



- ۱۵۳۶..... بررسی تأثیر ویژگی زمین‌شناسی در تحلیل فراوانی سیلاب منطقه‌ای حوضه‌های آبریز شمال شرق ایران
طیبه طاهرپور- بیژن قهرمان- کامران داوری
- ۱۵۳۸..... تعیین ارتفاع فیلتر قایم در سدهای غیرهمگن با هسته رسی قایم
سعید صالحی- کاظم اسماعیلی
- ارزیابی تبخیر- تعرق ذرت و اجزای آن و ارتباط آنها با شاخص سطح برگ در سیستم آبیاری قطره‌ای
سطحی و زیرسطحی
حسین دهقانی سانج- الهه کنانی- سمیرا اخوان
- ۱۵۴۹..... پیش‌بینی جریان رودخانه کشکان با استفاده از ترکیب روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، آنالیز موجک و K-
نزدیک‌ترین همسایه
داریوش یاراحمدی- حمید میرهاشمی
- ۱۵۵۷..... عدم قطعیت روش‌های ریزمقیاس نمایی در تخمین جریان آبی حوضه آبریز قره‌سو تحت اثر تغییر اقلیم
محمدرضا گودرزی- علیرضا فرجی- مهدی کماسی
- ۱۵۸۷..... تحلیل پایداری کمی سامانه‌ای آبخوان (مطالعه موردی: خراسان جنوبی- آبخوان بیرجند)
حمید کاردان مقدم- محمد ابراهیم بنی حبیب- سامان جوادی
- ۱۶۰۲..... تأثیر کاربری اراضی بر جمعیت میکروبی خاک و تغییرپذیری مکانی آنها در اراضی میرآباد، نقره
شیدا کیودی- فرزین شهبازی- ناصر علی اصغرزاد- نصرت‌اله نجفی- ناصر دوانگر
- ۱۶۱۱..... اثر ماده آلی بر توزیع شکل‌های شیمیایی کادمیم در خاک در محیط ریشه ذرت
فائزه لطفی- امیر فتوت- رضا خراسانی- مهدی بحرینی طوحان
- اثر متقابل شوری و آلودگی کادمیم بر کادمیم قابل جذب، تنفس و زیست‌توده میکروبی در یک خاک آهکی
تیمار شده با بقایای گیاهی
۱۶۲۳..... الهام صادقی- فایز رئیسی- علیرضا حسین پور
- افزایش عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان با مصرف تلفیقی فسفر و لجن فاضلاب در شرایط آبیاری مطلوب
و محدود
۱۶۳۷..... سولماز کاظم علیلو- نصرت‌اله نجفی- عادل ریحانی تبار
- مقایسه کارایی دو سامانه‌ی رده‌بندی آمریکایی و جهانی خاک در بیان آلودگی‌های زیست‌محیطی
(مطالعه موردی: منطقه لنجان اصفهان)
۱۶۵۱..... رضا مهاجر- محمدحسن صالحی
- شبیه‌سازی اثر کود نیتروژن بر تولید ذرت (Zea maize) توسط مدل CERES-Maize تحت شرایط اقلیمی
کرماتشاه
۱۶۶۵..... فرزاد مندنی
- اثر مالچ پلی اتیلن شفاف بر تولید و کارایی مصرف آب در کدوی تخم کاغذی (Cucurbita pepo) تحت
سطوح مختلف رطوبتی
۱۶۷۹..... مرجان نکونخو- سیف‌اله فلاح- رحیم برزگر
- بررسی فرآیند معدنی شدن نیتروژن آلی تحت تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبادل
فاطمه رخش- احمد گلچین

Contents

- Effect of Geological Feature on Regional Flood Frequency of Watersheds of North-East of Iran..... 1537
T. Taherpour- B. Ghahraman- K. Davary
- Determine the Height of the Vertical Filter for Inhomogeneous Dams with Vertical Clay Core 1548
S. Salehi - K. Esmaili
- Evaluation of Corn Evapotranspiration and its Components and Relationship between Leaf Area Index and Components in Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems..... 1548
H. Dehghanisanij – E. Kanani – S. Akhavan
- Forecasting Kashkan River Flow using a Combination of Artificial Neural Network, Wavelet Analysis and K - Nearest Neighbor 1574
D. Yarahmadi - H. Mirhashemi
- Uncertainty of Downscaling Methods in Future Catchment Flow under Climate Change Effect 1586
M.R. Goodarzi - A.R. Faraji - M. Komasi
- Quantitative Sustainability Analysis of Aquifer System (Case Study: South Khorasan- Birjand Aquifer)..... 1601
H. Kardan Moghaddam - M. E. Banihabib - S. Javadi
- Effect of Land Uses on Soil Microbial Community and Spatial Variability in Mirabad Lands, Naghadeh 1610
Sh. Kaboudi - F. Shahbazi- N. Aliasgharzad- N. Najafi- N. Davatgar
- Effect of Organic Matter on Distribution of Chemical Forms of Cadmium in Soil in Corn Rhizosphere 1622
F. Lotfi - A. Fotovat - R. Khorassani- M. Bahreini Touhan
- Interactive Effects of Salinity and Cadmium Pollution on Microbial Respiration and Biomass in a Calcareous Soil Treated with Plant Residue 1636
E. Sadeghi - F. Raiesi- A. Hossienpur
- Increasing the Yield and Yield Components of Sunflower by Integrated Application of Phosphorus and Sewage Sludge under Optimum and Limited Irrigation Conditions 1650
S. Kazemalilou - N. Najafi - A. Reyhanitabar
- American Soil Taxonomy Compared to World Reference Base for Expressing Environmental Pollution, a Case Study: Lenjanat Region of Isfahan..... 1664
R. Mohajer - M.H. Salehi
- Simulation of Nitrogen Fertilizer Effect on Maize (Zea maize) Production by CERES-Maize Model under Kermanshah Climate Condition 1678
F. Mondani
- Effect of Transparent Poly Ethylene Mulch on Production and Water Use Efficiency of Hull-Less Seed Pumpkin (Cucurbita pepo L.) under Different Levels of Moisture..... 1690
M. Nekookhoo - S. Fallah- R. Barzegar
- Investigation of Mineralization of Organic Nitrogen under the Influence of Type, Content of Clay and Exchangeable Cations 1711
F. Rakhsh - A. Golchin

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه 21/2015 مورخه 1368/4/11 و درجه علمی - پژوهشی شماره 26524 تاریخ 1373/10/19 از

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد 31 شماره 6 بهمن - اسفند سال 1396

صاحب امتیاز:

دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولی زاده

سر دبیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

آستارائی، علیرضا

دانشیار - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

اوستان، شاهین

دانشیار - علوم خاک (دانشگاه تبریز)

ثنائی نژاد، سید حسین

دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

خرمالی، فرهاد

استاد - علوم خاک (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)

علیزاده، امین

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

فتوت، امیر

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

قائمی، علی اصغر

دانشیار - آبیاری و زهکشی (دانشگاه شیراز)

کمالی، غلامعلی

دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران)

کیانی، علیرضا

استاد - آبیاری و زهکشی (مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گلستان)

لکزیان، امیر

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

مساعدی، ابوالفضل

استاد - آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

موسوی بایگی، محمد

استاد - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

مهدیان، محمد حسین

استاد - آبیاری و زهکشی (پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری)

ناشر: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

چاپ: چاپ و تکثیر نفیس

نشانی: دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده کشاورزی - ص. پ. 91775-1163 - دبیرخانه نشریات علمی - نشریه آب و خاک

نمابر: 0511-8787430

این نشریه در پایگاههای زیر نمایه شده است:

پایگاه استنادی علوم ایران (ISC) پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID) بانک اطلاعات نشریات کشور (MAGIRAN)

پست الکترونیکی: jswa3@um.ac.ir

مقاله های این شماره در سایت <http://jm.um.ac.ir> به صورت کامل نمایه شده است.

این نشریه به صورت دو ماهانه (شش شماره در سال) منتشر می شود.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- ۱۵۲۶ بررسی تأثیر ویژگی زمین‌شناسی در تحلیل فراوانی سیلاب منطقه‌ای حوضه‌های آبریز شمال شرق ایران
طیبه طاهرپور- بیژن قهرمان- کامران داوری
- ۱۵۳۸ تعیین ارتفاع فیلتر قایم در سدهای غیرهمگن با هسته‌ی رسی قایم
سعید صالحی- کاظم اسماعیلی
- ۱۵۴۹ ارزیابی تبخیر- ترق ذرت و اجزای آن و ارتباط آنها با شاخص سطح برگ در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی
حسین دهقانی سانج- الهه کنعانی- سمیرا اخوان
- ۱۵۶۱ پیش‌بینی جریان رودخانه کشکان با استفاده از ترکیب روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، آنالیز موجک و K- نزدیک‌ترین همسایه
داریوش یاراحمدی- حمید میرهاشمی
- ۱۵۵۷ عدم قطعیت روش‌های ریزمقیاس‌نمایی در تخمین جریان آبی حوضه آبریز قره‌سو تحت اثر تغییر اقلیم
محمدرضا گودرزی- علیرضا فرجی- مهدی کماسی
- ۱۵۸۷ تحلیل پایداری کمی سامانه‌ی آبخوان (مطالعه موردی: خراسان جنوبی- آبخوان بیرجند)
حمید کاردان مقدم- محمد ابراهیم بنی حبیب- سامان جوادی
- ۱۶۰۲ تأثیر کاربری اراضی بر جمعیت میکروبی خاک و تغییرپذیری مکانی آنها در اراضی میرآباد، ننده
شیدا کیودی- فرزین شهبازی- ناصر علی‌اصغرزاد- نصرت‌اله نجفی- ناصر دواتگر
- ۱۶۱۱ اثر ماده آلی بر توزیع شکل‌های شیمیایی کادمیم در خاک در محیط ریشه ذرت
فائزه لطفی- امیر فتوت- رضا خراسانی- مهدی بحرینی طوحان
- ۱۶۲۳ اثر متقابل شوری و آلودگی کادمیم بر کادمیم قابل جذب، تنفس و زیست‌توده میکروبی در یک خاک آهکی تیمار شده با بقایای گیاهی
الهام صادقی- فایز رئیسی- علیرضا حسین پور
- ۱۶۳۷ افزایش عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان با مصرف تلفیقی فسفر و لجن فاضلاب در شرایط آبیاری مطلوب و محدود
سولماز کاظم علیلو- نصرت‌اله نجفی- عادل ریحانی تبار
- ۱۶۵۱ مقایسه کارایی دو سامانه‌ی رده‌بندی آمریکایی و جهانی خاک در بیان آلودگی‌های زیست‌محیطی (مطالعه موردی: منطقه لنجانان اصفهان)
رضا مهاجر- محمدحسن صالحی
- ۱۶۶۵ شبیه‌سازی اثر کود نیتروژن بر تولید ذرت (*Zea mize*) توسط مدل CERES-Maize تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه
فرزاد مندنی
- ۱۶۷۹ اثر مالچ پلی اتیلن شفاف بر تولید و کارایی مصرف آب در کدوی تخم کاغذی (*Cucurbita pepo*) تحت سطوح مختلف رطوبتی
مرجان نکوخو- سیف‌اله فلاح- رحیم برزگر
- ۱۶۹۱ بررسی فرآیند معدنی شدن نیتروژن آلی تحت تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی
فاطمه رخس- احمد گلچین
- ۱۷۱۲ شناسایی مولکولی و تعیین خصوصیات محرک رشدی سویه‌های باکتری جدا شده از ریزوسفر گندم
ویدا همتی- هادی اسدی رحمانی- شکوفه رضایی

۱۷۲۴

رابطه خاک با اقلیم و سطوح ژئومورفیک در منطقه راین استان کرمان

لیلی نژادزمانی - محمد هادی فرپور - اعظم جعفری

۱۷۴۰

بررسی رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی از برخی کانی‌های پتاسیم‌دار توسط عصاره‌گیرهای مختلف

ساناز اشرفی سعیدلو - میر حسن رسولی صدقیانی - عباس صمدی - محسن برین - ابراهیم سپهر



بررسی تأثیر ویژگی زمین‌شناسی در تحلیل فراوانی سیلاب منطقه‌ای حوضه‌های آبریز شمال شرق ایران

طیبه طاهرپور^۱ - بیژن قهرمان^{۲*} - کامران داوری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۰۸

چکیده

تحلیل فراوانی منطقه‌ای سیلاب، نیازمند شناسایی حوضه‌های مشابه از نظر مکانیزم تولید سیلاب می‌باشد. تشابه حوضه‌ها در تولید سیلاب تابع عواملی نظیر ویژگی‌های فیزیوگرافی و هواشناسی حوضه، موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی می‌باشد. در این مطالعه به منظور تعیین اثر شاخص زمین‌شناسی در تعیین مناطق همگن هیدرولوژیکی، ۷۳ ایستگاه آب‌سنجی واقع در شمال شرق ایران که دارای اقلیم خشک تا نیمه‌خشک است با میانگین طول دوره آماری ۲۹ سال، با در نظر گرفتن شاخص زمین‌شناسی و نیز بدون در نظر گرفتن این شاخص با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی C-میانگین فازی به ۶ ناحیه‌ی همگن تقسیم شدند. جهت تعیین تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها از سه شاخص صحت‌سنجی خوشه‌بندی فازی وون، ژی-بنی و فوکویاما-سوگنو استفاده شد. نواحی حاصل از دو روش با استفاده از آماره‌های همگنی برپایه‌ی گشتاورهای خطی همگن تشخیص داده شد. توابع توزیع ناحیه‌ها با استفاده از آزمون‌های نیکوئی برازش Z و کولموگروف-اسمیرنوف انتخاب شدند. با مقایسه توزیع ایستگاه‌ها و همچنین دو آماره ارزیابی میانه خطای نسبی و نسبت دبی پیش‌بینی شده به دبی برآورد شده به ازاء ۵ دوره بازگشت مختلف (۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال)، هر دو روش تحلیل، نتایجی قابل قبول داشته و اضافه کردن شاخص زمین‌شناسی منجر به بهبود نتایج گردید. با در نظر گرفتن ویژگی زمین‌شناسی در ناحیه‌بندی حوضه‌ها، علاوه بر توابع توزیع برتر، تابع توزیع لوگ نرمال سه پارامتری برای تمامی نواحی مناسب تشخیص داده شد، که از این نقطه نظر استفاده از ویژگی زمین‌شناسی مناسب بود.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خوشه‌ای فازی، سیلاب نمایه، حوضه‌های آبریز فاقد آمار، شاخص نفوذ

مقدمه

(۳۰). تحلیل فراوانی سیلاب منطقه‌ای با روش‌های زیادی در بسیاری از کشورهای مختلف جهان بکار رفته که یکی از روش‌های بسیار رایج، روش سیلاب نمایه است. از جمله کاربردهای این روش در نقاط مختلف جهان می‌توان به مطالعات دال‌ریمپل (۴)، هاسکینگ و والیس (۱۲)، سف (۲۵ و ۲۶)، دس و کیونین (۵)، سوین‌سن و همکاران (۲۸)، زمان (۳۰) و کومار (۱۶) اشاره کرد.

گام نخست در تحلیل فراوانی منطقه‌ای، تعیین نواحی همگن هیدرولوژیکی می‌باشد. برای رسیدن به این هدف می‌بایست ایستگاه‌ها را به گروه‌هایی جدا از هم تقسیم‌بندی نمود. باتوجه به پژوهش‌های انجام شده برای تعیین منطقه‌های همگن، می‌توان از معیارها و روش‌های مختلفی استفاده نمود. تحلیل خوشه‌ای، به عنوان نوعی تحلیل چند متغیره، ابزاری آماری است که در آن داده‌ها و مشاهدات بر اساس متغیرهای تعیین شده توسط محقق طبقه‌بندی می‌شوند. روش‌های تفکیکی به دو بخش خوشه‌بندی سخت (مثلاً K-میانگین، گوئل (۸)) و خوشه‌بندی فازی (مثلاً C-میانگین، جین‌گی و هال (۱۴)) تقسیم می‌شوند. در خوشه‌بندی سخت، هر داده به یک و

تخمین دبی سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب مانند مطالعات زیست‌محیطی رودخانه، سازه‌های هیدرولیکی، ذخیره سیلاب و مدیریت دشت سیلابی از اهمیت به سزایی برخوردار است. تحلیل فراوانی نقطه‌ای سیل مستقیم‌ترین روش برآورد دبی طراحی است که نیازمند دوره طولانی مدت از داده‌های جریان رودخانه می‌باشد. با این حال در بسیاری از موارد در محل مورد نظر داده‌های ثبت شده جریان محدود بوده یا به‌طور کامل وجود ندارد. در این شرایط جهت برآورد دبی طراحی از تحلیل فراوانی سیلاب منطقه‌ای استفاده می‌شود که در آن ویژگی‌های جریان از حوضه‌های دارای آمار جریان به حوضه‌های فاقد آمار انتقال می‌یابد

۱ و ۲ و ۳- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد منابع آب و استادان گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(Email: bijangh@um.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

DOI: 10.22067/jsw.v31i6.28972

نحوه کاربری، که در سال‌های مختلف متفاوت می‌باشد، بستگی داشته و در کل، نااطمینانی‌های زیادی برای تعیین آن وجود دارد.

برای یافتن نمایه‌ای مناسب، در مطالعه حاضر برای در نظر گرفتن نقش زمین‌شناسی، به شاخصی از نفوذپذیری حوضه که به طور معکوس بر روی شدت سیل‌خیزی حوضه تأثیر دارد، توجه شد. تأثیر جنس زمین در واحدهای هیدرولوژیک یکسان نمی‌باشد. وجود درز و شکاف در زمین‌های آهکی یا کارستی که خود سبب نفوذ آب به درون زمین می‌شود، از شدت سیلاب‌ها کاسته و آن را تعدیل می‌کند این در حالی است که در زمین‌های ماری و رسی عکس آن است. بنابراین با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و توجه به لیتولوژی سنگ‌ها، اقدام به برآورد وضعیت نفوذپذیری حوزه‌ها گردید.

از جمله مطالعاتی که در منطقه شمال شرق کشور صورت گرفته است می‌توان به مطالعات شامکوئیان و همکاران (۲۷) اشاره کرد که در آن با انتخاب چهار متغیر مساحت، طول بلندترین آبراهه، طول عرض جغرافیایی مرکز ثقل حوضه، جهت ناحیه‌ای کردن حوضه‌های آبریز استان‌های خراسان از روش‌های تحلیل حوضه‌ای کلاسیک استفاده و ۷ ناحیه همگن حاصل شد. موشخیان و همکاران (۱۹) نیز جهت توسعه‌ی مدل‌های منطقه‌ای برآورد سیلاب در حوضه‌های آبریز استان خراسان رضوی از تحلیل حوضه‌ای سلسله‌مراتبی وارد استفاده کردند. در مطالعات صورت گرفته در منطقه تنها از روش کلاسیک برای خوشه‌بندی استفاده شده و همچنین ویژگی زمین‌شناسی به عنوان عاملی مؤثر در تحلیل خوشه‌ای لحاظ نشده است. هدف از این مطالعه، تعیین مناطق همگن هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز شمال شرق کشور با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی C- میانگین فازی و همچنین ارزیابی میزان تأثیر استفاده از شاخص زمین‌شناسی در تحلیل فراوانی سیلاب منطقه‌ای می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد بررسی و داده‌ها

منطقه‌ی مورد بررسی شامل زیرحوضه‌های سه حوضه آبریز اصلی کشور، اترک، کشف‌رود (قره‌قوم) و کال‌شور، واقع در استان‌های خراسان شمالی و رضوی می‌باشد. از ۷۳ ایستگاه آب‌سنجی واقع در این حوضه‌ها با حداقل طول دوره آماری ۵ سال (در ایستگاه ازغند) و حداکثر طول دوره آماری ۴۶ سال (در ایستگاه آق‌دریبد) استفاده شد. میانگین طول دوره‌ی آماری ایستگاه‌ها ۲۷ سال بوده و طول دوره‌ی آماری مختوم به سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ می‌باشد. طول دوره‌ی آماری تنها در ۱۵ درصد ایستگاه‌ها کم‌تر از ۱۵ سال بود. جهت تحلیل خوشه‌ای از ویژگی‌های متداول فیزیوگرافی حوضه‌ها شامل مساحت، شیب، ارتفاع متوسط، طول و عرض مرکز ثقل حوضه، طول آبراهه‌ی اصلی و همچنین ویژگی زمین‌شناسی حوضه استفاده شد. برای در

تنها یک خوشه نسبت داده می‌شود، در حالی که در خوشه‌بندی فازی، تفکیک فازی صورت می‌گیرد. در شرایط واقعی، خوشه‌بندی فازی بسیار طبیعی‌تر از خوشه‌بندی سخت است، چون داده‌های موجود در مرز خوشه‌های مختلف مجبور به تعلق کامل به یکی از خوشه‌ها نبوده و با درجه تعلق بین صفر تا یک که نشان دهنده تعلق نسبی آن‌ها است تفکیک می‌شوند. عضویت جهت شناسایی حوضه‌های واقع شده در محدوده همپوشانی ناحیه‌ها، آگاهی از این توزیع مفید است. بنابراین خوشه‌بندی فازی اطلاعات بیش‌تری در مورد ساختار داده‌ها نسبت به خوشه‌بندی سخت فراهم کرده و جهت تحلیل فراوانی سیل مناسب‌تر است (۲۲).

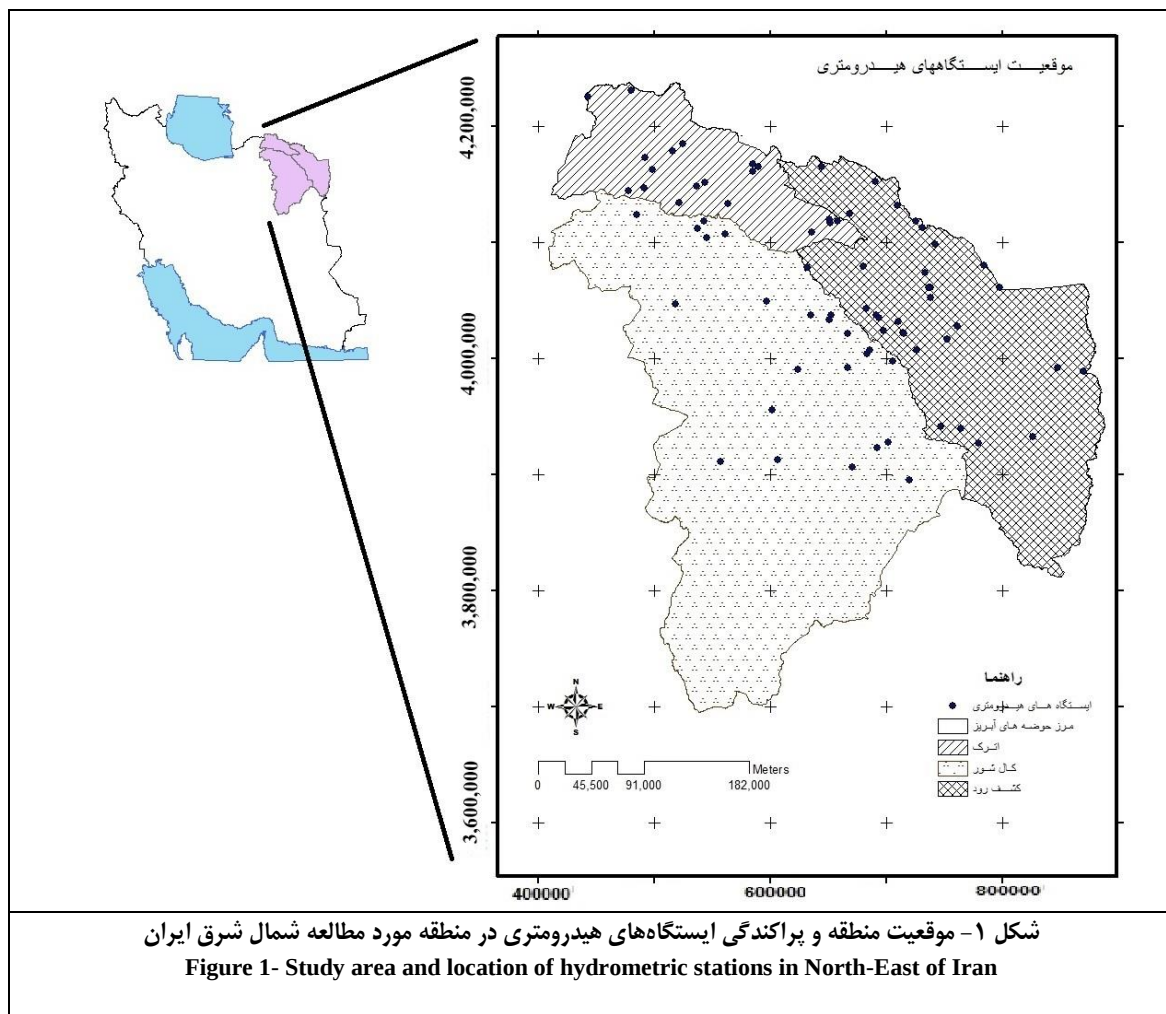
مطالعات انجام شده از جمله: هال و مینس (۱۰)، جین‌گی و هال (۱۴)، راثو و سری‌نیواس (۲۲)، نشان داده که جهت حاصل شدن خوشه‌بندی با کیفیت بالا استفاده از تابع خوشه‌بندی فازی ضروری بوده و ناحیه‌های حاصل از خوشه‌بندی فازی همگنی فیزیکی بهتری را نسبت به خوشه‌بندی کلاسیک دارند.

به علت پیچیدگی در اطلاع دقیق عوامل مؤثر در تولید سیل، رهنمود مشخصی جهت شناسایی نواحی همگن وجود ندارد. لذا اولین مسئله مشترک در همه روش‌های ناحیه‌ای کردن، انتخاب متغیرهای خوشه‌بندی است (۱۸). برای مشخص کردن نواحی همگن حوضه‌های آبریز، از دو گروه متغیر (الف) آماره‌های ایستگاهی و (ب) ویژگی‌های ایستگاهی استفاده می‌شود. به عنوان مثال در نیوزیلند، موس‌لی (۲۰) به کمک تحلیل خوشه‌ای و با استفاده از آمار دبی متوسط سالانه و ضریب تغییرات حوضه‌ها، به گروه‌بندی مناطق مذکور پرداخت. عطایی و شیران (۲) جهت ناحیه‌ای کردن حوضه‌های آبریز دشت کرون از چهار گروه متغیر ژئومورفولوژی حوضه (شاخص‌های تراکم آبراهه‌ها، ژئومتری حوضه، متغیرهای ارتفاعی و اقلیمی حوضه)، استفاده کردند. جریان سیل بطور عمده ناشی از رواناب سطحی می‌باشد که حاصل مقدار و خصوصیات بارش و خصوصیات حوضه آبریز آن است. بزرگی سیلاب رودخانه‌ها وابستگی مستقیم به جنس و نفوذپذیری زمین دارد. از این رو، الوانکار (۱) نشان داد علاوه بر مساحت، ارتفاع متوسط و شاخص پوشش گیاهی حوضه‌های آبریز، اطلاعات دیجیتالی ماهواره لندست که به جنس زمین وابسته بوده و بیانگر نفوذپذیری زمین می‌باشد نیز در بزرگی سیلاب حوضه‌های تأثیر فراوانی دارد. مشکل استفاده از تصاویر ماهواره‌ای این است که این تصاویر در دسترس نبوده و فن‌آوری آن هنوز همگانی نشده و برای انتخاب تصاویر مناسب و قابل اطمینان مشکلات فراوانی وجود دارد. میشر و همکاران (۱۸) جهت ناحیه‌ای کردن حوضه‌های آبریز نپال از شماره منحنی رواناب (CN) که تابع نوع خاک از لحاظ نفوذپذیری، پوشش سطح حوضه و شیب حوضه می‌باشد، به عنوان روشی مؤثر در ناحیه‌ای کردن استفاده کرد. اما شماره منحنی به نوع کاربری بستگی داشته که خود عاملی پویا بوده و به فصل سال و

منطقه و پراکندگی ایستگاه‌های هیدرومتری در سه حوضه آورده شده است.

جهت پرهیز از تأثیر واحدهای اندازه‌گیری و عدم وابستگی به آن‌ها، داده‌های استخراج شده استاندارد می‌شوند. در این صورت، متغیرها تأثیر غیرمتجانسی بر اندازه‌گیری فاصله نخواهند داشت. از متداول‌ترین روش‌های استاندارد کردن داده‌ها، روش نرمال‌سازی (کسر کردن مقدار متغیر تصادفی از میانگین داده‌ها و سپس تقسیم آن به انحراف استاندارد داده‌ها) است.

نظر گرفتن نقش زمین‌شناسی، به شاخصی از نفوذپذیری حوضه توجه شد. این عامل به‌طور معکوس بر روی شدت سیل‌خیزی حوضه تأثیر دارد. با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی، اقدام به برآورد وضعیت نفوذپذیری حوزه‌ها گردید. با توجه به لیتولوژی سنگ‌ها، نفوذپذیری به‌طور کیفی در ۹ دسته به صورت بسیار ناچیز، ناچیز، خیلی کم، کم، متوسط تا کم، متوسط، متوسط تا زیاد، زیاد و خیلی زیاد در نظر گرفته شد. به هر کدام از این دسته‌ها به ترتیب اعداد (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۲/۵، ۳، ۴، ۵) اختصاص داده شد. سپس میزان نفوذپذیری نسبی در حوزه‌ها توسط میانگین وزنی (نسبت به مساحت) محاسبه و تحت عنوان شاخص زمین‌شناسی حوضه لحاظ شد. در شکل (۱) موقعیت



$$J(U.V : X) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N (u_{ik})^m d^2(x_k, v_i) \quad (1)$$

که در آن، N تعداد نمونه و u_{ik} میزان تعلق نمونه i ام در خوشه k ام را نشان می‌دهد. m توان وزنی است که عددی حقیقی بزرگ‌تر از ۱

الگوریتم خوشه‌بندی فازی

کاربردترین الگوریتم خوشه‌بندی فازی، الگوریتم C-میانگین می‌باشد (۲). این الگوریتم بر اساس بهینه‌سازی تکراری تابع هدف فازی (رابطه‌ی ۱) می‌باشد.

هیدرولوژیکی همگن نیستند لذا جهت بهبود همگنی این ناحیه‌ها را باید تعدیل کرد. در تحلیل خوشه‌ای فازی آگاهی از توزیع عضویت یک حوضه در میان ناحیه‌های فازی در تعدیل ناحیه‌ها جهت بهبود همگنی آن‌ها مفید است (۲۲).

دو ابزار آماری مفید (اندازه‌ی ناهم‌نوایی برای مشخص کردن ایستگاه‌های ناهم‌هنگ در منطقه و اندازه‌ی ناهم‌هنگی جهت حصول اطمینان از همگن بودن مناطق) در تحلیل فراوانی سیلاب منطقه‌ای بر اساس گشتاورهای خطی وجود دارد (۱۲).

آزمون ناهمگنی تغییرات بین ایستگاهی گشتاورهای خطی نمونه برای گروهی از ایستگاه‌ها با مقدار مورد انتظار برای یک ناحیه همگن مقایسه می‌شود. عموماً سه آماره‌ی ناهمگنی H_1 برای بررسی ضریب تغییرات خطی (L_{CV})، آماره‌ی H_2 برای ترکیبی از ضریب تغییرات خطی و ضریب چولگی (L_{CS}) و آماره‌ی H_3 برای ترکیبی از ضریب چولگی خطی و ضریب کشیدگی خطی (L_{CK}) در بررسی تغییرپذیری سه آماره‌ی خطی مختلف به کار برده می‌شود. جزئیات بیشتر در هاسکینگ و والیس (۱۲ و ۱۳) آورده شده است.

برآورد دبی با استفاده از تحلیل فراوانی منطقه‌ای

در روش سیلاب‌نامه، گشتاورهای خطی جهت برآورد دبی با دوره بازگشت T سال $(Q_i(T))$ از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود.

$$Q_i(T) = \bar{Q}_i q(T), i = 1, \dots, N. \quad (5)$$

که در آن، $\bar{Q}_i$ سیلاب نمایه یا شاخص سیلاب بوده، که می‌تواند سیل میانگین در نظر گرفته شود. در مناطق فاقد آمار، میانگین مورد نظر قابل محاسبه نیست. در چنین شرایطی، رابطه‌ی همبستگی بین مقادیر میانگین دبی اوج لحظه‌ای سالانه مناطق دارای آمار و ویژگی‌های فیزیوگرافی و اقلیمی آن‌ها برقرار می‌شود.

$$\bar{Q}_i = \theta_0 + \sum_{j=1}^k \theta_j Z_j^{(i)} + u_i \quad (6)$$

در این رابطه، $\bar{Q}_i$ متوسط دبی اوج لحظه‌ای (سیلاب نمایه)، $Z_1^{(i)}, \dots, Z_k^{(i)}$ ویژگی‌های منتخب فیزیوگرافی و اقلیمی ایستگاه i ام، $\theta_j, j = 0, 1, \dots, k$ پارامترهای مدل و u_i پارامتر خطا می‌باشد.

از آزمون نیکویی برازش Z (۱۳) و آزمون کولموگروف-اسمیرنوف جهت انتخاب بهترین تابع توزیع استفاده گردید.

آماره‌های ارزیابی

جهت ارزیابی کلی دو روش تحلیل منطقه‌ای یک روش صحت‌سنجی به کار رفته است. در این روش یک ایستگاه را انتخاب و سپس با استفاده از روابط تحلیل منطقه‌ای (سیلاب نمایه و منحنی رشد

است. زمانی که $m = \infty$ باشد، داده‌ها تمایل دارند عضویت برابر در همه خوشه‌ها داشته باشند (۲۲). محدوده‌ی کلی m توسط راس (۲۴) در بازه $[2 - 1/25]$ و توسط پال و بزدک (۲۱) در بازه‌ی $[2/5 - 1/5]$ پیشنهاد شده است. X_k نمونه k ام است و v_i نماینده یا مرکز خوشه i ام است. $d^2(X_k, v_i)$ میزان تشابه (فاصله) نمونه k -ام با (از) مرکز خوشه i -ام می‌باشد که می‌توان از هر تابعی (مثلاً اقلیدسی) که بیانگر تشابه نمونه و مرکز خوشه باشد را استفاده کرد. توضیحات بیشتر در کوره پزان دزفولی (۱۵) و هاسکینگ و والیس (۲۲) آورده شده است. خوشه‌های فازی به وسیله‌ی اختصاص ایستگاه‌هایی که عضویت آن‌ها در خوشه از مقدار آستانه‌ای تجاوز کند تشکیل می‌شود. به‌طور کلی انتخاب مقدار آستانه برای ایجاد خوشه‌های فازی با قضاوت شخصی انجام می‌شود. در فازی‌ترین افراز، عضویت داده‌ها به تمامی خوشه‌ها مساوی $1/c$ است (۲۲).

یکی از مهم‌ترین مسایل در خوشه‌بندی، انتخاب تعداد خوشه‌های مناسب (حداکثر فشردگی خوشه‌ها و حداکثر جدایی بین آن‌ها) می‌باشد. برای مشخص کردن تعداد درست خوشه‌ها، ۳ تابع به صورت شاخص فوکویاما-سوگو (۷) (رابطه‌ی ۲)، ژی-بنی (۲۹) (رابطه‌ی ۳) و وون (۱۷) (رابطه‌ی ۴) در منابع وجود دارد که می‌توان با استفاده از آن‌ها تعداد خوشه‌ها را مشخص کرد.

$$V_{FS,m}(U, V; X) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N u_{ik}^m (\|x_k - v_i\|^2 - \|v_i - \bar{v}\|_A^2) \quad (2)$$

$$V_{XB}(U; V; X) = \frac{c \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N u_{ik}^m \|x_k - v_i\|^2}{n(\min\{v_i - v_j\})} \quad (3)$$

$$V_K(U, X) = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N (u_{ik})^m \|v_i - x_k\|^2 + \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \|v_i - \bar{v}\|}{\min_{i \neq k} \|v_i - v_k\|^2} \quad (4)$$

در رابطه‌ی ۲، $\bar{v}$ میانگین کل نمونه‌ها است. جمله‌ی اول در تابع فوق معیاری برای فشردگی خوشه‌ها و جمله‌ی دوم معیاری برای جدایی خوشه‌ها از هم می‌باشد. بنابراین حداقل کردن تابع فوق معیار مناسبی برای ارزیابی خوشه‌بندی و تعداد خوشه‌ها می‌باشد. لذا کم‌ترین مقدار برای V_{FS} بیانگر بهترین افراز بوده که هم ارز خوشه‌های متراکم و دور از هم خواهد بود (۲۲).

هدف شاخص ژی و بنی، به کمیت درآوردن نسبت مجموع واریانس درون خوشه‌ها و میزان جداسازی خوشه‌ها است. انتخاب تعداد خوشه‌های مناسب با حداقل کردن رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید. مقدار شاخص ژی-بنی به‌طور یکنواخت با افزایش تعداد خوشه‌ها کاهش می‌یابد (۲۲). جهت حل این مسئله، وون (۱۷) شاخص جدیدی را ارائه داد (رابطه ۴).

آزمون‌های گشتاورهای خطی

ناحیه‌های حاصل از الگوریتم‌های خوشه‌بندی به‌طور کلی از لحاظ

نظر از مقدار آستانه‌ای مدنظر بیش‌تر بود به ناحیه‌ی مربوطه تعلق یافت. ناحیه‌های حاصل از روش اول (با درنظر گرفتن شاخص زمین شناسی) و روش دوم (بدون درنظر گرفتن شاخص زمین‌شناسی) در جدول (۲) ارایه شده است. همان‌گونه که از این دو جدول پیداست، نواحی A و A' و نیز ناحیه‌های C و C' کاملاً مشابه بوده ولی ایستگاه‌های تعلق یافته به ۴ ناحیه‌ی باقی‌مانده در دو روش به مقدار جزئی متفاوت می‌باشند. حوضه‌های تعلق یافته به ناحیه A شامل حوضه‌های آبریزی است که از لحاظ مساحت بسیار کوچک‌اند، درحالی‌که حوضه‌های تعلق یافته به ناحیه‌ی C شامل حوضه‌های بسیار بزرگی است که از لحاظ مساحت با سایر حوضه‌های ناحیه همخوانی ندارند بنابراین در هردو روش، این ۵ حوضه در یک دسته‌ی واحد واقع شده‌اند. همان‌گونه که از جدول (۲) پیداست اندازه‌ی ناحیه‌ها (تعداد ایستگاه‌های واقع شده در ناحیه) در روش دوم که از شاخص زمین‌شناسی در دسته‌بندی ایستگاه‌ها استفاده نشده بزرگتر است که این خود بیانگر همپوشانی بیشتر ناحیه‌ها می‌باشد.

آزمون‌های گشتاورهای خطی

آماره‌ی ناهم‌نوابی برای همه‌ی ایستگاه‌ها محاسبه گردید. برپایه‌ی نتایج، ایستگاه ازغند (که دارای کمترین طول دوره آماری، ۵ سال، می‌باشد) ناهم‌نوا بوده و از مجموعه ایستگاه‌ها حذف شد. در مطالعه‌ی شامکوتیان و همکاران (۲۷) نیز ایستگاهی که از طول دوره‌ی آماری کوتاه‌تری (۱۰ سال) نسبت به سایر ایستگاه‌ها برخوردار بود، ناهم‌نوا گزارش شده است.

نتایج آزمون همگنی (جدول ۴)، حاکی از این است که تمام نواحی حاصل از روش اول (با درنظر گرفتن شاخص زمین‌شناسی) همگن است، هم‌چنین تمام نواحی حاصل از روش دوم (بدون درنظر گرفتن شاخص زمین‌شناسی) بجز ناحیه B' که نسبتاً همگن است نیز همگن می‌باشند لذا جهت تحلیل فراوانی سیلاب مناسب می‌باشند.

روابط چندک بی‌بعد ناحیه‌ای

جهت تعیین توابع توزیعی که بهترین برازش را با داده‌های هر یک از نواحی مذکور دارند، از آزمون‌های نیکوئی برازش Z و کولموگروف-اسمیرنوف به‌طور توأم استفاده شد. در جدول (۴) توابع توزیع منتخب هر ناحیه و نیز پارامترهای آن‌ها ارائه شده است. در مطالعه‌ی شامکوتیان و همکاران (۲۷) علاوه بر توابع انتخابی در هر ناحیه به عنوان بهترین حالت ممکن، تابع توزیع مقادیر حدی تعمیم یافته نیز برای تمامی نواحی در سطح $\alpha=0/2$ معنی‌دار بود. در این مطالعه در روش اول (درنظر گرفتن شاخص زمین‌شناسی) تابع توزیع لوگ نرمال سه پارامتری برای تمامی نواحی در سطح $\alpha=0/2$ ، معنی‌دار است ولی برای نواحی حاصل از روش دوم (بدون در نظر گرفتن

ناحیه‌ای) مقدار سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف برای ایستگاه مورد نظر محاسبه شده و مقدار خطا محاسبه می‌شود و این رویه برای تمام ایستگاه‌ها تکرار می‌شود. میزان کارایی روش تحلیل منطقه‌ای توسط میانه خطای نسبی (RE) ارزیابی می‌شود.

$$RE(\%) = \text{median}_{i=1}^n \left[\text{abs} \left(\frac{Q_{pred,i} - Q_{obs,i}}{Q_{obs,i}} \right) \right] \times 100 \quad (7)$$

$Q_{obs,i}$ مقدار سیلاب حاصل از تحلیل فراوانی نقطه‌ای است و $Q_{pred,i}$ دبی محاسباتی با استفاده از روابط منطقه‌ای (روابط ۵ و ۶) و n تعداد ایستگاه‌های موجود در ناحیه می‌باشد. آماره‌ی ارزیابی دیگر، مقدار $\frac{Q_{pred,i}}{Q_{obs,i}}$ که اگر این مقدار به‌طور قراردادی در بازه‌ی ۰/۵-۲ باشد مناسب است و برای مقادیر کم‌تر از ۰/۵ و بیش‌تر از ۲، به‌ترتیب برآورد خیلی کم و خیلی زیاد، روابط منطقه‌ای مفید وجود خواهد داشت (۳۰).

نتایج و بحث

در این مطالعه جهت ارزیابی میزان تأثیر استفاده از شاخص زمین‌شناسی در تحلیل فراوانی سیلاب منطقه‌ای مراحل تحقیق طی دو روش اجرا شد:

روش اول: تحلیل فراوانی سیلاب منطقه‌ای با درنظر گرفتن شاخص زمین‌شناسی
روش دوم: تحلیل فراوانی سیلاب منطقه‌ای بدون درنظر گرفتن شاخص زمین‌شناسی

نتایج تحلیل خوشه‌ای

پس از استاندارد کردن مشخصه‌های حوضه‌ها، با اجرای الگوریتم C-میانگین فازی به اِزاء مقادیر مختلف m (توان وزنی) با فواصل ۰/۱ و تغییر مقدار c (تعداد خوشه)، مقادیر سه شاخص فوکویاما-سوگونو (V_{FS})، ژی-بنی ($V_{XB,m}$) و وون (V_K) محاسبه شد. همان‌گونه که از جدول (۱) پیداست مقدار شاخص فوکویاما-سوگونو با افزایش تعداد خوشه‌ها به‌طور یکنواخت افزایش می‌یابد، بنابراین دراین‌جا کارایی لازم را ندارد. مقدار بهینه‌ی دو شاخص ژی-بنی و وون نشان می‌دهد که $c=9$ بهترین تعداد برای خوشه‌هاست، زمانی که $m=1/4-1/7$ و زمانی که $c=6$ ، $m=1/8-2/7$ بهترین تعداد خوشه‌ها می‌باشد. هم‌چنین به اِزاء مقادیر $m < 1/9$ مقدار دو شاخص به‌طور معنی‌دار افزایش می‌یابد، لذا تعداد ۶ خوشه با توان وزنی ۱/۹ که حداقل مقدار شاخص‌ها را به خود اختصاص داده است، به‌عنوان افراز بهینه، انتخاب می‌شود. جهت استخراج ناحیه‌های هیدرولوژیکی، با درنظر گرفتن مقدار آستانه‌ای ۱/۷، ایستگاه‌هایی که درجه عضویت آن‌ها به خوشه‌ی مورد

شاخص زمین‌شناسی) هیچ تابع توزیعی در تمامی نواحی، در هیچ سطح احتمالی ($\alpha=0/2, 0/1, 0/01, 0/05$) معنی‌دار نبود. استفاده از یک نوع تابع توزیع برای تمامی نواحی مورد مطالعه، می‌تواند کاربردی‌تر و مؤثرتر واقع شود، بنابراین در نظر گرفتن شاخص زمین‌شناسی از این نقطه نظر مناسب است.

جدول ۱- مقادیر سه شاخص صحت‌سنجی وون (V_K)، زی-بنی ($V_{XB,m}$) و فوکویاما-سوگنو (V_{FS}). C تعداد خوشه‌ها است
Table 1- Values of three validation criteria of Kwon (V_K), Xie and Beni ($V_{XB,m}$), and Fukuyama and Sugeno (V_{FS}). C is number of clusters

$V_{XB,M}$	V_{FS}	V_K	m	$V_{XB,M}$	V_{FS}	V_K	m	$V_{XB,M}$	V_{FS}	V_K	m	C
0.76	194	55.69		0.75	217	54.69		0.74	235	54.09		2
0.59	91.5	43.54		0.49	40.9	36.89		0.55	25	41.23		3
0.57	5.84	43.76		0.58	-28	44.21		0.48	-62	36.51		4
0.94	-57.44	74.82		0.51	-77	44.28		0.45	-123	34.28		5
0.35	-92	28.5	2	0.41	-116	32.52	1.7	0.51	-163	38.84	1.4	6
0.78	-107	65		0.45	-139	36.28		0.52	-188	37.41		7
0.88	-121	75		0.44	-168	30.9		0.44	-209	51.36		8
0.73	-127	61.8		0.36	-175	30.6		0.43	-236	32.51		9
0.51	-142	56.8		0.50	-209	42		0.38	-244	28.1		10
0.77	186	56.2		0.75	210	54.95		0.74	230	54.3		2
0.85	92.8	62.7		0.47	52.4	34.98		0.53	27.73	40		3
0.56	14.25	42.36		0.6	-18	45.5		0.51	-51.6	38.6		4
1.15	-53.8	93.7		0.54	-67.39	50.54		0.47	-108	36.1		5
0.37	-82.7	30.8	2.1	0.36	-107	29.1	1.8	0.48	-145	37.7	1.5	6
0.70	-99.7	60		0.43	-128	39.6		0.41	-165	40		7
0.72	-105	66.8		0.44	-149	34.6		0.45	-215	34.77		8
0.86	-112	73.8		0.54	-169	52.7		0.38	-240	34		9
1.47	-120	1376		0.45	-187	60.88		0.35	-253	44.9		10
0.77	178	56.77		0.75	202	55.28		0.74	224	54.48		2
1.15	90	84.63		0.44	68	32.53		0.51	32.78	38.5		3
0.54	20	41.28		0.59	-6	45.18		0.54	-40	41.46		4
1.33	-5.82	103.4		0.76	-61.24	60.04		0.49	-91	37.6		5
1.32	-72.52	200	2.2	0.34	-99.8	27.2	1.9	0.45	-127	35.35	1.6	6
595	-83.66	29817		0.81	-114	66.37		0.49	-149	38.45		7
2.4	-13.91	2966710		0.83	-130	54.69		0.44	-174	34.9		8
185	-96.92	155.67		0.75	-148	65.6		0.38	-213	30.4		9
114	-101	2119		0.46	-156	69.56		0.54	-236	44.4		10

جدول ۲- توزیع حوضه‌ها در نواحی. حروف انگلیسی ساده مربوط به در نظر گرفتن ویژگی زمین‌شناسی و حروف انگلیسی با علامت پریم، مربوط به در نظر نگرفتن شاخص زمین‌شناسی است

Table 2- Distribution of watersheds in regions. For plain English letters, geological feature is included, while for the other case (with prime) this feature is not included

ایستگاه‌های واقع در هر ناحیه Stations in the region	تعداد ایستگاه Number of stations	ناحیه Region
۱۱،۱۲،۱۳،۱۴،۲۸،۳۳،۳۴،۳۵،۳۷،۴۷،۴۸،۵۴،۶۹،۷۱	14	A و A'
۱،۳،۵،۱۶،۱۷،۳۲،۳۸،۳۹،۴۳،۴۵،۴۶،۴۹،۵۰،۵۱،۵۳،۶۰،۷۰	17	B
۱،۳،۵،۱۶،۱۷،۳۱،۳۲،۳۶،۳۸،۳۹،۴۳،۴۵،۴۶،۴۹،۵۰،۵۱،۵۳،۶۰،۷۰	19	B'
۱۵،۱۶،۴۳،۵۹،۶۳	5	C و C'
۴۶،۷۹،۱۹،۲۰،۲۱،۲۲،۲۳،۲۴،۴۰،۴۲،۵۷،۶۲،۶۳،۶۵،۶۶،۶۸،۷۲،۷۳	20	D
۲،۴،۶،۸،۹،۱۰،۲۰،۲۱،۲۲،۲۳،۲۴،۲۵،۳۹،۴۲،۴۴،۴۶،۴۷،۴۹،۵۲،۵۵،۵۶،۵۷،۵۸،۶۱،۶۶،۶۷،۶۸	27	D'
۱،۲،۳،۸،۱۰،۱۷،۲۵،۲۶،۲۷،۲۸،۲۹،۳۰،۳۱،۳۲،۳۶،۳۷،۳۹،۴۴،۴۷،۴۹،۵۱،۵۲،۵۴،۵۵،۵۷،۶۰،۶۷،۶۸،۷۰	29	E
۱،۲،۳،۵،۸،۹،۱۰،۱۳،۱۷،۲۵،۲۶،۲۷،۲۸،۲۹،۳۰،۳۱،۳۲،۳۶،۳۷،۳۹،۴۴،۴۷،۴۹،۵۴،۵۵،۶۰،۶۷،۶۸،۷۰،۷۱،۷۲	31	E'
۱۸،۱۹،۳۹،۴۰،۴۱،۴۲،۴۶،۵۲،۵۶،۵۷،۵۸،۶۱،۶۳،۶۴،۶۵	15	F
۷،۱۸،۱۹،۲۰،۴۰،۴۱،۴۲،۴۶،۶۱،۶۲،۶۳،۶۴،۶۵،۶۶،۷۲،۷۳	16	F'

جدول ۳- نتایج آزمون همگنی
Table 3- Results of homogeneity test

وضعیت همگنی Homogeneity	H_3	H_2	H_1	ناحیه Region	وضعیت همگنی Homogeneity	H_3	H_2	H_1	ناحیه Region
همگن	-0.492	-0.313	0.122	A'	همگن	-0.492	-0.313	0.122	A
نسبتاً همگن	-0.154	-0.255	-1.02	B'	همگن	-0.118	-0.075	-0.859	B
همگن	-0.123	-0.078	-0.912	C'	همگن	-0.123	-0.078	-0.912	C
همگن	-0.073	-0.061	-0.082	D'	همگن	-0.253	-0.442	-0.795	D
همگن	-0.193	-0.707	-0.505	E'	همگن	-0.425	-0.311	-0.72	E
همگن	-0.217	-0.417	-0.733	F'	همگن	-0.36	-0.254	-0.391	F

جدول ۴- توزیع‌های آماری تعیین شده برای نواحی با استفاده از آزمون‌های نکویی برازش
Table 4- Distribution functions for regions by using goodness of fit tests

Region ناحیه	Distribution function توزیع آماری انتخابی	ξ	α or μ	k or σ
A and A'	Three parameter log-Normal لوگ نرمال سه پارامتری	-0.008	-0.4664	0.9741
B	Generalized Pareto پارتو تعمیم یافته	-0.0028	0.8409	-0.1631
C and C'	Three parameter log-Normal لوگ نرمال سه پارامتری	-0.0872	-0.3299	0.9145
D	Three parameter log-Normal لوگ نرمال سه پارامتری	-0.0658	-0.4493	0.0129
E	Three parameter log-Normal لوگ نرمال سه پارامتری	-0.0629	-0.4397	1.001
F	Generalized Extreme Value	0.4025	-0.0338	-0.4694
B'	Three parameter log-Normal لوگ نرمال سه پارامتری	-0.1632	-0.2441	0.891
D'	Three parameter log-Normal لوگ نرمال سه پارامتری	-0.0316	-0.5169	0.9925
E'	Three parameter log-Normal لوگ نرمال سه پارامتری	-0.0931	-0.3517	0.9388
F'	Generalized Logistic لجستیک تعمیم یافته	0.0065	-0.3298	-0.5192

$$\text{Three parameter log-Normal } x(F) = \xi + \exp(\mu + \sigma \Phi^{-1}(F)),$$

$$\text{Generalized Extreme Value } x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \{1 - (-\log F)^k\},$$

$$\text{Generalized Logistic } x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} (1 - ((1 - F)/F)^k),$$

$$\text{Generalized Pareto } x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} [1 - (1 - F)^k]$$

تخمین متوسط دبی سیلاب لحظه‌ای (سیلاب‌نامه)

به منظور برآورد سیلاب‌نامه (رابطه ۶) برای هر یک از نواحی تحت مطالعه، ترکیبات مختلفی از متغیرها مستقل، در نظر گرفته شد و مدل لگاریتمی آن در هر ناحیه مورد بررسی و آزمون قرار گرفت، و در

نهایت مدلی با ویژگی‌های آماری مناسب‌تر (ضریب همبستگی بیشتر و متوسط خطای استاندارد کمتر) انتخاب شد. مدل لگاریتمی چهار متغیره با استفاده از مقادیر متوسط دبی سیلاب اوج لحظه‌ای بر حسب متر مکعب بر ثانیه (μ) به‌عنوان متغیر وابسته و سایر پارامترهای

ارائه شده است. مقدار ضریب همبستگی مدل در ناحیه F برابر ۰/۲۹ به‌دست آمد. جهت افزایش همبستگی در ناحیه‌ی مورد نظر و به منظور افزایش دقت برآورد سیلاب‌نمایه، ناحیه‌ی مورد نظر با ناحیه‌های دیگر (A, B, C, D, E)، دو به دو ترکیب شد. زمانی که از مجموع داده‌های این ناحیه و ناحیه E استفاده شد، مقدار ضریب همبستگی مدل بیشترین مقدار (۰/۵۵) را داشت که از این مدل برای برآورد سیلاب نمایه تنها در ناحیه‌ی F استفاده شد.

فیزیوگرافی همچون شیب متوسط (S)، ارتفاع متوسط برحسب متر (H)، مساحت برحسب متر مربع (A) و طول بلندترین آبراهه برحسب متر به‌عنوان متغیرهای مستقل حوضه‌های آبریز در هر ناحیه استخراج شد. شکل کلی این روابط به صورت زیر است:

$$\text{Log}(\mu) = \theta_0 + \theta_1 \text{Log}(H) + \theta_2 \text{Log}(A) + \theta_3 \text{Log}(S) + \theta_4 \text{Log}(L) \quad (8)$$

در جدول (۵) ضرائب مدل لگاریتمی پیشنهادی و مقادیر متوسط خطای استاندارد (MSE) و آماره‌ی R مربع برای هر یک از نواحی

جدول ۵- ضرائب مدل لگاریتمی چهار متغیره پیشنهادی رابطه (۸) برای هر یک از نواحی
Table 5- Coefficients of 4-parameters logarithmic model (Eq. 8) for all regions

R ²	MSE	θ_0	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	Region ناحیه
0.7	0.27	-19	2.76	1.55	-1/2	-2	A
0.67	0.17	17.5	-2	0.71	-0.5	-1.1	B
1	0	-25	2.14	-1.2	3.31	1.12	C
0.54	0.39	3.68	-0.8	0.72	-0.1	-0.7	D
0.61	0.2	5.62	-1.3	0.64	1.01	-0.7	E
0.55	0.3	5.05	-1.24	0.61	0.55	-0.52	F
0.66	0.16	16.59	-1.86	0.61	-0.37	-0.97	B'
0.49	0.36	8.53	-1.93	0.84	0.88	-0.9	D'
0.56	0.19	6.99	-1.23	0.54	0.45	-0.58	E'
0.42	0.45	18.1	-2.38	0.22	-0.14	-0.05	F'

در حالی که زمان و همکاران (۳۰) برای مناطق خشک و نیمه‌خشک استرالیا مقدار این آماره را در بازه‌ی ۵۷-۶۹ درصد گزارش دادند. به دلیل تغییرپذیری بیشتر رخدادهای هیدرولوژیک در مناطق خشک و نیمه خشک نسبت به مناطق مرطوب- ساحلی، خطای برآورد چارک ها تا ۱/۵-۲ برابر بیشتر از مناطق مرطوب- ساحلی، قابل قبول است (۳۰). مقادیر محاسبه شده میانه‌ی خطای نسبی در مطالعه‌ی حاضر نشان می‌دهد که این مقادیر نسبت به مناطق خشک و نیمه‌خشک استرالیا خیلی کمتر است که این به دلیل تفکیک منطقه به نواحی

همگن می‌باشد. همچنین مقادیر آماره‌ی $\frac{Q_{pred,i}}{Q_{obs,i}}$ در جدول (۷)

نشان می‌دهد که در روش اول ۷۵-۹۵ درصد ایستگاه‌ها و در روش دوم ۷۸-۹۷ درصد ایستگاه‌ها برآورد قابل قبولی را دارا هستند.

آماره‌های ارزیابی

جهت ارزیابی کلی دو روش، مقادیر دبی‌های برآوردی با استفاده از روابط منطقه‌ای (Q_{pred}) برای تمام ایستگاه‌ها به ازاء ۵ دوره بازگشت (۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال) با مقادیر دبی‌های برآوردی به روش تحلیل نقطه‌ای (Q_{obs}) مقایسه می‌شود. برای محاسبه‌ی Q_{obs} توابع توزیعی که بهترین برازش را با داده‌های جریان هر ایستگاه دارند با استفاده از دو آزمون نیکویی برازش کولموگروف- اسمیرنوف و مجموع مربعات باقیمانده انتخاب شدند. میانه‌ی خطای نسبی با استفاده از رابطه‌ی (۷) محاسبه شد (جدول ۶). با مقایسه‌ی مقادیر آماره‌ی ارزیابی ناحیه‌های دو روش (بدون در نظر گرفتن ناحیه‌هایی که در دو روش متشابهند) مقادیر میانه‌ی خطای نسبی در روش اول در بازه‌ی ۰/۲۱-۰/۴۵ درصد و در روش دوم در بازه‌ی ۰/۲۱-۰/۴۹ درصد می‌باشد. حداد و رحمان (۹) برای نواحی مرطوب- ساحلی استرالیا میانه‌ی خطای نسبی را در بازه‌ی ۳۰-۴۰ درصد گزارش دادند

جدول ۶- مقادیر آماره ارزیابی میانه خطای نسبی ناحیه‌ها به ازاء ۵ دوره بازگشت

Table 6- Median of relative error for regions corresponding to 5 return periods

Median of relative error (RE)					Region ناحیه
(RE) میانه خطای نسبی					
T=100	T=50	T=25	T=10	T=5	
0.53	0.45	0.35	0.29	0.16	A
0.23	0.27	0.35	0.37	0.33	B
0.14	0.01	0.04	0.01	0.04	C
0.39	0.37	0.34	0.36	0.3	D
0.43	0.31	0.21	0.24	0.23	E
0.36	0.45	0.33	0.36	0.39	F
0.37	0.32	0.29	0.31	0.29	B'
0.44	0.39	0.31	0.26	0.26	D'
0.38	0.33	0.24	0.21	0.25	E'
0.28	0.26	0.35	0.43	0.49	F'

$$\frac{Q_{pred,i}}{Q_{obs,i}}$$

جدول ۷- مقادیر آماره ارزیابی

Table 7- Evaluation criterion of $\frac{Q_{pred,i}}{Q_{obs,i}}$

$\frac{Q_{pred,i}}{Q_{obs,i}}$			Region ناحیه
<0.5(%)	2-0.5(%)	>2(%)	
9	76	16	A
2.5	95	2.5	B
0	100	0	C
9	75	16	D
3	90	7	E
7	75	8	F
1	97	2	B'
12	85	3	D'
4	89	6	E'
3	78	20	F'

نگرفتن آن)، تفاوت زیادی در توزیع حوضه‌ها در نواحی مشاهده نشد به‌علاوه، برآورد سیلاب در هر دو روش نتایج قابل قبولی به همراه داشت و می‌توان گفت که هر دو روش خوب بودند و اضافه کردن شاخص زمین‌شناسی منجر به بهبود معنی‌دار نتایج نگردید. زمانی که از شاخص زمین‌شناسی نیز جهت ناحیه‌بندی استفاده شد علاوه بر توابع انتخابی در هر ناحیه به‌عنوان بهترین حالت ممکن، تابع توزیع لوگ نرمال سه پارامتری برای تمامی نواحی در سطح $\alpha=0/2$ ، معنی‌دار بود. استفاده از یک نوع تابع توزیع برای تمامی نواحی مورد مطالعه، می‌تواند کاربردی‌تر و مؤثرتر واقع شود، بنابراین در نظر گرفتن شاخص زمین‌شناسی از این نقطه نظر مناسب است.

با مقایسه‌ی توزیع ایستگاه‌ها و همچنین دو آماره‌ی ارزیابی میانه‌ی خطای نسبی (RE) و نسبت Q_{pred}/Q_{obs} مشاهده شد که هر دو روش خوب بودند و اضافه کردن شاخص زمین‌شناسی نتایج را به میزان اندک بهبود بخشید.

نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل خوشه‌ای فازی حوضه‌های آبریز شمال شرق کشور نشان داد که تحلیل خوشه‌ای فازی روشی مناسب جهت تعیین ناحیه‌های همگن منطقه مورد نظر می‌باشد. همچنین با مقایسه‌ی دو روش تحلیل منطقه‌ای سیلاب (در نظر گرفتن شاخص زمین‌شناسی و در نظر

منابع

- 1- Alvankar S.R. 2011. Estimating maximum flood discharge by using Landsat satellite data. The 4th Conference on

- Iran Water Resources Management. Amirkabir Industrial University. May 2-3, 2011. Tehran. 12 pages (in Persian).
- 2- Ataee H., and Shiran M. 2011. Identifying homogeneous hydrologic watersheds based on geomorphologic feature effective on flood by using cluster analysis (case study: Keroon plain). *Journal of Geography and environmental planning*, 42, 79-98 (in Persian).
- 3- Bezdek J.C. 1981. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Plenum Press, New York.
- 4- Dalrymple T. 1960. Flood frequency analysis. US Geological Survey Water Supply Paper 1543-A.
- 5- Das S., and Cunnane C. 2011. Examination of homogeneity of selected Irish pooling groups. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 819-830.
- 6- Dunn J.C. 1974. A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact, well-separated clusters. *Journal of Cybernetics*, 3 (3): 32-57.
- 7- Fukuyama Y., and Sugeno M. 1989. A new method of choosing the number of clusters for the fuzzy c-means method. *Proceedings of Fifth Fuzzy Systems Symposium*, pp. 247-250 (in Japanese).
- 8- Goel G.N. 2000. The formation of groups for regional flood frequency analysis. *Hydrological Sciences-Journal-des, Sciences Hydrologiques*; 45(1) 97-112.
- 9- Haddad K., and Rahman A. 2012. Regional flood frequency analysis in eastern Australia: Bayesian GLS regression-based methods within fixed region and ROI framework: Quantile regression vs. parameter regression technique. *Journal of Hydrology*. 430-431, 142-161.
- 10- Hall M.J., and Minns A.W. 1999. The classification of hydrologically homogeneous regions. *Hydrological Sciences Journal*, 44 (5): 693-704.
- 11- Hosking J.R.M. 1990. L-Moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of Royal Statistical Society B*, 52: 105-124.
- 12- Hosking J.R.M., and Wallis J.R. 1993. Some statistics useful in regional frequency analysis, Res. Rep. RC 17096, IBM Research Division, York town Heights, NY 10598.
- 13- Hosking J.R.M., and Wallis J.R. 1997. *Regional Frequency Analysis (An Approach Based on Linear Moments)*. Cambridge University Press.
- 14- Jingyi Z., and Hall M.J. 2004. Regional flood frequency analysis for the Gan-Ming River basin in China. *Journal of Hydrology*, 296: 98-117.
- 15- Koorehpazan Dezfooli A. 2008. *Theoretical Principles of Fuzzy sets and its Applications in Problems of Water Engineering Modeling*. Amirkabir Industrial University Publication, 8737. Tehran. 261 pp (in Persian).
- 16- Kumar R., Chatterjee C., Kumar S., Lohani A. K., and Singh R.D. 2003. Development of regional flood frequency relationships using L-Moments for Middle Ganga Plains subzone 1(f) of India. *Water Resources Management*, 17: 243-257.
- 17- Kwon S.H. 1998. Cluster validity index for fuzzy clustering. *Electronics Letters* 34 (22), 2176-2177.
- 18- Mishra B.K., Takara K., and Tachikawa Y. 2008. Regionalization of Nepalese river basins for flood frequency analysis. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 52: 91-96.
- 19- Mooshkhan Y., Ownagh M., Bardy Shykh V., Mosaedi A., and Saad-o-ddin A. 2012. Developing regional models for estimating flood discharge in selected watersheds of Khorasan Razavi watersheds. 8th National Meeting on Science and Engineering of Watershed Management. May 1-17, 2012. Lorestan University (in Persian)
- 20- Mosley M.P. 1981. Delimitation of New Zealand hydrologic regions. *Journal of Hydrology*, 49: 173-192.
- 21- Pal N.R., and Bezdek J.C. 1995. On cluster validity for the fuzzy c-means model. *IEEE Transactions on Fuzzy systems*, 3 (3): 370-379.
- 22- Rao A.R., and Srinivas V.V. 2006. Regionalization of watersheds by fuzzy cluster analysis. *Journal of Hydrology*, 318: 57-79.
- 23- Roa A.R., and Srinivas V.V. 2006. Regionalization of watersheds by Hybrid-Cluster analysis. *Journal of Hydrology*, 318: 37-56.
- 24- Ross T.J. 1995. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. McGraw-Hill, New York.
- 25- Saf B., Dikbas F., and Yasar M. 2007. Determination of regional frequency distributions of floods in West Mediterranean river basins in Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 16 (10): 1300-1308.
- 26- Saf B. 2010. Assessment of the effects of discordant sites on regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 380: 362-375.
- 27- Shamkooian H., Ghahraman B., Davary K., and Sarmad M. 2009. Regional flood frequency analysis by using Linear Moment theory and flood index method in Khorasan Province watersheds. *Journal of Soil and Water (Agricultural Science and Industry)*. 23(1), 31-43 (in Persian).
- 28- Sveinsson O.G.B., Boes D.C., and Salas J.D. 2001. Population index flood method for regional frequency analysis. *Water Resources Research*, 37 (11): 2733-2748.
- 29- Xie X.L., and Beni G. 1991. A validity measure for fuzzy clustering. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13 (8): 841-847.
- 30- Zaman M.A., Rahman A., and Haddad K. 2012. Regional flood frequency analysis in arid regions: A case study for Australia. *Journal of Hydrology*, 475: 74-83.



Effect of Geological Feature on Regional Flood Frequency of Watersheds of North-East of Iran

T. Taherpoor¹ - B. Ghahraman^{2*} - K. Davary³

Received: 24-12-2013

Accepted: 30-07-2017

Introduction: Finding out homogeneous watersheds based on their flood potential mechanisms, is needed for conducting regional flood frequency analysis. Similarity of watersheds based on flood potential severity depends on many factors such as physiographic and meteorological features of the watershed, geographical location and geological features. These criteria although are sound ones, they suffer from this concept that there is no attention to hydrological losses of runoff into the soil. As a result, current literature lacks for considering geological features into delineating homogeneous regions. The primary contribution of this paper is to include one geological criterion on flood regionalization. In a previous study we made a homogeneous classification for Khorasan Province of Iran without taking into consideration of infiltration features of the region. So, by taking geological features there may provide a sound comparison to regionalization issue.

Materials and Methods: To find out the effect of geological feature on delineation of homogeneous regions, 73 hydrometric stations at North-East of Iran with arid and semi-arid climate covering an average of 29 years of record length were considered. Initially, all data were normalized. Watersheds were clustered in homogeneous regions adopting Fuzzy c-mean algorithm and two different scenarios, considering and not considering a criterion for geological feature. Three validation criteria for fuzzy clustering, Kwon, Xie-Beni, and Fukuyama-Sugeno, were used to learn the optimum cluster numbers. Homogeneity approval was done based on linear moment's algorithm for both methods. We adopted 4 common distributions of three parameter log-Normal, generalized Pareto, generalized extreme value, and generalized logistic. Index flood was correlated to physiographic and geographic data for all regions separately. To model index flood, we considered different parameters of geographical and physiological features of all watersheds. These features should be easily-determined, as far as practical issues are concerned. Cumulative distribution functions for all regions were chosen through goodness of fit tests of Z and Kolmogorov-Smirnov.

Results and Discussion: Watersheds were clustered to 6 homogenous regions adopting Fuzzy c-mean algorithm, in which fuzziness parameter was 1.9, under the two different scenarios, considering and not considering a criterion for geological feature. Homogeneity was approved based on linear moment's algorithm for both methods, although one discordant station with the lowest data was found. For the case with inclusion of geologic feature, 3-parameter lognormal distribution was selected for all regions, which is a highly practical result. On the other hand, for not considering this feature there were no unique distribution for all regions, which fails for practical usages. As far as index flood estimation is concerned, a logarithmic model with 4 variables of average watershed slope, average altitude, watershed area, and the longest river of the watershed was found the best predicting equation to model average flood discharge. Determination coefficient for one of the regions was low. For this region, however, we merged this region to other regions so that reasonable determination coefficient was found; the resulting equation was used only for that specific region, however. By comparing the distributions of stations and also two evaluation statistics of median relative error and predicted discharge to estimated discharge ration corresponding to 5 different return periods (5, 10, 20, 50, and 100 years). Both perspectives showed acceptable results, and including geological feature was effective for flood frequency studies. With considering the geological feature for regionalization, Besides, Log normal 3 parameters distribution was found appropriate for all of the regions. From this point of view, geological feature was useful. Median of relative error was lower for small return periods and gradually increased as return period was increased. Median of relative error was between 0.21 to 0.45 percentages for the first method, while for the second method it varied between 0.21 to 0.49 percentages. These errors are quite smaller than those reported in literature under the same climatic region of arid and semi-arid. The probable reason may due to the fact that we made a satisfactory regionalization via fuzzy logic algorithm. We considered another mathematical criterion of "predicted discharge to the observed discharge". The optimum range for this criterion is between 0.5 and 2. While under-estimation and over-estimation are found if this criterion is lower than 0.5 and higher than 2,

1, 2 and 3- Former Graduate Student of Water Resources and Professors of Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Respectively
(* - Corresponding Author Email: bijangh@um.ac.ir)

respectively. Based on this premise, 75 to 95 percentages of stations were categorized as good estimation under the first method of analysis. On the other hand, 78 to 97 percentages of stations were considered good for the second approach.

Keywords: Flood index, Fuzzy cluster analysis, Infiltration measure, Non-data watersheds



تعیین ارتفاع فیلتر قایم در سدهای غیرهمگن با هسته‌ی رسی قایم

سعید صالحی^۱ - کاظم اسماعیلی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۲۱

چکیده

یکی از مشکلات سدهای خاکی در هنگام بهره‌برداری، وقوع پدیده‌ی پایداری می‌باشد. این پدیده به خاطر بالا رفتن گرادیان هیدرولیکی موجود از گرادیان هیدرولیکی مجاز می‌باشد. راهکارهای مختلفی برای حل این مشکل پیشنهاد شده است. یکی از این راهکارها استفاده از ترکیب هسته رسی با فیلتر پایین دست هسته رسی می‌باشد. به همین منظور در این تحقیق با استفاده مدل آزمایشگاهی و مدل نرم افزاری PLXIS V8.5 سعی در پیش‌بینی ابعاد بهینه این نوع فیلترها شده است. سه مدل آزمایشگاهی به طول ۴/۲ متر و ارتفاع یک متر و شیب بدنه 2V : 1H در فلوم آزمایشگاهی تهیه شد. پس انجام آزمایشات و ترسیم خطوط نشت در مدل‌های آزمایشگاهی، با استفاده از مقایسه آماری بین مدل‌های آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزاری صحت داده‌های نرم‌افزاری با استفاده از آزمون آماری P-VALUE و RMSE سنجیده شد. در نهایت با استفاده از مدل نرم‌افزاری فیلتر پیشنهادی برای سدهای خاکی با هسته قایم ارایه شد. نتایج نشان داد که ارتفاع فیلتر رابطه مستقیمی با نسبت هدایت هیدرولیکی هسته به پوسته سدهای رسی با هسته‌ی قایم دارد. بدین صورت که با افزایش این نسبت ارتفاع فیلتر پیشنهادی نیز افزایش پیدا می‌کند. در نهایت ارتفاع این فیلتر ارایه شد.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع فیلتر، ضخامت هسته رسی، مدل سد خاکی غیرهمگن، نرم‌افزار

مقدمه

سدهای خاکی به صورت قایم می‌باشد. این امر در مطالعات گذشته نشان داده است. در صورتی که هسته رسی به صورت مایل ساخته شود، اگر چه از ضریب پایداری شبروانی بیشتری برخوردار است ولی به خاطر نشست ناهمگون منابع سازند سد در عمر بهره‌برداری سد می‌شود، این امر موجب ایجاد خرابی‌های ساختمانی در فصل مشترک بین هسته و پوسته به خاطر تنش‌ها و کرنش‌های بوجود آمده، می‌شود (۴). به همین منظور در این تحقیق با ساختن مدل سد خاکی در ابعاد آزمایشگاهی، به بررسی و ارایه پیشنهاداتی برای ضخامت هسته رسی و همچنین ابعاد فیلتر پایین دست پرداخته شد.

مطالعات انجام شده

ابتدا در این بخش به مرور منابع گذشته مبحث پرداخته می‌شود و در ادامه مطالعاتی جدیدتر ارایه می‌گردد. از جمله مطالعاتی که در زمینه فیلترهای سدهای خاکی در سال‌های گذشته می‌توان اشاره نمود. مطالعات ترزاقی (۱۲)، ترزاقی (۱۳)، آرولاناندان و همکاران (۱)، خور و همکاران (۵) و چینگ و همکاران (۲) پرداخت.

ترزاقی (۱۲)، (۱۳) مباحثی در مورد ارایه راهکارهایی برای کنترل نشت و گرادیان هیدرولیکی در سدهای خاکی ارایه نمود. از جمله این راهکارها، استفاده از فیلترها برای کنترل نشت در سدهای خاکی را می‌توان اشاره کرد.

آرولاناندان و همکاران (۱) به بررسی نشت در سدهای خاکی

امروزه ساخت سدهای خاکی در تأمین آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعت اهمیت فراوانی دارد. این نوع سدهای در دو حالت همگن و غیرهمگن ساخته می‌شوند. سدهای خاکی با بدنه غیرهمگن معمولاً با پوسته همگن از جنس خاک غیر چسبنده و هسته‌ای در وسط ساخته می‌گردند (۶). از گذشته میزان ضخامت و محل قرارگیری این هسته در این نوع سدهای همیشه مورد بحث و آزمایش بوده است. عموماً در هنگام آبگیری این نوع سدها، نشت از بین بدنه سد جریان پیدا کرده و به سمت پایین دست ادامه پیدا می‌کند. در صورت افزایش این نشت، گرادیان موجود در منطقه بین هسته رسی و پوسته (به خاطر تغییر اندازه‌ی ذرات خاک و افزایش سرعت جریان) افزایش پیدا کرده و در نهایت از گرادیان هیدرولیکی مجاز خاک هسته بیشتر می‌گردد. این پدیده باعث شروع خرابی در این منطقه می‌شود. برای جلوگیری از این افزایش گرادیان استفاده از فیلترها در این محدوده در تحقیقات گذشته پیشنهاد می‌شود (۱۵).

نکته حایز اهمیت در این تحقیق استفاده از هسته رسی در

۱ و ۲- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(Email: esmaili@um.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول

انتهای فیلترها بیشترین گرادیان هیدرولیکی را متحمل می‌شوند و امکان خرابی حاصل از پاپینگ در این مناطق به مراتب بیشتر از دیگر ناحیه‌های سد می‌باشد.

میشرا (۷) به بررسی پدیده نشت در بدنه سدهای خاکی پرداخت. در این تحقیق به بررسی خط نشت و ارایه روابط ریاضی برای تخمین این خط پرداخته شده است. در این تحقیق معادله دارسی با معادله چند درجه خط نشت باز نویسی شد. و فاکتورهای هیدرولیکی از جمله دبی و هد اولیه بر خط نشت مورد ارزیابی قرار داده شد. در نهایت روابطی برای طول زهکش افقی پیشنهاد شد. این مطالعه با مطالعات کاساگران مورد مقایسه قرار داده شد.

همچنین مطالعات در سال‌های اخیر در داخل صورت گرفته که به برخی از آنها در زیر اشاره می‌گردد.

کاربر و همکاران (۴) به بررسی رفتار استاتیکی و لرزه‌ای یک سد خاکی (سد بیدواز) با هسته رسی مایل در پایان ساخت را مورد بررسی قرار دادند. تحلیل‌های عددی برای همان سد، ولی با فرض هسته قائم، تکرار شده است. آنالیزهای حساسیت انجام شده برای زلزله با شتاب‌های متفاوت نشان از ایجاد تغییر شکل‌های زیاد و تمایل بیشتر به ناپایداری در سد با هسته مایل نسبت به سد با هسته قایم دارد.

نجف‌پور خویگانی و همکاران (۸) با مدل‌سازی سد خاکی همگن، تأثیر زهکش پنجه با زوایا و طول و ارتفاع‌های مختلف را بر روی روند نشت بررسی کردند. مدل‌سازی بوسیله نرم‌افزار PLXIS V8 و نرم‌افزار SAS انجام پذیرفت که با سطح اطمینان ۹۵ درصد خطایی بین داده‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزاری وجود نداشت. در نهایت با معرفی ارتفاع زهکش با نمایه P و ارتفاع آب در مخزن سد با نمایه h و همچنین زاویه α به عنوان زاویه زهکش پنجه، بهترین زهکش از لحاظ افت خط نشت نسبت به حالت بدون زهکش معرفی شد این زهکش با شاخص $P/h=0.25$ و زاویه ۴۵ درجه می‌باشد.

در ساخت سدهای خاکی با هسته‌ی رسی عموماً در پایین دست هسته رسی برای خارج کردن زه آب در هسته و پایین آوردن فشار آب منفذی در این ناحیه از فیلتر استفاده می‌شود. معمولاً ارتفاع ساخت این فیلتر با ارتفاع ساخت هسته‌ی رسی برابر در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی ساخت فیلتر در زمان ساخت بدنه سد دارای حساسیت خاص خود می‌باشد. ساختن آن با ارتفاع مناسب (نه ارتفاع کل هسته) امری است ضروری که به خودی خود باعث کاهش هزینه‌های ساخت سد می‌گردد. این امر مهم زمینه‌ای برای تحقیق در مورد ارتفاع فیلتر مورد نیاز در این نوع سدهای خاکی فراهم می‌آورد. در این تحقیق با استفاده از سه مدل آزمایشگاهی و تعمیم دادن داده‌های بدست آمده از آزمایشات محیطی با مدل نرم‌افزاری سعی در ارایه استاندارد با توجه به جنس خاک سازند سد ارایه می‌شود. با توجه به موارد گفته شده زمینه‌ای برای تحقیق در این مورد فراهم می‌باشد. که متأسفانه در مطالعات انجام شده در این حیطه تحقیق جامعی صورت نگرفته است. با توجه به این موارد سعی شد به این مورد پرداخته شود.

همگن پرداختند. در این تحقیق با توجه به جنس منابع قرضه بدنه سد، نمودارهای برای ارتفاع و ابعاد فیلترها در سدهای خاکی ارایه شد. در این تحقیق به عملکرد فیلترها با دانه‌بندی‌های مختلف و هدایت هیدرولیکی‌های گوناگون در هنگام شروع نشت در سدهای خاکی ارایه شد.

چینگ و همکاران (۲) با استفاده از روش اجزا محدود معادلات نشت به ارایه روشی برای حل معادلات نشت در سدها با فیلتر افقی پرداختند. در این تحقیق از داده‌های مدل آزمایشگاهی استفاده شد. در نهایت روش تحلیلی-ترسیمی برای برآورد طول فیلتر افقی در سدهای خاکی ارایه شد. این تحقیق جز مطالعاتی است که روش‌هایی برای حل عددی معادلات نشت ارایه می‌داد. و مطالعات را از فاز آزمایشگاهی به فاز استفاده از روش‌های عددی سوق می‌داد.

خور و همکاران (۵) با در نظر گرفتن جنس و دانه‌بندی فیلتر به بررسی عملکرد فیلترها در سدهای خاکی با هسته‌ی رسی پرداختند. در این تحقیق با توجه به جنس هسته‌ی رسی در سدهای خاکی به ارایه فیلترهایی با ساختار مکانیک خاکی مختلف پرداخته شد. در نهایت دانه فیلتر، به صورت لای لایه برای کنترل پاپینگ ارایه شد. در این تحقیق نشان داده شد که تغییرات دانه‌بندی در فیلتر از درشت به سمت ریز دانه باعث می‌شود که گرادیان هیدرولیکی به گرادیان هیدرولیک خرابی نرسد و انرژی آب در طول فیلتر به آرامی مستهلک شود.

همچنین در ادامه مطالعاتی که در سال‌های اخیر صورت گرفته می‌توان به مطالعات زیر اشاره نمود.

یا و همکاران (۱۶) به بررسی رفتار هسته‌ی رسی در یک سد واقعی پرداختند. در این مطالعه با استفاده از چاهک‌هایی که در طول سد احداث شد. در یک سال بهره‌برداری رفتار هسته رسی و همچنین نشت از بدنه سد مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد زمان بارندگی و پر شدن مخزن و نشت از بدنه سد باعث کرنش سد به سمت دامنه پایین دست می‌شود. همچنین پیشنهاد شد که با تزریق گروت در فصل مشترک بین هسته و پوسته مقدار قابل توجهی از نشت را کاهش می‌دهد. این راهکار می‌تواند باعث کاهش دبی نشت و در نهایت کاهش گرادیان هیدرولیکی گردد. اگر چه دبی نشت به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا نکرد ولی این راهکار باعث جلوگیری از خرابی‌های هیدرولیکی در بدنه‌ی سدهای خاکی می‌گردد.

تیموتی و همکاران (۱۵) به بررسی نشت در سدهای خاکی غیرهمگن پرداختند. در این مطالعه نشت از فیلتر، در هنگام اشباع بودن خاک مورد ارزیابی قرار داده شد. در هنگام تخلیه‌ی مخزن، دبی نشت برگشتی به مخزن با استفاده از مدل نرم‌افزاری مورد ارزیابی قرار داده شد. با استفاده از داده‌های نرم‌افزاری Seep-W مکان‌های خرابی حاصل از نشت در حالت غیراشباع پیش‌بینی شد. در نهایت عملکرد فیلتر بالادست هسته رسی مورد ارزیابی قرار گرفت و راهکارهایی برای افزایش عملکرد پیشنهاد شد. نتایج نشان داد قسمت

مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایشات و محاسبه بهترین ارتفاع فیلتر از امکانات آزمایشگاهی استفاده شد که به ترتیب معرفی می‌گردند. همچنین آزمایشات نیز در زیر توضیح داده شده است.

تجهیزات آزمایشگاهی

۱- فلوم آزمایشگاهی: آزمایشات در یک فلوم (Flume) آزمایشگاهی به طول ۶ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱٫۲ متر واقع در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه شهرکرد، انجام گرفت. ساختمان فلوم متشکل از فولاد و پلاستیکی گلاس است که در آن کف فلوم و دیواره پشت فلوم از جنس ورق گالوانیزه با ضخامت ۲ میلی‌متر و دیواره‌های دیگر فلوم از جنس پلاستیکی گلاس با ضخامت ۱۵ میلی‌متر که با استفاده از چسب‌های خارجی آکواریم آب‌بندی شده ساخته شد. برای جلوگیری از باز شدن ورق‌های گالوانیزه در کف، بالا و پشت فلوم تکیه گاه‌های (نبشی) در فواصل مشخص جوش داده شد (شکل ۱).

۲- جعبه زهکشی: به منظور جمع‌آوری آب حاصل از زهکشی مدل سد خاکی، باکسی با عرض ۰/۶ متر، طول ۰/۹ متر و ارتفاع ۰/۴

متر با ورق گالوانیزه ساخته شد. برای ورود آب حاصل از زهکشی از فلوم به داخل باکس، سوراخ‌هایی با قطر ۳ میلی‌متر در کف فلوم، براساس استاندارد قطر USBR سوراخ‌های زهکش، طراحی شد.

۳- پیزومترها و چاهک‌های مشاهداتی: برای اندازه‌گیری فشار آب داخل فلوم، ۳۰ عدد پیزومتر به صورت شبکه‌بندی شده، روی دیواره‌ی پلاستیکی گلاس تعبیه و آب‌بندی شد. این پیزومترها شامل فیلتر ورودی و لوله‌های پلاستیکی هستند. همچنین برای بررسی روند خط نشست، تعداد ۷ چاهک‌های مشاهداتی، از لوله‌ی گالوانیزه به قطر سه چهارم اینچ و با سوراخ‌هایی به قطر ۱ سانتی‌متر ساخته شد (شکل ۱ و ۲).

۴- دستگاه مولتی‌متر: برای قرائت آب در داخل چاهک از دستگاه مولتی‌متر استفاده شد بدین صورت که قطب مثبت و منفی این دستگاه به سر میله‌ای به صورت عایق و بدون اتصال کنار هم قرار داده شد و در هنگام اتصال این قسمت با آب مولتی‌متر در حالت مقاومت‌سنجی مقاومتی را نشان می‌دهد پس از واسنجی مقاومت با ارتفاع آب از این روش برای قرائت آب در چاهک‌ها استفاده شد (شکل ۳).



شکل ۳- استفاده از زوج میله‌ها در چاهک‌ها
Figure 3- Resistance related Height of instrument calibration



شکل ۲- چاهک‌های مشاهده‌ای
Figure 2- Observation wells

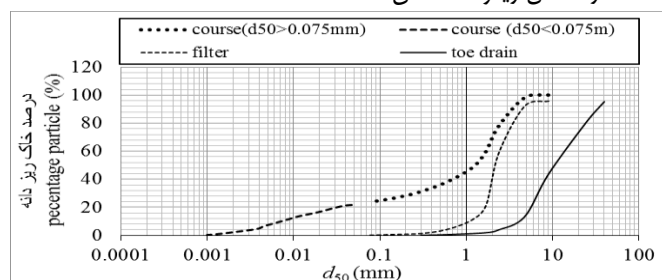


شکل ۱- وضعیت قرارگیری پیزومترها
Figure 1- Experimental Flume and Pizometer

آزمایشات

۱- آزمایشات مکانیک خاکی (دانه‌بندی): به منظور تعیین محدوده دانه‌بندی بکار رفته در ساخت مدل از آزمایش دانه‌بندی با الک‌های استاندارد و روش هیدرومتری برای بخش ریزدانه استفاده شد. دانه‌بندی قسمت‌های مختلف سد در شکل زیر مشخص شده

است. همچنین برای خاک پوسته درصد خاک ریز دانه در سه لایه مختلف مدل سد تعیین شد. که در لایه ۱ (اولین لایه تراکم)، لایه‌ی دوم (لایه‌ی میانی مدل‌ها) و لایه سوم (لایه در تاج سدها) مقدار درصد ریزدانه (عبوری از الک ۲۰۰) تعیین شد که به ترتیب برابر با ۱۹، ۲۰ و ۱۸ درصد بود.

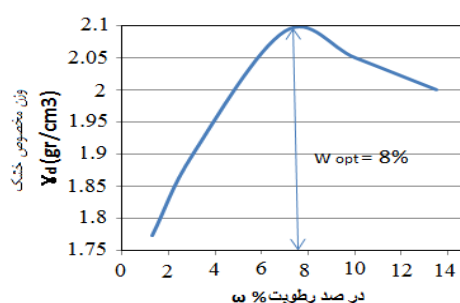


شکل ۴- دانه‌بندی خاک‌های استفاده شده در مدل‌ها
Figure 4- Drain, filter and crust classification of desert and laboratory compression

فاکتورهای تلاش برای تراکم برای رسیدن به پروکتور) مقدار از وزن خاک باقی مانده و در حجم مورد نظر جا داده نمی‌شود. با توجه به رابطه‌های ۲ و ۳ با بدست آوردن وزن جا داده شده به وزن کل، می‌توان درصد تراکم را محاسبه نمود (۱۵).

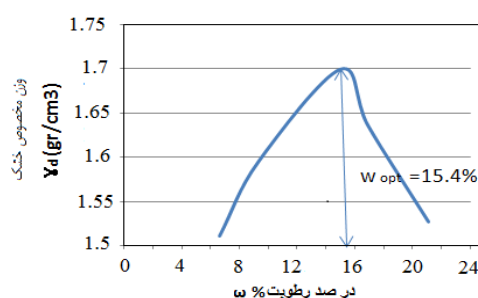
$$\gamma_{dmax} = \frac{W_s}{V} \Rightarrow W_s = \gamma_{dmax} \times V \quad (2)$$

$$R(\%) = \frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \times 100 = \frac{\frac{W_s}{V}}{\frac{W_s}{V}} - \frac{W_s}{W_t} \times 100 \quad (3)$$



شکل ۵- رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک در خاک ۲۰ درصد ریزدانه

Figure 5- Dry density and Optimum damp of 20% fine.



شکل ۶- رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک در خاک ۶۰ درصد ریزدانه

Figure 6- Dry density and Optimum damp of 60% fine



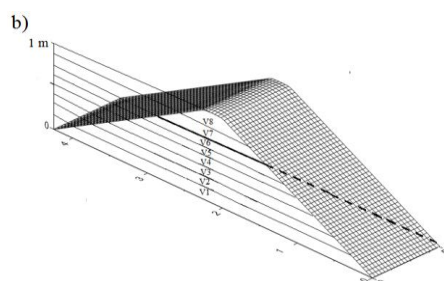
۲- آزمایش تراکم: در ساخت بدنه‌ی سدهای خاکی باید تراکم سد به حدی باشد که سد مقاومت لازم را در مقابل تنش‌های قایم و برشی حاصل از نیروی آب و همچنین نشت را داشته باشد. طبق نظر بر ام ج داس (۱۱) در صورتی که درصد تراکم نسبی خاک از ۸۵ درصد بیشتر باشد این خاک در محدوده‌ی خاک‌های بسیار متراکم تقسیم‌بندی می‌شود از این رو میزان تراکم نسبی برای مدل‌ها محاسبه شد که به صورت زیر به صورت مرحله به مرحله انجام گرفت.

$$R(\%) = \frac{\gamma}{\gamma_{max}} * 100 \quad (1)$$

γ : وزن مخصوص خاک در محل
 γ_{max} : وزن مخصوص ماکزیمم (پروکتور)

در این تحقیق برای این که مدل‌ها دارای تراکم قابل قبولی باشند، با استفاده از آزمایش پروکتور استاندارد برای نمونه‌های خاک ۲۰ و ۶۰ درصد ریزدانه رطوبت آنها محاسبه شد. نمودارهای وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه برای دو نوع خاک به صورت شکل (۵) و (۶) می‌باشد. لازم به ذکر است از خاک ۲۰ درصد ریزدانه برای ساخت پوسته و خاک ۶۰ درصد ریزدانه برای ساخت هسته استفاده شد.

بعد از بدست آوردن رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک خاک‌ها برای رسیدن به تراکم مورد نیاز بدین صورت عمل شد. ابتدا مقطع سد (شکل ۷-ب)) به دوزنقه‌ها مختلفی تقسیم‌بندی شد. با داشتن سطح این دوزنقه‌ها در عرض سد که همان ۰/۶ متر (عرض فلوم) بود حجم این قسمت‌ها بدست آورده شد. با داشتن وزن مخصوص خشک و حجم مورد نیاز خاک وزن خاک خشک محاسبه شد و با اضافه کردن رطوبت بهینه، خاک متراکم شد (با استفاده از چکش استاندارد- شکل ۷-الف). اگر این مقدار وزن مرطوب خاک در حجم مورد نظر جا داده شود وزن مخصوص فیلد با وزن مخصوص آزمایشگاهی (پروکتور) برابر می‌گردد که در این صورت تراکم نسبی صد درصد می‌شود. از آنجایی که در ساخت مدل‌ها امکان تراکم تا حد وزن مخصوص پروکتور وجود نداشته است، (به خاطر عدم وجود



شکل ۷- نمایی از خاکریز سد. الف) وسایل تراکم بدنه سد ب) تقسیم‌بندی بدنه سد

Figure7- Sketch of dam embankment; a) Soil compression instrument; b) Dam body fragmentation situation for compression layer respectively

جدول ۱- مشخصه‌های خاک‌های مورد استفاده

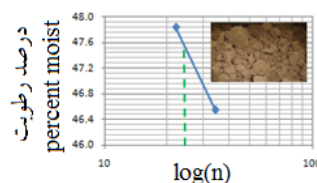
Table 1- Used soils specifications

Parameters پارامترها	Coarse درشت دانه	Core ریزدانه	Filter&drain فیلتر و زهکش
$\gamma_{dry} (KN/m^3)$ وزن مخصوص خشک	17.5	18.5	17.5
$\gamma_{sat} (KN/m^3)$ وزن مخصوص اشباع	19	20	19
$K_x (m/day)$ هدایت هیدرولیکی افقی	0.2	0.035	30
$K_y (m/day)$ هدایت هیدرولیکی قائم	0.2	0.035	30
$E_{ref} * 10^4 (KN/m^2)$ مدول الاستیسته	11	200	7
N عدد ثابت	0.35	0.3	0.3
$C_{ref} (KN/m^2)$ چسبندگی	1	2	1
$\Phi(phi)$ زاویه ایستایی خاک	40	35	45
$\Psi(psi)$ زاویه ساو	10	10	10

شهرکرد و منبع دوم خاک با بافت رسی موجود در محوطه دانشگاه بود. با توجه به این موضوع که کانی خاک رسی مورد استفاده باید از جنس کائولینیت به دلیل چسبندگی و تراکم‌پذیری بالا باشد. این دو میزان رس با هم ترکیب و حد روانی آنها با استفاده از دستگاه کاساگران تعیین شد که میزان رطوبت مربوط به ۲۵ ضربه آن با دستگاه کاساگرانده برابر با ۴۸ در صد بود که نشان می‌دهد این رس در محدوده حد روانی رس کائولینیت است. این خاک رس در استفاده از هسته‌های رسی کاربرد دارد (۶).

۳- مشخصه‌های خاک‌های مورد استفاده: مشخصه‌های اندازه‌گیری شده خاک‌های مورد استفاده در جدول زیر است:

۴- نوع مصالح بدنه اصلی مدل: جنس پوسته‌ی سد خاکی غیرهمگن به منظور کاهش نفوذپذیری و جلوگیری از نشت زیاد آب از نوع SC (ماسه ورس) انتخاب شد. در این تحقیق برای تأمین رس از دو منبع خاک رسی استفاده شد یک منبع آن با توجه به این که رسوبات موجود در مخازن سدها دارای خاصیت کاملاً رسی‌اند از رسوبات جمع شده در مخزن سد پیر بلوط واقع در ۲۰ کیلومتری



clay	PL
Caolinait	35-100
Elite	55-120
Montmorionet	100-860

شکل ۸- تعیین حد روانی با استفاده از دستگاه کاساگران

Figure 8- Determination of clay soil via casagrand instrument

افتان و بار ثابت) برای دو نوع خاک صورت گرفت. آزمایش بار ثابت برای خاک ۲۰ درصد ریزدانه که در محدوده درشت‌دانه واقع است و آزمایش بار افتان برای خاک ریزدانه (۶۰ درصد ریزدانه) انجام شد. در نهایت با استفاده از روابط هدایت هیدرولیکی مشخص گردید که

۵- آزمایشگاه تعیین هدایت هیدرولیکی: در آزمایشگاه برای تعیین هدایت هیدرولیکی، دو نوع خاک ابتدا به تراکم مناسب (در وزن مخصوص پروکتور) کوبیده شد و به حداکثر تراکم آزمایشگاهی رسید. سپس نمونه‌ها در خود قالب تحت آزمایشات هدایت هیدرولیکی (با

$\frac{Q_b}{Q_t}$ با فرض این که دبی ورودی به محیط متخلخل و دبی خروجی به برابر باشد می‌توان تأثیر این عدد را حذف نمود. اشباع شدن سد و در نهایت ثابت شدن دبی خروجی این موضوع را اثبات می‌کند. لازم به ذکر است در کلیه آزمایشات دبی برداشتی به مقدار ثابتی می‌رسد. پس اعدادی که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرند، می‌توان از اعداد $\frac{\Delta h}{H}, \frac{a}{H}, \frac{k_2}{k_1}, \frac{h_2}{H}$ استفاده نمود. برای بدست آوردن ارتفاع فیلتر بهینه با توجه به مدل آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزاری آزمایشاتی طرح‌ریزی شد که به صورت زیر می‌باشد.

۷- آزمایشات مدل‌ها: در تحقیق انجام شده از سه مدل اجرایی استفاده شد. مدل اول شامل دو جنس خاک ریزدانه و درشت‌دانه بود که از تاج سد تا بالادست خاک درشت‌دانه و از تاج سد تا پایین‌دست خاک ریزدانه استفاده گردید (شکل ۹). مدل دوم شامل سه قسمت می‌باشد ضخامت هسته رسی قایم به اندازه‌ی یک هفتم قاعده سد انتخاب شد و دو طرف آن خاک درشت‌دانه خاکریزی شد (شکل ۱۰). مدل سوم همانند مدل دوم با تفاوت ضخامت هسته رسی به میزان یک دهم قاعده سد ساخته شد (شکل ۱۱). علت بکارگیری مدل دوم و سوم بررسی تأثیر این ضخامت بر خط نشت آزاد در بدنه‌ی سد می‌باشد. در این مدل سه آزمایش بدون زهکش انجام گردیده شد. در مدل دوم آزمایشات همانند مدل یک، برای ماکزیمم ارتفاع آب در مخزن با $\frac{a}{L} = \frac{1}{7}$ انجام گرفت. دبی حجمی نشت، اندازه‌گیری شد. همچنین با استفاده از چاهک‌های مشاهداتی تعبیه شده خط نشت ترسیم گردیده شد. در مدل سوم آزمایشات همانند مدل یک برای ماکزیمم با تعدا سه فیلتر با $\frac{a}{L} = \frac{1}{10}$ انجام گرفت. همچنین با استفاده از چاهک‌های مشاهداتی تعبیه شده خط نشت این مدل نیز ترسیم گردیده شد.



شکل ۱۱- مدل سوم
 Figure 11- The third model



شکل ۱۰- مدل دوم
 Figure 10- The second model



شکل ۹- مدل اول
 Figure 9- The first model

برداشت و بررسی داده‌های حاصل از آزمایشات، مدل‌سازی در نرم‌افزار PLXIS انجام گردید. در ابتدا باید یک مدل هندسی از مقطع سد ایجاد گردد که برای این کار بر اساس مقطع اجرایی مدل آزمایشگاهی

هدایت $k_1=0.2\text{m/day}$ بدست آمد. $k_2=0.035\text{m/day}$

هیدرولیکی پوسته سد و k_2 هدایت هیدرولیکی هست سد می‌باشد. ۶- آنالیز ابعادی: در علم هیدرولیک همواره از شبیه‌سازی مدل برای کاهش هزینه و... استفاده می‌گردد. به همین علت برای تحقیق حاضر آنالیز ابعادی برای تعیین اعداد بی بعد تأثیرگذار استفاده شد. با توجه به قضیه پی باکینگهام و در نظر پارامترهای تأثیرگذار بر نشت می‌توان اعدادی به صورت زیر داشت (۱۰).

$$(۴) \quad \frac{\Delta h}{H}, \frac{a}{H}, \frac{k_2}{k_1}, \frac{h_2}{H}, Dr, \frac{\rho V D_{50}}{\mu}, \frac{Q_b}{Q_t}$$

Δh : افت خط نشت در هسته رسی	H : ارتفاع آب در مخزن	a : ضخامت هسته رسی قایم
K_2 : هدایت هیدرولیکی پوسته	K_1 : هدایت هیدرولیکی هسته	h_2 : ارتفاع فیلتر
Dr : تراکم نسبی	V : سرعت در معادله دارسی	D_{50} : قطر متوسط خاک
Q_b : دبی نشت	Q_t : دبی ورودی	

با توجه به اعداد بی بعد در نظر گرفته شده در این تحقیق، می‌توان بعضی از اعداد صرفه نظر کرد. از جمله این اعداد، اعداد $Dr, \frac{\rho V D_{50}}{\mu}, \frac{Q_b}{Q_t}$ می‌باشند. با توجه به این که تراکم نسبی در مدل‌ها مقدار قابل قبولیست به طوری که معادله دارسی برقرار باشد، می‌توان با در نظر گرفتن و ایجاد تراکم نسبی قابل قبولی از این مقدار صرفه نظر کرد. همچنین عدد $\frac{\rho V D_{50}}{\mu}$ نمایان‌گر عدد رینولدز در محیط متخلل می‌باشد. با توجه به این موضوع که معادله دارسی برقرار است. از این فاکتور نیز برای بررسی صرفه نظر شد. همچنین در عدد

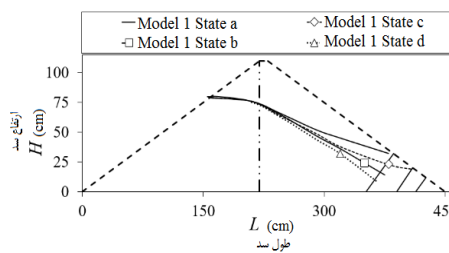
لازم به ذکر است، دبی نشت از بدنه‌ی سد خاکی از روش حجمی اندازه‌گیری از باکس تعبیه شده در انتهای فلولم اندازه‌گیری شد. ۸- تعریف مدل و تعیین شرایط اولیه و مرزی در نرم‌افزار: پس از

پس از انجام آزمایشات مدل آزمایشگاهی خط نشت با استفاده از چاهک‌های مشاهداتی ترسیم شد. همچنین فشار پیزومتریک در ۳۰ پیزومتر در هنگام انجام آزمایشات اندازه‌گیری شد در ادامه این پارامترها در مدل آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزاری مورد مقایسه آماری قرار داده شدند.

۱- خط نشت: خط نشت بدست آمده از مدل آزمایشگاهی سد خاکی غیرهمگن در زیر نشان داده شده است.

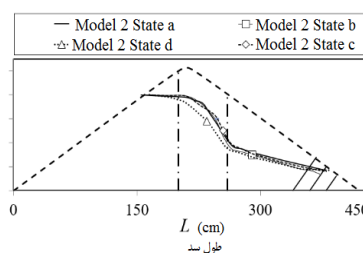
در فلو، مدل هندسی در برنامه PLXIS ایجاد شد. در مرحله دوم، ورود داده‌های مربوط به مصالح به کار رفته در بدنه سد در اولویت بود. لازم به ذکر است داده‌های مربوط به هدایت هیدرولیکی با استفاده از آزمایشات بار افتان و بار ثابت اندازه‌گیری شد و با مقایسه این مقادیر با جدول‌ها و روابط مختلف در نهایت مقدار قابل قبولی در نظر گرفته شد. در نهایت با ارایه مدل نرم‌افزاری همسان با مدل آزمایشگاهی آزمایشات مورد پیگیری قرار گرفت.

نتایج و بحث



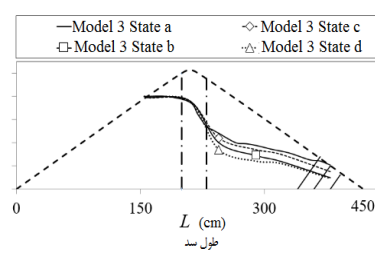
شکل ۱۲- مدل اول

Figure 12- The first model



شکل ۱۳- مدل دوم

Figure 13- The second model

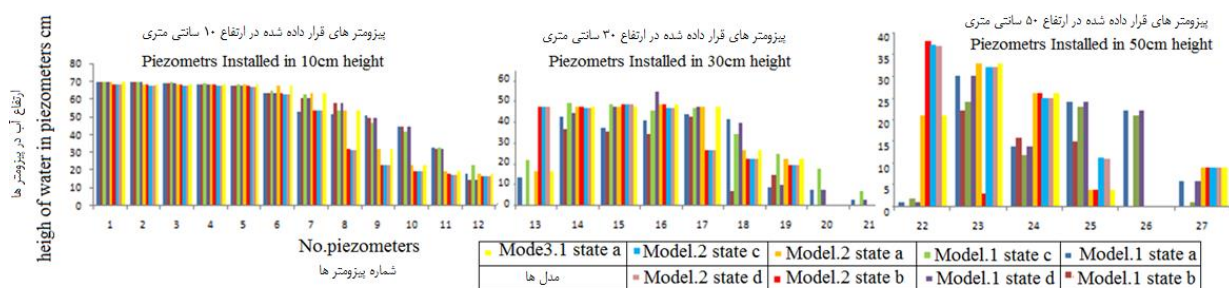


شکل ۱۴- مدل سوم

Figure 14- The third model

۲- بررسی داده‌های پیزومتری آزمایشگاهی و PLXIS با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS: ارتفاع آب در پیزومترها که در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده‌اند به صورت شکل (۱۵) می‌باشد.

پس از برداشت خطوط نشت و فشار پیزومترها در آزمایش مدل مقایسه‌ی آماری بین مدل نرم‌افزاری و مدل آزمایشگاهی صورت گرفت. این مقایسات در دو قسمت، در زیر آورده شده است.



شکل ۱۵- سطح آب پیزومتریک در پیزومترها

Figure 15- Height of water in piezometers in three models

PLXES V8.5: با اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی پوسته و هسته سد خاکی با از آزمایش بار افتان و بار ثابت و استفاده از این مقادیر در مدل نرم‌افزاری مدل نرم‌افزاری با مدل‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار داده شد. شکل ۱۶ اجرای مدل‌های آزمایشگاهی را در نرم‌افزار PLXIS نشان می‌دهد. برای مقایسه مدل نرم‌افزاری با مدل آزمایشگاهی از ۲۰ نقطه خط نشت استفاده شد. با مقایسه ارتفاع خط نشت در این نقاط مدل آزمایشگاهی و مدل فزاری خطای موجود محاسبه شد.

با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS داده‌های فشار آب منفذی در مدل نرم‌افزاری و همچنین پیزومترهای تعبیه شده در فلو، مقایسه‌ی آماری مورد مقایسه قرار داده شد و آزمون آماری P-value انجام شد.

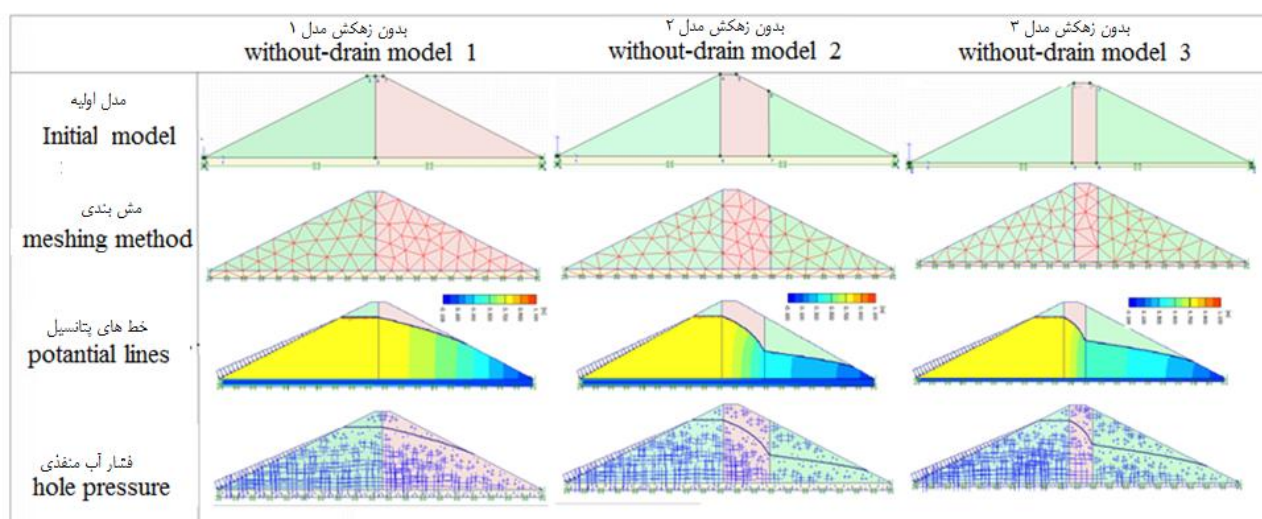
بر این اساس در سطح اعتماد ۹۰ تا ۹۸ درصد اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. همچنین مقداری خطای ریشه‌ی میانگین مربعات RMSE، برای همه‌ی حالات محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است.

۳- مقایسه خط نشت آزمایشگاهی مدل غیرهمگن با مدل نرم‌افزاری

جدول ۲- مقایسه‌ی داده‌های فشار آب منفذی با داده‌های پیزومتریک

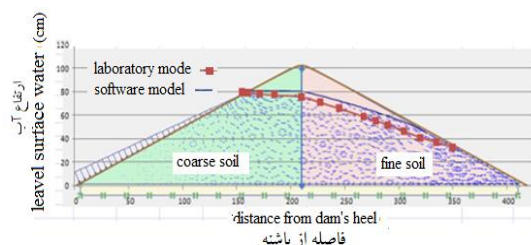
Table 2- Comparison of measured piezometers in laboratory and obtained piezometer pressure rate from software

مدل Model	1	2	3
P-value	0.03	0.095	0.062
آزمون (%) R^2	97	91	94
سطح اعتماد RMSE	0.561	0.424	0.475
مجموع مربعات خطاها			



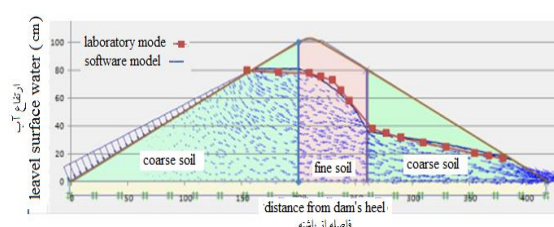
شکل ۱۶- ایجاد شرایط اولیه در مدل نرم‌افزاری PLXIS برای مدل یک و دو و سه برای حالت بدون زهکش

Figure 16- Steps of modeling in PLXIS software model for models no. 1, 2, & 3 in without-drain situation



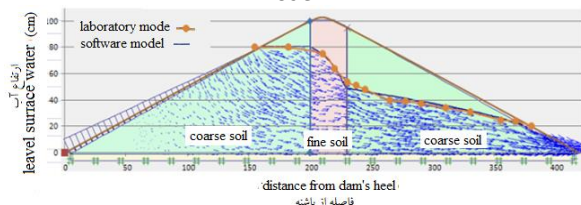
شکل ۱۷- مقایسه مدل ۱ آزمایشگاهی و مدل PLXIS

Figure 17- Comparison of laboratory model with PLXIS model 1



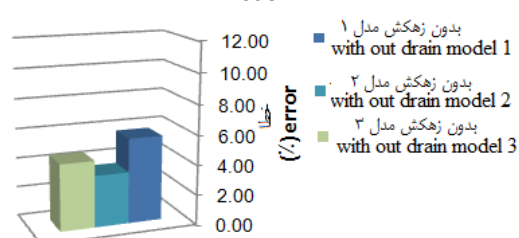
شکل ۱۸- مقایسه مدل ۲ آزمایشگاهی و مدل PLXIS

Figure 18- Comparison of laboratory model with PLXIS model 2



شکل ۱۹- مقایسه مدل ۳ آزمایشگاهی و مدل PLXIS

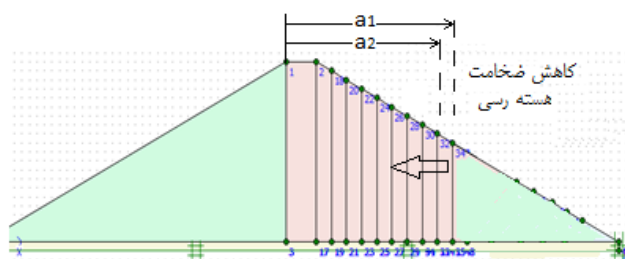
Figure 19- Comparison of laboratory model with PLXIS model 3



شکل ۲۰- خطای بین مدل نرم‌افزاری با آزمایشگاهی

Figure 20- Error between laboratory model and PLXIS model

شد. ابتدا مدلی همانند مدل‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار ترسیم شد. با وارد کردن پارامترهای مورد نیاز ضخامت هسته‌رسی با توجه به شکل ۲۱ تغییر داده شد. با ران کردن نرم‌افزار محل برخورد خط نشت با فصل مشترک پایین دست هسته رسی قایم این ارتفاع برداشت شد. با تغییر دادن مقدار هدایت هیدرولیکی پوسته و هسته (شکل ۲۲) این مدل‌سازی‌های نرم‌افزاری پیگیری شد. با استفاده از بی بعد کردن مقدار افت در هسته رسی و همچنین نرمالیزه کردن دیگر پارامترها به ازای نسبت هدایت هیدرولیکی هسته به پوسته سد خاکی و ارتفاع آب در مخزن بالا، میزان افت در هسته رسی قایم به ازای ضخامت‌های مختلف تعیین شد. در ادامه ارتفاع فیلتر پیشنهادی که در شکل ۲۲ نمایش داده شده است، با بدست آوردن ارتفاع خط نشت در فصل مشترک پایین دست هسته رسی و پوسته سد ارتفاع فیلتر پیشنهاد می‌گردد. این مورد در بخش ۵ و ۶ نتایج و بحث ارایه شده است.



شکل ۲۱- نحوه‌ی زون‌بندی برای سعی و خطا کردن
Figure 21- Changing the thickness of the clay core as shown in software model

مدل به ازای ضخامت مختلف هسته رسی و نسبت هدایت هیدرولیکی‌ها مختلف) بدست آمد. ارتفاع فیلتر پیشنهادی با ضریب اطمینان ۱/۲ ارایه شد. این ارتفاع در شکل ۲۴ با توجه به ضخامت هسته رسی و نسبت هدایت هیدرولیکی ارایه شده است

نتیجه‌گیری

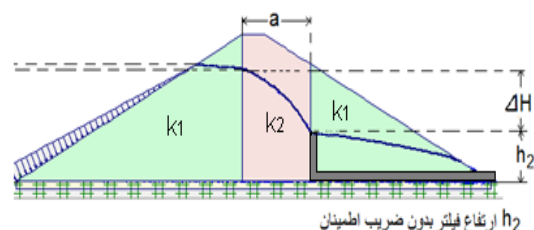
با توجه به موارد گفته شده از این تحقیق نتایج زیر قابل استحصال است.

۱- در برآورد ابعاد فیلتر در سدهای خاکی با هسته رسی قایم، پارامتر هدایت هیدرولیکی هسته به پوسته از اهمیت فراوانی برخوردار است با کاهش این مقدار از ۰/۰۰۲، ضخامت هسته رسی بر افت خط نشت در هسته‌ی رسی تأثیر کمتری پیدا خواهد کرد. این نتیجه به این خاطر است که با کم شدن این مقدار شکست خط نشت در فصل مشترک دو خاکر به ماکزیمم مقدار خود خواهد رسید. و اگر این مقدار باز کمتر شود خط نشت به صورت نفوذ قایم وارد هسته رسی می‌گردد.

در شکل‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مقایسه بین خط نشت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری و همچنین خطای آنها در شکل ۲۰ ارائه شده است.

مقایسه بین مدل آزمایشگاهی با نتایج بدست آمده از مدل نرم‌افزاری PLXIS نشان داد، مقایسه بین فشار آب منفذی و فشار آب در پیژومترها با استفاده از آزمون آماری P-value دارای سطح اعتماد بالایی می‌باشد. که در جدول (۲) قابل مشاهده می‌باشد. همچنین خطای بین خط نشت برداشتی در آزمایشگاه و خط نشت مدل نرم‌افزاری همان طور که در شکل (۲۰) مشخص شده است دارای خطای در حدود ۵ درصد است. با در نظر گرفتن این موارد می‌توان ادامه مطالعات را با استفاده از واسنجی بین مدل آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزاری پیگیری کرد.

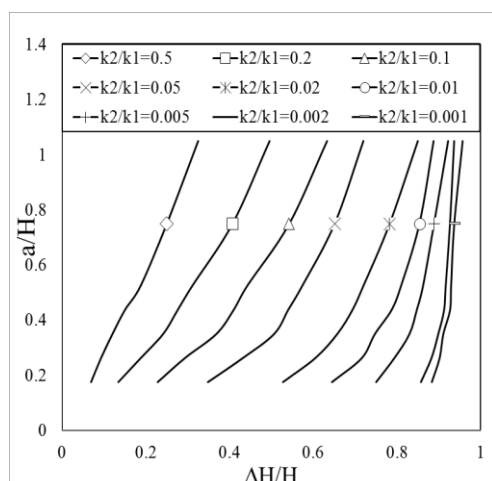
۴- استفاده از نرم‌افزار برای مدل‌ها: در ادامه تحقیق برای تعیین ارتفاع بهینه در سدهای رسی با هسته قایم از مدل نرم‌افزاری استفاده



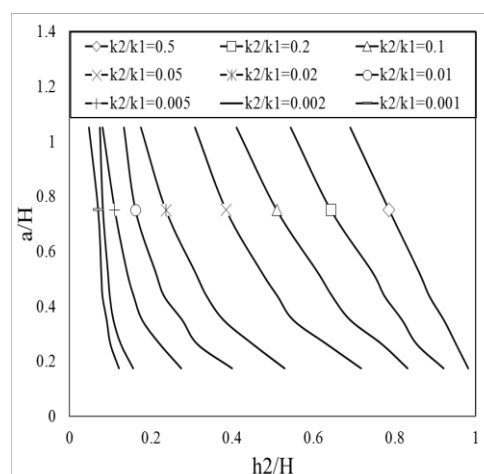
شکل ۲۲- نمایش پارامترهای مورد استفاده
Figure 22- Input parameters

۵- بدست آوردن میزان افت در خاک ریزدانه با استفاده از مدل نرم‌افزاری: با توجه به میزان افت سطح آب در خاک ریزدانه در داده‌های نرم‌افزاری، شکل ۲۳ ترسیم شد. این شکل میزان افت خط نشت را نسبت به ضخامت هسته رسی قایم برای هدایت هیدرولیکی‌ها مختلف نمایش می‌دهد. این نتیجه برداشت می‌گردد که هنگامی که $\frac{k_2}{k_1} \leq 0.002$ گردد دیگر ضخامت لایه ریز دانه بر افت کم می‌گردد.

۶- تعیین میزان ارتفاع فیلتر پیشنهادی با استفاده از مدل نرم‌افزاری: با داشتن خط نشت حاصله از مدل نرم‌افزاری در فصل مشترک پایین دست هسته و پوسته سد خاکی با هسته‌ی قایم، می‌توان محل برخورد خط نشت در خاک پوسته سدهای خاکی با هسته رسی قایم را پیش‌بینی نمود. با پیش‌بینی این مقدار از نرم‌افزار ارتفاع پیشنهادی فیلتری ارایه شد. به ازای اعمال و ساخت این فیلتر در پایین دست هسته رسی همواره به ازای ماکزیمم ارتفاع آب در مخزن سد خط نشت با نقطه‌ی بالایی فیلتر تماس پیدا خواهد کرد. این مورد باعث جلوگیری از بوجود آمدن پدیده پایپینگ در این نقطه می‌گردد. با داشتن این مقادیر که از مدل نرم‌افزاری (ران کردن ۲۷۰



شکل ۲۳- تأثیر ضخامت و نسبت هدایت هیدرولیکی‌ها بر افت در درشت‌دانه
Figure 23- Effect of thickness the clay and hydraulic conductivity on decline in water level



شکل ۲۴- تعیین ارتفاع فیلتر
Figure 24- Determinate of filter height

مدل قابل قبولی برای حل مسایل نشت می‌باشد و برای طراحی‌های مهندسی نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.

۲- نتایج نشان داد که در به ازای یک مقدار $\frac{k_2}{k_1}$ با افزایش ضخامت هسته رسی از ارتفاع فیلتر پایین دست کاسته می‌گردد.
۳- با توجه به مقایسه آماری بین مدل‌های آزمایشگاهی و مدل‌های نرم‌افزاری نتیجه‌گیری می‌گردد که مدل نرم‌افزاری PLXIS

منابع

- 1- Arulanandan K., Edward B., and Perry M. 1983. Members, Erosion in Relation to Filter Design Criterion in Earth Dams. J. Geotech. Engrg. 109:682-698.
- 2- Ching S., and Chang M. 1987. Boundary Element Method in Drawdown Seepage Analysis for Earth Dams. J. Comput. Civ. Eng. 1:83-98.
- 3- Eskorchi A. M. 2006. Soil Mechanic Laboratory. Third publish. Tehran University Publication. Tehran.
- 4- Karbar H., and Soroosh A. 2012. Numerical Comparing Behaviors Core dam with Vertical Core and Middle Slop Core. Journal of Civil engineering. (in Persian with English abstract)
- 5- Khor C., and Woo H. K. 1989. Investigation of Crushed Rock Filters for Dam Embankment. J. Geotech. Engrg. 115: 399-412.
- 6- Kharaghani S. 2005. Earth dam engineering. Shahid Chamran University Publication. Ahvaz.
- 7- Mishra G. C., and Singh A. K. 2005. Seepage through a Levee. International journal of geomechanics, ASCE 5:74-79.
- 8- Najafpoor Khoyegani N. 2013. Investigation Seepage Pattern in Earth Dam on Impermeable Base with and without Toe Drain by using physical Models. Agriculture Department. Shahrekord University.
- 9- Rahimi H. 2006. Earth Dam. Second Publish. Tehran University Publication. Tehran.
- 10- Shafahi Bajestani M. 2005. Hydraulic and Physical models. Second Publish. Shahid Chamran University Publication. Ahvaz.
- 11- Tahoni Sh. 2006. Implementation Principles in Earth Dam. 13th Publish. Thehran Pars Aien Institution. Tehran.
- 12- Terzaghi K. 1992. Der Grundbriich an Staveverken und Seine Verbutung. Die Wasser-Kraft, Vol. 17, 1922, pp. 445-449.
- 13- Terzaghi K. 1925. Erdbaumechnik auf Borden physikalischev, Grundlage, Devticke, Vienna, Australia, 1925.
- 14- Timothy D., Jafari N. H., Zhindon S. L., and Baghdagy A. 2016. Unsaturated and Transient Seepage Analysis of San Luis Dam J. Geotech. Geoenviron. Eng., 04016093.
- 15- Vafaeian M. 2006. Impalement Information for Earth Dam. Second Publish. Ardakan Knowledge Publication. Isfahan.
- 16- Yea G.G., Kim H. T., and Kim J. H. R. 2013. Rehabilitation of the Core Zone of an Earth-Fill Dam. J. Perform. Constr. Facil. 27: 485-495.

Determine the Height of the Vertical Filter for Inhomogeneous Dams with Vertical Clay Core

S. Salehi¹ - K. Esmaili^{2*}

Received: 17-11-2015

Accepted: 12-11-2017

Introduction: Today, always some occurrences threaten the earth. One of the most important of this event is seepage from earth dam. It can wash interior body of earth dam that finally might ruin whole the earth dam. For investigating these events in this research some experiments for expressing some alternatives to solve this problem in earth dam with clay core were investigated. In first step has been introduced new design in earth dam that it includes earth dam with clay core.

Materials and Methods: In order to determine the height of the filter after the vertical clay core in non-homogeneous earth dam, 3 experimental model with length 2/4 meter and a height of one meter and Body slope 1H: 2V was prepared. This model made in Shahrekord University. In flume that has 0.6 meter with, 6-meter length and 1-meter height. This flume has a drain in downstream which determine the discharge through earth dam. Front of flume made glass for visual inspection and behind flume made by steel sheet that was welded. Also, for embankment model, two types of fine-grained and coarse-grained soils were used that determine the range of hydraulic conductivity of soils was performed with Using aggregation experiments model and Soil Mechanics hydrometer. For embankment model use layer have 0.1 meter height and this layer was impacted after an after. Finally, dam was built. The slope of models was elected in reference that had normal range and had economical cases. In the first downstream the dam crest was used fine-grained soil and upstream of the dam crest was used coarse-grained soil finally experiment done. In models 2 and 3 with cutting fine grained soil from the toe of the dam to the dam crest vertical clay core was created. The parameter a/L was introduced. a is thickness of clay core and L is the Length base of the dam although in the second model $\frac{1}{7} = \frac{a}{L}$ and the third model $\frac{a}{L} = \frac{1}{10}$ was selected. Level of water in pound was performed in 3 water height 80 and 55 and 30 and in 3 level of water determinate pressure with 30 embedded piezometers and this data was used in method model .as well as phreatic line was determinate by using of wells and 30 embedded piezometers in the model. Seven holes were instated in body of earth dam in 3 models for visual inspection of phreatic line. In 3 model of earth dam decline clay core in laboratory for show this effect in discharge and phreatic line use Method model. Then the rates of decline in clay core in the laboratory with modeling in software PLAXIS V8.5 were compared. The rate of high filter after the clay core with safety factor 1.2 (Encounter Line Leak with 20% of the bottom filter) was introduced. Finally use SAS software to compare the result of data in filth and software after that comparing show can use software for continue the experiment with Method Model. With change the permeability in PLXIS V8.5 modeling another state. Permeability, this modeling showed that tackiness and permeability of vertical core soil effect in height of vertical filter in downstream. So, can decline this case with choose non-permeability in core. That show in result of this paper. With the class of soil and permeability and change the tackiness of core can estimate height of filter in downstream.

Results and Discussion: Finally, Analysis and comparison between water Failure in interface of fine-grained and coarse-grained soils, both of Software model and laboratory model have a relatively well fit. To obtain the height of Suggested filter, the software model was used to simulate the experiments and Subtracting the thickness of the fine-grained. By applying safety factor of 1.2, Height was designed to filter and after that the clay core was introduced. Software model results show that by increasing clay core thickness the angle of broken-seepage line is increased. Also, the experimental model can emphasize this matter. Finally, by using vertical clay core against the clay core with slop can improve the application of earth dam and by using his plan can improve and diminish the seepage from the earth dam body that this design process was expressed in this research.

Keywords: Height Filter, Model of non-homogeneous earth dam, Software PLAXIS V8.5, Thickness of the clay core

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor, Water and Science Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

(*- Corresponding Author Email: esmail@um.ac.ir)



ارزیابی تبخیر- تعرق ذرت و اجزای آن و ارتباط آنها با شاخص سطح برگ در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی

حسین دهقانی سانج^{۱*} - الهه کنعانی^۲ - سمیرا اخوان^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۸

چکیده

جداسازی تبخیر- تعرق به منظور شناخت و تعیین دقیق سهم هر یک از اجزای تبخیر- تعرق دارای اهمیت زیادی است و اساس بسیاری از طرح‌های مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب می‌باشد. پژوهش حاضر به منظور مقایسه تبخیر- تعرق ذرت و اجزای آن تحت دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در مزرعه الگوی معاونت آب و خاک وزارت جهاد کشاورزی واقع در کرج اجرا شد. نتایج نشان داد که مقدار ETC ذرت در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۳۷۷/۰۹ و ۳۷۱/۹۲ میلی‌متر بدست آمد که از این مقدار سهم اجزای تعرق گیاهی و تبخیر از سطح خاک در سیستم قطره‌ای سطحی به ترتیب ۲۰۰/۸۱ و ۱۷۶/۰۲ و در سیستم قطره‌ای زیرسطحی ۲۱۳/۰۴ و ۱۵۸/۸۱ میلی‌متر بدست آمد. همچنین مقدار تبخیر از سطح خاک در دوره‌های اولیه، توسعه و میانی به ترتیب برابر ۶۵/۸۳، ۳۴/۹۸ و ۷۳/۰۲ میلی‌متر برای سیستم قطره‌ای زیرسطحی و ۶۵/۷۳، ۳۷/۳۲ و ۱۱۸/۹۵ میلی‌متر برای سیستم قطره‌ای سطحی حاصل شد. کل مقدار تعرق گیاهی در دوره‌های اولیه، توسعه و میانی به ترتیب برابر ۱۲/۷۸، ۸۱/۳۱ و ۱۱۸/۹۵ میلی‌متر برای سیستم قطره‌ای زیرسطحی و برای سیستم قطره‌ای سطحی ۵/۸۸، ۷۶/۸۲ و ۱۱۸/۲۱ میلی‌متر بوده است. نتایج نشان داد که سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به سیستم قطره‌ای سطحی دارای تلفات تبخیر از سطح خاک کمتر و همچنین دارای میزان تعرق گیاهی بیشتری در طول فصل رشد ذرت می‌باشد که این می‌تواند در افزایش عملکرد گیاه ذرت نقش مهمی را ایفا کند. در این پژوهش روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ذرت به ترتیب با عملکرد خشک و تر ۲۶/۵۳ و ۷۶/۶۴ تن بر هکتار عملکرد بهتری را نسبت به سیستم قطره‌ای سطحی به خود اختصاص داد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر خاک، تعرق گیاهی، جداسازی، ذرت، میکرو لایسیمتر

مقدمه

جداسازی تبخیر- تعرق به اجزا مطلوب و نامطلوب بیان می‌شود که در آن تعرق معمولاً جزء مطلوب و تبخیر جزء نامطلوب در نظر گرفته می‌شود (۲). در نواحی خشک و نیمه‌خشک بخش قابل‌توجهی از بارندگی بر اثر تبخیر تلف می‌شود، حتی هنگامی که سطح خاک دارای پوشش گیاهی است، بسته به روش و استراتژی آبیاری، مرحله رشد و نوع گیاهان، حدود ۱۰ تا ۶۰ درصد میزان کل تبخیر- تعرق را تبخیر از سطح خاک تشکیل می‌دهد (۱۴).

با توجه به قرار گرفتن ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک و نیز تلاش برای بالا بردن بهره‌وری مصرف آب، لزوم شناخت تبخیر- تعرق و اجزای آن را بیش از پیش با اهمیت می‌کند. مطالعات نشان داده است تبخیر از سطح خاک در دوره‌ی رشد بیشتر گیاهان زراعی حدود ۳۰ درصد از تبخیر- تعرق کل را شامل می‌شود (۸). روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری و تعیین دقیق تبخیر- تعرق و اجزای آن وجود دارد که شامل لایسیمترهای وزنی، روش بیلان انرژی نسبت

در بخش کشاورزی برآورد صحیح تبخیر- تعرق به منظور تعیین شیوه‌های مدیریت آب، طراحی سیستم‌های آبیاری، تعیین رژیم آبیاری و محاسبه عملکرد محصول بسیار اساسی است (۷). جداسازی تبخیر- تعرق (E^1) به تبخیر از خاک (E^2) و تعرق از طریق روزنه گیاهان (T^3) یکی از بحث‌های مهم در تعیین نیاز آبی گیاه است، زیرا

۱- دانشیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، البرز، ایران
(*) نویسنده مسئول: Email: h.dehghansanij@areeo.ac.ir
۲ و ۳- کارشناس ارشد و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

بوون^(۱) (BREB)، جریان سنج‌های شیره گیاهی (SF^۲)، پالس حرارت خاک (SHP^۳) و میکرولاسیمترها است. دستیابی به سهم جداگانه اجزای تبخیر- تعرق به روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است.

تحقیقات زیادی در نقاط مختلف جهان به منظور جداسازی تبخیر- تعرق گیاهی با استفاده از روش‌های گوناگون روی گیاهان مختلفی صورت گرفته است (۶ و ۱۵ و ۱۳). از جمله پژوهش‌های صورت گرفته می‌توان از روش‌های اندازه‌گیری تبخیر با استفاده از میکرولاسیمترها در طول فصل رشد اشاره کرد، که در این تحقیقات هر دو جزء بطور مستقل اندازه‌گیری نشدند، بلکه از تفاضل مقدار تبخیر- تعرق و جزء تبخیر از سطح خاک سهم جزء تعرق را محاسبه

کردند (۳). در تحقیقی توسط لیو و همکاران (۱۸) در شمال کشور چین میزان تبخیر از سطح خاک به روش میکرولاسیمتری روی گیاه گندم و ذرت در سیستم آبیاری شیاری اندازه‌گیری شد و نتایج آن تحقیق نشان داد که تبخیر از سطح خاک ۳۰ درصد از مقدار کل تبخیر- تعرق این دو گیاه را به خود اختصاص داد. چن و همکاران (۶) در مطالعه‌ای روی دو گیاه گندم و ذرت با روش آبیاری شیاری در شمال چین میزان تبخیر از سطح خاک به روش میکرولاسیمتری و میزان تعرق گیاهی را از تفاضل مقدار تبخیر- تعرق و جزء تبخیر محاسبه و گزارش کردند که از کل مقدار تبخیر- تعرق ۱۰ تا ۶۰ درصد آن راسم تبخیر از سطح خاک تشکیل می‌دهد و سهم کمتری از آن را تعرق گیاهی تشکیل می‌دهد. در تحقیقی، فلوومینین و همکاران (۱۱) جداسازی تبخیر- تعرق در کشور برزیل بر روی قهوه که تحت سیستم بارانی آبیاری می‌شد انجام دادند، این محققان گزارش کردند که جزء تبخیر از سطح خاک ۰/۱۸ تا ۰/۶۱ درصد از مقدار تبخیر- تعرق گیاهی را به خود اختصاص داد. در سال ۲۰۱۳ در چین نیز سهم جزء تبخیر خاک و تعرق گیاهی ذرت با استفاده از روش میکرولاسیمتری که تحت سیستم شیاری آبیاری می‌شد مشخص شد. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که ۳۰ تا ۴۵ درصد از مقدار کل تبخیر- تعرق گیاه ذرت را تبخیر از سطح خاک شامل می‌شود، هم چنین این محققان گزارش کردند که نتایج تحقیقات آن‌ها تقریب خوبی از حاصل جمع E و T را در مقایسه با ET نشان می‌دهد (۱۰).

تحقیقات زیادی نیز وجود دارد که در آن‌ها جزء تبخیر خاک و جزء تعرق گیاهی را به طور جداگانه محاسبه کرده‌اند. از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیق انجام شده در کشور ژاپن توسط زگاف و همکاران (۲۳) بر روی گیاه ذرت تحت سیستم آبیاری بارانی اشاره کرد که میزان تبخیر از سطح خاک را به روش نسبت بیلان انرژی میکروبوون (M-BREB) و میزان تعرق گیاهی را به روش جریان

سنج شیره گیاهی (SF) اندازه‌گیری کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که نسبت تبخیر از سطح خاک به تبخیر- تعرق کل گیاه ۴۲ تا ۶۳ درصد و نسبت تعرق به تبخیر- تعرق کل ۲۵ تا ۵۸ درصد را شامل شد. در سال ۲۰۱۲ در منطقه نیمه‌خشک دشت بزرگ تگزاس تحقیقی به منظور جداسازی تبخیر- تعرق گیاه کتان که تحت سیستم قطره‌ای زیرسطحی آبیاری می‌شد انجام شد. در تحقیق آن‌ها تعرق گیاهی به روش جریان سنج شیره گیاهی (SF) و تبخیر خاک از تفاضل مقدار تبخیر- تعرق و جزء تعرق گیاهی اندازه‌گیری شد. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که تعرق گیاهی کتان حدود ۸۲ تا ۹۰ درصد از مقدار تبخیر- تعرق گیاه را به خود اختصاص داد (۵). جداسازی تبخیر- تعرق نیز در تاکستان‌های انگور انجام شد، از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیق فریرا و همکاران (۱۰) اشاره کرد که میزان تبخیر خاک به روش میکرولاسیمتری و میزان تعرق گیاهی به روش جریان سنج شیره گیاهی (SF) را در تاکستانی که با سیستم قطره‌ای آبیاری می‌شد اندازه‌گیری کردند. بر طبق نتایج این تحقیق حدود ۱۳ درصد به جزء تبخیر خاک و ۸۷ درصد از میزان کل تبخیر- تعرق به تعرق گیاهی اختصاص یافت. مطالعه‌ای توسط پابلیت و همکاران (۲۱) به منظور اندازه‌گیری تبخیر- تعرق درختان انگور و هرکدام از اجزای آن تحت سیستم قطره‌ای انجام شد که در آن تحقیق تبخیر- تعرق به روش ادی کوریانس (EC^۴)، تعرق با استفاده از جریان سنج‌های شیره گیاهی و تبخیر توسط میکرولاسیمتر اندازه‌گیری شد. بر طبق نتایج این تحقیق سهم تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاهی به ترتیب ۳۱ و ۶۹ درصد از تبخیر- تعرق کل گیاهی را شامل شد و سازگاری خیلی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر- تعرق به روش ادی کوریانس داشتند که تا حدی حاکی از قابل اعتماد بودن روش‌های بکار رفته می‌باشد. بنابراین باتوجه به اینکه لزوم شناخت و تعیین دقیق سهم هر یک از اجزای تبخیر- تعرق دارای اهمیت زیادی است و می‌توان با اعمال روش‌های مدیریتی مختلف بالأخص در مورد سیستم‌های نوین آبیاری که با هزینه‌ای بالا اجرا می‌شوند در کم کردن هرچه بیشتر تلفات تبخیر، بهبود آب مصرفی و همینطور افزایش عملکرد گیاه گام برداشت.

هدف از تحقیق حاضر جداسازی تبخیر- تعرق با استفاده از روش میکرولاسیمتری و مقایسه آن‌ها در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی و ارتباط بین شاخص سطح برگ با هر کدام از اجزاء تبخیر- تعرق می‌باشد که این می‌تواند در افزایش بهره‌وری آب آبیاری گیاه و عملکرد گیاه ذرت تحت سیستم‌های آبیاری قطره‌ای نقش مهمی را ایفا کند.

1- Bowen Ratio Energy Balance

2- Sap flow

3- Soil heat pulse

4- Eddy covariance

مواد و روش‌ها

مشخصات محل اجرای طرح

تحقیق در تابستان ۱۳۹۳ در مزرعه الگوی معاونت آب و خاک وزارت جهاد کشاورزی واقع در کرج با عرض جغرافیایی $35^{\circ}21'$ ، طول جغرافیایی $51^{\circ}38'$ و ارتفاع از سطح دریا برابر $1312/5$ متر انجام شد. طی مدت اجرای تحقیق، داده‌های هواشناسی از ایستگاه سینوپتیک هواشناسی کرج به صورت روزانه دریافت شد. برای اجرای پروژه ۸ عدد میکرو لایسیمتر استوانه‌ای حجمی در داخل خاک کار گذاشته شد. هر میکرو لایسیمتر دارای قطر ۴۰ سانتی‌متر و عمق ۷۰ سانتی‌متر بود. پس از کارگذاری میکرو لایسیمترها عملیات ریختن خاک به داخل آن‌ها شروع شد و برای جلوگیری از ورود آب از سطح زمین به لایسیمتر، دیواره‌های لایسیمتر تا ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از سطح

زمین قرار گرفت. شرایط آب و مواد غذایی به طور مطلوب و یکسان برای میکرو لایسیمتر فراهم شد. لایه‌های خاک درون میکرو لایسیمترها، مشابه خاک زمین‌های اطراف بود تا بیانگر شرایط طبیعی مزرعه باشد. برای انجام تحقیق از ۶ عدد میکرو لایسیمتر در سه تکرار استفاده شد و به ترتیب در سه عدد از آن‌ها سیستم قطره‌ای سطحی و سه عدد دیگر سیستم قطره‌ای زیرسطحی اعمال شد. در داخل هر میکرو لایسیمتر ۳ عدد بذرت ذرت علوفه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴ به صورت دستی با فواصل ۱۳ سانتی‌متر از یکدیگر به ترتیب بر روی یک ردیف و با عمق ۵ سانتی‌متر از سطح خاک در تاریخ ۱۳۹۳/۵/۸ کاشته شد. همچنین برای اندازه‌گیری تبخیر از سطح خاک دو عدد میکرو لایسیمتر فاقد کشت گیاه ذرت در داخل مزرعه کارگزاری شد (شکل ۱).

ب
bالف
a

شکل ۱- نمایی از طرح راه‌اندازی شده پژوهش (شامل گیاه و میکرو لایسیمتر) در سیستم‌های آبیاری الف- قطره‌ای سطحی و ب- قطره‌ای زیرسطحی

Figure 1- The layout of experimental setup (including plants and the micro lysimeter) in a- surface drip (DI) and b- subsurface drip (SDI), irrigation systems

در هکتار) در مرحله ۸ و ۹ برگی به صورت کود مایع به زمین داده شد. برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک داخل میکرو لایسیمترها در جدول ۱ ارائه شده است.

کود فسفات آمونیوم به مقدار (۲۵۰ کیلوگرم در هکتار) به انضمام نیمی از کود اوره مورد نیاز (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) در مرحله ۳ و ۴ برگی مورد استفاده قرار گرفت و نصف دیگر کود اوره (۲۰۰ کیلوگرم

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک
Table 1- Physicochemical properties of the soil

عمق خاک Soil depth (cm)	جرم مخصوص ظاهری خاک BD (g cm^{-3})	رطوبت وزنی در ظرفیت زراعی FC (%)	رطوبت وزنی در نقطه پژمردگی دائم WP (%)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})	بافت خاک Soil texture
0-20	1.42	22.5	9.8	7.8	1.41	لومی Loam
20-40	1.42	22.4	9.6	7.9	1.21	لومی Loam
40-60	1.42	22.1	9.5	8.14	2.46	لومی Loam

در اینجا: ET_c = تبخیر- تعرق بالقوه گیاه ذرت در فاصله اندازه گیری آب خاک در لایسیمتر (mm). I = مقدار آب آبیاری (mm). R = ارتفاع بارندگی (mm). D = مقدار آب زهکشی (mm). ΔS = تغییرات رطوبت خاک در لایسیمتر (mm) که از معادله ۵ محاسبه می‌شود:

$$\Delta S = S_t - S_{t-1} \quad (5)$$

که در آن S_t و S_{t-1} تغییرات رطوبت خاک در زمان‌های t و $t-1$ می‌باشد.

مقدار آب زهکش یا آب اضافی از منطقه ریشه در میکرو لایسیمترهایی که در آن‌ها سیستم قطره‌ای اعمال شده بود به صورت حجم سنجی از طریق استوانه مدرج اندازه‌گیری شد.

محاسبه تبخیر از سطح خاک (E)

در این پژوهش تبخیر از سطح خاک با استفاده از میکرو لایسیمتر اندازه‌گیری شد. میکرو لایسیمترهای استفاده شده دارای قطر داخلی ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر بودند. هنگامی که این میکرو لایسیمترها در درون خاک قرار گرفتند، لبه آنها حدود یک سانتی‌متر از سطح خاک بالاتر بود و نیز خاک درون میکرو لایسیمترها نیز حدود ۱ تا ۱/۵ سانتی‌متر زیر لبه قرار گرفت. میکرو لایسیمترها با خاک مشابه داخل میکرو لایسیمترهای حاوی کشت ذرت پر شدند و از تفاضل مقدار آب ورودی و زهکشی شده در بازه آبیاری متناسب با آبیاری لایسیمترهای ذرت ارتفاع تبخیر در آن بازه زمانی بدست آمد. در نهایت از تفاضل مقدار تبخیر- تعرق واقعی و مقدار تبخیر از سطح خاک تعرق گیاهی محاسبه گردید.

همچنین در طول دوره رشد گیاه ذرت عملیات اندازه‌گیری سطح، طول، عرض و ضخامت برگ با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری شاخص سطح برگ (LASER Area Meter) مدل (CI - 202) ساخت کشور آمریکا هر ده روز یک‌بار اندازه‌گیری شد.

تعدادی از متغیرهای هواشناسی در ماه‌های متناسب با تقویم زراعی ذرت از جمله میانگین دمای حداکثر و حداقل روزانه هوا، میانگین رطوبت نسبی و میانگین سرعت باد در منطقه در طول دوره مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به پارامترهای هواشناسی نشان داده شد که دمای هوا از ماه مرداد تا مهر کاهش پیدا کرد و گرم‌ترین و سردترین مقدار دما به ترتیب در ماه مرداد و مهر اتفاق افتاد. مقدار رطوبت نسبی از ماه مرداد تا مهر افزایش پیدا کرد و به میانگین مقدار در حدود ۵۰٪ در ماه مهر رسید، همچنین سرعت باد از ماه مرداد تا شهریور کاهش و از ماه شهریور تا مهر افزایش پیدا کرد.

آبیاری میکرو لایسیمترها به این صورت بود که برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی از لوله‌های ۱۶ میلی‌متری مجهز به قطره‌چکان از نوع Netafim با دبی ۴ لیتر بر ساعت و از نوع کنترل کننده فشار در داخل لوله با فاصله ۴۰ سانتی‌متر استفاده شد و قطره‌چکان‌های Netafim با استفاده از میکروتیوب متصل شده به لترال‌های آبیاری در عمق ۳۰ سانتی‌متری از خاک در زیر ردیف کشت کار گذاشته شدند و آب آبیاری از طریق میکروتیوب به عمق مورد نظر منتقل می‌شد. عملیات آبیاری پس از جوانه‌زنی و استقرار بوته‌ها از روی محاسبات انجام شد و براساس دور آبیاری دو روز در هفته در اختیار گیاه قرار گرفت. عمق آب آبیاری مورد نیاز بر اساس فرمول پنمن-مانتیت فائو (۲) و با استفاده از اطلاعات هواشناسی ثبت شده توسط ایستگاه سینوپتیک هواشناسی کرج محاسبه گردید. لازم به ذکر است که یک عدد کنتور حجمی نیز در مسیر جریان آب در لوله نصب شد که حجم آب ورودی به سیستم قطره‌ای سطحی و زیرسطحی را کنترل می‌کرد. به منظور برآورد مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع به روش پنمن-مانتیت فائو (۲) از فرمول زیر استفاده شد:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma (900 (T + 273) U_2 (e_s - e_a) + \gamma (1 + 0.34 U_2))}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

در اینجا: ET_0 : تبخیر- تعرق گیاه مرجع (mm day^{-1}); R_n : تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($\text{Mj m}^{-2} \text{ day}^{-1}$); T : متوسط دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$); U_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (m s^{-1}); Δ : شیب منحنی فشار بخار ($\text{Kpa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ : ضریب رطوبتی ($\text{Kpa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); G : شار گرمایی به داخل خاک ($\text{Mj m}^{-2} \text{ day}^{-1}$); $e_s - e_a$: کاهش فشار بخار اشباع (KPa) می‌باشد.

عمق ناخالص آب آبیاری از معادله ۲ محاسبه گردید (۱۶):

$$D_g = \frac{ET_0 \times K_c}{e} \quad (2)$$

در اینجا: D_g : عمق ناخالص آب آبیاری (mm); ET_0 : تبخیر- تعرق گیاه مرجع (mm day^{-1}); K_c : ضریب گیاهی، e : راندمان کاربرد آب آبیاری

که در این طرح با توجه به کوتاه بودن طول لترال‌ها و یکنواختی توزیع آب راندمان ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده است و در نهایت حجم آب مورد نیاز هر کدام از میکرو لایسیمترها از معادله ۳ محاسبه گردید:

$$V = D_g \times A \quad (3)$$

تبخیر- تعرق واقعی ذرت (ET_c)

تبخیر- تعرق واقعی گیاه ذرت با استفاده از بیلان آب خاک و از طریق معادله ۴ محاسبه شد:

$$ET_c = P + I - D - R - \Delta S \quad (4)$$

جدول ۲- پارامترهای هواشناسی منطقه مورد آزمایش
 Table 2- Climatic parameters of the experimental region

ماه Month	حد اقل دما T _{min} (°C)	حد اکثر دما T _{max} (°C)	میانگین دما T _{avg} (°C)	میانگین رطوبت نسبی RH _{avg} (%)	میانگین سرعت باد U _{2avg} (m s ⁻¹)
مرداد August	20.4	36.5	28.4	32	5.04
شهریور September	18.2	33.5	25.8	38	4.16
مهر November	11.5	24.7	17.8	49	4.82

نتایج و بحث

تبخیر- تعرق واقعی گیاه ذرت و اجزای آن

مقایسه نتایج بدست آمده در این تحقیق با نتایج دیگر محققان نشان می‌دهد که تفاوت در مقدار ET_c در مناطق مختلف به دلیل تفاوت در زمان کاشت و شرایط آب و هوایی مختلف و نوع روش‌های آبیاری می‌تواند متفاوت باشد. مطابق جدول بیشترین تبخیر- تعرق صورت گرفته برای هر کدام از روش‌های آبیاری در مرحله میانی از فصل رشد به ترتیب با مقادیر برابر ۱۵۵/۵۳ و ۱۵۳/۹۴ برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و قطره‌ای زیرسطحی رخ داده است.

تبخیر- تعرق واقعی ذرت در طول کل فصل رشد برای سیستم های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به ترتیب برابر ۳۷۷/۰۹ و ۳۷۱/۹۲ میلی‌متر بود (جدول ۳). براساس این نتایج بیشترین مقدار تبخیر- تعرق در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی مشاهده شد. تحقیقات نشان می‌دهد که دامنه‌ی ET_c ذرت از مقدار ۲۰۰ تا ۶۶۳ میلی‌متر برای شرایط آب و هوایی مختلف متغیر است (۱۹، ۲۰ و ۲۴).

 جدول ۳- عمق آب آبیاری و تبخیر- تعرق واقعی گیاه در دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی (ET_{cDI}) و زیرسطحی (ET_{cSDI})
 Table 3- Irrigation depth and actual evapotranspiration under surface (ET_{cDI}) and subsurface drip (ET_{cSDI}) irrigation system

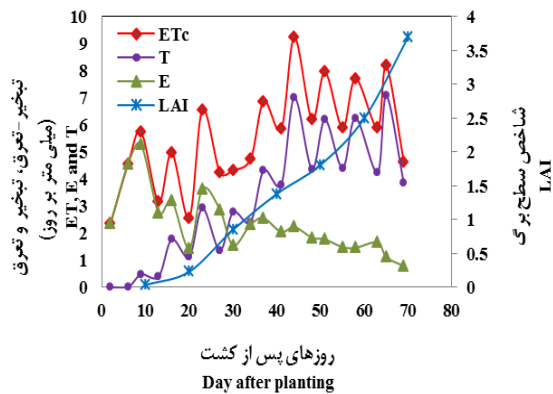
مراحل پس از کشت Stages after planting	تبخیر-تعرق قطره‌ای سطحی ET _c -SDI (mm)	تبخیر-تعرق قطره‌ای زیرسطحی ET _c -SDI (mm)	عمق آب آبیاری Irrigation depth (mm)
اولیه Initial	79	77.83	79.71
توسعه Development	142.56	140.15	143.41
میانی Middle	155.53	153.94	156.72
مجموع Sum	377.09	371.92	379.86

از آن شدت تبخیر- تعرق روند افزایشی داشته است. به‌طوری‌که، حدوداً ۴۸ روز پس از کشت، حداکثر تبخیر و تعرق در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به ترتیب ۹/۳۳ میلی‌متر بر روز و ۹/۲۴ میلی‌متر بر روز گزارش شد. دلیل آن را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با وارد شدن گیاه به مرحله توسعه و میانی از فصل رشد آن شاخص سطح برگ افزایش پیدا می‌کند که افزایش شاخص سطح برگ نیز به نوبه خود باعث افزایش تبخیر-تعرق گیاهی خواهد شد. در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به دلیل اینکه سطح خاک مرطوب کمتری با سطح آزاد هوا در تماس است، میزان تبخیر از

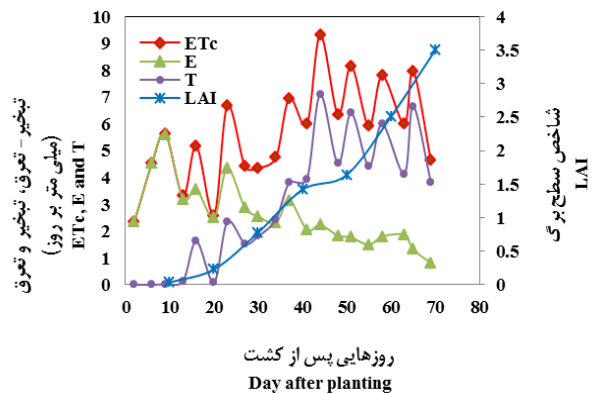
روند تغییرات تبخیر- تعرق واقعی ذرت، تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاهی و شاخص سطح برگ برای روزهای مختلف رشد تحت دو روش آبیاری اعمال شده در شکل ۲ نشان داده شده است. این نمودارها نشان می‌دهد مقدار تبخیر- تعرق و تعرق گیاهی ذرت تحت دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی (DI) و قطره‌ای زیرسطحی (SDI) از مرحله اولیه تا مرحله میانی از فصل رشد ذرت روند افزایشی داشت. به عبارت دیگر با توجه به شکل ۲ ابتدای مرحله اولیه که پوشش گیاهی کم است، این مقدار کوچک می‌باشد، تا ۲۰ روز بعد از اولین آبیاری و شروع رشد گیاه بین ۴ تا ۵ میلی‌متر در روز بوده و پس

میلی‌متر بر روز بود، و پس از آن مجدداً با روند کاهشی آن در ۶۹ روز پس از کشت برای دو سیستم قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به ترتیب به ۴/۶۵ و ۴/۱۲ میلی‌متر بر روز رسید.

سطح خاک نیز در مقایسه با روش آبیاری قطره‌ای سطحی کمتر می‌باشد، سپس به تدریج روند کاهشی تبخیر-تعرق مشاهده می‌شود. در مرحله میانی رشد، حداکثر شدت تبخیر-تعرق گیاه برای هر کدام از سیستم‌های قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۸/۱۹ و ۸/۱۷



ب
b



الف
a

شکل ۲- تغییرات تبخیر-تعرق واقعی، تعرق گیاه و تبخیر از سطح خاک در سیستم آبیاری: الف- قطره‌ای سطحی و ب- قطره‌ای زیرسطحی
Figure 2- Variation of actual evapotranspiration, transpiration and soil evaporation in irrigation systems: a - surface drip (DI) and b- subsurface drip (SDI)

اندازه‌گیری شده در طی فصل رشد ذرت در شکل ۲ نشان داد که در دوره رشد اولیه ذرت، شدت تبخیر از سطح خاک به علت سطح کم پوشش گیاهی در این مرحله بالا بوده و پس از آن به مرور زمان میزان تبخیر از سطح خاک به علت توسعه پوشش گیاهی کاهش یافته است. در ابتدای رشد گیاه که پوشش کامل نبوده و سطح خاک در تماس بیشتری با هوا بوده میزان تبخیر از سطح خاک بالا می‌باشد، اما به تدریج با افزایش پوشش گیاهی این نسبت کاهش یافته است، بطوری‌که با کامل شدن پوشش گیاه در مهر ماه کمترین مقدار را داشته است. بیشترین مقدار تبخیر از سطح خاک برای هر کدام از روش‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به ترتیب برابر ۵/۶۰ و ۵/۲۷ میلی‌متر بر روز، حدود ۹ روز پس از کشت در مرحله اولیه از دوره رشد ذرت رخ داده است.

مجموع مقادیر تبخیر-تعرق واقعی ذرت، تعرق گیاهی، تبخیر از سطح خاک، نسبت تعرق گیاهی به تبخیر-تعرق واقعی و نسبت تبخیر از سطح خاک به تبخیر-تعرق واقعی برای مراحل اولیه، توسعه و میانی از فصل رشد ذرت دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به ترتیب در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد کل مقدار تعرق گیاهی در هر کدام از دوره‌های اولیه، توسعه و میانی از فصل رشد در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی به ترتیب برابر ۵/۸۸، ۷۶/۸۲ و ۱۱۸/۲۱ میلی‌متر بر روز و در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به ترتیب برابر با ۱۲/۷۸، ۸۱/۳۱ و ۱۱۸/۹۵ میلی‌متر بر روز بود که بطور کلی در هر کدام از سیستم‌های

روند تغییرات تعرق گیاهی ذرت در دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در شکل ۲ نشان داد که از ابتدای مرحله اولیه تا مرحله میانی کشت ذرت به تدریج در حال افزایش بوده و روند صعودی را طی کرده است که این افزایش تعرق گیاهی ذرت را می‌توان این گونه بیان کرد که با سپری شدن هر روز از فصل رشد ذرت بر شاخ و برگ ذرت افزوده شده و شاخص سطح برگ و پوشش گیاهی بر روی زمین به اوج رشد خود می‌رسد که با افزایش پوشش گیاهی تعرق بیشتری از گیاه ذرت صورت گرفته و ماکزیمم مقدار آن در مرحله میانی از فصل رشد رخ می‌دهد. حداکثر مقدار تعرق گیاهی ذرت به ترتیب برابر ۷/۰۷ و ۷/۰۹ میلی‌متر بر روز برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و قطره‌ای زیرسطحی است که حدوداً ۴۸ روز پس از کشت اتفاق افتاده است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات ETc ذرت عمدتاً با تغییرات T کنترل شده بود زیرا تبخیر از سطح خاک یک نسبت خیلی کمی از تبخیر-تعرق را در مراحل توسعه و میانی به خود اختصاص داده بود و در طول فصل رشد ذرت با افزایش شاخص سطح برگ مقدار تبخیر کاهش یافته است، همچنین در مراحل اولیه و توسعه رشد گیاه مقدار تبخیر-تعرق و تبخیر در روش آبیاری قطره‌ای سطحی بیشتر از قطره‌ای زیرسطحی است، اما در مرحله میانی که شاخص سطح برگ در دو سیستم آبیاری به حد ماکزیمم خود می‌رسد دیگر اختلاف چندانی در بین اجزای تبخیر-تعرق دو روش آبیاری قابل مشاهده نیست.

همچنین تغییرات شدت تبخیر از سطح خاک در دوره زمانی

قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۲۰۰/۹۱ و ۲۱۳/۰۴ میلی‌متر شد. از کل مقدار تبخیر- تعرق گیاه ذرت به تعرق گیاهی اختصاص داده

جدول ۴- نسبت تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاهی ذرت به تبخیر- تعرق واقعی در سیستم‌های قطره‌ای سطحی و زیرسطحی
Table 4- Ratio of soil evaporation and corn transpiration to evapotranspiration in surface drip (DI) and subsurface drip (SDI) irrigation systems

سیستم آبیاری Irrigation system	مراحل فصل رشد Growth season stages	مجموع تبخیر- تعرق ΣET _c (mm)	مجموع تبخیر ΣE (mm)	مجموع تعرق ΣT (mm)	مجموع نسبت تبخیر- تعرق به تبخیر- تعرق ΣT/ET _c (%)	مجموع نسبت تبخیر- تعرق به تبخیر- تعرق ΣE/ET _c (%)
قطره‌ای سطحی Surface drip (DI)	اولیه Innitial	77.91	73.02	5.88	7.54	93.72
	توسعه Advance	142.57	65.73	76.82	53.88	46.10
	میانی Middle	155.53	37.32	118.21	76	23.99
قطره‌ای زیرسطحی Subsurface drip (SDI)	اولیه Innitial	77.84	65	12.78	16.42	83.50
	توسعه Advance	140.16	58.83	81.31	58.01	41.97
	میانی Middle	153.94	34.98	118.95	77.27	22.72

از فصل رشد و تعرق گیاهی ذرت در مرحله میانی رشد اختصاص داشت. بررسی مقادیر تبخیر- تعرق، تبخیر از سطح خاک و همین‌طور تعرق در دو سیستم آبیاری در مراحل اولیه رشد نشان می‌دهد، تبخیر- تعرق کل و تبخیر از سطح خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی کمتر از سیستم سطحی است، بنابراین مقدار تعرق در سیستم زیرسطحی بیشتر از سیستم سطحی خواهد بود که با نتایج تحقیقات اسفندیاری و همکاران (۸) همخوانی دارد.

همچنین در طول انجام تحقیق مقدار عملکرد خشک (Y_{dry}) و عملکرد تر (Y_{wet}) گیاه و نیز برخی از پارامترهای گیاهی از جمله شاخص سطح برگ (LAI)، ارتفاع بوته (H) و نیز قطر بوته گیاه (D) نیز تا مرحله برداشت گیاه اندازه‌گیری شد (جدول ۵).

همچنین نتایج جدول ۴ نشان داد که در مرحله اولیه‌ی رشد، در هر کدام از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۹۳ و ۸۳ درصد تبخیر- تعرق کل صرف تبخیر از سطح خاک شده است، که مینیمم مقدار کل سهم تبخیر به تبخیر- تعرق کل به ترتیب برابر ۳۷ و ۳۴ میلی‌متر در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در مرحله میانی اتفاق افتاد. در نهایت از کل مقدار تبخیر- تعرق گیاهی به ترتیب ۱۷۶/۰۲ و ۱۵۸/۸۱ میلی‌متر در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به تبخیر از سطح خاک اختصاص یافت. از نتایج جدول ۵ نیز مشاهده می‌شود که بیشترین سهم تبخیر- تعرق کل گیاه ذرت در هر کدام از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به تبخیر از سطح خاک در مرحله اولیه

جدول ۵- عملکرد بیولوژیکی (خشک و تر) و پارامترهای گیاهی ذرت در سیستم قطره‌ای سطحی و زیرسطحی
Table 5- Dry and wet biological yield and plant characteristics of corn in surface drip (DI) and subsurface drip (SDI) irrigations

سیستم‌های آبیاری Irrigation Systems	عملکرد Yield		پارامترهای گیاهی Plant characteristics		
	عملکرد خشک Y_{dry} (ton ha ⁻¹)	عملکرد تر Y_{wet} (ton ha ⁻¹)	LAI شاخص سطح برگ	ارتفاع H (cm)	قطر D (cm)
قطره‌ای سطحی Surface drip (DI)	23.19	58.54	3.42	169.24	2.76
قطره‌ای زیرسطحی Subsurface drip (SDI)	26.53	76.64	3.70	179.33	2.90

بود. باتوجه به شکل مشاهده می‌شود که زمانی که LAI کوچکتر از مقدار ۳ بود نسبت T/ETc افزایش چشمگیری داشت و پس از آن با یک نسبت خیلی کمی در زمانی که LAI بزرگتر از ۳ است روند افزایشی داشته است. در این پژوهش T/ETc به عنوان تابعی از LAI با یک تابع پلی‌نومینال به صورت زیر ارائه شد:

$$Y = 9.324 X^2 + 53.32 X + 7.617 \quad (۶)$$

قطره‌ای سطحی $R^2 = 0.951$

$$Y = 9.899 X^2 + 54.49 X + 13.42 \quad (۷)$$

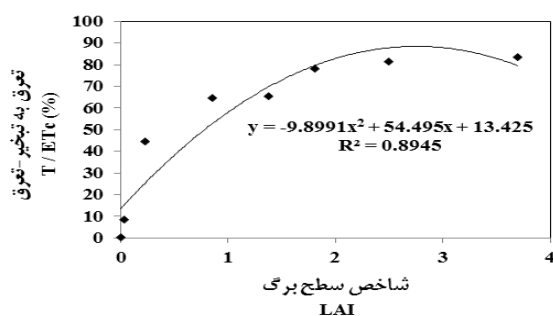
قطره‌ای زیرسطحی $R^2 = 0.894$

معادلات ۶ و ۷ با ضرایب تعیین (R^2) بالا نشان می‌دهند که تعرق به عنوان تابعی از پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ مطرح است. تعدادی از مطالعات نشان دادند که اغلب هنگامی که LAI بیشتر از ۳ بود تغییرات تعرق با افزایش LAI روند افزایشی کندی را دنبال می‌کند که با نتایج تحقیقات ریتچی و برنت (۲۲)، برن و همکاران (۳) و کریستنسن (۱۷) مطابقت دارد.

نتایج ارائه شده در جدول ۵ نشان داد که سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی دارای مقادیر عملکرد بیولوژیک بالاتر و همچنین مقادیر بالاتری در پارامترهای گیاهی نسبت به سیستم قطره‌ای سطحی بود. دلیل این امر را می‌توان آن دانست که آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به دلیل کاهش تبخیر، کنترل بهتر علف‌های هرز و رساندن مستقیم آب به منطقه توسعه ریشه نقش بسزایی در افزایش عملکرد ذرت دارد.

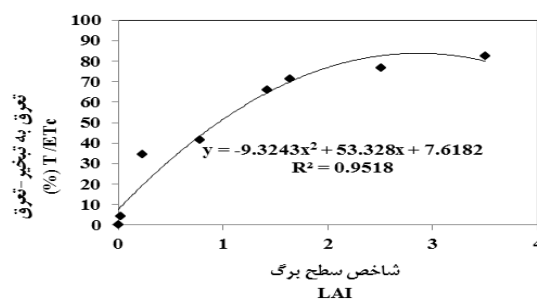
ارتباط بین تعرق و تبخیر به تبخیر- تعرق (T/ETc) و شاخص سطح برگ (LAI)

در شکل ۳ و ۴ به ترتیب روند تغییرات تعرق به تبخیر- تعرق (T/ETc) و روند تغییرات تبخیر به تبخیر- تعرق (E/ETc) و شاخص سطح برگ (LAI) برای گیاه ذرت در دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی ارائه شده است. شکل ۳ نشان می‌دهد که نسبت بین T/ETc با پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ ارتباط خیلی نزدیکی دارد. مقادیر T/ETc از صفر تا حدود ۹۰ درصد متغیر



ب

b

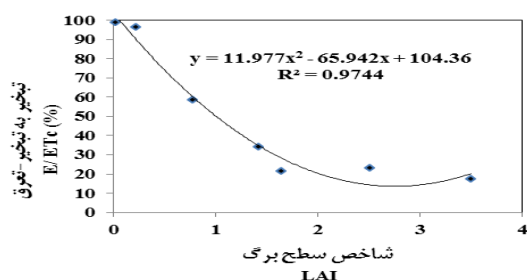


الف

a

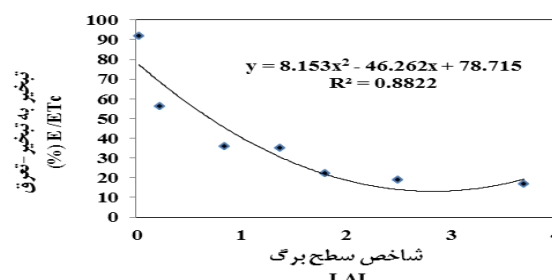
شکل ۳- ارتباط بین نسبت تعرق گیاهی به تبخیر- تعرق و شاخص سطح برگ در سیستم آبیاری الف- قطره‌ای سطحی و ب- قطره‌ای زیرسطحی

Figure 3- Relationship between ratio of transpiration to evapotranspiration and leaf area index in a: surface drip (DI) and b: subsurface drip (SDI) irrigation system



ب

b



الف

a

شکل ۴- ارتباط بین نسبت تبخیر از سطح خاک به تبخیر- تعرق و شاخص سطح برگ در سیستم آبیاری الف- قطره‌ای سطحی و ب- قطره‌ای زیرسطحی

Figure 4- Relationship between ratio of evaporation to evapotranspiration and leaf area index in a: surface drip (DI) and b: subsurface drip (SDI) irrigation systems

اجزاء تعرق گیاهی و تبخیر از سطح خاک در طول دوره رشد به ترتیب ۲۰۰/۸۱ و ۱۷۶/۰۲ برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی قطره‌ای سطحی و ۲۱۳/۰۴ و ۱۵۸/۸۱ برای سیستم قطره‌ای زیرسطحی بدست آمد. بطور کلی در هر کدام از سیستم‌های قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۲۰۰/۹۱ و ۲۱۳/۰۴ میلی‌متر از کل مقدار تبخیر- تعرق کل گیاه ذرت به تعرق گیاهی اختصاص داده شد. همچنین در مرحله اولیه‌ی رشد، در هر کدام از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به ترتیب تقریباً حدود ۹۳ و ۸۳ درصد تبخیر- تعرق کل صرف تبخیر از سطح خاک شده است، که مینیمم مقدار کل سهم تبخیر به تبخیر- تعرق کل به ترتیب برابر ۳۷ و ۳۴ میلی‌متر در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در مرحله میانی اتفاق افتاد. در نهایت از کل مقدار تبخیر- تعرق کل گیاهی به ترتیب ۱۷۶/۰۲ و ۱۵۸/۸۱ میلی‌متر در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به تبخیر از سطح خاک اختصاص یافت. با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق مشخص شد که بیشترین مقدار تبخیر از سطح خاک در هر دو سیستم آبیاری به ترتیب در مرحله اولیه رشد صورت گرفت. بیشترین مقدار تعرق گیاهی نیز برای هر کدام از سیستم‌های قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در مرحله میانی از فصل رشد زمانی که شاخص سطح برگ گیاه به مقدار ماکزیمم خود رسیده بود رخ داد. با توجه به نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در مقایسه با سیستم قطره‌ای سطحی دارای مقدار تبخیر از سطح خاک کمتر و تعرق گیاهی بیشتری بوده است. همچنین ارزیابی عملکرد گیاه و اجزای آن نیز نشان داد که آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به دلیل کاهش تبخیر، کنترل بهتر علف‌های هرز و رساندن مستقیم آب به منطقه توسعه ریشه نقش بسزایی در افزایش عملکرد داشت.

بعلاوه E/ETc نیز به عنوان تابعی از LAI با یک تابع پلی‌نومیل به صورت زیر ارائه شد:

$$Y = 11.97 X^2 + 65.94 X + 104.3 \quad (8)$$

قطره‌ای سطحی $R^2 = 0.974$

$$Y = 8.153 X^2 + 6.26 X + 78.71 \quad (9)$$

قطره‌ای زیرسطحی $R^2 = 0.882$

معادلات ۸ و ۹ با ضرایب تعیین (R^2) بالا نشانگر این است که تبخیر از سطح خاک به عنوان تابعی از پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ بود. با توجه به نمودار شکل ۴ مشاهده می‌شود که اغلب هنگامی که LAI کمتر از مقدار ۳ بود تغییرات تبخیر با افزایش LAI روند کاهشی سریعی را دنبال می‌کند و پس از آن با یک نسبت خیلی کمی در زمانی که LAI بزرگتر از ۳ است روند کاهشی را همچنان طی کرده است. همانطور که نمودار نشان می‌دهد نسبت تبخیر از سطح خاک به تبخیر- تعرق گیاه در برابر تغییرات شاخص سطح برگ نسبت عکس دارند یعنی افزایش LAI باعث کاهش E/ETc می‌شود. نتایج ارائه شده و روابط پیشنهادی می‌تواند به بر آورد بهتر آب مورد نیاز محصول و برنامه‌ریزی دقیق آبیاری در طول کل فصل رشد محصول کمک کند ولی باید در مکان‌های دیگر تحت خاک و شرایط آب و هوایی متفاوت مورد آزمایش قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج تحقیقات در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقدار کل ETc برای ذرت در منطقه مورد مطالعه برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۳۷۷/۰۹ و ۳۷۱/۹۲ میلی‌متر بدست آمد. ماکزیمم ETc و T برای هر دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در زمان ۴۸ روز پس از کشت در مرحله میانی از فصل رشد گیاه ذرت رخ داد. از کل مقدار تبخیر- تعرق سهم هر کدام از

منابع

- 1- Agam N., Evett S.R., Tolk J.A., Kustas W.P., Colaizzi P.D., Alfieri J.G., Mckee L.G., Copeland K.S., Howell T.A., and Chavez J.L. 2012. Evaporative loss from irrigated inter rows in a highly advective semi-arid agricultural area. *Advance in Water Resources*, 50: 20–30.
- 2- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. *Crop Evapotranspiration – Guide-lines for Computing Crop Water Requirements*. FAO, Rome.
- 3- Brun L. J., Kanemasu E. T., and Powers W. L. 1972. Evapotranspiration from soybean and sorghum fields. *Agronomy Journal*, 64(2): 145-148.
- 4- Bufon V.B., Lascano R.J., Bednarz C., Booker J.D. and Gitz D.C. 2012. Soil water content on drip irrigated cotton: comparison of measured and simulated values obtained with the Hydrus 2-D model. *Irrigation Science*, 30: 259–273.
- 5- Campbell G.S., Calissendorff C., and Williams J.H. 1991. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. *Soil Science Society America Journal*. 55: 291–293.
- 6- Chen S., Zhang X., Sun H., Ren T., and Wang Y. 2010. Effects of winter wheat row spacing on evapotranspiration, grain yield and water use efficiency. *Agricultural water management*, 97: 1126–1132.

- 7- Eberbach P.L., Humphreys E., and Kukal S.S. 2011. The effect of rice straw mulch on evapotranspiration, transpiration and soil evaporation of irrigated wheat in Punjab, India. *Agricultural Water Management*, 98(12): 1847-185.
- 8- Esfandyari S. 2013. Evaluation of fertigation effect under drip irrigation systems (surface and subsurface) on root development, yield and corn evapotranspiration. Ph.D Dissertation of Irrigation and Drainage Engineering, Ferdowsi University of Mashhad. (in Persian with English abstract)
- 9- Fan Z., Chai Q., Huang G., Yu A., Huang P., Yang C., Tao Z., and Liu H. 2013. Yield and water consumption characteristics of wheat/maize intercropping with reduced tillage in an oasis region. *European Journal of Agronomy*, 45: 52-58.
- 10- Ferreira M.I., Silvestre J., Conceição N., and Malheiro A.C. 2012. Crop and stress coefficients in rainfed and deficit irrigation vineyards using sap flow techniques. *Irrigation Science*, 30: 433-447.
- 11- Flumignan D.L., de Faria R.T., and Prete C.E.C. 2011. Evapotranspiration components and dual crop coefficients of coffee trees during crop production. *Agricultural Water Management*, 98: 791-800.
- 12- Ham J.M., Heilman J.L. and Lascano R.J. 1990. Determination of soil water evaporation and transpiration from energy balance and stem flow measurements. *Agricultural Forest Meteorology*, 52: 287-301.
- 13- Heitman J.L., Xiao X., Horton R. and Sauer T.J., 2008. Sensible heat measurements indicating depth and magnitude of subsurface soil water evaporation. *Water Resource, Research*, 44: 1-7.
- 14- Hillel D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, London, UK/San Diego, CA.
- 15- Kang S., Gu B., Du T. and Zhang, J. 2003. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. *Agricultural Water Management*. 59: 239-254.
- 16- Kosari H. 2009. Evaluation of Soil surface energy balance to estimation of evapotranspiration and its components in surface and sub-surface drip irrigation systems. Irrigation and Drainage Master's thesis, University of Tehran. (in Persian).
- 17- Kristensen K. J. 1974. Actual evapotranspiration in relation to leaf area. *Hydrology Research*, 5(3): 173-182.
- 18- Liu C., Zhang X., and Zhang Y. 2002. Determination of daily evaporation and evapo-transpiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agricultural Forest Meteorology*, 111: 109-120.
- 19- Liu H., Wang X., Zhang X., Zhang L., Li Y., and Huang G. 2017. Evaluation on the responses of maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water use efficiency to drip irrigation water under mulch condition in the Hetao irrigation District of China. *Agricultural Water Management*, 179: 144-157.
- 20- Payero J. O., Tarkalson D. D., Irmak S., Davison D., and Petersen J. L. 2008. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 95(8): 895-908.
- 21- Poblete-Echeverría C., Ortega-Farías S., Zúñiga M., and Fuentes S. 2012. Evaluation of compensated heat-pulse velocity method to determine vine transpiration using combined measurements of eddy covariance system and microlysimeters. *Agricultural Forest Meteorology*, 109: 11-19.
- 22- Ritchie J. T., and Burnett E. 1971. Dryland evaporative flux in a subhumid climate: II. Plant influences. *Agronomy Journal*, 63(1): 56-62.
- 23- Zeggaf A.T., Takeuchi S., Dehghanisanij H., Anyoji H., and Yano T. 2008. A Bowen ratio technique for partitioning energy fluxes between maize transpiration and soil surface evaporation. *Agronomy Journal*, 100: 988-996.
- 24- Zhang H., Xiong Y., Huang G., Xu X., and Huang Q. 2017. Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao Irrigation District. *Agricultural Water Management*, 179: 205-214.

Evaluation of Corn Evapotranspiration and its Components and Relationship between Leaf Area Index and Components in Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems

H. Dehghanisanij^{1*} – E. Kanani² – S. Akhavan³

Received: 08-05-2017

Accepted: 09-12-2017

Introduction: Partitioning of evapotranspiration (ET) into evaporation from the soil (E) and transpiration through the stomata of plants (T) is important in order to assess biomass production and the allocation of increasingly scarce water resources. Generally, T is the desired component with the water being used to enhance plant productivity; whereas, E is considered a source of water loss or inefficiency, and is the basis of the management and organization of water resources. The present investigation was carried out with the objectives evaluation of corn evapotranspiration and its components and relationship between leaf area index and components in surface and subsurface drip irrigation systems.

Materials and Methods: The pilot farm were located in the water and soil department of the ministry of agriculture in Karaj, Iran (latitude of 38°51' N and longitude of 21°35' W, 1312.5 m above sea level). For implementation project was placed 8 volume micro-lysimeters in the soil, which were filled with soil excavated from the study site. The soil inside of micro-lysimeter and the soil of the surrounding study had the same physical-chemical characteristics. The corn was irrigated with surface drip (DI) and subsurface drip irrigation (SDI) system, that was installed just prior to planting in 2014 in a field that was planted to sprinkler-irrigated corn. Daily crop actual evapotranspiration (ET_c) of each micro-lysimeter was calculated by applying the water balance method and soil evaporation was measured with micro-lysimeters. Finally, plant transpiration was calculated from difference between the actual evapotranspiration value and amount of evaporation from the soil surface. Leaf area index (LAI), was measured, and it was measured with the electronic leaf area-meter, CI – 202 seven times during the growing season. This method provides an indication of the plant growth.

Results and Discussion: The obtained results indicated that actual corn evapotranspiration was 377 and 371.92 mm for surface drip and subsurface drip irrigation systems, respectively. The value of corn evapotranspiration under surface drip and subsurface drip irrigation increased from initial, to middle season stages. The maximum daily values of ET_c occurred on 48 days after planting in middle season stages. The total value of transpiration plant was 5.88, 76.82 and 118.21 mm for surface drip irrigation system and 12.78, 81.31 and 118.95 mm for subsurface drip irrigation system in the initial, advance, and middle season stages, respectively. Sum evaporation from the soil surface and crop transpiration was 200.81 and 176.02 mm for surface drip irrigation system and 213.04 and 158.81 mm for subsurface drip irrigation system. So, amount of evaporation from the soil surface was 73.02, 65.73 and 37.32 mm for surface drip irrigation system and 65, 58.83 and 34.98 mm for subsurface drip irrigation system in the initial, advance, and middle season stages, respectively. In surface drip and subsurface drip irrigation was allocated approximately 93 and 83 percent of evapotranspiration to evaporation from the soil surface respectively. The minimum daily values of E/ET_c were 37 and 34 mm for surface drip and subsurface drip irrigation systems respectively, and occurred in middle season stages. Amount of transpiration was 5.88, 76.82 and 118.21 mm for surface drip irrigation system 12.78, 81.31 and 118.95 mm for subsurface drip irrigation for the initial, advance and middle season stages, respectively. The relationship between T/ET_c and LAI was fitted to a polynomial equation with significant correlation coefficients, R² = 0.95 and 0.89 for surface drip and subsurface drip irrigation systems, respectively. T/ET_c started from 0 at sowing, and reached to its maximum at the middle growth stage or when LAI reached to about 3.0. Also, the relationship between E/ET_c and LAI was fitted to a polynomial equation with significant correlation coefficients, R² = 0.97 and 0.88 for surface drip and subsurface drip irrigation systems respectively, and reached to its minimum at the middle growth stage. Also the results showed that subsurface drip irrigation systems have higher biological yield and higher values for plant parameters in compared to surface drip

1- Associate Researcher, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Alborz, Iran

(*- Corresponding Author Email: h.dehghansanij@areeo.ac.ir)

2 and 3- Master Student and Assistant Professor, Department of Water Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

irrigation system that it shows subsurface drip irrigation system due to evaporation reduction, better weed control and direct transport of water to the developmental zone has a significant role in increasing corn yield.

Conclusion: The results of this study indicated that soil evaporation losses in subsurface drip irrigation system had lower than surface drip irrigation system. Also, had higher transpiration in the growth season. This could perform important role on yield of crop. These results should help the precise planning and efficient management of irrigation for these crops in this region.

Keywords: Corn, Micro Lysimeter, Partitioning, Soil evaporation, Transpiration



پیش‌بینی جریان رودخانه کشکان با استفاده از ترکیب روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، آنالیز موجک و K- نزدیک‌ترین همسایه

داریوش یاراحمدی^۱ - حمید میرهاشمی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۱۵

چکیده

پیش‌بینی دقیق هیدرولوژی و منابع آب می‌تواند اطلاعاتی مفیدی برای برنامه‌ریزی شهری، آمایش زمین، طراحی پروژه‌های شهری و مدیریت منابع آب ارائه دهد. در این مطالعه با در نظر گرفتن اهمیت قابل توجهی که رودخانه کشکان در تأمین بخش مهمی از آب رودخانه کرخه و مشروب ساختن زمین‌های کشاورزی استان لرستان دارد مدل پیش‌بینی سری زمانی جریان این رودخانه با استفاده از روش‌های K- نزدیک‌ترین همسایه (K-NN)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ترکیب آنالیز موجک (WT) اجرا شد. در این خصوص ابتدا با استفاده از نمایه هرست، حافظه سری زمانی رودخانه یاد شده به مقدار ۰/۶ به دست آمد که نشان از حافظه بلندمدت و رفتار دینامیکی سیگنال سری زمانی آن داشت. در ادامه با در نظر گرفتن اینکه سری زمانی جریان رودخانه تابعی از سری‌های زمانی با تأخیر ۱-۳-۷-۱۰ و ۱۵ روز است. فرآیند مدل‌سازی سیگنال رواناب با استفاده از دو روش K-NN و ANN انجام گرفت. در گامی دیگر سری زمانی سیگنال رواناب با استفاده از موجک مادر میر، به ۴ زیر سیگنال تجزیه شد که با اتخاذ این زیرسیگنال‌ها به جای سیگنال اصلی، مدل‌های ترکیبی K-NN-WT و ANN-WT جهت شبیه‌سازی رواناب اجرا شدند. نتایج حاصل از سنجش‌های کارایی عملکرد مدل نشان دادند که مدل K-NN با خطای ۴/۶ درصد و ضریب همبستگی ۰/۹ از عملکرد مناسب‌تری نسبت به شبکه عصبی که متحمل خطاهای نامتقارنی شده بود برخوردار است. از سوی دیگر ترکیب آنالیز موجک عملکرد هر دو مدل بهبود پیدا کرد که در این خصوص مدل ANN-WT با خطای ۱/۲ درصد و ضریب همبستگی ۰/۹۸۹ شبیه‌سازی دقیق‌تری را نسبت به سه مدل دیگر انجام داد.

واژه‌های کلیدی: رودخانه کشکان، سیگنال سری زمانی، موجک میر، نمایه هرست

مقدمه

عوارض کوهستانی و دشتی هستند و همچنین از کاربری‌های پیچیده و ساده برخوردارند، عملی بغرنج بوده، چراکه جریان‌های معمول و حدی رودخانه در هر بخش از این حوضه‌های وسیع، وابسته به متغیرهای زیادی هستند که وزن و نوع هر یک از این متغیرها در بخش‌های مختلف حوضه از مقادیر متفاوتی برخوردار است. از سویی، به سبب پیچیدگی و عدم دانش کافی در مورد فرآیندهای فیزیکی چرخه هیدرولوژی و عدم توانایی در دخالت دادن تمام متغیرهای مؤثر در مقدار جریان رودخانه، به نظر می‌رسد که ساخت مدل‌های پیش‌بینی مرسوم با درجه دقت بسیار بالا، بسی دشوار خواهد بود. از این گذشته، اساس بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها در فرآیندهای هیدرولوژیکی و تصمیمات بهره‌برداری از منابع آب بر پایه‌ی پیش‌بینی و تحلیل سری‌های زمانی است. به‌عنوان نمونه، بهره‌برداری در زمان واقعی از مخازن سدها نیازمند آگاهی از آورد جریان ورودی به مخزن در آینده بوده که این پروسه به‌وسیله پیش‌بینی سری زمانی جریان رودخانه امکان‌پذیر است (۱۰). به عبارتی مدل‌سازی سری‌های زمانی

پیش‌بینی و مدل‌سازی جریان رودخانه، گامی اساسی در راستای برنامه‌ریزی، طراحی و بهره‌برداری از سیستم منابع آب (۱۸) و مدیریت مسائل منوط به آن همچون خشک‌سالی و سیلاب‌های مخرب در حوضه‌های آبریز است (۲۴)؛ زیرا کمبود و مازاد جریان رودخانه به ترتیب منجر به خسارات مالی (خشک‌سالی) و جانی - مالی (سیلاب) خواهد شد (۸). به‌طوری‌که چنین پیش‌بینی‌های از جریان رودخانه با فراهم کردن هشدارهای لازم در مورد رخداد سیل و کمک به تنظیم جریان خروجی منابع آب در هنگام پایین بودن تراز جریان رودخانه، به مدیریت منابع آب کمک می‌کنند (۲). لازم به ذکر است که فرآیند مدل‌سازی و پیش‌بینی در حوضه‌های وسیعی که حاصل درهم‌تنیدگی

۱- دانشیار آب و هواشناسی گروه جغرافیا، دانشگاه لرستان

۲- دکترای آب و هواشناسی و مدرس گروه جغرافیا، دانشگاه لرستان

(Email: climate90@yahoo.com)

(*)- نویسنده مسئول:

به منظور تولید داده و پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی، یک گام مهم در طراحی و تحلیل حساسیت منابع آب است (۱۹). چنانکه بسیار از فعالیت‌های مرتبط با برنامه‌ریزی و اجرای مؤلفه‌های سیستم منابع آب نیازمند پیش‌بینی رخدادهای آینده است (۱۲) تا بر این اساس با مدیریت خشک‌سالی و سیلاب، خسارات ناشی از آن‌ها تا حد ممکن کمینه شود (۲۲). در این راستا، پژوهش‌های گسترده‌ای به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی جریان رودخانه در قالب مدل‌های آماری، تجربی، احتمالاتی و اخیراً هوش مصنوعی صورت گرفته که عمده این پژوهش‌ها در راستای کاهش عدم قطعیت و خطای پیش‌بینی و همچنین ارزیابی میزان کارایی روش‌های اتخاذ شده بوده‌اند.

انیس حسینی و ذاکر مشق (۳) به منظور پیش‌بینی رواناب رودخانه کشکان از منظر نظریه آشوب ابتدا با استفاده از روش‌های میانگین اطلاعات متقابل (لازم به ذکر است که این روش زمان تأخیر ۱۵ روز را به عنوان زمان بهینه تشخیص داد) و نزدیک‌ترین همسایگان کاذب، فضای فاز را بازسازی نموده و آنگاه با استفاده از بُعد همبستگی و توان لیاپانوف به ترتیب بُعد فراکتالی جاذب سیستم و حساسیت به شرایط اولیه را تخمین زدند. براین اساس شرایط یک سیستم آشوبناک را در سری زمانی دبی کشکان شناسایی کردند که در ادامه با استفاده از روش تقریب محلی در فضای فاز، فرایند پیش‌بینی رواناب را با ضریب همبستگی $0/88$ و جذر میانگین مربعات خطای $33/14$ متر مکعب در ثانیه انجام دادند. شفائی و همکاران (۲۲) با تجزیه سیگنال سری زمانی جریان روزانه رودخانه آجی‌چای به ۱۱ زیر سری با استفاده از دو تابع موجک مادر هار و میر، مدل پیش‌بینی موجک - شبکه عصبی مصنوعی را برای جریان روزانه این رودخانه بنا نهادند. با مقایسه نتایج حاصل از تجزیه دو تابع موجک مادر یاد شده نتیجه گرفتند که تابع موجک مادر میر دارای قابلیت بهتری در تجزیه سیگنال سری زمانی بوده؛ همچنین مدل ترکیبی موجکی - عصبی نسبت به مدل شبکه عصبی از ضریب دقت بالاتری برخوردار است. عبداللهی اسدآبادی و همکاران (۱) به منظور ارائه مدل پیش‌بینی رواناب روزانه رودخانه حوضه آبخیز بهشت‌آباد بر اساس افق‌های ۱، ۲، ۳ و ۷ روز تأخیر زمانی، از سه روش موجک متقاطع، شبکه عصبی مصنوعی و موجک - شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند. مقایسه نتایج مترتب بر عملکرد این سه روش حاکی از دقت مدل ترکیبی موجکی - عصبی در قیاس با دو مدل دیگر بود. همچنین دقت مدل موجک متقاطع تنها در تأخیر زمانی ۱ روز، بهتر از مدل شبکه عصبی بود. ثانی‌خانی و همکاران (۲۱) با استفاده از روش‌های K-NN، ماشین بردار پشتیبان و فازی - عصبی تطبیقی به مدل‌سازی جریان ماهانه رودخانه باراندوزچای پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که به‌رغم آنکه هر سه روش مورد استفاده، مقدار دبی بیشینه را کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد می‌کنند با این حال، ماشین بردار پشتیبان عملکرد بهتری نسبت به دو روش دیگر در تخمین مقدار دبی بیشینه

نشان می‌دهد. کناس^۱ و همکاران (۵) با تجزیه سیگنال سری زمانی رواناب حوضه تیرسو (واقع در ساردینا، ایتالیا) با استفاده از تبدیلات موجک پیوسته و گسسته و مدل‌سازی رواناب از طریق شبکه عصبی مصنوعی - موجک نتیجه گرفتند که تجزیه با استفاده از موجک گسسته، رفتار هیدرولوژیکی جریان رودخانه را دقیق‌تر پیش‌بینی می‌کند. پرامیناک و پاندا^۲ (۲۰) با اتخاذ ۵ الگو با زمان‌های تأخیر متفاوت از رودخانه ماهندی در هندوستان به عنوان ورودی روش‌های شبکه عصبی و نروفازی (ANFIS) دریافتند که رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل نروفازی دارای تطابق بهتری با رواناب مشاهداتی نسبت به مورد شبکه عصبی است. وئو و چائو^۳ (۲۴) با مدل‌سازی جریان ماهانه چندین رودخانه در کشور چین نشان دادند که روش K-NN در پیش‌بینی جریان رودخانه از کارایی مناسب‌تری نسبت به روش آریمای و شبکه عصبی برخوردار است. یانگ^۴ و همکاران (۲۹) با ترکیب مدل HEC-HMS با مدل‌های نروفازی (ANFIS) و نرو ژنتیک (GANN) در طی رخداد پدیده تی‌فون در حوضه لان‌تونگ در جنوب تایوان نشان دادند که شبیه‌سازی‌های ایجاد شده توسط مدل‌های ترکیبی HEC-HMS-ANFIS و HEC-HMS-GANN قادرند دقت پیش‌بینی را به‌طور قابل توجهی بهبود ببخشند. در صورتی که مدل HEC-HMS به تنهای قادر نیست پیش‌بینی رضایت‌بخشی از رواناب ساعتی حوضه در طی رخداد تی‌فون به عمل آورد.

در این راستا با توجه به اهمیتی که مقدار جریان رودخانه و نوسان‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت آن در ابعاد مختلف زندگی بشر ایفا می‌کند، دانستن رفتار و عملکرد آن ضرورت دارد. چراکه با کشف دینامیک رفتار آن می‌توان به چگونگی عملکرد آن در آینده پی برد؛ بنابراین هدف از انجام این مطالعه کشف و شبیه‌سازی عملکرد رودخانه کشکان با استفاده از روش‌های آماری و هوشمند است تا بتوان با ارائه مدل‌هایی با عدم قطعیت کمتر گامی در راستای بهبود برنامه‌ریزی‌های مبتنی بر جریان این رودخانه برداشت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه کشکان با وسعت $9502/7$ کیلومتر مربع در ناحیه جنوب غربی ایران واقع شده است. گستره جغرافیایی آن بین مختصات 33 درجه و 8 دقیقه تا 34 درجه و 2 دقیقه عرض شمالی و 47 درجه و 12 دقیقه تا 48 درجه و 59 دقیقه طول شرقی قرار دارد.

1- Cannas

2- Pramanik and Panda

3-Wu and Chau

4- Young

همواره صفر خواهد بود؛ بنابراین دامنه تعدیل شده برابر خواهد بود با:

$$R_n = \max(Y_1, \dots, Y_n) - \min(Y_1, \dots, Y_n) \quad (3)$$

از آنجای که میانگین Y صفر است، بیشینه آن همواره بزرگ‌تر یا مساوی صفر و کمینه آن کوچک‌تر یا مساوی صفر خواهد بود؛ بنابراین دامنه تعدیل شده همیشه غیر منفی است. هرست با استفاده از قاعده نصف در آمار رابطه ۴ را تعریف کرد:

$$\left(\frac{R}{S}\right)_n = a \cdot n^H \quad (4)$$

که در این رابطه، R دامنه تغییرات، S انحراف معیار سری زمانی، a عدد ثابت، n تعداد مشاهده‌ها و H نمای هرست است. این رابطه را می‌توان به صورت رابطه ۵ نیز نوشت

$$\log\left(\frac{R}{S}\right)_n = \log a + H \log(n) \quad (5)$$

در این راستا با رسم سمت چپ رابطه ۵ در مقابل $\log(n)$ ، نمای هرست برآورد شد. برحسب یافته‌های هرست، اگر مقدار نمای هرست برابر با 0.5 شد، بر یک فرآیند مستقل نرمال دلالت دارد. اگر بین 0.5 و 1 قرار گرفت بر یک سری زمانی دوام‌دار با حافظه بلندمدت دلالت دارد که این به نوبه خود نشان‌دهنده ساختار غیرخطی سری زمانی نیز است. در نهایت اگر نمای هرست مثبت و کمتر از 0.5 شد، نشان از بی‌دوام بودن سری زمانی دارد.

وجود حافظه بلندمدت سری زمانی رواناب نشان از دینامیکی بودن این سری دارد بدین عنوان که حالت کنونی این سری وابسته به حالت‌های گذشته آن است؛ بنابراین زمان‌های تأخیر $1, 3, 5, 7, 9, 11$ و 15 روز قبل برای رواناب محاسبه که بدین ترتیب میزان رواناب به عنوان تابعی از این سری‌های زمانی قلمداد شدند. در مدل‌های پیش‌بینی سری‌های زمانی، سمت راست تابع رواناب (رابطه ۶) به عنوان ورودی و سری زمانی سمت چپ به عنوان سری زمانی هدف محسوب می‌شوند.

$$Q(t) = f\left(\begin{matrix} Q(t-1), Q(t-3), Q(t-5), \\ Q(t-7), Q(t-10), Q(t-15) \end{matrix}\right) \quad (6)$$

الگوریتم انجام پیش‌بینی با استفاده از K-NN

روش K-نزدیک‌ترین همسایه از معروف‌ترین روش‌های رگرسیون ناپارامتری است. در این روش تابع توزیع مقادیر پیش‌بینی با استفاده از توزیع ناپارامتری تابع کرنل به دست می‌آید. این مدل بدین عنوان تدوین یافته که هرگاه شرایطی مشابه شرایط تاریخی مشاهده شده در زمان حال به وقوع پیوست، شرایط محتمل در آینده مشابه شرایطی خواهد بود که در آن تاریخ رخ داده است. مبنای مورد استفاده در این روش به این ترتیب است که با اندازه‌گیری و مشاهده متغیرهای مستقل در زمان واقعی، مدل به جستجوی حالت‌های مشابه

این حوضه بخش مهمی از سرشاخه‌های پرآب رودخانه کشکان را تشکیل می‌دهد، به طوری که حدود ۳۳٪ از خاک استان لرستان را در برمی‌گیرد. در تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژیکی ایران، بخشی از حوضه آبریز خلیج فارس به شمار می‌رود. این حوضه $18/5$ ٪ از مساحت حوضه آبریز بزرگ کرخه را شامل می‌شود.

برای رهیافت به این مطالعه، سری داده‌های دبی روزانه ایستگاه کشکان - پل دختر (واقع در پایاب رودخانه کشکان) در بازه زمانی ۱۳۷۰-۱۳۹۳ به عنوان ورودی اولیه مورد استفاده قرار گرفتند. روش‌های بکار گرفته شده در این مطالعه مبتنی بر بررسی حافظه سری زمانی رواناب، مدل سازی سری زمانی با استفاده از روش آماری K-نزدیک‌ترین همسایه (K-NN)، شبکه عصبی مصنوعی، ترکیب موجک - K-NN و ترکیب عصبی - موجک است که در ادامه مفاهیم تئوریک و چگونگی کاربرد این رویکردها شرح داده می‌شود. اساس بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها در فرآیندهای هیدرولوژیکی و تصمیمات بهره‌برداری از منابع آب مبتنی بر پیش‌بینی و تحلیل سری زمانی است. از سویی در فرآیند مدل سازی و پیش‌بینی، بررسی این مورد که آیا سری زمانی دارای حافظه بلندمدت است، ضرورت دارد؛ زیرا یک سری زمانی در صورتی از قابلیت پیش‌بینی برخوردار است که دارای حافظه بلندمدت باشد. این تفکر مبتنی بر آن است که آیا در سری زمانی در دسترس، تمامی پدیده‌های حدی قابل انتظار رخ داده‌اند (۱۰). در سری‌های زمانی هیدرولوژیکی (مثل رواناب) حافظه بلندمدت موجب وابستگی مقدار رواناب با مقادیر قبلی در گذشته شده که این نشان دهنده وجود پارامتری قابل پیش‌بینی در سری زمانی است.

هرست^۱ با مطالعه تراز آبی رودخانه نیل، آزمون‌ی را برای بررسی حافظه بلندمدت ارائه داد (۹) که اینک به عنوان نمایه هرست محسوب می‌شود. مراحل انجام این آزمون که در مطالعه حاضر به عنوان ابزاری جهت بررسی حافظه بلندمدت سری زمانی رواناب رودخانه کشکان مورد استفاده قرار گرفته به شرح ذیل است. با اتخاذ یک سری زمانی رواناب با $X = X_1, X_2, \dots, X_n$ ابتدا مقیاس داده‌ها با استفاده از رابطه ۱ نرمال شد.

$$k = 1, 2, \dots, n \quad z_k = (x_k - x_m) \quad (1)$$

که در آن x_k مقدار رواناب روزانه، x_m میانگین سری زمانی رواناب و z_k مقدار رواناب نرمال شده است. در مرحله بعد سری زمانی تجمعی رواناب محاسبه شد (رابطه ۲).

$$Y_i = \sum_{k=1}^i z_k \quad (2)$$

نظر به اینکه میانگین Z صفر است، آخرین مقدار Y یعنی Y_n

واقعی (r) است. چنین برداری با متغیرهای مستقل مشاهده شده تاریخی به شکل زیر مقایسه می‌شود:

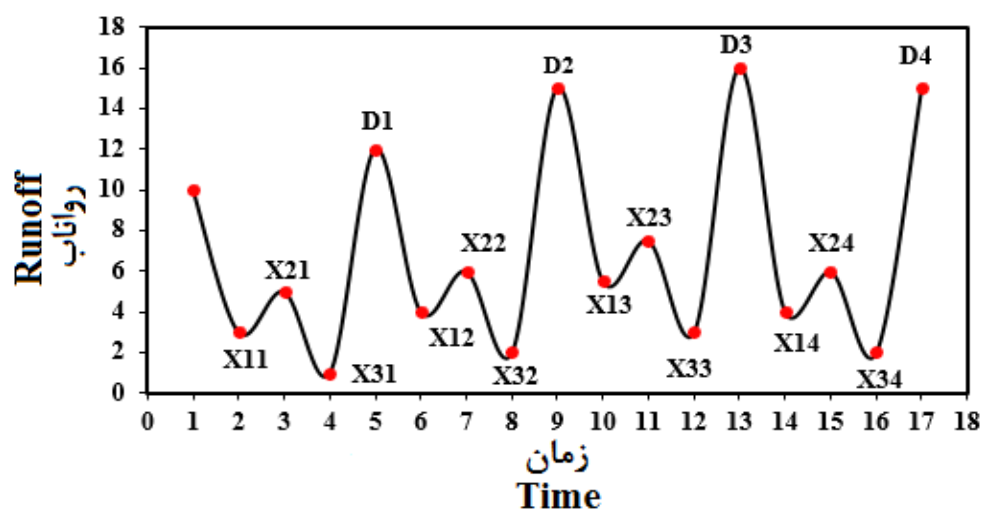
$$X_r = \{X_{1r}, X_{2r}, \dots, X_{nr}\} \quad (۸)$$

در این بردار X_{nr} ، n آمین متغیر مستقل مشاهده شده در زمان t در دوره مشاهده اطلاعات است. به ازای هر یک از بردارهای تاریخی نشان داده شده در فوق یک مقدار مشاهداتی وابسته به این بردار تحت عنوان D_t وجود دارد. شکل ۱ شماتیکی از نحوه در نظر گرفتن این متغیرها در یک سری تاریخی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل برای پیش‌بینی مقادیر اوج جریان (D) از جریان مشاهده شده در ۳ بازه زمانی قبل (X) استفاده می‌شود.

به حالت فعلی در سری‌های تاریخی می‌پردازد. وقایعی که در سری تاریخی بعد از این حالت‌ها پیش آمده‌اند می‌توانند به عنوان گزینه‌های محتمل در شرایط فعلی نیز در نظر گرفته شوند. احتمال رخداد هر یک از این حالت‌ها در شرایط کنونی بستگی به شباهت بردار مشاهداتی متغیرهای مستقل فعلی با بردار مستقل مشاهداتی در سری تاریخی دارد (۴ و ۱۰). الگوریتم انجام پیش‌بینی با استفاده از K-NN به شرح ذیل است. متغیرهای مشاهداتی در زمان واقعی را می‌توان به صورت برداری به شکل زیر نشان داد:

$$X_r = \{X_{1r}, X_{2r}, \dots, X_{nr}\} \quad (۷)$$

در این رابطه X_{nr} مبین متغیر مستقل مشاهده شده n ام در زمان



شکل ۱- شماتیک تعریف متغیرها در الگوریتم K-NN

Figure 1- Schematic definition of variables in the K-NN algorithm

$$Dis_t = W_t |X_{1r} - X_{1t}| + W_t |X_{2r} - X_{2t}| + \dots + W_t |X_{nr} - X_{nt}| \quad (۱۰)$$

در روابط ۹ و ۱۰، Dis_t فاصله بردار مشاهداتی متغیرهای مستقل فعلی از بردارهای تاریخی هستند. گزینه‌های که به عنوان گزینه برتر از میان سری تاریخی برای تعیین مقدار پیش‌بینی انتخاب می‌شوند گزینه‌هایی هستند که دارای کمترین فاصله از بردار مشاهداتی متغیرهای مستقل فعلی می‌باشند. چنانکه از رابطه‌های ۹ و ۱۰ برمی‌آید تعیین فاصله مشخص شده بستگی به وزنی دارد که برای هر کدام از متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شود (۲۸). در این مطالعه برای تعیین وزن‌ها از روش اعتبارسنجی متقاطع^۱ استفاده شد. پس از محاسبه وزن‌ها مقدار عددی متغیر مطلوب D_r می‌تواند از رابطه زیر به دست آید.

تعداد سه متغیر مستقل برای پیش‌بینی و ۳ نزدیک‌ترین همسایه برای D_r منظور شده است. همچنین مقادیر X_r به صورت X_{14} ، X_{24} و X_{34} در این شکل قابل مشاهده‌اند.

جهت تشخیص همسایه‌ها ضرورت دارد که یک تابع فاصله مورد استفاده قرار گیرد (۲۶). مرسوم‌ترین نوع فاصله‌ها عبارت از فاصله اقلیدسی، مربع اقلیدسی، بلوک شهری (منهتن) و چپ‌چف هستند (۲۳). از سویی در روش K-NN استفاده از فاصله اقلیدسی وزن‌دار شده بسیار مرسوم است (۴) (رابطه ۹).

$$Dis_t = \sqrt{W_t (X_{1r} - X_{1t})^2 + W_t (X_{2r} - X_{2t})^2 + \dots + W_t (X_{nr} - X_{nt})^2} \quad (۹)$$

در این مطالعه علاوه بر فاصله اقلیدسی از فاصله وزن‌دار بلوک شهری (رابطه ۱۰) نیز استفاده شد.

خاص به آن منجر به دریافت پاسخ خاص می‌شود، شبکه بر مبنای تطابق و هم‌سجی بین ورودی و هدف سازگار می‌شود تا اینکه خروجی شبکه و هدف بر هم منطبق گردند. عموماً تعداد زیادی از این زوج‌های ورودی و خروجی به کار گرفته می‌شوند تا در این روند که از آن تحت عنوان یادگیری نظارت شده یاد می‌شود شبکه آموزش داده شود (۱۱). شبکه عصبی پرسپترون^۲ یکی از معروف‌ترین شبکه‌های عصبی است که در مدل چندلایه (MLP) دارای ۳ لایه شامل یک لایه ورودی، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی بوده که لایه پنهان خود می‌تواند بیش از یک لایه باشد و همچنین تعداد نورون‌های موجود در هر لایه متفاوت بوده و بر اساس ماهیت مسئله مورد بررسی با سعی و خطا تعیین می‌شود (۱۷)؛ بنابراین، تحت رویکردی دیگر، از مدل شبکه عصبی چندلایه با روش پس‌انتشار خطا (BP) با الگوریتم لونبرگ - مارکوئٹ^۳ و تابع محرک تان سیگموئید، مدل‌سازی و پیش‌بینی سری زمان جریان رودخانه کشکان انجام شد.

آنالیز موجک

در گامی دیگر، جهت بهره‌گیری از کلیه اطلاعات سیگنال اصلی سری زمانی که از داده‌های خام در دسترس نیستند و همچنین جهت افزایش دقت مدل پیش‌بینی از تحلیل موجک جهت پیش‌پردازش و تجزیه سیگنال اصلی سری زمانی استفاده شد. چراکه تحلیل موجک قادر است بسیاری از منظرهای پنهان داده‌های که دیگر روش‌های تحلیل سیگنال در شناسایی آن‌ها ناتوان هستند را شناسایی کند. به عبارتی تبدیلات موجک قادر هستند تا اطلاعات مفیدی را که به‌سادگی از سیگنال اصلی قابل‌بازبایی نیستند را به دست آورند (۶). در این راستا چون تبدیل گسسته موجکی جهت پیش‌پردازش و تحلیل سری‌های زمانی مناسب‌تر از تبدیل پیوسته موجکی هست، بدین ترتیب که داده‌های تبدیل یافته با DWT^۴ اجزای اضافی نداشته و بنابراین تبدیل معکوس را می‌توان برای هر دسته از داده‌های زمان - بسامد به کاربرد (۸)، از تبدیلات موجک گسسته برای تجزیه سیگنال اصلی سری‌های زمانی رواناب استفاده شد.

اولین گام در تجزیه موجکی سیگنال سری زمانی، شناسایی موج مادر است. که به‌صورت رابطه ۱۳ تعریف می‌شود:

$$\Psi(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (13)$$

که $\psi(t)$ تابع موجک مادر است که توابع مورد استفاده در تحلیل با دو عمل ریاضی انتقال و مقیاس در طول سیگنال مورد بررسی، تغییر اندازه و محل می‌یابند.

$$D_r = \sum_1^m \left[\frac{1}{\sum_1^m \frac{Dis_t}{1}} \right] * D_t \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، عبارت داخل کروشه یک تابع کرنل است و بیانگر مقدار احتمال وقوع یک پیش‌بینی برابر با میزان متغیر تاریخی (D_t) در صورت مشاهده شرایط اقلیمی فعلی است. در این رابطه، m تعداد همسایه‌هایی است که برای پیش‌بینی اتخاذ شده‌اند. در الگوریتم پیش‌بینی با استفاده از نزدیک‌ترین همسایه، دو نوع پارامتر مهم وجود دارد که دقت پیش‌بینی را کنترل می‌کنند: اول تعداد همسایه‌ها (m) و دوم وزن هر یک از متغیرها (w) است که در نهایت رابطه پیش‌بینی به‌صورت رابطه ۱۲ توسط لال و شرما^۱ (۱۴) ارائه و بیان داشتند که مزیت کاربرد این روش بیش از رابطه ۱۱ است.

$$D_r = \sum_1^m \left[\frac{\frac{1}{j}}{\sum_1^m \frac{1}{j}} \right] * D_t \quad (12)$$

در رابطه بالا j مرتبه هر یک از همسایه‌ها است. بدین ترتیب که هرچه فاصله مقادیر مستقل تاریخی از مقادیر مستقل مشاهداتی مطابق با رابطه ۱۲ کمتر باشد مرتبه آن بیشتر در نظر گرفته می‌شود.

شبکه عصبی مصنوعی

مغز انسان حاوی میلیاردها نورون متصل به هم است که به سبب ساختاری که در آن نورون‌ها آرایش یافته و عمل می‌کنند، انسان‌ها قادرند که به سرعت الگوها را تشخیص داده و اطلاعات را پردازش کنند. یک شبکه عصبی مصنوعی طرح ریاضیاتی ساده شده‌ای از این شبکه عصبی زیستی است (۱۳). بنابراین در شبکه‌های عصبی مصنوعی سعی بر این است که ساختاری مشابه ساختار بیولوژیکی مغز انسان و شبکه اعصاب بدن ساخته شود تا همانند مغز، قدرت یادگیری، تعمیم‌دهی و تصمیم‌گیری داشته باشد و طرحی از یک فضای چند متغیره با استفاده از اطلاعات دریافتی تولید کند (۱۵). چنین شبکه‌های عصبی مصنوعی از عناصر ساده‌ای ترکیب شده‌اند که به‌طور موازی عمل می‌کنند. این عناصر از سیستم‌های عصبی زیستی الهام گرفته شده‌اند (۱۶). همچنانکه که در طبیعت، ساختار شبکه‌های عصبی از طریق نحوه اتصال بین عناصر (اجزاء) تعیین می‌شود، در شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز با تنظیم مقادیر هر اتصال تحت عنوان وزن اتصال می‌توان نحوه ارتباط بین اجزای آن را تعیین کرد. پس از تنظیم یا همان آموزش شبکه عصبی، اعمال یک ورودی

2- Multi-Layer Perceptron(MLP)

3- Levenberg-Marquardt

4- Discrete Wavelet Transform

1- Lall and Sharma

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(P_i - \bar{P})^2 (O_i - \bar{O})^2]}} \quad (19)$$

$$CRM = \frac{\left[\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right]}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (20)$$

در روابط بالا، O_i و $\bar{O}$: به ترتیب داده‌ها و میانگین داده‌های مشاهداتی، P_i و $\bar{P}$: به ترتیب داده‌ها و میانگین داده‌های محاسباتی. در رابطه ۲۰ مقادیر مثبت ضریب CRM مبین گرایش مدل برای تخمین مقادیر کمتر از مقادیر مشاهداتی، مقدار منفی آن بیانگر گرایش مدل برای تخمین مقادیر بیشتر از مقادیر مشاهداتی و در این مدل، ایدئال مقدار این ضریب صفر است.

نتایج و بحث

حافظه سیستم جریان رودخانه کشکان، با استفاده از نمایه هرست بافاصله ۱۰ روز و پایه میانه ۴۲۰۰ روز به مقدار ۰/۶ به دست آمد (شکل ۲). این مقدار گویایی رفتار غیرخطی و دینامیکی سیستم یاد شده بود و همچنین نشان از وجود حافظه بلندمدت در سری زمانی جریان رودخانه کشکان داشت. در ادامه، شبیه‌سازی جریان رودخانه کشکان با استفاده از روش‌های همچون K-NN و شبکه عصبی مصنوعی که مقید به پیش‌فرض‌های روش‌های خطی نیستند و از قابلیت کشف رفتار سیستم‌های غیرخطی برخوردارند انجام می‌گیرد. در گام نخست، با در نظرگیری سری‌های زمانی درج‌شده در سمت راست و چپ تابع سری زمانی (رابطه ۱) به ترتیب به‌عنوان ورودی و خروجی در مدل K-NN، ۸۰ درصد از حجم این داده‌ها برای آموزش مدل و ۲۰ درصد از آن‌ها برای آزمون مدل اختصاص پیدا کرد.

از سویی با اتخاذ دامنه‌ای از ۱ تا ۱۰ نزدیک‌ترین همسایه و دامنه‌ای از ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ ذره (برای پوشش داده‌ها در بخش آموزش) این مدل تعبیه شد. آنگاه با ارزیابی معیارهای سنجش کارایی و دقت مدل در هر اجرا از دامنه‌های یادشده، بهترین مدل با ساختار ۶ همسایه و ۱۵۰۰۰ ذره به دست آمد. همچنین مدل ایجاد شده برحسب فاصله بلوک شهری از نتایج دقیق‌تری نسبت به فاصله اقلیدسی برخوردار بود. ارزیابی شناسه‌های سنجش عملکرد مدل نشان می‌دهد که K-NN مقادیر رواناب را اندکی بیشتر از رواناب مشاهداتی با میزان همبستگی ۰/۹۰ و خطای ۴/۶ درصد، شبیه‌سازی کرده است. همچنین نسبت تغییرات انحراف معیار داده‌ها نسبت به هر واحد از

$$\Psi_{s,t}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-t}{s}\right) \quad (14)$$

در رابطه ۱۴: t پارامتر انتقال و s پارامتر مقیاس است. برای محاسبه موجک گسسته بایستی به‌جای مقادیر t و s در رابطه ۱۴ مقدار گسسته آن‌ها به ترتیب $ks_0^j \tau_0$ و s_0^j جایگذاری شود.

$$\psi_{\kappa,j}(t) = \frac{1}{\sqrt{s_0^j}} \psi\left(\frac{t - ks_0^j \tau_0}{s_0^j}\right) \quad (15)$$

در رابطه ۱۵: j و k اعداد صحیح هستند. $s_0 > 1$ یک گام تأخیری ثابت شده است. τ_0 فاکتور تبدیل است که به گام تأخیر وابسته است. با ساده کردن رابطه فوق رابطه ۱۶ به‌صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\psi_{\kappa,j}(t) = s_0^{-j/2} \psi(s_0^{-j} t - k \tau_0) \quad (16)$$

با کاربرد رابطه ۱۶، ضرایب گسسته موجک طبق رابطه ۱۷ به‌دست می‌آیند.

$$DWT_s^\psi(t) \sum s(t) \psi_{\kappa,j}(t) dt \quad (17)$$

در تبدیل موجک گسسته، سیگنال از یک سری فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر عبور داده می‌شود که بخش به‌دست آمده از فیلتر بالاگذر حاوی اطلاعات فرکانس بالا است که جزئیات نامیده می‌شود. از سویی بخش حاصل از فیلتر پایین‌گذر حاوی اطلاعات فرکانس پایین و دربردارنده ویژگی‌های اصلی سیگنال است که کلیات نامیده می‌شود (۸). در ادامه به سبب شباهت موجک مادر میر (موجک پیچیده) به سیگنال سری زمانی رواناب، تجزیه این سیگنال‌ها با استفاده از تابع موجک میر انجام گرفت. برحسب رابطه ارائه شده توسط وانگ و دینگ $L = \text{INT}[\log(N)]$ (L: درجه تجزیه، INT: تابع گردکننده و N: تعداد داده‌های سری زمانی) تعداد سطح تجزیه مناسب به مقدار ۴ سطح به دست آمد؛ بنابراین سیگنال رواناب به ۵ زیر سیگنال شامل ۴ سیگنال فرکانس بالا و یک سیگنال فرکانس پایین تجزیه شد که این ۵ سیگنال با تأخیرهای زمانی که در سمت راست تابع رواناب جای دارند به‌صورت ترکیبی با مدل K-NN و شبکه عصبی ترکیب شده و عمل شبیه‌سازی رواناب با احتساب به این مدل‌های ترکیبی نیز انجام گرفت. در آخر به‌منظور ارزیابی، مقایسه و گزینش دقیق‌ترین ساختار مدل رواناب از شاخص‌های ضریب همبستگی (R)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب CRM استفاده شد (رابطه‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰)

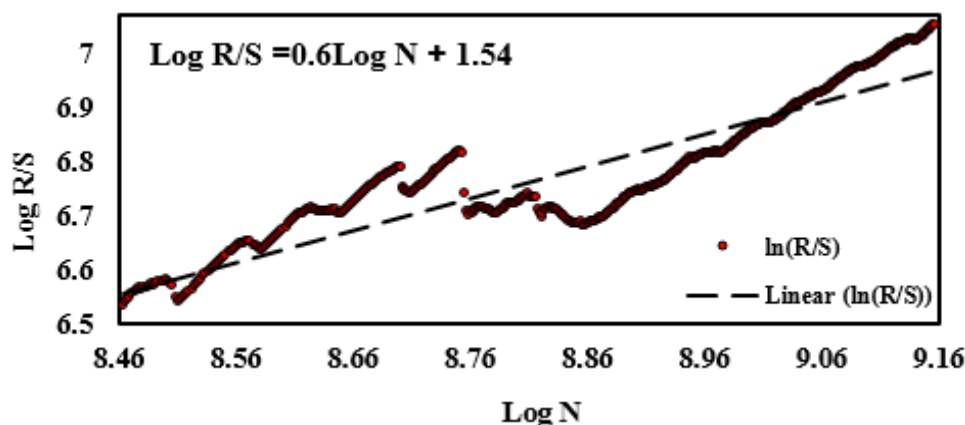
$$RMSE = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0.5} \quad (18)$$

1- Details

2- Approximation

بهترین مدل برازشی شد. در این ساختار ۶، ۸ و ۱ به ترتیب به عنوان تعداد نورون ورودی، نورون لایه پنهان و نورون خروجی محسوب می‌شوند. معیارهای سنجش کارایی این مدل نیز حاکی از عملکرد نسبتاً قابل قبول آن در شبیه‌سازی رواناب است. به‌طوری‌که سری زمانی شبیه‌سازی شده دارای ضریب همبستگی ۰/۸۹ با سری زمانی مشاهداتی بوده و خطای پیش‌بینی آن در حدود ۵/۸ درصد است (شکل‌های ۵ و ۶).

میانگین آن‌ها در سری زمانی شبیه‌سازی شده همسان با سری زمانی داده‌های مشاهداتی است. بدین ترتیب که پراکندگی این دو سری نسبت به میانگین یکسان بوده و از توزیع برابری برخوردارند؛ بنابراین جداسازی داده‌ها در این مدل به‌خوبی انجام شده است (جدول ۱، شکل‌های ۳ و ۴). معماری شبکه عصبی مصنوعی جهت شبیه‌سازی رواناب با ۶ نورون ورودی و در نظرگیری ۳ تا ۲۰ نورون در یک لایه پنهان و یک نورون خروجی منتهی به ساختار ۶-۸-۱ به عنوان



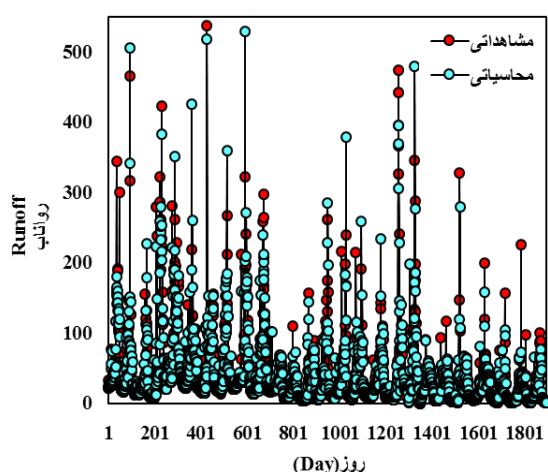
شکل ۲- نمودار هرست سری زمانی جریان رودخانه کشکان (۱۳۷۰-۱۳۹۳)

Figure 2- Hurst plot of time series flow for the Kashkan river

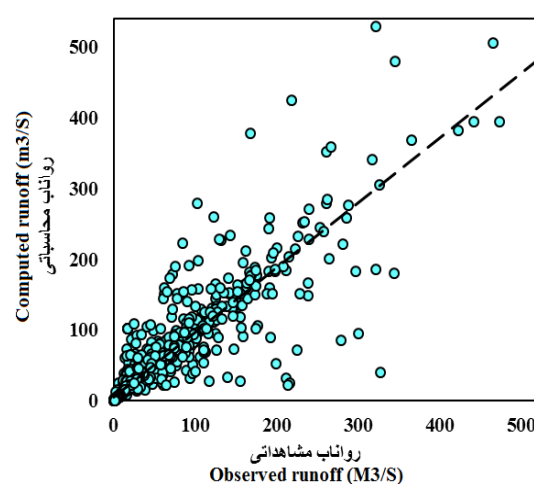
جدول ۱- نتایج عملکرد مدل K- نزدیک‌ترین همسایه (K-NN) و شبکه عصبی (ANN) در شبیه‌سازی رواناب کشکان

Table 1- Performance results for K-nearest neighbor (K-NN) and neural network (ANN) in Kashkan runoff modeling

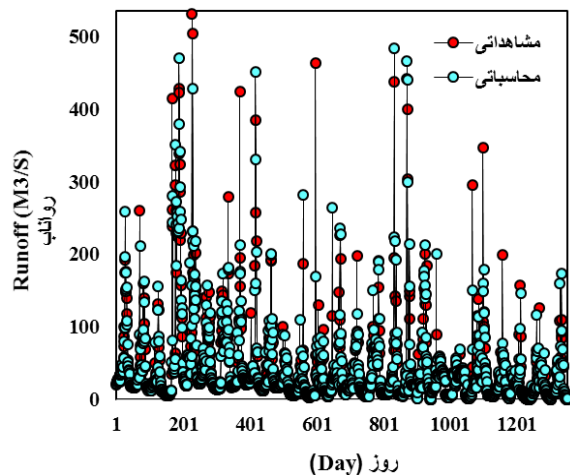
مدل Model	میانگین مشاهداتی Observed Mean (M ³ /s)	میانگین محاسباتی Computed Mean (M ³ /s)	انحراف معیار مشاهداتی Observed Std deviation	انحراف معیار محاسباتی Computed Std deviation	R	RMSE (M ³ /s)	CRM
K-NN	39.87	41.33	53.13	54.23	0.9	24.1	-0.037
ANN	42.03	42.63	60.38	57	0.89	27.88	-0.014



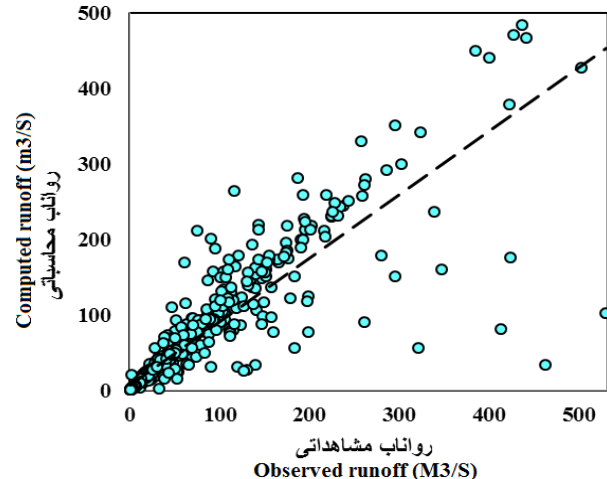
شکل ۴- نمودار مقایسه رواناب مشاهداتی و محاسباتی (K-NN)
Figure 4- Comparison of the observed and computed runoff (K-NN)



شکل ۳- نمودار پراکندگی رواناب مشاهداتی و محاسباتی (K-NN)
Figure 3- Scatter plot for observed and computed runoff (K-NN)



شکل ۶- نمودار مقایسه رواناب مشاهداتی و محاسباتی (ANN)
Figure 6- Comparison of the observed and computed runoff (K-NN)



شکل ۵- نمودار پراکندگی رواناب مشاهداتی و محاسباتی (ANN)
Figure 5- Scatter plot for observed and computed runoff (K-NN)

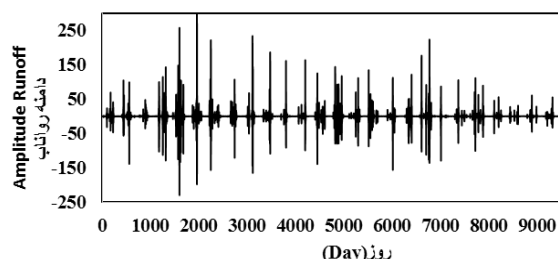
NN و ANN قلمداد شدند که در ادامه با قرارگیری در سمت راست تابع رواناب (رابطه ۶) منتهی به شکل‌گیری دو مدل ترکیبی تحت عنوان K-NN-WT و ANN-WT خواهند شد.

در این گام، با اختصاص ۱ تا ۲۰ همسایه و پوششی از ۱ تا ۱۰۰۰۰۰ ذره (در بخش آموزش مدل) رویکرد K-NN-WT در این بازه‌ها اجرا شد. همچنانکه از سنجش‌های کارایی عملکرد مشخص است مدل با ساختار ۶ همسایه، ۵۰۰۰۰ ذره و فاصله اقلیدسی بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی رواناب در قیاس با سایر ساختارهای این مدل نشان می‌دهد (جدول ۲). در این خصوص، مدل یاد شده مقادیر رواناب را برخلاف مدل K-NN کمتر از مقادیر مشاهداتی و با خطای کمتری به مقدار ۲/۷ درصد شبیه‌سازی کرد.

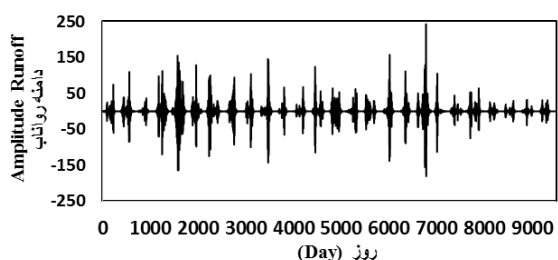
چنانکه از شکل‌های ۱۳ و ۱۴ محرز است جداسازی داده‌ها و دقت رواناب شبیه‌سازی شده در این مدل بهبود یافته و پراکنش مقادیر رواناب نسبت به میانگین در سیگنال شبیه‌سازی شده کمتر از همین مورد در سیگنال مشاهداتی رواناب حاصل شده است. از سویی تقارن خطاها و مقدار مطلق آن‌ها در مدل K-NN-WT نسبت به مدل K-NN اندکی کاهش پیدا کرده بدین مفهوم که مدل ترکیبی توانسته است مقادیر فراوانی از خطاهای مطلق را کاهش دهد اما در برخورد با فرکانس‌های متفاوت سری زمانی رفتار همگنی مانند مدل K-NN نشان نمی‌دهد. به‌واقع این فرآیند نشان از ضعف نسبی این مدل ترکیبی در قیاس با مدل K-NN نداشته زیرا این مدل توانسته مقادیر مطلق خطای که در تمامی فرکانس‌های رواناب ایجاد شده بود را کاهش دهد؛ بنابراین چنین عدم تقارنی به سبب مقادیر کمینه خطای رواناب شبیه‌سازی شده از توجه ویژه‌ای برخوردار نیست هرچند که در نظرگیری آن جهت بیشتر عدم قطعیت ضرورت دارد.

مدل ANN نیز مقدار رواناب را اندکی بیش از رواناب مشاهداتی و با خطای بیشتری نسبت به مدل K-NN تخمین زده است. از سویی رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل ANN نسبت به میانگین دارای پراکنش بیشتری در قیاس با سری زمانی رواناب مشاهداتی است؛ بنابراین چنین پراکنشی موجب افزایش خطای این مدل و عدم تقارن شدید خطاها شده است. مقایسه نمودارهای پراکنش و معیارهای سنجش عملکرد دو مدل یادشده نشان می‌دهد که مدل K-NN فراوانی رواناب‌های کمتر از میانگین را اندکی افزایش داده در صورتی مدل ANN فراوانی رواناب‌های کمتر از میانگین را کاهش داده است. بدین عنوان که مدل K-NN واکنش نسبتاً همگن‌تری در برابر رواناب‌های بیشینه و کمینه نشان می‌دهد. در صورتی که مدل ANN رواناب‌های کمینه را بسیار بیشتر و رواناب‌های بیشینه را بسیار کمتر از مدل مذکور شبیه‌سازی کرده است.

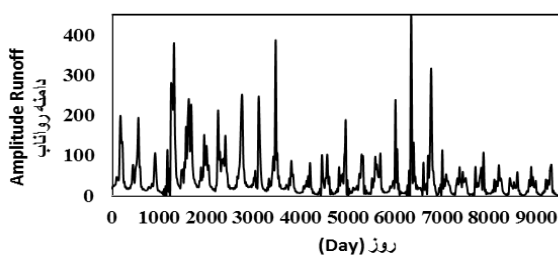
به‌طور کلی این دو رویکرد به‌رغم ارائه شبیه‌سازی نسبتاً قابل قبول رواناب روزانه رودخانه کشکان اما در برخورد با داده‌های فرکانس بالا و فرین عملکرد چندان مناسبی نشان ندادند. چراکه در چنین مواردی دستخوش خطاهای بالایی می‌شدند. به‌واقع، این فرآیند به ماهیت داده‌های روزانه جریان رودخانه برمی‌گردد که سیگنال سری زمانی آن از رفتارهای روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه برخوردار بوده و هرکدام از این رفتارها با توجه به دینامیکی که دارند وزن متفاوتی در تعیین رفتار آینده رواناب بر عهده دارند؛ بنابراین به‌منظور فائق آمدن به چنین مسئله‌ای، سیگنال اصلی سری زمانی رواناب (شکل ۷) با استفاده از تابع موجک میر به ۴ سطح شامل ۸ زیرسیگنال فرکانس بالا و فرکانس پایین تجزیه شد. بدین ترتیب که ۴ زیرسیگنال فرکانس بالا (شکل‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱) و یک سیگنال فرکانس پایین سطح ۴ (شکل ۱۲) به‌جای سیگنال اصلی رواناب به‌عنوان ورودی مدل K-



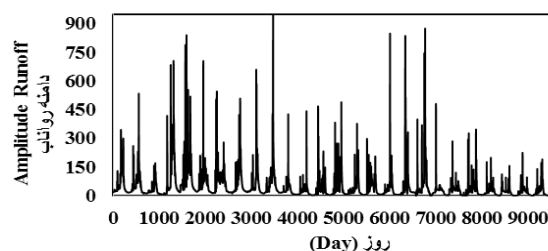
شکل ۸- سیگنال فرکانس بالای رواناب در سطح ۱
Figure 8- Detail signal of runoff in level 1



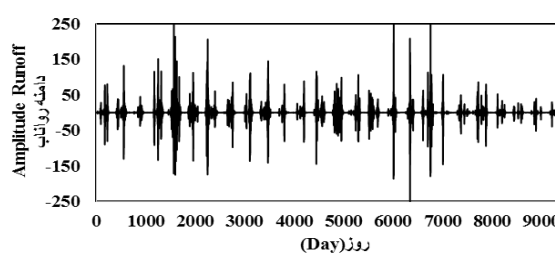
شکل ۱۰- سیگنال فرکانس بالای رواناب در سطح ۳
Figure 10- Detail signal of runoff in level 3



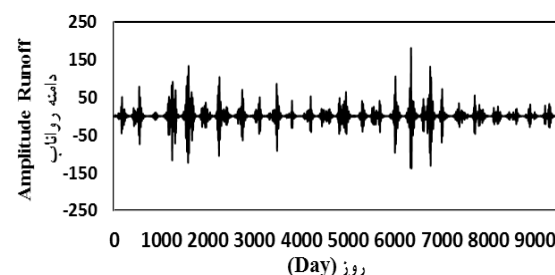
شکل ۱۲- سیگنال فرکانس پایین رواناب در سطح ۴
Figure 12- Approximation signal of runoff in level 4



شکل ۷- سیگنال اصلی رواناب
Figure 7- Original signal of runoff



شکل ۹- سیگنال فرکانس بالای رواناب در سطح ۲
Figure 9- Detail signal of runoff in level 2



شکل ۱۱- سیگنال فرکانس بالای رواناب در سطح ۴
Figure 11- Detail signal of runoff in level 4

رواناب قادر نبود واکنش مناسبی را نشان دهد در مدل ANN-WT مرتفع شد.

بنابراین ترکیب آنالیز موجک با شبکه عصبی در شبیه‌سازی سیگنال رواناب موجب انعطاف‌پذیری بیشتر شبکه عصبی شده است. چنانکه مشخص شد سیگنال سری زمانی رواناب کشکان از ماهیت دینامیکی برخوردار بوده و دارای کمینه‌ها و بیشینه‌های محلی است که این فرآیند باعث شده که مدل ANN قادر به تشخیص مناسب چنین کمینه و بیشینه‌های محلی در مقدار رواناب نباشد در صورتی که با جداسازی این سیگنال‌ها از سیگنال اصلی رواناب، عملکرد و کشف اطلاعات زودگذر و بلندمدت رواناب با وزن مناسب در دسترس شبکه عصبی قرار گرفتند.

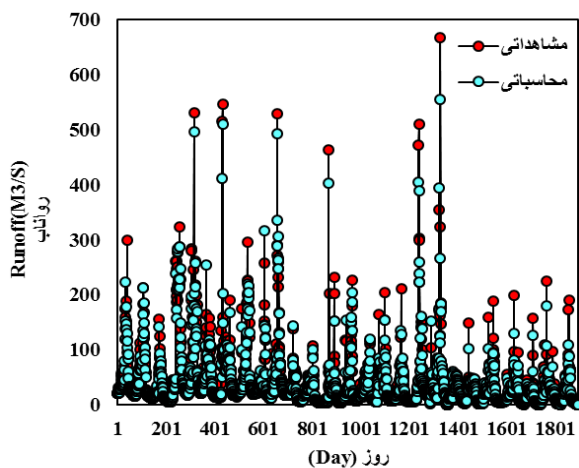
معماری مدل ترکیبی شبکه عصبی - آنالیز موجک نیز با احتساب به ۳۰ نورون ورودی و سه لایه پنهان انجام گرفت که ارزیابی سنج‌های کارایی عملکرد مدل نشان دادند که ساختار ۷-۱-۳۰ با ۱/۲ درصد خطای پیش‌بینی و ضریب همبستگی ۰/۹۸۹ بهترین شبیه‌سازی رواناب را در قیاس با سایر ساختارها این مدل ترکیبی بر عهده دارد (شکل‌های ۱۵ و ۶). چنانکه از پراکنش داده‌های رواناب مشخص است دقیق‌ترین جداسازی داده‌ها در این مدل اتفاق افتاده است. از سویی این مدل نیز مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده را بیشتر از مقادیر رواناب مشاهداتی برآورد کرده است.

به‌واقع مسئله‌ای که در رویکرد ANN اتفاق افتاده بود بدین ترتیب که خطای رواناب شبیه‌سازی شده دستخوش عدم تقارن شدیدی شده بود یعنی اینکه مدل در برخورد با فرکانس‌های متفاوت

جدول ۲- نتایج عملکرد مدل ترکیبی K- نزدیک ترین همسایه - آنالیز موجک (K-NN-WT) و مدل ترکیبی شبکه عصبی - آنالیز موجک (ANN-WT) در مدل سازی رواناب کشکان

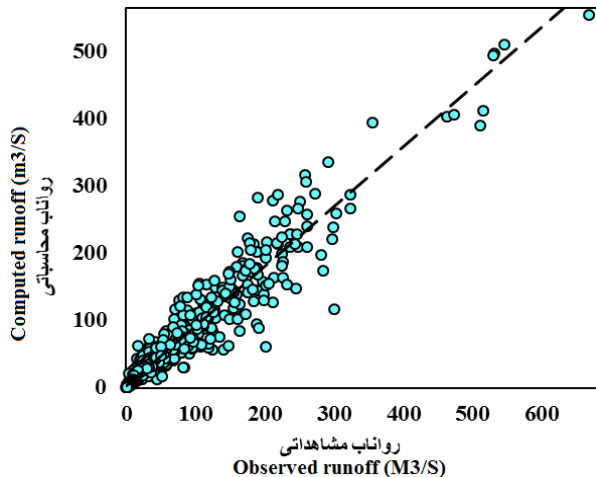
Table 2- Performance results for K-nearest neighbor and wavelet hybrid model (K-NN-WT) and neural network and wavelet hybrid model (ANN-WT) in Kashkan runoff modeling

مدل Model	میانگین مشاهداتی Observed Mean (M ³ /s)	میانگین محاسباتی Computed Mean (M ³ /s)	انحراف معیار مشاهداتی Observed Std deviation	انحراف معیار محاسباتی Computed Std deviation	R	RMSE (M ³ /s)	CRM
K-NN-WT	41.44	39.86	58.24	53.5	0.967	15.2	0.038
ANN-WT	43.8	45.3	65.27	63.34	0.989	9.9	0.035



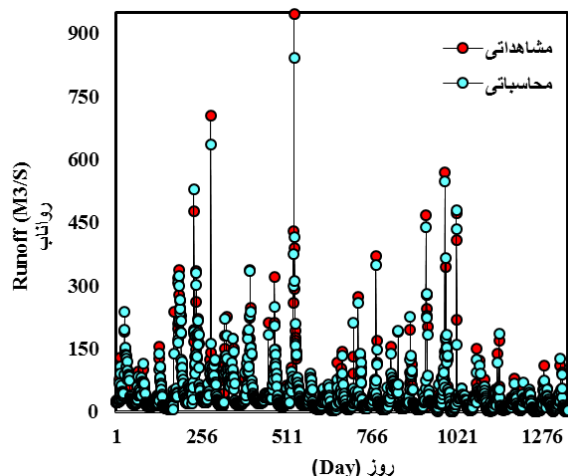
شکل ۱۴- نمودار مقایسه رواناب مشاهداتی و محاسباتی (K-NN-WT)

Figure 14- Comparison of the observed and computed runoff (K-NN-WT)



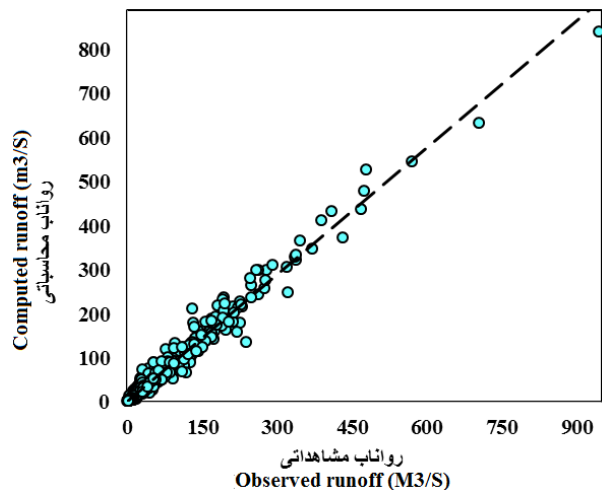
شکل ۱۳- نمودار پراکندگی رواناب مشاهداتی و محاسباتی (K-NN-WT)

Figure 13- Scatter plot of observed and computed runoff (K-NN-WT)



شکل ۱۶- نمودار مقایسه رواناب مشاهداتی و محاسباتی (ANN-WT)

Figure 16- Comparison observed and computed runoff (ANN-WT)



شکل ۱۵- نمودار پراکندگی رواناب مشاهداتی و محاسباتی (ANN-WT)

Figure 15- Scatter plot observed and computed runoff (ANN-WT)

نتیجه‌گیری

چنین خطاهای نبوده ولی این مدل، عملکرد همگنی مقابل داده‌ها داشته و پراکندگی مقادیر رواناب را به‌درستی تشخیص داده بود. بنابراین به‌منظور افزایش دقت دو مدل یادشده و استخراج اطلاعات پنهان سیگنال رواناب که در فرکانس‌های متفاوت آن نهفته‌اند، ابتدا سیگنال رواناب در ۴ سطح تجزیه شد که این ۴ سطح به‌نوعی بیانگر فرکانس‌های روزانه، ماهانه و سالانه رواناب کشکان بودند. به این ترتیب، رفتارهای متفاوت سیگنال سری زمانی این رودخانه در دسترس مدل‌های یاد شده قرار گرفت و دو مدل ترکیبی ANN-WT و K-NN-WT اجرا شدند. نتایج به‌دست آمده از رواناب شبیه‌سازی شده توسط این مدل‌های ترکیبی حکایت از افزایش ضریب دقت و بهبود خروجی آن‌ها نسبت به مدل‌های منفرد داشت. به‌واقع تجزیه سیگنال اصلی رواناب توسط آنالیز موجک باعث شده بود که در فرآیند شبیه‌سازی، وزن‌دهی مناسبی به دینامیک‌های بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت سیگنال رواناب اختصاص پیدا کند و خطای ناشی از مدل‌سازی به نحو برجسته‌ای کاهش پیدا کند. به‌طوری‌که این دو مدل ترکیبی به ترتیب رواناب را به مقدار خطای ۱/۲ و ۲/۷ درصد شبیه‌سازی کردند.

به‌طورکلی مدل ترکیبی ANN-WT بهترین عملکرد را در قیاس با سایر مدل‌ها نشان داد. به‌واقع مسئله‌ای که مدل ANN با آن روبه‌رو بود با ترکیب آنالیز موجک حل شد. به‌طورکلی این نتایج حاکی از آن هستند که چون سیگنال روزانه رواناب رودخانه کشکان از حالت غیر ایستا و دینامیک پیچیده‌ای برخوردار بوده و همچنین دارای دینامیکی با فرکانس‌های متعدد زمانی است لذا استخراج این فرکانس‌ها می‌تواند به‌طور مؤثری منجر به بهبود مدل‌های شبیه‌سازی و کاهش عدم قطعیت شود.

سری‌های زمانی داده‌های روزانه جریان آب رودخانه اغلب از دینامیک پیچیده‌ای برخوردارند بدین مفهوم که فرکانس‌های متفاوتی در رفتار آن‌ها نهفته است که روش‌های آماری و هوشمند به‌تنهایی قادر به کشف این فرکانس‌های نیستند. این مطالعه به ارزیابی چگونگی عملکرد ترکیب دو مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و K-NN نزدیک‌ترین همسایه (K-NN) با آنالیز موجک در شبیه‌سازی سیگنال سری زمانی رواناب رودخانه کشکان تمرکز یافته بود. آزمون حافظه و رفتار سیگنال اصلی این سری زمانی با استفاده از نمایه هرست به مقدار ۰/۶ نشان داد که رواناب رودخانه کشکان دارای رفتاری دینامیکی بوده و از حافظه بلندمدت جهت به‌کارگیری مدل‌های سری زمانی برخوردار است. در این راستا با در نظرگیری تابعی که سیگنال سری زمانی رواناب را به ۶ سیگنال از سری‌های زمانی این رواناب با تأخیرهای ۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ وابسته کرده بود، فرآیند شبیه‌سازی رواناب با اتکای به دو مدل یادشده انجام گرفت. ارزیابی سنج‌های کارایی عملکرد مدل حاکی از این بود که هر دو مدل در مجموع، مقدار رواناب را بیشتر از مقادیر مشاهداتی شبیه‌سازی کرده‌اند.

از سویی مدل K-NN با خطای ۴/۶ درصد عملکرد بهتری نسبت به مدل ANN با خطای ۵/۸ درصد نشان داد. به‌واقع مدل دومی از واکنش همگنی در مقابل مقادیر محلی واقع در سیگنال رواناب برخوردار نبود یعنی اینکه فرکانس‌های روزانه، ماهانه، دوره‌ای و سالانه‌ای که در سیگنال رواناب رودخانه کشکان قرار دارند باعث به وجود آمدن این رفتار غیر همگن در شبکه عصبی شده‌اند. در این راستا، شبکه عصبی در مواجهه با چنین رفتارهای غیر سینوسی و محلی که جزء ماهیت سیگنال رواناب کشکان هستند متحمل خطاهای بسیار شدید شده بود. هرچند که مدل K-NN نیز مبرا از

منابع

- 1- Abdollahi Asadabadi S., Dinpashoh Y., and Mirabbasi R. 2014. Forecasting of mean daily runoff discharge of behesht-abad River using wavelet analysis. Journal of Water and Soil, 28(3):534-545. (in Persian with English abstract)
- 2- Akhtar M.K., Corzo G.A., Van Andel S.J., and Jonoski A. 2009. River flow forecasting with artificial neural networks using satellite observed precipitation pre-processed with flow length and travel time information: case study of the Ganges river basin. Hydrol. Earth Syst. Sci, 13:1607-1618.
- 3- Anis Hosseini M., and Zaker Mashgh M. 2013. Analysis and forecasting of river flow kashkan using chaos theory. Journal of Hydrolic, 8(3):45-61. (in Persian with English abstract)
- 4- Azmi M., and Araghinejad. 2012. Development of K-Nearest Neighbour regression method in forecasting river stream flow. J. of Water and Wastewater, 2:108-119. (in Persian with English abstract)
- 5- Cannas B., Fanni A., See L., and Sias G. 2006. Data preprocessing for river flow forecasting using neural networks: Wavelet transforms and data partitioning. Phys. Chem. Earth, 31(18): 1164-1171.
- 6- Daubechies I. 1992. Ten lectures on wavelets. Society for Industrial Mathematics.
- 7- Haghizadeh A., Mohammadlo M., and Nouri F. 2015. Modeling rainfall – runoff process using artificial neural

- network and Neuro-Fuzzy Computing and multiple regression (case study: watershed of Korramabad). *Journal of Eco hydrology*, 2:233-243. (in Persian with English abstract)
- 8- Hassanzadeh Y., Lotfollahi M.A., Shahverdi S., Farzin S., and Farzin N. 2013. De-noising and prediction of time series based on the wavelet algorithm and chaos theory (Case Study: SPI drought monitoring index of tabriz city), *Iran-Water Resources Research*, 8(3):1-13. (in Persian with English abstract)
- 9- Hurst H.E. 1951. Long-term storage capacity of reservoirs (with discussion). *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116: 770-808.
- 10- Karamuz M., and Araghinejad Sh. 2014. *Advanced hydrology*. AmirKabir University. Iran
- 11- Kia, M. 2010. *Neural networks in matlab*. Qian academic publishing.
- 12- Kisi O. 2007. Streamflow forecasting using different artificial neural network algorithms. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, 12(5):532-539.
- 13- Kisi O. 2005. Daily river flow forecasting using artificial neural networks and auto-regressive models. *Turkish J. Eng. Env. Sci*, 29:9-20.
- 14- Lall U., and Sharma A. 1996. A nearest neighbor bootstrap for resampling hydrologic time series. *Water Resources Research*, 32(3):679-694.
- 15- Lee S., Ryu J.H., Lee M.J., and Won J.S. 2006. The Application of artificial neural networks to landslide susceptibility mapping at Janghung, Korea. *Mathematical Geology*, 38(2):199-220.
- 16- Mark H.B., Martin T.H., and Haward B.D. 2016. *Neural network toolbox™ getting started guide*. The MathWorks, Inc.
- 17- Menhaj M. 2002. *Neural networks and artificial intelligent basic*. First edition AmirKabiruniversity. Press, 350p.
- 18- Montaseri M., and Zamanzad Ghavidel S. 2014. River Flow Forecasting by Using Soft computing *Journal of Water and Soil*, 28 (2):394-405. (in Persian with English abstract)
- 19- Nayak P.C., Sudheer K.P., Rangan D.M., and Ramasastri K.S. 2004. A neuro-fuzzy computing technique for modeling hydrological time series. *Journal of Hydrology*, 291(1):52-66.
- 20- Pramanik N., and Panda R.K. 2009. Application of neural network and adaptive neuro-fuzzy inference systems for river flow prediction. *Hydrological sciences journal*, 54(2): 247-260.
- 21- Sanikhani H., Dinpashoh Y., and Ghorbani M.A. 2014. Baranduz-chay river flow modeling using the K-nearest neighbor and intelligent methods. *Water and Soil Science*, 25(1):219-233.
- 22- Shafaei M., Fakheifard A., Darbandi S., and Ghorbani M.A. 2013. prediction daily flow of vanyar station using ANN and wavelet hybrid procedure. *Irrigation & Water Engineering*, 14:144-128. (in Persian with English abstract)
- 23- Shataee Sh., Kalbi S., Fallah A., and Pelz D. 2012. Forest attributes imputation using machine-learning methods and ASTER data: comparison of k-NN, SVR and random forest regression algorithms. *International Journal of Remote Sensing*, 33(19):6254-6280. (in Persian with English abstract)
- 24- Veiga V.B., Hassan Q.K., and He J. 2015. Development of Flow Forecasting Models in the Bow River at Calgary, Alberta, Canada. *Journal Water*, 7:99-115.
- 25- Wang W., and Ding J. 2003. Wavelet network model and its application to the prediction of hydrology. *Nature and Science*, 1(1):67-71
- 26- Wilson D. R., and Martinez T. R. 2000. Reduction techniques for exemplar-based learning algorithms. *Machine Learning*, 38(3): 257-286.
- 27- Wu C.L., and Chau K.W. 2010. Data-driven models for monthly streamflow time series prediction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 23:1350-1367.
- 28- Yates D., Gangopadhyay S., Rajagopalan B., and Strzepek K. 2003. A technique for generating regional climate scenarios using a nearest-neighbor algorithm. *Water Resoures Research*, 39 (7): 1114- 1121.
- 29- Young C.C., Liu W.C., and Chung C.E. 2015. Genetic algorithm and fuzzy neural networks combined with the hydrological modeling system for forecasting watershed runoff discharge. *The Natural Computing Applications*, 1-13.



Forecasting Kashkan River Flow using a Combination of Artificial Neural Network, Wavelet Analysis and K - Nearest Neighbor

D. Yarahmadi¹- H. Mirhashemi^{2*}

Received: 23-05-2017

Accepted: 06-11-2017

Introduction: Forecasting and modeling of river flow is an essential step towards planning, designing and utilizing water resources management system which is subject to issues such as droughts and destructive floods in river basins. The river flow deficit and excess could result in financial and human losses. Such predictions of river flow not only provide the necessary warning signals about the flood risk, but also help to adjust the water outflows during low level of water flows which help to the water resource management. Due to the importance of river flows and its fluctuations in short and long term on different aspects of human lives, understanding its behavior and performance is crucial (necessary). Thus, with discovering its dynamic behavior, it is possible to predict its future performance. The aim of this study is to explore and simulation of Kashkan River's performance using the statistical intelligent methods to provide models with lower uncertainty in order to improve the planes based on Kashkan's River flows.

Materials and Methods: For this study, the series of daily discharge data from Poldokhtar- Kashkan station (located in the coastal river) over 1370-1393 were used as the primary input. Methods used in this study were based on memory uses the Hurst exponent of long memory time series. Runoff is the dynamics of the series. The current state of these series is dependent on its historical states. The delay time (lag time) of 1, 3, 5, 7, 10 and 15 days before the runoff were calculated. The amount of runoff was seen as a function of the time series. Considering the above-mentioned six time series as input signals, time series modeling using statistical methods K- nearest neighbor (K-NN), and artificial neural network, combined wavelet - K-NN and combining the wavelet nervous.

Results and Discussion: Kashkan's Memory river flow system, using the Hurst exponent within 10 days and mid-4200 based on the amount of 0.6 was obtained (Figure 2). This amount indicates a non-linearly behavior and a dynamic learning system. In addition, it shows the presence of long memory in the river flow time series. Then, by allocating 80% of the data for training and the remaining 20 percent for testing the model and adopting ranges from 1 to 10 nearest neighbor and a range of 1,000 to 50,000 particles (for data on education) Model K-NN were prepared. Using the criteria to assess the efficiency and accuracy of a model in each performance of the mentioned domains, the best model with the 6 neighbors structure and 15,000, was obtained. In this model stimulated the runoff with the correlation of 0.90 and a 4.6 error was obtained. On the other hand, artificial neural network architecture to simulate runoff with 6 input neurons in a hidden layer neurons and considering 3 to 20 and an output neurons leading to the 6-8-1 structure as the best model was fitted. This model has a correlation of 0.89 and the forecast error of 5.8 in the process of runoff simulation. Then using wavelet function, mortality, time-series signal runoff into 4 levels, including 8 under high frequency and low frequency signal was decomposed where high-frequency signals and low-frequency signal of 4 level were considered as the original signal for the input surface runoff. In this regard, the hybrid model K-NN-WT with runoff time series prediction error of 2.7 percent and the hybrid model ANN-WT with the correlation of 0.99 the estimation error of 1.2 were simulated.

Conclusion: Running 4 Artificial Neural Network (ANN), K-nearest neighbor (K-NN) and combining the wavelet analysis of the two models (ANN-WT and K-NN-WT) to predict the time series of runoff river showed that due to the existence of multiple time frequencies in the time series of the river signals, its decomposition it using wavelet analysis results in extraction of hidden information that are not available through the original signal. This information is the daily, monthly, quarterly and annual fluctuations. The hybrid models performance

1- Assistant Professor in Climatology, Geography Sciences Department, Lorestan University

2- Ph.D. of Climatology and Lecturer of Geography Sciences Department, Lorestan University

(*- Corresponding Author Email: climate90@yahoo.com)

indicated higher accuracy and improved outcomes relative to individual models. In fact, the analysis of the original runoff signal by wavelet analysis in the process of simulation results in an appropriate weighting given to long-term and short term dynamic of runoff which led to significant lower error in modeling.

Keywords: Kashkan River, Hurst exponent, Myer wavelet, Time series signal

عدم قطعیت روش‌های ریزمقیاس نمایی در تخمین جریان آبی حوضه آبریز قره‌سو تحت اثر تغییر اقلیم

محمدرضا گودرزی^{۱*} - علیرضا فرجی^۲ - مهدی کماسی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳

چکیده

تخمین عدم قطعیت اثرات تغییر اقلیم در مطالعات اخیر توجهات بسیاری را به خود جلب کرده است، اما بر عدم قطعیت روش‌های ریزمقیاس نمایی کمتر توجه شده است. امروزه مطالعات فراوانی پیرامون اثرات تغییر اقلیم در آینده بر زندگی بشر و منابع آب موجود صورت می‌پذیرد. توسعه شهرها، چالش مصارف آب و افزایش گازهای گلخانه‌ای بر این پدیده در آینده شدت خواهد افزود و جریان رودخانه‌ها را دستخوش تغییر خواهد نمود. این تحقیق بر روی حوضه آبریز رودخانه قره‌سو واقع در غرب کشور ایران و با چهار ایستگاه باران‌سنجی و دو ایستگاه سینوپتیک انجام شده است، همچنین بر چندین مدل اقلیمی مختلف حاصل از گزارش چهارم و پنجم انجمن IPCC تمرکز نموده و برای لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های مختلف از روش‌های ریزمقیاس نمایی آماری و تناسبی و همچنین سناریوها و مدل‌های اقلیمی مختلف استفاده شده است. نتایج شاخص‌ها حاکی از برتری مدل‌های CANESM2 و HADCM3 (برای هر دو متغیر) در روش آماری و HADCM3 (بارش) و HADGEM (دما) در روش تناسبی می‌باشد. داده‌های دما و بارش دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۶۹) روش آماری و (۲۰۴۰-۲۰۵۲) روش تناسبی) ریزمقیاس شده و به مدل HEC-HMS که از قبل مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفته است جهت چشم انداز جریان حوضه در دوره آینده داده شد. نتایج ضریب تعیین روزانه برابر ۰/۷ برای دوره واسنجی و ۰/۶ برای دوره صحت‌سنجی بود. در نهایت تغییرات رواناب مورد بررسی قرار گرفت که در کل اکثر مدل‌ها در فصل زمستان، افزایش رواناب و در بقیه فصول کاهش رواناب نسبت به دوره پایه را پیش‌بینی می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: روش تناسبی، سناریوهای انتشار، مدل‌های اقلیمی، مدل HEC-HMS، مدل SDSM

مقدمه

مقیاس مورد نیاز در حوضه‌ها می‌باشد، برای فائق آمدن بر این مشکلات به روش‌های ریزمقیاس نمایی دینامیکی برای ایجاد ورودی‌های آب و هوایی با جزئیات بیشتر، روش‌های ریزمقیاس نمایی آماری برای شبیه‌سازی متغیرهای سطحی مقیاس محلی با استفاده از متغیرهای تروپوسفری بزرگ مقیاس نیاز می‌باشد (۲۱). پژوهش‌های متعددی بر اثرات تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه‌ها صورت پذیرفته است که از جمله آن می‌توان به تحقیقات زیر اشاره کرد. ذهبیون و همکاران (۲۴) در تحقیقی کاربرد مدل SWAT را در تخمین رواناب حوضه در دوره‌های آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم بررسی نمودند. آنها از مدل HADCM3 حاصل از گزارش چهارم انجمن IPCC^۵ تحت سناریوی A2 استفاده نمودند و همچنین از روش عامل تغییر برای ریزمقیاس نمایی خروجی مدل HADCM3 استفاده کردند، نتایج تحقیق نشان از افزایش دما ۱ تا ۴ درجه سانتی‌گرادی در همه ماه‌ها و تغییرات بارش حوضه بین ۳۰٪- تا ۳۰٪+ به غیر از ماه‌های بدون

حوضه‌های آبریز طی دهه‌های اخیر با چالش‌های بی‌سابقه‌ای کمبود جریان و به تبع آن کاهش رواناب رودخانه‌ها مواجه شده‌اند که در این بین پدیده‌ی تغییر اقلیم نیز در آینده اثرات خود را بر حوضه‌ها القا خواهد نمود. اولین گام در مطالعات تغییر اقلیم برآورد چشم‌انداز داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی نظیر دما و بارش در دوره آینده (سناریوهای اقلیمی) می‌باشد که برای این امر از مناسب‌ترین ابزارها، می‌توان به خروجی‌های مدل‌های اقلیمی GCM^۴ اشاره نمود. مهم‌ترین موضوع عدم تطابق مقیاس مکانی خروجی‌های این مدل‌ها با

۱ و ۳- استادیاران گروه مهندسی عمران، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)
(*) نویسنده مسئول: (Email: Goodarzi6mr@gmail.com)

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)

DOI: 10.22067/jsw.v31i6.64439

4- General Circulation Model

5- Intergovernmental Panel on Climate Change

یک روش ریزمقیاس نمایی صرفاً نمی‌توان اعتماد کرد و لحاظ عدم قطعیت موجود در مدل‌های GCM و روش‌های ریزمقیاس نمایی نقطه‌ای مثبتی است که در این تحقیق با در نظر گرفتن سه مدل HADCM3، CGCM3 و CANESM2 با روش ریزمقیاس نمایی آماری و هشت مدل اقلیمی شامل CGCM3، CNRMCM3، CSIROCM3، ECHAM5، GFDL2.1، GISS-ER، HADGEM و HADCM3 با روش ریزمقیاس نمایی تناسبی لحاظ شده است. هدف از این تحقیق ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه قره‌سو می‌باشد که با استفاده از روش ریزمقیاس نمایی آماری SDSM^۲ و روش تناسبی و مدل بارش-رواناب HEC-HMS این تحقیق صورت گرفته است و همچنین از مدل CANESM2 که جدیدترین مدل منتشر شده توسط انجمن IPCC از سری گزارشات AR5 (گزارش پنجم) بهره برده شده است و سعی بر آن شده تا با استفاده از سه مدل مختلف اقلیمی و سناریوهای انتشار RCP^۳ و SRES^۴ با روش آماری و هشت مدل اقلیمی ذکر شده با روش تناسبی عدم قطعیت موجود در مدل‌های اقلیمی و سناریوهای انتشار لحاظ گردد. همچنین از مدل تلفات پیوسته SMA^۵ در مدل‌سازی بارش-رواناب HEC-HMS استفاده شده است که منجر به واسنجی بهتر مدل می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه قره‌سو در شمال غربی حوضه کرخه و در غرب ایران واقع شده است (شکل ۱). مساحت آن ۵۳۵۴ کیلومتر مربع و متوسط بارندگی سالانه آن بین ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر است (۲۴). ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک متعددی در سطح حوضه قره‌سو وجود دارد. تعدادی از این ایستگاه‌ها جهت تهیه داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل‌سازی انتخاب گردیده‌اند. ایستگاه‌های منتخب در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار RCP و SRES

مدل‌های GCM ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی سیستم آب و هوایی و تحقیقات اقلیمی می‌باشند که سناریوهای اقلیمی احتمالی را در دوره آینده تولید می‌کنند. بسیاری از مطالعات هیدرولوژیکی از خروجی‌های دما و بارش ریزمقیاس شده‌ی حاصل از مدل‌های GCM به عنوان ورودی مدل‌های بارش-رواناب استفاده نموده‌اند (۲۳). دقت

بارش داشت. همچنین تغییرات رواناب خروجی حوضه بین ۹۰- تا ۱۲۰٪ بود. Mbaye و همکاران (۱۱) اثرات تغییر اقلیم را بر روی منابع آب حوضه سنگال (غرب آفریقا) بررسی نمودند. آنها از خروجی‌های مدل اقلیمی منطقه‌ای REMO به عنوان ورودی مدل هیدرولوژیکی MPI-HM جهت شبیه‌سازی جریان رودخانه، رواناب، رطوبت خاک و تبخیر-تعرق استفاده نمودند. ضریب نش برای این مدل ۰/۹۲ بدست آمد که نشان از شبیه‌سازی مناسب جریان حوضه با این مدل بود. نتایج نشان از کاهش کلی جریان حوضه، رطوبت خاک تحت دو سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 در همه شبیه‌سازی‌ها بود. Saha (۱۳) در تحقیقی اثرات القایی تغییر اقلیمی بر بارش و منابع آب حوضه British Columbia در کانادا را بررسی نمود. وی در این تحقیق از مدل CRCM4.2 تحت سناریوهای انتشار A2 و B1 و روش ریزمقیاس نمایی عامل تغییر (تناسبی^۱) برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ و مدل هیدرولوژیکی بارش-رواناب GSSHA استفاده نمود. نتایج کلی حاکی از افزایش جریان ماهانه، فصلی و سالانه بود. میانگین جریان سالانه در دوره آینده تحت دو سناریوی انتشار A2 و B1 به ترتیب در حدود ۱۵/۵٪ و ۱۲/۱٪ به علت افزایش بارش میانگین ۵/۵٪ و ۳/۵٪ و افزایش دما در حدود ۰/۷۶٪ و ۰/۵۷٪ درجه سانتی‌گراد بود. وی همچنین به این نتیجه رسید که میانگین جریان فصلی نیز در زمستان، بهار، تابستان و پاییز در دوره آینده و تحت سناریوی A2 با افزایش ۱۰٪، ۱۶٪، ۱۱٪ و ۱۱٪ و تحت سناریوی B1 به ترتیب ۶٪، ۱۵٪، ۶٪ و ۸٪ روبرو خواهد شد. Sharma و همکاران (۱۶) اثرات تغییر اقلیم کلی را بر جریان‌های کمینه در حوضه Muskingum در اوهایو شرقی مورد مطالعه قرار دادند. آنها از مدل هیدرولوژیکی SWAT برای شبیه‌سازی جریان حوضه استفاده کردند. آنها همچنین برای سنجش تغییرات جریان در طی قرن ۲۱ از ۱۹ مدل GCM تحت سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در سه دوره مختلف و عامل Bias Corrected استفاده کردند. نتایج حاکی از افزایش میانگین جریان سالانه ۳۸/۳٪ در دهه ۲۰۳۵، ۴۶/۹٪ در دهه ۲۰۵۵ و ۴۹/۶٪ در دهه ۲۰۸۵ بود اما جریان در ماه سپتامبر (دوره جریان کمینه) با کاهش بحرانی روبرو شده بود. در اکثر مطالعات قبلی که در کشور ایران صورت پذیرفته است جای خالی مدل‌های GCM حاصل از گزارش پنجم IPCC به شدت احساس می‌شود، از این رو همه‌ی اساتید اقلیم‌شناسی بر این موضوع تأکید دارند که پژوهش‌ها باید به‌روز گردند. به همین جهت در این تحقیق از جدیدترین مدل GCM حاصل از گزارش پنجم IPCC با عنوان CANESM2 بهره برده شده است، همچنین در بیشتر مطالعات قبلی بر یک مدل GCM و یک روش ریزمقیاس نمایی منحصر تکیه شده است با وجود اینکه بر نتایج یک مدل اقلیمی و

2- Statistical Down Scaling Methods

3- Representative Concentration Pathways

4- Special Reports on Emission Scenario

5- Soil Moisture Accounting

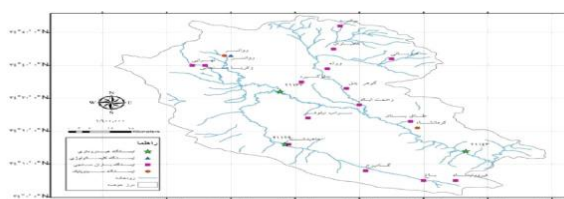
1- Proportional Downscaling

گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی گردند. سناریوهای قدیمی تر SRES در واقع گزارش ویژه‌ای است که توسط IPCC در سال ۲۰۰۰ منتشر شد که به منظور ارائه تصویری از تغییر اقلیم آینده کره زمین استفاده می‌شود. این سناریوها در گزارش‌های سوم (TAR) و چهارم (AR4) IPCC که به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۷ چاپ شدند مورد استفاده قرار گرفتند (۷ و ۸). به طور کلی ۴۰ سناریوی مختلف وجود دارند که هر کدام فرضیات متفاوتی از میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، پوشش سطح زمین و دیگر وادش‌های اقلیم در آینده را مد نظر قرار داده‌اند. علاوه بر آن فرضیاتی برای نحوه توسعه فنی و رشد اقتصادی آینده کشورها را در نظر گرفته‌اند. خانواده سناریوهای انتشار به سناریوهایی اطلاق می‌شود که دارای موضوع و زمینه مشترکی هستند. در گزارش‌های سوم و چهارم IPCC بر روی شش خانواده از سناریوهای بحث شده‌اند که عبارتند از: A1B, A1FI, A1T, A2, B1 و B2.

مکانی افقی مدل‌ها در سطح خشکی‌های کره زمین نوعاً ۲۵۰ کیلومتر و دقت مکانی قائم آن برابر یک کیلومتر می‌باشد. در حالی که دقت مکانی قائم در اقیانوس‌ها ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر و دقت مکانی افقی برابر ۱۲۵ تا ۲۵۰ کیلومتر می‌باشد. مدل‌های GCM در چند دهه اخیر با افزایش قدرت رایانه‌ها توسعه چشمگیری یافته‌اند (۲۰). داده‌های خروجی مدل‌های GCM بعد از ریزمقیاس نمایی می‌توانند در مقیاس منطقه‌ای به مدل‌های هیدرولوژیکی جهت تصویر چشم انداز رواناب در آینده معرفی گردند (۱۰). انجمن IPCC در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود (AR5) از سناریوهای جدید RCP به عنوان نماینده خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است (۹). سناریوهای جدید دارای چهار خط سیر کلیدی با نام‌های RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 و RCP8.5 می‌باشند که بر اساس میزان واداشت تابشی آنها در سال ۲۱۰۰ و مشخصات متفاوت سطح تکنولوژی، وضعیت اجتماعی و اقتصادی، خط مشی‌ها در آینده می‌باشند که در هر شرایط می‌توانند منجر به سطح انتشار متفاوت

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های منتخب
Table 1- Characteristics of selected stations

نام ایستگاه Station name	نوع ایستگاه Station type	ارتفاع (m) Height	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	دوره آماری Statistical period	بارش سالانه (mm) Annual precipitation
کرمانشاه Kermanshah	سینوپتیک Synoptic	1318.6	47 09	34 21	1970-2000	447
روانسر Ravansar	سینوپتیک Synoptic	1379.7	46 39	34 43	1988-2000	525
جلوگیره Jelogireh	باران‌سنجی Rain gage	1180	46 51	34 35	1988-2000	490
ماهیدشت Mahidasht	باران‌سنجی Rain gage	1415	46 49	34 16	1988-2000	403
قره باغستان Gharebaghestan	هیدرومتری Hydrometric	1230	47 15	34 14	1970-2000	-



شکل ۱- نقشه حوضه قره‌سو و ایستگاه‌های منتخب

Figure 1- The location of the Gharehsoo Basin and selected stations

مقیاس مانند میانگین تراز سطح دریا، باد منطقه‌ای، دما، ارتفاع ژئو پتانسیل و ... به متغیرهای اقلیمی محلی مانند دما، بارش و رطوبت مشاهداتی ارتباط داده می‌شود، این هدف با روابط آماری و تجربی حاصل می‌شود (۱۹). مدل SDSM در تحقیقات بسیاری جهت

روش‌های ریزمقیاسی آماری SDSM و تناسبی

سه روش جهت ریزمقیاس نمایی خروجی‌های مدل‌های GCM وجود دارد که شامل ریزمقیاس نمایی آماری، دینامیکی و عامل تغییر می‌باشد (۴). با استفاده از مدل‌های آماری، متغیرهای اقلیمی بزرگ

باشد. مدل‌های مذکور در طی زمان بارندگی خاصی، سیستم هیدرولوژیکی را شبیه‌سازی کرده، رواناب را محاسبه می‌کنند و پس از پایان آن زمان دیگر روانابی مشاهده نمی‌شود. معمولاً به چنین مدل‌هایی در هیدرولوژی، مدل‌های تک رویدادی یا منقطع می‌گویند. اما در مقابل مدل‌هایی نیز وجود دارد که می‌تواند رفتار شرایط خشک و تر حوضه را شبیه‌سازی می‌کند، در هیدرولوژی مهندسی، چنین مدل‌هایی، به مدل‌های پیوسته معروف‌اند. مدل پیوسته موجود در HEC-HMS مدل احتساب کننده رطوبت خاک می‌باشد که قادر است تغییرات مقدار رطوبت خاک را بین رویدادهای بارندگی در زمان‌های مختلف شبیه‌سازی کند (شکل ۲). این مدل حرکت آب و ذخیره آن را در گیاهان، سطح خاک، عمق خاک و لایه‌های زیرزمینی شبیه‌سازی کرده و با داشتن مقدار بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، مدل جریان سطحی، جریان آب زیرزمینی و تلفات ناشی از آن را روی کل حوضه آبریز محاسبه می‌کند (۱۲). مدل بکار رفته در محاسبه رواناب مدل هیدروگراف واحد کلارک می‌باشد (۱). کلارک، هیدروگراف واحد یک حوضه آبریز را به صورت صریح با دو فرآیند اصلی در تبدیل بارش مازاد به رواناب معرفی می‌کند: انتقال یا حرکت بارش اضافی از نقطه اصلی تا نقطه خروجی حوضه آبریز و میرایی یا کاهش مقدار دبی به منزله ذخیره مازاد در سراسر حوضه آبریز. ذخیره کوتاه مدت آب در حوضه (در خاک، روی سطح، در کانال‌ها) نقش مهمی را در تبدیل بارش مازاد به رواناب ایفا می‌کند (۱۷). در مدل کلارک، مخزن خطی تأثیرات جمعی کل ذخیره حوضه را نشان می‌دهد، بنابراین مخزن می‌تواند در خروجی حوضه آبریز متمرکز شود. مدل کلارک زمان لازم برای حرکت آب به خروجی حوضه را نیز منظور می‌کند (۲ و ۶).

نتایج و بحث

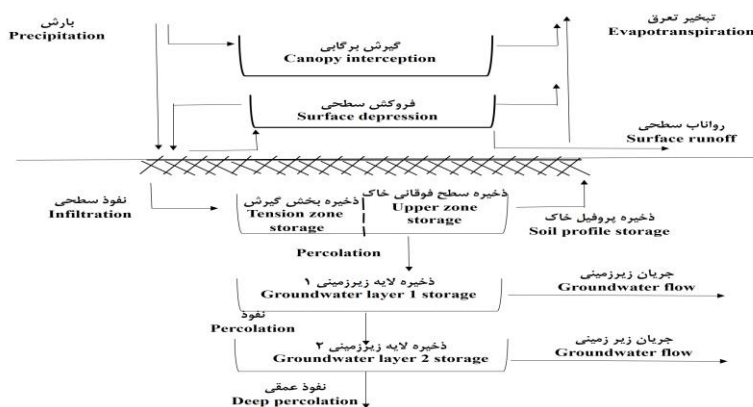
بررسی عملکرد مدل‌های GCM در شبیه‌سازی داده‌های دما و بارش در دوره پایه با روش تناسبی

به منظور بررسی عملکرد مدل‌های GCM در شبیه‌سازی داده‌های دما و بارش، در ابتدا داده‌های دما و بارش متوسط حوضه محاسبه گردید. در مرحله بعد داده‌های دما و بارش مورد نیاز برای روش ریزمقیاس نمایی تناسبی حاوی سری زمانی دما و بارش دوره پایه و دوره آینده مدل‌های مختلف GCM و در روش آماری فایل متغیرهای مشاهداتی بزرگ مقیاس ناحیه‌ای NCEP و متغیرهای بزرگ مقیاس اتمسفری استخراج شده از مدل‌های GCM برای هر یک از مدل‌ها از پایگاه‌های IPCC و سایت کانادایی وابسته به این انجمن تهیه و مرتب گردید. در ادامه، میانگین ۳۰ ساله (۲۰۰۰-۱۹۷۱) ماهانه دما و بارندگی سلول مذکور محاسبه شد.

ریزمقیاس نمایی برخی متغیرهای مهم نظیر دما و بارش برای چشم انداز پاسخ‌های هیدرولوژیکی در مطالعات تغییر اقلیم به کار برده شده است (۱۴). این مدل با ترکیب میان رگرسیون چندگانه خطی و مولدهای آب و هوایی تصادفی گسترش داده شده است (۲۰). در ابتدا به منظور واسنجی و صحت یابی مدل SDSM، متغیرهای بزرگ مقیاس منطقه مطالعاتی در مقیاس روزانه در دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ (متغیرهای حاصل از Ncep) به عنوان متغیرهای مستقل و بارندگی و میانگین دما روزانه مشاهداتی، به عنوان متغیرهای وابسته بطور جداگانه وارد مدل شدند. سپس نتایج بدست آمده از مدل با مقادیر مشاهده شده مقایسه و نحوه عملکرد مدل ارزیابی شد. با استفاده از نتایج بدست آمده در دوره تنظیم مدل و با استفاده از داده‌های بزرگ مقیاس مدل‌های GCM، سناریوهای بارش و دمای منطقه برای دو دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ و ۲۰۴۰-۲۰۶۹ تولید شدند. با استفاده از این سناریوها می‌توان به تخمین تغییرات اقلیمی دوره مطالعاتی آینده (۲۰۴۰-۲۰۶۹) منطقه مطالعاتی پرداخت. در روش تناسبی به طور معمول نسبت‌های ماهانه برای سری‌های تاریخی به دست می‌آید. ابتدا سناریوهای تغییر اقلیم برای دما و بارش تولید می‌شود. لذا برای محاسبه سناریوی تغییر اقلیم در هر مدل مقادیر اختلاف برای دما و نسبت برای بارندگی متوسط بلند مدت هر ماه در دوره آینده ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و دوره شبیه‌سازی شده پایه با استفاده از همان مدل (۲۰۰۰-۱۹۷۱) برای هر سلول از شبکه محاسباتی محاسبه می‌شود (۱۸ و ۲۲). سپس از روش عامل تغییر (Change Factor) برای ریزمقیاس نمایی تناسبی داده‌های طرح استفاده می‌شود. در روش عامل تغییر برای به دست آوردن سری زمانی سناریوی اقلیمی در آینده، سناریوهای تغییر اقلیم به مقادیر مشاهداتی (۱۹۷۱-۲۰۰۰) افزوده می‌شود (۲۵).

مدل HEC-HMS

سیستم مدل‌سازی هیدرولوژی HEC-HMS توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی (HEC) انجمن مهندسين ارتش آمریکا تهیه شده است. این مدل امکان شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب در حوضه‌های آبریز را فراهم می‌آورد. مدل HEC-HMS جهت حل محدوده گسترده‌ای از مسائل هیدرولوژیکی در محدوده وسیعی از سطوح جغرافیایی با توپوگرافی متفاوت قابل استفاده است. از نظر دسته‌بندی مدل‌ها، مدل HEC-HMS جزو مدل‌های ریاضی محسوب می‌شود که شامل زیر مدل‌های مختلف می‌باشد. در این تحقیق روش احتساب کننده رطوبت خاک جهت محاسبه تلفات و از روش هیدروگراف واحد کلارک جهت محاسبه رواناب و از مدل نمایی فروکش جهت تعیین دبی پایه استفاده شده است. مدل نمایی فروکش تشریح کننده مقدار زهکشی از ذخیره‌های قبلی موجود در حوضه است. مدل تلفات بکار رفته مدل احتساب کننده رطوبت خاک می



شکل ۲- الگوریتم کاری مدل احتساب کننده رطوبت خاک (۱۲)

Figure 2- Schematic view of the continuous soil moisture accounting components (12)

می‌باشند، که نشان دهنده‌ی پیچیدگی بارندگی و تعدد عناصر مؤثر بر آن است.

بررسی عملکرد مدل‌های GCM در شبیه‌سازی ایستگاه‌های بارش در دوره پایه با مدل آماری SDSM

به منظور صحت در انتخاب مدل‌های GCM و تعیین چشم‌انداز آینده داده‌های بارش، برای هر ایستگاه به طور جداگانه داده‌های بارش ریزمقیاس‌نمایی آماری شده و عملکرد هر مدل برای هر ایستگاه مورد سنجش قرار گرفته است. نتایج این موضوع در جدول ۴ و ۵ ارائه شده است. در ایستگاه‌های جلوگیره و ماهیدشت مدل HADCM3 و برای ایستگاه‌های کرمانشاه و روانسر مدل CANESM2 برگزیده شدند.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS

پارامترهای متعددی جهت واسنجی مدل انتخاب گردیده است. این پارامترها با توجه به تحقیقات قبلی در زمینه واسنجی مدل HEC-HMS انتخاب گردیده‌اند. پس از برآورد رواناب در خروجی حوضه، به منظور مقایسه آن با رواناب مشاهداتی از شاخص‌های خوبی برازش استفاده می‌شود. مدل برای دوره ۱۹۹۶-۱۹۹۳ (سال‌های ۹۳، ۹۴، ۹۵ و ۹۶) واسنجی و برای دوره ۱۹۹۰-۱۹۸۸ (سال‌های ۸۸، ۸۹ و ۹۰) مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. مقادیر ضرایب تعیین و نش شبیه‌سازی جریان روزانه در جدول ۶ آمده است. همچنین در شکل‌های ۳ و ۴ هیدروگراف جریان در دوره‌های واسنجی و صحت سنجی ارائه شده است.

نهایتاً این مقادیر با میانگین ۳۰ ساله معرف ماهانه دما و بارندگی مشاهداتی متوسط حوضه در دوره پایه معرف مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از وزن‌دهی و خطاهای RSME و Bias و ضرایب تعیین و نش مربوط به روش ریزمقیاس‌نمایی تناسبی در جدول ۲ آمده است، بر اساس نتایج مدل‌های ECHAM، HADGEM و CSIROMK3 برای معرفی متغیر دما و مدل HADCM3 به عنوان برترین مدل برای معرفی متغیر بارش به مدل بارش رواناب شناخته شد. مدل‌هایی که بیشترین وزن، کمترین خطا و بیشترین ضرایب تعیین و نش را دارا می‌باشند.

بررسی عملکرد مدل‌های GCM در شبیه‌سازی داده‌های دما در دوره پایه با مدل آماری SDSM

پس از واسنجی مدل SDSM برای دوره ۱۹۸۵-۱۹۷۱، به منظور ارزیابی عملکرد مدل، با استفاده از قابلیت تولید کننده آب و هوایی مدل SDSM، داده‌های بزرگ مقیاس غالب برای هر مدل و پارامترهای واسنجی شده هر یک از مدل‌ها، ۲۰ سری زمانی دمای روزانه منطقه برای دوره ۲۰۰۰-۱۹۸۶ تولید شد. سپس عملکرد داده‌های مدل شده و مشاهداتی دما مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج جدول ۳، مدل CGCM3 نسبت به مدل‌های دیگر دارای وزن کمتری (برابر صفر) می‌باشد و کارایی دو مدل دیگر در ریزمقیاس‌نمایی داده‌های دما دوره آبی بیشتر است. وزن دو مدل CANESM2 و HADCM3 به ترتیب ۰/۲۶ و ۰/۷۴ می‌باشد و همچنین خطای کمتر این دو مدل نشان از قدرت بالای این دو مدل در شبیه‌سازی دمای مشاهداتی منطقه است. بنابراین از دو مدل مذکور برای ریزمقیاس‌نمایی دما با روش آماری SDSM استفاده شده است. در مدل بارندگی، تعداد متغیرهای پیش‌بینی کننده بیشتر از مدل دمای

جدول ۲- وزن دهی، خطای RSME و Bias و ضریب تعیین و نش (داده‌های سی ساله) دوره پایه روش تناسبی
Table 2- Weighted, RSME and Bias errors and coefficient of determine and nash values for base temperature and precipitation data (30 years data) by Proportional down scaling

مدل Model	وزن دما Weighting temperature	RSME (°C)	Bias (°C)	ضریب تعیین R ²	ضریب نش Nash	وزن بارش Weighting precipitation	RSME (mm)	Bias (mm)	ضریب تعیین R ²	ضریب نش Nash
CGCM3	0.032	5.812	5.49	0.99	0.55	0.091	1.425	0.27	0.79	0.71
CNRMCM3	0.046	4.615	3.85	0.985	0.732	0.057	1.712	0.43	0.31	0.04
CSIROMK3	0.073	3.468	2.45	0.973	0.885	0.063	1.567	0.39	0.56	0.44
ECHAM5OM	0.092	2.858	-1.92	0.992	0.921	0.034	1.438	0.72	0.87	0.32
GFDLCM2.1	0.042	4.893	-4.39	0.984	0.717	0.022	1.765	1.12	0.95	-0.57
GISS-ER	0.072	4.699	-2.46	0.981	0.775	0.069	1.459	0.36	0.86	0.68
HADCM3	0.032	5.829	5.48	0.99	0.599	0.579	1.532	-0.04	0.81	0.8
HADGEM A1B	0.301	2.090	-0.59	0.989	0.978	0.042	1.733	0.59	0.44	0.18
HADGEM A2	0.309	2.091	-0.57	0.989	0.978	0.042	1.737	0.59	0.43	0.18

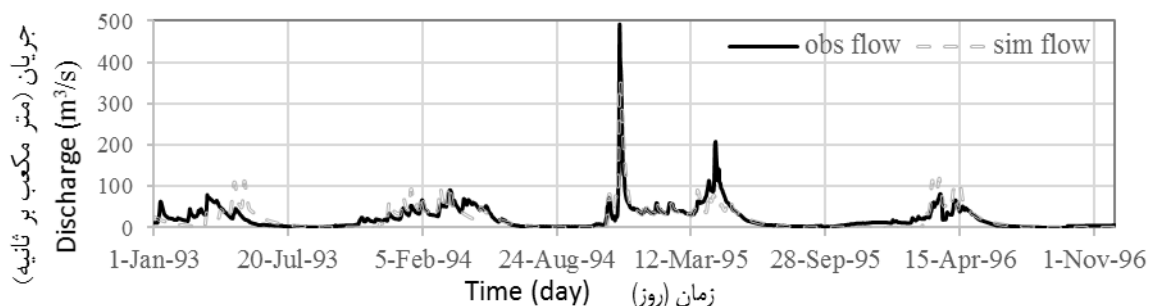
جدول ۳- خطای RSME و Bias مدل‌های GCM در روش آماری نسبت به داده‌های مشاهداتی دمای دوره پایه
Table 3- RSME and Bias errors of GCM models by statistical method for basic observed temperature

مدل Model	خطای RSME RSME error	خطای Bias Bias error	وزن Weighting	ضریب تعیین (واسنجی) R ² (Calibration)	ضریب تعیین (ارزیابی) R ² (Validation)	ضریب نش (واسنجی) Nash (calibration)	ضریب نش (ارزیابی) Nash (Validation)
CANESM2	1.75	0.71	0.26	0.9972	0.9976	0.9961	0.9894
CGCM3	101	-73	0	0.4520	0.9969	-133	0.9881
HADCM3	1.71	0.25	0.74	0.9991	0.9965	0.9989	0.9863

جدول ۴- خطاهای RSME و BIAS برای ایستگاه‌های بارش

Table 4- The RSME and Bias errors of precipitation stations

Table 4: The RMSE and Bias errors of precipitation stations								
کرمانشاه		روانسر		ماهیدشت		جلوگیره		ایستگاه بارش
Kermanshah		Ravansar		Mahidasht		Jelogireh		Station
Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	معیار Index
-0.1	1.42	-0.6	2.51	-0.3	1.49	-2.15	9.88	CANESM2
-13174	40142	-800000	7000000	-0.73	8.18	-30.8	149200	CGCM3
-0.56	-2.99	-1.05	7.12	-0.03	1.03	-0.35	1.53	HADCM3



شکل ۳- مقایسه هیدروگراف جریان مشاهداتی و مدل‌سازی شده در دوره واسنجی مدل HEC-HMS

Figure 3- The comparison between observed flow hydrograph and simulated flow hydrograph in HEC-HMS calibration period

جدول ۵- ضریب تعیین، ضریب نش و وزن دهی سالانه برای ایستگاه‌های بارش

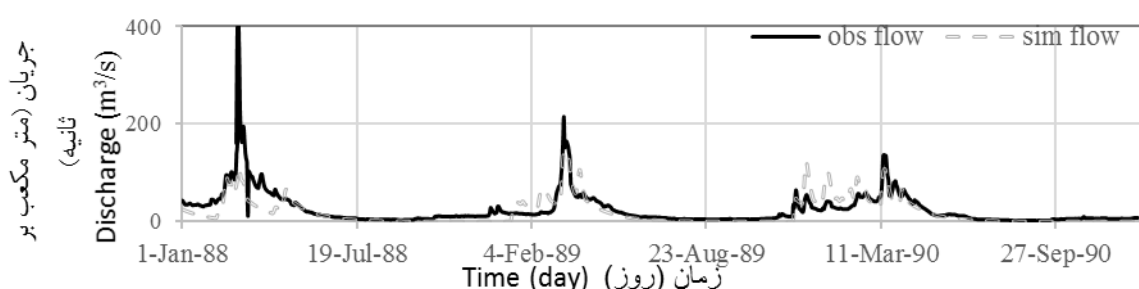
Table 5- The coefficient of detemine and nash and annual weighting for precipitation stations

کرمانشاه Kermanshah			روانسر Ravansar			ماهیدشت Mahidasht			جلوگیره Jelogireh			مدل Model	
وزن Weigh	Nash	R ²	وزن Weigh	Nash	R ²	وزن Weigh	Nash	R ²	وزن Weigh	Nash	R ²		
0.84	0.90	0.90	0.64	-2.66	0.51	0.10	-2.09	0.46	0.14	-96.8	0.01	واستجی Calibration	CANES M2
	0.70	0.80		-7.4	0.19		-1.88	0.43		-143	0.01	ارزیابی Validation	
0	-	0.04	0	-	0.1	0.04	-7.39	0.05	0	-	0.24	واستجی Calibration	CGCM3
	-	0.03		-	0.1		-54.6	0.01		-	0.07	ارزیابی Validation	
0.16	-1.16	0.39	0.36	-43.7	0.01	0.86	0.45	0.55	0.86	-0.14	0.84	واستجی Calibration	HADCM3
	0.42	0.92		-4.14	0.15		0.78	0.81		-1.25	0.74	ارزیابی Validation	

جدول ۶- نتایج حاصل از واستجی و ارزیابی مدل HEC-HMS برای حوضه قره‌سو

Table 6- HEC-HMS calibrated and validated results for Ghareso Basin

دوره Period	واستجی ۱۹۹۳-۱۹۹۶ Calibration						صحت‌سنجی ۱۹۸۸-۱۹۹۰ Validation					
	ضریب ضریب	ضریب	میانگین	میانگین	واریانس	واریانس	ضریب ضریب	ضریب	میانگین	میانگین	واریانس	واریانس
Index معیار	R ² تعیین	Nash	مشاهداتی Observati on average	مدل شده Simulation average	مشاهداتی Observati on variance	مدل شده Simulation variance	R ² تعیین	Nash	مشاهداتی Observati on average	مدل شده Simulation average	مشاهداتی Observati on variance	مدل شده Simulation variance
روزانه	0.70	0.66	23.76	22	1018	1073	0.60	0.57	24.19	18.87	1102	731
ماهانه	0.72	0.65	23.87	22.05	578.3	674.5	0.67	0.64	24.23	19	786.7	547.9
فصلی	0.80	0.74	23.87	22.05	321.5	396.5	0.71	0.65	24.23	19	446.7	370.9



شکل ۴- مقایسه هیدروگراف جریان مشاهداتی و مدل‌سازی شده در دوره صحت‌سنجی مدل HEC-HMS
Figure 4- Comparison between observed flow hydrograph and simulated flow in HEC-HMS validation

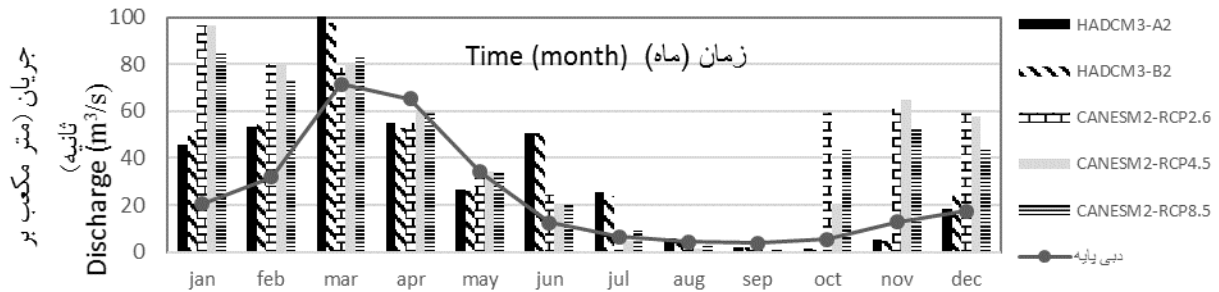
سناریوهای مختلف شبیه‌سازی گردید. شکل ۵ تغییرات میانگین ماهانه رواناب برای هر مدل GCM را با روش آماری SDSM نمایش می‌دهد. همانطور که از خروجی‌های روش SDSM مشهود است مدل HADCM3 نسبت به مدل CANESM2 در بیشتر ماه‌ها مقادیر کمتری را نشان می‌دهد و مدل CANESM2 در اکثر ماه‌های

تغییرات رواناب حوضه در دوره آینده

در ادامه با معرفی سری زمانی روزانه دما و بارش ریزمقیاس شده توسط مدل SDSM و تناسبی به مدل HEC-HMS، سری زمانی رواناب در ایستگاه هیدرومتری قره باغستان طی دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ برای روش آماری و ۲۰۴۰-۲۰۵۲ برای روش تناسبی تحت مدل‌ها و

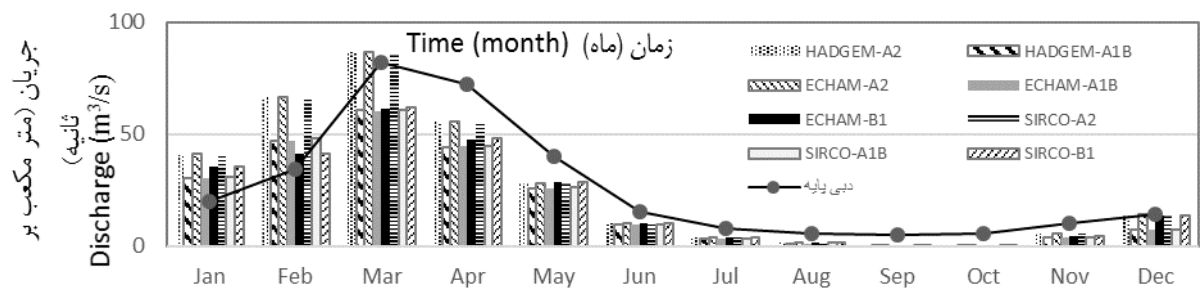
پیش‌بینی می‌کند در حالی که در بقیه فصل‌ها کاهش رواناب مشاهده می‌شود.

زمستان و پاییز افزایش رواناب را شبیه‌سازی کرده است در حالی که در اکثر ماه‌های بهار و تابستان کاهش رواناب را نشان می‌دهد. مدل HADCM3 نیز در فصول زمستان و تابستان افزایش رواناب را



شکل ۵- میانگین ماهانه رواناب با روش SDSM در دوره آینده

Figure 5- Monthly average runoff by SDSM method for future period



شکل ۶- میانگین ماهانه رواناب با روش تناسبی در دوره آینده

Figure 6- Monthly average runoff by Proportional method for future period

جدول ۷- دامنه تغییرات رواناب دوره آینده نسبت به دوره پایه

Table 7- The Runoff variation values for future period versus basic period

میانگین تغییرات جریان	بیشترین کاهش (m³/s)	بیشترین افزایش (m³/s)	مدل منتخب دما روش تناسبی Selected model for temperature by Proportional method	مدل منتخب بارش روش تناسبی Selected model for precipitation by Proportional method	میانگین تغییرات جریان	بیشترین کاهش (m³/s)	بیشترین افزایش (m³/s)	مدل منتخب دما روش SDSM Selected model for temperature by SDSM	مدل منتخب بارش روش SDSM Selected model for precipitation by SDSM
Average of flow changes (m³/s)	Highest decreases (m³/s)	Highest increases (m³/s)			Average of flow changes (m³/s)	Highest decreases (m³/s)	Highest increases (m³/s)		
-0.07	-17	32.3	HADGEM-A2		8.7	-10	38	HADCM3-A2	HADCM3-A2
-6.6	-28.2	13	HADGEM-A1B		9.1	-12.2	38.3	HADCM3-B2	HADCM3-B2
0.06	-16.6	32.4	ECHAM-A2		22.5	-9.9	75.8	CANESM2-RCP2.6	CANESM2-RCP2.6
-6.5	-27.9	12.9	ECHAM-A1B	HADCM3	19.3	-5.9	75.7	CANESM2-RCP4.5	CANESM2-RCP4.5
-5.4	-24.5	15.2	ECHAM-B1		18.5	-5.9	63.9	CANESM2-RCP8.5	CANESM2-RCP8.5
0.04	-17.1	32.6	SIRCO-A2						
-6.4	-27.7	13.6	SIRCO-A1B						
-5.2	-24.3	15.4	SIRCO-B1						

منظور خروجی دما و بارش مدل‌های GCMs با دو روش آماری (مدل SDSM) و تناسبی برای دوره آبی حوضه ریزمقیاس گردید. برتری این تحقیق ارزیابی مدل CANESM2 که به تازگی ارائه شده است می‌باشد همچنین از دیگر نقاط قوت در بخش واسنجی مدل بارش-رواناب HEC-HMS می‌باشد که از مدل تلفات پیوسته SMA استفاده شد که منجر به واسنجی بهتر و در نظر گرفتن تغییرات ترسالی و خشکسالی حوضه شده است. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل بارش-رواناب نیز در حد مورد قبول بود به طوری‌که ضریب تعیین روزانه برابر با ۰/۷ برای دوره واسنجی و ۰/۶ برای دوره صحت‌سنجی مدل بود. نتایج کلی نشان از تغییرات ماهانه رواناب در روش SDSM بین ۱۲/۲۳- و ۷۵/۸۶ و در روش تناسبی ترکیبی بین ۲۸/۲- و ۳۲/۶۵ متر مکعب بر ثانیه دارد. در دوره آینده در اکثر مدل‌ها حوضه با افزایش رواناب در فصل زمستان و کاهش آن در دیگر فصول همراه خواهد بود که دلیل آن ذوب برف در زمستان به علت افزایش دما و کاهش رواناب در دیگر فصول به علت کاهش بارش در بیشتر مدل‌ها می‌باشد. در آخر نیز به عنوان پیشنهاد این تحقیق لزوم بر توجه به تغییرات اقلیم و سیاست‌گذاری‌های صحیح جهت مقابله و کمتر نمودن اثرات آن در آینده بیش از پیش اهمیت یافته و مستلزم مدیریت صحیح در منابع آب و تصمیم‌گیری‌های بهنگام در دوره حال و آینده می‌باشد.

از شکل ۶ نیز می‌توان به این نتیجه رسید که روش تناسبی کاهش بیشتر رواناب را در دوره آینده نسبت به روش SDSM نمایش می‌دهد. به طوری‌که حوضه در زمستان شاهد افزایش رواناب و در فصول بهار، تابستان و پاییز کاهش رواناب خواهد بود. دامنه تغییرات رواناب و افزایش و کاهش هر مدل در دوره آینده نسبت به دوره پایه در جدول ۷ آورده شده است. نتایج جدول حاکی از کاهش رواناب در روش تناسبی و در سناریوهای A1B و B1 است. همچنین بیشترین افزایش رواناب در مدل CANESM2-RCP2.6 به اندازه‌ی ۷۵/۸۶ متر مکعب بر ثانیه و کمترین افزایش در روش تناسبی ترکیبی در مدل ECHAM-A1B به مقدار ۱۲/۹۴ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. همچنین بیشترین کاهش رواناب در روش تناسبی ترکیبی در مدل HADGEM-A1B به اندازه‌ی ۲۸/۲- متر مکعب بر ثانیه و کمترین کاهش در روش SDSM و مدل CANESM2-RCP4.5 به اندازه‌ی ۵/۹۱- متر مکعب بر ثانیه است. در کل تغییرات ماهانه رواناب در روش SDSM بین ۱۲/۲۳- و ۷۵/۸۶ متر مکعب بر ثانیه است و در روش تناسبی ترکیبی بین ۲۸/۲- و ۳۲/۶۵ متر مکعب بر ثانیه است.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر برای بررسی عدم قطعیت روش‌های ریزمقیاس‌نمایی تحت اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه قره‌سو انجام گردید. بدین

منابع

- 1- Clark C.O. 1945. Storage and the unit hydrograph: transactions. American Society of Civil Engineers, 110: 1419-1488.
- 2- Dooge J.C.I. 1959. A general theory of the unit hydrograph. Journal of Geophysical Research, 64(2): 241-256.
- 3- Graham L.P., Andréasson J., and Carlsson B. 2007. Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods-A case study on the Lule River basin. Climate Change Journal, 81: 293-307.
- 4- Hussain M., Yusof K.W., Mustafa M.R., and Afshar N.R. 2015. Application of statistical downscaling model (SDSM) for long term prediction of rainfall in Sarawak, Malaysia. WIT Transactions on Ecology and The Environment Journal, 196: 269-278.
- 5- Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual. 2000. US Army Corps Engineers Hydrologic Engineering Center, CA 95616 USA, 152pp.
- 6- Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Quick Start Guide. 2013. US Army Corps Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center, CA 95616 USA, 52pp.
- 7- IPCC. 2000. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Nakicenovic N., Davidson O., Davis D., Grubler A., Kram T., Lebre La Rovere E., Metz B., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Sankovski A., Shukla P., Swart R., Watson R., and Dadi Z.]. Emissions Scenarios.
- 8- IPCC: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. (AR4), Tech. rep., The United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf.
- 9- IPCC, Summary for Policymakers. 2013. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., and Midgley P.M.,] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 28pp.
- 10- Le T.B., and Sharif H.O. 2015. Modeling the Projected Changes of River Flow in Central Vietnam under Different

- Climate Change Scenarios. *Journal of Water*, 7: 3579-3589.
- 11- Mbaye M.L., Hagemann S., Haensler A., Stacke T., Thierno Gaye A., and Afouda A. 2015. Assessment of Climate Change Impact on Water Resources in the Upper Senegal Basin (West Africa). *American Journal of Climate Change*, 4: 77-93.
 - 12- Musavi Nadoshan S.S., and Danandeh Mehr A. 2005. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Dibagaran Tehran, Tehran.
 - 13- Saha G.C. 2015. Climate Change Induced Precipitation Effects on Water Resources in the Peace Region of British Columbia, Canada. *Journal of Climate*, 3: 264-282.
 - 14- Saraf V.R., and Regulwar D.G. 2016. Assessment of Climate Change for Precipitation and Temperature Using Statistical Downscaling Methods in Upper Godavari River Basin, India. *Journal of Water Resource and Protection*, 8: 31-45.
 - 15- Schlesinger M.E., and Mitchell J.F.B. 1987. Climate model simulations of the equilibrium climatic response to increased carbon dioxide. *Reviews of Geophysics Journal*, 25: 760-798.
 - 16- Sharma S., Shrestha A., and Mclean C.E. 2016. Impact of Global Climate Change on Stream Low Flows in a Hydraulic Fracking Affected Watershed. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering*, 5: 1-19.
 - 17- USEPA. 2001. Our Built and Natural Environments: A Technical Review of the Interactions between Land Use, Transportation, and Environmental Quality. 4pp.
 - 18- Van Roosmalen L., Christensen B.S.B., and Sonnenborg T.O. 2007. Regional differences in climate change impacts on groundwater and stream discharge in Denmark. *Vadose Zone Journal*, 6: 554-571.
 - 19- Wetterhall F., Bardossy A., Chen D., Halldin S., and Xu C.Y. 2006. Daily precipitation-downscaling techniques in three chinese regions. *Journal of Water Resouces Research*, 42: W11423, doi:10.1029/2005WR004573.
 - 20- Wilby R.L., and Harris I. 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Journal of Water Resources Researcch*, 42: W02419, doi:10.1029/2005WR004065.
 - 21- Xu C.Y. 1999. Climate Change and Hydrologic Models: A Review of Existing Gaps and Recent Research Developments. *Journal of Water Resources Management*, 13: 369-382.
 - 22- Xu C.Y., Widen E., and Halldin S. 2005. Modeling hydrological consequences of climate change Progress and challenges. *Advance Atmosphere Science Journal*, 22: 789-797.
 - 23- Xu H., and Luo Y. 2015. Climate change and its impacts on river discharge in two climate regions in China. *Hydrologic Earth System Science Journal*, 19: 4609-4618.
 - 24- Zahabiyoun B., Goodarzi M.R., and Massah Bavani A.R. 2010. Application of the SWAT Model in the Ghare Sou river Basin under climate change. *Journal of Climate Research*. 1(3-4): 45-61. (in Persian with English abstract)
 - 25- Zahabiyoun B., Goodarzi M.R., Massah Bavani A.R., and Azamathulla H.M. 2013. Assessment of Climate Change Impact on the Gharesou River Basin Using SWAT Hydrological Model. *Clean – Soil, Air, Water Journal*, 41(6): 601-609.
 - 26- Zarghami M., Hassanzadeh Y., Babaeian I., and Kanani R. 2009. Climate Change and Water Resources Vulnerability; Case study of Tabriz City. P. 94. SENSE Symposium on Climate Proofing Cities, 1 Dec, 2009. Amsterdam/Volendam. (in Persian with English abstract)



Uncertainty of Downscaling Methods in Future Catchment Flow under Climate Change Effect

M.R. Goodarzi^{1*} - A.R. Faraji² - M. Komasi³

Received: 23-05-2017

Accepted: 04-12-2017

Introduction: Uncertainty estimation of climate change impacts has been given a lot of attention in the recent literature. However, uncertainty in downscaling methods have been given less attention. Today many studies have been done about the future impact of climate change on human life and water resources. Urban development, water conflicts, and Green House Gases increasing will intensify this event in future and will alter rivers flow. Basin catchment has faced to flow recession and also runoff decreasing in few last decades. At this field the climate change effects will intensify this conditions in future decades too. The first step of climate change impacts studies is the projection of future climate variables (e.g precipitation and temperature). GCMs models and their outputs are useful tools for this projection. The main problem is the mismatch of spatial scale between the scale of global climate models and the resolution needed for impacts assessments.

Materials and Methods: The Gharehrou River Basin is located in the west of Iran. Its area is approximately equal to 5793km², and the maximum and minimum of its heights are 1237 and 3350 m, respectively. The average of annual rainfall varies from 300 to 800mm. This study focuses on various climate models from IPCC fourth and fifth reports and has been used two downscaling methods including the statistical and proportional downscaling methods and also scenarios and different climate models for considering different uncertainty. The new scenarios as Representative Concentration Pathways (RCPs) of greenhouse gasses have been used in fifth assessment reports (AR5) of IPCC. The Representative Concentration Pathways describe four different 21st-century pathways of greenhouse gas (GHG) emissions and atmospheric concentrations, air pollutant emissions and land use. The RCPs represent the range of GHG emissions. Different kinds of downscaling method include 1) Proportional downscaling that is adding coarse-scale climate changes to higher resolution observations (the delta approach); 2) Statistical method (eg SDSM model; CLIGEN; GEM; LARS-WG and etc); 3) Dynamical method that is application of regional climate model using global climate model boundary conditions (e.g, RegCM3; MM5 and PRECIS). statistical downscaling method processes establish relating large scale climate features (e.g., 500 MB heights), predictors, to local climate (e.g, daily, monthly temperature at a point), predictands. The SDSM software reduces the task of statistically downscaling daily weather series into seven discrete processes that are consist of quality control and data transformation; screening of predictor variables; model calibration; weather generation (observed predictors); statistical analyses; graphing model output and scenario generation (climate model predictors). HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) has been designed by HEC (Hydrologic Engineering Center) for simulation of precipitation-runoff processes in a drainage basin. The HEC-HMS simulation methods represent - Watershed precipitation and evaporation: These describe the spatial and temporal distribution of rainfall on and evaporation from a watershed. - Runoff volume: These address questions about the volume of precipitation that falls on the watershed: How much infiltrates on pervious surfaces? How much runoff of the impervious surfaces? When does it run off? - Direct runoff: including overland flow and interflow. These methods describe what happens as water that has not infiltrated or been stored on the watershed moves over or just beneath the watershed surface. Baseflow: simulate the slow subsurface drainage of water from a hydrologic system into the watershed's channels.- Channel flow: These so-called routing methods simulate one-dimensional open channel flow, thus predicting time series of downstream flow, stage, or velocity, given upstream hydrographs. HEC-HMS includes several models for calculation of cumulative precipitation losses but only the SMA module is continuous (a module that simulates the losses for both wet and dry weather conditions). Other loss models are event based.

Results and Discussion: The results of criteria and models weighting show that CANESM2 and HADCM3 are better than other models for future temperature and precipitation projection for statistical downscaling and HADCM3 for future precipitation and HADGEM for future temperature assessment for Proportional

1 and 3- Assistant Professors, Department of Civil Engineering, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Borujerd, Iran
(*- Corresponding Author Email: Goodarzi6mr@gmail.com)

2- M.Sc. Graduated, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Borujerd, Iran

downscaling. According to various scenarios, future temperature and precipitation projection (2040-2069 period for the statistical and 2040-2052 period for Proportional downscaling) have downscaled and have given to HEC-HMS model for future flow projection. Already the rainfall-runoff model has calibrated and validated base on observed flow data in reference period that daily coefficient of determine was 0.7 for calibrated period and 0.6 for validated period. Finally, flow variation has investigated that Most of GCMS represent increases in winter flows and reductions in other season flows.

Keywords: Emission scenarios, GCM models, HEC-HMS model, Proportional approach, SDSM model



تحلیل پایداری کمی سامانه‌ی آبخوان (مطالعه موردی: خراسان جنوبی - آبخوان بیرجند)

حمید کاردان مقدم^۱ - محمد ابراهیم بنی حبیب^{۲*} - سامان جوادی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳

چکیده

استفاده از راهکارهای طرح تعادل بخشی به عنوان یکی از مهمترین گزینه‌های کاهش و تعدیل بحران منابع آب زیرزمینی بوده و رسیدن به یک تراز آب مطلوب و پایدار در آبخوان‌ها به عنوان هدف اصلی این راهکار مطرح می‌باشد. تراز مطلوب آب زیرزمینی با توجه به هدف طرح تعادل بخشی آبخوان، برگشت سامانه به تراز اولیه‌ی آب و جبران کمبود منابع آب زیرزمینی است. جهت نیل به این هدف می‌بایست سناریوهای تعادل بخشی و پایداری سیستم آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های مناسب ارزیابی گردند. بدین منظور در مقاله حاضر، سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت پیشنهاد گردیده و این شاخص‌ها جهت ارزیابی میزان پایداری سیستم آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف تعادل بخشی بصورت یکپارچه و توزیعی محاسبه شد. در این تحقیق از راهکار کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی که یکی از اصلی‌ترین پروژه‌های طرح تعادل بخشی است، در ۶ سطح کاهش ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درصد برداشت آب کشاورزی بصورت سالانه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مدل MODFLOW و اعمال سناریوهای طرح تعادل بخشی نشان داد که با کاهش برداشت آب، شاخص پایداری سیستم افزایش یافته و از بهبود ۳۲ درصدی در سناریوی یک درصد کاهش برداشت به ۸۸ درصد در سناریوی ۳/۵ درصد کاهش برداشت می‌رسد. همچنین بررسی شاخص پایداری سیستم در سناریوهای مختلف نیز نشان داد که کاهش ۲/۵ درصدی برداشت آب، وضعیت آبخوان را به حالت پایداری خواهد رساند. شاخص ارائه شده در این تحقیق با توجه به قابلیت توزیعی بودن و امکان بررسی اثر سناریوهای مختلف، در سایر آبخوان‌ها نیز می‌تواند استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری، اعتمادپذیری، تراز مطلوب، شاخص پایداری سیستم، مطلوبیت

مقدمه

خشک که تنها منبع تأمین آن منابع زیرزمینی هستند، سبب افت شدید این منابع شده است. متولیان آب کشور با بر آن داشته تا طرح‌های تعادل بخشی و برون رفت از بحران آب زیرزمینی را ارائه دهند. ارائه سناریوهای مختلف جهت تعادل بخشی بدون توجه به میزان اثرگذاری و ارزیابی پایداری آبخوان نمی‌تواند موجب بهبود مدیریت آبخوان شود.

مطالعات مختلفی در زمینه شاخص ارائه شده است که از آن جمله شاخص $CWSI^4$ (۱۴)، شاخص پایداری WSI^5 (۲) شاخص $WJWSI^6$ (۶) و شاخص جامع خشکسالی (۱۵) را می‌توان نام برد که در این تحقیقات پایداری منابع آب تعریف نشده است. پاندی و همکاران در سال ۲۰۰۷ (۱۳) به منظور بررسی و توسعه پایدار در بخش آب زیرزمینی از یک چارچوب ۵ بخشی که شامل پایش آب

در دو دهه اخیر تحت تأثیر تنش‌های محیطی و اقلیمی برداشت از منابع آب زیرزمینی رشد قابل توجهی داشته (۱۹)، که سبب افت شدید سطح سفره‌های آب زیرزمینی بخصوص در مناطق خشک شده است. با توجه به افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی، مدیریت برداشت از این منابع و کنترل سطح برداشت بسیار مهم بوده و بسیاری از سناریوهای تعادل بخشی آبخوان برای تأمین این هدف مطرح شده‌اند. مدیریت آب‌های زیرزمینی در سراسر جهان با تغییرات اقلیم، رشد اقتصادی-اجتماعی و حکمرانی نامناسب آب، مختل شده است (۴). مصرف آب بدون برنامه‌ریزی در بخش کشاورزی بخصوص در مناطق

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری منابع آب، دانشیار و استادیار گروه مهندسی

آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(Email: banihabib@ut.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول

4- Canadian Water Sustainability Index

5- Watershed sustainability index

6- West Java water sustainability index

استفاده قرار گیرد. بررسی منابع آب زیرزمینی با در نظر گرفتن سیستماتیک بودن آبخوان و استفاده از شاخص، جهت ارزیابی پایداری یا انعطاف‌پذیری سیستم آب زیرزمینی تاکنون انجام نشده است. پایداری یا انعطاف‌پذیری در سیستم آبخوان به مفهوم کمی کردن ظرفیت سیستم به منظور حداقل رساندن آسیب به آبخوان است.

در این مطالعه، با اصلاح شاخص انعطاف‌پذیری پیشنهادی هاشیموتو و همکاران، شاخص جدید پایداری برای ارزیابی سیستم آب زیرزمینی پیشنهاد شده و تأثیر سناریوهای طرح تعادل‌بخشی در آبخوان با استفاده از شاخص پایداری آبخوان مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

آبخوان بیرجند، در محدوده مطالعاتی (۴۶۱۶) بیرجند در حوزه کویر لوت در شرق ایران به عنوان یک منطقه راهبردی مرزی می‌باشد. این آبخوان با مساحت ۴۲۸/۹ کیلومتر مربع، با میانگین بارندگی ۱۷۰ میلی‌متر در یک اقلیم خشک و سرد قرار دارد. سازند زمین‌شناسی آبخوان بیرجند از نوع کواترنر با متوسط ضخامت آبخوان ۷۵ متر می‌باشد. جهت کلی جریان آب زیرزمینی، از شمال به طرف جنوب و در ادامه بطرف غرب آبخوان است. میانگین ضخامت اشباع آبخوان حدود ۲۵ متر برآورد شده است (۱۱). شکل (۱) موقعیت آبخوان، محدوده مطالعاتی و شکل (۲) تغییرات حجم آبخوان و افت آب زیرزمینی را طی یک دوره ۲۰ ساله تا سال آبی ۱۳۹۳-۹۴ نشان می‌دهد. بیش از ۱۲ میلیون متر مکعب در طی این دوره زمانی از حجم استاتیک آبخوان آب برداشت شده که سبب شده این آبخوان بصورت ممنوعه و بحرانی از سوی شرکت آب منطقه‌ای معرفی شود (۱۱).

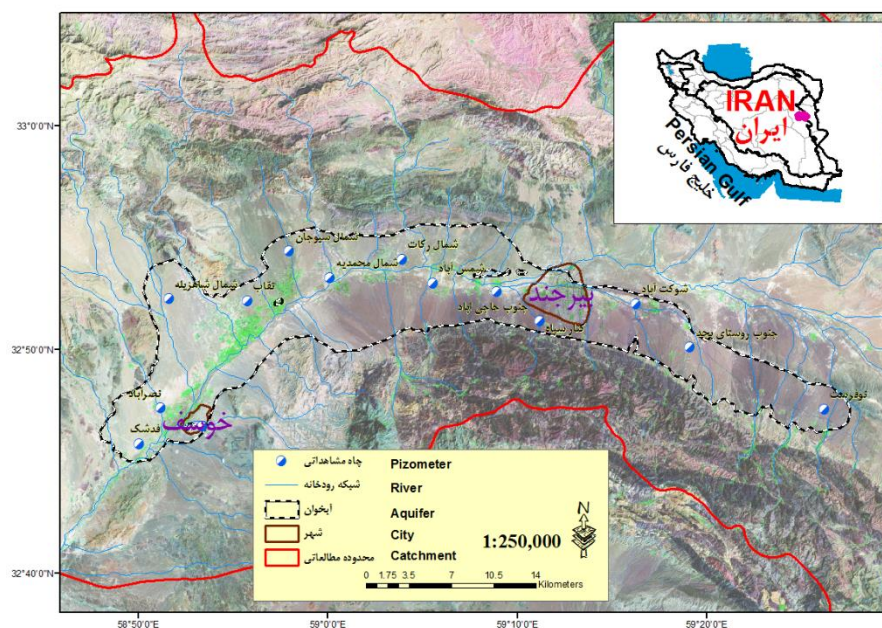
تعادل‌بخشی آبخوان

برداشت‌های بی‌رویه از آب زیرزمینی بخصوص در طی ۱۵ سال اخیر، سبب کاهش حجم استاتیک آبخوان‌های کشور به میزان ۷۵ میلیارد متر مکعب تا پایان سال آبی ۹۱-۹۰ شده است (۱۱). این کاهش حجم با ۳۵ میلیارد متر مکعب اضافه برداشت قبل از سال ۷۶ برآورد ۱۱۰ میلیارد متر مکعب برداشت مازاد از سفره‌های آب زیرزمینی را در برداشته است (۱۲). این موضوع سبب خشک شدن بسیاری از منابع آب زیرزمینی، رودخانه‌ها، تالاب‌ها، باغات و اراضی کشاورز، افت کیفی منابع آب زیرزمینی، نشست زمین، بلااستفاده بیش از ۲۵۰۰۰۰ کیلومتر شبکه آفای، مهاجرت و حاشیه نشینی، به خطر افتادن امنیت سیاسی، افزایش مصرف انرژی و سایر پیامدها را داشته است (۱۲).

زیرزمینی، تولید دانش و انتشار، تنظیم مقررات، مشارکت عمومی و مسئولیت سازمانی بود، استفاده کرد. براساس این ۵ بخش پارامترهای تغییرات در سیستم آب زیرزمینی منطقه دره کاتماندو را براساس تغییرات حجم مخزن و رضایت‌مندی اجتماعی مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که وضعیت منابع آب زیرزمینی بحرانی بوده و تقویت زیرساخت‌ها جهت سیاست‌گذاری توسعه پایدار منطقه ضروری است. مازا و همکاران در سال ۲۰۱۴ (۸) پایداری آبخوان را در یک دوره زمانی در جنوب ایتالیا به عنوان شاخص مطمئن برای برداشت آب از آبخوان معرفی کردند. در این مطالعه حساسیت شاخص برداشت مطمئن آب با استفاده از پارامترهای مختلف مؤثر در بیلان آب منطقه مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج نشان داد که تغذیه از بارندگی و رواناب مهمترین پارامترهای ورودی به منطقه جهت برداشت مطمئن معرفی شد. علیمتی و لمباردی در سال ۲۰۱۵ (۱) حداکثر دبی قابل برداشت را به عنوان یک شاخص کمی برای پایداری آبخوان معرفی کردند. با توجه به ورودی‌های آماری، تعادل بین عرضه و تقاضا را لازمه برقراری اطمینان‌پذیری آبخوان معرفی کردند. شاهدی و طالبی در سال ۲۰۱۴ (۱۸)، چهار شاخص فالکن مارک برای آب تجدیدپذیر حوضه، نسبت آب مصرفی به آب تجدیدپذیر، حداکثر اراضی فاریاب و شاخص تجاوز سطح اراضی فاریاب را به عنوان شاخص‌های تعادل منابع آب و توسعه پایدار در حوضه قره‌قوم معرفی کردند. صفوی و همکاران در سال ۲۰۱۶ (۱۶) استفاده از توابع عضویت فازی جهت استفاده در شاخص‌های کارایی سیستم منابع آب را جهت بهبود عملکرد معیارها ارائه دادند. آنها با بررسی میزان تأمین و نیاز آب در محدوده حوزه زاینده‌رود، با بررسی میزان کمبود آب در بخش‌های مختلف حوزه، از شاخص هاشیموتو (آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و اطمینان‌پذیری) جهت بررسی میزان عملکرد سیستم در دوره‌های مختلف استفاده کردند. برای بهبود دقت برآورد شاخص‌ها از توابع عضویت فازی جهت افزایش دقت استفاده کردند (۱۶). استفاده شاخص، جهت کمی کردن یک سیستم بکار برده می‌شود و جهت ارزیابی یک سیستم منابع آب شاخص انعطاف‌پذیری ارائه شده است. مطالعات زیادی در خصوص کارایی سیستم‌های منابع آب با استفاده از شاخص انعطاف‌پذیری^۱ ارائه شده است. بررسی، تحلیل و ارزیابی عملکرد سیستم منابع آب (مخازن سد)، با استفاده از روابط ارائه شده توسط هاشیموتو^۲ و همکاران در سال ۱۹۸۲ (۵) مورد استفاده قرار گرفته است. با این وجود، شاخص انعطاف‌پذیری ارائه شده توسط هاشیموتو با توجه به عدم در نظر گرفتن ساختار آبخوان، تفاوت زمانی در تغذیه و تخلیه آبخوان و تأثیرپذیر بودن آبخوان به این عوامل را نمی‌توان بصورت مناسب در ارزیابی سیستم آب زیرزمینی مورد

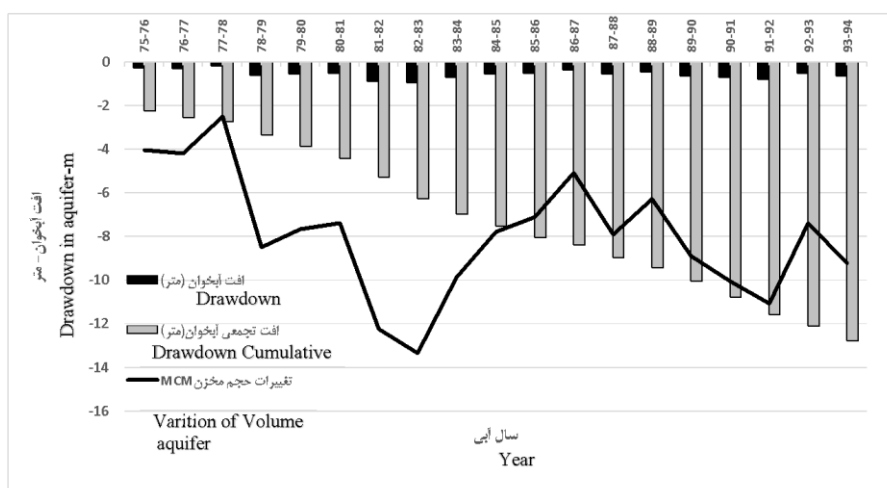
1- Reliability

2- Hashimoto



شکل ۱- موقعیت آبخوان و محدوده مطالعاتی بیرجند

Figure 1- Case study of Birjand aquifer



شکل ۲- تحلیل وضعیت افت و تغییرات حجم مخزن آب زیرزمینی

Figure 2- Analyst of losses and groundwater volume

حجم برداشت فعلی از منابع آب زیرزمینی می‌شوند و می‌توانند حجم قابل توجهی آب را به سفره‌ی آب زیرزمینی برگردانند. براساس برآوردهای انجام شده حجمی بالغ بر ۴۴ درصد از هدف احیاء و تعادل بخشی آبخوان‌ها با استفاده از این سه پروژه در سطح کلان تأمین خواهد شد و مابقی براساس جلوگیری از اضافه برداشت چاه‌های مجاز، طرح‌های افزایش نفوذ آب انجام خواهد شد. در این مطالعه ضمن بررسی کاهش برداشت از سفره‌آب زیرزمینی که یکی از پروژه‌های طرح تعادل بخشی است، لزوم اثربخشی این سناریو بر

به منظور تسریع در مدیریت این وضعیت، برنامه تعادل بخشی زیر نظر وزارت نیرو در ۱۵ پروژه کلان ملی با هدف تأمین و بازگشت حجم استاتیک سفره‌های آب زیرزمینی آغاز شده است (۱۲). هدف چند پروژه طرح تعادل بخشی، کاهش برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی می‌باشد که به طرق خرید چاه‌های کم بازده کشاورزی، کنترل، نظارت و مسلوب‌المنفعه نمودن چاه‌های فاقد پروانه مضر و جایگزینی پساب با چاه‌های کشاورزی در دشت‌های ممنوعه از آن جمله است (۱۲). این پروژه‌ها در صورت اجرایی شدن سبب کاهش

وضعیت آبی آبخوان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

تعریف تراز مطلوب آب زیرزمینی

به منظور ارزیابی پایداری سیستم آب زیرزمینی، تعریف تراز مطلوب آب زیرزمینی جهت مقایسه و برآورد شاخص امری مهم است. تراز مطلوب آب زیرزمینی، با توجه به هدف تعادل بخشی آبخوان، در یک برنامه بیست ساله تعریف شده است. بر اساس این طرح، تراز آب زیرزمینی در آبخوان‌ها می‌بایست در طی بیست سال (چهار برنامه ۵ ساله) به تراز آب زیرزمینی اولیه برگردد (۱۲). برگشت تراز آب زیرزمینی به حالت اولیه براساس جبران ۱۱۰ میلیارد متر مکعب از کل کسری آبخوان‌های دارای بیلان منفی کشور و بطور متوسط سالانه ۵ میلیارد متر مکعب در برنامه تعادل بخشی در طی بیست سال تعریف شده است (۱۲).

بررسی هیدروگراف آبخوان و سری زمانی تراز آب زیرزمینی پی‌نمودها و آبخوان نشان می‌دهد که منحنی تراز آب زیرزمینی علاوه بر داشتن روند تراز آب در طی دوره زمانی، دارای یک رفتار نوسانی در زمان نیز می‌باشد، بطوری که تغییرات تراز آب زیرزمینی را در دوره زمانی نشان می‌دهد. رفتار نوسانی تراز آب زیرزمینی ناشی از افزایش تغذیه و کاهش برداشت آب در فصول مرطوب و افزایش بهره‌برداری و کاهش تغذیه در فصول خشک ناشی می‌شود. با توجه به نزدیکی رفتار تراز آب زیرزمینی با منحنی سری فوریه (رابطه ۱) می‌توان رفتار نوسانی تراز آب را با بسط یک تابع از نوع سری فوریه روی داده‌های تراز آب زیرزمینی مورد بررسی قرار داد (۳). هدف طرح تعادل بخشی رسیدن تراز آب زیرزمینی به تراز آب اولیه می‌باشد که نحوه رسیدن تراز آب در طی زمان اهمیت نداشته لذا در این مطالعه با توجه به روند تغییرات تراز آب و رفتار نوسانی در آبخوان در طی دوره‌ی آماری از سری زمانی فوریه برای تدوین سری زمانی تراز آب در هر چاه مشاهده‌ای و آبخوان استفاده شد. سری فوریه بسطی است که هر تابع متناوب را به صورت حاصل جمع تعدادی نامتناهی از توابع نوسانی ساده (سینوسی، کسینوسی و یا تابع نمایی مختلط) بیان می‌کند.

$$f(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos(nx)) + \sum_{n=1}^{\infty}(b_n \sin(nx)) \quad (1)$$

$F(x)$ تابع سیگنال، a_0 اندازه سیگنال با فرکانس صفر و دو تابع سینوسی و کسینوسی، توابع نوسانی می‌باشد.

پایداری سیستم آب زیرزمینی

معیارهای عملکرد یک سیستم منابع آب براساس میزان تأمین نیاز آب برای کاربران آب در بخش‌های مختلف تعریف می‌شود. کارایی فنی یک سیستم منابع آب را می‌توان با استفاده از شاخص انعطاف‌پذیری مورد ارزیابی قرار داد. این شاخص ترکیبی از سه

شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری بوده و برای ارزیابی کارایی سیستم‌های منابع آب پیشنهاد شده و بیشتر در مطالعات مختلف بهره‌برداری بهینه و پایدار از مخازن آب استفاده شده است (۶). اما در مطالعات آب‌های زیرزمینی، جهت ارزیابی بهره‌برداری پایدار آبخوان، این شاخص‌ها استفاده نشده است. بنابراین در این مطالعه شاخص‌های پایداری آبخوان شامل اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت به عنوان شاخص‌های ارزیابی فنی پایداری سیستم آب زیرزمینی معرفی و استفاده می‌شود. شاخص اعتمادپذیری آبخوان، به این مفهوم است که سناریوی کاهش برداشت تا چه حد توانسته آبخوان را به حالت اولیه خود برگرداند. این برگشت به حالت اولیه آبخوان، براساس هدف طرح تعادل بخشی به عنوان تراز آب یا حجم آب است که هدف آن برگشت تراز آب زیرزمینی به تراز اولیه آن تا بیست سال آینده در برنامه ششم توسعه می‌باشد. براین اساس اعتمادپذیری کمی سیستم آبخوان برای هر سناریوی تعادل بخشی بصورت رابطه (۲) ارائه شده است (۵). در شکل (۳) مفهوم این شاخص با پیکان مشکی شماره یک نشان داده شده است و در هر یک از گام‌های زمانی که تراز آب زیرزمینی بالاتر از تراز مطلوب قرار گیرد، محاسبه می‌شود.

$$\alpha_{EL} = \frac{n_{EL}}{N_{EL}} \quad (2)$$

که در آن n_{EL} تعداد دوره‌هایی که تراز آب زیرزمینی بالاتر از تراز مطلوب (تراز تعادل) باشد و N_{EL} تعداد کل دوره‌ها است.

آسیب‌پذیری بیانگر میزان کمبود (۹) در سیستم آب زیرزمینی می‌باشد که شدت شکست‌های سیستم را بیان می‌کند. این شدت شکست می‌تواند براساس میانگین ماکزیمم کمبودها در یک دوره متوالی شکست در سیستم یا احتمال بیشتر شدن کمبود در یک یا چند دوره از یک حد معین و یا میانگین شکست‌ها بیان شود (۷، ۵ و ۱۰). میزان آسیب‌پذیری آبخوان از نقطه نظر کمی با استفاده از رابطه (۳) در آبخوان با توجه به تغییرات تراز آب آبخوان در طی دوره شبیه‌سازی محاسبه شده است. شکست یک سیستم آب زیرزمینی در اجرای سناریوی تعادل بخشی، براساس پایین‌تر بودن تراز آب زیرزمینی نسبت به تراز مطلوب تعریف می‌شود. شکل (۳) مفهوم آسیب‌پذیری را با توجه به پارامترهای مورد استفاده در رابطه (۳) نشان می‌دهد (۵). براین اساس در گام‌های زمانی که تراز آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز مطلوب باشد سیستم آبخوان دارای کمبود می‌باشد که در شکل (۳) این فاصله یا کمبود با رنگ خاکستری نشان داده شده است.

$$\gamma_{EL} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_s - W_t)}{\sum_{i=1}^n (W_t - W_{Pr})} \quad (3)$$

در این رابطه W_t تراز آب زیرزمینی مطلوب در هر گام زمانی، W_s

باشد میزان پایداری سیستم بیشتر خواهد بود. از این شاخص می‌توان جهت سهولت در مقایسه، ارزیابی و تصمیم‌گیری بین سناریوهای مختلف تعادل بخشی در تصمیم‌گیری و برنامه ریزی استفاده کرد (۱۷).

$$\rho_{EL} = \sqrt[3]{\alpha_{EL} \cdot \beta_{EL} \cdot (1 - \gamma_{EL})} \quad (۵)$$

در این رابطه ρ_{EL} شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی، α_{EL} شاخص اعتمادپذیری، β_{EL} شاخص مطلوبیت و γ_{EL} شاخص آسیب‌پذیری است.

مدل‌سازی آبخوان

استفاده از مدل جهت بررسی رفتار یک سیستم در شرایط فعلی و آینده مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا به منظور شبیه‌سازی اثر سناریوی کاهش برداشت آب در طرح تعادل بخشی و ارزیابی شاخص‌های پایداری آبخوان از مدل MODFLOW 2000 با استفاده از نرم‌افزار پایداری آبخوان از مدل GMS v6 استفاده شد. وضعیت فعلی اقلیمی و مدیریتی آبخوان در یک دوره ۹ ساله (۸۶-۱۳۸۵ تا ۹۴-۱۳۹۳) مدل‌سازی شد. استفاده از مدل مفهومی آبخوان با توجه به قابلیت توزیعی بودن نتایج، می‌تواند اثربخشی آبخوان را در هر بخش از آبخوان نشان دهد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، یک دوره ۱۰ ساله برای پیش‌بینی و اثر سناریوهای تعادل بخشی استفاده شد. دوره ۱۰ ساله با توجه به افق ۱۴۰۴ طرح تعادل بخشی (۱۲) انتخاب شد. دوره آماری مدل‌سازی شامل ۶ سال برای واسنجی (۸۶-۱۳۸۵ تا ۹۱-۱۳۹۰) و ۳ سال برای صحت‌سنجی مدل تا سال آبی ۹۴-۹۳ مورد استفاده قرار گرفت. گام زمانی شبیه‌سازی بصورت ماهانه و مهرماه ۱۳۸۵ با توجه به کمترین تغییرات تراز آب، کمترین حساسیت آبخوان به منابع تغذیه و تخلیه و داده‌های موجود برای شبیه‌سازی حالت ماندگار مدل انتخاب شد. مدل ماندگار در واقع بیانگر اولین گام زمانی مدل‌سازی است که براساس معادلات حرکت آب زیرزمینی می‌بایست در آن پارامتر هدایت هیدرولیکی واسنجی شود.

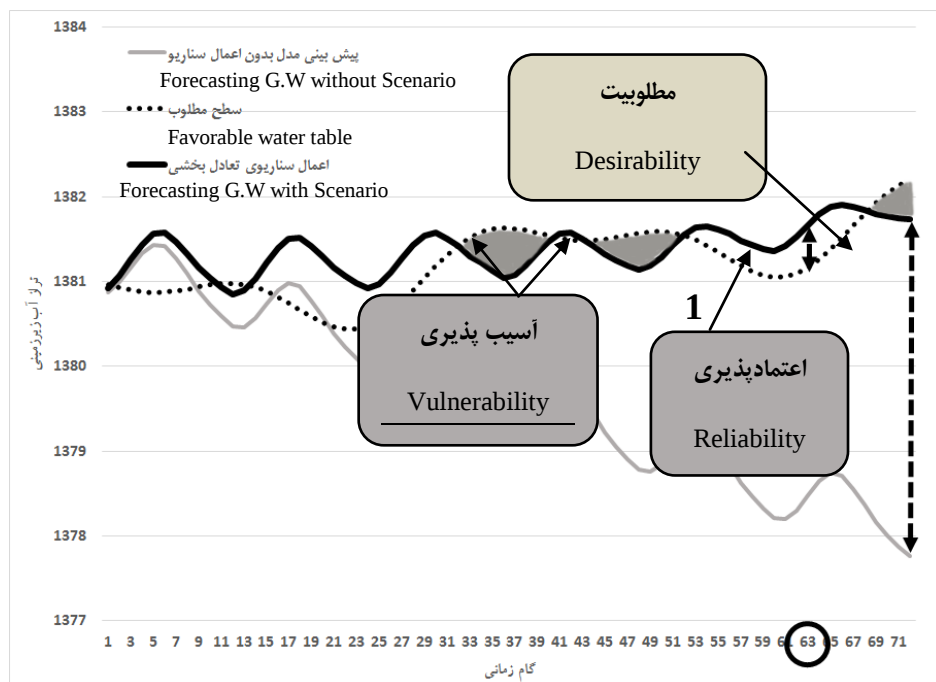
هدف از مدل‌سازی بررسی گزینه‌های چگونگی به تعادل رساندن بیلان، پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان تحت سناریوهای مختلف هیدرولوژیکی، بررسی صحت و سقم داده‌های مدل مفهومی و دنباله روی از روش‌های استاندارد مدل‌سازی ریاضی توأم با ارائه واسنجی می‌باشد. اولین گام مدل‌سازی تهیه مدل مفهومی آبخوان بیرجند می‌باشد که بر مبنای منابع تغذیه و تخلیه آبخوان، مرز محدوده مدل‌سازی، تبخیر و تعرق و همچنین استراتیگرافی آبخوان آماده می‌شود.

تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در هر دوره زمانی برای هر سناریو، W_{Pr} تراز آب زیرزمینی بدون اعمال سناریو و n تعداد دوره‌هایی که تراز آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز مطلوب قرار می‌گیرد. در شرایطی که تراز آب زیرزمینی بالاتر یا برابر با تراز مطلوب باشد مقدار $(W_s - W_t)$ صفر در نظر گرفته می‌شود.

استفاده از شاخص برگشت‌پذیری جهت ارزیابی یک سیستم آب زیرزمینی قابل تعریف نمی‌باشد. شاخص برگشت‌پذیری به مفهوم برگشت سیستم از حالت شکست به حالت پیروزی یا مطلوب است و در آب‌های زیرزمینی با توجه به نوسانات و روند کلی تراز آب، قابل ملموس نیست. تغییرات تراز آب در چاه‌های مشاهده‌ای برخلاف تراز آب در پشت یک سد، تابع سریعی از جریانات ورودی و خروجی نمی‌باشد. نرخ تغییرپذیری حجم سفره‌ی آب زیرزمینی نسبت به منحنی عرضه و تقاضا مربوط به بهره‌برداری از یک سد کم می‌باشد. بطور کلی مفهوم آبخوان به معنای یک مخزن دارای آب بوده و مشابه مخزن سد که در آن اضافه تامین نیاز آبی در یک گام زمانی سبب خشک شدن مخزن سد می‌شود نیست. این تغییرات کم سبب می‌شود تا مفهوم شکست و پیروزی کمتر قابل استفاده باشد و استفاده از مفهوم برگشت‌پذیری و رابطه ارائه شده برای آن، در بخش آب زیرزمینی صحیح نباشد. لذا بدین منظور با استفاده از این مفهوم، شاخص مطلوبیت آب زیرزمینی تعریف می‌شود. در این شاخص احتمال برگشت سیستم به حالت مطلوب تحت یک سناریو یا بدون اعمال سناریو به عنوان شاخص مطلوبیت سیستم معرفی می‌شود. با توجه به افت منابع آب زیرزمینی، به منظور جبران این کمبود آب، از سناریوی تعادل بخشی استفاده شد. اثر سناریو و میزان برگشت آب در آبخوان تا تراز مطلوب آب زیرزمینی، با استفاده از شاخص مطلوبیت مورد سنجش قرار گرفت. این شاخص بر مبنای درصد برگشت تراز آب زیرزمینی تا تراز مطلوب در هر سناریو با استفاده از رابطه (۴) بدست می‌آید. در شکل (۳) مفهوم شاخص مطلوبیت نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود درصد بالا آمدن تراز آب زیرزمینی نسبت به تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و تراز مطلوب، به عنوان شاخص مطلوبیت با خط‌چین معرفی می‌شود.

$$\beta_{EL} = 100 * \left(\frac{R_{EL} - r_{EL}}{R_{EL} - R_{pr}} \right) \quad (۴)$$

در این رابطه r_{EL} بیانگر تراز آب زیرزمینی پس از افت، R_{EL} تراز آب زیرزمینی در تراز مطلوب و R_{pr} تراز آب زیرزمینی مشاهداتی یا پیش‌بینی شده (بدون اجرای سناریوی تعادل بخشی) می‌باشد. پس از برآورد سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت، شاخص پایداری سیستم برای هر سناریوی طرح تعادل بخشی را می‌توان با استفاده از رابطه (۵) محاسبه کرد (۵). شاخص بدست آمده از رابطه (۵) بین صفر تا یک است. هرچه مقدار این شاخص به یک نزدیک‌تر



شکل ۳- شاخص‌های پایداری آبخوان با استفاده از هیدروگراف بدون اعمال سناریو، شبیه‌سازی سناریو و تراز مطلوب

Figure 3- Sustainability Indicators of groundwater hydrograph for business as usual, simulation of the scenario and desired water level

۱۰۸ گام زمانی ماهانه تا سال آبی ۱۳۹۳-۹۴ انجام گرفت. پارامترهای ورودی به مدل مفهومی شامل تغذیه آبخوان، بهره‌برداری از منابع برداشت آبخوان، جبهه‌های ورودی و خروجی، تراز آب زیرزمینی مشاهده شده و ... بصورت سری زمانی ۹ ساله وارد مدل آب زیرزمینی و شبیه‌سازی انجام شد. پس از مدل‌سازی آبخوان جهت پیش‌بینی و ارزیابی شاخص‌های پایداری آبخوان دو مرحله واسنجی، صحت‌سنجی مدل انجام گرفت. براساس معادلات حرکت آب زیرزمینی در حالت ماندگار و غیرماندگار و آنالیز حساسیت پارامترهای آبخوان دو پارامتر هدایت هیدرولیکی در حالت ماندگار و آبدی ویژه آبخوان برای حالت غیرماندگار جهت واسنجی انتخاب می‌شود.

نتایج و بحث

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل کمی

یکی از عوامل مهم در اجرای دقیق مدل، شناسایی عوامل حساس و واسنجی این عوامل جهت بدست آوردن نتایج بهینه می‌باشد. با توجه به اجرای مدل و آنالیز حساسیت مدل، دو عامل هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدی ویژه به عنوان عوامل حساس در مدل ماندگار و غیرماندگار مشخص شد. براساس این دو عامل، مدل واسنجی شد. در انجام واسنجی برای دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه از لوگ‌های حفاری موجود در منطقه، نتایج آزمایشات

نفوذ از بارندگی، نفوذ ناشی از جریانات برگشتی کشاورزی و شرب، نفوذ از رواناب سطحی، تغذیه ناشی از جریان ورودی آب زیرزمینی که بصورت جبهه‌های با بار ثابت (GHB)^۱ در نظر گرفته شد به عنوان پارامترهای تغذیه مدل‌سازی اعمال شد. همچنین برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، تبخیر و تعرق در خروجی آبخوان که سطح آب زیرزمینی کمتر از ۵ متر است، جبهه‌های خروجی آب زیرزمینی که بصورت جبهه‌های با بار ثابت (GHB) در نظر گرفته شد به عنوان پارامترهای تخلیه مدل‌سازی وارد مدل شد. در واقع کلیه عوامل تأثیرگذار و مؤثر بر وضعیت هیدرولیکی آبخوان بایستی در نظر گرفته شود. به منظور شبیه‌سازی و حل معادلات جریان آب زیرزمینی شبکه‌بندی آبخوان بصورت شبکه ۲۵۰*۲۵۰ متر مربع وارد مدل MODFLOW گردید. جدول (۱) خلاصه‌ای از پارامترهای بیلان آب زیرزمینی است که با محاسبه این پارامترها، میزان تغذیه ناشی از بارندگی و رواناب منطقه با تقسیم‌بندی آبخوان از نظر کاربری اراضی و شبکه جریان برآورد و در مدل مفهومی وارد شد.

پس از ورود کلیه پارامترهای بیلان آب زیرزمینی به مدل مفهومی، شبیه‌سازی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار انجام گرفت. شبیه‌سازی در حالت ماندگار در اولین گام زمانی مربوط به مهرماه سال ۱۳۸۵ و پس از آن شبیه‌سازی در حالت غیرماندگار با تعریف

1- General head package

هدایت هیدرولیکی بگونه‌ای انجام پذیرفت که حداقل خطای ممکن بین تراز آب زیرزمینی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برقرار باشد.

پمپاژ و برآورد قابلیت انتقال و مطالعات پیشین نیز جهت تطبیق نتایج استفاده شد. واسنجی مدل ماندگار آب زیرزمینی با تغییر در مقادیر

جدول ۱- خلاصه بیلان آب زیرزمینی محدوده آبخوان بیرجند
Table 1- Abstract of water balance in birjand aquifer

تغییرات حجم مخزن Variation of volume	تخلیه (MCM) Discharge				تغذیه (MCM) Recharge			
	جمع Sum	خروجی از آب زیرزمینی Outflow G.W	تبخیر از آب زیرزمینی Evaporation from G.W	برداشت از چاه، چشمه و قنات Discharge well, spring and qanat	جمع Sum	برگشتی از آب شرب و صنعت Flow back from supply and industrial	برگشتی کشاورزی Flow back from Agriculture	نفوذ از ارتفاعات Infiltration from Mountain
-10.1	107	3	0	104	96.93	14.88	17.08	52.77

می‌دهد. شکل (۴) صحت‌سنجی نتایج را برای سال پایانی (سال نهم) مدل‌سازی نشان می‌دهد. نتایج مناسب صحت‌سنجی حاکی از دقت مناسب مدل در فرآیند واسنجی است. نتایج صحت‌سنجی نشان دهنده حداقل اختلاف بین تراز آب در شبیه‌سازی و مشاهداتی است و کلیه نقاط پیرامون خط مبنا می‌باشد.

جدول ۲- میزان خطای مدل کمی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار
Table 2- Error in Quantitative model in steady and Un-steady

مدل غیرماندگار Un-steady model	مدل ماندگار Steady model	پارامتر خطا Error parameter
-0.038	0.048	میانگین خطا Mean Error
0.581	0.169	میانگین مطلق خطا Abs Error
0.835	0.211	میانگین مجذور خطا RMSE ^۱

پیش‌بینی و تعیین تراز آستانه آب زیرزمینی

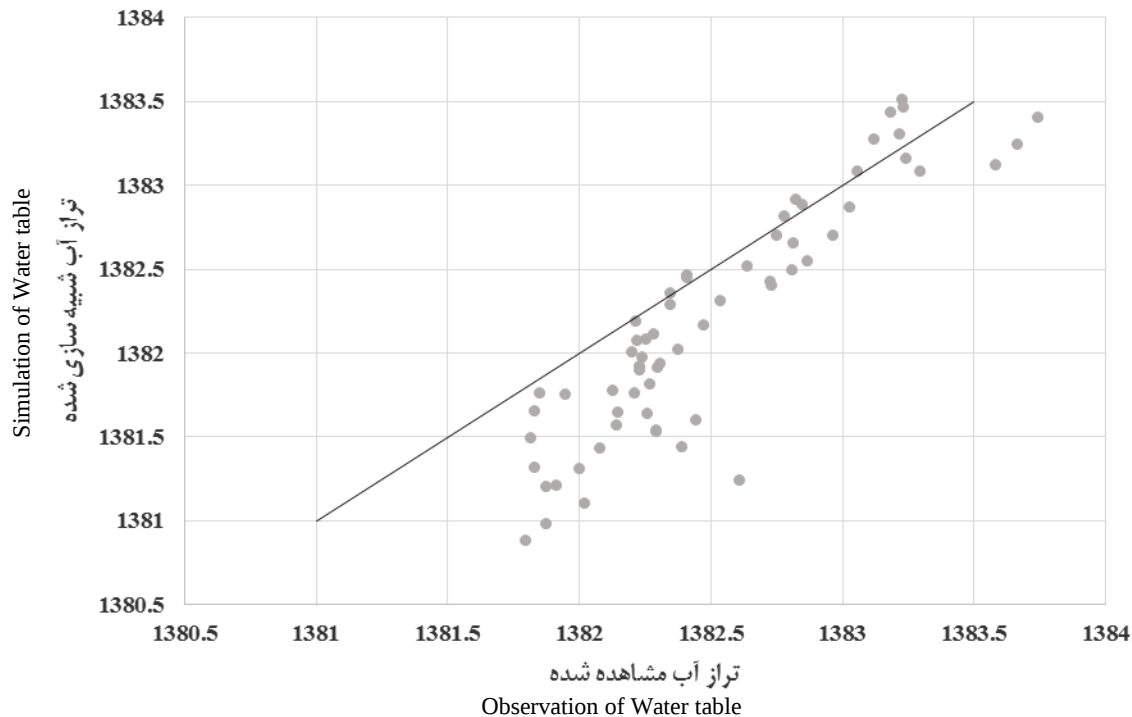
پس از صحت‌سنجی مدل کمی آبخوان، پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی آبخوان با در نظر گرفتن تکرار شرایط گذشته برای آینده، انجام گرفت. نتایج خروجی از پیش‌بینی مدل تا سال ۱۴۰۴ که یک دوره ۱۰ ساله می‌باشد بصورت شکل (۵) ارائه شده است. در این شکل پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی بدون اعمال سناریو معرفی شده است که نتایج هیدروگراف حاکی از ادامه افت آبخوان با روند افزایشی نسبت به دوره‌های قبل تحت شرایط نرمال می‌باشد. به منظور تعیین تراز مطلوب آب زیرزمینی و تعیین روند تغییرات افت آب در هر پیژومتر و کل آبخوان، تحلیل روند افت آب زیرزمینی

مبنای خطای شبیه‌سازی برای مدل‌سازی در طول دوره مدل‌سازی اختلاف کمتر از ۵۰ سانتی‌متر بین تراز آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده می‌باشد که در مجموع خطای مدل کمتر از ۱ درصد می‌باشد. جدول (۲) میزان خطای مدل نهایی ماندگار و غیر ماندگار برای آبخوان بیرجند را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل خطا حاکی از دقت مناسب مدل برای مدل‌سازی غیرماندگار دارد. این نتایج نشان می‌دهد که میانگین مجذور خطا یعنی اختلاف بین تراز آب زیرزمینی مشاهده شده با تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در کلیه ۱۲ پیژومتر مدل کمتر از ۲۱ سانتی‌متر است. پس از واسنجی مدل ماندگار در آبخوان بیرجند، شبیه‌سازی اولیه و پس از آن واسنجی مدل کمی آبخوان برای پارامتر آبدهی ویژه (Sy^۱) آبخوان برای مدت زمان ۶ سال انجام و پس از آن برای صحت‌سنجی دوره ۳ سال بعد انتخاب شد. مقدار خطای مدل در حالت غیرماندگار مطابق جدول (۲) ارائه شد. در حالت غیرماندگار میانگین مجذور خطا بین تراز آب زیرزمینی مشاهده شده با شبیه‌سازی شده در کلیه پیژومترهای آبخوان در طی ۶ سال کمتر از ۸۴ سانتی‌متر می‌باشد که دقت مناسب مدل را برای صحت‌سنجی و پیش‌بینی نشان می‌دهد.

از ضروریات استفاده از یک مدل مناسب، کنترل و بررسی رفتار مدل در مقابل برداشت‌ها و اطلاعات زمان‌های گذشته است که بایستی تطابق کافی بین نتایج مشاهده‌ای و پاسخ‌های مدل وجود داشته باشد. طول زمان تطابق جهت صحت‌سنجی بستگی به دو عامل نوع آبخوان و سیر تاریخی آبخوان دارد. بدین منظور از صحت‌سنجی مدل غیرماندگار برای سه سال پایانی مدل‌سازی حاکی از دقت مناسب جهت پیش‌بینی وضعیت آتی آبخوان را نشان

پیزومترهای آبخوان، از افت ۱۰ متر در پیزومتر تقاب که در مرکز آبخوان قرار دارد تا بالادگی ۶۰ سانتی متری آب در خروجی آبخوان حاکی است.

انجام گرفت. هدف طرح تعادل بخشی تأمین کسری مخزن و رسیدن تراز آب زیرزمینی به تراز اولیه می باشد. در آبخوان بیرجند در طی ۹ سال مدل سازی تراز آبخوان از ۱۳۸۵/۴ متر به ۱۳۸۰/۸ رسیده که نشان دهنده افت ۴/۶ متر می باشد. این تغییرات افت در



شکل ۴- نتایج صحت سنجی مدل کمی آبخوان
Figure 4- Validation in Quantitative model

مشاهداتی و تراز مطلوب را برآورد کرده است. در این پیش بینی تنها ادامه روند کنونی بهره برداری از آبخوان مورد نظر بوده است.

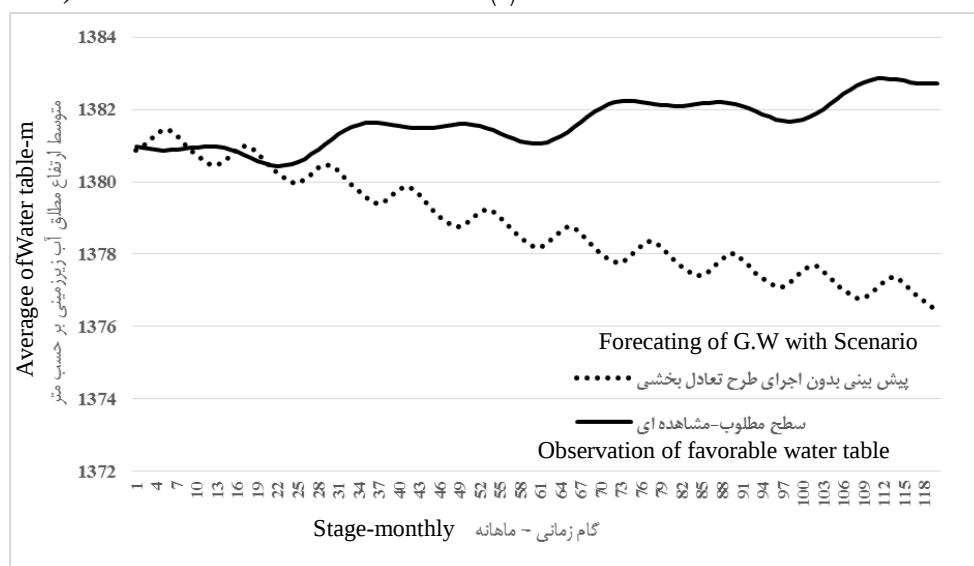
ارزیابی پایداری فنی سناریوی کاهش برداشت از آب زیرزمینی

به منظور اجرای طرح تعادل بخشی در آبخوان بیرجند، ۶ سناریوی کاهش برداشت از آب زیرزمینی در طی دوره ی پیش بینی ۱۰ ساله در مدل اعمال شد. سناریوهای کاهش برداشت از چاه های بهره برداری بصورت کاهش ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درصد وارد مدل مفهومی آبخوان شد. با تعریف سناریوی کاهش برداشت آب از آبخوان، میزان آب برگشتی در بخش کشاورزی محاسبه و این حجم از میزان تغذیه آبخوان کسر و در مدل مفهومی اعمال شد. کاهش برداشت از آب زیرزمینی فقط برای چاه های کشاورزی در مدل در نظر گرفته شد. این سطوح کاهش بهره برداری به منظور اجرای تعادل بخشی انتخاب شد و کاهش بهره برداری در هر سال در مدل اعمال شد. همچنین به منظور برآورد پایداری سیستم آبخوان بیرجند تحت سناریوهای تعادل بخشی

رفتار تراز آب زیرزمینی بدون اعمال سناریوی تعادل بخشی، با تناوب و روند کاهشی همراه بوده که به منظور تعیین تراز مطلوب آب زیرزمینی جهت ارزیابی شاخص در اعمال سناریوهای تعادل بخشی از برازش سری فوری و روند افت آب زیرزمینی استفاده شد. بدین منظور با استفاده از سری زمانی ثبت شده و برازش آن با استفاده از نرم افزار MATLAB تابع سری فوری استخراج و با تحلیل شیب روند سری زمانی تراز آب، تراز مطلوب آب زیرزمینی بدست آمد. سپس میزان تراز مطلوب جهت ارزیابی شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت. رابطه (۶)، منحنی برازش داده شده تراز مطلوب برای کل آبخوان را نشان می دهد. مشابه این رابطه برای هر چاه مشاهده ای در آبخوان، تراز مطلوب جهت ارزیابی شاخص پایداری سیستم برآورد شد که حداکثر خطای برآورد تراز مطلوب با استفاده از سری فوری ۸ سانتی متر تعیین شد. شکل (۵) تغییرات تراز آب زیرزمینی در آبخوان به همراه تراز مطلوب نیز ارائه شده است. تحلیل نتایج هیدروگراف نشان می دهد که ادامه روند بهره برداری از آبخوان طی ۱۰ سال آینده اختلاف نزدیک به ۵ متر بین تراز آب زیرزمینی

براساس سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت آبخوان برای هر چاه مشاهده‌ای و کل آبخوان بدست آمد.

$$WT = 1382 + 0.356 \cdot \cos(0.165X) + 0.148 \cdot \sin(0.165X) + 0.106 \cdot \cos(0.33X) - 0.114 \cdot \sin(0.33X) - 0.11 \cdot \cos(0.495X) - 0.087 \cdot \sin(0.495X) \quad (۶)$$



شکل ۵- تغییرات تراز آب زیرزمینی آبخوان در طی ۱۰ سال پیش‌بینی به همراه تراز مطلوب آب زیرزمینی

Figure 5- Groundwater level changes predicted over the next 10 years with a favorable balance of groundwater

برداشت آب از آبخوان، بازگشت آبخوان به حالت اولیه (تراز مبنای تعادل بخشی) را به‌همراه خواهد داشت. همچنین با کاهش برداشت آب از سفره‌ی آب زیرزمینی، میزان شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت در هر پیژومتر بهبود یافته است. در چاه‌های مشاهده‌ای میانی آبخوان (شمال شاهزله، شمال محمدیه و شمال رکات)، که تحت تأثیر زیاد برداشت آب هستند شاخص پایداری آبخوان با اعمال سناریوهای کاهش برداشت آب، مقدار کمی بهبود داشته که ناشی از اثر تخلیه بالای حجم آب روی تراز آب این بخش از آبخوان است. میزان شاخص پایداری در چاه مشاهده‌ای تقاب که در مرکز آبخوان واقع است از ۳۲ درصد در سناریوی کاهش یک درصد برداشت آب به ۹۴ درصد در سناریوی کاهش ۳/۵ درصد مصرف آب رسیده است. این میزان در سایر چاه‌های مشاهده‌ای نیز افزایش داشته و در پیژومترهای میانی آبخوان با توجه به حجم بالای منابع تخلیه آب، رشد کمتری داشته است. شاخص آسیب‌پذیری نشان می‌دهد که کاهش برداشت آب سبب کاهش این شاخص شده به‌طوری‌که در چاه مشاهده‌ای شمال محمدیه از ۰/۶۵- به ۰/۱۷- رسیده است. بیشترین میزان آسیب‌پذیری در اعمال سناریوهای کاهش برداشت آب در چاه مشاهده‌ای که در پایین دست چاه‌های بهره‌برداری واقع شده است، مشاهده شد. به‌طوری‌که چاه مشاهده‌ای فدشک با اعمال سناریوی کاهش برداشت از یک درصد تا ۳/۵ درصد تنها ۱۶ درصد و نصرآباد تنها ۲۵ درصد بهبود شاخص آسیب‌پذیری را داشته است. بررسی مطلوبیت سیستم آب زیرزمینی نیز نشان داد که در چاه‌های

جدول (۳) نتایج شاخص پایداری آبخوان در ۶ سطح کاهش برداشت آب برای پیژومترها و کل آبخوان را نشان می‌دهد. لذا بیان شاخص برای هر پیژومتر، با توجه موقعیت مکانی اثر بخشی سناریو حائز اهمیت است. براساس نتایج بدست آمده در محدوده چاه مشاهده‌ای خوسف و جنوب بجد در سطوح مختلف کاهش برداشت میزان پایداری ۱۰۰ درصد بدست آمده و در سایر چاه‌های مشاهده‌ای میزان شاخص پایداری با افزایش سطح برداشت، افزایش داشته است بطوری‌که بیشترین تأثیر کاهش برداشت در چاه مشاهده‌ای شمال شاهزله مشاهده شد که میزان پایداری ۹ درصد در سناریوی کاهش یک درصد به میزان پایداری ۱۶ درصد در سناریوی کاهش ۳/۵ درصد می‌رسد. شکل (۶) هیدروگراف ناشی از اعمال ۶ سناریو با وضعیت بدون اعمال سناریو در مقایسه با تراز مطلوب تراز آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سطح کاهش برداشت تراز هیدروگراف آبخوان افزایش داشته و در سناریوهای کاهش ۳/۵، ۳ و ۳/۵ درصد برداشت آب تراز آب زیرزمینی بالاتر از تراز مطلوب آبخوان قرار می‌گیرد.

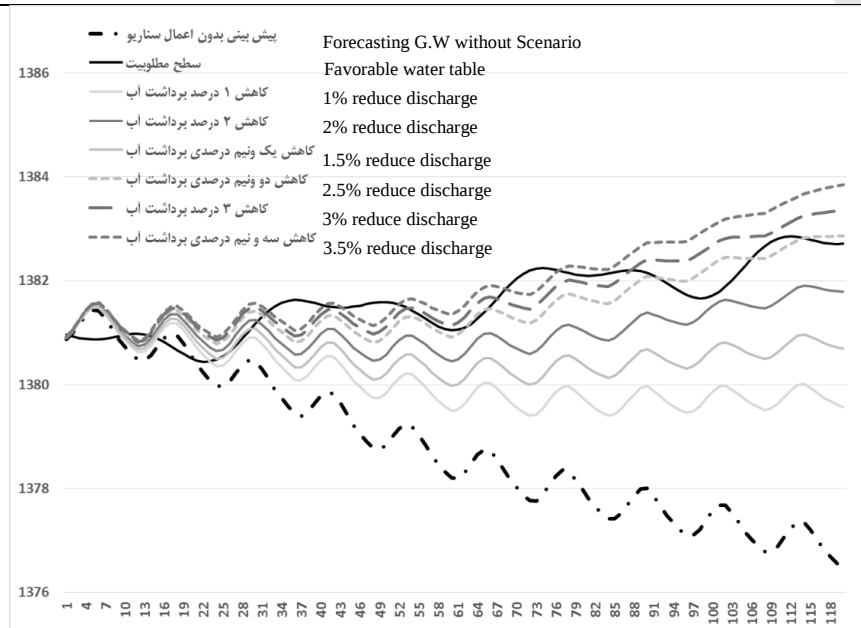
بررسی شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی با استفاده از ۶ سناریوی در طرح تعادل بخشی نشان داد که با کاهش برداشت آب، میزان شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی افزایش یافته به‌طوری‌که از میزان ۳۲ درصد در اولین سطح (کاهش ۱ درصد برداشت) به ۸۸ درصد (کاهش ۳/۵ درصد برداشت) رسیده است (شکل (۷)). همچنین بررسی شاخص مطلوبیت نشان می‌دهد که کاهش ۲/۵ درصدی

مشاهده‌ای ابتداء و انتهای آبخوان که کمتر تحت تأثیر منابع تخلیه
آبخوان هستند و تغییرات تراز آب زیرزمینی کمتری را دارند سریع تر به
تراز مطلوب رسیده و در چاه‌های مشاهده‌ای میانی آبخوان، دارای روند
کندتر می‌باشد.

جدول ۳- ارزیابی پایداری آبخوان با سطوح کاهش یک، ۲/۵ و ۳/۵ درصد برداشت آب

Table 3- Evaluation Sustainability Analysis by 1,2.5 and 3.5 percent reduce discharge

سناریو و شاخص Scenario	سناریوی کاهش سه و نیم درصد 3.5% reduce				سناریوی کاهش دو و نیم درصد 2.5% reduce				سناریوی کاهش یک درصد 1% reduce				نام پیزومتر Pizometer
	پایداری سیستم Sustainable system index	مطلوبیت Desirability	آسیب پذیری Vulnerability	اعتماد پذیری Reliability	پایداری سیستم Sustainable system index	مطلوبیت Desirability	آسیب پذیری Vulnerability	اعتماد پذیری Reliability	پایداری سیستم Sustainable system index	مطلوبیت Desirability	آسیب پذیری Vulnerability	اعتماد پذیری Reliability	
اراضی شمس آباد- shamsabad	0.47	0.97	-0.18	0.13	0.41	0.84	-0.29	0.11	0.20	0.40	-0.66	0.06	
تقاب- Taghab	0.94	1.00	-0.05	0.87	0.85	1.00	-0.11	0.69	0.32	0.54	-0.49	0.11	
جنوب حاجی اباد- HajiAbad	0.50	0.84	-0.24	0.19	0.43	0.72	-0.35	0.16	0.22	0.34	-0.69	0.10	
جنوب بجد- Bojd	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	
خوسف- Khosf	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	
شمال شاهزله- Shahzileh	0.16	0.69	-0.45	0.01	0.15	0.60	-0.52	0.01	0.09	0.29	-0.77	0.01	
شمال محمدیه- Mohamadiyeh	0.42	1.00	-0.17	0.09	0.19	0.87	-0.26	0.01	0.12	0.42	-0.65	0.01	
کنار سپاه- Sepah	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.66	0.69	-0.31	0.61	
نصرآباد- NasrAbad	0.83	1.00	-0.24	0.76	0.79	1.00	-0.20	0.61	0.35	0.55	-0.49	0.15	
فدشک- Fedeshk	0.44	0.49	-0.65	0.48	0.41	0.44	-0.68	0.48	0.28	0.25	-0.81	0.43	
شمال رکات- Rekat	0.37	1.00	-0.17	0.06	0.19	0.87	-0.27	0.01	0.12	0.42	-0.65	0.01	
نوفرست- Noferest	0.98	1.00	0.00	0.93	0.98	1.00	0.00	0.93	0.93	1.00	0.00	0.81	
آبخوان- Aquifer	0.88	1.00	-0.11	0.76	0.73	1.00	-0.12	0.43	0.32	0.50	-0.55	0.14	

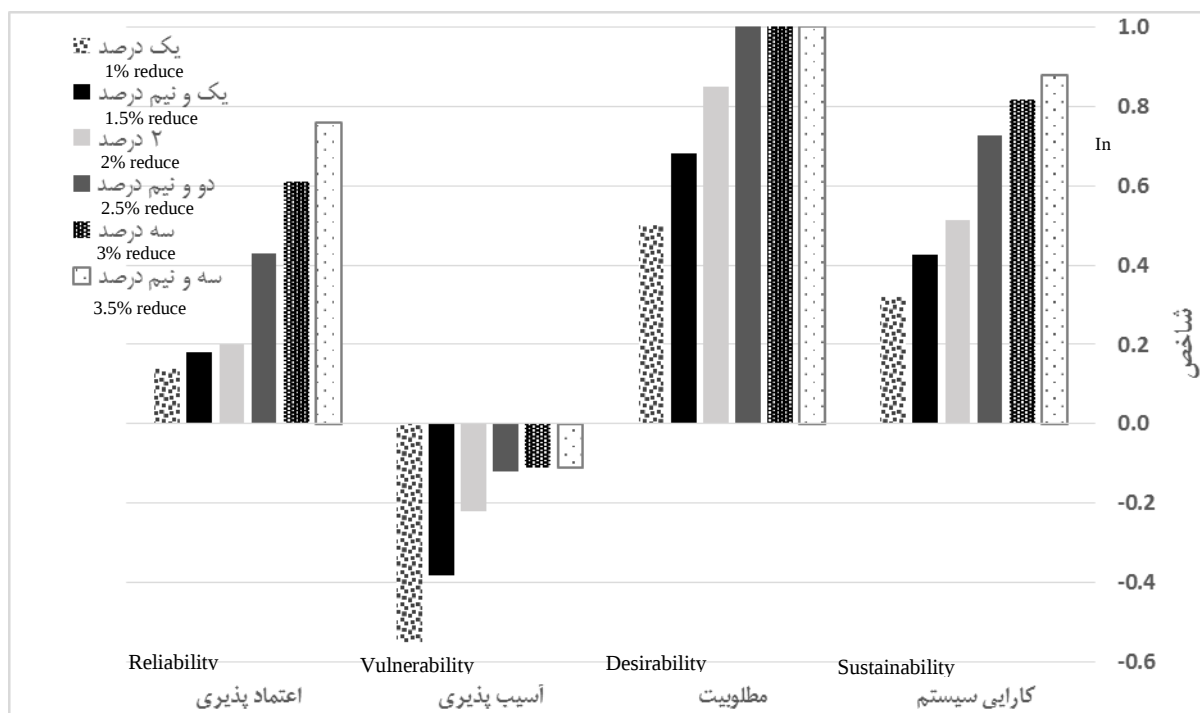


شکل ۶- هیدروگراف آب زیرزمینی تحت اعمال ۶ سناریو با تراز مطلوب

Figure 6- Groundwater hydrograph under Acts 6 scenarios with favorable balance

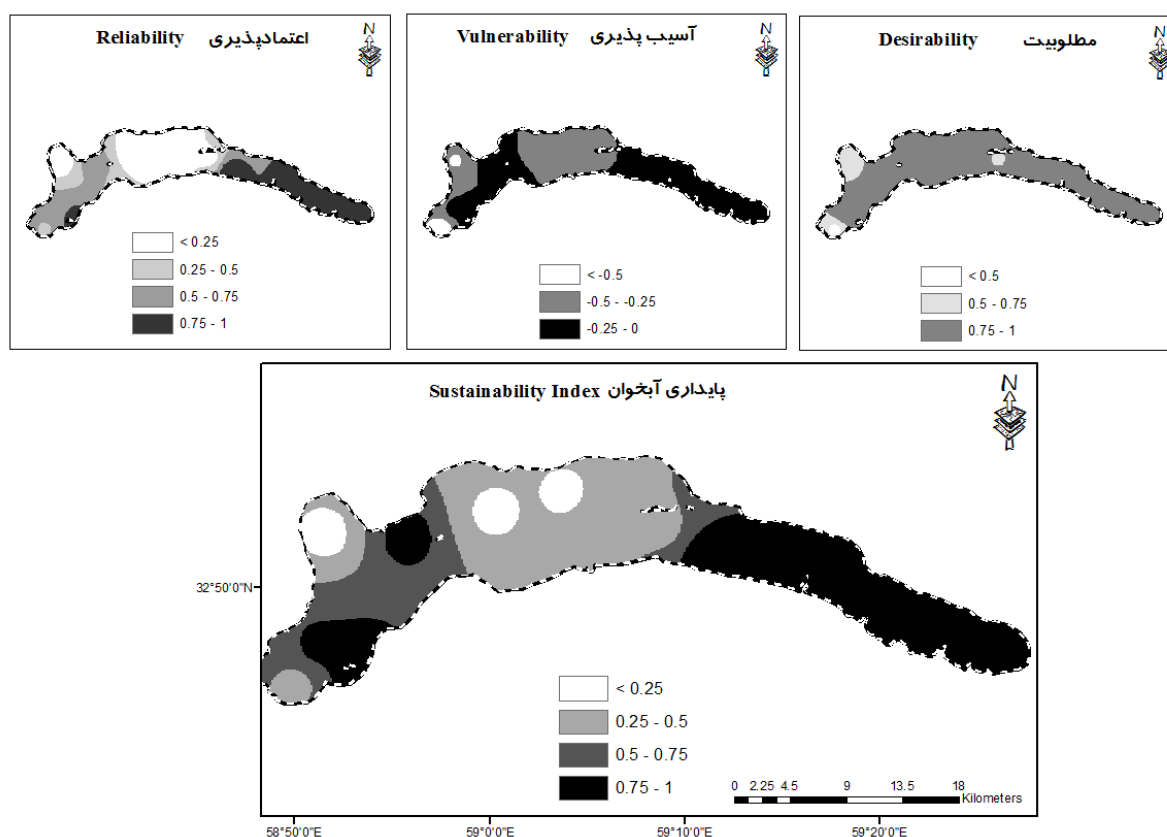
این مقدار به مفهوم رسیدن سطح آب زیرزمینی آبخوان به تراز مطلوب تعریف شده‌ی آبخوان است. در شکل (۸) میزان پایداری سیستم آب زیرزمینی را با استفاده از سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت بصورت توزیعی با استفاده از نتایج سناریوی کاهش ۲/۵ درصدی برداشت آب ارائه شده است. نتایج توزیعی نشان می‌دهد که شاخص اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری آبخوان در منطقه میانی آبخوان که محل تمرکز چاه‌های بهره‌برداری است رشد چشمگیری نداشته و پایداری سیستم آب زیرزمینی را در این منطقه نسبت به سایر بخش‌های آبخوان کاهش داده است. همچنین تحلیل توزیعی شاخص نشان می‌دهد که روند افزایشی شاخص در مناطق میانی آبخوان که تحت تأثیر چاه‌های بهره‌برداری قرار دارد روند کندتری داشته است. همچنین شاخص پایداری آبخوان در سناریوی کاهش ۱ درصد برداشت از آب چاه‌ها از ۳۲ درصد به شاخص ۸۸ درصد در سناریوی کاهش ۳/۵ درصد می‌رسد.

بطور کلی نتایج نشان می‌دهد که پیژومترهای ابتدایی (شرق آبخوان) آبخوان که تحت تأثیر منابع تخلیه آب زیرزمینی قرار ندارند تغییرات کمتری در پایداری آبخوان دارند و حساسیت کمتری را نسبت به سناریوهای مختلف نشان می‌دهند. شش پیژومتر میانی آبخوان (پیژومتر تقاب، پیژومتر شمس‌آباد، پیژومتر شمال شاهزیله، شمال محمدیه، شمال رکات و کنارسپاه) که تحت تأثیر چاه‌های بهره‌برداری قرار دارد با کاهش برداشت، افزایش پایداری سیستم را نشان داده که در این بین چاه‌های مشاهده‌ای بالادست تغییرات کمتری را نسبت به پایین دست دارند. بررسی پایداری سیستم آب زیرزمینی تحت ۶ سناریوی کاهش برداشت آب در شکل (۷) ارائه شده است. اعمال ۲/۵ درصد کاهش برداشت آب زیرزمینی بصورت توزیعی در آبخوان، توانسته سطح آب زیرزمینی را به تراز مطلوبیت متناسب با هدف طرح تعادل بخشی آبخوان، نزدیک کند. نتایج نشان داد که با اعمال ۲/۵ درصد کاهش برداشت آب از آبخوان، مطلوبیت سیستم تأمین شده که



شکل ۷- شاخص‌های پایداری سیستم آب زیرزمینی در سناریوهای کاهش برداشت

Figure 7- Sustainability Indicators groundwater system in reducing harvest scenarios



شکل ۸- میزان پایداری سیستم آب زیرزمینی بصورت توزیعی در سناریو کاهش ۲/۵ درصد
Figure 8- The sustainability of groundwater system in the distributed scenario decrease 2.5%

نتیجه گیری

تبادل بخشی، مورد سنجش قرار گرفت. نتایج برآورد شاخص پایداری سیستم با استفاده از سه شاخص نشان داد که مناطقی که کمتر تحت تأثیر چاه‌های بهره‌برداری هستند حساسیت کمتری داشته و به سرعت میزان پایداری سیستم به حد مطلوب (عدد یک حد بالای شاخص است) می‌رسد. در بخش‌هایی از آبخوان که چاه‌های بهره‌برداری قرار دارند، با توجه به حجم بالای برداشت آب تغییرپذیری شاخص‌ها کندتر است. روند تغییرات پایداری سیستم آب زیرزمینی آبخوان نشان می‌دهد که با کاهش ۱ درصد برداشت آب ۳۳ درصد پایداری سیستم افزایش داشته و اگر این میزان به ۳/۵ درصد برسد این میزان افزایش به ۸۸ درصد خواهد رسید.

استفاده از این شاخص‌ها با توجه به قابلیت توزیعی بودن آن امکان توسعه و بهره‌برداری مناسب و بهینه از آبخوان‌ها را فراهم می‌کند. نتایج این تحقیق و ارائه شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی با توجه به بررسی توزیعی اثر سناریو و ارزیابی اثر آن می‌تواند برای آبخوان‌های دیگر با وضعیت مشابه بخصوص برای تبادل بخشی مورد ارزیابی و آسیب‌شناسی قرار گیرد.

استفاده از شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی، جهت ارزیابی اثر سناریوهای طرح تعادل بخشی موجب تصمیم‌گیری راحت‌تر در رابطه با بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از مفهوم شاخص انعطاف‌پذیری، شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی با تلفیق از سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت ارائه و بکار گرفته شده است. بدین منظور یک تراز مطلوب آب زیرزمینی جهت تصمیم‌گیری و برآورد شاخص با استفاده از سری فوریه و روند افت آب زیرزمینی برای هر چاه مشاهداتی و کل آبخوان تعریف شد. به منظور استفاده از شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی، ۶ سناریوی تعادل بخشی (کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی در سطوح کاهش ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درصدی از چاه‌های بهره‌برداری کشاورزی) با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی شد. پس از شبیه‌سازی و برآورد هیدروگراف آبخوان برای یک دوره ۱۰ ساله، سناریو کاهش برداشت آب در مدل اعمال شد. نتایج مدل با استفاده از شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی برآورد شده و بر اساس آن میزان پایداری سیستم در هر سناریوی

منابع

- 1- Alimonti C., and Lombardi M. 2015. Reliability Analysis for Preliminary Forecasts of Hydrogeological Unit Productivity. *Water Resource Management* , 29:3771–3785.
- 2- Chaves HML., and Alipaz S. 2007. An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: the watershed sustainability index. *Water Resource Management*, 21(5):883–895.
- 3- Fourier J.B.J. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France VII. 570-604 (1827) (greenhouse effect essay).
- 4- Frija A., Dhehibi B., Chebil A., and Villholth K.G. 2015. Performance evaluation of groundwater management instruments: The case of irrigation sector in Tunisia. *Groundwater for Sustainable Development*, 1(1):23-32.
- 5- Hashimoto T., Stedinger JR., and Loucks DP. 1982. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. *Water Resources Research*, 10(1):14–20.
- 6- Juwana I., Perera BJC., and Muttill N. 2009. Conceptual framework for the development of West Java water sustainability index. 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns.
- 7- Loucks DP., and van Beek E. 2005. Water resources systems planning and management, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France.
- 8- Mazza R., La Vigna F., and Alimonti C D. 2014. Evaluating the available regional groundwater resources using the distributed hydrogeological budget. *Water Resource Management*, 11:1–17.
- 9- McMahon T. A., Adeloye A. J., and Sen-Lin Z. 2006. Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology*, 324: 359–382.
- 10- Mendoza VM., Villanuave EE., and Adem J. 1997. Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change. *Climate Research Journal*, 9:139-145.
- 11- Ministry of Power. 2011. Prohibition discharge in Birjand plain. (In Persian)
- 12- Ministry of Power. 2014. Report of Reduction program and balance groundwater. (In Persian)
- 13- Pandey V., Shrestha S., Chapagain S., and Kazama F. 2011. A framework for measuring groundwater sustainability. *Environmental science & policy*, 14: 396 – 407.
- 14- Policy Research Initiative .2007. Canadian water sustainability index. PRI Project Report on Sustainable Development.
- 15- Safavi HR., Esfahani MK., and Zamani AR. 2014. Integrated index for assessment of vulnerability to drought, case study: Zayandeh-rood River Basin, Iran. *Journal of Water Resources Management*, 28(6):1671-1688. (In Persian)
- 16- Safavi HR., and Golmohammadi MH. 2016. Evaluating the Water Resource Systems Performance Using Fuzzy Reliability, Resilience and Vulnerability. *Iran-Water Resources Research*, 12 (1): 68-83.
- 17- Sandoval-Solis S., McKinney DC., and Loucks DP. 2011. Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(5):381-390.
- 18- Shahedi M., and Talebi Hossein Abad F. 2014. Introducing some indices to evaluate the balance of water resources and sustainable development. *Journal of Water and Sustainable Development*, 1(1):73-79. (In Persian)
- 19- Todd DK., and Mays LW. 2005. *Groundwater hydrology*, 3rd edn. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken.



Quantitative Sustainability Analysis of Aquifer System (Case Study: South Khorasan- Birjand Aquifer)

H. Kardan Moghaddam¹- M. E. Banihabib^{2*}- S. Javadi³

Received: 25-09-2017

Accepted: 04-12-2017

Introduction: Groundwater is predominantly a renewable resource, and when managed properly can ensure a long-term water supply for increasing water demand and for climate change impacted region. Surface water renews as part of the hydrologic cycle in an average time period ranging from approximately 16 days (rivers) to 17 years (lakes and reservoirs); however, the average renewal time for groundwater is approximately 1400 years for aquifers to millions years for some deep fossil groundwater. Groundwater depletion, which is the reduction in the volume of groundwater storage, can lead to land subsidence, negative impacts on water supply, reduction in surface water flow and spring discharges, and loss of wetlands. Water balancing strategy has been considered as one of the most effective options to mitigate the groundwater depletion, and thus the balancing scenarios are applied as main approach to manage ground water sustainably. The purpose of the water balancing strategy in aquifers management is that groundwater level to be returned to the primary water level and to compensate the water resources shortage of aquifers' storage.

Materials and Methods:

1. Case study: Birjand aquifer with an area of 1100 square kilometers is situated in eastern part of Iran. The location of the aquifer is between 59° 45 and 58° 43 east longitude, and 33° 08 and 32° 34 north latitude.

2. Modeling: Laplace Equation is the basic equation for groundwater flow study in steady or unsteady states. In simulation by using numerical models, the boundary of the model, recharge and discharge resources, evaporation and recharge zones are important elements. After finding the key components of the conceptual model, the MODFLOW software was applied for simulation of groundwater. MODFLOW, which is a computer code that solves the groundwater flow equation and uses finite-difference method, is provided by the U.S. Geological Survey.

3. Sustainability Analysis: In order to achieve the objective of this study, water balancing scenarios should be evaluated for sustainability of the groundwater system using appropriate indices. Here, three indicators of reliability, vulnerability and desirability are proposed and were employed to assess the stability of groundwater system in different balancing scenarios in lumped and distributed forms. The aquifer sustainability index is expressed in Equation 4. In this equation, three indicators of aquifer reliability (Equation 1), aquifer vulnerability (Equation 2) and Desirability (Equation 3) have been used to assess the stability of groundwater system. The aquifer reliability index means in what extent the withdrawal scenario has been able to return the aquifer to its original state using the Equation 1 as follows:

$$\alpha_{EL} = \frac{n_{EL}}{N_{EL}} \quad (1)$$

In which n_{EL} the number of periods where the groundwater level is above the desired level (equilibrium balance) and N_{EL} the total number of time steps in simulation. The vulnerability index indicates the amount of shortage in the groundwater storage and expresses the severity of the system failures using the Equation 2 as follows:

$$\gamma_{EL} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_s - W_t)}{\sum_{i=1}^n (W_t - W_{Pr})} \quad (2)$$

1, 2 and 3- Ph.D. Candidate, Water Resources Engineering and Associate Professors of Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran, Respectively
(*- Corresponding Author Email: banihabib@ut.ac.ir)

In this equation, W_t the desired groundwater level at time step t , W_s the groundwater level simulated in t time period for each scenario, W_{pr} the groundwater level without scenarios and n the number of periods where the groundwater level is lower than the desired level. The index of the likelihood of returning the system to a favorable state is presented as an indicator of the desirability of the system using the Equation 3 as follows:

$$\beta_{EL} = 100 * \left(\frac{R_{EL} - r_{EL}}{R_{EL} - R_{pr}} \right) \quad (3)$$

In this equation, r_{EL} indicates the groundwater level after the depletion, R_{EL} is the desired level of groundwater and R_{pr} is the groundwater level (without the scenario). After estimating three indicators of reliability, vulnerability and desirability, the sustainability index for each scenario can be appraised using Equation 4.

$$\rho_{EL} = \alpha_{EL} \cdot \beta_{EL} \cdot (1 - \gamma_{EL}) \quad (4)$$

In this equation, ρ_{EL} groundwater sustainability index, α_{EL} reliability index, β_{EL} desirability index and γ_{EL} vulnerability index.

Results and Discussion: In this study, six water balancing strategies were employed to reduce 1, 1.5, 2, 2.5, 3 and 3.5 percent water withdrawing for agricultural water use. Results of the simulation of different water balancing strategies demonstrated that with reducing in water use, the stability index has been improved significantly. The improvement changes from 32% increase in the index for 1% water withdrawing reduction scenario to 88% increase in the index for the 3.5% water withdrawing reduction scenario. Moreover, the reviewing of the stability indices of the system in various scenarios reveals that a 2.5% reduction in water use will assistance the aquifer status achieve to a stable state.

Conclusion: In order to manage groundwater withdrawal, it is easier to assess the impact of the water balancing scenarios using the groundwater sustainability index. The review of sustainability indices in the studied aquifer shows that by reducing 1% of the water harvest, 32% of the system's stability increases, and if water harvest reduction reaches 3.5%, the index increases 88%. Considering the distributed potential and possibility of the investigation of different scenarios by proposed indices in this study, they can be applied to assess and manage other similar aquifers.

Keywords: Desirability, Desired water table, Reliability, Sustainable system index, Vulnerability



تأثیر کاربری اراضی بر جمعیت میکروبی خاک و تغییرپذیری مکانی آنها در اراضی میرآباد،

نقده

شیدا کبودی^{۱*} - فرزین شهبازی^۲ - ناصر علی اصغرزاد^۳ - نصرت اله نجفی^۴ - ناصر دواتگر^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۰۹

چکیده

فهم بیولوژی و اکولوژی خاک به طور فزاینده‌ای برای تجدید و پایداری اکوسیستم مهم است. در تمام اکوسیستم‌ها، میکروب‌های خاک نقش مهمی در تجزیه مواد آلی، چرخه مواد غذایی و فراهمی عناصر غذایی قابل جذب گیاه ایفا می‌کنند. هدف از این تحقیق، بررسی تغییرپذیری مکانی و پهنه‌بندی جمعیت میکروبی خاک، کربن آلی و کربنات کلسیم معادل خاک متأثر از کاربری‌های اراضی شامل باغ سیب، مرتع و زراعت می‌باشد. بدین منظور، از منطقه میرآباد مابین شهرهای نقده و اشنویه (استان آذربایجان غربی) ۶۵ نمونه خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متری) برداشته شد. آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها توسط برنامه آماری SPSS انجام گرفت. مقادیر نقاط نمونه‌برداری نشده با استفاده از روش‌های کریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله‌ها در نرم‌افزار زمین‌آمار (GS+) میان‌یابی شد. نتایج نشان داد روش کریجینگ بهترین روش میان‌یابی نقاط نمونه‌برداری نشده می‌باشد. وابستگی مکانی جمعیت میکروبی خاک متوسط بوده و این امر نشان‌دهنده تأثیر کاربری بر توزیع مکانی ویژگی‌های مذکور می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از تحلیل آماری توسط برنامه MSTATC در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) نیز بیان‌کننده تفاوت معنی‌دار در بین سه کاربری از نظر ویژگی‌های مطالعه شده است. نقشه‌های توزیع مکانی با تلفیق نتایج حاصل از زمین‌آمار و GIS تهیه شدند.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، تغییرپذیری مکانی، جمعیت میکروبی، کریجینگ

مقدمه

پراکنش مکانی ساختار جمعیت میکروبی و فعالیت آنزیم‌های خاک متأثر از انواع کاربری اراضی را در چین و ايسلند با استفاده از زمین‌آمار بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که کاربری اراضی باعث تغییر در کربن آلی و به نوبه خود بر روی ساختار جمعیت میکروبی و آنزیمی خواهد شد. در اکوسیستم‌های زراعی و مرتعی متنوعی که در کالیفرنیا وجود دارد از شدت اختلاط خاک برای مقایسه اثرات کاربری اراضی بر روی ساختار جمعیت میکروبی استفاده می‌شود به گونه‌ای که با کاهش فعالیت‌های خاک‌ورزی و کشاورزی می‌توان انتظار افزایش زیست‌توده و فعالیت ریزجانداران را داشت (۱۲). علم زمین‌آمار بر پایه نظریه متغیر مکانی استوار است. این علم که شاخه‌ای از علم آمار است به وسیله مهندسين معدن برای برآورد حجم و عیار توده‌های کانساری ابداع گردیده است. روش‌های میان‌یابی مختلفی در زمین‌آمار وجود دارد که از مهمترین آن‌ها می‌توان به روش‌های کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، وزن‌دهی معکوس فاصله و کریجینگ رگرسیون اشاره کرد (۳). ژانگ و همکاران (۲۴) در رابطه با کاربرد زمین‌آمار در علوم خاک تحقیقاتی انجام داده و زمین‌آمار را به عنوان یک ابزار مفید و پیشرفته در حل مسائل مربوط به علوم خاک معرفی کردند. روش

حساسیت زیاد ویژگی‌های بیولوژیکی به تغییرات مدیریتی خاک باعث در نظر گرفتن این ویژگی‌ها به عنوان شاخص‌های مناسب برای ارزیابی کیفیت خاک شده است (۱۱). هدف از این تحقیق، بررسی تغییرپذیری مکانی و پهنه‌بندی جمعیت میکروبی خاک، کربن آلی و کربنات کلسیم معادل خاک متأثر از کاربری‌های اراضی شامل باغ سیب، مرتع و زراعت می‌باشد. در تمام اکوسیستم‌ها، میکروب‌های خاک نقش مهمی در تجزیه مواد آلی، چرخه مواد غذایی و فراهمی عناصر غذایی قابل جذب گیاه ایفا می‌کنند (۱۸). الگوی جمعیت میکروبی خاک نقش اصلی و اساسی در محصولات اولیه و چرخه غذایی اکوسیستم‌های جهانی و خاکی دارد (۱۷). گائو و همکاران (۱۰)

۱، ۲، ۳ و ۴ - به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشیار، استاد و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(*) - نویسنده مسئول: (Email: sheydaa.kaboodi@yahoo.com)

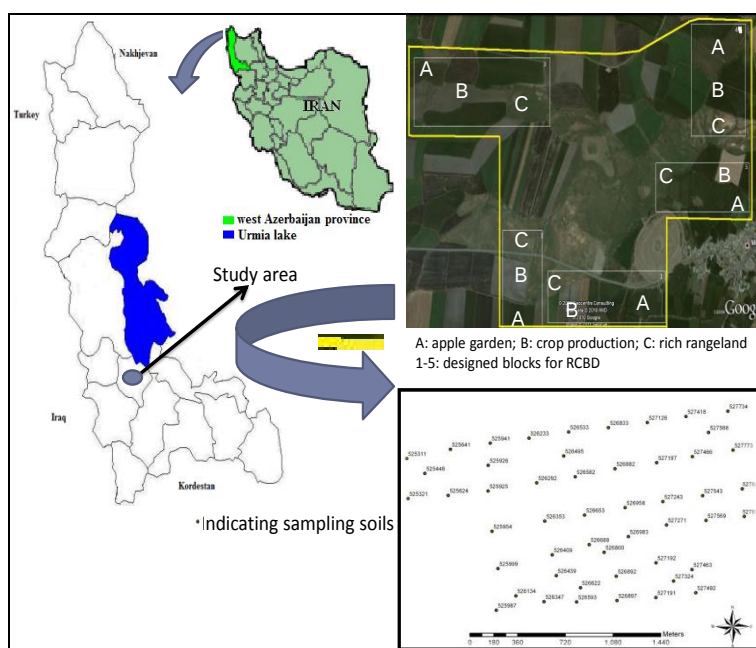
۵- استادیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

شهرهای نقده و اشنویه به وسعت ۳۶۲ هکتار، واقع شده است. مواد مادری منطقه، مخروط افکنه‌های کوهپایه‌ای قدیمی مرتفع می‌باشد و از نظر رده‌بندی بر اساس نقشه رده‌بندی خاک‌های ایران در رده اینسپتی‌سول طبقه‌بندی می‌شوند. الگوی طراحی نقاط نمونه‌برداری در شکل ۱ نشان داده شده است. تعداد ۶۵ نمونه خاک سطحی از عمق ۰-۳۰ سانتی متری به عنوان عمق مؤثر زراعی (۱۳) برداشته شد و جمعیت میکروبی خاک از طریق شمارش کلنی رشد کرده در محیط کشت آگار غذایی (۱)، کربن آلی خاک به روش والکلی بلک (۱۶) و کربنات کلسیم معادل خاک نیز به روش تیتراسیون (۲۲) تعیین شدند.

وزن‌دهی معکوس فاصله توسط ایناکس و سولت (۷) به عنوان روش آماری چند متغیره و زمین‌آماری در بررسی خاک‌های آلوده در آلمان بکار رفته و نتایج نشان از دقت بالای کاربرد این روش در خاک‌های آلوده دارد. اشکین و قیزیلکایا (۲) از روش‌های زمین‌آماری و تخمین-گر کریجینگ برای میان‌یابی الگوی پراکنش نیتروژن زیست‌توده در مراتع شمال ترکیه استفاده کردند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه (میرآباد) در بخش غربی جلگه سلدوز بین



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نمایی از شبکه نمونه‌برداری

Figure 1- Study area location and scheme of sampling grid

ارزیابی شدند که وابستگی مکانی نامیده می‌شود و معمولاً به صورت درصد بیان می‌گردد. چنانچه این نسبت کمتر از ۲۵ درصد گردد نشان دهنده وابستگی مکانی قوی می‌باشد و اگر این نسبت بین ۲۵ و ۷۵ درصد قرار گیرد بیانگر وابستگی مکانی متوسط و چنانچه این نسبت بزرگتر از ۷۵ درصد گردد نشان دهنده وابستگی مکانی ضعیف خواهد بود (۱۹). برای ارزیابی‌ها و مقایسه‌های انجام شده بین تخمین‌گرها، ارزیابی اعتبارسنجی تقاطعی (جک‌نایف)، جهت ارزیابی دقت حاصل از میان‌یابی انجام می‌شود. از پارامتر آماری میانگین خطا اریب (MBE) و میانگین خطا مطلق (MAE) استفاده شد. مقادیر مثبت و منفی این پارامترها نشان دهنده بیش برآوردی و کم برآوردی از مقدار واقعی می‌باشد. که در حالت ایده‌آل مساوی صفر است که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقت بیشتر روش می‌باشد:

تغییرنا ویژگی‌های ساختاری متغیر ناحیه‌ای و چگونگی تغییرات را بررسی می‌کند. با توجه به این که محاسبه نیم تغییر نما برای همه جامعه مورد مطالعه امکان پذیر نمی‌باشد، نیم تغییر نما در یک فاصله تفکیک مشخص با استفاده از رابطه ۱ تخمین زده می‌شود (۶):

$$\gamma = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x+h) - z(x)]^2 \quad (1)$$

که در آن، γ مقدار نیم‌تغییرنا برای جفت نقاطی است که به فاصله h از هم قرار دارند، $n(h)$ تعداد زوج نقاطی است که به فاصله h از هم قرار دارند، $z(x)$ مقدار متغیر در نقطه‌ای به مختصات x ، $z(x+h)$ مقدار متغیر در نقطه‌ای به مختصات $(x+h)$ می‌باشد. ضریب تبیین بالا (R^2) بالا و مجموع مربعات باقیمانده پایین (RSS) پایین معیار انتخاب بهترین مدل می‌باشد (۱۸). قدرت ساختار مکانی متغیرها با استفاده از نسبت واریانس اثر قطعه‌ای به واریانس کل

نشان داد که جمعیت میکروبی و کربن آلی دارای توزیع فراوانی نرمال نبودند. ضریب تغییرات معیاری از تغییرپذیری نسبی است که مقدار آن در مورد جمعیت میکروبی کمترین و در مورد کربنات کلسیم معادل بیشترین محاسبه گردید. ضریب تغییرات کم ناشی از تأثیر عوامل ذاتی و ضریب تغییرات زیاد ناشی از اثر ترکیبی عوامل مدیریتی و عوامل ذاتی در این منطقه است زیرا ویژگی‌های بیولوژیک از جمله ویژگی‌هایی بوده که شدیداً تحت تأثیر مدیریت قرار می‌گیرند (۲۱). تبدیل لگاریتمی داده‌ها علاوه بر سوق دادن توزیع داده‌ها به سمت نرمال، ضریب تغییرات را نیز کاهش می‌دهد. همچنین بریجدا و همکاران (۵) نیز نشان دادند تبدیل داده‌ها در کاهش چولگی، نزدیک شدن داده‌ها به توزیع نرمال و کاهش ضریب تغییرات مؤثر است.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)] \quad (2)$$

n = تعداد نقاط مشاهده‌ای، $Z^*(x_i)$ مقدار برآوردی بر نقطه i ام، $Z(x_i)$ میانگین مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد. MBE فاقد قدر مطلق می‌باشد و مقادیر منفی را نیز شامل می‌شود ولی مقادیر MAE همواره مثبت خواهند بود. سپس پارامترهای زمین آماری را وارد محیط GIS کرده و نقشه پراکنش ویژگی‌های خاک به دست خواهد آمد.

نتایج و بحث

پارامترهای آماری توصیفی، در جدول ۱ آورده شده است. نتایج

جدول ۱- پارامترهای آماری توصیفی ویژگی‌های خاک منطقه مورد مطالعه

Table 1- Descriptive statistical criteria of soil properties in the study area

	میانگین Mean	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	انحراف معیار Standard deviation	ضریب تغییرات Coefficient of variation	چولگی Skewnes	کشیدگی Kurtosis
جمعیت میکروبی Microbial community	16.6×10 ⁶	57×10 ⁶	2×10 ⁶	9.39	53.2	1.73	3.932
کربن آلی Organic carbon	3.39	0.79	8.33	2.03	59.88	1.1	-0.17
کربنات کلسیم معادل Carbonate calcium equivalent	27.38	4.15	58.34	16.81	61.39	0.54	-1.1

تحلیل آماری

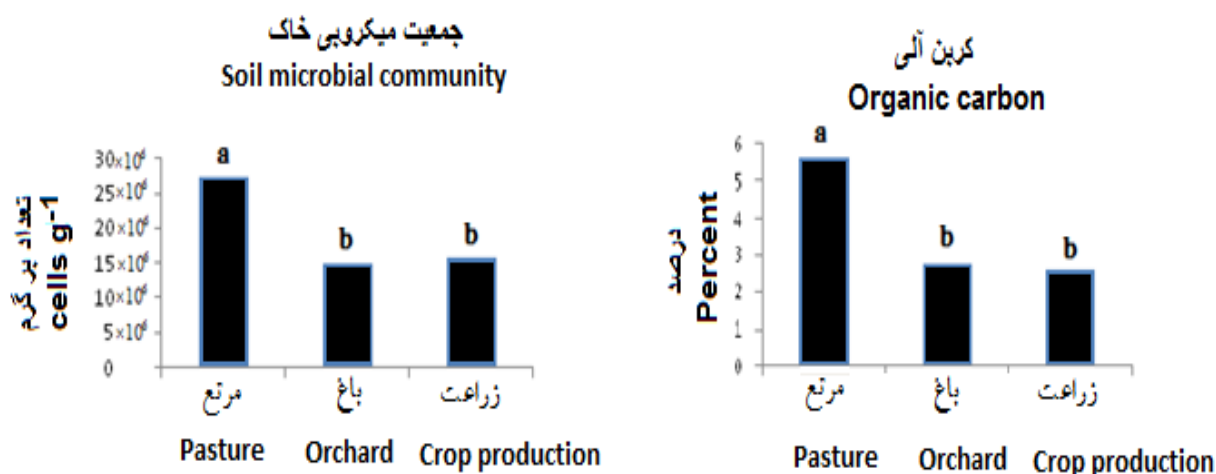
خاک‌ورزی همگی باعث کاهش جمعیت میکروبی در زراعت می‌شود. کیفیت و کمیت مواد آلی ورودی، غالباً فاکتور مهمی بوده و ضمن افزایش زیست‌توده میکروبی، ساختار جمعیت میکروبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۸). افزایش در میزان کربن آلی و همچنین کربن آلی به سهولت قابل تجزیه مانند لاشبرگ، باعث افزایش سرعت این فرآیند می‌شود و نتایج آزمایش نشان‌دهنده وجود کربن آلی زیاد در کاربری مرتع است که این با نتایج وان ولیت و همکاران (۲۳) مطابقت دارد. همچنین از آن‌جا که در مرتع عملیات کشاورزی و خاک‌ورزی انجام نمی‌گیرد، کربن آلی در خاک ذخیره و تعادل بیولوژیک به هم نمی‌خورد و معدنی شدن نیتروژن آلی افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس جدول (۲) نشان می‌دهد که از لحاظ کربنات کلسیم معادل در بین کاربری‌ها اختلاف معنی‌داری وجود دارد ($p < 0.05$). با توجه به مقایسه میانگین کربنات کلسیم معادل خاک، کاربری مرتع بیشترین و باغ کمترین میزان کربنات کلسیم معادل را دارد چون در طول دوره خشکی در کاربری‌های باغ و زراعت حداقل ۱۰-۱۲ مرتبه آبیاری انجام می‌شود که این امر باعث انتقال آهک از لایه‌های سطحی خاک شده و باعث کاهش میزان آهک در این دو کاربری می‌شود.

برای بررسی تأثیر کاربری اراضی بر روی شاخص‌های بیولوژیکی طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) با ۵ تکرار (۵ بلوک) و سه تیمار زراعت، باغ سیب و مرتع پایه‌ریزی گردید. نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس در جدول (۲) نشان می‌دهد که از لحاظ جمعیت میکروبی و کربن آلی در بین کاربری‌ها اختلاف معنی‌داری وجود دارد ($p < 0.01$). با توجه به مقایسه میانگین‌ها (شکل ۲) بیشترین مقدار جمعیت میکروبی و کربن آلی خاک مربوط به کاربری مرتع می‌باشد. در کاربری مرتع وجود شرایط مساعد و عدم وجود عملیات خاک‌ورزی باعث افزایش جمعیت میکروبی شده است که نتایج مشابهی توسط باردگت و کوک (۴) در رابطه با همبستگی بین جمعیت میکروبی و کربن آلی و همچنین جمعیت میکروبی بالا در خاک مرتع گزارش شده است. علت کم بودن جمعیت میکروبی در باغ وجود گیاهان چند ساله (درختان) می‌باشد زیرا سالانه مقادیر اندکی ریشه و بقایای گیاهی به خاک افزوده می‌شود لذا کل کربن آلی و کربن سهل‌الوصول در این کاربری کمتر و به همان نسبت جمعیت میکروبی نیز کمتر است. همچنین ورود نهاده‌های کشاورزی نظیر سم و کود و عملیات

جدول ۲- تجزیه واریانس ویژگی‌های خاک منطقه مطالعه شده
Table 2- Variance analysis of soil properties in the study area

Table 2 - Variance analysis of soil properties in the study area				
	درجه آزادی Degree of freedom	(Mean of squares) میانگین مربعات		
		جمعیت میکروبی Microbial community	کربن آلی Organic carbon	کربنات کلسیم معادل Carbonate calcium equivalent
بلوک Block	4	0.021	0.028a	0.012
کاربری Land use	2	0.106b	0.168b	0.265a
خطا Error	8	0.007	0.003	0.052
ضریب تغییرات (%) Coefficient of Variation (%)		6.67	10.18	18.24

اعداد با حروف a و b به ترتیب نشان دهنده اختلاف معنی دار ($p < 0.05$) و ($p < 0.01$) می‌باشد
Numbers "a" and "b" followed by the letter reveal significantly different ($p < 0.05$) and ($p < 0.01$), respectively



شکل ۲- تأثیر کاربری‌های مختلف بر میانگین مقادیر جمعیت میکروبی و کربن آلی خاک
Figure 2- Effect of different land use on mean soil microbial community and organic carbon

غیره) در این تغییرات تأثیری نداشته است و تحت تأثیر مقیاس مطالعه نیز می‌باشد چون ویژگی‌های بیولوژیک شدیداً تحت تأثیر مدیریت قرار می‌گیرند (۲۱). بررسی نتایج واریوگرام نشان داد که کربنات کلسیم معادل و کربن آلی نسبت به سایر پارامترها ساختار مکانی قوی‌تری داشته است. میان‌یابی زمین‌آمار برای برآورد آن‌ها نیز از دقت بیشتری برخوردار بوده است که وابسته به فاکتورهای ذاتی بوده و فاکتور مدیریتی دخالتی در این تغییرات نداشته است. مک‌گراس و ژانگ (۱۴) نیز در بررسی توزیع مکانی کربن آلی در خاک‌های مرتعی ایرلند به نتایج مشابهی دست یافتند.

تحلیل‌های زمین‌آماري

پارامترهای نیم‌تغییرنا برای ویژگی‌های مطالعه شده در جدول ۳ تنظیم شده است. نتایج نشان می‌دهد که همه ویژگی‌های مطالعه شده از مدل کروی تبعیت می‌کنند (شکل ۳). دامنه تأثیر نیم‌تغییرنا از ۶۱۱۰ متر برای جمعیت میکروبی تا ۷۸۱ متر برای کربنات کلسیم معادل متغیر است. دامنه تأثیر ویژگی‌های مختلف خاک، تابعی از مقیاس مورد مطالعه و فاصله نمونه‌برداری و موقعیت سیمای اراضی می‌باشد. محاسبات نشان داد که جمعیت میکروبی از وابستگی مکانی متوسطی برخوردار است و مؤید این مطلب است که این ویژگی وابسته به فاکتور مدیریتی منطقه بوده و فاکتور ذاتی (مواد مادری و

جدول ۳- نیم تغییرنماهای بهترین مدل برازش داده شده به ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

The best fitted model to variograms of studied soil properties

مجموع مربعات باقی مانده	ضریب همبستگی	نسبت اثر قطعه‌ای به سقف (%)	دامنه تأثیر (متر) Range of parameter/ m	سقف Sill	اثر قطعه- ای Nugget effect	مدل Model
Reduced sums of squares	Correlation coefficient	Ratio of nugget effect to sill/ %				
319	0.70	49.90	6110	142.7	71.3	کروی Spherical Microbial community
1.28×10^{-6}	0.99	22.17	852	0.074	0.016	کروی Spherical Organic carbon
116	0.99	2.35	781	340.1	8.0	کروی Spherical Carbonate calcium equivalent

جدول ۴- اعتبارسنجی روش‌های میان‌یابی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

Table 4- Validation of interpolating methods of studied soil properties

میانگین خطای اریب Mean biased error	میانگین خطای مطلق Mean absolute error	روش میان‌یابی Interpolating method
0.21	6.8	کریجینگ Kriging Microbial community
0.3	7.2	وزن‌دهی معکوس فاصله Inverse distance weighting
0.008	0.14	کریجینگ Kriging کربن آلی Organic carbon
0.02	0.15	وزن‌دهی معکوس فاصله Inverse distance weighting
0.14	8.05	کریجینگ Kriging کربنات کلسیم معادل Carbonate calcium equivalent
-0.34	7.95	وزن‌دهی معکوس فاصله Inverse distance weighting

جدول ۵- مساحت پهنه‌های ویژگی‌های خاک مورد مطالعه بر حسب هکتار

Table 5- Area extension of studied soil properties (ha)

کلاس پنج Class 5	کلاس چهار Class 4	کلاس سه Class 3	کلاس دو Class 2	کلاس یک Class 1
20.02	49.25	74.61	94.3	124.4
40.97	36.43	52.45	119.71	113.1
56.78	50.60	72.88	94.58	87.82

تقسیم‌بندی کلاس‌های هر خصوصیت خاک در شکل ۴ نشان داده شده است

Classification of each property is shown in Figure 4

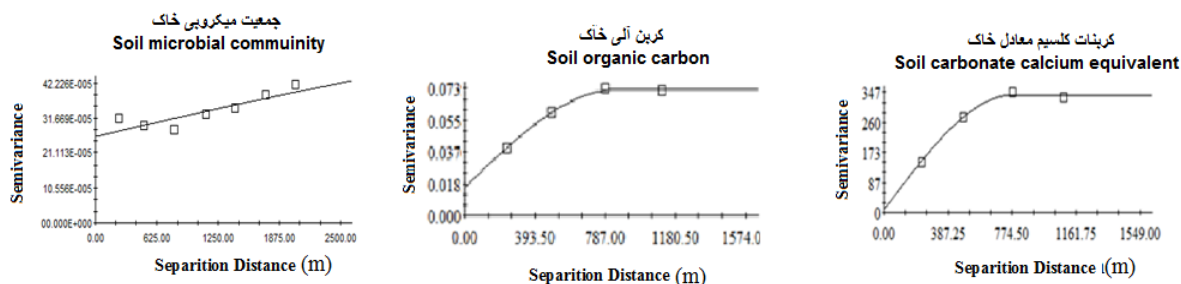
اعتبارسنجی روش‌های میان‌یابی کریجینگ و وزن‌دهی

معکوس فاصله

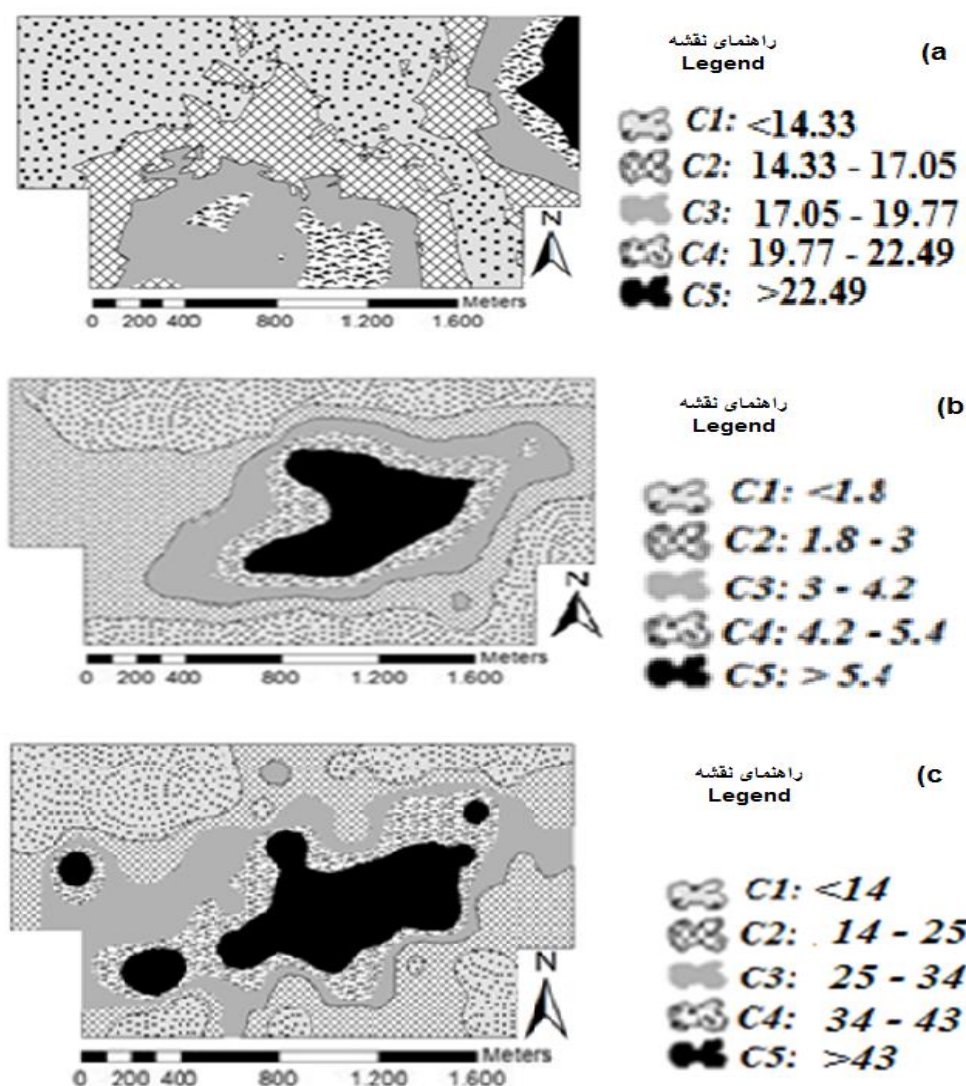
اعتبارسنجی هر دو روش میان‌یابی برای ویژگی‌های مورد مطالعه در جدول ۴ خلاصه شده است. بر اساس آماره‌های اعتبارسنجی، روش کریجینگ برای جمعیت میکروبی و کربن آلی و روش وزن‌دهی معکوس فاصله برای کربنات کلسیم معادل از دقت و اعتبار قابل

قبولی برخوردار است. شهبازی و همکاران (۲۰) در تحقیقی که بر روی تأثیر کاربری‌های باغ، مرتع و زراعت بر روی ویژگی‌های بیولوژیک در میرآباد نقره انجام دادند از دو تخمین‌گر کریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله استفاده کردند که برای آنزیم اوره‌آز و کربن زیست‌توده میکروبی روش کریجینگ بهتر بوده است. بعد از به دست آوردن بهترین روش میان‌یابی و پارامترهای زمین‌آمار، نقشه منطقه به دست آمد. فروغی‌فر و همکاران (۹) نیز از روش کریجینگ برای

میان‌یابی تأثیر واحدهای لندفرم بر توزیع فراوانی و تغییرات مکانی ویژگی‌های بیولوژیکی خاک در دشت تبریز استفاده کردند.



شکل ۳- مدل‌های کروی برازش داده شده به ویژگی‌های مورد مطالعه خاک
Figure 3- Spherical model variogram fitted to studied soil properties



شکل ۴- نقشه‌های زمین مرجع تهیه شده برای ویژگی‌های مورد مطالعه در منطقه میرآباد (پراکنش مکانی a: جمعیت میکروبی خاک؛ b: کربن آلی خاک؛ c: کربنات کلسیم معادل خاک)

Figure 4- Created georeferenced thematic maps for studied soil properties in Mirabad region
(Spatial distribution of a: soil microbial community; b: soil organic carbon; c: soil carbonate calcium equivalent)

کربن آلی به خاک جمعیت میکروبی و متعاقباً میزان زیست توده میکروبی افزایش می یابد و این امر باعث بهبود کیفیت خاک خواهد شد. براساس آماره های اعتبارسنجی، بهترین روش میان یابی برای میان یابی نقاط نمونه برداری نشده برای جمعیت میکروبی و کربن آلی در منطقه روش کریجینگ می باشد.

سیاسگزاری

بدین وسیله از استادان و مسئولان ارجمند دانشکده و کارشناسان آزمایشگاه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز به دلیل همکاری و مساعدت های لازم در انجام آزمایش ها تشکر می شود.

بعد از انجام تحلیل های زمین آماری و برآزش بهترین مدل بر اساس ضریب همبستگی و مجموع مربعات باقیمانده و همچنین ارزیابی بهترین روش میان یابی براساس آماره های اعتبارسنجی، پارامترهای زمین آماری وارد محیط GIS شده و نقشه پراکنش برای ویژگی های خاک تهیه گردید. برای درصد کربنات کلسیم معادل خاک نقشه منطقه بر اساس روش وزن دهی معکوس فاصله و برای سایر ویژگی های براساس روش کریجینگ می باشد (شکل ۴). مساحت هر یک از پهنه های ویژگی های خاک مورد مطالعه بر حسب هکتار در جدول ۵ ارائه شده است.

نتیجه گیری کلی

با توجه به نتایج به دست آمده ارتباط مستقیم بین کربن آلی و جمعیت میکروبی خاک گزارش می شود به طوری که با افزایش میزان

منابع

- 1- Aliasgharzar N. 2011. Methods in Soil Biology. University of Tabriz, Iran. (Translated to Persian).
- 2- Aşkın T., and Kizilkaya R. 2006. Assessing spatial variability of soil enzyme activities in pasture topsoils using geostatistics. *European Journal of Soil Biology*, 42: 230-237.
- 3- Ayoubi S., Mohammadzamani S., and Khormali F. 2007. Prediction total nitrogen by organic matter content using some geostatistic approaches in part of farm land of Sorkhankalateh, Golestan Province. *Journal of Agricultural Science and Natural Resources*, 14: 78-87. (in Persian with English abstract)
- 4- Bardgett R.D., and Cook R. 1998. Functional aspects of soil animal diversity in agricultural grasslands. *Applied Soil Ecology*, 10: 263-276.
- 5- Brejda J.J., Moorma T.B., Smith J.L., Karlen D.L., Allen D.L., and Dao T.H. 2000. Distribution and variability of surface soil properties at a regional scale. *Journal of American Soil Science Society*, 64: 974-982.
- 6- Burgess T.M., and Webster R. 1980. Optimal interpolation and is arithmetic mapping of soil properties: I. The variogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science*, 31: 315-331.
- 7- Einnax J.W., and Soldt U. 1999. Geostatistical and multivariate statistical methods for the assessment of polluted soils-merits and limitations. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 46: 79-91.
- 8- Fliebbach A., and Mader P. 2000. Microbial biomass and size-density fractions differ between soils of organic and conventional agricultural systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 32: 757-768.
- 9- Froughifar H., Jafarzadeh A.A., Torabi Gelsefidi H., and Aliasgharzar N. 2012. Effect of different landforms on spatial variability and frequency distribution of soil biological properties in Tabriz Plain. *Water and Soil Science-University of Tabriz*, 4: 35-52. (in Persian with English abstract)
- 10- Gao Y., Mao L., Miao C.Y., Zhou P., Cao J.J., Zhi Y.E., and Shi W.J. 2010. Spatial characteristics of soil enzyme activities and microbial community structure under different land uses in Chongming Island, China: Geostatistical modelling and PCR-RAPD method. *Science of the Total Environment*, 408: 3251-3260.
- 11- Islam K.R., and Weil R.R. 2000. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. *Journal of Soil and Water Conservation*, 55: 69-78.
- 12- Johnson N.C., Zak D.R., Tilman D., and Pflieger F.L. 1991. Dynamics of vesicular-arbuscular mycorrhizae during old field succession. *Oecologia*, 86: 349-358.
- 13- Mahmoodi S., and Hakimian M. 1998. Fundamentals of Soil Science. Tehran University Publication. (Translated to Persian)
- 14- McGrath D., and Zhang C. 2003. Spatial distribution of soil organic carbon concentrations in grassland of Ireland. *Applied Geochemistry*, 18: 1629-1639.
- 15- McKenzie N.J., Grundy M.J., Webster R., and Ringrose -Voase A.J. 2008. Guidelines for Surveying Soil and Land Resources. CSIRO Publishing, Australia, 576.
- 16- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon and organic matter. In: Page, A. L et al. (Eds.), *Methods of*

- Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Methods. Agronomy Monographs ASA and SSSA, Madison, USA. 539-580.
- 17- Paul E.A., and Clark F.E. 1996. Soil Microbiology and Biochemistry, Academic Press, San Diego, CA. 340.
- 18- Plante A.F. 2007. Soil biogeochemical cycling of inorganic nutrients and metals. In: E.A. Paul (ed.) Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry. Academic Press, Oxford. 389-432.
- 19- Quine T.A., and Zhang Y. 2002. An investigation of spatial variation in soil erosion, soil properties and crop production within an agricultural field in Devon, U.K. Journal of Soil and Water Conservation, 57: 50-60.
- 20- Shahbazi F., Aliasgharzad N., Ebrahimzad S. A., and Najafi N. 2013 Geostatistical analysis for predicting soil biological maps under different scenarios of land use. European Journal of Soil Biology, 55: 20-27.
- 21- Sheklabadi M., Khademi H., Karimian Eghbal M., and Nourbakhsh F. 2007. Effect of climate and long term interdicton on some soil biological quality indices in central Zagros. Journal of Water and Soil Science-Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 11(41): 103-115. (in Persian)
- 22- Soil Conservation Service. 1992. Soil Survey Laboratory Methods and Procedures for Collecting Soil Sample. USDA-SCS. Soil Survey. Invest. Ret. No. 2. U. S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- 23- Van Vliet P.C.J., Van der Stelt B., Rietberg P.I., and de Goede R.G.M. 2007. Effects of organic matter content on earthworms and nitrogen mineralization in grassland soils. European Journal of Soil Biology, 43: S222-S229.
- 24- Zhang R., Shouse P.J., Yates S.R., and Kravchenko A. 1997. Application of Geostatistics in Soil Science. Trends in Soil Science, 2: 95-104.



Effect of Land Uses on Soil Microbial Community and Spatial Variability in Mirabad Lands, Naghadeh

Sh. Kaboudi¹- F. Shahbazi^{2*}- N. Aliasgharzad³- N. Najafi⁴- N. Davatgar⁵

Received: 12-05-2014

Accepted: 31-10-2017

Introduction: Understanding soil biology and ecology is increasingly important for renewing and sustainability of ecosystems. In all ecosystems, soil microbes play an important role in organic matter turnover, nutrient cycling and availability of nutrients for plants. Different scenarios of land use may affect soil biological properties. Advanced information technologies in modern software tools such as spatial geostatistics and geographical information system (GIS) enable the integration of large and complex databases, models, tools and techniques, and are proposed to improve the process of soil quality and sustainability. Spatial distribution of chemical and biological properties under three scenarios of land use was assessed.

Materials and Methods: This study was carried out in Mirabad area located in the western part of Souldoz plain surrounded by Urmieh, Miandoab, Piranshahr and Naghadeh cities in the west Azerbaijan province with latitude and longitude of 36°59'N and 45°18'E, respectively. The altitude varies from 1310 to 1345 with average of 1325 m above sea level. The monthly average temperature ranges from -1.4 °C in January to 24.6 °C in July and monthly precipitation ranges from 0.9 mm in July to 106.6 mm in March. Apple orchard, crop production field and rich pasture are three selected scenarios in this research work. Soil samples were systematically collected at 65 sampling points (0-30 cm) on mid July 2010. Soil chemical and biological properties i.e. microbial community, organic carbon and calcium carbonate equivalent were determined. The ArcGIS Geostatistical Analyst tool was applied for assessing and mapping the spatial variability of measured properties. The experimental design was randomized complete blocks design (RCBD) with five replications. Two widely applied methods i.e. Kriging and Inverse Distance Weighted (IDW) were employed for interpolation. According to the ratio of nugget variance to sill of the best variogram model three following spatial dependence conditions for the soil properties can be considered: (I) if this ratio is less than 25%, then the variable has strong spatial dependence; (II) if the ratio is between 25% and 75%, the variable has moderate spatial dependence; and (III) otherwise, the variable has weak spatial dependence. Data were also integrated with GIS for creating digital soil biological maps after testing analysis and interpolating the mentioned properties.

Results and Discussion: Spherical model was the best isotropic model fitted to variograms of all examined properties. The value of statistics (R^2 and reduced sum of squares (RSS)) revealed that IDW method estimated calcium carbonate equivalent more reliably while organic carbon and microbial community was estimated more accurately by Kriging method. The minimum effective range (6110 m) was found for microbial community which had the strong spatial dependence [$(C_0/C_0+C) < 25$]. The highest amount of estimated microbial community was scattered in the north-east of study area. On contrary, organic carbon and calcium carbonate equivalent was mainly mapped in the center of study area mostly with land use of rich pasture. Land use change from pasture to crop production and apple orchard increases soil aeration and also decreases organic matter content. Therefore, it may be involved in climate change challenge. As soil management in particular at harvest stage influences other soil biological properties especially enzyme activities, assessing enzymes activity under different scenarios of land use is hence recommended.

Conclusion: The geostatistical results showed that the management practices may have relevantly effects on microbial community, but the statistical analysis revealed significant differences between pasture and two other land uses. The created maps were classified to five subdivisions, while for better explanation of land use effects on soil biological indices and their spatial variability, the digital maps must be classified to many subdivisions.

Keywords: Kriging, Soil microbial community, Spatial variability, Zoning

1, 2, 3 and 4- Graduated M.Sc. Student, Associate Professor, Professor and Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Respectively

(*- Corresponding Author Email: sheydaa.kaboodi@yahoo.com)

5- Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)



اثر ماده آلی بر توزیع شکل‌های شیمیایی کادمیم در خاک در محیط ریشه ذرت

فائزه لطفی^۱ - امیر فتوت^{۲*} - رضا خراسانی^۳ - مهدی بحرینی طوحان^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۳۱

چکیده

برای ارزیابی خطر آفرینی آلودگی فلزات سنگین در خاک، آگاهی از زیست‌فراهمی فلزات بسیار مهم است که خود به توزیع شکل‌های شیمیایی آن‌ها در خاک بستگی دارد. به منظور بررسی اثر ماده آلی (کود گاوی) و نحوه تأثیر فعالیت ریشه و ترشحات آن بر توزیع شکل‌های شیمیایی فلز کادمیم، آزمایشی به صورت گلخانه‌ای بر روی خاک آلوده به کادمیم در سیستم رایزوباکس انجام گرفت. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۲ سطح ماده آلی (حضور و عدم حضور ماده آلی) و ۳ ناحیه با فاصله از ریشه و با ۳ تکرار اجرا شد. به منظور تعیین شکل‌های شیمیایی کادمیم از روش عصاره‌گیری متوالی تسیر استفاده شد. نتایج نشان داد که افزودن ماده آلی به خاک بر تغییرات هیچ یک از شکل‌های شیمیایی کادمیم در خاک جز فرم زیست‌فراهم بطور معنی‌داری مؤثر نبوده است اما موجب افزایش معنی‌دار pH، CEC و مقدار کربن آلی در خاک شد. بنابراین می‌توان گفت کاهش معنی‌دار فرم زیست‌فراهم کادمیم در اثر افزودن ماده آلی به خاک به علت تغییر ویژگی‌های خاک بوده است. بر اساس نتایج، افزودن کود گاوی به خاک بیشترین تأثیر را بر فرم کربناتی کادمیم دارد. همچنین غلظت کادمیم در ریشه گیاه ذرت در شرایط حضور و عدم حضور ماده آلی بطور معنی‌داری بیشتر از اندام هوایی بوده است. این امر نشان می‌دهد که کادمیم تمایل بیشتری برای تجمع در ریشه گیاه در مقایسه با اندام هوایی داشته است.

واژه‌های کلیدی: جزءبندی، رایزوباکس، زیست‌فراهمی، کادمیم، مواد آلی

مقدمه

پنج جزء مختلف در نظر گرفتند که این شکل‌ها در خاک شامل محلول و قابل تبادل، پیوند یافته با کربنات‌های خاک، متصل به اکسیدهای آهن و منگنز، وابسته به مواد آلی خاک و باقیمانده در ساختمان شبکه‌ای کانی‌ها می‌باشند.

حرکت و سرنوشت فلزات سنگین در خاک بطور عمده به شکل و گونه فلز بستگی دارد (۳۴) که توزیع شکل‌های شیمیایی فلزات سنگین در خاک خود می‌تواند تحت تأثیر برخی فاکتورها از جمله pH خاک، مقدار ماده آلی، قدرت یونی محلول خاک، اکسیدهای آهن و منگنز و پتانسیل اکسیداسیون - احیا تغییر کند (۲۱). البته عوامل تأثیرگذار دیگری نیز مانند کربن آلی محلول، اسیدهای آلی و سایر ترشحات ریشه گیاهان (۱۷)، EC (۳۱)، بافت خاک و درصد رس (۱۲)، ظرفیت تبادل کاتیونی (۱۵) و مقدار کربنات کلسیم در خاک (۳۱) وجود دارند که موجب تغییر شکل‌های شیمیایی فلزات در محیط خاک می‌شود. افزودن ماده آلی به خاک موجب تغییر برخی ویژگی‌های خاک و در نتیجه باعث تغییر توزیع شکل‌های شیمیایی فلزات در خاک می‌شود. تأثیر مواد آلی بر فراهمی فلزات سنگین به ویژگی‌های طبیعی و ذاتی فلزات، نوع خاک و ویژگی‌های ماده آلی بخصوص درجه هومیکی شدن آن بستگی دارد. مواد آلی نقش حیاتی در کنترل

امروزه آلودگی خاک‌ها با فلزات سنگین در اثر فعالیت‌های انسانی یک مشکل و نگرانی جدی برای جوامع بشمار می‌آید (۱۶). تجمع فلزات سنگین از جمله کادمیم در خاک اثرات زیانباری به دنبال دارد، به عنوان مثال منجر به کاهش فعالیت میکروبی و تنوع زیستی، کاهش حاصلخیزی خاک، پایین آمدن عملکرد محصولات و آسیب رساندن به حیوانات و انسان‌ها از طریق زنجیره‌های غذایی می‌شود (۳۶). مقدار کل فلزات سنگین در خاک می‌تواند نشان دهنده گسترش آلودگی در محیط باشد اما شاخص صحیحی برای بیان سمیت آن برای گیاهان و سایر موجودات زنده نیست، بنابراین بهتر است شکل‌های شیمیایی فلزات سنگین در خاک‌ها بررسی شود (۳۱). برای ارزیابی خطر آفرینی آلودگی فلزات سنگین در خاک، آگاهی از زیست‌فراهمی فلز بسیار مهم است که خود به توزیع شکل‌های شیمیایی فلزات در خاک بستگی دارد (۲۷). تسیر و همکاران (۳۱) برای هر فلز

۱، ۲، ۳ و ۴ - به ترتیب فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، استاد، دانشیار و دانشجو دکتری، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(Email: afotovat@um.ac.ir)
* - نویسنده مسئول

کربن آلی خاک با استفاده از روش اکسیداسیون تر (والکلی و بلاک، ۱۳۹۴)، اسیدیته خاک در حالت گل اشباع و با استفاده از دستگاه pH متر و هدایت الکتریکی با استفاده از دستگاه هدایت سنج الکتریکی، در گل اشباع (پیچ و همکاران، ۱۹۸۲) و CEC نیز به روش چاپمن (۱۹۶۵) با استفاده از استات آمونیوم اندازه گیری شدند. به منظور تعیین غلظت کل کادمیم و همچنین تعیین شکل های شیمیایی آن به ترتیب از روش تیزآب سلطانی (۲۷) و روش عصاره گیری متوالی تسیر استفاده شد (۲۸). در نهایت غلظت کل فلز کادمیم و همچنین غلظت کادمیم موجود در هر یک از شکل های شیمیایی با دستگاه جذب اتمی اندازه گیری شد.

طراحی و ساخت ریزوباکس

به منظور مطالعه نحوه تأثیر فعالیت ریشه و ترشحات آن بر توزیع شکل های شیمیایی فلز کادمیم در ریزوسفر و مقایسه آن با توده خاک، کاشت دانه ذرت در ریزوباکس انجام شد که هر ریزوباکس شامل سه بخش بود: ناحیه مرکزی^۱ یا تحت تأثیر ریشه (۲۰ میلی متر)، ناحیه های نزدیک ریزوسفر^۲ (ناحیه حد وسط و متأثر از ترشحات ریشه) در دو طرف ناحیه مرکزی (۲۰ میلی متر) و ناحیه های غیر ریزوسفری یا توده خاک^۳ در دو طرف ناحیه حد وسط (۵۰ میلی متر).



شکل ۱- ریزوباکس مورد استفاده در این پژوهش
Figure 1- The rhizobox used for this study

اندازه ضخامت ناحیه های مختلف ریزوباکس که بر اساس نوع گیاه، سیستم ریشه و شرایط فصل رشد تعیین می گردد، نسبت به

تحرک فلزات سنگین در خاک دارند و می توانند فراهمی فلزات سنگین را از طریق تشکیل رسوب، جذب و یا تشکیل کمپلکس آلی-فلز کاهش بدهند (۲۱). در این میان استفاده از کودهای دامی موجب افزایش انباشت کادمیم در گیاهان می شود زیرا کودهای دامی بطور میانگین دارای ۰/۳ تا ۰/۸ میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک کادمیم هستند. به علاوه نیتروژن و اسیدهای آلی موجود در کودهای دامی موجب کاهش pH و افزایش تحرک کادمیم موجود در خاک می شود. اما از طرفی ترکیب های آلی غیرمحلول موجود در کود دامی می توانند با کادمیم پیوند برقرار کنند و در نتیجه فراهمی آن را برای گیاهان کاهش بدهند (۱۲). علاوه بر افزودن ماده آلی به خاک، ترشحات و تراوشات ریشه گیاهان نیز نقش مهمی بر تغییر شکل های شیمیایی فلزات بخصوص در محیط ریزوسفر دارد. ترشحات ریشه گیاهان شامل پروتون ها، اسیدهای آلی و آمینواسیدها می باشد که می تواند بر pH محلول خاک، حلالیت فلزات و همچنین مقدار کربن آلی محلول تأثیر گذار باشد. ترشح اسیدهای آلی توسط ریشه گیاهان و اسیدی شدن خاک در محیط ریزوسفر یکی از سازوکارهای افزایش حلالیت فلزات می باشد که متعاقباً موجب افزایش تجمع فلزات در گیاهان می شود (۱۶). بنابراین با توجه به اثرات قابل توجه ریزوسفر بر تغییر شکل های شیمیایی فلزات استفاده از ریزوباکس امکان مطالعه آسان تر و دقیق تر این بخش و بررسی اثرات مربوط به آن را فراهم می کند (۳۳). مطابق نظر یوسف و چایو (۳۸) استفاده از ریزوباکس، اطلاعات کمی و کیفی دقیقی پیرامون محدوده اثر ریزوسفر بر توزیع عناصر غذایی در خاک در اختیار قرار می دهد. آن ها همچنین بیان کردند که استفاده از ریزوباکس جهت مطالعه اثرات ویژگی های خاک، تیمارها، گونه گیاهی و فعالیت میکروبی بر توزیع عناصر غذایی در اطراف ریزوسفر مناسب می باشد. هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر کود گاوی اضافه شده به خاک بر تغییر شکل های شیمیایی کادمیم در خاک و در بخش های مختلف ریزوباکس می باشد.

مواد و روش ها

ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک

یک خاک آلوده به عنصر کادمیم از شهرستان زنجان (X: 268900، Y: 4057300) نمونه برداری و پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی متری عبور داده شد. برخی از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل نیتروژن کل به روش کلدال (برمنر و کنی، ۱۹۶۶)، پتاسیم قابل جذب خاک به روش استات آمونیوم، فسفر به روش السن (السن و واتاناب، ۱۹۵۷)، بافت خاک با روش هیدرومتری (بویوکوس، ۱۹۶۲) و با استفاده از محلول هگزا متا فسفات سدیم، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی کردن مواد خنثی شونده با اسید کلریدریک و تیتراسیون اسید اضافی با سود (پیچ و همکاران، ۱۹۸۲)،

۱- ناحیه R

۲- ناحیه NR

۳- ناحیه B

رایزوباکس یوسف و چاینو (۳۸) متفاوت است. ابعاد رایزوباکس ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب طول، ارتفاع و ضخامت می‌باشد. مطابق شکل ۱، به منظور جلوگیری از رشد ریشه به فضای اطراف ناحیه رایزوسفر از صفحات مشبک نایلونی با قطر منافذ ۲۵ میکرون (مش ۳۰۰) در ابعاد ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. بدنه رایزوباکس‌ها از جنس پلکسی‌گلاس تهیه شد و به منظور قرار دادن صفحات مشبک در رایزوباکس هم از یک چارچوب از جنس پلکسی‌گلاس استفاده شد. ۴ عدد صفحه نایلونی به شکلی در قاب ثابت گردیدند که اجازه عبور ریشه به فضای اطراف و همچنین اجازه عبور آب در فضای بین قاب و جداره را ندهند. به این ترتیب تبادلات گاز، آب و عناصر غذایی محلول فقط از قسمت صفحات نایلونی امکان‌پذیر خواهد بود.

آزمایش گلخانه‌ای

پس از ساخت رایزوباکس‌ها، خاک هوا خشک از الک ۲ میلی متری عبور داده شد و به مقدار لازم عناصر N (۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، P (۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، K (۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به خاک اضافه و با آن مخلوط گردید. تیمار ماده آلی شامل دو سطح صفر و ۱/۵ درصد ماده آلی بود که با مخلوط کردن ۱/۵ درصد (جرمی) کود گاوی با خاک اعمال شد. سپس بر اساس حجم رایزوباکس و همچنین وزن مخصوص ظاهری خاک، مقدار خاک مورد نیاز برای هر رایزوباکس محاسبه و در داخل هر کدام از نواحی باکس (R، NR و B) ریخته شد. بذر ذرت رقم سینگل گراس ۷۰۴ تهیه و پس از جوانه‌زنی هشت بذر انتخاب و در ناحیه مرکزی رایزوباکس کشت شد. چند روز پس از رشد گیاه، تعداد گیاهچه در هر رایزوباکس به ۴ عدد کاهش داده شد. در دوره رشد، آبیاری توسط آب

مقطر و از سطح رایزوباکس و به روش وزنی انجام شد. پس از گذشت ۷۵ روز از کاشت گیاه، رایزوباکس باز و خاک ناحیه‌های مختلف رایزوباکس که در دو طرف آن عینا تکرار شده بودند با یکدیگر مخلوط و به عنوان یک نمونه خاک در نظر گرفته شدند. نمونه‌های خاک قبل از انتقال به آزمایشگاه هواخشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. جهت انجام عصاره‌گیری متوالی، خاک هر کدام از ناحیه‌های رایزوباکس مخلوط و یک نمونه یک گرمی در سه تکرار وزن و در لوله‌های سانتریفوژ ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد. با استفاده از عصاره‌گیری متوالی به روش تسیر (۱۹۷۹) ۵ جزء فلز عصاره‌گیری شد. شکل قابل جذب فلز برای گیاه (زیست فراهم) نیز توسط محلول DTPA-TEA عصاره‌گیری شد. اندام هوایی و ریشه گیاه پس از جداسازی خاک با آب مقطر شستشو داده شدند. پس از خشک شدن، نمونه‌ها در داخل پاکت و سپس در داخل آون در دمای ۶۰ درجه به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد. نمونه‌های خشک شده در آون پس از توزین، آسیاب شده و در کوره الکتریکی مخصوص با دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس خاکستر شدند. هضم نمونه‌های گیاهی توسط روش هضم تر صورت گرفت (وسترن، ۱۹۹۰). غلظت فلز کادمیم موجود در تمام عصاره‌ها با دستگاه جذب اتمی (AAS) اندازه‌گیری شد. این آزمایش به صورت فاکتوریل با طرح پایه کاملاً تصادفی اجراء شد که دارای ۲ فاکتور ماده آلی (حضور و عدم حضور ماده آلی) و فاصله از ریشه (سه سطح ناحیه ریشه، ناحیه نزدیک ریشه و ناحیه غیر ریزوسفری یا توده خاک) می‌باشد. مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون LSD، در سطح احتمال ۵٪ و توسط نرم‌افزار آماری JMP 4.0.4 انجام گرفت.

جدول ۱- مراحل عصاره‌گیری متوالی تسیر

Table 1- Levels of sequential extraction of Tessier

فرم شیمیایی Fraction	عصاره‌گیر Extractant	شرایط عصاره‌گیری Extraction
Exchangeable (Ex)	8 ml MgCl ₂ (1M)	(HCl) pH=7, Shake (1h)
Carbonate (Car)	8 ml C ₂ H ₃ NaO ₂ (1M)	(CH ₃ COOH) pH=5, Shake (5h)
Oxide (Fe & Mn)	20 ml H ₃ NO.HCl (0.04M)	CH ₃ COOH (25%), Shake (6h, 96°C)
Organic Mater (OM)	3 ml HNO ₃ (0.02 M) + 5 ml H ₂ O ₂ (30%)	(HNO ₃) pH=2, Shake (2h, 85°C)
	3 ml H ₂ O ₂ (30%)	(HNO ₃) pH=2, Shake (3h, 85°C)
	5 ml C ₂ H ₇ NO ₂ (2.3M)	HNO ₃ (20%), Shake (30m)
Residual (Res)	7 ml HCl + 2.5 ml HNO ₃ + 0.5 Water	25°C (16h), 100°C (2h)

مطالعه ۷/۴۵ و آهک آن ۲۷/۵ درصد بود که با توجه به مقدار آهک موجود، خاک مورد مطالعه جزء خاک‌های آهکی بوده است. غلظت کل عنصر کادمیم در خاک مورد مطالعه قبل از کاشت برابر با ۶/۱۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. نحوه توزیع شکل‌های شیمیایی

نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در خاک مورد مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده است. pH خاک مورد

pH در این ناحیه R نسبت به نواحی دیگر پایین تر باشد (۳۵ و ۱۷). مواد آلی CEC بالایی دارند (۹) به همین دلیل افزودن ماده آلی به خاک سبب افزایش CEC شده است (۳۱). بالا بودن مقدار کربن آلی موجود در کود دامی (۲۹/۳ درصد) نیز سبب افزایش مقدار کربن آلی در همه بخش های رایزوباکس شده است (۲۱). افزایش مقدار CEC و کربن آلی در نتیجه افزودن ماده آلی به خاک توسط بقای و همکاران (۶) نیز گزارش شده است. روند تغییرات CEC و کربن آلی با افزایش فاصله از ریشه گیاه کاملاً با هم مطابقت دارد که این امر نشان می دهد که با افزایش مقدار کربن آلی در خاک مقدار CEC نیز افزایش می یابد.

شکل تبادلی و محلول کادمیم

افزایش دادن ماده آلی به خاک تأثیر معنی داری بر شکل تبادلی کادمیم در خاک نداشته است (جدول ۵). با افزودن ماده آلی به خاک، pH افزایش می یابد و از آن جایی که pH و فرم تبادلی رابطه منفی دارند بنابراین افزایش ماده آلی منجر به کاهش اندک فرم تبادلی کادمیم در خاک شد (۳۱).

کادمیم قبل از کشت در جدول شماره (۳) آمده است. بر اساس نتایج بدست آمده شکل کربناته، تبادلی و متصل به اکسیدهای آهن و منگنز به ترتیب بیشترین غلظت کادمیم را به خود اختصاص داده اند. کادمیم موجود در بخش های باقیمانده و وابسته به مواد آلی درصد کمی در مقایسه با سایر شکل های شیمیایی کادمیم دارند.

افزودن ماده آلی به خاک سبب افزایش معنی دار pH، CEC و کربن آلی در هر سه ناحیه از رایزوباکس شده است (جدول ۴). ممکن است بالا بودن pH کود دامی اضافه شده به خاک، علت افزایش pH باشد. در برخی از پژوهش ها، افزودن ماده آلی به خاک سبب کاهش pH و در برخی دیگر سبب افزایش pH شده است که علت آن می تواند ماهیت متفاوت مواد آلی اضافه شده به خاک باشد (۱۲). به عنوان مثال عظیم زاده و همکاران (۵) بیان کردند که افزودن کود سبز به خاک باعث کاهش pH و افزایش کربن آلی محلول شده است. این در حالی است که نارول و سینگ (۲۱) و والکر و همکاران (۳۱) بیان کردند بکار بردن کود گاوی در خاک سبب افزایش pH خاک می شود. روند تغییرات pH با فاصله از رایزوسفر به صورت افزایشی بوده که در بیان علت آن می توان گفت ترشحات ریشه گیاه مانند اسیدهای آلی و همچنین بالا بودن مقدار فعالیت و تنفس ریزجانداران و در نتیجه تولید دی اکسید کربن بیشتر در محیط رایزوسفر، موجب می شود که

جدول ۲- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه، قبل از کشت گیاه

Table 2- Physicochemical properties of studied soil, before planted

بافت (Texture)	Sandy Clay Loam
pH	7.45
هدایت الکتریکی (EC) (dS m ⁻¹)	3
ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) (cmol _c kg ⁻¹)	35.4
فسفر (Phosphorus) (mg kg ⁻¹)	11.45
پتاسیم (Potassium) (mg kg ⁻¹)	245.3
نیترژن کل (Total nitrogen) (mg kg ⁻¹)	724.5
آهک (درصد) (Calcium carbonate)	27.5
کربن آلی (درصد) (Organic carbon)	0.56
غلظت کادمیم کل (Total cadmium) (mg kg ⁻¹)	145
غلظت کادمیم قابل عصاره گیری با DTPA (DTPA extractable cadmium) (mg kg ⁻¹)	3

جدول ۳- شکل های شیمیایی کادمیم در خاک مورد مطالعه قبل از کشت

Table 3- Chemical forms of cadmium in studied soil before planting

باقیمانده Residual	وابسته به مواد آلی Organic mater	متصل به اکسیدهای آهن و منگنز Fe & Mn oxids	متصل به کربنات ها Carbonate	قابل تبادل Exchangable
0.417	1.140	1.419	2.421	1.717
6.81	2.29	23.20	39.60	28.08

جدول ۴- مقادیر pH، CEC و کربن آلی در نواحی مختلف رایزوباکس پس از کشت گیاه

Table 4- Soil pH, CEC and organic carbon in different rhizobox zones, after planting

Treatment تیمار	Zone ناحیه	pH	CEC (cmolc kg ⁻¹)	OC(%)
Without organic mater بدون ماده آلی	Rhizosphere رایزوسفر	7.68 ^b	35.38 ^b	1.15 ^c
	Close to Rhizosphere نزدیک رایزوسفر	7.70 ^b	30.53 ^b	1.15 ^c
	Bulk soil توده خاک	7.71 ^b	33.67 ^b	1.16 ^c
With organic mater با ماده آلی	Rhizosphere رایزوسفر	7.76 ^{ab}	40.51 ^b	1.49 ^{ab}
	Close to Rhizosphere نزدیک رایزوسفر	7.77 ^{ab}	43.60 ^a	1.39 ^b
	Bulk soil توده خاک	7.92 ^a	37.99 ^b	1.54 ^a

اعداد دارای حروف مشترک در سطح احتمال ۵٪ دارای اختلاف معنی‌دار نمی‌باشند

Numbers followed by the same letter are not significantly different (P<0.05)

به مقدار کم افزایش یافت (جدول ۵). این امر می‌تواند به علت تأثیر ماده آلی بر افزایش pH باشد. وانگ و همکاران (۳۱) در رابطه با تأثیر pH بر شکل کربناتی بیان کردند که افزایش pH باعث می‌شود که یون‌های فلزی براحتی با کربنات‌ها پیوند برقرار کنند، بنابراین افزایش pH منجر به افزایش فرم کربناتی فلزات می‌شود. والکر و همکاران (۳۱) بیان کردند کود دامی فرم کربناتی سرب را افزایش داده است. آن‌ها علت این امر را تشکیل کربنات‌های نامحلول توسط دی‌اکسید کربن تولید شده طی فرآیند معدنی شدن مواد آلی بیان کردند. غلظت کادمیم کربناتی در ناحیه B نسبت به ناحیه R بیشتر است که علت آن بالا بودن pH توده خاک نسبت به ناحیه رایزوسفری است (۳۱)، همچنین می‌توان گفت ترشح اسیدهای آلی توسط ریشه در ناحیه رایزوسفری باعث انحلال ترکیبات کربناتی و کاهش شکل کربناتی کادمیم در این بخش می‌شود. در رابطه با بالا بودن مقدار کادمیم کربناتی در ناحیه NR نسبت به ناحیه B می‌توان علت را افزایش گاز دی‌اکسید کربن ناشی از تنفس ریشه و ریزجاندانان در این ناحیه نسبت به توده خاک دانست. اگرچه این عامل می‌تواند باعث افزایش فرم کربناتی کادمیم در ناحیه رایزوسفر شود اما ترشح اسیدهای آلی توسط ریشه مانع آن می‌گردد.

بخش اکسیدی کادمیم

فرم کادمیم متصل به اکسیدهای آهن و منگنز در شرایط حضور و عدم حضور ماده آلی بیشترین درصد را پس از شکل‌های کربناتی و تبدالی به خود اختصاص داده است. اضافه کردن ماده آلی به خاک بر فرم اکسیدی کادمیم در خاک اثر معنی‌داری نداشت (جدول ۵) زیرا موجب افزایش کادمیم اکسیدی در بخش‌های رایزوسفر و نزدیک رایزوسفر و کاهش آن در ناحیه توده خاک شده است. در تیمارهای

همچنین افزودن ماده آلی به خاک که خود CEC بالایی دارد به عنوان رقیب برای کلوییدهای خاک محسوب می‌شود که می‌تواند یون‌های کادمیم را جذب کرده و باعث کاهش کادمیم قابل تبادل در خاک شود (۹). روند تغییرات فرم تبدالی کادمیم با افزایش فاصله از ریشه گیاه به عوامل مختلفی از جمله مقدار جذب گیاه، ترشحات ریشه و pH بستگی دارد (۵). در ناحیه رایزوسفر ترشحات ریشه باعث کاهش pH شده و از آنجایی که pH و شکل تبدالی کادمیم با هم رابطه منفی دارند در نتیجه سبب افزایش شکل تبدالی کادمیم می‌شود. از طرفی ریشه گیاه از طریق ترشحات خود باعث افزایش DOC شده که خود با کادمیم تبدالی رابطه مستقیم دارد (۱۷). بنابراین با کاهش pH و افزایش DOC کادمیم تبدالی در رایزوسفر افزایش می‌یابد اما بطور همزمان جذب کادمیم توسط ریشه، باعث کاهش شکل تبدالی کادمیم در ناحیه R می‌شود (۲۷). در ناحیه NR فرم تبدالی کادمیم تحت تأثیر ترشحات ریشه است اما چون جذب توسط گیاه از این ناحیه اتفاق نمی‌افتد بنابراین غلظت کادمیم تبدالی در ناحیه NR بیشتر از سایر نواحی است. ناحیه B که دورترین قسمت از ریشه گیاه می‌باشد به دلیل تأثیر کم از ترشحات ریشه و عدم جذب توسط گیاه از این ناحیه، کمترین غلظت کادمیم تبدالی را نشان داد (۳).

بخش کربناتی کادمیم

فرم کربناتی کادمیم در شرایط حضور و عدم حضور ماده آلی بیشترین درصد را نسبت به سایر شکل‌های شیمیایی به خود اختصاص داده است که بالا بودن مقدار کربنات کلسیم (۲۷/۵ درصد) در خاک می‌تواند علت آن باشد. افزودن ماده آلی به خاک بر فرم کربناتی کادمیم در خاک اثر معنی‌داری نداشت و تنها کادمیم کربناتی

بخش باقیمانده کادمیم

شکل باقیمانده کادمیم درصد نسبتاً کمی از غلظت این فلز را تشکیل داده است و اضافه کردن ماده آلی به خاک اثر معنی‌داری بر این شکل نداشته است (جدول ۵). نارول و سینگ (۲۱) نیز در رابطه با تأثیر مواد آلی بر شکل‌های شیمیایی فلزات بیان کردند که فرم باقیمانده کادمیم به مقدار کم تحت تأثیر افزودن مواد آلی قرار می‌گیرد. در حالی که وانگ و همکاران (۳۳) بیان کردند که ماده آلی و شکل باقیمانده دارای همبستگی منفی می‌باشند. آن‌ها بیان کردند که این امر مربوط به ترشحات و متابولیت‌های آزاد شده توسط ریشه گیاهان و ریزجانداران می‌شود که این مواد آلی می‌توانند فلزات سنگین را از فرم پیوندهای قوی به فرم پیوندهای ضعیف تبدیل کنند و در نهایت سبب کاهش گونه باقیمانده فلز در خاک می‌شوند. در برخی مطالعات نیز بیان شده است که افزودن ماده آلی به خاک موجب افزایش غلظت شکل باقیمانده فلزات از جمله کادمیم می‌شود (۳۰ و ۲۱). روند تغییرات فرم باقیمانده کادمیم با فاصله از ریشه گیاه معنی‌دار نشده است. ممکن است علت این امر پایداری فرم باقیمانده کادمیم و تأثیرپذیری کم آن نسبت به تغییرات محیط خاک باشد.

بخش زیست فراهم کادمیم

بخش زیست فراهم کادمیم در نتیجه افزودن ماده آلی به خاک بطور معنی‌داری کاهش یافته است (جدول ۵). افزودن ماده آلی به خاک باعث می‌شود که کادمیم با مواد و ترکیب‌های آلی غیر محلول پیوند برقرار کند و در نتیجه مقدار زیست‌فراهمی آن کاهش یابد (۱۲). از طرفی با افزودن ماده آلی به خاک غلظت کادمیم در گیاه نیز افزایش نشان داد، بنابراین می‌توان گفت افزایش مقدار جذب کادمیم توسط گیاه باعث کاهش فرم زیست‌فراهم آن پس از افزودن ماده آلی به خاک شده است. والکر و همکاران (۳۱) نیز بیان کردند که کود دامی غلظت فلزات قابل استخراج با DTPA را کاهش می‌دهد. عظیم‌زاده و همکاران (۵) در پژوهش خود درباره تأثیر کود سبز بر شکل‌های شیمیایی فلزات بیان کردند که افزودن ماده آلی به خاک موجب افزایش فرم زیست فراهم فلزات شده است که علت آن را تشکیل کمپلکس با ترکیب‌های آلی محلول دانسته‌اند. در حقیقت می‌توان گفت هر چه مقدار حلالیت یک فلز بیشتر باشد زیست‌فراهمی آن نیز بیشتر است، بنابراین نوع ماده آلی و مقدار ترکیب‌های محلول آن نقش مهمی در فراهمی فلزات برای گیاهان دارد (۳۵). روند تغییرات شکل زیست‌فراهم کادمیم با افزایش فاصله از ریشه معنی‌دار نشده است که علت آن فرایند جذب شکل‌های با قابلیت جذب بالا توسط ریشه گیاه می‌باشد (۵).

فرم زیست‌فراهم کادمیم بیشترین همبستگی را با فرم تبدالی (۷۰٪) و سپس با مجموع شکل‌های تبدالی و وابسته به ماده آلی

بدون ماده آلی، با افزایش فاصله از ریشه گیاه مقدار کادمیم اکسیدی نیز افزایش یافته است. عظیم‌زاده و همکاران (۴) علت افزایش فرم اکسیدی با افزایش فاصله از ریشه را تأثیر ترشحات ریشه بیان کردند. وانگ و همکاران (۳۳) بیان کردند که افزایش pH موجب می‌شود که یون‌های فلزی بتوانند به راحتی با اکسیدهای آهن و منگنز پیوند برقرار کنند. در تیمارهای حاوی ماده آلی، مقدار کادمیم اکسیدی در ناحیه NR نسبت به نواحی دیگر بیشتر است. وانگ و همکاران (۳۲) نیز بالا بودن مقدار کادمیم اکسیدی در ناحیه نزدیک ریزوسفر نسبت به نواحی دیگر را گزارش کردند. آن‌ها بیان کردند افزایش فرم اکسیدی در ناحیه نزدیک ریزوسفر ممکن است به علت فعالیت ریزجانداران باشد. چون میسلیم‌های قارچ‌ها می‌توانند پوشش نایلونی بین بخش‌های R و NR را سوراخ کنند و موجب اکسید مواد آلی شوند که این سازوکار منجر به افزایش فرم اکسیدی فلزات می‌شود. نارول و سینگ (۲۱) نیز در پژوهش خود درباره اثر مواد آلی بر تغییر شکل‌های شیمیایی بیان کردند که فرم اکسیدی کادمیم پس از شکل تبدالی بیشترین مقدار (۳۲٪) را دارا می‌باشد. آن‌ها بیان کردند که افزودن کود گاوی به خاک موجب کاهش کادمیم تبدالی و افزایش کادمیم متصل به اکسیدهای آهن و منگنز می‌شود.

بخش وابسته به مواد آلی کادمیم

فرم ماده آلی کادمیم تنها درصد کمی (حدود ۲/۵ درصد) از شکل‌های شیمیایی این فلز را به خود اختصاص داده است که ممکن است به علت پایین بودن سطح مواد آلی در خاک مورد مطالعه باشد (۲۴)، حتی افزودن ماده آلی به خاک نیز نتوانسته است این مقدار را افزایش دهد. اضافه کردن ماده آلی به خاک موجب کاهش اندک فرم ماده آلی کادمیم در بخش‌های R و NR شده اما در ناحیه توده خاک عکس آن اتفاق افتاده است (جدول ۵) (۳۱). بنابراین ماده آلی در خاک مورد مطالعه نتوانسته است اثر معنی‌داری بر شکل آلی کادمیم داشته باشد. نارول و سینگ (۲۱) نیز بیان کردند که فرم وابسته به ماده آلی کادمیم به مقدار کم تحت تأثیر افزودن ماده آلی قرار گرفته است و علیرغم وجود مقدار زیاد کربن آلی در خاک و افزودن ماده آلی به خاک، تنها بخش کمی از کادمیم با مواد آلی پیوند برقرار کرده است. این امر نشان می‌دهد که کادمیم کمپلکس‌های ضعیفی با مواد آلی تشکیل می‌دهد. روند تغییرات فرم آلی کادمیم با افزایش فاصله از ریزوسفر به صورت افزایشی بوده است اما وانگ و همکاران (۳۲) در پژوهش خود گزارش کردند که فرم آلی کادمیم در ناحیه نزدیک ریزوسفر نسبت به نواحی دیگر بیشتر است و کمترین غلظت آن مربوط به ناحیه ریزوسفر می‌باشد. آن‌ها علت این امر را اکسید شدن مواد آلی توسط ریزجانداران دانسته‌اند که منجر به کاهش فرم آلی کادمیم و افزایش شکل اکسیدی آن می‌شود.

(۶۷٪) نشان داد. این امر نشان می‌دهد که بخش فراهم کادمیم برای گیاهان بیشتر توسط شکل‌های تبادل و وابسته به ماده آلی تأمین شده است. عظیم‌زاده و همکاران (۴) نیز در بررسی خود بر روی تغییر شکل‌های شیمیایی روی با فاصله از ریزوسفر بیان کردند که فرم زیست‌فراهم روی با شکل‌های تبدیلی و وابسته به ماده آلی دارای همبستگی مثبت است.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل ماده آلی و فاصله از ریشه بر شکل‌های شیمیایی کادمیم در خاک مورد مطالعه
Table 5- Mean comparison of the effect of organic matter and distance from root on chemical forms of cadmium in studied soil

Treatment تیمار	Zone ناحیه	Cd-Ex	Cd-Car	Cd-Ox	Cd-OM	Cd-Res	Cd-DTPA
بدون ماده آلی Without organic mater	Rhizosphere ریزوسفر	1.72 ^{ns}	2.14 ^{ns}	1.28 ^{ns}	0.15 ^{ns}	0.41 ^{ns}	1.92 ^b
	Close to ریزوسفر Rhizosphere	1.73 ^{ns}	2.40 ^{ns}	1.42 ^{ns}	0.15 ^{ns}	0.47 ^{ns}	1.92 ^b
	Bulk soil توده خاک	1.71 ^{ns}	2.27 ^{ns}	1.51 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.45 ^{ns}	1.99 ^b
با ماده آلی With organic mater	Rhizosphere ریزوسفر	1.56 ^{ns}	2.45 ^{ns}	1.47 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.42 ^{ns}	1.63 ^a
	Close to ریزوسفر Rhizosphere	1.59 ^{ns}	2.58 ^{ns}	1.50 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.36 ^{ns}	1.57 ^a
	Bulk soil توده خاک	1.62 ^{ns}	2.48 ^{ns}	1.43 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.39 ^{ns}	1.55 ^a

اعداد دارای حروف مشترک در سطح احتمال ۵٪ دارای اختلاف معنی‌دار نمی‌باشند

Numbers followed by the same letter are not significantly different ($P < 0.05$)

^{ns} نشانه عدم وجود تفاوت آماری معنی‌دار می‌باشد

^{ns}: not significantly different

نتایج تجزیه گیاه

غلظت کادمیم در ریشه و اندام‌هوایی گیاه ذرت و همچنین غلظت آن در کل گیاه در شکل (۲) نشان داده شده است. براساس نتایج بدست‌آمده، افزودن ماده آلی به خاک موجب افزایش غلظت کادمیم در ریشه و اندام‌هوایی گیاه ذرت شده است، اما این افزایش معنی‌دار نبوده است. از آنجایی‌که اضافه کردن ماده آلی به خاک نتوانسته است باعث افزایش معنی‌دار غلظت کادمیم در گیاه بشود، بنابراین می‌توان گفت که ممکن است این امر به علت پایین بودن مقدار ترکیب‌های آلی محلول در کود دامی استفاده شده باشد. کیم و همکاران (۱۶) بیان کردند که جذب کادمیم توسط گیاه به شدت به غلظت کادمیم در فاز محلول بستگی دارد تا به غلظت کل آن در خاک. بنابراین احتمالاً با افزایش مقدار کربن آلی محلول و کادمیم محلول، غلظت کادمیم در گیاه نیز افزایش یافته است. گرانت و همکاران (۱۲) نیز بیان کردند که افزودن مواد اصلاح‌کننده به خاک مانند کودهای دامی موجب افزایش تجمع کادمیم در محصولات گیاهی شده است. آن‌ها بیان کردند افزایش تجمع کادمیم در گیاهان در نتیجه استفاده از کودهای دامی ممکن است به علت وجود کادمیم در کودهای دامی باشد زیرا این کودها بطور میانگین ۰/۳ تا ۰/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک

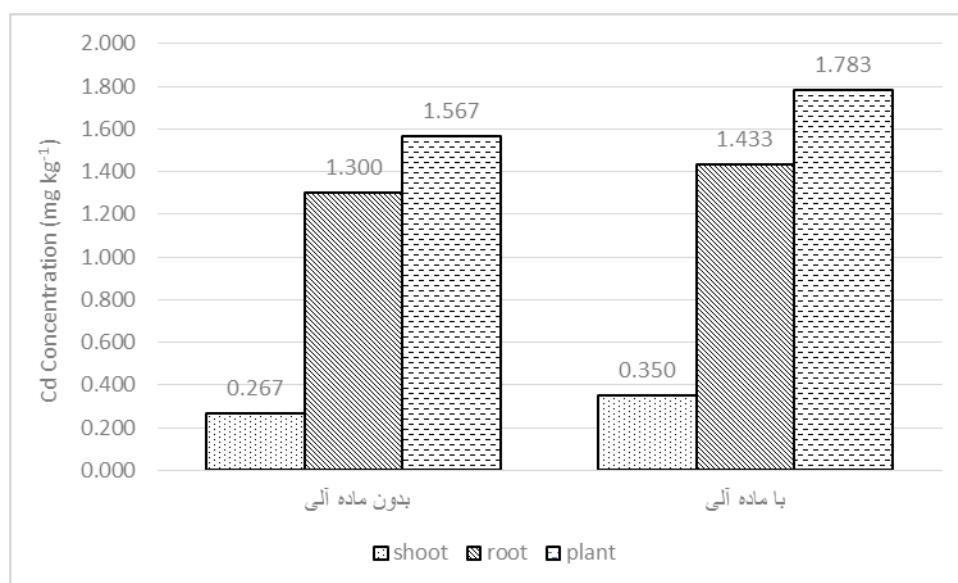
کادمیم دارند. براساس نتایج، غلظت کادمیم در ریشه گیاه ذرت در شرایط حضور و عدم حضور ماده آلی بطور معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) بیشتر از اندام‌هوایی بوده است. این امر نشان می‌دهد که کادمیم تمایل بیشتری برای تجمع در ریشه گیاه در مقایسه با اندام‌هوایی داشته است. کیم و همکاران (۱۶) بیان کردند که نسبت مقدار کادمیم در اندام‌هوایی به ریشه کمتر از یک است که نشان می‌دهد کادمیم بیشتر توسط ریشه جذب شده است و احتمالاً به دلیل تشکیل کمپلکس آلی- کادمیم در نتیجه افزایش مقدار کربن آلی محلول در محیط ریزوسفر و کاهش انتقال کادمیم به اندام‌هوایی بوده است.

نتیجه‌گیری

افزودن ماده آلی به خاک بر تغییرات هیچ یک از شکل‌های شیمیایی کادمیم در خاک جز فرم قابل‌عصاره‌گیری با DTPA بطور معنی‌داری مؤثر نبوده است. این در حالی است که اضافه کردن ماده آلی به خاک منجر به تغییر معنی‌دار هر سه ویژگی اندازه‌گیری شده در خاک شامل pH، CEC و درصد کربن آلی شده است. بنابراین می‌توان این‌طور نتیجه‌گیری کرد که افزودن ماده آلی به خاک بطور

خاک که بر توزیع شکل‌های شیمیایی کادمیم مؤثر هستند اثرگذار بوده است.

مستقیم باعث تغییر شکل‌های شیمیایی کادمیم در خاک مورد مطالعه نشده است بلکه به صورت غیر مستقیم و از طریق تغییر ویژگی‌های



شکل ۲- غلظت کادمیم (میلی گرم بر کیلوگرم) در ریشه، اندام‌هوایی و کل گیاه ذرت
Figure 2- Concentration of Cadmium (mg kg⁻¹) in root, shoot and total plant of corn

کود گاوی به خاک‌های آهکی در محدوده pH خنثی تا کمی قلیایی منجر به افزایش جذب کادمیم توسط گیاه و کاهش غلظت آن در خاک می‌شود. در خصوص آلودگی‌زدایی گیاه ذرت که دارای بخش خوراکی است، به نظر می‌رسد بالا بودن غلظت کادمیم در ریشه نسبت به اندام هوایی به عنوان یک مزیت محسوب می‌شود زیرا با کشت این گیاه هم می‌توان فرایند گیاه‌پالایی را انجام داد و هم از محصول آن استفاده نمود.

همچنین اضافه کردن ماده آلی به خاک نتوانسته است غلظت کادمیم در گیاه ذرت را بطور معنی‌داری افزایش دهد که ممکن است این امر به علت نوع (کود گاوی) و یا مقدار ماده آلی (۱/۵ درصد جرمی) اضافه شده به خاک باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، افزودن کود گاوی به خاک بیشترین تأثیر را بر فرم کربناتی کادمیم دارد بنابراین با توجه به این که شکل کربناتی فلزات پس از شکل تبدیلی بیشترین فراهمی را برای گیاهان دارد و جزء شکل‌های بالقوه فراهم برای گیاه محسوب می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که اضافه کردن

منابع

- 1- Akkajit P., and Tongcumpou C. 2010. Fractionation of metals in cadmium contaminated soil: Relation and effect on bioavailable cadmium. *Geoderma*, 156(3), 126-132 .
- 2- Alavi H., Motlagh M. B., and Dordipour E. 2012. Determination of chemical forms of copper and their relationships with plant responses and soil properties in some soils of Golestan Province. *Water And Soil Conservation*, 19(3), 20. (in Persian with English abstract).
- 3- Azimzadeh Y., Shariatmadari H., and Shirvani M. 2013a. Changes in chemical forms and bioavailability of zinc by distance from rhizosphere of single and mixed culture. *Soil Applied Reaserch*, 1(1), 12. (in Persian with English abstract).
- 4- Azimzadeh Y., Shariatmadari H., and Shirvani M. 2013b. Remediation of some soil heavy metals by corn and canola in single and mixed culture system. *Water and Soil*, 27(2), 9. (in Persian with English abstract).
- 5- Azimzadeh Y., Shirvani M., and Shariatmadari H. 2013c. Effect of green manure on chemical forms of some heavy metalsin soil by distance from rhizosphere of corn. *Soil Applied Reaserch*, 2(2), 20. (in Persian with English abstract).
- 6- Baghaie A. H., Khoshgoftarmanesh A. H., and Afyuni M. 2012. Effects of inorganic and organic fractions of

- enriched cow manure and sewage sludge on distribution of lead chemical fractionation in soil. Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resources., Water and Soil Sci, 16(60), 12. (in Persian with English abstract).
- 7- Brümmer G .1986 .Heavy metal species, mobility and availability in soils: Springer.
- 8- Dechun S., Jianping X., Weiping J., and Woonchung W. 2009. Cadmium uptake and speciation changes in the rhizosphere of cadmium accumulator and non-accumulator oilseed rape varieties Journal of Environmental Sciences, 21(8), 1125-1128 .
- 9- Eriksson J. E. 1990. Factors influencing adsorption and plant uptake of cadmium from agricultural soils. Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala.
- 10- Fard A. G., Hosseini H. M., Besharati H., and Savaghebi G. R. 2013. Study on chemical forms of lead and zinc in the rhizosphere of some maize and canola cultivars. Water and Soil, 26(6), 13. (in Persian with English abstract).
- 11- Gholami M., and Motlagh M. B. 2011. Distribution of zinc forms and the relationship of these fractions with soil properties in some soils of Golestan Province. Soil Management and Sustainable, 1(2), 19. (in Persian with English abstract).
- 12- Grant C., Buckley W., Bailey L., and Selles F. 1998. Cadmium accumulation in crops. Canadian Journal of Plant Science, 78(1), 1-17 .
- 13- Haghiri F. 1974. Plant uptake of cadmium as influenced by cation exchange capacity, organic matter, zinc, and soil temperature. Journal of Environmental Quality, 3(2), 180-183.
- 14- He Q., and Singh B. 1993. Effect of organic matter on the distribution, extractability and uptake of cadmium in soils. Journal of Soil Science, 44(4), 641-650 .
- 15- Hinesly T., Redborg K., Ziegler E., and Alexander J. 1982. Effect of soil cation exchange capacity on the uptake of cadmium by corn. Soil Science Society of America Journal, 46(3), 490-497.
- 16- Kim K.-R., Owens G., and Naidu R. 2010. Effect of root-induced chemical changes on dynamics and plant uptake of heavy metals in rhizosphere soils. Pedosphere, 20(4), 494-504 .
- 17- Kim K.-R., Owens G., Naidu R., and Kwon S.-I. 2010. Influence of plant roots on rhizosphere soil solution composition of long-term contaminated soils. Geoderma, 155(1), 86-92 .
- 18- Marchiol L., Assolari S., Sacco P., and Zerbi G. 2004. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. Environmental Pollution, 132(1), 21-27 .
- 19- Martínez-Alcalá I., Walker D., and Bernal M. 2010. Chemical and biological properties in the rhizosphere of *Lupinus albus* alter soil heavy metal fractionation. Ecotoxicology and Environmental Safety, 73(4), 595-602.
- 20- Mohamed I., Ahamadou B., Li M., Gong C., Cai P., Liang W., and Huang Q. 2010. Fractionation of copper and cadmium and their binding with soil organic matter in a contaminated soil amended with organic materials. Journal of Soils and Sediments, 10(6), 973-982 .
- 21- Narwal R., and Singh B. 1998. Effect of organic materials on partitioning, extractability and plant uptake of metals in an alum shale soil. Water, Air, and Soil Pollution, 103(1-4), 405-421 .
- 22- Ravanbakhsh M. H., Fotovat A., and Haghnia G. 2011. Effect of sewage sludge, clay content and time on the fractionation of nickel and cadmium in selected calcareous soils. Water and Soil, 25(3), 13. (in Persian with English abstract).
- 23- Ravanbakhsh M.H., Fotovat A., and Haghnia GH. 2009. The effect of sewage sludge and incubation time on the availability and speciation of Nickel and Cadmium in the calcareous soil solutions. Water and Soil, 23(1), 11. (in Persian with English abstract).
- 24- Reyhanitabar A., Karimian N., Muazardalan M., Savaghebi G. R., and Ghannadha M .R. 2006. Zinc Fractions of Selected Calcareous Soils of Tehran Province and Their Relationships with Soil Characteristics. Water and Soil science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources), 10(3), 11. (in Persian with English abstract).
- 25- Saadat K., Motlagh M. B., Dordipour E., and Ghasemnezhad A. 2012. Influence of sewage sludge on some soil properties, yield and concentration of lead and cadmium in roots and shoots of Maize. Soil Management and Sustainable, 2(2), 22. (in Persian with English abstract).
- 26- Shuman L., Dudka S., and Das K. 2002. Cadmium forms and plant availability in compost-amended soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 33(5-6), 737-748 .
- 27- Sposito G., Lund L. J., and Chang A. C. 1981. Trace Metal Chemistry in Arid-zone Field Soils Amended with

- Sewage Sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in Solid Phases. Soil Science Society of America Journal, 46(2), 260-264.
- 28- Tao S., Chen Y., Xu F., Cao J., and Li B. 2003. Changes of copper speciation in maize rhizosphere soil. Environmental Pollution, 122(3), 447-454 .
- 29- Tessier A., and Campbell P. 1987. Partitioning of trace metals in sediments: relationships with bioavailability. Hydrobiologia, 149(1), 43-52 .
- 30- Tessier A., Campbell P. G., and Bisson M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical chemistry, 51(7), 844-851 .
- 31- Walker D. J., Clemente R., Roig A., and Bernal M. P. 2003. The effects of soil amendments on heavy metal bioavailability in two contaminated Mediterranean soils. Environmental Pollution, 122(2), 303-312 .
- 32- Wang J., Zhang C., and Jin Z. 2009. The distribution and phytoavailability of heavy metal fractions in rhizosphere soils of *Paulownia fortunei* (seem) Hems near a Pb/Zn smelter in Guangdong, PR China. Geoderma, 148(3), 229-306.
- 33- Wang Z., Shan X.-q., and Zhang S. 2002. Comparison between fractionation and bioavailability of trace elements in rhizosphere and bulk soils. Chemosphere, 46(8), 1163-1171 .
- 34- Wenzel W. W., Wieshammer G., Fitz W. J., and Puschenreiter M. 2000. Novel rhizobox design to assess rhizosphere characteristics at high spatial resolution. Plant and soil, 237, 37-45 .
- 35- Wuana R. A., and Okieimen F. E. 2011. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. ISRN Ecology.
- 36- Xian X. 1989. Effect of chemical forms of cadmium, zinc, and lead in polluted soils on their uptake by cabbage plants. Plant and Soil, 113(2), 257-264 .
- 37- Yanai J., Mabuchi N., Moritsuka N., and Kosaki T. 2004. Distribution and forms of cadmium on the rhizosphere of *Brassica juncea* in Cd-contaminated soils and implications for phytoremediation. Soil Science and Plant Nutrition, 50(3), 423-430 .
- 38- Youssef R. A., and Chino M. 1988. Development of a new rhizobox system to study the nutrient status in the rhizosphere. Soil Science and Plant Nutrition, 34(3), 461-465 .
- 39- Ziyadeh M., and Hosseini H. M. S. 2013. Assessment of lead extractable changes with different extractants in rhizosphere and bulk soil of corn (*Zea mays*) and canola (*Brassica napus*) and lead amounts in these two plants. Soil Management and Sustainable, 3(1), 17. (in Persian with English abstract).



Effect of Organic Matter on Distribution of Chemical Forms of Cadmium in Soil in Corn Rhizosphere

F. Lotfi¹- A. Fotovat²- R. Khorassani³- M. Bahreini Touhan⁴

Received: 13-12-2016

Accepted: 22-07-2017

Introduction: The pollution of soils by heavy metals due to human activities poses a serious concern for human and environmental health. In order to evaluate the risks of heavy metal contamination such as cadmium in soil, it is necessary to understand its bioavailability which depends on its chemical forms in the soil. According to Tessier (1979), heavy metals can be found in various chemical forms in soil including exchangeable, bound to carbonates, bound to iron and manganese oxides and bound to organic matter and residual. These fractions significantly influence the cadmium mobility and bioavailability. Distribution of metals in chemical forms in soil depends on soil pH, amount of organic matter, oxidation-reduction potential and ionic strength. Root exudation, soil texture, cation exchangeable capacity and amount of calcium carbonate may also impact chemical forms of cadmium. Many studies have showed that plant root may affect the chemistry of heavy metals in soil root zone. The objective of this study was to evaluate the effect of organic matter on the distribution of cadmium in corn root media.

Materials and Methods: To investigate the effect of organic matter (cow manure) and root activity on chemical forms of cadmium, a greenhouse experiment was conducted using rhizobox. The contaminated soil sample used in the study was collected from Zanjan. This greenhouse experiment was conducted in a factorial design, with 2 replications, two levels of organic matter (0 and 1.5%) and three zones classified based on their distance from root. The soil samples were air dried and crushed to pass through a 2-mm sieve. The cultivation was conducted using a rhizobox. The rhizobox consisted of three parts: 1. central compartment (rhizosphere), 2. close to rhizosphere, and 3. soil bulk. Soil samples were mixed with fertilizer and packed in rhizobox. Eight pre-germinated maize seedlings were transferred to the central compartment and five days after germination, thinned to four plants. Ten weeks after planting, corn plants were harvested for analysis. The compartments of rhizobox were separated. The collected plant samples (root and shoot) were rinsed with deionized water and oven-dried at 70 °C. Soil samples were also measured for pH, CEC and total organic carbon. The chemical forms of cadmium in the soil and plant samples were identified by the sequential extraction procedure proposed by Tessier (1979). Bioavailable cadmium in soil was also extracted by DTPA-TEA.

Results and Discussion: Results showed that the highest amount of soil cadmium was found in carbonate fraction. Adding organic matter increased the soil pH, CEC and organic carbon amount, whereas none of chemical forms of cadmium were significantly affected by adding organic matter. Bioavailability of cadmium, however, decreased by adding organic matter to soil. It can be therefore concluded that increment in cadmium uptake due to increased organic matter led to decreased cadmium bioavailability. The exchangeable cadmium was negatively correlated to soil organic carbon, while bioavailable cadmium was negatively correlated to soil pH, CEC and amount of soil organic carbon. Moreover, our results indicated that the fractions of cadmium were not significantly affected by distance from the root. Moreover, adding organic matter insignificantly increased concentration of cadmium in shoots, roots and total plants.

Conclusion: In this study, among different chemical forms of cadmium, only bioavailable cadmium was significantly affected by adding organic matter to soil. Additionally, soil pH, CEC and organic carbon were significantly increased by adding organic matter. These results indicate that addition of organic matter to soil may indirectly influence chemical forms of cadmium through impacting soil properties (soil pH, CEC and organic carbon). The addition of organic matter had the most influence on carbonate fraction of cadmium which

1, 2, 3 and 4- M.Sc. Student, Professor, Associate Professor and Ph.D. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, Respectively
(* - Corresponding Author Email: afotovat@um.ac.ir)

may be potentially available to plant. It seems that addition of organic matter (cow manure) may result in increase of cadmium concentration in plant. Therefore, it can be concluded that addition of cow manure to calcareous soils with neutral to slightly alkaline pH may lead to increased cadmium uptake by the plant (corn) and reduced soil cadmium concentration.

Keywords: Bioavailability, Cadmium, Fractionation, Organic matter, Rhizobox



اثر متقابل شوری و آلودگی کادمیم بر کادمیم قابل جذب، تنفس و زیست توده میکروبی در یک خاک آهکی تیمار شده با بقایای گیاهی

الهام صادقی^{۱*} - فایز رئیسی^۲ - علیرضا حسین پور^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۱۵

چکیده

خاک به عنوان یکی از اجزای اکوسیستم، محیط رشد گیاه و زیستگاه موجودات زنده متنوع با انواع تنش‌های زیستی روبه‌رو است. اگر چه اثرات منفرد تنش‌های شوری و آلودگی بر فعالیت‌های زیستی خاک عموماً شناخته شده است ولی اثر مشترک این دو تنش بر رشد، جمعیت و فعالیت موجودات زنده خاک مورد توجه قرار نگرفته است. هدف این تحقیق مطالعه اثر متقابل و یا مشترک تنش‌های شوری و آلودگی کادمیم بر کادمیم قابل جذب، تنفس و زیست توده میکروبی و ضریب متابولیکی در یک خاک آهکی آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی طی سه ماه انکوباسیون بود. آزمایش به صورت فاکتوریل (دو سطح کادمیم، سه سطح شوری و دو سطح تیمار بقایای گیاهی) در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار و در شرایط آزمایشگاهی اجرا گردید. نتایج نشان داد افزایش سطح شوری باعث افزایش غلظت کادمیم قابل جذب، کاهش تنفس و کربن زیست توده میکروبی و همزمان افزایش ضریب ویژه تنفسی خاک گردید. مصرف بقایای گیاهی آثار منفی شوری و آلودگی را بر تنفس و کربن زیست توده میکروبی کاهش داد به گونه‌ای که در خاک‌های تیمار نشده با بقایای گیاهی اثرات متقابل این دو تنش اثرات منفی همدیگر را تشدید نموده ولی در خاک‌های تیمار شده با بقایای گیاهی اثرات منفی تعدیل شده بود. این نشان می‌دهد در خاک‌های شور و آلوده با محدودیت کربن، افزایش سطح ماده آلی خاک افزایش غلظت کادمیم قابل جذب ناشی از شوری خاک را کاهش و در نتیجه از اثر بازدارنده شوری بر فعالیت و جمعیت میکروبی می‌کاهد.

واژه‌های کلیدی: اثر متقابل، آلودگی، تنفس میکروبی، زیست توده میکروبی، زیست‌فراهمی فلز، شوری

مقدمه

کاهش فعالیت آن‌ها می‌گردد (۲۱ و ۳۱). طبق نتایج چاودهری و همکاران (۶) شوری و تغییر پتانسیل اسمزی خاک ممکن است فعالیت و رشد ریزجانداران را تحت تأثیر قرار دهد. نتایج اغلب مطالعات حاکی است که شوری باعث کاهش زیست توده میکروبی در خاک می‌شود (۱۰ و ۲۱). تریپاتی و همکاران (۲۶) نشان دادند که کاهش رشد میکروب‌ها در خاک‌های شور به دلیل تنش ناشی از فزونی نمک می‌باشد و همین عامل موجب کاهش تنفس خاک می‌گردد. علاوه بر این، تنش ناشی از آلودگی و سمیت فلزات سنگین نیز رشد و فعالیت موجودات زنده خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۳ و ۷). از جمله این عناصر سمی می‌توان به کادمیم اشاره کرد که عنصری غیرضروری و فاقد نقش بیولوژیک خاصی است (۹ و ۲۵). نتایج اکثر تحقیقات حاکی است که کادمیم نیز تأثیر منفی بر فعالیت میکروبی خاک دارد (۷، ۱۳، ۱۷ و ۲۲). آقابابایی و همکاران (۳) گزارش کردند که با افزایش کادمیم فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک کاهش می‌یابد. اگر چه تنش‌های شوری و آلودگی به تنهایی سبب کاهش فعالیت‌های زیستی خاک می‌گردند ولی اثر مشترک و یا متقابل این دو تنش بر موجودات زنده خاک مورد توجه قرار نگرفته است. نتایج برخی

ویژگی‌های میکروبی خاک از شاخص‌های مهم کیفیت آن به شمار می‌آیند و به همین دلیل کیفیت و سلامت خاک با استفاده از خواص مختلف میکروبی نیز قابل ارزیابی می‌باشند (۱۱ و ۱۹). ریزجانداران خاک نقش مهمی در افزایش زیست‌فراهمی عناصر غذایی، تجزیه مواد آلی، بهبود و ارتقاء رشد گیاه و حاصلخیزی خاک دارند (۸ و ۲۴). با این حال، موجودات خاکزی در معرض انواع تنش‌های زیستی و غیرزیستی در محیط خاک قرار دارند. شوری و آلودگی دو تنش مهم و متداول غیرزیستی محسوب می‌شوند که در اغلب خاک‌های دنیا به ویژه مناطق خشک و نیمه خشک فرایندهای مهم خاک و زندگی ریزجانداران را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۳، ۶، ۷، ۲۱ و ۲۶). معمولاً تنش شوری باعث از بین رفتن ریزجانداران خاک و

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و استادان گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

(*)- نویسنده مسئول: (Email: el.sadeghi70@gmail.com)
DOI: 10.22067/jsw.v31i6.60958

شهرکرد انتخاب، و از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی متری به میزان لازم نمونه برداری شد. پس از انتقال به آزمایشگاه و هوا خشک شدن، خاک از الک ۲ میلی متری عبور داده شد. خاک مورد آزمایش دارای $pH=7/6$ ، قابلیت هدایت الکتریکی (عصاره اشباع) $1/35$ دسی زیمنس بر متر، کربن آلی $5/69$ گرم بر کیلوگرم، کربنات کلسیم معادل 350 گرم بر کیلوگرم، نیتروژن کل $0/54$ گرم بر کیلوگرم، وزن مخصوص ظاهری $1/35$ گرم بر سانتی متر مکعب و بافت این خاک به روش هیدرومتری لوم رسی بود. کادمیم کل $1/7$ میلی گرم بر کیلوگرم و غلظت کادمیم قابل جذب پس از عصاره گیری نمونه ها با $DTPA-0/15$ TEA میلی گرم بر کیلوگرم بود.

آزمایش در دو سری نمونه انجام گردید. در نمونه سری اول به منظور اندازه گیری تنفس میکروبی به صورت هفتگی 100 گرم خاک خشک (105 درجه سانتی گراد) و در نمونه سری دوم به منظور اندازه گیری کربن زیست توده میکروبی، 400 گرم خاک معادل وزن آن خشک (105 درجه سانتی گراد) برداشت و در جارهای پلاستیکی 1 لیتری ریخته شد. ابتدا با استفاده از نمک کلرید کادمیم، خاک مورد مطالعه در سطح 30 میلی گرم کادمیم بر کیلوگرم آلوده گردید. سپس معادل 1 درصد وزنی پودر بقایای گیاه یونجه کاملاً آسیاب شده (1 میلی متری) به آن افزوده و محتوی جارها به طور کامل با هم مخلوط شدند. پس از مخلوط کردن کامل خاک و بقایای گیاهی، تیمار شوری شامل $1/35$ (شاهد)، $7/5$ و 15 دسی زیمنس بر متر با استفاده از نمک $NaCl$ اعمال گردید. برای فعال شدن جمعیت میکروبی و برقراری تعادل نسبی، رطوبت مخلوط خاک- بقایای گیاهی- نمک در حد 70 درصد ظرفیت مزرعه خاک اولیه تنظیم و جارها $3-4$ هفته در دمای معمولی محیط به حالت پیش انکوباسیون قرار گرفتند. در ادامه نمونه ها داخل انکوباتور و در دمای 25 ± 1 درجه سانتی گراد نگهداری شدند و تا انتهای دوره آزمایش (98 روز) کنترل رطوبت آن ها به روش وزنی هر چند روز یک بار با توزین جارها انجام گرفت. طی انکوباسیون تنفس میکروبی (4) به صورت هفتگی و کادمیم قابل جذب (14) و مقدار کربن زیست توده میکروبی (29) طی سه دوره به فاصله زمانی 30 روز اندازه گیری شدند. در پایان تجزیه واریانس فاکتوریل با اندازه گیری مکرر (Repeated measures) و مقایسه میانگین ها با آزمون LSD در سطح احتمال $\alpha=0/05$ با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد. در این آزمایش برای تعیین نوع و ماهیت اثرات متقابل (هم- کرداری و پادکرداری) بین شوری و آلودگی از مدل مستقل بلیس (Bliss independence model) استفاده شد (12 و 32).

نتایج و بحث

کادمیم قابل جذب

نتایج نشان داد اثر اصلی شوری، آلودگی و ماده آلی و برهمکنش

مطالعات آزمایشگاهی نشان می دهد که شوری می تواند تحرک و زیست فراهمی عناصر سمی مانند کادمیم (1 ، 2 ، 18 ، 27 ، 28 و 30) و سرب (1 ، 2 و 28) را در خاک های آلوده افزایش دهد. شوری ناشی از نمک های کلریدی مانند کلرید سدیم به دلیل ورود یون کلر و متعاقب آن تشکیل کمپلکس پایدار کلر- فلز محلول سبب افزایش تحرک و غلظت شکل قابل استفاده فلزات سمی می شوند (1 و 2). بنابراین، انتظار می رود اثر مسمومیت ناشی از فلزات سنگین بر فعالیت های زیستی خاک آلوده در شرایط شور تشدید گردد. به بیان دیگر، شوری ممکن است آثار منفی فلزات سمی را بر رشد و فعالیت موجودات زنده تحریک نماید. مطالعات ثابت کرده اند که افزایش مقدار ماده آلی خاک در نتیجه کاربرد کودهای آلی اثر شوری بر موجودات زنده خاک را کاهش می دهد (23). افزودن کربن سهل الوصول به خاک به دلیل فراهم کردن منبع انرژی در شرایط تنش از کاهش فعالیت میکروبی جلوگیری می کند (6). مواد آلی خاک می تواند از طریق تشکیل کمپلکس های پایدار با گروه های عامل سبب غیرمتحرک شدن فلزات سمی گردد (15). در حال حاضر تعداد زیادی از اصلاح کننده های آلی مانند کود دامی و کمپوست در اصلاح خاک های شور و شور و قلیا مورد استفاده قرار می گیرند (16). به علاوه افزودن مواد آلی می تواند روش مفید جهت کاهش اثرات مخرب آبیاری با آب شور و بهبود ویژگی های میکروبیولوژیکی خاک در شرایط شور باشد (6). با این حال اثر همزمان شوری، کادمیم و ماده آلی بر زیست توده و فعالیت میکروبی هنوز مورد مطالعه و بررسی قرار نگرفته است. از این رو با توجه به بروز همزمان تنش شوری و آلودگی و افزایش روز افزون این تنش ها، این تحقیق با هدف اثر متقابل شوری و آلودگی کادمیم بر کادمیم قابل جذب، تنفس و کربن زیست توده میکروبی در یک خاک آهکی تیمار شده با بقایای گیاهی انجام گرفت. در این تحقیق فرض می گردد که (1) شوری سبب افزایش تحرک و زیست فراهمی کادمیم و در نتیجه کاهش زیست توده و فعالیت میکروبی می گردد و اثرات متقابل آنها هم کرداری است و (2) افزایش ماده آلی خاک از اثر شوری بر زیست فراهمی کادمیم و فعالیت میکروبی می کاهد و اثر مشترک شوری و آلودگی در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی پادکرداری خواهد بود.

مواد و روش ها

این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل با سه سطح شوری ($1/35$ (شاهد)، $7/5$ و 15 دسی زیمنس بر متر)، دو سطح آلودگی کادمیم (0 و 30 میلی گرم بر کیلوگرم) و دو سطح بقایای گیاهی یونجه (0 و 1 درصد) در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در چهار تکرار انجام شد. برای تهیه خاک، ابتدا یک خاک زراعی از اراضی دانشگاه

دسی‌زیمنس بر متر کادمیم قابل جذب خاک را به ترتیب ۱۴، ۲۲ و ۲۲ درصد در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) طی ماه اول، دوم و سوم آزمایش افزایش داد و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون سبب افزایش بیشتر کادمیم قابل جذب (به ترتیب ۲۶، ۳۸ و ۳۷ درصد) نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۲). بررسی نتایج حاصل از معادله بلیس نشان داد اثر مشترک شوری و آلودگی بر کادمیم قابل جذب در خاک تیمار نشده با بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری معمولاً هم‌کرداری است (جدول ۳). به عبارت دیگر شوری اثر کادمیم را تحریک نموده و غلظت کادمیم قابل جذب در خاک با افزایش شوری افزایش یافت.

دو جانبه شوری × آلودگی، شوری × ماده آلی و آلودگی × ماده آلی و همچنین برهمکنش سه جانبه شوری × آلودگی × ماده آلی بر کادمیم قابل جذب معنی‌دار ($p < 0.001$) گشت اما اثر دو جانبه شوری و ماده آلی غیر معنی‌دار ($p > 0.05$) بود (جدول ۱). در خاک غیرآلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون باعث افزایش ۳۰، ۴۰ و ۳۱ درصدی کادمیم قابل جذب نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم شد (جدول ۲). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث افزایش بیشتر (به ترتیب ۷۵، ۸۰ و ۶۲ درصدی طی ماه اول، دوم و سوم) کادمیم قابل جذب نسبت به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) گردید (جدول ۲). در خاک آلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرات اصلی آلودگی کادمیم، شوری و بقایای گیاهی و اثرات متقابل بین آن‌ها (بین گروهی)، اثر زمان و اثر متقابل زمان (درون گروهی) بر کادمیم قابل جذب ($C_{d_{ava}}$)، کربن زیست توده میکروبی (MBC)، سرعت تنفس میکروبی (MRR) و ضریب ویژه تنفسی (qCO_2)

Table 1- ANOVA results (mean square values) for the main effects of cadmium pollution, salinity and plant residue; and their interactions with time (T) for soil available cadmium ($C_{d_{ava}}$), microbial biomass C (MBC), microbial respiration rate (MRR) and specific respiratory quotient (qCO_2)

منبع تغییرات Sources of variation	df	کادمیم قابل جذب $C_{d_{ava}}$	کربن زیست توده میکروبی MBC	سرعت تنفس میکروبی MRR	ضریب ویژه تنفسی qCO_2
اثرات متقابل بین گروهی Between-Subjects Effects					
Pollution (P)	1	24.2*** (1.00)	19901*** (0.88)	21.6*** (1.00)	285*** (0.97)
Salinity (S)	2	0.68*** (0.99)	30751*** (1.00)	18.8*** (1.00)	1036*** (0.99)
Residue (R)	1	4.74*** (1.00)	170693*** (1.00)	172*** (1.00)	876*** (0.99)
P×S	2	0.31*** (0.99)	423*** (0.96)	0.08*** (0.93)	305*** (0.98)
P×R	1	2.81*** (1.00)	0.42*** (0.01)	0.58*** (0.98)	392*** (0.96)
S×R	2	0.001 ^{ns} (0.06)	1499*** (0.99)	0.26*** (0.98)	705*** (0.99)
P×S×R	2	0.01*** (0.71)	340*** (0.95)	1.31*** (1.00)	19.3*** (0.80)
Error (خطا)	36	25×10^{-5}	0.92	3×10^{-4}	0.26
C.V. (%)		2.71	1.01	0.52	1.44
اثرات متقابل درون گروهی Within-Subjects Effects					
Time (T)	2	0.053*** (0.89)	73096*** (1.00)	214*** (1.00)	3115*** (0.99)
T×P	2	0.055*** (0.89)	520*** (0.95)	1.36*** (0.99)	7181*** (0.64)
T×S	4	0.008*** (0.71)	1053*** (0.99)	3.73*** (1.00)	134*** (0.87)
T×R	2	0.004*** (0.35)	10569*** (1.00)	21.8*** (1.00)	199*** (0.83)
T×P×S	4	0.007*** (0.69)	136*** (0.91)	0.04*** (0.84)	16.2*** (0.45)
T×P×R	2	0.004*** (0.35)	532*** (0.96)	0.17*** (0.92)	55.9*** (0.58)
T×S×R	4	0.007*** (0.68)	379*** (0.97)	0.25*** (0.97)	155*** (0.88)
T×P×S×R	4	0.006*** (0.67)	76.3*** (0.86)	0.33*** (1.98)	2.26* (0.10)
Error (Time)	72	18×10^{-5}	0.70	4×10^{-4}	0.70
C.V. (%)		2.31	0.88	0.63	0.88

اعداد داخل پرانتز نشان دهنده η^2 جزئی ($SS_{effect} / (SS_{effect} + SS_{error})$) می‌باشند. ns، *، **، *** به ترتیب به مفهوم غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵، ۱، ۰/۱ درصد می‌باشد. (C.V.) ضریب

تغییرات

The numbers in parentheses represent the partial η^2 ($SS_{effect} / (SS_{effect} + SS_{error})$) as a measure of the effect size; ns, *, **, *** non-significant and significant at 5, 1, 0.1%, respectively. C.V. coefficient of variation

جدول ۲- اثر بقایای گیاهی، آلودگی کادمیم و شوری بر غلظت کادمیم قابل جذب ($Cd_{ava.}$) در خاک. اعداد میانگین ($n=4$) به همراه خطای معیار می‌باشند (SE)

Table 2- The effect of plant residue, cadmium pollution and salinity on soil available cadmium ($Cd_{ava.}$) concentration. Values are mean ($n = 4$) with standard error (SE) of the mean

بقایای گیاهی Plant residue	کادمیم Pollution ($mg\ kg^{-1}$)	شوری Salinity ($dS\ m^{-1}$)	زمان نمونه‌برداری (روز) Sampling time (day)		
			30	60	90
بدون بقایای گیاهی Without plant residue	0	1.35	0.16 ± 0.003^{Ai}	0.15 ± 0.004^{Ai}	0.16 ± 0.006^{Ai}
		7.5	0.21 ± 0.005^{Ah}	0.21 ± 0.011^{Ah}	0.21 ± 0.012^{Ah}
		15	0.28 ± 0.006^{Ag}	0.27 ± 0.006^{Ag}	0.26 ± 0.006^{Ag}
	30	1.35	1.12 ± 0.005^{Bc}	1.07 ± 0.006^{Cc}	1.15 ± 0.011^{Ac}
		7.5	1.28 ± 0.006^{Cb}	1.31 ± 0.005^{Cb}	1.40 ± 0.011^{Ab}
		15	1.41 ± 0.009^{Ba}	1.48 ± 0.005^{Aa}	1.57 ± 0.007^{Ca}
با بقایای گیاهی With plant residue	0	1.35	0.11 ± 0.004^{Aj}	0.11 ± 0.003^{Ak}	0.11 ± 0.005^{Ak}
		7.5	0.12 ± 0.006^{Aj}	0.12 ± 0.003^{Aj}	0.13 ± 0.004^{Aj}
		15	0.16 ± 0.002^{Ai}	0.14 ± 0.005^{Cij}	0.15 ± 0.004^{Ai}
	30	1.35	0.40 ± 0.009^{Cf}	0.44 ± 0.006^{Cf}	0.50 ± 0.013^{Af}
		7.5	0.52 ± 0.002^{Ce}	0.73 ± 0.006^{Be}	0.84 ± 0.009^{Ae}
		15	0.85 ± 0.007^{Bd}	0.84 ± 0.009^{Bd}	0.91 ± 0.011^{Ad}

در هر ستون میانگین‌ها دارای حروف کوچک مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند

در هر ردیف میانگین‌ها دارای حروف بزرگ مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین زمان‌های مختلف بر اساس آزمون LSD هستند

Within each column the means sharing similar lowercase letters do not have significant differences among treatments at 5% level according to the LSD test

Within each row the means sharing similar uppercase letters do not have significant differences at 5% level between different sampling times at 5% level according to the LSD test

جدول ۳- ماهیت نوع اثرات متقابل شوری و آلودگی بر غلظت کادمیم قابل جذب ($Cd_{ava.}$) محاسبه شده بر اساس معادله مستقل بلیس در خاک‌های تیمار نشده (R_0) و تیمار شده (R_1) با بقایای گیاهی

Table 3- The nature of interactions between salinity and Cd pollution on concentration of soil available Cd in soils untreated (R_0) and treated (R_1) with plant residue determined on the basis of the Bliss independence model

شوری Salinity ($dS\ m^{-1}$)	تیمار Treatment	۳۰ روز (30 days)		۶۰ روز (60 days)		۹۰ روز (90 days)	
		R0	R1	R0	R1	R0	R1
7.5	S	+36.8	+13.4	+36.4	+19.4	+31.2	+19.5
	P	+616	+260	+596	+309	+618	+351
	(PS) _o	+718	+365	+754	+584	+773	+669
	(PS) _p	+879	+308	+849	+389	+842	+439
	CI _{95%}	13.6	8.35	12.1	19.4	21.2	25.6
	t-statistic	17.5	26.9	11.4	35.7	8.09	23.4
	p-statistic	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT
15	S	+74.1	+40.4	+72.6	+36.4	+62.7	+38.3
	P	+616	+260	+596	+309	+618	+351
	(PS) _o	+800	+666	+865	+692	+876	+733
	(PS) _p	+1146	+406	+1101	+458	+1069	+523
	CI _{95%}	15.7	20.9	9.79	24.5	14.5	31.4
	t-statistic	12.8	54.1	41.9	32.7	22.0	46.0
	p-statistic	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT

S خاک شور به تنهایی، P خاک آلوده به تنهایی، (PS)_o اثر مشترک مشاهده شده شوری و آلودگی، (PS)_p اثر مشترک پیش‌بینی شده شوری و آلودگی، CI_{95%} حدود اطمینان در سطح احتمال ۹۵

درصد، t statistic و t statistic (two-tail) آماره t و p در آزمون t test، Interaction نوع اثر متقابل، SYN (هم‌کرداری) و ANT (پادکرداری)

S saline soil, P Cd-polluted soil, (PS)_o the observed effect of salinity and pollution, (PS)_p the predicted effect of salinity and pollution, CI_{95%} confidence interval at 95%; t-statistic student's t test; p-statistic two-tail p value; SYN synergistic, ANT antagonistic

و ۱۸ درصدی کادمیم قابل جذب را نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) طی ماه اول، دوم و سوم به همراه داشت (جدول ۲). شوری

همین‌طور در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه دوره آزمایش به ترتیب افزایش ۹، ۹

بیشتر (به ترتیب ۷۲، ۷۷ و ۷۳ درصد) MBC نسبت به تیمار شاهد گردید (جدول ۴). در این آزمایش بین غلظت کادمیم قابل جذب و میزان MBC همبستگی منفی معنی دار ($p < 0.01$, $r = -0.59$) وجود داشت. بنابراین با افزایش میزان کادمیم قابل جذب در خاک مقدار MBC کاهش می یابد. بررسی نتایج حاصل از معادله بلیس نشان داد اثر متقابل شوری و آلودگی بر MBC در خاک تیمار نشده با بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری هم کرداری است (جدول ۵). عثمان و همکاران (۲۸) اظهار کردند که افزایش شوری فراهمی و جذب فلزات سمی در خاک را افزایش می دهد و این افزایش منجر به کاهش MBC می گردد.

همینطور در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی زیمنس بر متر طی سه دوره آزمایش کاهش ۱۶، ۳۶ و ۳۸ درصدی MBC را نسبت به خاک شاهد به ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم به همراه داشت (جدول ۴). در حالی که شوری ۱۵ دسی زیمنس بر متر طی ماه اول، دوم و سوم آنکوباسیون به ترتیب باعث کاهش ۲۲، ۲۶ و ۲۷ درصدی MBC نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) گردید (جدول ۴). در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی زیمنس بر متر میزان MBC خاک را طی ماه های اول، دوم و سوم آنکوباسیون به ترتیب ۲۲، ۳۷ و ۳۲ درصد نسبت به شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد (جدول ۴). با این حال شوری ۱۵ دسی زیمنس بر متر طی سه ماه آنکوباسیون کاهش ۲۴، ۴۱ و ۴۱ درصدی MBC را نسبت به خاک شاهد (آلوده غیرشور) به همراه داشت (جدول ۴). نتایج نشان می دهد در حضور ماده آلی با افزایش سطح شوری در خاک آلوده و غیرآلوده میزان MBC کاهش می یابد و اینکه کاهش MBC در شوری های بالا بیشتر از شوری های پایین بود. نتایج معادله بلیس نشان داد اثر متقابل شوری و آلودگی بر MBC در خاک تیمار نشده با بقایای گیاهی در شوری ۷/۵ دسی زیمنس بر متر طی ماه اول مستقل و طی ماه های دوم و سوم پادکرداری بود و در شوری ۱۵ دسی زیمنس بر متر طی سه ماه آنکوباسیون پادکرداری گردید (جدول ۵). مصرف مواد آلی در خاک های شور باعث بهبود ویژگی های میکروبیولوژیکی خاک و افزایش زیست توده میکروبی گردیده است (۲۴).

تنفس (MR) و سرعت تنفس میکروبی (MRR)

نتایج نشان داد تنش شوری و آلودگی کادمیم سبب کاهش تنفس میکروبی گردید ولی افزودن بقایای گیاهی یونجه به خاک افزایش تنفس میکروبی را به همراه داشت (شکل ۱). تنفس میکروبی در خاک های تیمار شده با بقایای گیاهی یونجه همواره بیشتر از تیمار بدون بقایای گیاهی بود و دلیل آن می تواند فراهمی ترکیبات آسان تجزیه شونده در پسماند گیاه یونجه باشد.

۱۵ دسی زیمنس بر متر طی ماه اول، دوم و سوم آنکوباسیون به ترتیب باعث افزایش ۴۵، ۲۷ و ۳۶ درصدی کادمیم قابل جذب نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) گردید (جدول ۲). در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی زیمنس بر متر میزان کادمیم قابل جذب خاک را طی ماه های اول، دوم و سوم آنکوباسیون به ترتیب ۳۰، ۶۶ و ۶۸ درصد نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) افزایش داد و شوری ۱۵ دسی زیمنس بر متر طی سه ماه انجام آزمایش افزایش بیشتر (به ترتیب ۱۱۲، ۹۱ و ۸۲ درصد طی ماه اول، دوم و سوم) کادمیم قابل جذب نسبت به تیمار شاهد را به همراه داشت (جدول ۲). مصرف مواد آلی در خاک آلوده و غیرآلوده موجب ایجاد اثرات متقابل پادکرداری بین شوری و آلودگی گردید (جدول ۳). نتایج نشان می دهد در حضور ماده آلی با افزایش سطح شوری در خاک آلوده و غیرآلوده، فراهمی کادمیم قابل جذب نیز افزایش می یابد و افزایش کادمیم قابل جذب در شوری های بالا بیشتر از شوری های پایین بود. نتایج معادله بلیس نیز این یافته را تأیید می کند (جدول ۳). بنابراین مصرف ماده آلی منجر به تغییر نوع اثر متقابل بین شوری و آلودگی کادمیم از حالت هم کرداری در غیاب ماده آلی به حالت پادکرداری در حضور ماده آلی گردید (جدول ۳). کلر ناشی از نمک NaCl از طریق تشکیل کمپلکس پایدار با کادمیم فراهمی، جذب و حلالیت آن را در خاک افزایش می دهد (۱). مصرف مواد آلی با جذب و غیرمتحرک ساختن کادمیم سبب محدود شدن حلالیت و زیست فراهمی آن می گردد و بدین ترتیب ممکن است از تشکیل کمپلکس کلر- کادمیم محلول جلوگیری نماید. کاربرد مواد اصلاحی آلی می تواند نقش مهمی در کاهش سمیت فلزات سمی خاک های آلوده تحت تنش شوری داشته باشد (۱ و ۲۷).

کربن زیست توده میکروبی (MBC)

طی این آزمایش اثر اصلی شوری، آلودگی و ماده آلی و برهمکنش دو جانبه شوری × آلودگی، شوری × ماده آلی و آلودگی × ماده آلی و همچنین برهمکنش سه جانبه شوری × آلودگی × ماده آلی بر کربن زیست توده میکروبی معنی دار ($p < 0.01$) بود (جدول ۱). در خاک غیرآلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی زیمنس بر متر طی سه ماه آنکوباسیون باعث کاهش ۲۴، ۲۷ و ۱۱ درصدی MBC نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم شد (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی زیمنس بر متر طی ماه اول، دوم و سوم آنکوباسیون به ترتیب باعث کاهش ۴۵، ۵۳ و ۳۵ درصدی MBC نسبت به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) گردید (جدول ۴). در خاک آلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی زیمنس بر متر MBC را به ترتیب ۴۸، ۵۲ و ۳۲ درصد در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) طی ماه اول، دوم و سوم آزمایش کاهش داد و شوری ۱۵ دسی زیمنس بر متر سبب کاهش

جدول ۴- اثر شوری، آلودگی کادمیم و بقایای گیاهی بر میزان کربن زیست توده میکروبی (MBC)، سرعت تنفس میکروبی (MRR) و ضریب ویژه تنفسی (qCO_2). اعداد میانگین (n=4) به همراه خطای معیار (SE) می باشند

Table 4- The effect of plant residue, cadmium pollution and salinity on soil microbial biomass carbon (MBC) content, microbial respiration rate (MRR) and specific respiratory quotient (qCO_2). Values are mean (n = 4) with standard error (SE) of the mean

بقایای گیاهی Plant residue	کادمیم Pollution (mg kg ⁻¹)	شوری Salinity (dS m ⁻¹)	زمان نمونه برداری (روز) Sampling time (day)		
			30	60	90
کربن زیست توده میکروبی MBC (mg kg ⁻¹)					
بدون بقایای گیاهی	0	1.35	139±0.32 ^{Ag}	82.9±0.31 ^{Bf}	58.3±0.40 ^{Cg}
گیاهی		7.5	106±0.41 ^{Ai}	60.2±0.51 ^{Bh}	52.0±0.98 ^{Ch}
Without plant residue		15	76.0±0.19 ^{Aj}	38.7±0.28 ^{Bi}	38.0±0.38 ^{Bi}
	30	1.35	118±0.36 ^{Ah}	73.1±0.48 ^{Bg}	53.0±0.47 ^{Ch}
		7.5	61.0±0.21 ^{Ak}	35.4±0.38 ^{Bj}	36.0±0.14 ^{Bj}
		15	32.5±0.31 ^{Al}	16.7±0.08 ^{Bk}	14.5±0.29 ^{Bk}
با بقایای گیاهی	0	1.35	227±0.45 ^{Aa}	171±0.95 ^{Ba}	115±0.42 ^{Ca}
		7.5	191±0.45 ^{Ac}	109±0.34 ^{Bd}	71.8±0.34 ^{Cd}
		15	176±0.27 ^{Ad}	126±0.73 ^{Bc}	83.4±0.79 ^{Cc}
With plant residue		1.35	208±0.37 ^{Ab}	141±0.40 ^{Bb}	95.7±0.39 ^{Cb}
		7.5	163±0.12 ^{Ae}	89.4±0.52 ^{Be}	64.7±0.44 ^{Ce}
		15	158±0.34 ^{Af}	83.4±0.31 ^{Bf}	56.4±0.28 ^{Cf}
سرعت تنفس میکروبی MRR (mg kg ⁻¹ day ⁻¹)					
بدون بقایای گیاهی	0	1.35	5.38±0.006 ^{Ag}	2.39±0.005 ^{Bg}	1.59±0.006 ^{Cg}
گیاهی		7.5	4.36±0.028 ^{Ai}	1.90±0.006 ^{Bi}	1.28±0.051 ^{Ci}
Without plant residue		15	3.36±0.007 ^{Aj}	1.78±0.007 ^{Bj}	1.15±0.009 ^{Cj}
	30	1.35	5.21±0.008 ^{Ah}	2.15±0.005 ^{Bh}	1.37±0.012 ^{Ch}
		7.5	2.92±0.007 ^{Ak}	1.23±0.009 ^{Bk}	0.90±0.002 ^{Ck}
		15	2.05±0.008 ^{Al}	1.03±0.004 ^{Bl}	0.52±0.004 ^{Cl}
با بقایای گیاهی	0	1.35	9.65±0.008 ^{Aa}	4.76±0.050 ^{Ba}	2.55±0.050 ^{Ca}
		7.5	7.62±0.007 ^{Ac}	4.12±0.004 ^{Bb}	2.43±0.004 ^{Cb}
		15	7.21±0.008 ^{Ad}	3.46±0.021 ^{Bd}	2.20±0.006 ^{Cc}
With plant residue		1.35	7.78±0.004 ^{Ab}	3.53±0.013 ^{Bc}	2.05±0.010 ^{Cd}
		7.5	6.63±0.008 ^{Ae}	2.85±0.004 ^{Be}	2.02±0.004 ^{Ce}
		15	6.41±0.006 ^{Af}	2.81±0.020 ^{Bf}	1.81±0.008 ^{Cf}
ضریب ویژه تنفسی qCO ₂ (μg CO ₂ -C mg ⁻¹ MBC day ⁻¹)					
بدون بقایای گیاهی	0	1.35	38.8±0.06 ^{Ag}	29.0±0.07 ^{Bg}	27.4±0.17 ^{Cd}
گیاهی		7.5	41.2±0.32 ^{Ae}	31.6±0.26 ^{Bf}	24.8±0.44 ^{Ch}
Without plant residue		15	44.4±0.21 ^{Bc}	45.9±0.44 ^{Ab}	30.5±0.32 ^{Ce}
	30	1.35	44.4±0.15 ^{Ac}	29.5±0.22 ^{Bg}	26.1±0.23 ^{Cg}
		7.5	48.2±0.22 ^{Ab}	34.8±0.45 ^{Bd}	25.0±0.03 ^{Ch}
		15	63.1±0.47 ^{Aa}	61.8±0.41 ^{Aa}	35.8±0.52 ^{Ca}
با بقایای گیاهی	0	1.35	42.5±0.11 ^{Ad}	27.8±0.13 ^{Bh}	22.2±0.08 ^{Ci}
		7.5	39.8±0.10 ^{Af}	38.0±0.13 ^{Bc}	33.8±0.13 ^{Cb}
		15	40.9±0.04 ^{Ae}	27.5±0.25 ^{Bh}	26.4±0.27 ^{Cg}
With plant residue	30	1.35	37.4±0.09 ^{Ah}	25.1±0.06 ^{Bi}	21.5±0.17 ^{Cj}
		7.5	40.8±0.07 ^{Ae}	31.8±0.21 ^{Bf}	31.2±0.22 ^{Bd}
		15	40.7±0.12 ^{Ae}	33.7±0.35 ^{Be}	32.3±0.23 ^{Cc}

در هر ستون میانگین های دارای حروف کوچک مشابه، فاقد اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند

در هر ردیف میانگین های دارای حروف بزرگ مشابه، فاقد اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد بین زمان های مختلف بر اساس آزمون LSD هستند

Within each column the means sharing similar lowercase letters do not have significant differences among treatments at 5% level according to the LSD test

Within each row the means sharing similar uppercase letters do not have significant differences at 5% level between different sampling times at 5% level according to the LSD test

جدول ۵- ماهیت نوع اثرات متقابل شوری و آلودگی بر کربن زیست توده میکروبی (MBC) و سرعت تنفس میکروبی (MRR) محاسبه شده بر اساس معادله مستقل بلیس. در خاک‌های تیمار نشده (R0) و تیمار شده (R1) با بقایای گیاهی

Table 5- The nature of interactions between salinity and Cd pollution on soil microbial biomass carbon (MBC) content and microbial respiration rate (MRR) in soils untreated (R0) and treated (R1) with plant residue determined on the basis of the Bliss independence model

Bass independence model							
شوری Salinity (dS m ⁻¹)	تیمار Treatment	۳۰ روز (30 days)		۶۰ روز (60 days)		۹۰ روز (90 days)	
		R0	R1	R0	R1	R0	R1
کربن زیست توده میکروبی							
MBC							
7.5	S	-23.5	-15.8	-27.3	-36.6	-10.8	-37.5
	P	-15.2	-8.52	-11.7	-17.9	-9.43	-16.7
	(PS) _O	-56.1	-22.5	-57.2	-26.5	-38.2	-27.4
	(PS) _P	-35.1	-22.9	-35.8	-48.0	-19.2	-47.9
	CI _{95%}	0.47	0.38	2.00	3.86	1.50	2.18
	t-statistic	45.1	-0.90	15.8	-24.6	7.93	-30.8
	p-statistic	<0.001	0.42	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Interaction	SYN	ADD	SYN	ANT	SYN	ANT
15	S	-45.4	-28.5	-53.3	-47.8	-34.8	-43.7
	P	-15.2	-8.52	-11.7	-17.9	-9.43	-16.7
	(PS) _O	-76.5	-30.6	-79.8	-51.3	-75.1	-50.9
	(PS) _P	-53.7	-34.6	-58.8	-57.2	-41.0	-53.1
	CI _{95%}	0.71	0.48	0.32	3.09	1.56	0.76
	t-statistic	89.2	-18.2	20.6	-3.06	42.2	-3.06
	p-statistic	<0.001	<0.001	<0.001	0.04	<0.001	0.04
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT
سرعت تنفس میکروبی							
MRR							
7.5	S	-18.8	-21.0	-20.5	-13.4	-19.2	-4.83
	P	-3.12	-19.4	-9.95	-25.8	-13.7	-19.5
	(PS) _O	-45.6	-25.3	-48.5	-27.3	-43.6	-13.6
	(PS) _P	-21.4	-36.3	-28.4	-35.7	-30.3	-23.4
	CI _{95%}	0.37	0.33	1.12	1.58	0.59	0.75
	t-statistic	38.5	-66.9	38.3	-12.0	16.3	-19.1
	p-statistic	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT
15	S	-37.6	-31.2	-25.9	-40.2	-27.5	-20.9
	P	-3.12	-19.4	-9.95	-25.8	-13.7	-19.5
	(PS) _O	-61.9	-33.6	-57.0	-41.1	-67.5	-28.7
	(PS) _P	-39.5	-44.6	-33.3	-55.6	-37.4	-36.3
	CI _{95%}	0.47	0.21	0.59	1.37	0.96	1.15
	t-statistic	71.5	-106	45.8	-38.8	65.6	-12.7
	p-statistic	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT

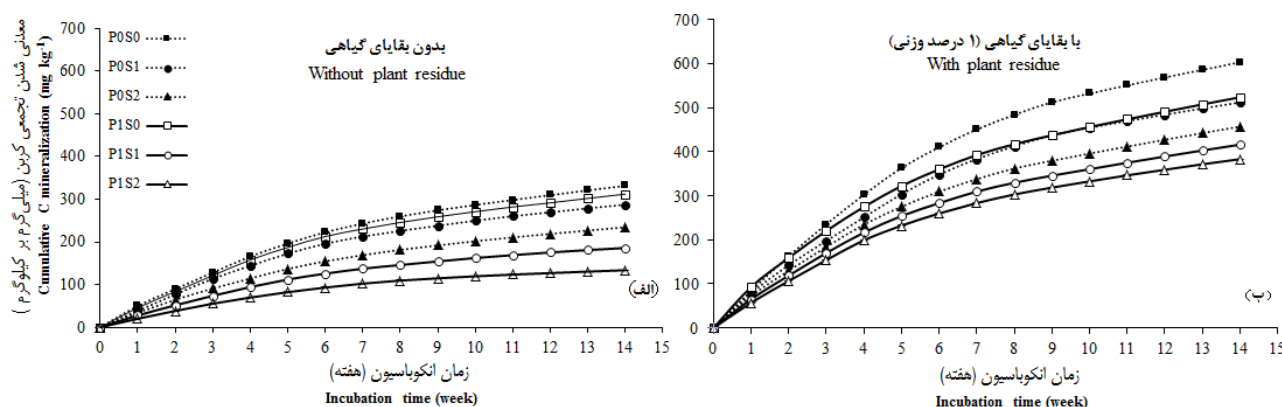
S خاک شور به تنهایی، P خاک آلوده به تنهایی، (PS)_o اثر مشترک مشاهده شده شوری و آلودگی، (PS)_p اثر مشترک پیش بینی شده شوری و آلودگی، CI_{95%} حدود اطمینان در سطح احتمال ۹۵

درصد، t statistics و t statistics (two-tail) آماره t و p در آزمون t test Interaction نوع اثر متقابل، SYN (هم کرداری)، ANT (پادکرداری) و ADD (مستقل)

S saline soil, P Cd-polluted soil, (PS)_o the observed effect of salinity and pollution, (PS)_p the predicted effect of salinity and pollution, CI_{95%} confidence interval at 95%; t-statistic student's t test; p-statistic two-tail p value; SYN synergistic, ANT antagonistic, ADD additive

هموار می‌باشد. کاهش سرعت معدنی شدن کربن در تیمار بدون بقایای گیاهی می‌تواند مربوط به محدودیت مقدار کربن باشد. نتایج رئیسی (۱۹) نشان داد خاک‌های تیمار شده با پسماند گندم و یونجه دارای میزان معدنی شدن تجمعی کربن بالاتری نسبت به خاک تیمار نشده بوده است.

این بقایا به دلیل دارا بودن کربن آلی قابل جذب فراوان و عناصر غذایی بالا مانند نیتروژن (نسبت کربن به نیتروژن پایین) فعالیت میکروبی را تحریک و موجب تولید بیشتر دی‌اکسید کربن شده‌اند. پس از ۱۴ هفته انکوباسیون و اندازه‌گیری میزان تنفس روند معدنی شدن کربن در خاک‌های دارای بقایای گیاهی تقریباً دارای شیب



شکل ۱- روند معدنی شدن تجمع‌ی کربن در سطوح مختلف شوری و کادمیم در خاک‌های الف) بدون بقایای گیاهی و ب) تیمار شده با بقایای گیاهی (n=۴). آلودگی (P0) و (P1) میلی گرم بر کیلوگرم خاک، شوری (S0) شاهد، (S1) ۷/۵ و (S2) ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر

Figure 1- The patterns of cumulative carbon (C) mineralization at different levels of salinity and cadmium in soils untreated (a) and treated (b) with plant residue (n=4). P0 unpolluted and P1 Cd-polluted (30 mg kg⁻¹) soil; S0 control, S1 7.5 and S2 15 dS m⁻¹

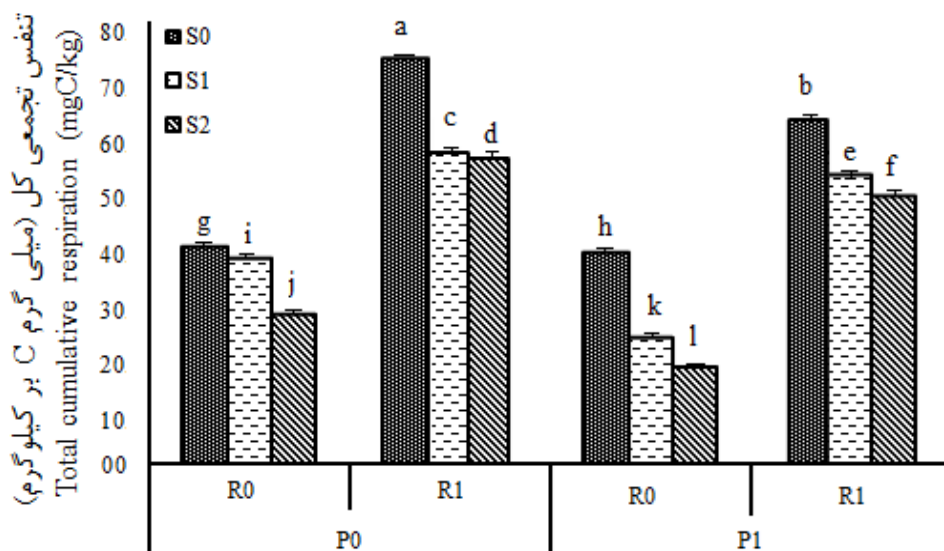
سرعت تنفس میکروبی نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) گردید (جدول ۴). چاودهری و همکاران (۶) گزارش کردند میزان بالای شوری باعث کاهش تنفس خاک می‌گردد. در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر میزان سرعت تنفس میکروبی خاک را طی ماه‌های اول، دوم و سوم انکوباسیون به ترتیب ۱۵، ۱۹ و ۱ درصد نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه‌های اول، دوم و سوم به ترتیب کاهش ۱۸، ۲۰ و ۱۳ درصدی سرعت تنفس میکروبی را نسبت به تیمار شاهد به همراه داشت (جدول ۴). بر اساس نتایج به دست آمده ماده آلی غلظت کادمیم قابل جذب را کاهش داده است (جدول ۲) و بدین ترتیب در هر دو سطح شوری منجر به بروز اثر متقابل پادکرداری بین شوری و کادمیم گردید (جدول ۵). اخیراً، عثمان (۲۷) گزارش کرد که شوری ناشی از نمک کلرید سدیم و سمیت ناشی از کادمیم تنفس میکروبی را در خاک آهکی کاهش داد در حالی که مصرف کود دامی افزایش تولید CO₂ را به همراه داشت. در این آزمایش همبستگی منفی و معنی‌دار بین کادمیم قابل جذب و تنفس میکروبی مشاهده شد ($p < 0.01$, $r = -0.61$). به بیان دیگر، کاهش تنفس میکروبی خاک بر اثر شوری به دلیل افزایش غلظت کادمیم قابل جذب است.

نتایج نشان داد اثر اصلی شوری، آلودگی و ماده آلی و برهمکنش دو جانبه شوری × آلودگی، شوری × ماده آلی و آلودگی × ماده آلی و همچنین برهمکنش سه جانبه شوری × آلودگی × ماده آلی بر تنفس تجمع‌ی کل معنی‌دار ($p < 0.01$) بود (نتایج گزارش نشده‌اند). مقایسه تنفس کل بین تمامی تیمارها و سطوح مختلف شوری و آلودگی نشان داد که کمترین میزان تنفس در عدم حضور بقایای گیاهی مربوط به

طی این آزمایش اثر اصلی شوری، آلودگی و ماده آلی و برهمکنش دو جانبه شوری × آلودگی، شوری × ماده آلی و آلودگی × ماده آلی و همچنین برهمکنش سه جانبه شوری × آلودگی × ماده آلی بر سرعت تنفس میکروبی معنی‌دار ($p < 0.01$) بود (جدول ۱). در خاک غیرآلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون باعث کاهش ۱۹، ۲۰ و ۱۹ درصدی سرعت تنفس میکروبی نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم شد (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون باعث کاهش بیشتر (به ترتیب ۳۷، ۲۵ و ۲۸ درصدی طی اول، دوم و سوم) سرعت تنفس میکروبی نسبت به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (جدول ۴). در خاک آلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر سرعت تنفس میکروبی خاک را به ترتیب ۴۳، ۴۴ و ۳۴ درصد در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) طی ماه اول، دوم و سوم آزمایش کاهش داد و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون سبب کاهش بیشتر (به ترتیب ۶۱، ۵۲ و ۶۲ درصدی) سرعت تنفس میکروبی خاک نسبت به تیمار شاهد گردید (جدول ۴). بررسی نتایج حاصل از معادله بلیس نشان داد اثر متقابل شوری و آلودگی بر سرعت تنفس میکروبی در خاک تیمار نشده با بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری هم‌کرداری است (جدول ۵). همین‌طور در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه دوره آزمایش به ترتیب کاهش ۲۱، ۱۳ و ۵ درصدی سرعت تنفس میکروبی را نسبت به خاک شاهد (غیرشور غیرآلوده) طی ماه اول، دوم و سوم به همراه داشت (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون به ترتیب باعث کاهش ۲۵، ۲۷ و ۱۴ درصدی

افزایش را می‌توان به دسترسی بیشتر سوبسترا و احتمالاً بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک برای ادامه فعالیت بیشتر ریزجانداران نسبت داد.

تیمار آلوده و شوری سطح سه و بیشترین میزان تنفس در حضور بقایای گیاهی مربوط به تیمار غیرآلوده غیرشور بود (شکل ۲). ماده آلی به مقدار زیادی تنفس میکروبی خاک را افزایش داده است و این



شکل ۲- اثر بقایای گیاهی، آلودگی کادمیم و شوری بر تنفس تجمعی کل (n=4)

آلودگی (P0) و (P1) ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک، شوری (S0) شاهد، (S1) ۷/۵ و (S2) ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و (R0) بدون بقایای گیاهی و (R1) ۱ درصد بقایای گیاهی یونجه. حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند. خطای معیار به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است

Figure 2- The effect of plant residue, cadmium pollution and salinity on total cumulative respiration. P0 unpolluted and P1 Cd-polluted (30 mg kg⁻¹) soil; S0 control, S1 7.5 and S2 15 dS m⁻¹; R0 without plant residue and R1 with alfalfa residue (1%, w/w). similar letters do not have significant differences among treatments at 5% level according to the LSD test. The vertical lines shown as standard error

به خاک شاهد (آلوده غیرشور) به ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم افزایش داد (جدول ۴). نتایج حاصل از معادله بلیس نشان داد اثر متقابل شوری و آلودگی بر qCO_2 در خاک تیمار نشده با بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری طی سه ماه انکوباسیون هم‌کرداری بود (جدول ۶).

در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه‌های دوم و سوم آزمایش به ترتیب باعث افزایش ۳۷ و ۵۲ درصدی و طی ماه اول کاهش ۶ درصدی qCO_2 نسبت به خاک شاهد (غیرشور غیرآلوده) گردید (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه اول کاهش ۴ درصدی و طی ماه سوم افزایش ۱۹ درصدی qCO_2 را نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به همراه داشت و در ماه دوم کاهش غیرمعنی‌دار بود (جدول ۴). پژوهشگران پیشین نیز گزارش کردند که در خاک‌های شور qCO_2 افزایش می‌یابد (۵ و ۲۰). دلیل این افزایش کاهش زیست‌توده میکروبی یا رشد میکروبی و افزایش مصرف انرژی است. در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر

اثر شوری و کادمیم بر ضریب ویژه تنفسی (qCO_2)

اثر اصلی شوری، آلودگی و ماده آلی و برهمکنش دو جانبه شوری × آلودگی، شوری × ماده آلی و آلودگی × ماده آلی و همچنین برهمکنش سه جانبه شوری × آلودگی × ماده آلی بر qCO_2 معنی‌دار بود ($p < 0.001$) (جدول ۱). در خاک غیرآلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه‌های اول و دوم انکوباسیون باعث افزایش ۶ و ۹ درصدی و طی ماه سوم باعث کاهش ۹ درصدی qCO_2 نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون افزایش بیشتر (به ترتیب ۱۴، ۵۹ و ۱۱ درصد) qCO_2 را نسبت به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) به همراه داشت (جدول ۴). در خاک آلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه اول و دوم باعث افزایش به ترتیب ۹ و ۱۸ درصد و در ماه سوم باعث کاهش ۴ درصدی qCO_2 نسبت به خاک شاهد (آلوده غیرشور) شد، اما این کاهش معنی‌دار نبود (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر qCO_2 را طی سه ماه انکوباسیون ۴۲، ۱۱۰ و ۳۷ درصد نسبت

میزان qCO_2 خاک را طی سه ماه انکوباسیون به ترتیب ۹، ۲۷ و ۴۵ نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) افزایش داد و شوری ۱۵ دسی زیمنس بر متر طی ماه اول، دوم و سوم انکوباسیون به ترتیب باعث

جدول ۶- ماهیت اثرات متقابل (هم‌کرداری و پادکرداری) بین شوری و آلودگی کادمیم بر ضریب ویژه تنفسی (qCO_2) محاسبه شده بر اساس معادله مستقل بلیس در خاک‌های تیمار نشده (R0) و تیمار شده (R1) با بقایای گیاهی

Table 6- The nature of interactions between salinity and Cd pollution on specific respiratory quotient (qCO_2), estimated based on the Bliss independence model in soils untreated (R0) and treated (R1) with plant residue

شوری	تیمار	۳۰ روز (30 days)		۶۰ روز (60 days)		۹۰ روز (90 days)	
Salinity (dS m ⁻¹)	Treatment	R0	R1	R0	R1	R0	R1
		ضریب ویژه تنفسی qCO ₂					
7.5	S	-23.5	-6.23	-27.3	+36.6	-10.9	+52.2
	P	-15.2	-11.9	-11.7	-9.60	-9.43	-3.32
	(PS) _o	-56.1	-3.65	-57.2	-1.08	-38.2	+19.0
	(PS) _p	-35.2	-17.4	-35.9	+23.5	-19.3	+47.1
	CI _{95%}	0.48	0.32	2.00	2.84	1.50	3.87
	t-statistic	58.7	-38.7	11.4	-52.1	11.3	-25.6
	p-statistic	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Interaction	SYN	ANT	SYN	SYN	SYN	SYN
15	S	-45.4	-3.86	-53.3	+14.6	-34.9	+40.6
	P	-15.2	-11.9	-11.7	-9.60	-9.43	-3.32
	(PS) _o	-76.5	-4.21	-79.9	+21.0	-75.1	+45.3
	(PS) _p	-53.7	-15.3	-58.8	+3.61	-41.0	+35.9
	CI _{95%}	0.71	0.91	0.32	4.03	1.57	3.30
	t-statistic	84.2	-33.7	22.3	-1.21	51.2	2.37
	p-statistic	<0.001	<0.001	<0.001	0.271	<0.001	0.055
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ADD	SYN	ADD

S خاک شور به تنهایی، P خاک آلوده به تنهایی، (PS)_o اثر مشترک مشاهده شده شوری و آلودگی، (PS)_p اثر مشترک پیش‌بینی شده شوری و آلودگی، CI_{95%} حدود اطمینان در سطح احتمال ۹۵ درصد، t statistics و p value (two-tail) آماره t و p در آزمون t test Interaction نوع اثر متقابل، SYN (هم‌کرداری)، ANT (پادکرداری) و ADD (مستقل) S saline soil, P Cd-polluted soil, (PS)_o the observed effect of salinity and pollution, (PS)_p the predicted effect of salinity and pollution, CI_{95%} confidence interval at 95%; t-statistic student's t test; p-statistic two-tail p value; SYN synergistic, ANT antagonistic, ADD additive

میکروبی (تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی) خاک داشتند و کاهش این خصوصیات در تنش شوری بیشتر از تنش آلودگی است. در غیاب بقایای گیاهی شوری سبب افزایش حلالیت و زیست‌فراهمی کادمیم شد و به طور افزایشده کاهش بیشتر تنفس و زیست‌توده میکروبی و افزایش ضریب ویژه تنفسی خاک را به همراه داشت. این در حالی است که افزودن بقایای گیاهی باعث تعدیل اثرات منفی تنش‌ها (شوری و آلودگی) در خاک شد. به همین دلیل اثر مشترک شوری و آلودگی در خاک‌های تیمار شده با بقایای گیاهی کاهنده بود. به طور کلی مصرف مواد آلی در خاک‌های آلوده و شور باعث کاهش نسبی کادمیم قابل جذب و سمیت ناشی از آن و بهبود نسبی و یا کامل فعالیت میکروبی خاک می‌شود. لذا پیشنهاد می‌گردد از مواد آلی برای بهبود رشد و فعالیت میکروبی خاک‌های آلوده شور استفاده شود.

بنابراین ماده آلی تأثیر متفاوت و معنی‌داری بر qCO_2 خاک داشت (جدول ۶). نتایج حاصل از معادله بلیس نشان داد اثر متقابل شوری و آلودگی بر qCO_2 در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی و شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه دوم و سوم انکوباسیون هم‌کرداری ولی طی ماه اول پادکرداری بود (جدول ۶). همچنین در شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر این اثر مشترک طی ماه اول انکوباسیون پادکرداری و طی ماه‌های دوم و سوم مستقل بود (جدول ۶). در این آزمایش همبستگی مثبت و معنی‌دار ($r=0.52$, $P<0.01$) بین کادمیم قابل جذب و qCO_2 مشاهده شد.

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج نشان داد شوری ناشی از NaCl تحرک و زیست‌فراهمی کادمیم را افزایش می‌دهد و این اثر شوری در خاک نیز منعکس گردید. تنش شوری و آلودگی اغلب اثر بازدارندگی بر خصوصیات

منابع

- 1- Abbaspour A., Kalbasi K., and Hajrasuliha S. 2008. Effect of organic matter and salinity on ethylenediaminetetraacetic acid-extractable and solution species of cadmium and lead in three agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39:7-8.
- 2- Acosta J.A., Jansen B., Kalbitz K., Faz A., and Martinez S. 2011. Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere*, 85:1318-1324.
- 3- Aghababaei F., Raiesi F., and Hosseinpour A. 2014. The combined effects of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi on microbial biomass and enzyme activities in a calcareous soil spiked with cadmium. *Applied Soil Ecology*, 75:33-42.
- 4- Anderson J.P.E. 1982. Soil respiration. p.831-871. In: A.L. Page, R.H. Miller. (Eds.). *Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. ASA, Madison, WI.
- 5- Anderson T.H., and Domsch K.H. 1993. The metabolic quotient for CO₂ (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 25:393-395.
- 6- Chowdhury N., Marschner P., and Burns R.G. 2011. Soil microbial activity and community composition: impact of changes in matric and osmotic potential. *Soil Biology and Biochemistry*, 43:1229-1236.
- 7- Dai J., Becquer T., Rouiller J.H., Reversat G., Bernhard-Reversat F., and Lavelle P. 2004. Influence of heavy metals on C and N mineralization and microbial biomass in Zn-, Pb-, Cu-, and Cd-contaminated soils. *Applied Soil Ecology*, 25:99-109.
- 8- Dilly O., and Munch J.C. 1996. Microbial biomass content, basal respiration and enzyme activities during the course of decomposition of leaf litter in a black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn) forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 28:1073-1081.
- 9- Effron D., Horra A.M., Defrieri R.L., Fontanive V., and Palma R.M. 2004. Effect of cadmium, copper and lead on different enzyme activities in a native forest soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35:1309-1321.
- 10- Elgharabli A., and Marschner P. 2011. Microbial activity and biomass and N and P availability in a saline sandy loam amended with inorganic nitrogen and lupin residues. *European Journal of Soil Biology*, 47:310-315.
- 11- Herrick J.E. 2000. Soil quality: an indicator of sustainable land management. *Applied Soil Ecology*, 15:75-83.
- 12- Koizumi Y., and Iwami S. 2014. Mathematical modeling of multi-drugs therapy: a challenge for determining the optimal combinations of antiviral drugs. *Theoretical Biology and Medical Modelling*, 41:1-9.
- 13- Landi L., Renella G., Moreno J.L., Falchini L., and Nannipieri P. 2000. Influence of cadmium on the metabolic quotient, L-D-glutamic acid respiration ratio and enzyme activity: microbial biomass ratio under laboratory conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 32:8-16.
- 14- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1987. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42:421-428.
- 15- Madrid F., Lopez R., and Cabera F. 2007. Metal accumulation in soil after application of municipal solid waste compost under intensive farming condition. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 119:249-256.
- 16- Melero S., Madejon E., Ruiz J.C., and Herencia J.F. 2007. Chemical and biochemical properties of a clay soil under dryland agriculture system as affected by organic fertilization. *European Journal of Agronomy*, 26:327-334.
- 17- Moreno J.L., Hernandez T., Perez A., and Garcia C. 2002. Toxicity of cadmium to soil microbial activity: effect of sewage sludge addition to soil on the ecological dose. *Applied Soil Ecology*, 21:149-158.
- 18- Muhling K.H., and Lauchli A. 2003. Interaction of NaCl and Cd stress on compartmentation pattern of cations, antioxidant enzymes and proteins in leaves of two wheat genotypes differing in salt tolerance. *Plant and Soil*, 253:219-231.
- 19- Raiesi F. 2007. The conversion of overgrazed pastures to almond orchards and alfalfa cropping system may favor microbial indicators of soil quality in central Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121:309-318.
- 20- Rasul G., Appuhn A., Muller T., Joergensen R.G. 2006. Salinity-induced changes in the microbial use of sugarcane filter cake added to soil. *Applied Soil Ecology*, 31:1-10.
- 21- Rietz D.N., and Haynes R.J. 2003. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 35:845-854.
- 22- Shentu J.L., He Z.L., Yang X.E., and Li T.Q. 2008. Microbial activity and community diversity in a variable charge soil as affected by cadmium exposure levels and time. *Journal Zhejiang University Science B*, 9:250-260.
- 23- Tejada M., Garcia C., Gonzalez J.L., and Hernandez M.T. 2006. Use of organic amendment as a strategy for saline

- soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38:1413-1421.
- 24- Tejada M., Gonzalez J.L., Garcia-Martinez A.M., and Parrado J. 2008. Effect of different green manures on soil biological properties and maize yield. *Bioresource Technology*, 99:1758-1767.
 - 25- Thomas E.Y., Omueti J.A.I., and Ogundayomi O. 2012. The Effect of phosphate fertilizer on heavy metal in soils and *Amaranthus caudatus*. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 3:145-149.
 - 26- Tripathi S., Kumari S., Chakraborty A., Gupta A., Chakrabarti K., and Bandyapadhyay B.K. 2006. Microbial biomass and its activities in salt-affected coastal soils. *Biology and Fertility of Soils*, 42:273-277.
 - 27- Usman A.R.A. 2015. Influence of NaCl-induced salinity and Cd toxicity on respiration activity and Cd availability to barley plants in farmyard manure-amended soil. *Applied and Environmental Soil Science*, (doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/483836>).
 - 28- Usman A.R.A., Kuzyakov Y., and Stahrk L.A. 2005. Effect of immobilizing substances and salinity on heavy metals availability to wheat grown on sewage sludge-contaminated soil. *Soil and Sediment Contamination*, 14:329-344.
 - 29- Vance E.D., Brookes P.C., and Jenkinson D.S. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19:703-707.
 - 30- Weggler-Beaton K., McLaughlin M.J., and Graham R.D. 2000. Salinity increases cadmium uptake by wheat and Swiss chard from soil amended with biosolids. *Australian Journal of Soil Research*, 38:37-46.
 - 31- Wichern J., Wichern F., and Joergensen R.G. 2006. Impact of salinity on soil microbial communities and the decomposition of maize in acidic soils. *Geoderma*, 137:100-108.
 - 32- Zhao W., Sachsenmeier K., Zhang L., Sult E., Hollingsworth R.E., and Yang H. 2014. A new bliss independence model to analyze drug combination data. *Journal of Biomolecular Screening*, 19:817-821.



Interactive Effects of Salinity and Cadmium Pollution on Microbial Respiration and Biomass in a Calcareous Soil Treated with Plant Residue

E. Sadeghi^{1*} - F. Raiesi² - A. Hossienpur³

Received: 08-01-2017

Accepted: 06-11-2017

Introduction: Soil, as an important component of terrestrial ecosystems, plant growth media, and a habitat of diverse living organisms commonly encounters a variety of abiotic stresses. Soil microorganisms play an important role in maintaining soil quality and functioning, since they are responsible for the decomposition of dead organic material, nutrient cycling and degradation of hazardous organic pollutants. Metal toxicity and salinity are the major abiotic stresses affecting soil microbial activity and community structure in many areas of the world, in particular arid regions. Anthropogenic activities have increased the concentration of heavy metals and soluble salts in soil, resulting in a major constrain for soil microbial performance and functions. Furthermore, soil microbial activity and biochemical processes are often limited by substrate availability in arid areas due to the low organic inputs. Although the individual effects of salinity and metal toxicity stresses on soil biological activity are generally well-known, their combined effects on microbial growth, population and functions are largely uncertain. The main aim of this study was to investigate the interactive effects of salinity and cadmium (Cd) Pollution on microbial respiration and biomass in a calcareous soil treated with plant residue. It was hypothesized that salinity would increase mobility and availability of Cd with subsequent reductions in microbial activity and biomass, and that addition of plant residue would modify these salinity effects.

Materials and Methods: This study was conducted under controlled laboratory conditions at Shahrekord University. A factorial experiment with two levels of cadmium (0 and 30 mg kg⁻¹), three levels of salinity (1.35, 7.5 and 10 dS m⁻¹) and two levels of plant residue (with and without alfalfa residue) was conducted using a completely randomized design with four replications. Using cadmium chloride salt, the soil was contaminated, and subsequently amended with alfalfa residue (1%, w/w). After thorough mixing of soil and plant residue, salinity treatments were applied using NaCl salt. To reactivate the microbial population and for the aging effect, soil moisture was set at 70% of field capacity, and containers were pre-incubated at room temperature for 4 weeks. The samples were then incubated at 25±1 °C for 98 days. Soil carbon (C) mineralization (microbial respiration) was measured weekly, and available Cd and microbial biomass C were measured at monthly intervals. In this experiment, the Bliss independence model was used to determine the type and nature of the interaction between salinity and pollution (synergistic and antagonistic).

Results and Discussion: The results showed that NaCl salinity increased the concentration of soil available Cd in both polluted and unpolluted soils over the experimental period, and the increases were greater at high than low salinity levels. This effect of salinity was less pronounced in residue-amended and unamended soils. In general, a strong synergistic effect of both stresses upon Cd availability was observed in residue-unamended soils while this effect was mostly antagonistic in residue-amended soils. This indicates that addition of plant residue to enhance soil organic matter may indirectly repress or lower salinity effect on Cd toxicity. Soil salinity decreased microbial biomass C and respiration with subsequent increases in specific respiratory quotient due to the increases in Cd solubility and availability. However, the changes in microbial properties were much lower in residue-amended and unamended soils. Addition of plant residue decreased the negative effects of both the individual and combined salinity and Cd pollution on microbial biomass and respiration. The interactive effect of these two stresses was mainly synergistic in residue-treated soils while it was antagonistic in residue-untreated soils. Overall, a strong synergistic effect occurred when both stresses were combined in the absence of plant residue while this effect was antagonistic in the presence of plant residue.

Conclusion: This study provided evidence that salinity could synergistically increase the mobility, bio-availability, and toxicity of Cd in Cd-polluted soils with C limitation. This was reflected by synergistic reductions in soil microbial biomass and respiration. However, addition of plant residue to increase soil organic matter lowered this effect of salinity, resulting in the antagonistic effects of salinity and pollution on soil microbial biomass and respiration. The reason for increase in the microbial activity in soils treated with plant residue was the increase of available substrate. As a result, using the plant residue increased the stimulatory effect of microbial activity. These findings point to the importance of providing adequate organic residues to

1, 2 and 3- M.Sc. Student and Professors, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Iran, Respectively
(* - Corresponding Author Email: el.sadeghi70@gmail.com)

enhance soil microbial performance and agricultural sustainability in polluted soils under salinity stress. However, further information on responses of microbial indicators to the joint effect of salinity and Cd toxicity is required.

Keywords: Interactions, Metal availability, Microbial biomass, Microbial respiration Pollution, Salinity



افزایش عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان با مصرف تلفیقی فسفر و لجن فاضلاب در شرایط آبیاری مطلوب و محدود

سولماز کاظم علیلو^{۱*} - نصرت اله نجفی^۲ - عادل ریحانی تبار^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳

چکیده

برای بررسی تأثیر لجن فاضلاب (SS) و سوپرفسفات تریپل (TSP) بر عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان روغنی (*Helianthus annuus* L.) در شرایط آبیاری مطلوب و محدود، آزمایشی به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی طی دو سال در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خوی و در شرایط مزرعه‌ای انجام شد. عامل‌های آزمایش شامل زمان آبیاری در دو سطح (آبیاری مطلوب و محدود به ترتیب پس از ۶۰ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشت تبخیر کلاس A)، TSP در سه سطح (صفر، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار)، SS در چهار سطح (صفر، ۱۴/۲، ۲۸/۴ و ۵۶/۷ تن در هکتار) و سال در دو سطح (۱۳۹۳ و ۱۳۹۴) با سه تکرار بودند. نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر سال به استثنای وزن هزار دانه، تعداد دانه در بوته و درصد پوکی بر سایر صفات معنادار بود. با وجود اینکه آبیاری محدود (تنش کم‌آبی) سبب افزایش معنادار درصد پوکی شد ولی وزن هزار دانه، وزن و تعداد دانه در بوته، قطر طبق و عملکرد دانه نسبت به شرایط آبیاری مطلوب به طور معناداری کاهش یافتند. بیشترین وزن هزار دانه، وزن و تعداد دانه در بوته، قطر طبق و عملکرد دانه و کمترین درصد پوکی در شرایط آبیاری مطلوب از تیمار تلفیقی ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS در هکتار و در شرایط آبیاری محدود از تیمارهای تلفیقی ۱۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS در هکتار و ۵۶/۷ تن SS به تنهایی به دست آمد. نتایج این تحقیق نشان داد که مصرف تلفیقی TSP و SS در کاهش اثرهای منفی تنش خشکی در آفتابگردان مؤثر بود. برای کاهش مصرف کودهای شیمیایی، افزایش عملکرد دانه آفتابگردان و توسعه کشاورزی پایدار، در شرایط آبیاری مطلوب، مصرف تلفیقی ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS در هکتار و در شرایط آبیاری محدود، مصرف ۱۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS در هکتار می‌تواند در شرایط مشابه توصیه شود.

واژه‌های کلیدی: تنش کم‌آبی، دانه‌های روغنی، کشاورزی پایدار، مدیریت تلفیقی تغذیه گیاه

مقدمه

است که هر چند به دلیل داشتن سیستم ریشه‌ای قوی نسبتاً مقاوم به خشکی است ولی به دلیل تولید زیست‌توده و رشد سبزینه‌ای بالا نیاز آبی زیادی دارد (۲۱). تنش کم‌آبی مهمترین تنش غیرزیستی در دنیا است که تولید محصول به ویژه در ایران را که دارای اقلیم خشک و نیمه خشک است محدود می‌کند (۶۴). تنش کم‌آبی عملکرد دانه و اجزای عملکرد طبق آفتابگردان یعنی وزن هزار دانه، وزن و تعداد دانه در طبق، قطر طبق و درصد پوکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد چون این صفات علاوه بر رقم به عوامل مختلف مؤثر در رشد (شرایط اقلیمی و خاک) نیز بستگی دارند (۱۸). تنش کم‌آبی با بسته نگه داشتن روزنه‌ها و کاهش سطح برگ آفتابگردان، میزان فتوسنتز و انتقال مواد پرورده به دانه‌ها را کاهش داده در نتیجه عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد و وزن دانه پر در بوته را کاهش می‌دهد (۳۲). یگاپان و همکاران (۷۳) گزارش کردند که تنش خشکی از طریق کاهش تعداد برگ، پیری زودرس برگ‌ها، کاهش قطر طبق، سطح برگ و وزن هزار دانه سبب

در میان محصولات کشاورزی، دانه‌های روغنی به دلیل کاربرد فراوان در تغذیه انسان و مصرف کنجاله آنها در تغذیه دام و طیور و مصارف متعدد صنعتی از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند و پس از غلات دومین ذخایر غذایی جهان را تشکیل می‌دهند؛ اما در حال حاضر در ایران با وجود اراضی وسیع قابل کشت، متأسفانه ۹۰ درصد روغن خوراکی مورد نیاز از محل واردات تأمین و تنها ۱۰ درصد روغن در کشور تولید می‌شود (۱۳). آفتابگردان از مهمترین گیاهان دانه روغنی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشجویان گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تبریز

(*)- نویسنده مسئول: (Email: solmazalilo@yahoo.com)

DOI: 10.22067/jsw.v31i6.61402

کاهش عملکرد دانه در آفتابگردان شد.

علاوه بر این، هنگامی که گیاهان با تنش خشکی مواجه می‌شوند، از تنش کمبود عناصر غذایی به دلیل ارتباط نزدیک بین رطوبت خاک و فراهمی عناصر غذایی رنج می‌برند. برای مثال، فسفر رشد ریشه را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد؛ بنابراین، در شرایط محدودیت در پخشیدگی فسفر، گیاه به دلیل کاهش رشد ریشه‌ها، قادر به جذب آب از اعماق خاک نیست. بنابراین، چنین گیاهانی نسبت به گیاهان دارای فسفر کافی و با سیستم ریشه‌ای گسترده از خشکی آسیب بیشتری می‌بینند (۲۷). برخی مطالعات نشان داده است که افزودن فسفر می‌تواند اثرهای منفی تنش خشکی بر عملکرد گیاهان را کاهش دهد (۲۳ و ۳۰). برای مثال، مطلبی‌فرد و همکاران (۵۰) گزارش کردند که تنش خشکی عملکرد و اجزای عملکرد سبب‌زمینی، کارایی مصرف آب و غلظت نشاسته را کاهش داد ولی مصرف کود فسفر این ویژگی‌ها را بهبود بخشید. لذا، برای جلوگیری از کاهش عملکرد در شرایط تنش خشکی، استفاده از کودهای شیمیایی ضروری به نظر می‌رسد. مصرف کودهای شیمیایی به دلیل سهولت حمل و نقل، مصرف آسان و افزایش عملکرد گیاهان در کوتاه‌مدت قابل توجه است ولی تقاضای زیاد انرژی برای تولید کودهای شیمیایی، پتانسیل آنبوایی نیترات، عدم بهبود وضعیت حاصلخیزی خاک در طولانی‌مدت و توسعه کشاورزی پایدار از جمله مسائلی است که مصرف آن‌ها را محدود می‌کند. برای مثال، مصرف بیش از حد کودهای فسفوری علاوه بر تجمع فسفر سبب افزایش هزینه‌ها، کاهش جمعیت قارچ میکوریزا، رقابت در جذب عناصر کم‌مصرف به‌ویژه روی و از همه مهمتر تجمع بیش از حد کادمیم در خاک و گیاهان می‌شود (۱۵).

مقدار و کیفیت مواد آلی خاک بر اکثر فرآیندهای مربوط به سلامت خاک مانند نگهداری رطوبت، نفوذپذیری، فراهمی عناصر غذایی و همچنین سلامت گیاه اثر دارد. مصرف پسماندهای آلی، کودهای دامی و کود سبز از طریق اثر بر بیماری‌زها، بهبود تغذیه و رشد گیاه، تحمل گیاهان به انواع تنش‌ها را افزایش می‌دهد (۲۵). میزان مواد آلی موجود در لجن فاضلاب شهری معمولاً بیش از ۵۰ درصد وزن خشک آن است (۶۷). از آنجایی که لجن فاضلاب منبع خوبی از مواد آلی و عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف می‌باشد، در اکثر کشورها از آن به عنوان جانشینی برای کودهای شیمیایی، کاهش هزینه‌های تولید، افزایش مواد آلی و حاصلخیزی خاک استفاده می‌شود (۱۹ و ۲۰). استفاده از لجن فاضلاب در کشاورزی علاوه بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از دیدگاه زیست محیطی اهمیت زیادی دارد، چون که بهترین راه برای دفع نهایی زباله و مدفون کردن آن در خاک است و از این طریق به حفظ ذخایر عناصر غذایی جهان نیز کمک می‌کند (۱۶). بررسی‌ها نشان داده است که مصرف لجن فاضلاب در کشاورزی عملکرد گیاهان را افزایش می‌دهد (۶ و ۶۲). مصرف کودهای آلی با کاهش مصرف کودهای شیمیایی و جلوگیری

از آلودگی محیط زیست یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای توسعه کشاورزی پایدار است. اکثر بررسی‌ها نشان داده است که کودهای شیمیایی و کودهای آلی به‌تنهایی نمی‌توانند سبب تولید پایدار شوند. لوبو و گراسی (۴۳) گزارش کردند که مصرف لجن فاضلاب در مقادیر زیاد عملکرد آفتابگردان را به طور معناداری افزایش داد ولی مقدار آن کمتر از عملکرد به‌دست آمده از مصرف کودهای شیمیایی بود. آنان نتیجه‌گیری کردند که لازم است در کنار لجن فاضلاب از کودهای شیمیایی نیز به‌صورت تلفیقی استفاده شود. بنابراین، بهترین روش برای افزایش حاصلخیزی خاک و تولید محصولات کشاورزی، مدیریت تلفیقی تغذیه گیاهان (IPNM)^۱ است (۶۵). مصرف تلفیقی کودهای شیمیایی و آلی با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش فعالیت‌های میکروبی و بهبود چرخه عناصر غذایی در خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و مواد آلی خاک، کاهش مصرف نهاده‌ها، کاهش میزان نیترات در خاک و افزایش کارایی کودهای شیمیایی، عملکرد گیاهان را افزایش می‌دهند (۸ و ۴۸). توماس و همکاران (۷۱) گزارش کردند که مصرف تلفیقی کود شیمیایی نیتروژنی و لجن فاضلاب به طور معناداری سطح برگ، وزن خشک بخش هوایی و عملکرد دانه در گیاه آفتابگردان را افزایش داد. با وجود مزایای گوناگون ذکر شده، هنگام استفاده از لجن فاضلاب در کشاورزی بایستی احتیاط شود زیرا ممکن است آلوده به فلزات سنگین و عوامل بیماری‌زا باشد که علاوه بر آلوده کردن خاک و صدمه به گیاهان می‌تواند وارد زنجیره غذایی انسان شده و سلامتی بشر را نیز تهدید نماید (۱۱).

هدف از پژوهش حاضر بررسی امکان افزایش عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان روغنی در شرایط آبیاری مطلوب و تنش کم‌آبی با مصرف توأم سطوح مختلف فسفر و لجن فاضلاب و تعیین مقدار بهینه مصرف این کودها بود. نتایج این آزمایش می‌تواند به توصیه کودی مناسب برای کشاورزان در شرایط آبیاری مطلوب و تنش کمبود آب کمک کند.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در دو سال زراعی متوالی ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی واقع در ۲ کیلومتری شمال شهرستان خوی انجام شد. ایستگاه در عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۳۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ درجه و ۵۵ دقیقه شرقی قرار داشته و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۱۵۷ متر بود. میانگین بارندگی ایستگاه در پنجاه سال اخیر ۲۸۶/۳ میلی‌متر و

مخلوط شد (۴ و ۵۳). تنش کمبود آب از مرحله ۸-۶ برگی تا پایان دوره رشد گیاه اعمال شد (۲۱).

برای کشت از آفتابگردان روغنی (*Helianthus annuus* L.) هیبرید زودرس و پرمحصول فرخ که توسط مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج معرفی شده است و با تراکم ۶۶ هزار بوته در هکتار استفاده شد. در مجموع در این آزمایش در هر سال ۷۲ کرت وجود داشت. طول هر کرت ۳ متر و عرض آن ۲/۴ متر بوده و فاصله بین ردیف‌ها ۶۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها ۲۵ سانتی‌متر بود. بین هر کرت با کرت بعدی دو خط نکاشت (۱/۲ متر) و بین بلوک‌ها ۱/۵ متر فاصله برای جلوگیری از انتقال آب در زمان اعمال تیمارهای آبی در نظر گرفته شد. عملیات داشت شامل تنک کردن و وجین علف‌های هرز به‌طور دستی و برای جلوگیری از آسیب پرنده‌گان پوشاندن طبق‌ها در زمان مورد نظر انجام شد. رطوبت خاک مزرعه تا استقرار کامل گیاهان در حد ظرفیت مزرعه‌ای نگهداری شد. برای تعیین نیاز آبی گیاه آفتابگردان (ET_c) در مراحل مختلف رشد و محاسبه حجم آب مورد نیاز در هر آبیاری از جدول‌های نیاز آبی گیاهان استفاده شد که توسط مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور برای هر گیاه و منطقه منتشر شده است (۲۸). در این جدول‌ها، میزان نیاز آبی گیاه آفتابگردان (ET_c) بر حسب میلی‌متر در روز) با توجه به مرحله رشد گیاه محاسبه و سپس با در نظر گرفتن راندمان ۹۰ درصد و مساحت کرت (متر مربع)، حجم آب مورد نیاز در هر تیمار با استفاده از رابطه زیر تعیین و آبیاری با استفاده از کنتور انجام شد.

[راندمان/ ($ET_c \times$ مساحت کرت)] = حجم آب مورد نیاز در هر آبیاری (لیتر در هر کرت)

در پایان دوره رشد، برای تعیین عملکرد دانه و اجزای آن، تعداد شش عدد بوته (سطحی معادل ۰/۷ متر مربع) از وسط هر کرت با حذف نیم متر از ابتدا و انتهای خطوط به‌عنوان اثر حاشیه‌ای برداشته شد. پس از جدا کردن دانه‌ها از طبق، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون تهویه‌دار با دمای ۷۲ درجه سلسیوس خشک شدند؛ سپس عملکرد دانه، وزن هزار دانه، وزن دانه در بوته، تعداد دانه در بوته، درصد پوکی و قطر طبق اندازه‌گیری شد. برای تعیین وزن هزار دانه از هر تیمار ۲۰۰ دانه که به‌طور تصادفی انتخاب شده بودند شمارش شد و وزن حاصل در عدد ۵ ضرب شد. درصد پوکی از رابطه $100 \times$ (تعداد کل دانه‌های هر طبق / تعداد دانه‌های پوک) محاسبه گردید. برای تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار MSTATC و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد. داده‌های دو سال آزمایش باهم ترکیب و تجزیه واریانس مرکب انجام شد.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش

میانگین درجه حرارت منطقه حدود ۱۲/۴ درجه سلسیوس گزارش شده است (۱۲). در هر سال، قبل از اقدام به کاشت بذر آفتابگردان، نمونه مرکب خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری مزرعه تهیه و بعد از هوا خشک شدن و عبور از الک دو میلی‌متری برخی ویژگی‌های مهم خاک مانند بافت، درصد کربنات کلسیم معادل، درصد کربن آلی، pH و EC تعیین شد (۲۲ و ۵۹). نیتروژن کل خاک با روش کج‌لدال (۳۵) تعیین شد. فسفر قابل جذب خاک با عصاره‌گیر بیکربنات سدیم (۵۸)، پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم قابل جذب با استات آمونیوم یک نرمال (۴۰) عصاره‌گیری شدند؛ سپس غلظت فسفر عصاره‌ها به‌وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر، پتاسیم و سدیم به‌وسیله دستگاه فلیم‌فوتومتر و کلسیم و منیزیم با دستگاه جذب اتمی مدل Shimadzu, AA-6300 اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری غلظت کل آهن، روی، منگنز، مس، کادمیم و سرب، دو گرم خاک در ۲۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۴ مولار به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس عصاره‌گیری شد (۶۸) و برای تعیین آهن، روی، منگنز، مس، کادمیم و سرب قابل جذب خاک از عصاره‌گیر DTPA (۴۲) استفاده شد، سپس قرائت نمونه‌ها با دستگاه جذب اتمی انجام شد.

آزمایش به‌صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۲۴ تیمار و در سه تکرار در شرایط مزرعه‌ای اجرا شد. عامل‌های آزمایش شامل زمان آبیاری در دو سطح (آبیاری مطلوب و محدود پس از ۶۰ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشت تبخیر کلاس A)، سوپرفسفات تریپل (TSP) در سه سطح (صفر، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار)، SS در چهار سطح (صفر، ۱۴/۲، ۲۸/۴ و ۵۶/۷ تن در هکتار) و سال در دو سطح (۱۳۹۳ و ۱۳۹۴) بودند. مقادیر فسفر بر اساس نتایج آزمون خاک، نتایج مطالعات مطلبی فرد و همکاران (۵۱)، توصیه مؤسسه تحقیقات خاک و آب (۴۴) و سطوح لجن فاضلاب بر اساس نتایج تحقیقات انجام یافته (۱، ۴ و ۵۳) تعیین شد. سایر عناصر غذایی مورد نیاز گیاه نیز بر اساس نتایج آزمون خاک و توصیه مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور (۴۴) هنگام کاشت و به‌صورت نواری مصرف شد. نیتروژن از منبع اوره به میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار در سه مرحله مصرف شد. یک سوم آن هنگام کاشت به‌صورت نواری و مخلوط با بقیه کودها، یک سوم هنگام هشت برگی شدن و یک سوم هم قبل از گلدهی آفتابگردان به‌صورت کوددهی جانبی یا پای بوته^۷، کود پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار قبل از کاشت و کود روی از منبع سولفات روی به میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار در مرحله هشت برگی شدن آفتابگردان به‌صورت نواری و در عمق خاک مصرف شد. لجن فاضلاب مورد استفاده از تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان خوی تهیه شد و پس از عبور از الک دو میلی‌متری و تعیین برخی ویژگی‌های شیمیایی مانند pH، EC و غلظت‌های کل و قابل جذب برخی عناصر غذایی و فلزات سنگین (۶۰)، قبل از کشت گیاه به خاک افزوده شده و به‌خوبی با خاک

جدول ۵ غلظت این فلزات سنگین در لجن فاضلاب مورد استفاده کمتر از این سطوح بود. مجموع بارندگی ایستگاه در دوره رشد آفتابگردان در سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ به ترتیب ۶۰/۵ و ۸۵ میلی متر بود و در سال دوم علاوه بر این که میزان بارندگی نسبت به سال اول زیاد بود بارندگی نسبتاً خوبی در شهریور ماه (مرحله پر شدن دانه) اتفاق افتاد در حالی که در سال اول تقریباً بارندگی در این ماه رخ نداد.

و همچنین لجن فاضلاب مورد استفاده در دو سال در جدول های ۱ تا ۵ آورده شده است. خاک مزرعه مورد آزمایش در دو سال دارای بافت لوم رسی، آهکی، غیرشور، فسفر قابل جذب کمتر از ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم (دارای کمبود فسفر) و کربن آلی کمتر از ۰/۶ درصد (دارای کمبود مواد آلی) بود (۳۳). حد مجاز استاندارد کادمیم، سرب، روی و مس کل در لجن فاضلاب به ترتیب ۱۰، ۹۰۰، ۲۵۰۰ و ۸۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک اعلام شده است (۱۱) که با توجه به

جدول ۱- برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک در دو سال (۱۳۹۴ و ۱۳۹۳)

Table 1- Some physical and chemical characteristics of soil in two years (2014 and 2015)

سال	بافت خاک	شن	سیلت	رس	CCE	ماده آلی	SP	pH (1:1)	EC (1:2)
Year	Soil Texture	Sand	Silt	Clay	(%)	OM	(w:v)	(w:v)	(dS/m)
2014	Clay loam	25	39	36	20.5	0.88	45	8.5	1.4
2015	Clay loam	25	39	36	20.1	0.86	47	8.5	1.3

CCE: کربنات کلسیم معادل، SP: درصد رطوبت اشباع جرمی

جدول ۲- N کل، P، K، Ca و Mg قابل جذب خاک در دو سال (۱۳۹۴ و ۱۳۹۳)

Table 2- Soil total N and available P, K, Ca and Mg in two years (2014 and 2015)

سال	نیترژن (N)	فسفر (P)	پتاسیم (K)	سدیم (Na)	کلسیم (Ca)	منیزیم (Mg)
Year	(%)	(%)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
2014	0.06	4	250.3	146.2	712.6	645.7
2015	0.05	6	230.7	137.3	758.7	686.9

جدول ۳- غلظت کل و قابل جذب عناصر غذایی کم مصرف و برخی فلزات سنگین در خاک در دو سال (۱۳۹۴ و ۱۳۹۳)

Table 3- The concentrations of total, available micronutrients and some heavy metals of soil in two years (2014 and 2015)

سال	آهن (Fe)	روی (Zn)	منگنز (Mn)	مس (Cu)	کادمیم (Cd)	سرب (Pb)
Year	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
2014-Total	14713	37.4	150.6	15.4	0.63	2.5
2015-Total	16800	33.4	141.9	15.1	0.55	2.5
2014-Available	4.6	0.2	3.6	2.3	0.03	0.06
2015-Available	4.4	0.3	3.2	2.4	0.03	0.07

جدول ۴- برخی ویژگی های شیمیایی لجن فاضلاب مورد استفاده در آزمایش مزرعه ای در دو سال (۱۳۹۴ و ۱۳۹۳)

Table 4- Some chemical characteristics of sewage sludge used in the field experiment (2014 and 2015)

سال	pH(1:5) (w:v)	EC(1:5)(dS/m) (w:v)	کربن آلی (%)	ماده آلی (%)	نیترژن کل (%)	C/N
Year			Organic Carbon	Organic Matter	Total Nitrogen	
2014	6.9	2.8	31.1	60.1	2.7	11.5
2015	6.8	2.5	32.7	68.1	2.8	11.7

جدول ۵- غلظت کل عناصر در لجن فاضلاب مورد استفاده در دو سال (۱۳۹۴ و ۱۳۹۳)

Table 5- Total concentrations of elements in the used sewage sludge (2014 and 2015)

سال	P	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd	Pb
	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
2014	2.5	1.1	0.75	18.3	12.0	12902	245	750.0	57.5	4.1	141.5
2015	2.0	1.4	1.1	18	13.3	16280	310	972.5	67.5	4.2	75.8

نتایج حاصل از تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر اصلی سال بر وزن دانه در بوته، قطر طبق و عملکرد دانه معنادار ولی بر وزن هزار دانه، تعداد دانه در طبق و درصد پوکی غیرمعنادار بود (جدول ۶). معنادار بودن اثر سال بیانگر آن است که گیاه آفتابگردان با شرایط محیطی متفاوتی طی دو سال اجرای آزمایش مواجه بوده است. به‌طور کلی، اکثر ویژگی‌های مذکور در سال ۱۳۹۳ کمتر از سال ۱۳۹۴ بود (جدول ۷) که دلیل آن علاوه بر متفاوت بودن ویژگی‌های خاکی و لجن فاضلاب ممکن است بارندگی کم و بالا بودن دما در سال ۱۳۹۳ باشد، چون علاوه بر اینکه گیاهان زودتر وارد مرحله زایشی

شدند، مرحله پر شدن دانه نیز در مرداد ماه که بارندگی آن نسبت به سال ۱۳۹۴ کم بود، انجام شد. اثر اصلی آبیاری تنها بر درصد پوکی غیرمعنادار و اثرهای اصلی سوپرفسفات تریپل و لجن فاضلاب بر تمامی ویژگی‌های مورد مطالعه معنادار بودند. اثر متقابل لجن فاضلاب×آبیاری تنها بر تعداد دانه در طبق و قطر طبق غیرمعنادار بود. اثرهای متقابل فسفر×آبیاری، لجن فاضلاب×فسفر و لجن فاضلاب×فسفر×آبیاری بر تمامی ویژگی‌های مورد مطالعه معنادار بودند (جدول ۶).

جدول ۶- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر سال، آبیاری، سوپرفسفات تریپل و لجن فاضلاب بر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده آفتابگردان
Table 6- Analysis of variance (mean of squares) for effects of year (Y), irrigation (I), triple superphosphate (TSP) and sewage sludge (SS) on yield characteristics of sunflower

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی Df	وزن هزار دانه (1000 SW)	وزن دانه در بوته (WSH)	تعداد دانه در بوته (NSH)	درصد پوکی (PEA)	قطر طبق (HD)	عملکرد دانه (SY)
سال (Y)	1	39.5 ^{ns}	4857 ^{**}	617 ^{ns}	0.28 ^{ns}	385.2 ^{**}	21155399 ^{**}
تکرار (سال) (Replication (Y)	4	3.1	5	3834	0.49	2.3	21386
آبیاری (I)	1	2619.7 ^{**}	2133 ^{**}	209458 [*]	5.3 ^{ns}	28.7 [*]	9290913 ^{**}
Y × I	1	0.3 ^{ns}	2 ^{ns}	5232 ^{ns}	0.23 ^{ns}	36.9 [*]	6844 ^{ns}
خطا (Error)	4	11.3	7	14165	0.92	3.3	31928
کود فسفر (TSP)	2	230.1 ^{**}	1593 ^{**}	80511 ^{**}	50.1 ^{**}	84.3 ^{**}	6940276 ^{**}
TSP × Y	2	19.4 ^{ns}	319 ^{**}	60778 [*]	0.61 ^{ns}	26.5 ^{**}	1391636 ^{**}
TSP × I	2	60.0 ^{**}	1441 ^{**}	200002 ^{**}	9.9 ^{**}	16.2 ^{**}	6274825 ^{**}
I × TSP × Y	2	2.6 ^{ns}	845 ^{**}	180818 ^{**}	1.6 ^{ns}	11.7 ^{**}	3679417 ^{**}
لجن فاضلاب (SS)	3	1386.1 ^{**}	3540 ^{**}	233505 ^{**}	188.2 ^{**}	69.0 ^{**}	15419007 ^{**}
SS × Y	3	1.4 ^{ns}	27 ^{ns}	49801 [*]	1.5 ^{ns}	19.0 ^{**}	117527 ^{ns}
SS × I	3	29.2 [*]	437 ^{**}	13404 ^{ns}	11.7 ^{**}	0.68 ^{ns}	1904224 ^{**}
SS × TSP	6	148.5 ^{**}	400 ^{**}	79232 ^{**}	14.5 ^{**}	11.1 ^{**}	1743815 ^{**}
SS × TSP × Y	6	9.8 ^{ns}	125 ^{**}	65720 ^{**}	2.4 ^{**}	2.4 [*]	542903 ^{**}
SS × TSP × I	6	27.3 [*]	78 ^{**}	55749 ^{**}	17.4 ^{**}	5.6 ^{**}	337695 ^{**}
SS × TSP × I × Y	9	13.1 ^{ns}	56 [*]	87045 ^{ns}	1.1 ^{ns}	4.2 ^{**}	245529 [*]
خطا (Error)	88	10.6	22.4	15692	0.6	0.89	97477
ضریب تغییرات (CV%)	–	6.3	7.2	9.4	14.7	5.2	7.2

ns, * و ** به ترتیب غیرمعنادار، معنادار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪

1000 seed weight: 1000 SW; weight and number of seeds per plant: WSP and NSP; the percentage of empty achenes: PEA; head diameter: HD; Seed yield: SY

ns, * and ** are non-significant and significant at 5 and 1 % probability levels, respectively

وزن هزار دانه

با توجه به اینکه وزن هزار دانه از اجزای عملکرد دانه می‌باشد، افزایش آن میزان عملکرد دانه را افزایش می‌دهد (۲). مقایسه میانگین‌های وزن هزار دانه برای اثر متقابل لجن فاضلاب×فسفر×آبیاری نشان داد که با اعمال تنش کم‌آبی وزن هزار دانه آفتابگردان به‌طور معناداری (۲۳/۳ درصد) نسبت به شرایط آبیاری

مطلوب کاهش یافت (جدول ۸). به نظر می‌رسد تنش کم‌آبی با کاهش دوره پر شدن دانه و پیری زودرس سبب کاهش وزن دانه می‌شود. دوره پر شدن دانه یکی از مراحل حساس به خشکی است که علاوه بر کاهش فتوسنتز و انتقال مواد ذخیره‌ای و عناصر غذایی به دانه، اگر کمبودی از نظر عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف وجود داشته باشد، دانه‌های تشکیل شده کوچک مانده و وزن هزار دانه

کاهش می‌یابد (۳). کاهش وزن هزار دانه بر اثر تنش کم‌آبی توسط ناظمی و همکاران (۵۶) و دهخدا و همکاران (۲۴) در آفتابگردان نیز گزارش شده است. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم TSP در هکتار، بیشترین وزن هزار دانه آفتابگردان در شرایط آبیاری مطلوب و محدود (به‌ترتیب ۵۵ و ۴۹ گرم) حاصل شد ولی بین شاهد و مصرف ۱۰۰ کیلوگرم TSP در شرایط آبیاری مطلوب تفاوت معناداری وجود نداشت (جدول ۸). نتایج مشابهی توسط طباطبایی و همکاران (۷۰) گزارش شده است که مصرف ۲۰۰ کیلوگرم TSP در هکتار، وزن هزار دانه ذرت را ۱۴٪ نسبت به شاهد افزایش داد. همچنین مصرف ۵۶/۷ تن لجن فاضلاب در هکتار، وزن هزار دانه آفتابگردان در شرایط آبیاری مطلوب و محدود را به‌ترتیب ۳۸ و ۶۲ درصد نسبت به شاهد افزایش داد ولی بین سطوح صفر و ۱۴/۲ تن لجن فاضلاب در هکتار در شرایط آبیاری محدود تفاوت معناداری مشاهده نشد (جدول ۸). نتایج این آزمایش نشان‌دهنده اثر مثبت لجن فاضلاب بر رشد آفتابگردان بود. بررسی‌ها نشان داد که این اثر مثبت لجن فاضلاب ناشی از افزایش جذب آب و نیتروژن در گیاه، افزایش سطح برگ و فتوسنتز می‌باشد (۴۷). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین وزن هزار دانه در شرایط آبیاری مطلوب مربوط به تیمار تلفیقی ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS و ۵۶/۷ تن SS در هکتار به‌تنهایی بود که به‌ترتیب ۴۲ و ۴۰ درصد نسبت به شاهد افزایش یافتند. در شرایط آبیاری محدود بیشترین وزن هزار دانه مربوط به تیمار تلفیقی ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS و ۵۶/۷ تن SS در هکتار بود که به‌ترتیب ۶۷ و ۶۲ درصد نسبت به شاهد افزایش یافتند و تیمار ۱۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS در جایگاه بعدی قرار داشت (جدول ۸). نتایج مشابهی توسط شوقی کلخورانی و همکاران (۶۶) گزارش شده است که با مصرف تلفیقی ۲۴ تن کود گاوی در هکتار و ۱۲۰ کیلوگرم اوره در هکتار بیشترین عملکرد دانه آفتابگردان به‌دست آمد. افزایش عملکرد گیاهان با مصرف تلفیقی کودهای آلی و شیمیایی در شرایط تنش خشکی را می‌توان به اثر مثبت عناصر غذایی در فعالیتهای زیستی گیاه، افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی و افزایش فعالیت آنزیم‌های مؤثر در رشد رویشی گیاه نسبت داد (۳۹).

وزن و تعداد دانه در بوته

با توجه به این که وزن دانه و تعداد دانه در طبق ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند لذا مهم‌ترین اجزاء عملکرد دانه آفتابگردان می‌باشند و برای افزایش عملکرد بایستی مد نظر قرار گیرند (۷۴). مقایسه میانگین‌های اثر متقابل لجن فاضلاب×فسفر×آبیاری نشان داد که تنش کم‌آبی وزن و تعداد دانه در بوته را به‌طور معناداری نسبت به شرایط آبیاری مطلوب کاهش داد (جدول ۸). نتایج مشابهی توسط گوکسوی و همکاران (۲۰۰۴) گزارش شده است (۳۲). بر خلاف این

نتایج، جمشیدی و همکاران (۳۴) نشان دادند که تعداد کل دانه در طبق آفتابگردان بر اثر افزایش تعداد دانه‌های پوک، نیمه پر و کوچک در شرایط تنش خشکی افزایش یافت. زیرا تعداد دانه در طبق قویاً به عوامل فیزیولوژیکی مؤثر مانند رقم، عوامل محیطی و مدیریتی وابسته می‌باشد (۷۲). وجود نتایج متفاوت در این مورد را می‌توان به اختلاف در نوع رقم، زمان اعمال تنش کم‌آبی به گیاه، شدت و مدت تنش نسبت داد (۶۱). مقایسه میانگین‌های وزن و تعداد دانه در بوته برای متقابل لجن فاضلاب×فسفر×آبیاری نشان داد که با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم TSP در هکتار، در شرایط آبیاری مطلوب وزن و تعداد دانه در بوته به‌ترتیب ۴۰ و ۳ درصد نسبت به شاهد افزایش یافتند (جدول ۸). همچنین با مصرف ۵۶/۷ تن لجن فاضلاب در هکتار وزن و تعداد دانه در بوته در شرایط آبیاری مطلوب به‌ترتیب ۴۵ و ۸ درصد و در شرایط آبیاری محدود به‌ترتیب ۱۱۶ و ۳۲ درصد نسبت به شاهد افزایش یافتند ولی بین شاهد و مصرف ۱۴/۲ تن SS در هکتار در شرایط آبیاری مطلوب تفاوت معناداری وجود نداشت (جدول ۸). افزایش وزن و تعداد دانه در بوته آفتابگردان با مصرف لجن فاضلاب توسط لاوآدا (۴۱) نیز گزارش شده است. مقایسه میانگین‌های وزن دانه در بوته برای اثر متقابل لجن فاضلاب×فسفر×آبیاری نشان داد که بیشترین وزن دانه در بوته در شرایط آبیاری مطلوب با ۵۲ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد از تیمار تلفیقی ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS به‌دست آمد که با تیمارهای ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۲۸/۴ تن SS، ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۱۴/۲ تن SS و ۵۶/۷ تن SS در هکتار به‌تنهایی تفاوت معناداری نداشتند. در شرایط آبیاری محدود بیشترین وزن دانه در بوته با ۱۱۶ درصد افزایش نسبت به تیمار بدون مصرف کود، به تیمار تلفیقی ۱۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS و ۵۶/۷ تن SS به‌تنهایی مربوط بود که با تیمار تلفیقی ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS در یک گروه آماری قرار داشتند (جدول ۸). احمد و همکاران (۵) تأثیر مثبت مصرف لجن فاضلاب در خاک‌های کشاورزی را به افزایش مواد آلی خاک و تولید اسیدهای هومیک و کربنیک نسبت دادند. آنان گزارش کردند که مواد هومیکی علاوه‌بر کاهش pH خاک‌های آهکی، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را نیز افزایش می‌دهند. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین تعداد دانه در بوته در شرایط آبیاری مطلوب با ۱۶ درصد افزایش نسبت به شاهد از تیمار تلفیقی ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۲۸/۴ تن SS و ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۱۴/۲ تن SS در هکتار به‌دست آمد و تیمارهای ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS، ۱۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS و ۵۶/۷ تن SS به‌تنهایی در جایگاه بعدی قرار داشتند. در شرایط آبیاری محدود نیز بیشترین تعداد دانه در بوته با ۳۱/۵ درصد افزایش نسبت به تیمار بدون مصرف کود به تیمار ۵۶/۷ تن SS در هکتار مربوط بود که با تیمارهای ۱۰۰ کیلوگرم TSP+۲۸/۴ تن SS، ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۱۴/۲ تن SS و ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۲۸/۴ تن SS در هکتار

سوپرفسفات تریپل به‌تنهایی در شرایط آبیاری محدود به‌دست آمد و پس از آن تیمار بدون مصرف کود بیشترین پوکی را با مقدار ۸ درصد در شرایط آبیاری محدود داشت (جدول ۸). نتایج مشابهی توسط اسماعیلیان و همکاران (۲۶) گزارش شده است که تیمار تلفیقی ۱۵ تن کود گاوی در هکتار+ نصف کود شیمیایی توصیه شده، کمترین درصد پوکی آفتابگردان نسبت به سایر تیمارها را داشت. نتایج این پژوهش حاکی از ارزش بالای مصرف لجن فاضلاب در کشاورزی می‌باشد و لزوم مصرف تلفیقی لجن فاضلاب و سوپرفسفات تریپل را برای دستیابی به بیشترین عملکرد دانه آفتابگردان نشان می‌دهد.

قطر طبق

قطر طبق رابطه مثبت و معناداری با عملکرد دانه دارد یعنی طبق‌های بزرگ‌تر می‌توانند عملکرد دانه بیشتری تولید کنند (۳۷). مقایسه میانگین‌های قطر طبق برای اثر متقابل لجن فاضلاب×فسفر×آبیاری نشان داد که تنش کم‌آبی قطر طبق را به‌طور معناداری (۱۳ درصد) نسبت به شرایط آبیاری مطلوب کاهش داد (جدول ۸). کاهش قطر طبق و ارتفاع آفتابگردان بر اثر تنش کم‌آبی توسط محققان مختلف نیز گزارش شده است (۵۲ و ۶۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مصرف TSP، SS و افزایش مقادیر آنها قطر طبق را به‌طور معناداری افزایش دادند به‌طوری که مصرف ۲۰۰ کیلوگرم TSP و ۵۶/۷ تن لجن فاضلاب در هکتار، قطر طبق آفتابگردان را در شرایط آبیاری مطلوب به‌ترتیب ۲۱ و ۳۴ درصد و در شرایط آبیاری محدود به‌ترتیب ۴۰ و ۴۹ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند (جدول ۸). افزایش قطر طبق آفتابگردان بر اثر مصرف کود فسفر توسط مرادی و همکاران (۴۹) نیز گزارش شده است. بررسی‌ها نشان داده است که مصرف لجن فاضلاب از طریق افزایش فراهمی نیتروژن و سایر عناصر غذایی رشد طبق آفتابگردان را افزایش می‌دهد (۷). مقایسه میانگین‌های قطر طبق برای اثر متقابل لجن فاضلاب×فسفر×آبیاری نشان داد که بیشترین قطر طبق در شرایط آبیاری مطلوب با ۴۶ درصد افزایش نسبت به شاهد از تیمار تلفیقی ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS به‌دست آمد و تیمارهای ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۱۴/۲ تن SS، ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۲۸/۴ تن SS و ۵۶/۷ تن SS به‌تنهایی در هکتار در جایگاه بعدی قرار گرفتند. در شرایط آبیاری محدود بیشترین قطر طبق با ۴۸ درصد افزایش نسبت به شاهد از تیمارهای ۱۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS و ۵۶/۷ تن لجن فاضلاب در هکتار به‌دست آمد (جدول ۸). اسماعیلیان و همکاران (۲۶) گزارش کردند که تغذیه تلفیقی ۱۵ تن کود گاوی در هکتار+ نصف کود شیمیایی توصیه شده قطر طبق آفتابگردان را ۱۵٪ نسبت به شاهد افزایش داد.

یک گروه آماری قرار داشتند (جدول ۸). نتایج مشابهی توسط نینگ و همکاران (۵۴) گزارش شده است که مصرف تلفیقی ۱۰ تن کود دامی در هکتار با ۵۰ کیلوگرم نیتروژن و ۲۲ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار، تعداد دانه‌های پر در خوشه برنج را ۳۱ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. بنابراین نتایج این پژوهش بیانگر آن است که مدیریت تلفیقی تغذیه در هر دو شرایط آبیاری مطلوب و تنش کم‌آبی سبب افزایش معنادار تعداد و وزن دانه در بوته آفتابگردان شد.

درصد پوکی

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها برای اثر متقابل لجن فاضلاب×فسفر×آبیاری نشان داد که تنش کم‌آبی سبب افزایش معنادار درصد پوکی شد (جدول ۸). افزایش معنادار درصد پوکی دانه بر اثر تنش کم‌آبی توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (۲۹). لقاح ناقص بر اثر دمای بالا، خودناسازگاری و یا نبود دانه‌گرده از جمله عواملی هستند که به‌طور مستقیم درصد پوکی دانه را افزایش می‌دهند (۵۷)؛ ولی فراهمی آب (۷۳)، عناصر غذایی، نور خورشید، تنظیم‌کننده‌ها و هورمون‌های رشد اثرهای چندگانه‌ای بر رشد گیاه داشته و به‌طور غیرمستقیم رشد دانه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۶۹). بررسی‌ها نشان داده است که در آفتابگردان رشد دانه‌ها توسط منبع تولید مواد پرورده (برگ‌ها) کنترل می‌شود. بنابراین، هر عاملی که بر تولید میزان کربوهیدرات‌ها اثر بگذارد و انتقال مؤثر مواد پرورده به بخش‌های بارده را کاهش دهد مانند تنش خشکی، کمبود عناصر غذایی و غیره می‌تواند رشد دانه‌ها را کاهش دهد (۹). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در شرایط آبیاری مطلوب، درصد پوکی با مصرف ۱۰۰ کیلوگرم TSP و ۵۶/۷ تن لجن فاضلاب در هکتار به‌ترتیب ۷ و ۳۰ درصد کاهش ولی در شرایط آبیاری محدود، با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم TSP و ۵۶/۷ تن لجن فاضلاب در هکتار به‌ترتیب ۳۰ و ۵۵ درصد نسبت به شاهد کاهش نشان داد (جدول ۸). لجن فاضلاب از طریق افزایش غلظت نیتروژن در گیاه و فراهمی آب، فتوسنتز و رشد گیاه را افزایش می‌دهد (۴۷). مقایسه میانگین‌های اثر متقابل لجن فاضلاب×فسفر×آبیاری نشان داد که کمترین درصد پوکی در شرایط آبیاری مطلوب با ۷۰ درصد کاهش نسبت به شاهد مربوط به تیمار تلفیقی ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS بود و تیمارهای ۱۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS، ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۱۴/۲ تن SS و ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۲۸/۴ تن SS در جایگاه بعدی قرار داشتند. کمترین درصد پوکی در شرایط آبیاری محدود با ۸۱ درصد کاهش نسبت به شاهد مربوط به تیمار تلفیقی ۱۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS بود و تیمارهای ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۲۸/۴ تن SS و ۲۰۰ کیلوگرم TSP+۵۶/۷ تن SS در جایگاه بعدی قرار داشتند. بیشترین درصد پوکی (۱۳ درصد) با مصرف ۱۰۰ کیلوگرم

عملکرد دانه

مقایسه میانگین‌های عملکرد دانه برای متقابل لجن فاضلاب×آبیاری×فسفر (جدول ۸) نشان داد که عملکرد دانه آفتابگردان در تیمار تنش کم‌آبی (با میانگین ۲۴۶۳ کیلوگرم در هکتار) به‌طور معناداری کمتر از تیمار آبیاری مطلوب (با میانگین عملکرد ۳۶۸۵ کیلوگرم در هکتار) بود که با نتایج فریزر و همکاران (۲۹)، کریم‌زاده اصل (۳۸) و غلام‌حسینی و همکاران (۳۱) مطابقت داشت. تنش کمبود آب با تأثیر بر شاخص سطح برگ سبب کاهش فتوسنتز، کاهش تعداد دانه در طبق، افزایش درصد پوکی دانه‌ها و در نهایت کاهش عملکرد دانه آفتابگردان می‌شود (۲۹). عملکرد دانه آفتابگردان همبستگی مثبتی با قطر طبق، وزن هزار دانه، تعداد دانه در طبق و ارتفاع بوته دارد (۴۵). تنش خشکی از طریق کاهش مقدار دانه‌گرده، غیرجذاب کردن گل‌ها برای حشرات گرده افشان و کاهش مقدار شهد گل‌ها اثر منفی بر گرده‌افشانی گل‌ها دارد و از این طریق سبب کاهش عملکرد و اجزای عملکرد دانه گیاهان می‌شود (۱۰). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در شرایط آبیاری مطلوب با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم TSP عملکرد دانه ۴۰ درصد و در شرایط آبیاری محدود ۳۲ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت ولی بین شاهد و مصرف ۱۰۰ کیلوگرم TSP در هکتار تفاوت معناداری وجود نداشت (جدول ۸). این نتایج با توجه به نقش فسفر در ذخیره و انتقال انرژی، فعالیت برخی آنزیم‌ها، فتوسنتز، تنفس سلولی، ساخت ساکاروز و نشاسته، انتقال کربوهیدرات‌ها (۴۶) همچنین افزایش قطر و طول ریشه، افزایش ریشه‌های خوشه‌ای و سطح تماس ریشه قابل توجه است (۲۰ و ۳۶). مصرف لجن فاضلاب و افزایش سطوح آن عملکرد دانه را به‌طور معناداری افزایش داد به‌طوری که بیشترین عملکرد دانه در شرایط آبیاری مطلوب و محدود از سطح ۵۶/۷ تن لجن فاضلاب در هکتار به دست آمد که به‌ترتیب ۴۵ و ۱۱۶ درصد نسبت به شاهد افزایش یافتند (جدول ۸). افزایش عملکرد دانه آفتابگردان با مصرف ۲۸/۴ تن لجن فاضلاب در هکتار توسط ابوکرو و همکاران (۷) نیز گزارش شده است که با نتایج به دست آمده از این پژوهش مطابقت دارد. بررسی‌ها نشان داده است که افزایش عملکرد آفتابگردان با مصرف لجن فاضلاب را می‌توان ناشی از افزایش فراهمی عناصر غذایی و بهبود ویژگی‌های

فیزیکی شیمیایی و زیستی خاک دانست (۵۵). مقایسه میانگین‌های عملکرد دانه برای اثر متقابل لجن فاضلاب×آبیاری×فسفر نشان داد که بیشترین عملکرد دانه در شرایط آبیاری مطلوب با ۵۱ درصد افزایش نسبت به شاهد از تیمار تلفیقی ۲۰۰ کیلوگرم $TSP+56/7$ تن SS در هکتار به‌دست آمد و تیمارهای ۲۰۰ کیلوگرم $TSP+28/4$ تن SS، ۲۰۰ کیلوگرم $TSP+14/2$ تن SS و $56/7$ تن SS به‌تنهایی در جایگاه بعدی قرار داشتند. در شرایط آبیاری محدود بیشترین عملکرد دانه با ۱۱۶ درصد افزایش نسبت به شاهد از تیمارهای ۵۶/۷ تن لجن فاضلاب به‌تنهایی و ۱۰۰ کیلوگرم $TSP+56/7$ تن SS در هکتار عملکرد دانه به‌دست آمد (جدول ۸). نتایج آزمایش بابائیان و همکاران (۱۴) نشان داد که بیشترین عملکرد دانه جو از تیمار تلفیقی ۳۰ تن کود دامی در هکتار + نصف کود شیمیایی به‌دست آمد. افزایش معنادار عملکرد دانه در نظام‌های مدیریت تلفیقی تغذیه را می‌توان به افزایش فراهمی عناصر غذایی به شکل قابل جذب و طولانی‌مدت برای گیاهان، بهبود ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی و افزایش مواد آلی خاک، توسعه سیستم ریشه‌ای قوی و افزایش جذب آب نسبت داد چون کودهای آلی و شیمیایی به‌تنهایی برای تولید عملکرد پایدار کافی نیستند (۶۵). نتایج این پژوهش نشان داد که با مصرف تلفیقی کودهای شیمیایی و آلی عملکرد دانه آفتابگردان از طریق افزایش وزن هزار دانه، وزن و تعداد دانه در بوته، قطر طبق و کاهش درصد پوکی در شرایط آبیاری مطلوب و محدود به‌طور معناداری افزایش یافت. وجود همبستگی مثبت بین عملکرد دانه با ویژگی‌های مذکور به‌وسیله سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (۱۷).

نتیجه‌گیری کلی

تنش کم‌آبی وزن هزار دانه، وزن و تعداد دانه در بوته، درصد پوکی، قطر طبق و عملکرد دانه آفتابگردان را به‌طور معناداری کاهش داد. نتایج نشان داد که افزایش عملکرد دانه آفتابگردان در هر دو شرایط آبیاری مطلوب و تنش کم‌آبی ناشی از افزایش وزن هزار دانه، افزایش تعداد و وزن دانه‌ها در طبق، افزایش قطر طبق و کاهش درصد پوکی با مصرف تلفیقی سوپرفسفات تریپل و لجن فاضلاب بود.

جدول ۷- مقایسه میانگین‌های ویژگی‌های اندازه‌گیری شده آفتابگردان برای اثر اصلی سال

Table 7- Means comparison on measured characteristics of sunflower for the main effect of year

عامل	سطوح	وزن دانه در بوته	قطر طبق (HD)	عملکرد دانه (SY)
Factor	Levels	(WSP) (g)	(cm)	(kg/ha)
سال	2014	59.8 ^b	16.4 ^b	3948.7 ^b
(Year)	2015	71.4 ^a	19.7 ^a	4715.3 ^a

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معنادار در سطح احتمال پنج درصد ندارند

Means followed by the same letter in a column are not significantly different at $p < 0.05$

جدول ۸- مقایسه میانگین‌های ویژگی‌های اندازه‌گیری شده آفتابگردان برای اثر متقابل آبیاری $SS \times TSP$
 Table 8- Means comparison on measured characteristics of sunflower for interaction effects of irrigation $\times TSP \times SS$

آبیاری Irrigation	TSP (kg/ha)	SS (t/ha)	وزن هزار دانه (1000 SW) (g)	وزن دانه در بوته (WSP) (g)	تعداد دانه در بوته (NSP)	پوکی (PEA) (%)	قطر طبق (HD)(cm)	عملکرد دانه (SY) (kg/ha)
مطلوب Optimum	0	0	46.0 ^{ij}	55.8 ^{fg}	1330 ^{c-h}	7.4 ^{de}	15.1 ^l	3685.2 ^{fg}
	0	15	50.9 ^{gh}	57.4 ^{fg}	1191 ^{h-j}	6.1 ^{f-h}	16.3 ^{jk}	3792.0 ^{fg}
	0	30	60.9 ^{bc}	70.9 ^c	1367 ^{b-g}	3.7 ^{k-m}	17.6 ^{f-i}	4682.2 ^c
	0	60	65.3 ^a	80.7 ^{ab}	1435 ^{a-d}	5.2 ^{h-j}	20.2 ^{b-c}	5329.0 ^{ab}
	100	0	50.0 ^{hi}	53.6 ^{gh}	1126 ^{ij}	6.9 ^{ef}	17.4 ^{h-j}	3536.0 ^{gh}
	100	15	50.0 ^{hi}	61.2 ^{ef}	1316 ^{d-h}	6.5 ^{e-g}	16.9 ^{i-j}	4042.3 ^{ef}
	100	30	54.5 ^{e-g}	57.3 ^{fg}	1289 ^{d-i}	4.9 ^{ij}	17.2 ^{h-j}	3782.7 ^{fg}
	100	60	58.7 ^{c-e}	70.3 ^c	1435 ^{a-d}	3.2 ^{mn}	19.1 ^{c-e}	4642.6 ^c
	200	0	55.1 ^{d-f}	77.9 ^b	1367 ^{b-g}	8.0 ^{cd}	18.2 ^{e-h}	5139.4 ^b
	200	15	56.0 ^{d-f}	83.2 ^{ab}	1537 ^a	3.4 ^{l-n}	20.8 ^b	5494.1 ^{ab}
	200	30	55.7 ^{d-f}	80.8 ^{ab}	1543 ^a	3.6 ^{k-n}	20.9 ^b	5330.6 ^{ab}
	200	60	64.2 ^{ab}	84.5 ^a	1513 ^{ab}	2.2 ^{op}	22.1 ^a	5575.8 ^a
محدود Limited	0	0	35.3 ^l	37.3 ⁱ	1136 ^{ij}	8.4 ^{bc}	13.2 ^m	2462.6 ⁱ
	0	15	37.3 ^l	52.0 ^{gh}	1238 ^{f-i}	5.8 ^{g-i}	15.4 ^{kl}	3435.0 ^{gh}
	0	30	49.2 ^{hi}	63.8 ^{de}	1313 ^{d-h}	4.5 ^{jk}	17.4 ^{h-j}	4211.0 ^{de}
	0	60	57.1 ^{c-f}	80.6 ^{ab}	1494 ^{a-c}	3.8 ^{k-m}	19.6 ^{c-d}	5322.0 ^{ab}
	100	0	41.3 ^k	49.2 ^h	1310 ^{d-h}	12.7 ^a	16.6 ^{ij}	3250.2 ^h
	100	15	46.2 ^{ij}	55.8 ^{fg}	1239 ^{e-i}	9.3 ^b	17.5 ^{g-j}	3684.0 ^{fg}
	100	30	44.7 ^{jk}	70.2 ^c	1392 ^{a-f}	3.7 ^{k-m}	18.5 ^{d-h}	4632.3 ^c
	100	60	54.0 ^{fg}	80.5 ^{ab}	1333 ^{c-h}	1.6 ^p	19.1 ^{c-e}	5310.3 ^{ab}
	200	0	49.2 ^{hi}	49.1 ^h	1070 ^j	5.9 ^{gh}	18.5 ^{d-h}	3238.1 ^h
	200	15	42.6 ^{jk}	68.5 ^{cd}	1411 ^{a-e}	4.4 ^{jl}	18.7 ^{d-g}	4522.2 ^{cd}
	200	30	49.1 ^{hi}	65.6 ^{c-e}	1387 ^{a-f}	2.6 ^{no}	17.9 ^{f-i}	4327.4 ^{c-e}
	200	60	59.0 ^{cd}	68.8 ^{cd}	1209 ^{g-j}	3.0 ^{mo}	18.7 ^{d-f}	4540.7 ^{cd}

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معنادار در سطح احتمال پنج درصد ندارند

Means followed by the same letter in a column are not significantly different at $p < 0.05$

سیاسگزاری

بدین وسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز به‌دلیل حمایت مالی در اجرای طرح پژوهشی که این مقاله حاوی قسمتی از نتایج آن است، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

به‌طور کلی، برای کاهش مصرف کودهای شیمیایی، افزایش عملکرد دانه آفتابگردان و توسعه کشاورزی پایدار، در شرایط آبیاری مطلوب مصرف تلفیقی ۲۰۰ کیلوگرم $SS + TSP$ تن ۵۶/۷ در هکتار و در شرایط آبیاری محدود مصرف ۱۰۰ کیلوگرم $SS + TSP$ تن ۵۶/۷ در هکتار در شرایط مشابه (از لحاظ خاک، لجن فاضلاب و اقلیم) می‌تواند توصیه شود.

منابع

- Abbasi M., Najafi N., Aliasgharzad N., and Oustan Sh. 2013. Effects of soil water conditions, sewage sludge, poultry manure and chemical fertilizers on the growth characteristics and water use efficiency of rice plant in a calcareous soil. Journal of Soil and Water Science-University of Tabriz, 23(1): 189-208. (in Persian with English abstract)
- Abolhassani K.H., and Saeidy G. 2003. Relationship between agronomic characteristics of safflower under with and without moisture stress. Iranian Journal of Field Crops Research, 1(2): 138-142. (in Persian with English abstract)
- Ahmadi A., and zali A. 2004. Compare of the storage and remobilization of photosynthesis materials and their contribution to the performance of four cultivar wheat in optimum and drought stress. Journal of Agricultural Science, 35(4): 931-921.
- Ahmadinejad F., Najafi N., Aliasgharzad N., and Oustan S. 2013. Effects of organic and nitrogen fertilizers on water use efficiency, yield and the growth characteristics of wheat (*Triticum aestivum* cv. Alvand). Journal of Soil and Water Science-University of Tabriz, 23(2): 194-177. (in Persian with English abstract)

- 5- Ahmed H.K., Fawy H.A., and Abdel-Hady E.S. 2010. Study of sewage sludge use in agriculture and its effect on plant and soil. Agriculture and Biology Journal of North America, 1(5): 1044-1049.
- 6- Ailincal C., Jitareanu G., Bucur D., and Ailincal D. 2007. Influence of sewage sludge on maize yield and quality and soil chemical characteristics. Journal of Food Agriculture and Environment, 5(1): 310-313.
- 7- Albuquerque H.C., Junio Z., Geraldo R., Sampaio R.A., Fernandes L.A., Zonta E., and Barbosa C.F. 2015. Yield and nutrition of sunflower fertilized with sewage sludge. Revista Brasileira Engenharia Agricultura Ambiental, 19(6): 553-559.
- 8- Alley M.M., and Vanlauwe B. 2009. The role of fertilizers in integrated plant nutrient management. International Fertilizer Industry Association.
- 9- Alkio M., Schubert A., Diepenbrock W., and Grimm E. 2003. Effect of source-sink ratio on seed set and filling in sunflower (*Helianthus annuus* L.). Plant, Cell and Environment, 26(10): 1609-1619.
- 10- Alqudah A.M., Samarah N.H., and Mullen R.E. 2011. Drought stress effect on crop pollination, seed set, yield and quality. Alternative Farming Systems, Biotechnology, Drought Stress and Ecological Fertilisation. Springer the Netherlands, Pp: 193-213.
- 11- Anonymous. 1993. Environmental Protection Agency (EPA). Standards for the use or disposal of sewage sludge. Office of Science & Technology, Washington, D.C. Final Rules, 58(32): 9248-9415.
- 12- Anonymous. 2014. Meteorological organization of Iran. www.iranhydrology.net/meteo.asp
- 13- Anonymous. 2014. The Ministry of Agriculture, Department of Animal Production.
- 14- Babaeian M., Esmaeilian Y., Tavassoli A., Asgharzade A., and Sadeghi. 2011. The effects of water stress, manure and chemical fertilizer on grain yield and grain nutrient content in barley. Scientific Research and Essays, 6(17): 3697-3701.
- 15- Bai Bourdi A., and Malakouti M.J. 2001. The effect of different levels of phosphorus and zinc on cadmium content of two potato varieties in sarab, East Azarbayjan. Journal of soil and water sciences, 15(1): 25-38. (in Persian with English abstract)
- 16- Barbosa G.M.C., Tavares Filho J., Brito O.R., and Fonseca I.C.B. 2007. Residual effect of sewage sludge on off-season corn yield. Brazilian Journal of Soil Science, 31(3): 601-605.
- 17- Behradfar A., Hassanzadeh Gortapeh A., Zardashty M.R., and Talat F. 2009. Evaluation correlated traits for seed and oil yield in sunflower (*Helianthus annuus* L.) through path analysis in under condition relay cropping. Research Journal of Biological Sciences, 4 (1): 82-85.
- 18- Beltrano J., Caldiz D.O., Barreyro R., Sanchez Vallduvi G., and Bezus R. 1994. Effects of foliar applied gibberellic acid and benzyladenine upon yield components in sunflower (*Helianthus annuus* L.). Plant Growth Regulation, 15: 101-106.
- 19- Binder D.L., Dobermann A., Sander D.H., and Cassman K.G. 2002. Biossolids as nitrogen source for irrigated maize and rainfed sorghum. Soil Science Society of America Journal, 66: 531-543.
- 20- Caldeira Junior C.F., Souza R.A., Santos A. M., Sampaio R.A., and Martins E.R. 2009. Chemical characteristics of soil and growth of *Astronium fraxinifolium* (Schott) in response to fertilization with sewage sludge and calcium silicate. Revista Ceres, 56(2): 213-218.
- 21- Chimenti C.A., Pearson J., and Hall A.J. 2002. Osmotic adjustment and yield maintenance under drought in sunflower. Field Crops Research, 75: 235-246.
- 22- Dane J.H., and Topp G.C. 2002. Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. ASA-CSSA-SSSA Publisher, USA.
- 23- Da Silva E.C., Nogueira R.J.M.C., da Silva M.A., and de Albuquerque M.B. 2011. Drought stress and plant nutrition. Plant Stress, 5: 32-41.
- 24- Dehkhoda A., Naderidarbaghshahi M., Rezaei A., and Majdnasiri B. 2013. Effect of water deficiency stress on yield and yield component of sunflower cultivars in Isfahan. International Journal of Farming and Allied Sciences, 2: 1319-1324.
- 25- Dordas C. 2008. Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture: a review. Agronomy for Sustainable Development, 28(1): 33-46.
- 26- Esmaeilian Y., Galavi M., Amiri E., and Heidari M. 2014. Effect of organic and chemical fertilizers on yield, yield components and seed quality of sunflower under drought stress conditions. Journal of Soil and Water Science, 24(3): 175-189. (in Persian with English abstract)
- 27- FAO. 2006. Plant Nutrition for Food Security. A Guide for Integrated Nutrient Management. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, No 16, Rome, 347 Pages.
- 28- Farshi A.A., Shariati M.R., Jaroollahi R., Ghaemi M.R., Shahabifar M., and Tavallaei M.M. 1997. An Estimate of Water Requirement of Main Field Crops and Orchards in Iran. Vol. 2. Field Crops. Agricultural Education Publications, Karaj, Iran. (in Persian).

- 29-Fereres E., Gimez C., and Fernandez J.M. 1986. Genetic variability in sunflower cultivars underdrought. I. yield relationships. Australian Journal of Agricultural Research, 37(6): 573-582.
- 30-Garg B.K., Burman U., and Kathju S. 2004. The influence of phosphorus nutrition on the physiological response of moth bean genotypes to drought. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 167(4): 503-508.
- 31-Gholamhoseini M., Ghalavand A., and Jamshidi E. 2008. The effect of irrigation regimes and fertilizer treatments on grain yield and elements concentration in leaf and grain of sunflower (*Helianthus annuus* L.). Pajouhesh & Sazandegi, 79: 91-100. (in Persian with English abstract)
- 32-Goksoy A.T., Demir A.O., Turan Z.M., and Daustu N. 2004. Responses of sunflower to full and limited irrigation at different growth stages. Field Crops Research, 87: 167-178.
- 33-Hazelton P.A., and Murphy B.W. 2007. Interpreting soil test results: what do all the numbers mean? CSIRO Publishing, Collingwood, Australia.
- 34-Jamshidi A., Ghalavand A., Salehi A., Javad Zare M., and Jamshidi E.R. 2009. Effect of mycorrhiza arbuscular on yield and yieldcomponents of sunflower under drought stressconditions. Iranian Journal of Agricultural Science, 11(1): 150-134. (in Persian with English abstract)
- 35-Jones B.J. 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. CRC Press, USA.
- 36-Jungi L., Deborah A.S., Bruna B., Deborah L., and Carol P.W. 2005. Signalling of phosphorus deficiency-induced gene expression in white lupinrequires sugar and phloem transport. The Plant Journal, 41(2): 257-268.
- 37-Kandil AA., and Elsalwa L. 2004. Head diameter of sunflower as indicator for seed yield. Helia. 11: 21-23.
- 38-Karimzadeh Asl Kh., Mazaheri D., and Peighambari S.A. 2003. The effect of fourirrigation on yield and quantitative three varieties of sunflower. Iranian Journal of Agricultural Science, 34(2): 300-303.
- 39-Kassab O.M. 2005. Soil moisture stress and micronutrients foliar application effects on the growth and yield of mungbean plants. Journal of Agricultural Sciences, Mansoura University, 30: 247-256.
- 40-Knudsen D., Peterson G.A., and Pratt P.F. 1982. Lithium, sodium, and potassium. Pp. 225-246. Page A.L., R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds). Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Soil Science Society of America Journal Book Ser. 5. Madison, WI, USA.
- 41-Lavado R.S. 2006. Effects of sewage-sludge application on soils and sunflower yield: quality and toxic element accumulation. Journal of Plant Nutrition, 29: 975-984.
- 42-Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society of America Journal, 42: 421-428.
- 43-Lobo T.F., and Grassi Filho H. 2007. Level of sewage sludge for the productivity of sunflower. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 7(3): 16-25.
- 44-Malakouti M.J., Balali M.R., Golchin A., Majidi A., Drodi M.S., Ziaeeian A.A., Lotfollahi M.A., Shahabian M., Basirat M., Manochchri S., Davoudi M.H., Khadami Z., and Shabbazi K. 2000. Optimum Fertilizer Recommendation to Crops. Technical Publication, No. 200, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. (in Persian)
- 45-Marinković R. 1992. Path coefficient analysis of some yield components of sunflower. Euphytica, 60(3): 201-205.
- 46-Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd edition, Academic Press, New York.
- 47-Mata-González R., Sosebee R.E., and Wan C. 2002. Physiological impacts of biosolids application in desert grasses. Environmental and Experimental Botany, 48(2): 139-148.
- 48-Mohammad S. 1999. Long-term effect of fertilizers and integrated nutrient supply in intensive cropping on soil fertility, nutrient uptake a yield of rice. The Journal of Agricultural Science, 133(04): 365-370.
- 49-Moradi M., Madani H., and Pilevari R. 2008. Comparison ofbiological and chemical phosphorus efficiency in oilsunflower under climatic conditions of Arak. New Findings in Agriculture, 3(2): 168-178. (in Persian)
- 50-Motalebifard R., Najafi N., Oustan S., Nyshabouri M.R., and Valizadeh M. 2013. The combined effects of phosphorus and zinc on evapotranspiration, leaf water potential, water use efficiency and tuber attributes of potato under water deficit conditions. Scientia Horticulturae, 162: 31-38.
- 51-Motallebifard R., Najafi N., Oustan S., Neyshabouri M.R., and Valizadeh M. 2014. Effects of soil moisture, phosphorus and zinc levels on the growth attributes of potato, greenhouse conditions. Iranian journal of Soil and Water Research, 45(1): 75-86. (in Persian with English abstract)
- 52-Mozaffari K., Arshi A., and Zeinalikhnagah V.H. 1996. Effects of drought on some traits of morpho physiology and yield components of sunflower seeds. Journal of Seed and Plant, 12(3): 24-30.
- 53-Najafi N., and Mardomi S. 2012. The effects of waterlogging, sewage sludge and manure on the growth characteristics of sunflower in a sandy loam soil. Journal of Water and Soil- Ferdowsi University of Mashhad, 25(6): 1264-1276. (in Persian with English abstract)
- 54-Naing A., Banterng P., Polthanee A., and Trelo-Ges V. 2010. The effect of different fertilizers management strategies on growth and yield of upland black glutinous rice and soil property. Asian Journal of Plant Sciences,

- 9(7): 414-422.
- 55-Nascimento A.L., Sampaio R.A., Junio G.R., Carneiro J.P., Fernandes L.A., and Rodrigues M.N. 2014. Heavy metal contents in soil and in sunflower fertilized with sewage sludge. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 18(3): 294-300.
- 56-Nazemie A., Khazaei H.R., Boromand Rezazadeh Z., and Hosseini A. 2008. Effects of drought stress and defoliation on sunflower (*Helianthus annuus*) in controlled conditions. *Desert*, 12: 99-104.
- 57-Nur I. 1978. Sunflower and the problem of unfilled seeds under Sudan conditions. *Acta Agronomica Academiae Scientiarum Hungarica*, 27: 339-340.
- 58-Olsen S.R., and Sommers L.E. 1982. Phosphorus, Pp. 403-430, In: Page Al (ed). *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Methods*, 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, USA.
- 59-Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R. 1982. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. ASA-CSSA-SSSA Publisher, Madison, Wisconsin, USA.
- 60-Peters J. 2003. *Recommended methods of manure analysis*. Cooperative Extension publishing, University of Wisconsin, USA.
- 61-Rahimizadeh M., Kashani A., Zare A., Madani H., and Soltani E. 2010. Effect of micronutrient fertilizers on sunflower growth and yield in drought stress condition. *Journal of Crop Production*, 3(1): 57-72. (in Persian with English abstract)
- 62-Ribeirinho V.S., Melo W.J., Silva D.H., Figueiredo L.A., and Melo G.M.P. 2012. Soil fertility, nutritional status, and yield of sunflower fertilized with sewage sludge. *Tropical Agricultural Research*, 42(2): 166-173.
- 63-Roshdi M., Heidari Sharifabad H., Karimi M., Noor Mohammadi G., and Darvish F. 2006. A survey on the impact of water deficiency over the yield of sunflower seed cultivar and its components. *Journal of Agricultural Sciences*, 12(1): 109-122. (in Persian with English abstract)
- 64-Sabaghpour S.H., Mahmodi A.A., Saeed A., Kamel M., and Malhotra R.S. 2006. Study on chickpea drought tolerance lines under dryland condition of Iran. *Indian Journal of Crop Science*, 1: 70-73.
- 65-Satyanarayana V., Prasad P.V., Murthy V.R.K., and Boote K.J. 2002. Influence of integrated use offarmyard manure and inorganic fertilizers on yield and yield components of irrigated lowland rice. *Journal of Plant Nutrition*, 25(10): 2081-2090.
- 66-Shoghi-Kalkhoran S., Ghalavand A., Modarres-Sanavy S.A.M., Mokhtassi-Bidgoli A., and Akbari P. 2013. Integrated fertilization systems enhance quality and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Agricultural Science and Technology*, 15: 1343-1352.
- 67-Singh R.P., and Agrawal M. 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28(2): 347-358.
- 68-Sposito G., Lund L.J., and Chang A.C. 1982. Trace metal chemistry in arid-zone amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases. *Soil Science Society of America Journal*, 46: 260-264.
- 69-Ster B.T., Hocking P.J., and Low A. 1988. Dry matter, minerals and carbohydrates in the capitulum of sunflower (*Helianthus annuus*): effects of competition between seeds, and defoliation. *Field Crops Research*, 18: 71-85.
- 70-Tabatabaie Ebrahimi S., Yarnia M., Khorshidi Benam M.B., and Farajzadeh Memari Tabrizi E. 2011. Effect of potassium fertilizer on corn yield (*jeta cv.*) under drought stress condition. *American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Sciences*, 10(2): 257-263.
- 71-Thomas C.N., Bauerle W.L., Chastain J.P., Owino T.O., Moore P., and Klaine S.J. 2006. Effect of scrubber by-product stabilized dairy lagoon sludge on growth and physiological responses of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Chemosphere*, 64(1): 152-160.
- 72-Vega C.R.C., Sadras V.O., Andrade F.H., and Uhart S.A. 2000. Reproductive allometry in soybean, maize and sunflower. *Annals of Botany*, 85(4): 461-468.
- 73-Yegappan T.M., Paton D.M., Gates C.T., and Müller W.J. 1982. Water stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) 3. Responses of cypsela size. *Annals of Botany*, 49: 69-75.
- 74-Zaffroni E.J., and Schneiter A.A. 1989. Water use efficiency and light interception of semi-dwarf and standard height sunflower hybrids grown in different row arrangement. *Agronomy Journal*, 81(5): 831-836.



Increasing the Yield and Yield Components of Sunflower by Integrated Application of Phosphorus and Sewage Sludge under Optimum and Limited Irrigation Conditions

S. Kazemalilou^{1*}- N. Najafi²- A. Reyhanitabar³

Received: 24-01-2017

Accepted: 04-12-2017

Introduction: Sunflower as one of the most important oil crops in the world is affected by water deficit stress. Water deficit stress is one of the most important limiting factors of crops growth and production in Iran and many regions of the world. Because of the low water productivity in Iran, the water conservation and increasing of water use efficiency through good management including integrated application of organic and chemical fertilizers and balanced nutrition of plants are necessary. One of the negative effects of water deficit stress is impaired uptake of nutrients such as phosphorus (P) by plants and a decrease in plant yield. It has been found that use of P can reduce the negative effects of drought stress on plants that means the tolerance of plants to drought stress increases with optimal nutrition of P. In Iran, due to the lack of organic matter and the high cost of chemical fertilizers, farmers tend to use organic wastes such as sewage sludge that can have an important contribution in the improvement of soil fertility and plant nutrition and lead to an increase in water use efficiency. Also, integrated and suitable nutrition of plants is a method of sustainable management of soil fertility under environmental stresses. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of sewage sludge (SS) and triple superphosphate (TSP) on sunflower (*Helianthus annuus* L. cv. Farrokh) seed yield and its components and determining the optimal levels of their consumption under optimum and limited irrigation conditions.

Materials and Methods: This experiment was conducted as a split-plot factorial arrangement in a randomized complete block design in Agricultural Research Station of Khoy under field conditions for two years. Experimental factors were irrigation time at two levels (irrigation after 60 and 150 mm evaporation from class A evaporation pan), triple superphosphate at three levels (0, 100 and 200 kg/ha), sewage sludge at four levels (0, 14.2, 28.4 and 56.7 t/ha) and year at two levels (2014 and 2015) with three replications. The 1000 seed weight of sunflower, weight and number of seeds per plant, the percentage of empty achenes, head diameter and seed yield were measured at the end of plant growth period. Statistical analysis of the data was performed using MSTATC software and means comparison was done by Duncan's multiple range test at 5% probability level.

Results and Discussion: The combined analysis of variances showed that the effect of year was significant for weight of seeds per plant, head diameter and seed yield but it is not significant for 1000 seed weight, number of seeds per plant and percentage of empty achenes. Although water deficit stress significantly increased the percentage of empty achenes but 1000 seed weight, weight and number of seeds per plant, head diameter and seed yield significantly decreased compared to optimum irrigation conditions. The application of integrated application of 200 kg TSP and 56.7 tons SS per ha increased yield and yield components significantly compared to the control treatment. The interaction effects of TSP×SS×irrigation were significant for all studied characteristics. Under optimum irrigation condition, the highest 1000 seed weight (64 g), weight of seeds per plant (85 g), number of seeds per plant (1513), head diameter (22 cm) and seed yield (5576 kg/ha) were observed in integrated treatment of 200 kg TSP+56.7 tons SS/ha. Under limited irrigation condition, the highest 1000 seed weight (57 g), seeds weight per plant (81 g), seeds number per plant (1494), head diameter (19.6 cm) and seed yield (5322 kg/ha) were obtained from 56.7 tons SS/ha treatment which showed no significant difference with 100 kg TSP+56.7 tons SS/ha treatment. Under optimum and limited irrigation conditions, the percentage of empty achenes were significantly decreased by integrated treatments of 200 kg TSP+56.7 tons SS/ha and 100 kg TSP+56.7 tons SS/ha (70 and 81 percent, respectively) compared to the control.

Conclusion: The results of this study indicated that integrated application of triple superphosphate and sewage sludge can mitigate negative effects of drought stress; therefore in order to reduce the use of chemical

1, 2 and 3- Ph.D. Student and Associate Professors, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Respectively

(*- Corresponding Author Email: solmazalilo@yahoo.com)

fertilizers, increasing sunflower seed yield and development of sustainable agriculture, integrated treatments of 200 kg TSP+56.7 tons SS/ha under optimum irrigation and 100 kg TSP+56.7 tons SS/ha under limited irrigation can be recommended at similar conditions (from the aspect of soil, plant, sewage sludge and climate).

Keywords: Integrated plant nutrition management, Oil seed, Sustainable agriculture, Water deficit stress



مقایسه کارایی دو سامانه‌ی رده‌بندی آمریکایی و جهانی خاک در بیان آلودگی‌های زیست‌محیطی

(مطالعه موردی: منطقه لنجان اصفهان)

رضا مهاجر^{۱*} - محمدحسن صالحی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۲۰

چکیده

یکی از رسالت‌های مهم سامانه‌های طبقه‌بندی خاک، شناسایی تفاوت ویژگی‌های مهم خاک برای اهداف مدیریتی می‌باشد. در سال‌های اخیر اهمیت مد نظر قرار دادن تأثیر انسان در تغییر ویژگی‌های خاک در آخرین نسخه‌های طبقه‌بندی خاک مرسوم مانند رده‌بندی آمریکایی و جهانی بیش از گذشته، مطرح و مواردی در این رابطه، اصلاح و یا اضافه شده است. هدف از مطالعه حاضر، مقایسه کارایی دو سامانه رده‌بندی آمریکایی و طبقه‌بندی جهانی در بیان آلودگی‌های زیست‌محیطی خاک‌های بخشی از اراضی کشاورزی منطقه لنجان اصفهان می‌باشد. نمونه‌گیری از خاک سطحی، محصولات کشاورزی رایج و نیز گوشت دام چرا کرده یا تغذیه شده از منطقه گرفته شد و بعد از رده‌بندی ۳۰ خاک رخ و تعیین خاک‌رخ شاهد در هریک از واحدهای نقشه خاک (در مجموع پنج خاک‌رخ شاهد)، در نهایت هر یک از خاک‌رخ‌های شاهد مطابق با آخرین کلید رده‌بندی آمریکایی (۲۰۱۴) و طبقه‌بندی جهانی (۲۰۱۵) خاک، طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که خاک‌های مزبور در سامانه آمریکایی در دو رده آلودگی سول و اینسپتی سول و بر اساس سامانه طبقه‌بندی جهانی خاک در سه گروه مرجع گلی سول، کمی سول و کلسی سول قرار می‌گیرند. با توجه به وجود آلودگی خاک، محصولات کشاورزی و دامی منطقه به برخی فلزات سنگین، سامانه رده‌بندی آمریکایی حتی با وجود آنکه در آخرین نسخه خود در سطح فامیل، کلاسی برای تأثیرات بشری بر روی خاک‌ها اضافه نموده است ولی توانست آلودگی خاک‌های منطقه به عناصر سنگین را نشان دهد ولی سامانه جهانی به دلیل وجود توصیف‌کننده توکسیک در بیان شرایط زیست‌محیطی و آلودگی خاک‌های مورد مطالعه از کارایی بیشتری برخوردار بود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، توصیف‌کننده توکسیک، زهکشی ضعیف، سامانه رده‌بندی

مقدمه

یکی از دلایل اصلی ایجاد سامانه‌های طبقه‌بندی خاک، شناسایی تفاوت و ویژگی‌های مهم خاک‌ها برای اهداف مدیریتی است. در سال‌های اخیر اهمیت مدنظر قرار دادن تأثیر انسان در تغییر ویژگی‌های خاک در طبقه‌بندی خاک مانند رده‌بندی آمریکایی (۲۰۱۴) و جهانی (۲۰۱۵) بیش از گذشته، مطرح و مواردی در این زمینه اصلاح و یا اضافه شده است.

رده‌بندی خاک‌ها به روش آمریکایی و جهانی، دو شیوه‌ی معمول در دنیا و کشور محسوب می‌شوند و هر دو از مقبولیت عمومی برخوردار هستند. به طور کلی، هر چند دو سامانه آمریکایی و جهانی در نقشه‌برداری خاک از قابلیت خوبی برای مباحث نقشه‌برداری برخوردار هستند ولی سامانه جهانی در طبقه‌بندی خاک، دارای توان بیش‌تری می‌باشد. البته ذکر این نکته لازم است که عیب هر دو سامانه این است که پویایی خاک را نادیده گرفته‌اند و در نتیجه نمی‌توانند رفتار خاک را پیش‌بینی کنند (۳۷).

در نسخه قبلی سامانه طبقه‌بندی جهانی خاک (۲۰۰۷)، دو گروه

در دهه‌های اخیر نقش انسان در تخریب، تغییر و آلودگی خاک‌ها به عنوان یک موضوع مهم در بین دانشمندان علوم خاک مطرح بوده است. توسعه مناطق صنعتی و شهرنشینی، وجود معادن و فعالیت‌های جانبی آن‌ها و توسعه کشاورزی متراکم موجب تغییرات خاک‌ها در مناطق مختلف شده است (۹). تأثیر انسان بر روی خاک‌ها به حدی قابل توجه بوده است که در اغلب سامانه‌های طبقه‌بندی خاک، نام‌هایی مانند آنتروپیک (۱۹)، آنتروپوسول‌ها (۲۱ و ۱۴)، آنتروپوسول‌ها (۱۳) و آنتروپوزم (۳۰) که بیانگر تأثیر انسان است مشاهده می‌شود.

۱- استادیار و عضو هیأت علمی گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور تهران

(*) نویسنده مسئول: Email: reza.mohajer@pnu.ac.ir

۲- استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

مرجع آنتروپوسول‌ها^۱ و تکنوسول‌ها^۲ و پسوند توکسیک^۳ و زیر مجموعه آن شامل آنتروتوکسیک^۴، اکوتوکسیک^۵، فیتوتوکسیک^۶ و زوتوکسیک^۷ برای سه گروه مرجع هیستوسول، تکنوسول و گلی سول تعریف شده بود (جدول ۱) اما در نسخه جدید آن (۲۰۱۵) تغییراتی انجام گرفته است. در این راستا بجای واژه پسوند، توصیف کننده‌های مکمل^۸ برای همه گروه مرجع‌ها تعریف شده و پسوند توکسیک و زیر مجموعه آن برای همه گروه‌های مرجع به جز چرنوزم، کاستانوزم و فائیزم اضافه و تعریف شده است. روزیتر (۳۴) در تحقیق خود بر روی طبقه‌بندی خاک‌های شهری و صنعتی اشاره کرده است که پسوند توکسیک می‌تواند برای سایر گروه مرجع‌ها هم مورد استفاده قرار بگیرد.

در سامانه رده‌بندی آمریکایی (۲۰۱۰)، افق M (لایه محدود کننده ریشه به دلیل وجود مواد ساخته بشری)، پسوند u (که دلالت بر حضور مواد ساخته بشری مانند چوب، آهن، پلاستیک و غیره را در لایه‌های خاک دارد) و پیشوند هشتم^۹ به صورت (^) برای افق‌های آلی و معدنی که بشر در جایابی مواد آن‌ها نقش داشته است تعریف شده‌اند. در رده‌بندی جدید آمریکایی (۲۰۱۴) در سطح فامیل خاک، کلاس جدیدی تحت عنوان مواد انتقالی و تغییر یافته بشری^{۱۰} به کلاس‌های قبلی اضافه شده است که این کلاس بیان کننده اطلاعات مفیدی در رابطه با رفتار و تفسیر استفاده از خاک‌هایی است که بر روی مواد انتقالی یا تغییر یافته بشری تشکیل شده است. همچنین در نسخه جدید رده‌بندی آمریکایی (۲۰۱۴) زیرگروه‌هایی برای خاک‌های جابجا شده و تغییر یافته توسط بشر تعریف شده است که از آن جمله می‌توان به آنتراکوئیک، آنترودنسیک، آنتروپورتیک و آنترالیتیک اشاره نمود که این موارد در نسخه‌های قبلی این سامانه وجود نداشت. با این حال، ضرورت مدنظر قرار دادن فرآیندهای آنتروپوژنیک از جمله خاک‌های آلوده به عناصر سنگین، بیش از پیش، احساس می‌شود. بریان و گالبریت (۶) پیشنهاد کرده‌اند کلاس (رده) مجزایی که نسبت به سایر خاک‌ها در اولویت باشد برای چنین خاک‌هایی تعریف گردد.

- 1- Anthrosols
- 2- Technosols
- 3- Toxic
- 4- Anthrotoxic
- 5- Ecotoxic
- 6- Phytotoxic
- 7- Zootoxic
- 8- Supplementary qualifiers
- 9- Caret
- 10- Human-altered and human-transported material classes

بهمنی و همکاران (۵) در مطالعه خود با هدف مقایسه سامانه‌های رده‌بندی آمریکایی و طبقه‌بندی جهانی خاک در توصیف ویژگی‌های برخی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران مرکزی به این نتیجه رسیدند که سامانه طبقه‌بندی جهانی در توصیف ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه تا حدی گویاتر است. هرچند در مطالعه آن‌ها هیچ کدام از سامانه‌ها نتوانستند وجود گچ در افق‌های پائینی خاک را نشان دهند. سرشوق و همکاران (۳۶) در مطالعه خود با هدف مقایسه رده‌بندی خاک به دو شیوهی آمریکایی و جهانی در موقعیت‌های مختلف دو جهت شیب منطقه چلگرد استان چهارمحال و بختیاری نشان دادند که رده‌بندی آمریکایی برای نشان دادن ویژگی‌های بارز خاک‌های کم عمق در مناطق نیمه‌خشک، گویاتر از طبقه‌بندی جهانی است. نتایج اسفندیارپور و همکاران (۱۱) نشان داد که به کارگیری سامانه طبقه‌بندی جهانی برای گروه‌بندی خاک‌های شور موجود در مناطق خشک، به دلیل استفاده از توصیف کننده‌های مختلف و انعطاف‌پذیری بالاتر در انعکاس خصوصیات مؤثر در نامگذاری خاک‌ها، بهتر می‌تواند واقعیات صحرا را در هر دو بعد افقی و عمودی خاک به نمایش گذارد. سرمست و همکاران (۳۵) در مطالعه اخیر خود که با هدف مقایسه سامانه‌های رده‌بندی آمریکایی و طبقه‌بندی جهانی خاک در توصیف خاک‌های آهکی و گچی منطقه مرکزی ایران انجام شد به این نتیجه رسیدند که سامانه طبقه‌بندی جهانی خاک بدلیل دارا بودن توصیف کننده‌های مکمل مختلف به خصوص برای خاک‌های شور نسبت به سامانه رده‌بندی آمریکایی کارآمدتر و مؤثرتر می‌باشد.

از آنجا که اساس سامانه‌های رده‌بندی خاک، به خصوص سامانه رده‌بندی آمریکایی، به طور عمده بر پایه ویژگی‌های مورفولوژیکی طراحی شده است توانایی آن‌ها در تشخیص خاک‌هایی که به دلیل فعالیت‌های بشری، دستخوش تغییر قرار می‌گیرند (خاک‌های آنتروپوژنیک) و در عین حال، در ظاهر خاک‌رخ آن‌ها، چندان تغییری ایجاد نمی‌شود با مشکلات و ابهاماتی روبه‌رو است (۳۳). به طور مثال، در خاک‌هایی که فعالیت‌های صنعتی و یا کوددهی فراوان، باعث اضافه نمودن عناصر سنگین به سطح خاک می‌شوند اگرچه این فرآیند جزو فرآیندهای افزایش به خاک است (۴۰) که به وسیله یکی از عوامل پنج‌گانه خاکساز مطرح شده توسط ینی (۲۴) که موجود زنده (انسان) است ایجاد شده، ولی کلاس‌ها و طبقه‌های بسیار اندکی برای تشخیص این خاک‌ها در سامانه‌های رده‌بندی وجود دارد (۱). در اروپا نقشه‌برداری از خاک‌هایی که با عناصر سنگین آلوده هستند از جمله موضوعات قابل بحث می‌باشد (۲۸). وجود آلودگی خاک به دو فلز سرب و کادمیم در برخی از نواحی مرکزی و غربی استان اصفهان (۲) باعث شد که منطقه مورد مطالعه، بخشی از اراضی زراعی منطقه لنجانان استان اصفهان انتخاب گردد. نزدیکی این اراضی با کارخانجات صنعتی مهمی چون

آن‌ها را مشخص نموده و گامی مهم در جهت آگاهی عمومی افراد جامعه بردارد. بنابراین، هدف از انجام این مطالعه، مقایسه نتایج طبقه‌بندی خاک حاصل از دو سامانه رده‌بندی آمریکایی و جهانی و بررسی میزان کارایی دو سامانه مذکور در بیان آلودگی‌های زیست‌محیطی منطقه لنجان اصفهان می‌باشد.

ذوب آهن، سیمان سپاهان، سیمان اصفهان و معدن سرب و روی، موجب گردیده که اهمیت این منطقه دوچندان شود. با توجه به اهمیت امنیت غذایی و نقش مهمی که علم خاک‌شناسی در بیان وضعیت آلودگی اکوسیستم از جمله خاک دارد طبقه‌بندی خاک‌های این منطقه بر اساس دو سامانه آمریکایی و جهانی می‌تواند نقاط قوت و ضعف

جدول ۱- انواع توصیف کننده‌های مکمل تاکسیک در سامانه طبقه‌بندی جهانی خاک (۲۳)

Table 1- Types of toxic supplementary qualifiers in WRB soil classification system

توضیحات Description	تقسیم‌بندی پسوند تاکسیک در سامانه طبقه‌بندی جهانی خاک Categorization of toxic supplementary qualifiers in WRB soil classification system
تأثیر مواد سمی بر روی سلامت انسان‌هایی که در تماس با این خاک‌ها هستند. The effect of toxic substances on the health of humans who are in contact with these soils	Anthrotoxic
تأثیر مواد سمی بر روی اکولوژی خاک The effect of toxic substances on the soil ecology	Ecotoxic
کلسیم و منیزیم) بر روی رشد گیاهان The effect of deficiency or high levels of all ions other than Fe, Al, Na, Ca and Mg on plant growth	Phytotoxic
تأثیر مواد سمی بر روی سلامت انسان‌ها و حیوانات از جمله دام به‌دلیل مصرف گیاهان و محصولات رشد کرده بر روی این خاک‌ها The effect of toxic substances to the health of animals, including humans, that ingest plants grown on these soils.	Zootoxic

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

بخشی از اراضی کشاورزی منطقه لنجان استان اصفهان، به-عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید (شکل ۱). این منطقه حد فاصل طول‌های جغرافیایی $52^{\circ}12'51''$ تا $46^{\circ}33'51''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $29^{\circ}38'32''$ تا $21^{\circ}32'32''$ شمالی قرار گرفته است و دارای میانگین بارش سالانه‌ی ۵۶ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه ۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. تشکیلات زمین‌شناسی غالب در منطقه بیشتر شامل تراس‌های آبرفتی مربوط به دوره زمین‌شناسی کواترنر و قسمت کمی از آن شامل تشکیلات آهکی شامل اوریتالین و آمونیت مربوط به دوره کرتاسه و همچنین رسوبات قدیمی دوره کواترنری است.

بر اساس گزارش‌های خاک‌شناسی موجود، واحدهای نقشه (که از نوع همگون^۱ بودند) به نام‌های لنجان، زاینده‌رود، خمینی‌شهر، نکوآباد

1- Consociation

و اصفهان انتخاب شدند و شش خاک‌رخ در هر یک از آن‌ها حفر شد (در مجموع، ۳۰ خاک‌رخ). مبنای انتخاب ۶ عدد خاک‌رخ برای هر واحد نقشه مساحت واحدها بوده که از آنجایی که تقریباً همه واحدها دارای مساحت یکسانی بودند با توجه به محاسبات انجام گرفته این عدد بدست آمد. بعد از تشریح هر یک از خاک‌رخ‌ها بر اساس راهنمای تشریح و نمونه‌برداری خاک‌ها در صحرای (۳۸)، خاک‌رخ شاهد در هر یک از واحدها انتخاب (در مجموع ۵ خاک‌رخ شاهد) و بعد از نمونه‌گیری از تمامی افق‌های ژنتیکی آن‌ها و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی هر یک از افق‌ها، در نهایت مطابق با کلید رده‌بندی آمریکایی خاک (۲۰۱۴) تا سطح فامیل خاک و بر اساس سامانه طبقه‌بندی جهانی خاک (WRB) (۲۰۱۵) تا سطح واحد خاک‌رخ‌های شاهد طبقه‌بندی گردیدند (۲۳ و ۴۲).

بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۷)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (۲۹) و ماده آلی به روش سوزاندن تر (۴۵) اندازه‌گیری شدند. pH نمونه‌ها در سوسپانسیون ۲:۱ آب مقطر به خاک با pH متر و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۲:۱ آب مقطر به خاک با استفاده از EC متر تعیین شدند.

جدول ۲- برخی از ویژگی های مورفولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی خاکهای شاهد سری های لنجان و اصفهان
Table 2- Some of the morphological, physical and chemical properties of the representative pedons in the Lenjan and Isfahanseries

Table 2- Some of the morphological, physical and chemical properties of the representative pecons in the Lenjan and Asfahan series																				
نام سری Name of series	افق Horizon	عمق Depth (cm)	رنگ مرطوب Moist Colour	پایداری مرطوب Consistency	درصدات کربنات %				ریس Clay	سیلت Silt	شن Sand	سنگریزه Rock fragments (mm)			بافت Texture	تجمعات Concentration (%)	گچ Gypsum	قابلیت هدایت الکتریکی EC (ds/m)	pH	ویژگی های اکسید و احیایی Redoximorphic properties
					مادل Calcium carbonate	ریس Clay	سیلت Silt	شن Sand				2-5	5-20	20-75						
(%)																				
لنجان	Ap	0-30	10YR 4/2	FR	44	34.5	35	30.5	7	25	Clay loam	-	5	1.2	7.8	-				c,1,P,F MM
	Bwg1	30-60	10YR 4/2	FR	43	35	34	31	10	30	Clay loam	-	3	0.5	7.5					m,1,P,F MM
	Bwg2	60-100	10YR 4/2	FI	39	34	36	30	20	33	Clay loam	-	0	0.34	7.5					f,1,F,FM M
	Bwg3	100-140	10YR 5/2	FI	42	43	37	20	10	15	Clay	-	0	0.28	7.6					
اصفهان	Ap	0-27	10YR 5/3	FR	40	31	50	19	5	0	Silty clay loam	-	10	1.6	7.5	-				
	Bwg1	27-50	2.5Y 5/2	FI	41	35	47	18	10	0	Silty clay loam	-	3	1.3	7.5	-				
	Bwg2	50-65	10YR 5/1	FI	36	57	33	10	0	25	clay	-	0	1.1	7.4	f,1,F, FMM				
	Bw	65-100	10YR 6/4	VFI	47	65	27	8	10	0	clay	-	0	1.3	7.45	m,2,P, FMM				
	Bk	100-165	10YR 5/6	VFI	41	65	25	10	0	2	5	clay	K2fl	0	0.9	7.5	m,2,P, FMM			
Firm:f;Firm: Many; l: Fine (size) 2: Medium (size)F: FaintP: Prominent FMM: iron-manganese K2: carbonates ;VFI: Very FirmFI,FR:Friable																				

Firm:Fewm: Many1: Fine (size) 2: Medium (size)F: FaintP: Prominent FMM: iron-manganese K2: carbonates :VF1: Very FirmFI:Friable

جدول ۳- برخی از ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی خاک‌رخ شاهد سری‌های زاینده‌رود و نکوآباد

Table 3- Some of the morphological, physical and chemical properties of the representative pedon in the Zayanderoud and Nekoabadseries

Table 2. Some of the most prominent physical and chemical properties of the representative peat in the Zayandeh-Rood and Kookabadi																
نام سری Name of series	افق Horizon	عمق Depth (cm)	رنگ مرطوب Moist Colour	°CEC (Cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	پایداری مرطوب Consistency Moist	کلسیم کربنات معادل Calcium carbonate equivalent %	رغ Clay	سیلت Silt	شن Sand	ذرات particles		بافت Texture	نسج (%) Gypsum	قابلیت هدایت الکتریکی EC (ds/m)	pH	ویژگی‌های اکسید و احیای Redoximorphic properties
										0.1-2	2-75					
(%)																
زاینده رود	Ap	0-20	10YR 4/2	34.4	VFI	27	29	25	46	5	25	Sandy clay loam	0	0.95	7.95	-
	Bwg1	20-40	2.5Y 4/2	29.5	FI	23	27	21	52	12	35	Sandy clay loam	0	0.84	7.83	-
	Bwg2	40-75	2.5Y 5.5/3	30.4	VFR	27	24	20	56	15	30	Sandy clay loam	0	0.78	7.2	-
	Bwg3	75-100	2.5Y 5/3	34.7	VFR	27	31	25	44	20	35	clay loam	0	0.6	7.4	f,1,F,FMM
نکوآباد	Bw	100-140	10YR 5/4	27.6	VFR	29	30	26	44	20	30	clay loam	0	0.6	7.4	m,2,P,FMM
	Ap	0-25	10YR 5/4	40.4	VFR	41	60	30	10	5	0	clay	0	2.1	7.6	-
	Bwg	25-35	2.5Y 5/2	37.2	VFI	38	57	35	8	2	0	clay	0	1.2	7.6	c,2,D,FMM
	Bw1	35-80	10YR 5/6	39.5	FI	39	65	25	10	10	0	clay	0	0.86	7.5	m,2,P,FMM
	Bw2	80-120	10YR 5/6	38.5	VFI	38	65	23	12	5	0	clay	0	1.5	7.7	m,2,P, FMM
Firm VFR: Very Friable; Common m: Many; Fine (size)2: Medium (size)m: Many; Distinct F: Faint; P: Prominent FMM: iron-manganese ;VFI: Very Firm;FI																

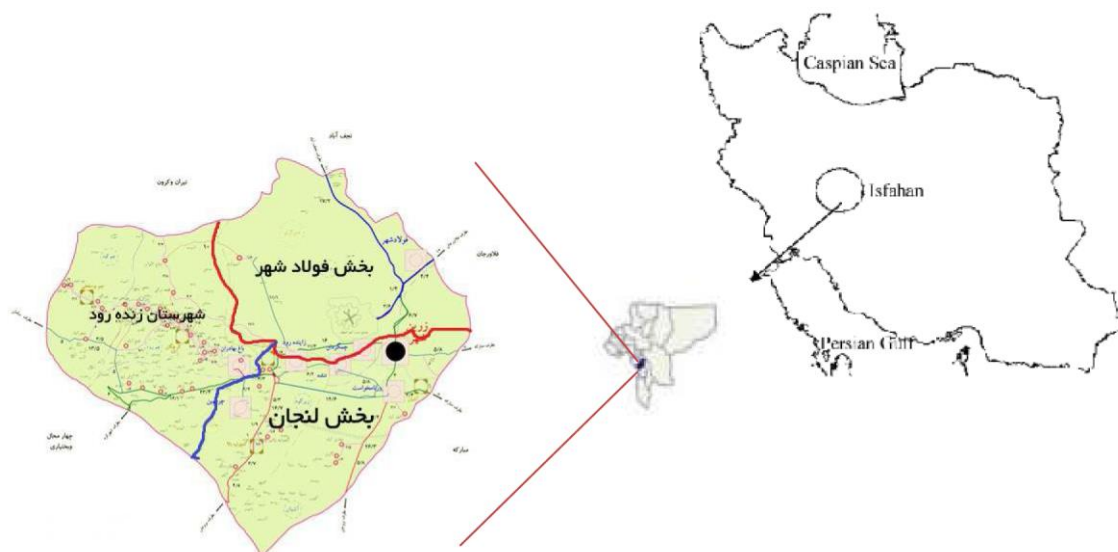
Firm VFR: Very Friable; Common m: Many1; Fine (size)2: Medium (size)m: ManyD; Distinct F: FaintP: Prominent FMM: iron-manganese ; VFI: Very FirmFI

اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی این خاک‌رخ برای تعیین کلاس قابلیت تبادل کاتیونی فامیل خاک به‌دلیل دارا بودن کلاس مینرالوژی مخلوط ضروری بوده است

جدول ۴- برخی از ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی خاک‌ریخ شاهد سری خمینی شهر
Table 4- Some of the morphological, physical and chemical properties of the representative pedon in the Khomeiny shahr series

نام سری Name of series	افق Horizon	عمق Depth (cm)	رنگ مرطوب Moist Colour	پایداری مرطوب Consistency	کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent %	Clay %	Silt %	Sand %	سنگریزه Rock fragments (mm)			نسبت Texture	تجمعات Concentration (%)	کلسیم فسفات Gypsum	هدایت الکتریکی EC (ds/m)	pH	ویژگی‌های اکسید و اجزای Redoximorphic properties
									2-5	5-20	20-75						
خمینی شهر	Ap	0-10	10YR 5/4	VFR	40.5	48	40	12	5	0	0	clay	-	7	2.1	7.6	-
	Bk1	10-35	10YR 6/4	FR	41	49	39	12	5	5	0	clay	k2fl	3	1.95	7.7	-
	Bk2	35-70	10YR 4/6	FR	43.5	50	30	20	5	0	0	clay	k2fl	9	2.2	7.7	-
	Bk3	70-110	10YR 5/2	F1	40.5	63	27	10	5	0	0	clay	k2c2	-	1.86	7.6	c,3.P, FMM
	Bk4	110-150	10YR 6/2	F1	45.5	64	26	10	5	5	0	clay	k2c1	-	2.4	7.7	c,2.P, FMM

Firm: Few 1: Fine (size) 2: Medium (size) 3: Coarse c: Common P: Prominent FMM: iron-manganese K2: carbonates VFR: Very Friable FL: Friable



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Location of the study area

ویژگی‌های خاک گردد و همچنین معیارهای هر دو سامانه رده‌بندی دستخوش تغییرات زیادی در طول زمان شده است لذا بایستی به این مطلب اشاره نمود که رده‌بندی خاک‌های حفر شده در هر واحد نقشه خاک الزاماً با رده‌بندی خاک‌های گزارش شده توسط مرکز تحقیقات کشاورزی استان اصفهان که در سال‌های ۱۳۵۳ و ۱۳۷۵ تهیه شده یکسان نمی‌باشد.

رده‌بندی هر یک از پروفیل‌های حفر شده در هر واحد نقشه خاک (جدول ۵) نشان می‌دهند که خاک‌های مزبور در سامانه آمریکایی در دو رده آریدی سول و اینسپتی سول قرار می‌گیرند.

رده‌بندی خاک‌ها در هر واحد نقشه خاک نشان می‌دهند که خاک‌های مزبور در سامانه آمریکایی در دو رده آریدی سول و اینسپتی سول قرار می‌گیرند. بایستی توجه نمود که به دلیل نحوه تعریف و اولویت تعریف رده‌های خاک در سامانه آمریکایی، رده خاک‌هایی که دارای زهکشی ضعیف طبیعی یا مصنوعی (خاک‌های احیا و یا دارای رژیم رطوبتی آکوئیک) هستند اجباراً بایستی اینسپتی سول انتخاب شود. مطابق تعریف رده‌ها در سامانه آمریکایی فقط زمانی این خاک‌ها آریدی سول هستند که علاوه بر رژیم رطوبتی آکوئیک، دارای افق سالیک نیز باشند ولی با توجه به اینکه رده اینسپتی سول معمولاً در مناطق نیمه‌خشک و مرطوب مشاهده می‌شود و عمده خاک‌های دارای تکامل در مناطق خشک در رده آریدی سول قرار می‌گیرند، لذا زیر رده‌ای مانند آکوئیدز^۲ برای این نوع خاک‌ها که در حقیقت نوعی آریدی سول هستند پیشنهاد می‌شود.

ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به روش استات آمونیوم (۴۴) و گچ به روش استون (۲۹) اندازه‌گیری شدند. لازم به ذکر است که در تعیین کلاس اندازه ذرات فامیل خاک و درصد رس برای تعیین فعالیت تبادل کاتیونی، درصد رس پس از کربنات‌زدایی^۱ مد نظر قرار گرفت. برای جداسازی رس نمونه‌ها جهت مطالعه کانی شناسی برای فامیل خاک از روش کیتریک و هوپ (۲۶) استفاده شد.

همچنین به منظور برآورد آلودگی خاک، محصولات کشاورزی و گوشت دام منطقه به دو فلز سنگین و خطرناک سرب و کادمیم برای سلامت انسان‌ها و دام، مقدار این فلزات در ۴۰۰ نمونه خاک سطحی به روش هضم اسیدی با اسید نیتریک ۴ مولار (۴۳)، ۷۰ نمونه محصولات مختلف کشاورزی با روش خاکستر خشک و هضم با اسید کلریدریک ۳ نرمال (۴۶)، ۲۰ نمونه گوشت گاو و ۱۰ نمونه گوشت گوسفند به روش هضم با اسید نیتریک خالص غلیظ (۱۲) اندازه‌گیری شد. برای توصیف آماری داده‌ها و بررسی چگونگی و توزیع آن‌ها از آمار کلاسیک استفاده شد. همچنین برای محاسبه شاخص‌های آماری (میانگین، میانه، ضریب تغییرات و انحراف معیار) از نرم‌افزار STATISTICA6 استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از اندازه‌گیری برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های شاهد هر واحد نقشه خاک در جدول‌های (۲) تا (۴) آورده شده است. از آن‌جا که گذشت زمان می‌تواند باعث تغییر در

جدول ۵- رده‌بندی خاک‌رخ‌های شاهد در هر واحد نقشه خاک در دو سامانه رده‌بندی آمریکایی و جهانی

Table 5- Classification of the representative pedons in soil units map in ST and WRB systems

نام واحد نقشه خاک Name of soil map unit	فامیل خاک (۴۲) Soil family	سامانه طبقه‌بندی جهانی خاک (۲۳) WRB soil classification system
لنجان Lenjan	Fine-Loamy, carbonatic, thermic TypicEpiaquepts	CalcaricGleysols (Loamic, Zootoxic)
زاینده‌رود Zayanderud	Fine-Loamy, mixed, Superactive, calcareous, thermic TypicEpiaquepts	CalcaricGleysols (Loamic, Zootoxic)
نکواباد Nekooabad	Very fine, mixed, Superactive, thermic, TypicAquicambids	CalcaricCambisols (Clayic, Zootoxic)
اصفهان Isfahan	Fine, carbonatic, thermic, TypicAquicambids	CalcaricCambisols (Loamic, Zootoxic)
خمینی‌شهر Khomeiny shahr	Fine, carbonatic, thermic TypicHaplocalcids	Haplic Calcisols (Clayic, Hypercalcic, Zootoxic)

جدول ۶- مشخصات آماری عناصر سرب و کادمیم (بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم) در نمونه خاک سطحی کل منطقه

Table 6- Statistical characteristics of lead and cadmium (mg/kg) in soil surface samples of region

عناصر (Element)	میانگین (Mean)	میانه (Median)	مینیمم (Min)	ماکزیمم (Max)	انحراف استاندارد (SD)	ضریب تغییرات % (% CV)	حد استاندارد Estandard limit
کادمیم Cadmium	1.11	1.08	0.18	6.3	0.61	54.95	0.8
سرب Lead	16.86	13.65	1.6	167.8	16.13	95.67	50

جدول ۷- میانگین غلظت سرب و کادمیم و بیشینه رواداری این دو فلز سنگین در محصولات مختلف (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک)

Table 7- Mean of lead and cadmium concentration and Maximum limit of heavy metals in different crops (mg kg dry weight^{۱)}

مشخصات Properties	کاهو Lettuce	کلم Cabbage	چغندر Beetroot	پیاز Onion	شلغم Turnip	یونجه Alfalfa
تعداد نمونه (Samples Number)	15	15	15	10	7	10
میانگین سرب (Mean lead)	4.8±2.8	3.4±1.4	5.4±2.4	2.7±2.3	2.88±1.95	3.4±2.1
میانگین کادمیم (Mean cadmium)	0.2±0.15	0.14±0.07	0.23±0.08	0.11±0.05	0.11±0.07	0.1±0.06
مینیمم سرب (Minimum lead)	0.55	1.5	1.15	0	0	0
مینیمم کادمیم (Minimum cadmium)	0	0	0.1	0	0	0
ماکزیمم سرب (Maximum lead)	8	4.7	8.3	4.3	5.7	7.45
ماکزیمم کادمیم (Maximum cadmium)	0.7	0.27	0.49	0.25	0.3	0.25
بیشینه رواداری سرب (۲۰) (Maximum limit of lead)	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	-
بیشینه رواداری کادمیم (۲۰) (Maximum limit of cadmium)	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	-
بیشینه مجاز سرب (۷) (Maximum permissible of lead)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	11*
بیشینه مجاز کادمیم (۷) (Maximum permissible of cadmium)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1*

* بر گرفته از منبع شماره (۱۶)

جدول ۸- مقادیر سرب و کادمیوم (بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تر) در عضله دو دام گاو و گوسفند

Table 8- Value of lead and cadmium (mg kg wet weight⁻¹) in muscle of cow and sheep

دام	مشخصات آماری	سرب	کادمیم
Livestock	Statistical characteristics	Lead	Cadmium
عضله گاو (تعداد نمونه = ۲۰) (Muscle of cow) NO=20	میانگین (Mean)	4.8	0.019
	حداقل (Min)	3.57	0
	حداکثر (Max)	7.93	0.04
	انحراف معیار (SD)	0.93	0.013
عضله گوسفند (تعداد نمونه = ۱۰) (Muscle of sheep) No.=10	میانگین (Mean)	4.1	0.016
	حداقل (Min)	4	0
	حداکثر (Max)	4.67	0.035
	انحراف معیار (SD)	0.25	0.015
	استاندارد ایران و اتحادیه اروپا (۸)		
	(Iran and Europe Union's permissible limit)		
		0.1	0.05

این پسوند بسته به تاثیر مواد بر روی سلامت انسان‌ها، تأثیر بر اکولوژی و موجودات خاک، تأثیر کمبود و یا بیش بود عناصر بر رشد گیاهان و همچنین تأثیر این مواد بر روی سلامت انسان‌ها و حیوانات از جمله دام به دلیل مصرف گیاهان و محصولات رشد کرده بر روی این خاک‌ها به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند که جزئیات استفاده از هر یک از این پسوندها در جدول (۱) آورده شده است. در این تحقیق برای حدود آستانه سرب و کادمیم خاک از استاندارد این عناصر در خاک‌های غیرآلوده کشور سوئیس که به ترتیب برابر ۵۰ و ۰/۸ میلی-گرم بر کیلوگرم می‌باشد برای مقایسه استفاده شد (۱۵). براساس نتایج جدول (۶) به طور کلی مقدار کادمیم در ۷۰ درصد کل نمونه‌های برداشت شده بالاتر از حد مجاز بودند. در میان واحدهای نقشه خاک، سری زاینده‌رود ۹۲ درصد نمونه‌های خاک آن دارای حد مجازی بالاتر از ۰/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم داشتند. همچنین در واحد نکوآباد تنها ۵۵ درصد نمونه‌ها بیشتر از حد مجاز کادمیم داشتند. با توجه به نتایج جدول (۶) در کل منطقه، دامنه تقریبی مقادیر میانگین کل سرب خاک بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم برابر ۱/۱۸۶ تا ۱۶۷/۸ می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج جدول (۷) همه نمونه‌های گیاهی انتخابی دارای غلظتی بیشتر از بیشینه رواداری سرب در محصولات دارند؛ به گونه‌ای که کاهو، کلم، چغندر، پیاز و شلغم به ترتیب در حدود ۲۴، ۱۱، ۵۴، ۲۷ و ۲۸ مرتبه بیشتر از حد مجاز بیشینه رواداری فلز سرب در خود ذخیره کرده‌اند. بیشینه مقدار سرب در محصولات کشاورزی طبق توصیه FAO-WHO، ۰/۳ می‌باشد (۷). بر این اساس اگر بخواهیم مقایسه‌ای با میزان غلظت سرب در محصولات مطالعه حاضر با مقدار مجاز توصیه شده توسط FAO-WHO داشته باشیم کاهو، کلم، چغندر، پیاز و شلغم به ترتیب ۱۶، ۱۱، ۱۸، ۹ و ۹/۵ مرتبه بیشتر از این حد مجاز سرب در خود ذخیره کرده‌اند. لذا مقدار سرب در هر پنج محصول بیشتر از حد هر دو استاندارد ذکر شده است.

از لحاظ طبقه‌بندی جهانی (۲۰۱۵)، خاک‌ها در سه گروه مرجع کمی‌سول، گلی‌سول و کلسی‌سول قرار گرفتند. با توجه به اینکه خاک‌رخ‌های مورد مطالعه در سری‌های نکوآباد و اصفهان در گذشته به دلیل کشت برنج حداقل چند روزی از سال از آب اشباع می‌شده‌اند رنگ خاک به خاطر احیای آهن و منگنز شرایط گلی بودن را نشان می‌دهد (جدول‌های ۲ و ۳). به همین دلیل، پسوند g برای افق‌های مربوطه به کار رفته است ولی در حال حاضر این خاک‌ها به دلیل خشکسالی و کمبود آب به کشت برنج اختصاص نمی‌یابند و خاک از آب اشباع نمی‌گردد. بنابراین، انتخاب گروه مرجع گلی‌سول^۱ برای این خاک‌ها ممکن نیست. همچنین، در شرایط فعلی، این خاک‌ها برخلاف این که دارای شرایط رنگ برای خاک‌های گلی هستند ولی فاقد شرایط احیایی^۲ تعریف شده در سامانه جهانی می‌باشند. بنابراین، شرایط برای انتخاب خاک‌های آنتروسل^۳ نیز برای این خاک‌ها برقرار نیست و اجباراً بایستی آن‌ها را در گروه مرجع کمی‌سول قرار داد.

نکته قابل توجه دیگر در رده‌بندی خاک‌ها وجود یک تفاوت مشخص در دو سامانه رده‌بندی است. همانطور که در نتایج رده‌بندی هر یک از خاک‌رخ‌های شاهد نشان داده شده است بر اساس سامانه طبقه‌بندی جهانی (۲۰۱۵) برای تمامی گروه‌های مرجع پسوند توکسیک به صورت زوتوکسیک قابل استفاده است. طبق تعریف پسوند تاکسیک موقعی استفاده می‌شود که در برخی لایه‌ها تا عمق ۵۰ سانتی‌متری از سطح زمین مواد آلی و یا غیر آلی سمی به جزء یون‌های آلومینیوم، آهن، سدیم، کلسیم و منیزیم وجود داشته باشد.

- 1- Gleysols
- 2- Reducing Conditions
- 3- Anthrosols

همچنین براساس جدول (۷) همه نمونه‌ها از لحاظ کادمیم دارای غلظتی بیشتر از بیشینه رواداری کادمیم که توسط استاندارد ملی ایران (۲۰) گزارش شده بود هستند. بیشینه مقدار کادمیم در محصولات کشاورزی طبق توصیه FAO-WHO، ۰/۱ است. هرچند اگر این نتایج با مقدار توصیه شده توسط FAO-WHO مقایسه گردد کادمیم کلم، پیاز و شلغم در محدوده این حد و یا پایین‌تر از آن می‌باشند اما غلظت کادمیم دو گیاه کاهو و چغندر در حدود ۲ برابر مقدار توصیه شده توسط FAO-WHO هستند.

نتایج جدول (۸) مقادیر میانگین غلظت دو فلز سرب و کادمیم (بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تر) را در عضله دو دام گاو و گوسفند نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مقدار میانگین سرب در دو دام گاو و گوسفند بیشتر از حد مجاز استاندارد ایران (۲۰) و اتحادیه اروپا (۸) می‌باشد. بر این اساس مقدار میانگین سرب به ترتیب در عضله گاو و گوسفند ۴۸ و ۴۱ مرتبه بیشتر از مقادیر استاندارد تعریف شده ایران و اتحادیه اروپا می‌باشد. همچنین میانگین سرب عضله دو نوع دام مورد مطالعه اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد نشان داده است.

بر اساس نتایج به‌دست آمده مقدار برخی از فلزات سرب و کادمیم در خاک، گیاهان و دام منطقه بیشتر از حد مجاز و برای سلامت انسان‌ها و حیوانات خطرآفرین گزارش شده است. اگر چه اهمیت این موضوع به نحوی در توصیف کننده‌های مکمل تاکسیک در سامانه رده‌بندی جهانی منعکس شده است ولی سامانه رده‌بندی آمریکایی در آخرین نسخه خود (۲۰۱۴) نیز نتوانسته این مسئله زیست‌محیطی مهم را در ارتباط با خاک‌های منطقه بیان نماید. به عقیده گراسیموف (۱۸) از آنجا که در سامانه جهانی خاک‌های متأثر از فعالیت‌های انسانی مدنظر قرار گرفته است، این سامانه بر سامانه آمریکایی برتری دارد. بریان و گالبریت (۶) یکی از نقص‌های سامانه رده‌بندی آمریکایی را عدم وجود یک رده مجزا برای شناخت خاک‌هایی دانستند که در آن‌ها فعالیت‌های آنتروپوژنیک وجود دارد. در رده بندی آمریکایی پیشوند زیرگروه‌هایی برای خاک‌های جابجا شده و تغییر یافته توسط بشر تعریف شده است که از آن جمله می‌توان به پیشوندهای آنتراکوئیک، آنترودنسیک، آنتروپورتیک و آنترالتیک اشاره نمود که این موارد در نسخه‌های قبلی این سامانه وجود نداشت. ولی دو اشکال اساسی وجود دارد یکی آنکه زیر گروه‌های جدید برای بعضی از رده‌ها تعریف شده است و برای رده‌های مانند اریدیسولز تعریف نشده است و دیگر آنکه هیچ کدام از این زیر گروه‌ها جهت آلودگی زیست‌محیطی به فلزات سنگین در خاک، گیاه و دام منطقه تعریف نشده است که ضرورت آن بسیار احساس می‌شود. اسفندیارپور و همکاران (۱۰) در مطالعه‌ای که با هدف مشخص نمودن میزان همبستگی و همخوانی میان دو سامانه طبقه‌بندی جهانی و آمریکایی در رده‌بندی برخی مناطق خاک‌های

خشک و نیمه‌خشک ایران انجام دادند به این نتیجه رسیدند که سامانه طبقه‌بندی جهانی نسبت به سامانه رده‌بندی آمریکایی بهتر می‌تواند ویژگی‌های خاک‌های آهکی را برای نامگذاری نشان دهد و به عبارت دیگر سامانه طبقه‌بندی جهانی برای خاک‌های مناطق خشک کامل‌تر از سامانه رده‌بندی آمریکایی است. نورایی (۳۱) اعتقاد دارد که سامانه طبقه‌بندی جهانی، نتایج قابل قبول‌تری را نسبت به سامانه‌ی رده‌بندی آمریکایی، در رابطه با کلاس‌بندی خاک‌های منطقه‌ی خشک دشت لوت در دسترس قرار می‌دهد. همچنین نتایجی مشابه با این دو مطالعه، در خاک‌های آهکی و گچی کرمان توسط سرمست و همکاران (۳۵) گزارش شد.

هرچند وجود پسوند گروه تاکسیک و زیرمجموعه‌های آن در سامانه جهانی تا حدی توانسته است آلودگی‌های زیست‌محیطی و خاک را نشان دهد لیکن به نظر می‌رسد که هنوز این سامانه نیز دارای اشکالاتی است. به عنوان مثال، یکی از این اشکالات، عدم ارایه یک تعریف کمی برای پسوند تاکسیک می‌باشد. همانطور که در جدول (۱) آورده شده همه این توصیف‌کننده‌ها کیفی است و امکان تفکیک نمودن آن‌ها در مواردی از همدیگر مشکل است. به عبارت دیگر، از آنجا که آلودگی به عواملی مانند منشأ، روش تماس و نوع پذیرنده آلودگی بستگی دارد با تعاریف موجود برای هر یک از توصیف‌کننده‌ها استفاده از آنها با ابهاماتی روبه‌رو است (۲۵). لذا ارایه یک تعریف جامع‌تر و استاندارد از تاکسیک و زیر مجموعه‌های آن، ابهامات موجود را به حداقل می‌رساند.

نتیجه‌گیری کلی

مقایسه رده‌بندی خاک‌ها در دو سامانه نشان داد که سامانه رده‌بندی آمریکایی با وجود اضافه نمودن کلاسی برای تأثیرات بشری بر روی خاک‌ها در سطح فامیل، نتوانست آلودگی خاک‌های منطقه به عناصر سنگین را نشان دهد ولی سامانه جهانی به دلیل وجود توصیف‌کننده توکسیک در بیان شرایط زیست‌محیطی و آلودگی خاک‌های مورد مطالعه از کارایی بیشتری برخوردار بود. در این راستا پیشنهاد می‌شود برای توصیف کننده‌های زیرمجموعه تاکسیک یک تعریف کمی و استاندارد به‌منظور رفع ابهامات موجود در سامانه طبقه‌بندی جهانی خاک در نسخه‌های آتی ارایه شود تا ضمن ارتقای کیفیت این سامانه، محققان و برنامه‌ریزان بتوانند در راستای مدیریت اراضی و بهبود امنیت غذایی در یک منطقه بهتر تصمیم‌گیری نمایند. لزوم در نظر گرفتن مسایل زیست‌محیطی در رده‌بندی آمریکایی بایستی به‌عنوان یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر در دستور کار قرار گیرد. تغییر و اصلاح تعاریف خاک‌های با زهکشی ضعیف در هر دو سامانه نیز نیازمند اصلاحات اساسی است.

استان چهارمحال و بختیاری تأمین شده است که بدینوسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

بخشی از هزینه‌های اجرای این تحقیق توسط دانشگاه پیام نور

منابع

- Ahrens R.J., and Engel R.J. 1999. Soil taxonomy and anthropogenic soils, In: J.M. Kimble, et al. (eds.). Classification, Correlation, and Management of Anthropogenic Soils. Proceedings. Nevada and California, Sept. 21-Oct. 2, 1998. USDA-NRCS, Nat. Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Amini M. 2004. Modeling Heavy Metal Accumulation and Assessing its Uncertainty in Agro- ecosystems of Isfahan Region. PhD thesis. Isfahan University of Technology. 135 p. (In Persian with English abstract).
- Amini M., Afyuni M., Fathianpour N., Khademi H., and Fluhler H. 2005. Continuous soil pollution mapping using fuzzy logic and spatial interpolation. *Geoderma* 124: 223-233.
- Asadi Z. 2004. Coregeionalization of selected heavy metals concentration in some plants and soils around Isfahan steel factory and foolad mobarakeh steel complex. MSc Thesis. Isfahan University of Technology. 123 p. (In Persian with English abstract).
- Bahmani M., Salehi M., and Esfandiarpour I. 2014. Comparison of Soil Taxonomy and WRB for Description of Soil Properties in Some Arid and Semiarid Regions of Central Iran. *JWSS - Isfahan University of Technology*. 18 (67):11-21. (In Persian with English abstract)
- Bryant Ray B., and Galbraith John M. 2003. Incorporating Anthropogenic Processes in Soil Classification, In: H. Eswaran et al. Soil classification: a global desk reference. CRC.
- Codex Alimentarius Commission (FAO/WHO). 2001. Food additives and contaminants. Joint FAO/WHO Food Standards Program 2001; ALINORM 01/12A:1-289.
- Codex Alimentarius Commission (FAO/WHO). 2011. Food additives and contaminants. Joint FAO/WHO Food Standards Program Fifth Session CF/5 INF/1.
- Dudal R., Nachtergaele F.O., and Purnell M.F. 2002. The human factor of soil formation. Proc. 17th World Congress of Soil Science, Symposium 18, vol. 11. Bangkok, Thailand, 93p.
- Esfandiarpour Boroujeni I., Salehi M.H., Karimi A., and Kamali A. 2013. Correlation between Soil Taxonomy and World Reference Base for Soil Resources in classifying calcareous soils: (A case study of arid and semi-arid regions of Iran). *Geoderma* 197-198:126-136.
- Esfandiarpour Boroujeni I., Farpoor M.H., and Kamali A. 2011. Comparison Between Soil Taxonomy and WRB for Classifying Saline Soils of Kerman Province -Journal of Water and Soil. 25: 5. 1158-1171. (In Persian with English abstract).
- Fallah A.A, Saei-Dehkordi S.S, Nematollahi A., and Jafari T. 2011. Comparative study of heavy metal and trace element accumulation in edible tissues of farmed and wild rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) using ICP-OES technique. *Microchemical Journal* 98:275-279.
- FAO/ISRIC/ISSS. 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Rep., vol. 84. FAO, Roma.
- Florea N., and Munteanu I. 2000. Sistemul Român de Taxonomie a Solurilor, (Romanian System of Soil Taxonomy) Univ. "Al. I. Cuza" Iasi. 107 p.
- FOEFL (Swiss Federal Office of Environment, Forest and Landscape), 1998. Commentary on the Ordinance Relating to Pollutants in Soils, VBBo of July 1, Bern.
- Food quality criteria; EU 2001. EU (2001) No:466.
- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. p. 383-411. In: A. Klute (ed.). Methods of Soil Analysis, part 1, physical and mineralogical methods Agronomy SSSA, Madison, WI.
- Gerasimova M. I. 2010. Chinese soil taxonomy: between the American and the international classification systems. *Eurasian Soil Science*. 43: 945-949.
- Hewitt A.E. 1993. Methods and rationale of the New Zealand Soil Classification. Landcare Research Science Series, vol. 2. Manaaki Whenua Press, Lincoln, New Zealand, 71p.
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran. Food & Feed-Maximum limit of heavy metals. 2011. 1st. Edition. No 12968.
- Isbell R.F. 1996. The Australian Soil Classification. CSIRO Publishing, Melbourne, Australia.
- IUSS Working Group WRB. 2007. World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.
- IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2015. No. 106. FAO, Rome.
- Jenny H. 1941. 'Factors of Soil Formation.' McGraw-Hill Book Company Inc: Dover. 281p.
- Kirkham MB. 2006. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. *Geoderma* 137: (1- 2). 19-32.

- 25- Kittrick J. A., and Hope E.W. 1963. A procedure for the particle size separation of soils for X-Ray diffraction analysis. *Soil Science*. 96: 312-325.
- 26- Lado LR., Hengl T., and Reuter HI. 2008. Heavy metals in European soils: A geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. *Geoderma*. 148: 189-199.
- 27- Maas S., Scheifler R., Benslama M., Crini N., Lucot E., Brahmia Z., Benyacoub S., and Giraudoux P. 2010. Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria. *Environmental Pollution*. vol 158: 6. 2294-2301.
- 28- Nelson R.E. 1982. Carbonate and gypsum. P. 181-197. In: A. L. Page, et al. (eds.). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. 2nd ed. Agron. Mongor. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 29- Němeček J. 2001. Taxonomický klasifikační systém půd České republiky (System of Soil Taxonomy of the Czech republic). *ĚZU Praha*, 79p.
- 30- Noraiee K. 2009. Genesis and classification of soils in Sirch-Kaleshur toposequence, Loot desert. MSc thesis Shahid Bahonar University of Kerman. (In Persian).
- 31- Pere J., Siika-aho M., and Viikari L. 1995. Effects of purified *Trichoderma* cellulose on the fiber properties of kraft pulp. *Tappi Journal*. 78:6.71-78.
- 32- Pouyat R.V., and Efland W.R. 1999. The investigation and classification of humanly modified soils in the Baltimore Ecosystem Study, In: J. M. Kimble et al. (eds.). *Classification, Correlation, and Management of Anthropogenic Soils*. Proceedings Nevada and California, Sept. 21-Oct. 2, 1998. USDA-NRCS, Nat. Soil Surv. Center, Lincoln, NE.
- 33- Rossiter D. G. 2007. Classification of Urban and Industrial Soils in the World Reference Base for Soil Resources. *J Soils Sediments*. 7: 2. 96-100.
- 34- Sarmast M., Frapoor M.H., and Esfandiarpour Boroujeni I. 2016. Comparing Soil Taxonomy (2014) and updated WRB (2015) for describing calcareous and gypsiferous soils, Central Iran. *Catena* 145: 83-91.
- 35- Sarshogh M. 2010. The effect of aspect and slope position on soil morphological, physicochemical and mineralogical properties in Chelgerd region. MSc thesis, Shahrekord University, Iran. (In Persian with English abstract).
- 36- Schad P., and Micheli E. 2010. The next steps in soil classification or how to kill 3 birds with 1 stone: pedons, landscapes, functions. 2010 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. pp: 40-42.
- 37- Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C., and Broderson W.D. (eds.). 2012. Field book for describing and sampling soils, 2nd version. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE, USA.
- 38- Schwartz R., Gerth J., Neumann-Hensel H., and Förstner U. 2006. Assessment of highly polluted Fluvisol in the Spittelwasser floodplain based on national guideline values and MNA-criteria. *Journal Soils Sediments* 6: 3. 145-155.
- 39- Simonson R.W. 1959. Outline of a generalized theory of soil genesis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23: 152-156.
- 40- Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy. 11th ed. USDA Natural Resources Conservation Service. Washington DC.
- 41- Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th ed. USDA Natural Resources Conservation Service. Washington DC.
- 42- Sposito G., Lund L.J., and Chang A.C. 1982. Trace metal chemistry in air-d-zone field soils amended sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, Pb in solid phases. *Soil Science Society of America journal* 46:260-264.
- 43- Sumner M.E., and Miller W.P. 1996. Cation exchange capacity, and exchange coefficients. In: D.L. Sparks (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 2: Chemical properties (3rd ed.). ASA, SSSA, CSSA, Madison, WI.
- 44- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of chromic acid in soil analysis. 1. *Experimental Soil Science* 79:459-465.
- 45- Westerman R.L. 1990. "Soil testing and plant analysis", Soil Science Society America, Madison, Wisconsin, USA.



American Soil Taxonomy Compared to World Reference Base for Expressing Environmental Pollution, a Case Study: Lenjanat Region of Isfahan

R. Mohajer^{1*} - M.H. Salehi²

Received: 26-02-2017

Accepted: 11-09-2017

Introduction: Increasing demand for an international classification system as a unique language in soil science has caused development of different classification systems. Soil classification is a useful tool for understanding and managing soils. In recent decades, the role of human in soil formation has become a matter of great concern among soil scientists. Human is now considered as a soil-forming factor and anthrosolization is recognized as a soil-forming process that consists of a collection of geomorphic and pedological processes resulting from human activities. Industrial developments, mines and their activities and intensive agriculture led to soil changes in urban areas. One of the important missions of soils classification is to identify important properties which have effect on management purposes. In recent years, the importance of human impact on soil properties considered in soil classification systems like American Soil Taxonomy (2014) and World Reference Base (2015) and some revisions and changes have been made in this regard. In this study, the efficiency of American Soil Taxonomy and WRB soil classification systems soils were compared to describe the pollution of soils to heavy metals in Lenjanat region of Isfahan, Iran.

Materials and Methods: Agricultural lands located in Lenjanat region of Isfahan province were selected as the study area. Lenjanat is an industrial region in which intensive agriculture surrounded by different industries like steel and cement making factories and lead mining. Agricultural lands which consisted of five soil map units (Khomeini Shahr, Nekooabad, Isfahan, Lenjan and Zayandehroud) were selected and 400 topsoil samples were randomly collected. Six soil profiles were excavated in each map unit (totally 30 soil profiles) and after describing soil, the classification of soils was determined in the field. Then, representative pedons were chosen for each unit and routine soil morphological, physical and chemical properties were determined using common methods. Finally, the soil profiles were classified according to criteria of Soil Taxonomy up to family level and (WRB) at the second level. The amount of heavy metals was studied in some agricultural crops of the region and livestock muscles in the region. Total Cd and Pb were extracted from the soil samples using concentrated HNO₃. Cadmium and lead of plant samples were prepared according to the procedure of Dry-ashing. Heavy metals were extracted by 3 N HCl. The metal contents of soil and plant samples were determined by flame atomic absorption spectrometry (FAAS). Descriptive statistics including mean, variance, maximum, minimum, and coefficient of variation (CV) were calculated using STATISTICA 6.0 software.

Results and Discussion: According to WRB (2015) classification, the soils were classified as 3 reference groups: Cambisols, Gleysols and Calcisols. The soils were also categorized as Aridisols and Inceptisols in Soil Taxonomy system. In this study, the environmental standards based on Swiss Federal Office of Environmental, Forest and Landscape were used for the threshold values of heavy metals pollution in the soils (VBBö). The results also indicate that the amount of cadmium in most of the soil samples was higher than the threshold limit. The amount of lead in soils was below the threshold limit. The results also indicated that all the crops had a lead average higher than the maximum of tolerance. The average of lead in cow and sheep livestock was also above Iran and Europe Union's permissible limit. Despite American soil taxonomy classification system in the last version has a class (Anthracic, Anthraquic, Anthrodensic, Anthropic) to show human impacts on soils at family level, it could not show the contamination of soils to heavy metals. However, WRB soil classification system defined qualifier "toxic" (Anthrotoxic, Ecotoxic, Phytotoxic, Zootoxic) which can be used in these conditions. Both systems had serious shortcomings to show poor drained soils in this area. Defining the Aquids suborder for Aridisols in American Soil Taxonomy and revision of the definition of Gleysols, Anthrosols and also aquic conditions in WRB soil classification system are highly recommended.

Conclusion: The results indicated that WRB soil classification system could explain the soils pollution and

1- Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: reza.mohajer@pnu.ac.ir)

2- Professor of Soil Science, College of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord

also their effects on human health for the studied soils. Definition of some quantitative sub qualifiers for toxic can be useful to improve the efficiency of WRB for classifying polluted soils. Incorporating some criteria for pollution hazards in American Soil Taxonomy should be considered in early future.

Keywords: Soil classification, Soil pollution, Toxic qualifiers



شبیه‌سازی اثر کود نیتروژن بر تولید ذرت (*Zea mays*) توسط مدل CERES-Maize تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه

فرزاد مندنی*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۷

چکیده

به منظور واسنجی و ارزیابی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی تولید ذرت تحت شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن آزمایشی به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۴ تکرار در کرمانشاه در سال ۱۳۹۳ اجرا شد. تیمارها شامل کود نیتروژن (صفر، ۱۳۸، ۲۳۸، ۳۵۰ و ۴۸۳ کیلوگرم اوره در هکتار) به‌عنوان کرت‌های اصلی و ارقام ذرت SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به‌عنوان کرت‌های فرعی بودند. ضرایب ژنتیکی ارقام توسط بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی برای تیمار ۳۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار محاسبه شد. نتایج واسنجی نشان داد، مدل قادر است با حداقل اختلاف، ویژگی‌های رشد و نمو را برای ارقام ذرت شبیه‌سازی کند که بیانگر دقت بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده بود. نتایج ارزیابی‌های مدل نشان داد که میزان nRMSE وزن خشک کل در ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۶/۲، ۸/۲ و ۵/۸ درصد میانگین مشاهده‌ها بود. میزان nRMSE عملکرد دانه نیز برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۴/۳، ۱۱/۴ و ۸/۱ درصد میانگین مشاهده‌ها بود. هم در شرایط شبیه‌سازی و هم در شرایط مزرعه با افزایش میزان کود نیتروژن از صفر به ۱۳۸، ۲۳۸، ۳۵۰ و ۴۸۳ کیلوگرم اوره در هکتار شاخص سطح برگ، عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه ارقام ذرت افزایش یافت. رقم سیمون در مقایسه با سایر ارقام از عملکرد دانه بیشتری برخوردار بود. بطور کلی نتایج نشان داد که مدل CERES-Maize قادر بود واکنش ارقام ذرت نسبت به تغییرات نیتروژن را با دقت بالایی پیش‌بینی کند.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی مدل، عملکرد دانه، نمو فنولوژیک، واسنجی مدل، وزن خشک کل

مقدمه

شبیه‌سازی گیاهان زراعی در تحقیقات جمع‌آوری شده است (۲۱). مدل DSSAT در بیش از ۹۰ کشور توسط محققان بسیاری از اواخر دهه ۱۹۸۰ مورد استفاده قرار گرفته است (۱۱). بطوری‌که جونز و همکاران (۱۱) به بیش از ۱۲۰ مطالعه انجام شده توسط این مدل‌ها در شمال آمریکا تا آفریقا اشاره کرده‌اند. در این مطالعات از این مدل برای تعیین عملیات مطلوب مدیریتی محصولات، مدیریت کود، مدیریت آبیاری، کشاورزی دقیق، مدیریت آفت، تنوع و تغییر اقلیم، آلودگی محیط و آموزش استفاده شده است (۲۱).

مدل سیستم گیاهی ذرت (CERES-Maize) یکی از مشهورترین مدل‌های بسته نرم‌افزاری DSSAT و یکی از پرکاربردترین مدل گیاهی شبیه‌سازی رشد و تولید ذرت است (۱۰) و (۱۹) که در سراسر جهان، بیش از ۳۰ سال در زمینه آن تحقیق و بررسی شده و می‌تواند اثرات گونه گیاهی، تراکم کشت، آب و هوا، آب خاک و نیتروژن را بر رشد، نمو و عملکرد ذرت شبیه‌سازی کند (۹) و (۱۱). این مدل در پژوهش‌های فراوانی از جمله ارزیابی عملکرد در شرایط اقلیمی نیمه خشک مدیرانه‌ای (۱۶)، شبیه‌سازی تغییرات نیتروژن خاک (۲۲) و راهکارهای بهینه آبی (۱۴) استفاده شده و

استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد به عنوان ابزار مفیدی برای محاسبه واکنش محصولات زراعی نسبت به تغییر در عوامل محیطی و مدیریت زراعی، ارزیابی ویژگی‌های فیزیولوژیک جهت بهبود عملکرد و کمک به تصمیم‌سازی‌ها جهت استفاده بهینه از منابع قابل دسترس افزایش یافته است (۱۵ و ۲۰). علاوه بر این، مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی کمک زیادی به کاهش هزینه‌ها و زمان مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها کرده و محققین را به کمک اطلاعات هواشناسی بلند مدت قادر به کاشت چندین ساله گیاه مورد نظر و ارزیابی نتایج آن می‌سازد (۲۱). در بین مدل‌ها یکی از معروفترین و پر کاربردترین آنها مدل DSSAT است که برای بیش از ۲۰ گیاه زراعی مختلف در یک بسته نرم‌افزاری، به منظور تسهیل در کاربرد مدل‌های

۱- استادیار اکولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

(*)- نویسنده مسئول: Email: farzad_mondani@yahoo.com
DOI: 10.22067/jsw.v31i6.161895

اجرای این تحقیق تعیین و واسنجی ضرایب ژنتیکی مدل CERES-Maize و ارزیابی اجرای آن در شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد دانه برخی از ارقام رایج ذرت تحت شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن و همچنین کاهش هزینه‌های تحقیقات کشاورزی و کمک به تصمیم‌گیری‌های مدیریت زراعی بود.

مواد و روش‌ها

تشریح مدل

به منظور شبیه‌سازی رشد و نمو ارقام مختلف ذرت از مدل سیستم گیاهی ذرت (CSM-CERES-Maize) از بسته نرم‌افزار DSSAT نسخه ۴/۶ استفاده شد (۹ و ۱۱). مدل CERES برای شبیه‌سازی اثر رقم، تراکم کاشت، آب و هوا (اقلیم)، رطوبت خاک و نیتروژن بر رشد، نمو و عملکرد گیاهان زراعی مختلف طراحی شده است. ورودی‌های این مدل شامل عملیات مدیریت زراعی، اختلافات ارقام، نوع و ویژگی‌های خاک و اطلاعات آب و هوایی است. ورودی‌های مدیریت زراعی شامل تاریخ کاشت، تراکم بونه، عمق کاشت، فاصله ردیف کاشت، شرایط اولیه خاک (رطوبت و حاصلخیزی) و جزئیات برداشت بود که در بخش XBuild بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT معرفی گردید. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز نیز شامل تشعشع خورشیدی روزانه، دمای حداقل و حداکثر روزانه و بارندگی روزانه برای شرایط آب و هوایی کرمانشاه بود که توسط بخش WeatherMan بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT در قالب فایل هواشناسی به عنوان ورودی‌های مدل معرفی گردید. علاوه بر این اطلاعات خاکشناسی مورد نیاز شامل درصد رس، شن و سیلت، وزن مخصوص ظاهری، اسیدیته خاک، کل نیتروژن قابل جذب توسط گیاه، درصد کربن آلی، نقطه ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و میزان رطوبت اشباع خاک محل آزمایش بود (جدول ۱) که توسط بخش SBuild بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT در قالب فایل خاکشناسی به عنوان ورودی‌های مدل معرفی گردید.

کارایی و توانمندی آن به اثبات رسیده است. این مدل همچنین می‌تواند تحت شرایط تنش‌های محیطی رشد و نمو گیاه، تولید ماده خشک و عملکرد را شبیه‌سازی کند. وایت (۲۴) اثرات نوسان درجه حرارت روی زمان گرده افشانی و رسیدگی فیزیولوژیکی ذرت را توسط مدل CERES-Maize مورد ارزیابی قرار داد و نتیجه گرفتند که این مدل دقت خوبی در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک داشت.

نیتروژن مهمترین عنصر مورد نیاز گیاه جهت دستیابی به عملکرد مطلوب است. اگرچه کمبود نیتروژن در محیط اطراف گیاه باعث کاهش عملکرد می‌گردد با این حال مدیریت صحیح این عنصر نه تنها منجر به کاهش مصرف کود و هزینه‌های تولید شده، بلکه باعث جلوگیری از آلودگی محیط زیست نیز می‌شود (۴). چسانگا و همکاران (۵) نشان دادند مدل CERES-Maize توانایی بالایی در شبیه‌سازی ویژگی‌های رشد و نمو ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن داشت. یانگ و همکاران (۲۷) نیز گزارش کردند مدل CERES-Maize دقت بسیار بالایی در شبیه‌سازی پاسخ ارقام ذرت به کاربرد مقادیر متفاوت کود نیتروژن داشت. همچنین گزارش شده است مدل CERES-Maize دقت بالای در پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت در شرایط کاربرد کود نیتروژن دارد (۲۲). محققین دیگر نیز توانایی مدل CERES-Maize را در شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت مطلوب گزارش کردند (۷، ۱۷ و ۲۳).

اطلاعات آب و هوایی و خاک، عملیات زراعی و ضرایب ژنتیکی از ورودی‌های اصلی مدل‌های بسته نرم‌افزاری DSSAT هستند. با این وجود دقت شبیه‌سازی صورت گرفته به وسیله مدل CERES-Maize بستگی به کیفیت داده‌های مورد استفاده، به خصوص در قسمت متغیرهای گیاهی، به عنوان ورودی‌های مدل دارد که اگر این متغیرها با توجه به مفهوم و تعریف آنها، به دقت از طریق آزمایش برآورد شوند، دقت و صحت شبیه‌سازی‌ها افزایش خواهد یافت (۱۵). در مدل‌های بسته نرم‌افزاری DSSAT ارقام مختلف گیاهان زراعی دارای واکنش‌های متفاوتی به تغییر در عوامل محیطی هستند که بر اساس ضرایب ژنتیکی تنظیم می‌شود (۹ و ۱۱). بر این اساس هدف از

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Soil physico-chemical properties of experimental field

عمق خاک (سانتی متر) Soil Depth (cm)	بافت خاک Soil Texture	رس (%) Clay (%)	سیلت (%) Silt (%)	شن (%) Sand (%)	کربن آلی (%) Organic Carbon (%)	نیتروژن (%) Nitrogen (%)	اسیدیته خاک Ph	وزن مخصوص ص ظاهری Bulk Density	نقطه پژمردگی دائم Permanent Wilting Point	نقطه ظرفیت زراعی Field Capacity	رطوبت اشباع Saturation (m ³ m ⁻³)
0-30	Clay-Silt	44.3	39.0	16.7	1.5	0.17	7.4	1.4	0.205	0.325	0.49
30-60	Clay-Silt	44.7	38.7	16.7	1.1	0.17	7.4	1.5	0.205	0.325	0.49
60-90	Clay-Silt	42.3	40.0	17.7	1.0	0.17	7.4	1.6	0.225	0.355	0.495

آزمایش مزرعه

به منظور استخراج ضرایب ژنتیکی مورد نیاز مدل CERES-Maize و اعتبارسنجی مدل آزمایشی در سال ۱۳۹۳ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی (طول جغرافیایی ۴۷ درجه ۵/۹۴ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹/۵۲ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۲۰ متر) اجرا شد. آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار بود. تیمارهای آزمایش شامل پنج سطح کود نیتروژن (صفر، ۴۰، ۷۰، ۱۰۰ و ۱۴۰ درصد نیاز گیاهی ذرت به عنصر نیتروژن که مقدار توصیه شده بر اساس آزمون خاک به ترتیب معادل صفر، ۱۳۸، ۲۳۸، ۳۵۰ و ۴۸۳ کیلوگرم اوره در هکتار در نظر گرفته شد) در قالب کرت‌های اصلی و سه رقم رایج ذرت دیررس SC-۷۰۴، متوسط رس سیمون و متوسط رس BC-۶۷۸ در قالب کرت‌های فرعی بودند. در این بررسی آنالیز خاک قبل از کاشت در اعماق صفر تا ۳۰، ۳۰ تا ۶۰ و ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متری خاک انجام شد و تیمارهای کود نیتروژن بر اساس این آزمون لحاظ شد (جدول ۱). از کود اوره (۴۶ درصد نیتروژن) در سه نوبت همزمان با کاشت، در مرحله نموی چهار برگی و آغاز گلدهی استفاده شد.

عملیات آماده‌سازی بستر بذر شامل شخم عمیق، دیسک زنی و تسطیح خاک بود که در نیمه دوم اردیبهشت انجام گردید و کاشت بذور ذرت به صورت خشکه‌کاری در اوایل خرداد ماه انجام شد. تراکم کاشت برای هر یک از ارقام مورد بررسی براساس تراکم مطلوب کاشت آن رقم انتخاب شد که ۷/۵ بوته در متر مربع بود. بذور ذرت در عمق ۵ تا ۷ سانتی‌متر توسط دست کشت شد. هر کرت فرعی نیز شامل ۴ ردیف کاشت به فاصله ۷۵ سانتی‌متر و به طول ۵ متر بود. آبیاری بلافاصله بعد از کاشت و بعد از آن هر ۷ روز یکبار بصورت نشتی صورت گرفت. مبارزه با علف‌هرز توسط وجین دستی بر حسب نیاز انجام گرفت.

اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده‌ها

اندازه‌گیری‌ها شامل ثبت مراحل نموی بر حسب روز پس از سبز شدن و نمونه‌برداری‌های تخریبی از بوته‌های ذرت بود. برای نمونه‌برداری‌های تخریبی از ۲ هفته پس از سبز شدن تا مرحله رسیدگی کامل، نمونه‌های تصادفی (در هر کرت ۳ بوته بطور کاملاً تصادفی) جهت اندازه‌گیری شاخص سطح برگ و وزن خشک گیاه برداشت شد. برای اندازه‌گیری سطح برگ از دستگاه شاخص سطح برگ‌سنج (مدل LA-3000A) استفاده شد. جهت اندازه‌گیری وزن خشک نیز ابتدا نمونه‌ها در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۷۲ ساعت تا ثابت شدن وزن خشک قرار داده شد و سپس توسط ترازو وزن آنها تعیین شد. برای ثبت عملکرد نهایی ذرت نیز در

انتهای دوره رشد، یک متر مربع از هر کرت برداشت شده و سپس وزن خشک کل و عملکرد دانه تفکیک ارقام اندازه‌گیری شد.

واسنجی مدل

به منظور واسنجی مدل CERES-Maize لازم است که ضرایب ژنتیکی ارقام مورد ارزیابی در محل آزمایش تحت شرایط مطلوب رشد (عدم وجود تنش‌های زیستی و غیر زیستی) تعیین شوند (۱۳). ضرایب ژنتیکی رشد و نمو گیاه را در شرایط آب و هوایی متفاوت تحت تأثیر خود قرار می‌دهند (۱۱). ضرایب ژنتیکی مورد نیاز مدل CERES-Maize شامل P1، فاصله بین ظهور گیاهچه تا پایان مرحله جوانی بر اساس درجه روز رشد و صفر فیزیولوژیک ۸ درجه سانتی‌گراد، P2، میزان تأخیر در نمو ذرت در صورت عدم تأمین طول روز مطلوب، P5، فاصله بین شروع گلدهی (ظهور ابریشم) تا رسیدگی فیزیولوژیک ذرت بر اساس درجه روز رشد و صفر فیزیولوژیک ۸ درجه سانتی‌گراد یا طول دوره پر شدن دانه، G2، حداکثر تعداد دانه تولید شده در بوته، G3، سرعت پر شدن دانه در مرحله پر شدن خطی دانه تحت شرایط مطلوب رشد و PHINT، فاصله زمانی بین ظهور نوک دو برگ متوالی (فیلوکرون) است (۹ و ۱۱). برای تخمین ضرایب ژنتیکی از بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی (GenCal) بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT استفاده شد. روش کار به این صورت بود که ابتدا واریته GF0301 (با توجه به نزدیکی بودن ویژگی‌های رشد و نمو آن به واریته‌های مورد ارزیابی) از فایل ضرایب ژنتیکی (MZCER045.CUL) بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT به‌عنوان پیش فرض انتخاب شد. برنامه محاسبه ضرایب ژنتیکی، ضرایب را از طریق اجرای متعدد مدل CERES-Maize براساس شرایط آب و هوایی و خاکشناسی و همچنین مدیریت زراعی تعریف شده در مدل، برای هر یک از واریته‌های مورد ارزیابی بطور جداگانه تخمین می‌زند. در این مرحله ضرایب ژنتیکی از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها با مشاهدات مزرعه و انتخاب حداقل اختلاف بین آنها تعیین و بطور خودکار در فایل ضرایب ژنتیکی مدل جایگزین می‌شود. اطلاعات لازم برای محاسبه ضرایب ژنتیکی شامل طول دوره نموی از سبز شدن تا گلدهی و طول دوره نموی از گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک، روند تغییرات شاخص سطح برگ، حداکثر شاخص سطح برگ، روند تغییرات عملکرد ماده خشک کل و روند تغییرات عملکرد دانه ذرت بود که از تیمار ۳۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (شرایط مطلوب) استخراج شد.

اعتبارسنجی مدل

اطلاعات مراحل نمو فنولوژیک، روند شاخص سطح برگ، روند

ضرایب ژنتیکی ذرت

مدل CERES-Maize دارای شش ضریب ژنتیکی است که رشد و نمو ذرت را تشریح می‌کند (جدول ۲). در این بررسی ضریب P1 که نشان دهنده فاصله بین ظهور گیاهچه تا پایان مرحله جوانی بر اساس درجه روز رشد و صفر فیزیولوژیک ۸ درجه سانتی‌گراد است، برای رقم SC-۷۰۴، ۲۷۵ درجه روز رشد و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، ۲۸۶ درجه روز رشد بدست آمد. مقدار ضریب P2 که بیانگر میزان تأخیر در نمو ذرت در صورت عدم تأمین طول روز مطلوب است، برای رقم SC-۷۰۴، ۱/۸۰ در هر ساعت و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، ۰/۵۷۶ در هر ساعت محاسبه شد. ضریب P5 که فاصله بین شروع گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک ذرت بر اساس درجه روز رشد و صفر فیزیولوژیک ۸ درجه سانتی‌گراد یا طول دوره پر شدن دانه را نشان می‌دهد، برای رقم SC-۷۰۴، ۹۱۰ درجه روز رشد و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، ۹۵۰ درجه روز رشد بود. همچنین مقدار ضریب G2 که نشان دهنده حداکثر تعداد دانه تولید شده در بوته است برای ارقام SC-۷۰۴ و BC-۶۷۸، ۷۵۰ دانه در بوته و برای رقم سیمون، ۸۵۰ دانه در بوته بدست آمد. مقدار ضریب G3 که سرعت پر شدن دانه در مرحله پر شدن خطی دانه تحت شرایط مطلوب رشد را نشان می‌دهد، برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۷/۵، ۷/۰ و ۷/۹ میلی‌گرم در روز محاسبه شد. همچنین ضریب PHINT (فاصله زمانی بین ظهور نوک دو برگ متوالی) برای رقم SC-۷۰۴، ۵۱/۹۷ درجه روز رشد در هر ظهور برگ و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، ۵۱/۷۰ درجه روز رشد در هر ظهور برگ بود. هوگینوم و همکاران (۹) نیز دامنه ضرایب ژنتیکی ارقام مختلف ذرت را برای ضرایب P1، P2، P5، G2، G3 و PHINT به ترتیب، ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه روز رشد، ۰/۸ در هر ساعت، ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه روز رشد، ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ دانه در بوته، ۶ تا ۱۰ میلی‌گرم در روز و ۳۰ تا ۶۰ درجه روز گزارش کردند.

عملکرد ماده خشک کل، روند عملکرد دانه و عملکرد دانه ارقام مختلف ذرت که از سایر تیمارهای آزمایش که به منظور استخراج پارامترها و واسنجی مدل از آنها استفاده نشده بود، استخراج گردید و برای تعیین اعتبار مدل CERES-Maize استفاده شد. شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده در این بررسی نیز شامل برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) و شاخص توافق ویلموت (d) بود که از طریق روابط (۱ تا ۳) محاسبه شد (۲۸):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\sigma} \times 100 \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

در این معادلات S_i ، مقادیر شبیه‌سازی شده، O_i ، مقادیر مشاهده شده، n ، تعداد مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و $\bar{O}$ ، میانگین مقادیر مشاهده شده است. جذر میانگین مربعات خطا نشان دهنده میانگین اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است (۲۵). جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نشان دهنده نیز درصد نسبی میانگین اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد که مقادیر صفر تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ درصد به ترتیب بیانگر دقت عالی، خوب و متوسط شبیه‌سازی‌ها است و مقادیر بالاتر از ۳۰ درصد نیز نشان دهنده عدم دقت شبیه‌سازی‌های مدل است (۲۷). مقادیر شاخص آماری توافق ویلموت بین صفر تا یک است که مقادیر $d \geq 0.9$ ، بیانگر توافق عالی، $0.8 < d \leq 0.9$ ، بیانگر توافق خوب، $0.7 < d \leq 0.8$ ، بیانگر توافق متوسط و $d < 0.7$ ، بیانگر توافق ضعیف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است (۱۲).

نتایج و بحث

جدول ۲- ضرایب ژنتیکی تخمین زده شده توسط بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی (GenCal) بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT برای هر یک از ارقام ذرت

Table 2- Estimated genetic coefficients using DSSAT GenCal for each maize cultivar

ضرایب ژنتیکی Genetic coefficients	ارقام ذرت Cultivars Maize			
	پیش فرض Default (GF0301)	SC SC-704-۷۰۴		سیمون
		BC-678	BC-678	Simon
P1 (degree days)	250.0	275.0	286.0	286.0
P2 (days)	0.500	1.800	0.576	0.576
P5 (degree days)	730.0	910.0	950.0	950.0
G2	840.0	750.0	750.0	850.0
G3 (mg day ⁻¹)	8.19	7.50	7.00	7.90
PHINT (degree days)	38.90	51.97	51.70	51.70

واسنجی مدل

نتایج واسنجی مدل CERES-Maize برای مراحل نموی ارقام مختلف ذرت در جدول ۳ نشان داده شده است. مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای مرحله نموی سبز شدن تا گلدهی برای رقم

SC-۷۰۴، یک روز و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، صفر روز بود (جدول ۳). جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز برای مرحله نموی سبز شدن تا گلدهی رقم SC-۷۰۴، ۱/۳۷ درصد و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، صفر بود.

جدول ۳- مقایسه آماری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، شاخص سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه ارقام ذرت برای واسنجی مدل CERES-Maize

Table 3- Statistical comparison between observed and simulated values for days to anthesis, days to maturity, Leaf area index, total dryweight and grain yield of maize cultivars for CERES-Maize model calibration

ارقام ذرت / Maize Cultivars	جذر میانگین مربعات خطا Root Mean Square Error (RMSE)			جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده Normalized Root Mean Square Error (nRMSE)		
	SCSC-۷۰۴	BC-۶۷۸	سیمون	SCSC-۷۰۴	BC-۶۷۸	سیمون
	704	BC-678	Simon	704	BC-678	Simon
Anthesis day / روز تا گلدهی	1	0	0	1.37	0.00	0.00
Maturity day / روز تا رسیدگی فیزیولوژیک	2	1	1	1.59	0.85	0.85
Leaf area index / شاخص سطح برگ	0.56	0.58	0.42	18.95	22.04	15.12
Total dry weight (kg ha ⁻¹) / وزن خشک کل	518.22	513.80	546.65	5.94	5.98	6.43
Grain weight (kg ha ⁻¹) / عملکرد دانه	362.80	111.39	260.42	7.05	2.77	5.29

اندازه‌گیری شده به ترتیب، ۵/۵۱۴۵، ۷/۴۰۱۹ و ۰/۴۹۲۶ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۳). میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز برای عملکرد دانه ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۷/۱، ۲/۸ و ۵/۳ درصد میانگین مشاهده‌ها بود (جدول ۳).

همانگونه که نتایج واسنجی ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای ویژگی‌های شبیه‌سازی شده مورد نظر و مقایسه آنها با نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده برای تیمار ۳۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار (شرایط مطلوب نیاز غذایی ذرت به کود نیتروژن) نشان داد، مدل CERES-Maize توانست با حداقل اختلاف، ویژگی‌های رشد و نمو را برای ارقام ذرت پیش‌بینی کند که این مطلب بیانگر دقت بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای ارقام مورد بررسی بود. همچنین مقایسه مقادیر جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده و r^2 در این تحقیق با نتایج سایر تحقیقات نشان دهنده دقت بسیار بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده توسط بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی (GenCal) بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT بود (۱۸، ۲۲ و ۲۳).

اعتبارسنجی مدل

مراحل نموی

هم در شرایط مزرعه و هم در شرایط شبیه‌سازی‌ها تغییرات نیتروژن خاک اثری بر طول دوره نمو فنولوژیک ارقام ذرت نداشت. با

مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای مرحله نموی سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک برای رقم SC-۷۰۴، ۲ روز و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، یک روز بود. همچنین جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز برای مرحله نموی سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک رقم SC-۷۰۴، ۱/۶ درصد و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، ۰/۸ درصد بود (جدول ۳). نتایج این بررسی همچنین نشان داد که میزان جذر میانگین مربعات خطای شاخص سطح برگ برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۰/۶، ۰/۵ و ۰/۴ در مقایسه با میانگین به ترتیب، ۲/۶، ۲/۷ و ۲/۷ اندازه‌گیری شده شاخص سطح برگ بود (جدول ۳). همچنین میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز برای شاخص سطح برگ ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۲۵/۵، ۲۱/۸ و ۱۶/۳ درصد میانگین مشاهده‌ها بود (جدول ۳). میزان جذر میانگین مربعات خطای وزن خشک کل برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۵۱۸/۲، ۵۱۳/۸ و ۵۴۶/۶ کیلوگرم در هکتار در مقایسه با میانگین اندازه‌گیری شده به ترتیب، ۸۷۳۰/۰، ۸۵۹۶/۱ و ۸۴۹۵/۴ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۳). همچنین میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز برای وزن خشک کل ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۵/۹، ۵/۹ و ۶/۴ درصد میانگین مشاهده‌ها بود (جدول ۳). نتایج نشان داد که میزان جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۳۶۲/۸، ۱۱۱/۴ و ۲۶۰/۴ کیلوگرم در هکتار در مقایسه با میانگین

فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده رقم SC-۷۰۴ به ترتیب، ۱۲۶ و ۱۲۸ روز بود. نتایج حاصل از ارزیابی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی مراحل نمو فیزیولوژیک رقم SC-۷۰۴ نشان داد که مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای مرحله نمو سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک به ترتیب، ۱ و ۲ روز و جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز به ترتیب، ۱/۴ و ۱/۶ درصد بود (جدول ۴).

این وجود ارقام ذرت از نظر مراحل فیزیولوژیک با یکدیگر تفاوت داشتند. در شرایط مزرعه زمان رسیدن از مرحله سبز شدن تا گلدهی و از گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک رقم SC-۷۰۴ به ترتیب، ۷۳ و ۵۳ روز بود، در حالی که نتایج شبیه‌سازی‌ها طول مرحله نمو سبز شدن تا گلدهی و گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک را به ترتیب ۷۴ و ۵۴ روز نشان داد. اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای مراحل نمو سبز شدن تا گلدهی و گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک، یک روز بود. همچنین طول دوره سبز شدن تا رسیدگی

جدول ۴- مقایسه آماری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، شاخص سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه ارقام ذرت برای ارزیابی مدل CERES-Maize

Table 4- Statistical comparison between observed and simulated values for days to anthesis, days to maturity, leaf area index, total dry weight and grain yield of maize cultivars for CERES-Maize model validation

ارقام ذرت Maize Cultivars	جذر میانگین مربعات خطا Root Mean Square Error (RMSE)			جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده Normalized Root Mean Square Error (nRMSE)			ضریب توافق (d) Index of agreement (d)		
	SC-۷۰۴	BC-۶۷۸	سیمون	SC-۷۰۴	BC-۶۷۸	سیمون	SC-۷۰۴	BC-۶۷۸	سیمون
	SC-704	BC-678	Simon	SC-704	BC-678	Simon	SC-704	BC-678	Simon
روز تا Anthesis day گلدهی	1	0	0	1.37	0.00	0.00	0.99	1.00	1.00
روز تا رسیدگی Maturity day فیزیولوژیک	2	1	1	1.59	0.85	0.85	0.99	0.99	0.99
شاخص سطح Leaf area برگ index	0.56	0.46	0.36	25.49	21.84	16.32	0.94	0.96	0.98
وزن خشک کل Total dry weight (kg ha ⁻¹)	440.05	569.57	419.75	6.25	8.18	5.82	0.95	0.94	0.95
عملکرد دانه Grain weight (kg ha ⁻¹)	163.68	345.19	314.36	4.30	11.36	8.11	0.98	0.93	0.94

BC-۶۷۸ و سیمون نیز به ترتیب، ۱۱۸ و ۱۱۹ روز بود. مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای مرحله نمو سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک ارقام BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، صفر و یک روز و جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز به ترتیب، صفر و ۰/۸ درصد بود (جدول ۴). همچنین ضریب توافق (d) برای مرحله نمو سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک نیز به ترتیب، ۱ و ۰/۹۹ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی مراحل نمو فیزیولوژیک ذرت ارقام BC-۶۷۸ و سیمون داشت (جدول ۴). در مدل‌های رشد گیاهان زراعی دقت شبیه‌سازی مراحل نمو فیزیولوژیک گیاه از اهمیت بسزایی برخوردار است زیرا تمام فرآیندهای تولید مواد فتوسنتزی و تخصیص آنها بین اندام‌های ریشه، ساقه، برگ و دانه و همچنین سایر

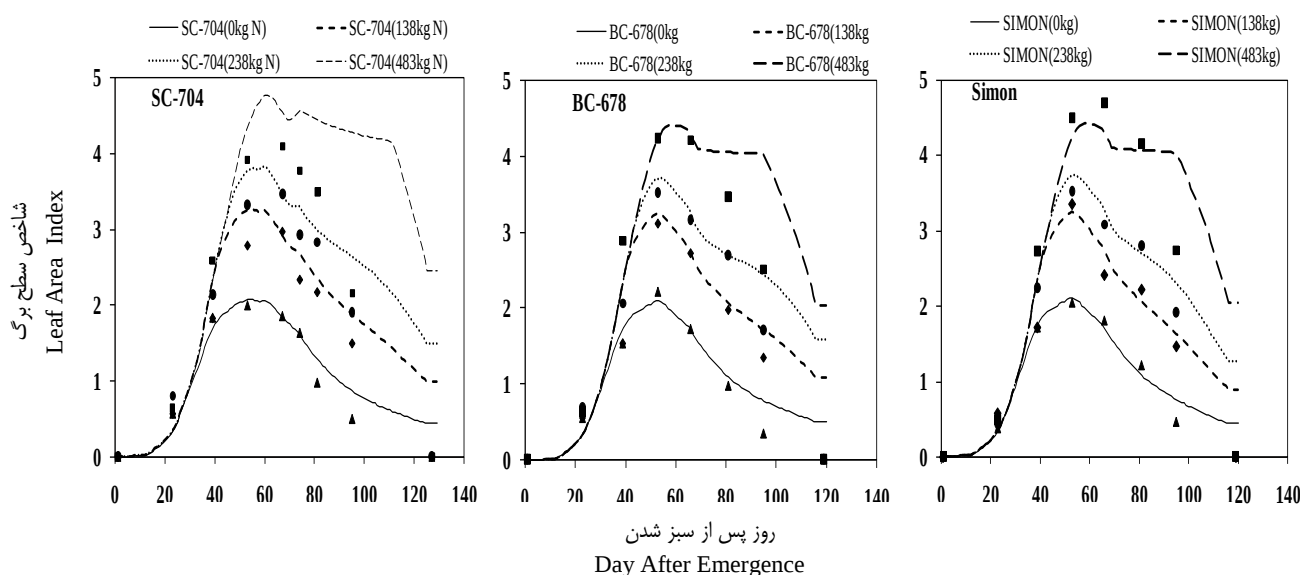
همچنین ضریب توافق (d) برای مرحله نمو سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک ۰/۹۹ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی مراحل نمو فیزیولوژیک ذرت رقم SC-۷۰۴ داشت (جدول ۴). نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که مرحله سبز شدن تا گلدهی و گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۶۵ و ۵۳ روز بود. طول مرحله نمو شبیه‌سازی شده سبز شدن تا گلدهی و گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک نیز به ترتیب ۶۵ و ۵۴ روز بود. اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای طول مراحل سبز شدن تا گلدهی و گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک به ترتیب صفر و یک روز بود. طول دوره سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ارقام

صرف‌نظر از تیمارهای کود نیتروژن، شاخص سطح برگ ارقام مختلف ذرت تا حدود ۳۰ روز پس از سبز شدن از رشد کمی برخوردار بود اما از این مرحله به بعد همراه با افزایش درجه حرارت روزانه، رشد شاخص سطح برگ به تدریج افزایش یافت و در حدود ۶۰ روز پس از سبز شدن (مرحله ظهور گل تاجی) به حداکثر میزان خود رسید (شکل ۱). شاخص سطح برگ بعد از مرحله گلدهی به علت پیری و ریزش برگ‌ها به تدریج کاهش یافت و در نهایت برای رقم SC-۷۰۴ و ارقام BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب در ۱۲۸ و ۱۱۹ روز پس از سبز شدن به انتهای رشد خود رسید (شکل ۱). مقایسه نتایج مزرعه نیز نشان داد که شاخص سطح برگ ارقام مختلف ذرت به جز در مراحل انتهایی رشد گیاه، روند تقریباً مشابهی نسبت به داده‌های شبیه‌سازی شده داشت (شکل ۱).

فرآیندهای رشدی گیاه تابعی از مراحل نمو است. یانگ و همکاران (۲۶) مقدار جذر میانگین مربعات خطای طول دور نمو سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده ارقام ذرت توسط مدل CERES-Maize در کارولینای شمالی را به ترتیب از ۱/۱ تا ۳/۵ روز و ۱/۳ تا ۳/۵ روز گزارش کردند. وایت (۲۴) نیز نشان داد که مدل CERES-Maize دقت خوبی برای شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک داشت. بنایان و همکاران (۳) شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک گندم زمستانه آمریکا را با مدل CERES-Wheat انجام دادند و به جذر میانگین مربعات خطا ۷ روز برای تاریخ گرده افشانی و ۱۰ روز برای رسیدگی برداشت دست یافتند.

شاخص سطح برگ

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که با پیشرفت مراحل نمو،



شکل ۱- اثر کاربرد کود نیتروژن بر شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خطوط) ارقام ذرت
Figure 1- Effect of nitrogen fertilizer application on measured (points) and simulated (lines) of maize cultivars leaf area index

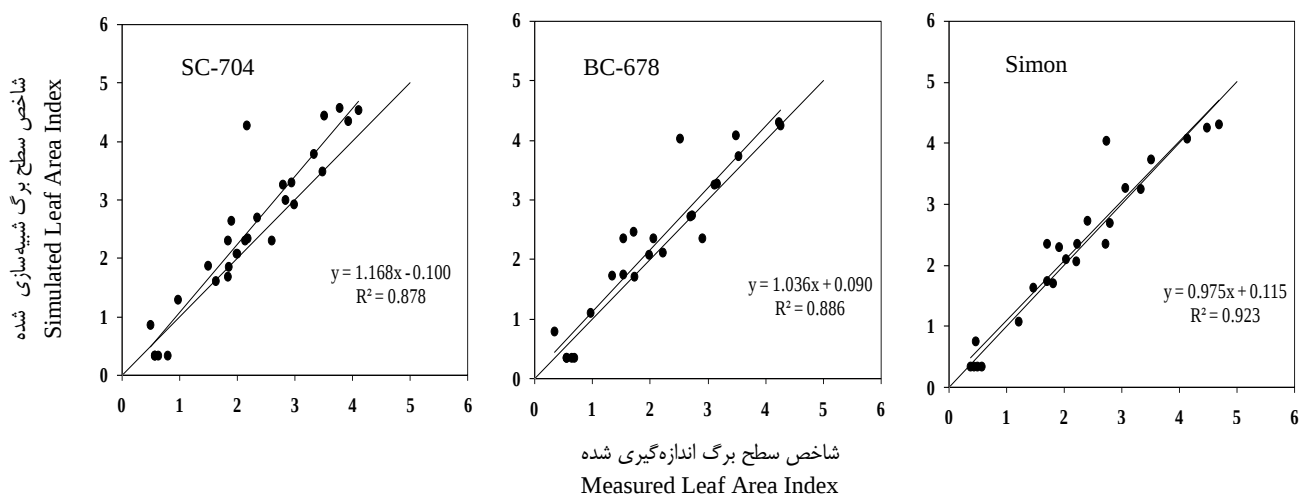
افزایش و سرعت تقسیم و بزرگ شدن سلول‌های برگ منجر به افزایش شاخص سطح برگ ذرت شد. علاوه بر این، افزایش میزان کاربرد نیتروژن می‌تواند از طریق تغییر زاویه برگ‌ها نسبت به ساقه، دوام سطح برگ و تولید برگ‌های بزرگتر باعث بهبود شاخص سطح برگ شود.

میزان جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) شاخص سطح برگ ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۰/۶، ۰/۶ و ۰/۴، در مقایسه با میانگین به ترتیب، ۲/۲، ۲/۱ و ۲/۲ مشاهده‌ها بود (جدول ۴). همچنین میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE)

لازم به ذکر است که هم در شرایط مزرعه و هم در شرایط شبیه‌سازی‌ها، روز تا رسیدن به حداکثر شاخص سطح برگ ارقام ذرت تحت تأثیر نیتروژن قرار گرفت، به گونه‌ای که با افزایش میزان کاربرد کود اوره حداکثر شاخص سطح برگ دیرتر حادث گردید. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که با افزایش میزان کاربرد نیتروژن، حداکثر میزان شاخص سطح برگ ارقام ذرت در تیمارهای ۱۳۸، ۲۳۸ و ۴۸۳ کیلوگرم اوره در هکتار نسبت به شرایط عدم مصرف کود به تدریج افزایش یافت که با داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه همخوانی زیادی داشت. به نظر می‌رسد نیتروژن از طریق اثر بر

۴). علاوه بر این، نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل CERES-Maize قادر بود تا بیش از ۹۲ درصد از تغییرات شاخص سطح برگ مشاهده شده را پیش‌بینی کند (شکل ۲).

نیز برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۲۵/۵، ۲۱/۸ و ۱۶/۳ درصد میانگین مشاهده‌ها بود (جدول ۳). ضریب توافق (d) برای شاخص سطح برگ ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۰/۹۴، ۰/۹۶ و ۰/۹۸ بود که حاکی از دقت بالای مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ داشت (جدول



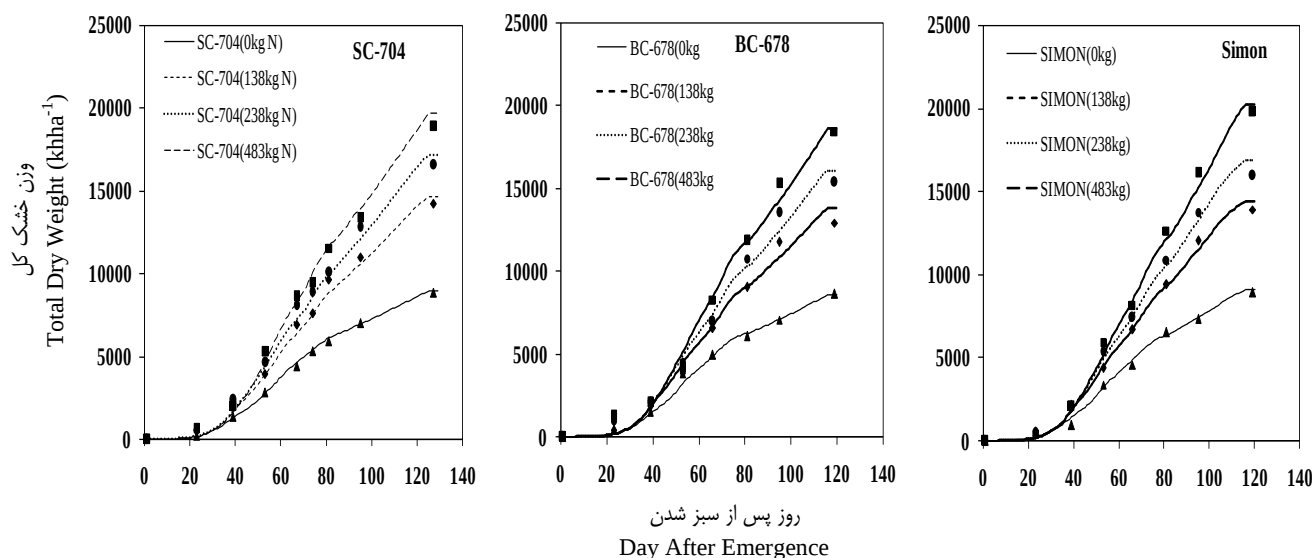
شکل ۲- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده شاخص سطح برگ ارقام مختلف ذرت در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن برای ارزیابی مدل

Figure 2- The regression analysis between the simulated and the measured maize cultivars leaf area index in nitrogen fertilizer application treatments for model validation

عملکرد وزن خشک کل

در ابتدای دوره رشد وزن خشک کل شبیه‌سازی شده ارقام ذرت صرف‌نظر از کاربرد کود نیتروژن به علت کوچک بودن بوته‌ها تا حدود ۴۰ روز پس از سبز شدن از روند رشد کندی برخوردار بود اما پس از آن به سرعت افزایش یافت و در انتهای دوره رشد گیاه به حداکثر میزان خود رسید (شکل ۳). در شرایط مزرعه نیز وزن خشک کل از روند مشابهی نسبت به شبیه‌سازی‌ها برخوردار بود. هم در شرایط شبیه‌سازی و هم در شرایط مزرعه با افزایش میزان کاربرد کود اوره از صفر به ۱۳۸، ۲۳۸ و ۴۸۳ کیلوگرم در هکتار، وزن خشک کل ذرت نیز به تدریج افزایش یافت. بیشترین وزن خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در تیمار کاربرد ۴۸۳ کیلوگرم اوره در هکتار بدست آمد که به ترتیب برای رقم SC-۷۰۴، ۱۸۹۲۰ و ۱۹۶۶۲ کیلوگرم در هکتار، رقم BC-۶۷۸، ۱۸۴۷۰ و ۱۸۶۰۹ کیلوگرم در هکتار و رقم سیمون، ۱۹۷۵۰ و ۲۰۲۳۷ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۳).

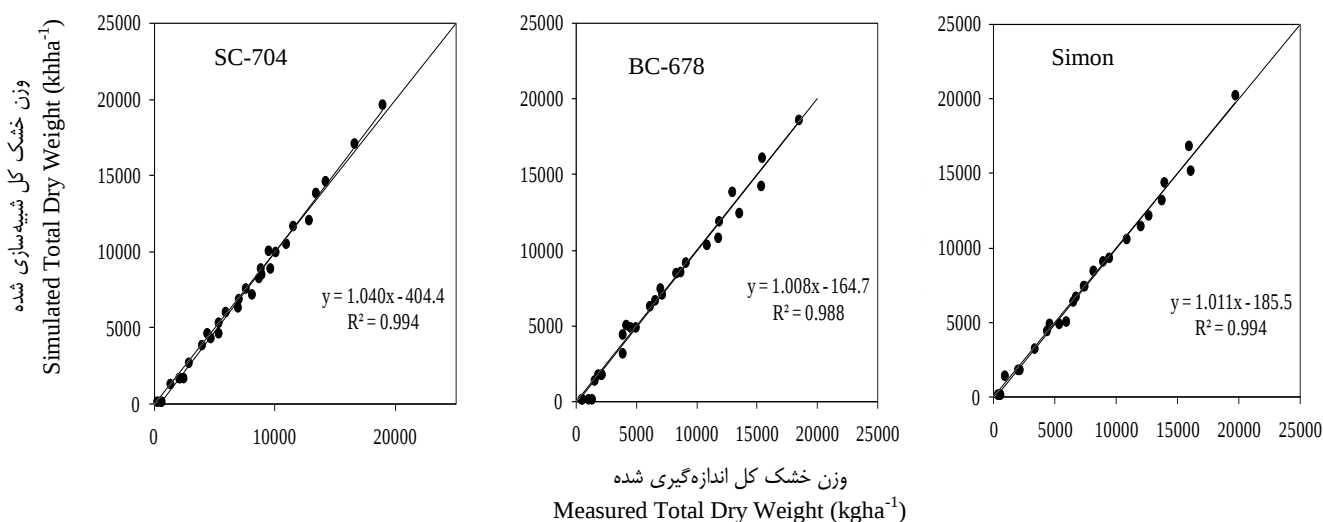
همانطور که نتایج ارزیابی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ ارقام ذرت تحت شرایط تیمارهای نیتروژن نشان داد، مدل در اکثر تیمارهای مورد بررسی میزان شاخص سطح برگ را در مراحل بعد از گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک گیاه بیشتر از داده‌های مزرعه تخمین زد (شکل ۱) که این موضوع باعث افزایش مقادیر جذر میانگین خطای نرمال شده به ویژه برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و در نتیجه کاهش نسبی دقت پیش‌بینی‌ها گردید. اما بطور کلی برآیند نتایج شاخص‌های ارزیابی نشان داد که مدل CERES-Maize از دقت نسبتاً خوبی برای پیش‌بینی تغییرات شاخص سطح برگ ارقام ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن برخوردار بود. چیسانگا و همکاران (۵) مقادیر جذر میانگین خطا و ضریب توافق (d) در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن توسط مدل CERES-Maize را به ترتیب، ۱/۳۴ و ۰/۵۴ نشان دادند. نونا و همکاران (۱۶) نیز گزارش کردند مدل Maize CERES از دقت پایینی در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ ذرت برخوردار بود. نامبردگان مقادیر جذر میانگین خطای نرمال شده را از ۲۶/۱۴ تا ۴۰/۵۷ درصد گزارش کردند.



شکل ۳- اثر کاربرد کود نیتروژن بر وزن خشک کل اندازه‌گیری شده (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خطوط) ارقام ذرت
Figure 3- Effect of nitrogen fertilizer application on measured (points) and simulated (lines) of maize cultivars total dry weight

برگ‌ها و تبدیل آنها به ترکیبات فتوسنتزی است، افزایش مصرف نیتروژن باعث افزایش سرعت گسترش برگ‌ها، دوام سطح برگ و افزایش میزان جذب تشعشع شد که در نهایت منجر به افزایش تولید ماده خشک کل گردید (۸).

تولید ماده خشک، انعکاسی از فتوسنتز خالص گیاه است که می‌تواند تعیین کننده عملکرد گیاه باشد. عدم دسترسی به نیتروژن کافی در مراحل حساس رشد، به دلیل رشد کمتر اندام هوایی منجر به تولید ماده فتوسنتزی کمتر و تجمع وزن خشک اندک گردید. با توجه به این که عوامل مؤثر بر رشد و تولیدات گیاه، میزان جذب نور توسط



شکل ۴- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده وزن خشک کل ارقام مختلف ذرت در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن برای ارزیابی مدل

Figure 4- The regression analysis between the simulated and the measured maize cultivars total dry weight in nitrogen fertilizer application treatments for model validation

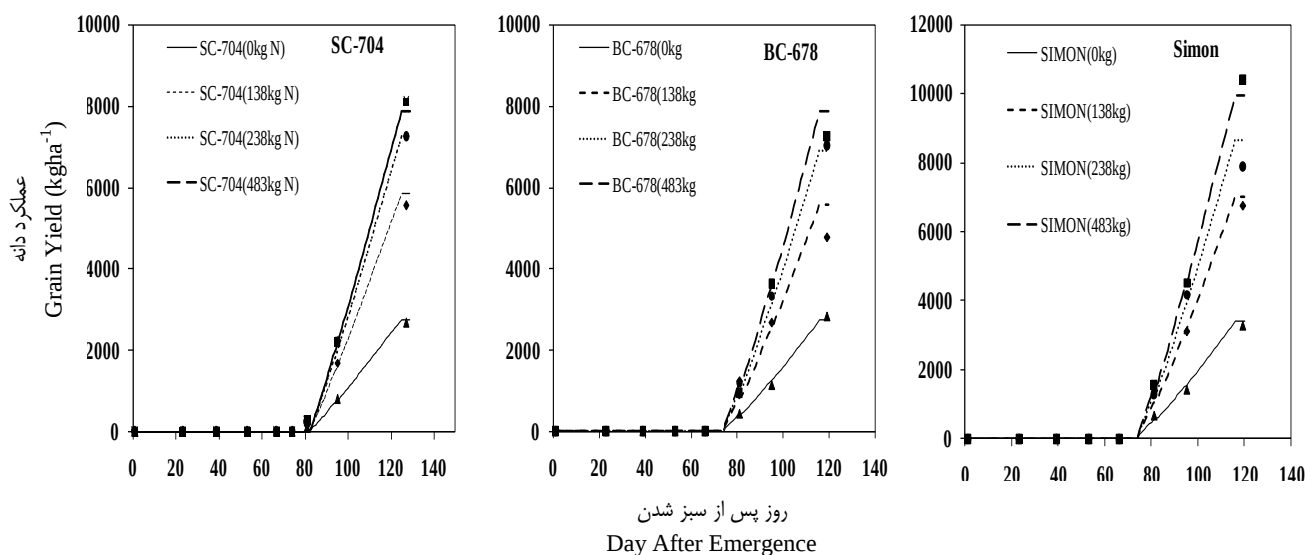
کیلوگرم در هکتار، ۰/۹۳ تا ۰/۹۷ و ۰/۸۶ تا ۰/۹۹ گزارش شده است (۱۸). فرید و همکاران (۷) نیز میزان جذر میانگین مربعات خطای وزن خشک کل شبیه‌سازی شده گندم تحت شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن توسط مدل CERES-Wheat را ۳۴۷/۸۱ تا ۸۷۳/۶۵ کیلوگرم در هکتار گزارش کرد. در تحقیقی دیگر جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده وزن خشک کل شبیه‌سازی شده برنج تحت شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن توسط مدل CERES-Rice به ترتیب ۸۶۲ کیلوگرم در هکتار و ۱۰ درصد گزارش شده است (۲).

عملکرد دانه

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که از شروع مرحله گلدهی ذرت (به ترتیب حدود ۷۴ و ۶۵ روز پس از سبز شدن برای رقم SC-۷۰۴ و ارقام BC-۶۷۸ و سیمون)، عملکرد دانه صرف‌نظر از میزان کاربرد کود نیتروژن به سرعت افزایش یافت و در انتهای دوره رشد (مرحله رسیدگی فیزیولوژیک) به حداکثر میزان خود رسید (شکل ۵). با افزایش میزان کاربرد کود اوره در تیمارهای ۱۳۸، ۲۳۸ و ۴۸۳ کیلوگرم در هکتار نسبت به شرایط عدم مصرف کود، عملکرد دانه ارقام مختلف ذرت نیز به تدریج بهبود یافت که با نتایج اندازه‌گیری شده در مزرعه همخوانی بالایی داشت (شکل ۵).

در تمام تیمارهای مورد بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در مقایسه با داده‌های مشاهده شده اختلاف بسیار ناچیزی داشت، بطوری که میزان جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) وزن خشک کل برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۴۴۰/۰۵، ۵۶۹/۵۷ و ۴۱۹/۷۵، در مقایسه با میانگین به ترتیب، ۷۰۴۱/۹۷، ۶۹۶۴/۲۱ و ۷۲۱۳/۱۱ کیلوگرم در هکتار مشاهده‌ها بود (جدول ۴). میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۶/۲۵، ۸/۱۸ و ۵/۸۲ درصد میانگین مشاهده‌ها بود (جدول ۴). همچنین ضریب توافق (d) برای وزن خشک کل ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۰/۹۵، ۰/۹۴ و ۰/۹۵ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی وزن خشک کل در تیمارهای مختلف داشت (جدول ۳). همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل CERES-Maize توانست تا بیش از ۹۹ درصد از تغییرات وزن خشک کل مشاهده شده را پیش‌بینی کرده و دقت بسیار بالایی برای پیش‌بینی وزن خشک کل ارقام ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن داشت (شکل ۴).

در مطالعات دیگر میزان جذر میانگین مربعات خطا، ضریب توافق (d) و R^2 برای شبیه‌سازی وزن خشک کل ذرت علوفه‌ای رقم SC-۷۰۴ توسط مدل CERES-Maize به ترتیب از ۹ تا ۱۳۸۳

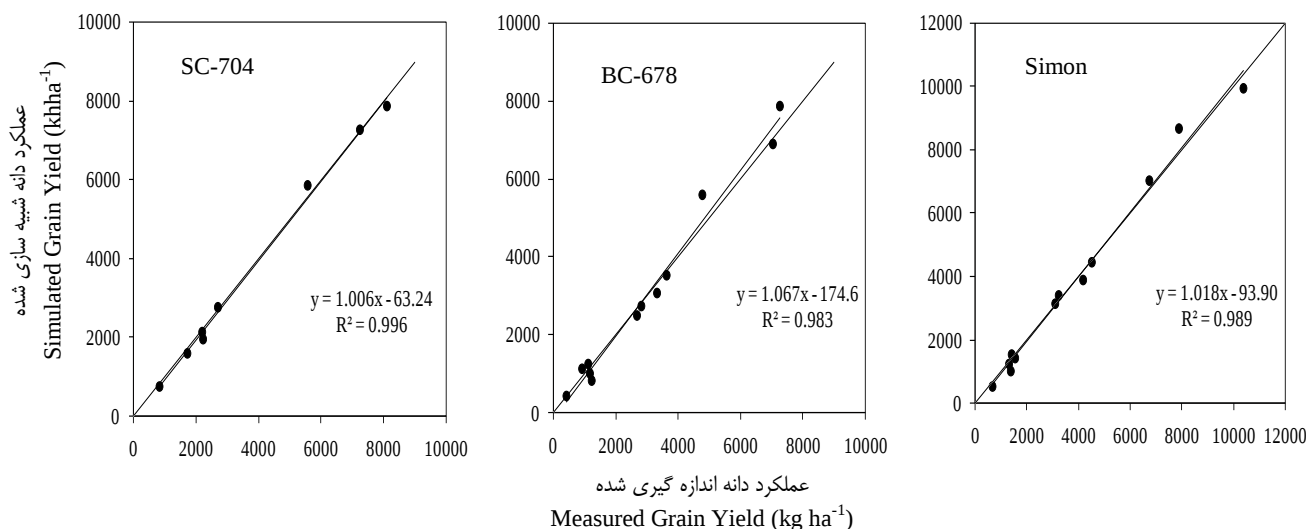


شکل ۵- اثر کاربرد کود نیتروژن بر عملکرد دانه اندازه‌گیری شده (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خطوط) ارقام ذرت
Figure 5- Effect of nitrogen fertilizer application on measured (points) and simulated (lines) of maize cultivars grain yield

بیشترین عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در تیمار کاربرد ۴۸۳ کیلوگرم اروه در هکتار بدست آمد که به ترتیب برای رقم SC-۷۰۴، ۸۱۰۲ و ۷۸۷۲ کیلوگرم در هکتار، رقم BC-۶۷۸، ۷۲۵۰ و ۷۸۷۵ کیلوگرم در هکتار و رقم سیمون، ۱۰۴۰۷ و ۹۹۲۵ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۵). به نظر می‌رسد مصرف نیتروژن از طریق بهبود ویژگی‌هایی نظیر شاخص سطح برگ، جذب تشعشع و سرعت رشد محصول باعث افزایش میزان تجمع ماده خشک کل و همچنین تخصیص مواد فتوسنتزی بیشتر به سمت اندام‌های ذخیره‌ای گیاه شد که این موضوع سبب بهبود عملکرد دانه ذرت شد (۱). رقم سیمون در شرایط شبیه‌سازی و مزرعه نسبت به دو رقم دیگر از عملکرد دانه بیشتری برخوردار بود که امکان دارد به علت مقاومت به خوابیدگی بوته، تحمل نسبتاً مناسب به تنش‌های محیطی به ویژه شوری و خشکی انتهای فصل، مقاوم به بیماری سیاهک و سازگاری بهتر با شرایط آب و هوایی استان کرمانشاه باشد (۶).

نتایج این بررسی همچنین نشان داد که بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و داده‌های مشاهده شده عملکرد دانه اختلاف بسیار ناچیزی وجود داشت، بطوری که میزان جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) عملکرد دانه برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۱۶۳/۷، ۳۴۵/۲ و ۳۱۴/۴، در مقایسه با میانگین به ترتیب،

۳۸۰۹/۲، ۳۰۳۸/۲ و ۳۸۷۵/۴ کیلوگرم در هکتار مشاهده‌ها بود (جدول ۳). میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۴/۳، ۱۱/۴ و ۸/۱ درصد میانگین مشاهده‌ها بود (جدول ۴). ضریب توافق (d) برای عملکرد دانه ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون نیز به ترتیب، ۰/۹۸، ۰/۹۳ و ۰/۹۴ بود که نشان دهنده توانایی بسیار بالای مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی عملکرد دانه در تیمارهای مختلف داشت (جدول ۴). همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل CERES-Maize توانست تا بیش از ۹۹ درصد از تغییرات عملکرد دانه مشاهده شده را پیش‌بینی کرده و توانایی بالایی برای پیش‌بینی عملکرد دانه ارقام ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن داشت (شکل ۶). میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و ضریب توافق (d) برای پیش-بینی عملکرد دانه ذرت توسط مدل CERES-Maize به ترتیب، ۱۹ درصد و ۰/۹۱ گزارش شده است (۲۲). محققین دیگر نیز مقدار جذر میانگین مربعات خطا را در شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت به‌وسیله مدل CERES-Maize را از ۷/۳ تا ۲۱/۴ درصد نشان دادند (۷، ۱۷ و ۲۳).



شکل ۶- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه ارقام مختلف ذرت در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن برای ارزیابی مدل

Figure 6- The regression analysis between the simulated and the measured maize cultivars grain yield in nitrogen fertilizer application treatments for model validation

ژنتیکی مورد نظر برای ارقام مورد مطالعه را تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه محاسبه نمایید. به گونه‌ای که نتایج واسنجی این ضرایب برای صفات شبیه‌سازی شده مورد نظر و مقایسه آنها با نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده در تیمار شرایط مطلوب نیاز غذایی ذرت به کود

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این بررسی نشان داد که بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی بسته نرم‌افزاری DSSAT نسخه ۴/۶ به خوبی توانست ضرایب

کود نیتروژن داشت. بررسی شاخص‌های ارزیابی بیانگر این مطلب بود که مدل CERES-Maize دقت نسبتاً پایینی در شبیه‌سازی روند تغییرات شاخص سطح برگ به ویژه در مراحل انتهایی رشد ذرت داشت. در اکثر تیمارها روند تغییرات شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده از مرحله گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک بالاتر از مشاهده شده بود. با این حال مدل CERES-Maize توانست با دقت بسیار بالایی تغییرات عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه ارقام ذرت را در تیمارهای کود نیتروژن به خوبی شبیه‌سازی کند که این نتیجه نشان می‌دهد که با اطمینان بالایی می‌توان از رهیافت‌های علم مدل‌سازی در کاهش وقت و هزینه‌های تحقیقات کشاورزی و همچنین تصمیم‌گیری‌های صحیح مدیریت زارعی استفاده کرد.

نیتروژن نشان داد، مدل CERES-Maize قادر است با حداقل اختلاف، ویژگی‌های رشد و نمو را برای ارقام ذرت پیش‌بینی کند که این مطلب بیانگر دقت بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای ارقام مورد بررسی بود. هم در شرایط مزرعه و هم در شرایط شبیه‌سازی‌ها با افزایش میزان کود نیتروژن شاخص سطح برگ، عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه بهبود یافت. اگرچه طول دوره نمو ارقام مورد ارزیابی با یکدیگر متفاوت بود ولی تغییرات نیتروژن تأثیری بر این صفت نداشت. رقم سیمون در مقایسه با دیگر ارقام از عملکرد دانه شبیه‌سازی شده (۹۹۲۵ کیلوگرم در هکتار) و اندازه‌گیری شده (۱۰۴۰۷ کیلوگرم در هکتار) بالاتری برخوردار بود. نتایج تعیین اعتبار نیز نشان داد مدل CERES-Maize دقت بالایی برای پیش‌بینی رشد، نمو و عملکرد دانه ارقام ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف

منابع

- 1- Abdian A., Rahimzade Khoei F., Anvari Savojbolagh K., and Rahimzada S. 2010. Evaluation of yield and yield components of early maturing maize in the second cropping. 11th Agronomy and Crop Breeding Congress. Tehran's Shahid Beheshti University, Iran. (in Persian with English abstract).
- 2- Amiri E., Rezaei M., Bannayan M., and Soufizadeh S. 2013. Calibration and Evaluation of CERES Rice Model under Different Nitrogen- and Water-Management Options in Semi-Mediterranean Climate Condition. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 44: 1814-1830.
- 3- Bannayan M., Crout N.M.J., and Hoogenboom G. 2003. Application of the CERES-Wheat model for within-season prediction of winter wheat yield in the United Kingdom. Agronomy Journal, 95:114-125.
- 4- Cassman K.G., Dobermann A., Walters D.T., and Yang H. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. Annual Review of Environment and Resources, 28: 315-358.
- 5- Chisanga C.B., Phiri E., Shepande C., and Sichingabula H. 2015. Evaluating CERES-Maize Model Using Planting Dates and Nitrogen Fertilizer in Zambia. Journal of Agricultural Science, 7: 79-97.
- 6- Dehghanpoor Z. 2014. Technical instructions planting and harvesting of corn (grain and forage). Agricultural Training Press.
- 7- Farid H.U., Bakhsh A., Mahmood-Khan Z., Ahmad N., and Ahmad A. 2015. Calibration and Validation of CERES-Wheat (*Triticum aestivum*) Model for Simulating Fertilizer Application Rates in Management Zones. Journal of Agricultural Science, 7: 115-127.
- 8- Gulser F. 2005. Effect of ammonium sulphate and urea on NO_3 and NO_2 accumulation nutrient contents and yield criteria in spinach. Scientia Horticulture, 106: 330-340.
- 9- Hoogenboom G., Jones J.W.P., Wilkens W., Porter C.H., Boote K.J., Hunt L.A., Singh U., Lizaso J.I., White J.W., Uryasev O., Ogoshi R., Koo J., Shelia V., and Tsuji G.Y. 2015. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6 (<http://dssat.net>). DSSAT Foundation, Prosser, Washington.
- 10- Jones C.A., and Kiniry J.R. 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development Texas A&M University Press, College Station, TX, USA.
- 11- Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H., Boote K.J., Batchelor W.D., Hunt L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijssman A.J., and Ritchie J.T. 2003. DSSAT Cropping System Model. European Journal of Agronomy, 18: 235-265.
- 12- Liu S., Yang J.Y., Zhang X.Y., Drury C.F., Reynolds W.D., and Hoogenboom G. 2013. Modelling crop yield, soilwater content and soil temperature for a soybean-maize rotation under conventional and conservation tillage systems in Northeast China. Agricultural Water Management, 123: 32-44.
- 13- Liu H.L., Yang J.Y., Drury C.F., Reynolds W.D., Tan C.S., and Bai Y.L., et al., 2011. Using the DSSAT-CERES-Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize production. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 89: 313-328.
- 14- Lopez-Cedron F.X., Boote K.J., Piñeiro J., and Sau F. 2008. Improving the CERES-Maize model ability to simulate water deficit impact on maize production and yield components. Agronomy Journal, 100: 296-307.
- 15- Mahru A.H., Soltani A., Galeshi S., and Kalate-Arabi M. 2010. Estimates of genetic coefficients and evaluation of model DSSAT for Golestan province. Electronic Journal of Crop Production, 3: 229-253. (in Persian with English abstract).
- 16- Nouna B.B., Katerji N., and Mastroiilli M. 2003. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean

- environment: New modeling of leaf area and water stress functions. *European Journal of Agronomy*, 19: 115-123.
- 17-Nouna B.B., Katerji N., and Mastrorilli M. 2000. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. Evaluation of model performance. *European Journal of Agronomy*, 13: 309-322.
- 18-Rabie M., Mirlatifi S.M., and Gheysari M. 2012. Calibration and Evaluation of the CSM-CERES-MAIZE Model for Maize Hybrid 704 Single-Cross in Varamin. *Journal of Water and Soil*, 26: 290-299. (in Persian with English abstract).
- 19-Ritchie J.T., Singh U., Godwin D.C., and Bowen W.T. 1998. Cereal growth, development, and yield.p. 79-98. In Tsuji G.Y. et al. (ed.). *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, The Netherlands.
- 20-Soltani A., Robertson M.J., Mohammad-Nejad Y., and Rahemi-Karizaki A. 2006. Modeling chickpea growth and development: leaf production and senescence. *Field Crop Research*, 99: 14-23.
- 21-Soltani A., and Hoogenboom G. 2007. Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crop Research*, 103: 198-207.
- 22-Ting L.Z., Yang J.Y., Drury C.F., and Hoogenboom G. 2015. Evaluation of the DSSAT-CSM for simulating yield and soil organic C and N of a long-term maize and wheat rotation experiment in the Loess Plateau of Northwestern China. *Agricultural Systems*, 135: 90-104.
- 23-Tojo Soler C.M., Sentelhas P.C., and Hoogenboom G. 2007. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal of Agronomy*, 27: 165-177.
- 24-White J.W. 2003. Modeling Temperature Response in Wheat and Maize: Proceedings of a Workshop, CIMMYT, El Batán, Mexico, 23-25 April 2001. NRG-GIS Series 03-01. México, D.F.: CIMMYT.
- 25-Willmott C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society*, 63: 1309-1313.
- 26-Yang Z., Wilarkson G.G., Buol G.S., Bowman D.T., and Heiniger R.W. 2009. Estimating Genetic Coefficients for the CSM-CERES-Maize model in North Carolina environments. *Agronomy Journal*, 101: 1276-1285.
- 27-Yang J.M., Yang J.Y., Dou S., Yang X.M., and Hoogenboom G. 2013. Simulating the effect of long-term fertilization on maize yield and soil C/N dynamics in northeastern China using DSSAT and CENTURY-based soil model. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 95: 287-303.
- 28-Yang J.M., Yang J.Y., Liu S., and Hoogenboom G. 2014. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. *Agricultural Systems*, 127: 81-89.



Simulation of Nitrogen Fertilizer Effect on Maize (*Zea mays*) Production by CERES-Maize Model under Kermanshah Climate Condition

F. Mondani^{1*}

Received: 26-02-2017

Accepted: 18-12-2017

Introduction: The DSSAT consists of a series of popular and widely used process-based crop growth simulation models. The models have been used worldwide to simulate crop biomass and yield, and soil nitrogen leaching under different management practices and various climatic conditions. The DSSAT has also proven to be a useful tool for selecting improved agricultural practices. Among all management agronomic factors, nitrogen fertilizer and crop species are major effective aspects impacting crops production. Although limited use of nitrogen fertilizer seems likely to reduce crop yield, high application rates of nitrogen causes serious adverse environmental effects. Thus, management of nitrogen fertilizer consumption decreases production costs and environmental pollution in agroecosystems. Therefore, the objectives of the present study were: (1) to determine the genetic coefficients and calibrate the CERES-Maize model (2) to evaluate the performances of the CERES-Maize model in simulating maize cultivars growth, development and grain yield for different fertilizer nitrogen application rates under Kermanshah climate condition.

Materials and Methods: This experiment was carried out in a split-plot design with 5 levels of nitrogen fertilizer application (0, 138, 238, 350 and 483 kg ha⁻¹ urea) as main plots, 3 current maize cultivars SC-704, BC-678 and Simon as sub plots, and 4 replications in 2014. The required model inputs describe field management, daily weather condition, soil profile characteristics, and cultivar characteristics. The cultivar coefficients were obtained under optimum conditions (i.e., minimum stress in weather and nutrients). The genetic coefficients (P1, P2, P5, G2, G3 and PHINT) of the maize cultivars i.e. SC-704, BC-78 and Simon were determined using the GenCal software of DSSAT v 4.6 for 350 kg Urea ha⁻¹ treatment (optimum nitrogen fertilizer amount based on the results of soil library). Model performance was evaluated by comparing simulated and measured values of maize cultivars phenological development stages (DVS), leaf area index, total dry weight and grain yield for independent nitrogen fertilizer treatment (0, 138, 238 and 483 kg Urea ha⁻¹) by root mean square error (RMSE), normalized RMSE (nRMSE) and index of agreement (d).

Results and Discussion: The coefficients of P1, P2, P5, G2, G3 and PHINT ranged between 275 to 286 °C day, 0.576 to 1.80 days hr⁻¹, 910 to 950 °C day, 940 to 990 number per plant, 7.0 to 7.9 mg day⁻¹ and 51.70 to 51.97 °C day, respectively, for all cultivars. The CERES-Maize model was able to accurately simulate growth, development stages and yield for maize cultivars. For both simulated and measured conditions, leaf area index, total dry weight and grain yield were improved by increasing the application of nitrogen fertilizer. Simon cultivar had higher simulated (9925 kg.ha⁻¹) and measured (10467 kg.ha⁻¹) grain yield in respect to other cultivars. The validation results also indicated that the CERES-Maize model gave a reliable estimate of growth, development stages and grain yield for maize cultivars in the different fertilizer nitrogen application rates. The value of RMSE and nRMSE for leaf area index of SC-704, BC-78 and Simon cultivars were 0.56, 0.46 and 0.36 and 25.5%, 21.8% and 16.3%, respectively. The index of agreement (d) for leaf area index ranged from 0.94 to 0.98. The RMSE and nRMSE magnitudes for total dry weight of SC-704, BC-78 and Simon cultivars were 440.1, 569.6 and 419.7 and 6.2%, 8.2% and 5.8%, respectively. The index of agreement (d) for total dry weight ranged from 0.94 to 0.95. The RMSE and nRMSE values for SC-704, BC-78 and Simon grain yield were equal to 163.7, 345.2 and 314.4 and 4.3%, 11.4% and 8.1%, respectively. The index of agreement (d) for grain yield ranged from 0.93 to 0.98.

Conclusion: The results indicated that the CERES-Maize was parameterized reliably for three maize cultivars under Kermanshah climate conditions. The results of validation also showed that the CERES-Maize model was able to give an accurate simulation of all studied traits of maize cultivars except leaf area index in different fertilizer nitrogen application rates.

Keywords: Development stages, Grain yield, Model calibration, Model validation, Total dry weight

1- Assistant Professor in Crop Ecology, Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran
(*- Corresponding Author Email: farzad_mondani@yahoo.com)



اثر مالچ پلی اتیلن شفاف بر تولید و کارایی مصرف آب در کدوی تخم کاغذی (*Cucurbita pepo*) تحت سطوح مختلف رطوبتی

مرجان نکوخو^۱ - سیف اله فلاح^{۲*} - رحیم برزگر^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۸

چکیده

منابع آب برای تولید محصولات کشاورزی بسیار محدود است. بنابراین استفاده بهینه از منابع آبی موجود و افزایش کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی ضروری است. هدف از اجرای این تحقیق تعیین اثر مالچ پلی اتیلن شفاف بر عملکرد و کارایی مصرف آب در کدوی تخم کاغذی بود. آزمایش با چهار تیمار در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۳۹۵ در بخش مرکزی شهرستان اصفهان منطقه برآن شمالی با عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۵۲ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۵۳۴ متر از سطح دریا انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل آبیاری کامل + مالچ پلاستیک (M+FW)، ۷۵٪ آبیاری کامل + مالچ پلاستیک (M+0.75FW)، ۵۰٪ آبیاری کامل + مالچ پلاستیک (M+0.5FW)، و آبیاری کامل بدون مالچ (FW) بودند. نتایج نشان داد که اثر سطوح مختلف رطوبتی و مالچ بر تعداد میوه در بوته، متوسط وزن میوه، عملکرد میوه، تعداد دانه در میوه، قطر میوه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، کارایی مصرف آب، میزان روغن و عملکرد روغن معنی‌دار بود. بیشترین کمترین میزان تعداد میوه در بوته، متوسط وزن میوه، عملکرد میوه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد روغن و درصد روغن به ترتیب به تیمارهای M+FW و M+0.5FW اختصاص داشت. تیمار M+0.75FW در اکثر صفات مورد بررسی، تفاوت آماری معنی‌داری با FW نداشت ولی کارایی مصرف آب آن بطور معنی‌داری بیشتر از FW بود. بنابراین، استفاده از مالچ پلاستیک در شرایط بدون محدودیت آب موجب افزایش عملکرد و در شرایط دسترسی کمتر به آب علاوه بر جلوگیری از کاهش عملکرد جهت صرفه‌جویی در مصرف آب در مناطق گرم و خشک کشور و افزایش کارایی مصرف آب اهمیت دارد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، روغن، کشت زیرپلاستیک، میوه

مقدمه

آبیاری از دسترس گیاه خارج می‌شود. بنابراین استفاده از مالچ پلاستیکی می‌تواند کارایی مصرف آب را افزایش دهد (۱۵). کاربرد این نوع مالچ در کشاورزی به منظور کاهش میزان تبخیر از خاک، کاهش فشار علف‌های هرز، افزایش دمای خاک، افزایش کارایی کاربرد عنصرهای غذایی خاک، کاهش آسیب و زیان برخی از آفات و ارتقای عملکرد محصولات در ۱۰ سال اخیر، در سراسر جهان به‌طور چشمگیری افزایش یافته است (۱۰). عباسی و همکاران (۱) در آزمایشی گزارش دادند، که صفت تعداد میوه در بوته در گیاه کدوی تخم کاغذی تحت تأثیر دور آبیاری و مالچ قرار گرفت به‌طوری که مالچ پلاستیک سیاه با ممانعت از تبخیر بخشی از نیاز رطوبتی گیاه را تأمین نمود.

در ارزیابی نقش مالچ در زراعت خربزه (*Cucumis melo* L.) گزارش شده است که مالچ پلاستیک ضمن کاهش دفعات آبیاری موجب افزایش عملکرد کمی و کیفی خربزه شد (۷ و ۱۴). استفاده از مالچ پلاستیک موجب کاهش میزان مصرف آب، در کل طول دوره

در کشور ایران، رشد فزاینده جمعیت و نیاز روزافزون آنها به محصولات کشاورزی و از طرف دیگر، محدودیت منابع آب به عنوان نهاده اصلی و محدودکننده تولیدات کشاورزی، مسأله کم آبی و بحران آب را به گونه‌ای بسیار جدی فراوری کشور قرار داده است (۱۳). یکی از شاخص‌هایی که اهمیت نهاده آب را تبیین می‌کند، کارایی مصرف آب است که نسبت عملکرد محصول به تبخیر - تعرق واقعی را نشان می‌دهد و تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و محیطی قرار دارد. در کشت‌های سنتی کارایی آبیاری پایین است و مقدار زیادی از آب

۱ و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد و استاد گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

(*)- نویسنده مسئول: (Email: Falah1357@yahoo.com)

۳- استادیار گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
DOI: 10.22067/jsw.v31i6.66296

پیش از شروع آزمایش در نیمه دوم بهمن ماه زمین با گاو آهن چپزل شخم و در نیمه دوم فروردین ماه با دستگاه کشت توأم به طور همزمان کشت، عملیات کشیدن تیپ و مالچ کشی انجام شد. کشت به صورت جوی و پشته انجام گردید. بذرها به علت حساسیت به بوته میری در بالای پشته ها کشت شدند. فاصله ردیف های کاشت ۱۵۰ سانتی متر و فاصله بوته های روی ردیف، ۷۰ سانتی متر بود. بذرها به دلیل عدم پوشش قبل از کاشت با سم تبوکونازول^۱ به میزان دو در هزار ضد عفونی شدند، در هر کپه ۲ عدد بذر کاشته شد از آنجائی که مالچ کشی به صورت مکانیزه و با دستگاه همزمان با کاشت صورت گرفت، بعد از کاشت گیاه، در تیمارهای بدون مالچ، پلاستیک برش داده شد و از سطح مزرعه جمع آوری گردید و سپس آبیاری انجام شد. اعمال رژیم آبیاری تا زمان استقرار کامل بوته ها صورت گرفت و پس از آن تنش در تیمارهای کم آبیاری اعمال گردید.

برای تعیین مقدار آب مورد نیاز هر تیمار، در هر نوبت آبیاری از روش کمبود رطوبت خاک استفاده شد، روز قبل از هر آبیاری، نمونه خاک از هر تیمار جداگانه تهیه و پس از خشک کردن رطوبت خاک به روش وزنی اندازه گیری و کمبود رطوبت خاک تا حد ظرفیت زراعی محاسبه شد. آب مورد نیاز هر تیمار از طریق رابطه زیر محاسبه شد. به طوری که در تیمار بدون تنش ۴۵۰۰ متر مکعب آب در هکتار و در تیمار ۷۵ درصد و ۵۰ درصد به ترتیب ۳۳۷۵ و ۲۲۵۰ متر مکعب آب در هکتار با استفاده از سیستم تیپ به کرت ها داده شد و حجم آب مصرفی در هر نوبت آبیاری و در هر تیمار به طور جداگانه توسط کنتور حجمی که در محل لوله اصلی نصب گردیده بود ثبت گردید. کل آب قابل استفاده و سهل الوصول گیاه از روابط زیر محاسبه گردید (۶).

$$TAW=1000 (FC-PWP) \times Zr \quad (۱)$$

کل آب قابل استفاده گیاه = TAW

رطوبت حجمی ظرفیت زراعی مزرعه = FC

رطوبت حجمی نقطه پژمردگی دائم = PWP

عمق ریشه = Zr

$$RAW = p \times TAW \quad (۲)$$

رطوبت سهل الوصول = RAW

ضریب رطوبت سهل الوصول = p

p برای کدو تخم کاغذی ۰/۵ در نظر گرفته شد (۱۸). برای محاسبه کارایی مصرف آب از رابطه ۳ استفاده شد (۱۱). عمق ریشه قبل از هر نوبت آبیاری با حفر پروفیل کنار بوته گیاه اندازه گیری شد.

ماده خشک تولید شده (کیلوگرم)

$$\text{آب مصرفی (مترمکعب)} = \text{کارایی مصرف آب} \quad (۳)$$

رشد و افزایش چشمگیر کارایی مصرف آب در گیاه پنبه گردید (۴). استفاده از پوشش پلاستیکی علاوه بر کنترل علف های هرز باعث کاهش مصرف آب از طریق جلوگیری از تبخیر سطحی و در نتیجه کاهش تعداد دفعات آبیاری شد و صرفه جویی قابل ملاحظه ای (۱۵۰۰ متر مکعب در هکتار) را در کشت طالبی به همراه داشت (۹). در پژوهشی که توسط اکینسی و دورسان (۵) بر روی گیاه خربزه انجام گرفت مشخص گردید که بیشترین میوه قابل عرضه به بازار و بیشترین وزن میوه، عملکرد و میزان قند میوه در تیمار پلاستیک شفاف نسبت به تیمارهای مالچ پلاستیک سیاه و بدون مالچ به دست آمد.

یکی از گیاهان دارویی ارزشمند در صنایع داروسازی بیشتر کشورهای توسعه یافته، کدوی تخم کاغذی (*Cucurbita pepo* L.) از خانواده Cucurbitaceae است (۱۹). از مواد مؤثره موجود در روغن به دست آمده از دانه های آن، برای درمان بیماری های هیپرپلازی پروستات، سوزش مجاری ادراری، تصلب شرائین، تنظیم دستگاه گوارش و تنظیم هورمون های جنسی در زنان و مردان استفاده می شود (۱۲).

کدوی تخم کاغذی به صورت یک محصول بهاره کشت می شود و گستردگی زیاد بوته آن موجب تلفات مقدار زیادی آب از سطح مزرعه می شود. بنابراین جلوگیری از این تلفات می تواند امکان تولید این گیاه ارزشمند را در مناطق نیمه خشک کشور که شدت تشعشعات بالایی دارد، را فراهم نماید. لذا این پژوهش با هدف تعیین اثر مالچ پلی اتیلن شفاف بر عملکرد و کارایی مصرف آب در کدوی تخم کاغذی تحت سطوح مختلف کم آبیاری اجرا شد.

مواد و روش ها

این پژوهش در سال زراعی ۱۳۹۵ در بخش مرکزی شهرستان اصفهان منطقه برآن شمالی (عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۵۲ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۵۳۴ متر از سطح دریا) به صورت طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. براساس آمار هواشناسی منطقه برآن شمالی جزء مناطق معتدل است و میانگین بارندگی سالیانه ۱۱۰ میلی متر و از نظر پراکنش دارای وضعیت مطلوبی نیست. تیمارهای مورد بررسی شامل آبیاری کامل + مالچ پلاستیک (M+FW)، ۷۵٪ آبیاری + مالچ پلاستیک (M+0.75FW)، ۵۰٪ آبیاری + مالچ پلاستیک (M+0.5FW)، و آبیاری کامل بدون مالچ (FW) بود. قبل از اجرای آزمایش و برای اطلاع از وضعیت فیزیکی و شیمیایی خاک، اقدام به نمونه برداری مرکب از خاک مزرعه (بافت لومی) از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متر شد (جدول ۱). هدایت الکتریکی آب آبیاری نیز در آزمایشگاه تعیین شد که میزان آن ۱/۳۹ دسی زیمنس بر متر بود.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک زراعی (عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری) محل انجام آزمایش

Table 1- Some physicochemical characteristics used soil (depth 0-30 cm)

هدایت الکتریکی	pH	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی دایم
EC (dS/m)		Available P (ppm)	Available K (ppm)	FC (cm cm ⁻³)	PWP (cm cm ⁻³)
4.44	7.6	30	233	0.20	0.83

FW و M+0.75FW می‌تواند به علت وجود رطوبت زیاد ناشی از کاهش تبخیر در شرایط استفاده از مالچ پلاستیک باشد، زیرا افزایش شدت تنش خشکی سبب کاهش سطح برگ و فتوستنز، کاهش شمار گل در گیاه شده و به دنبال آن شمار میوه در بوته کاهش می‌یابد (۱).

متوسط وزن میوه

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که ویژگی متوسط وزن میوه در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و مالچ قرار گرفت. بر اساس مقایسه میانگین تیمار سطوح مختلف آبیاری و مالچ، بیشترین میزان متوسط وزن میوه (۳/۶ کیلوگرم) را تیمار M+FW به خود اختصاص داد که با سایر تیمارها اختلاف معنی‌دار داشت (شکل ۲). اختلاف متوسط وزن میوه در تیمار M+FW نسبت به تیمار آبیاری FW ۱۴٪ بود. اختلاف بین M+0.75FW با FW ۳/۲۵ درصد است ولی از نظر آماری تفاوت معنی‌دار نبود. در این آزمایش مشخص شد که در شرایط ایده‌آل (آبیاری کامل و مالچ پلاستیک)، گیاه کدو تخم کاغذی توانست بیشترین میزان متوسط وزن میوه را به خود اختصاص دهد. کاهش متوسط وزن میوه و عملکرد در نتیجه کم آبی (تیمار M+0.5FW) ممکن است به دلیل عدم رطوبت کافی در منطقه ریشه باشد که در نتیجه آن فرایندهای فیزیولوژیکی مختلف از جمله جذب عناصر غذایی، رشد گیاه، فتوستنز و تجمع ماده خشک گیاهی کاهش می‌یابد (۱۷) و این منعکس‌کننده وزن متوسط و عملکرد کمتر میوه در اثر تنش آبی می‌باشد.

عملکرد میوه

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۲ نشان داد که ویژگی عملکرد میوه در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر تیمار سطوح مختلف آبیاری و مالچ قرار گرفت. بر اساس مقایسه میانگین تیمار سطوح مختلف آبیاری، بیشترین میزان عملکرد میوه (۹۵/۷۲ تن در هکتار) متعلق به تیمار M+FW و کمترین آن (۷۹/۷۸) به تیمار M+0.5FW اختصاص داشت (شکل ۳). تفاوت میزان عملکرد میوه در تیمار M+0.75FW نسبت به تیمار FW ۶٪ بود ولی از لحاظ آماری اختلاف معنی‌دار نبود. در این آزمایش استفاده از مالچ پلاستیکی باعث افزایش عملکرد میوه گردید که می‌توان این افزایش را ناشی از کاهش تبخیر از سطح خاک و حفظ رطوبت بیشتر در خاک (۲۱)، جذب بهتر عناصر غذایی و جلوگیری از رشد علف‌های هرز دانست.

در طی بازدیدهای مکرر از مزرعه بوته‌های سبز شده از زیر پلاستیک خارج شده و عملیات خاک‌دهی پای بوته‌ها انجام شد. تنک کردن بوته‌ها در مرحله ۴ برگی صورت گرفت. در تیمارهای بدون مالچ که علف‌های هرز سبز شده بود وجین به صورت دستی انجام گرفت. در نیمه دوم اردیبهشت‌ماه به دلیل بیماری سفیدک، مزرعه با استفاده از سم پنکونازول^۱ با دوز ۱۲۵ میلی‌لیتر در ۱۰۰۰ لیتر آب سم‌پاشی شد. برداشت بوته‌ها در نیمه دوم تیرماه بعد از رسیدگی فیزیولوژیک و پس از حذف اثر حاشیه از مساحت یک متر مربع انجام شد. صفات مورد بررسی کدوی تخم کاغذی شامل تعداد میوه در بوته، متوسط وزن میوه (کیلوگرم)، عملکرد میوه (تن در هکتار)، تعداد بذر در میوه، قطر میوه (سانتی‌متر)، وزن هزار دانه (گرم)، عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)، کارایی مصرف آب (کیلوگرم در متر مکعب)، میزان روغن و عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار) بود.

در نهایت داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از نرم‌افزار SAS مورد تجزیه قرار گرفتند (۱۶) و مقایسه میانگین صفات مورد بررسی با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

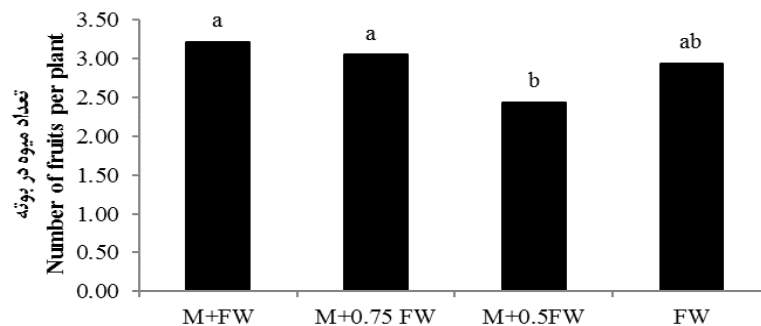
تعداد میوه در بوته

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که بین سطوح مختلف آبیاری و مالچ از نظر ویژگی تعداد میوه در بوته در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار وجود دارد (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین میزان تعداد میوه در بوته متعلق به تیمار M+FW (با میانگین ۳/۲۲) و کمترین آن متعلق به تیمار M+0.5FW (با میانگین ۲/۴۴) می‌باشد (شکل ۱)، که از نظر آماری دارای اختلاف معنی‌دار می‌باشند. به نظر می‌رسد که آبیاری به صورت کامل و مالچ در کنار هم باعث تولید حداکثر تعداد میوه در بوته گردیده است و در تیمار M+0.5FW تنش خشکی از طریق کاهش ظرفیت فتوستنزی گیاه باعث کاهش تعداد میوه در بوته شده است. بین تیمار M+0.75FW با FW تفاوت معنی‌دار وجود نداشت. بنابراین با صرفه‌جویی در مصرف آب به‌وسیله مالچ می‌توان تعداد میوه مطلوب در بوته دست یافت. احتمالاً دلیل این عدم اختلاف بین تیمار

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر مالچ پلاستیکی بر ویژگی‌های میوه کدوی تخم کاغذی تحت سطوح مختلف رطوبتی
Table 2- Analysis of variance the effect of plastic mulch on the characteristics of pumpkin fruit under different moisture levels

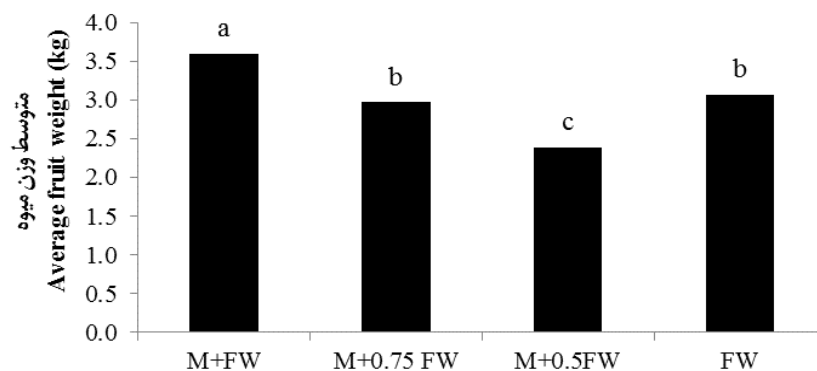
منبع تغییرات S.O.V	تعداد میوه در بوته Number of fruits per plant	متوسط وزن میوه Average fruit weight	عملکرد میوه Fruit yield	تعداد دانه در میوه Number of grain per fruit	قطر میوه Fruit diameter
بلوک Block	0.81 ^{ns}	0.63 [*]	280.6 ^{**}	179.1 ^{ns}	0.05 ^{ns}
تیمار Treatment	1.68 [*]	1.47 ^{**}	441.3 ^{**}	3938 [*]	10.34 ^{**}
خطا Error	0.23	0.06	18.03	574.2	0.93
ضریب تغییرات C.V(%)	20.16	9.52	4.79	7.42	4.54

ns, * و **: به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند
ns, * and **: Non significant, significant $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively



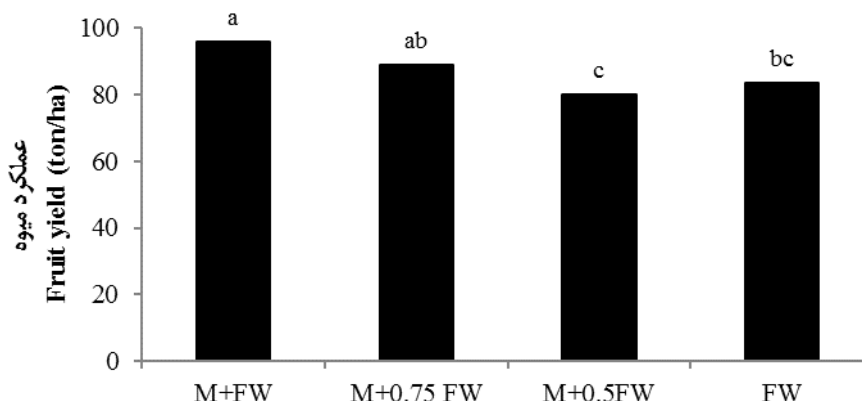
شکل ۱- اثر مالچ پلاستیکی بر تعداد میوه در بوته کدوی تخم کاغذی تحت سطوح مختلف رطوبتی. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌داری دارند. FW و M به ترتیب بیانگر آبیاری کامل و مالچ می‌باشند

Figure 1-The effect of plastic mulch on number of fruits per plant in pumpkin seeds under different moisture levels. Means followed with different letters have a significant different at 5% probability levels (LSD test). FW and M represent full irrigation and mulch, respectively



شکل ۲- اثر مالچ پلاستیکی بر متوسط وزن میوه کدوی تخم کاغذی تحت سطوح مختلف رطوبتی میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌داری دارند. FW و M به ترتیب بیانگر آبیاری کامل و مالچ می‌باشند

Figure 2- The effect of plastic mulch on average fruit weight in pumpkin seeds under different moisture levels. Means followed with different letters have a significant different at 5% probability levels (LSD test). FW and M represent full irrigation and mulch, respectively



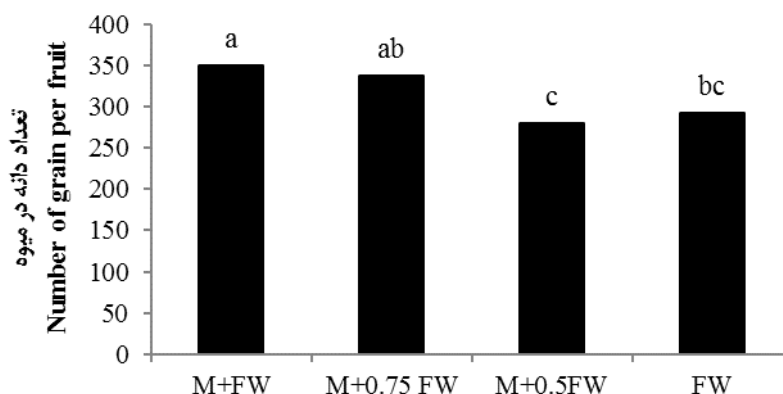
شکل ۳- اثر مالچ پلاستیکی بر عملکرد میوه کدوی تخم کاغذی تحت سطوح مختلف رطوبتی. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌داری دارند. M و FW به ترتیب بیانگر آبیاری کامل و مالچ می‌باشند

Figure 3- The effect of plastic mulch on fruit yield in pumpkin seeds under different moisture levels. Means followed with different letters have a significant different at 5% probability levels (LSD test). FW and M represent full irrigation and mulch, respectively

تفاوتی معادل ۱۳ و ۱۷ درصد را نشان داد که از نظر آماری فقط با تیمار M+0.5FW دارای تفاوت معنی‌دار بود (شکل ۴). احتمالاً با افزایش شدت تنش خشکی میزان مواد فنوسنتزی کاهش می‌یابد که در نهایت سبب کاهش تعداد دانه در میوه می‌گردد. تشکیل بیشترین تعداد دانه در میوه با دور آبیاری ۱۲ روزه همراه با کاربرد مالچ پلاستیک سیاه و ۷۵ درصد کودهای شیمیایی + کودهای زیستی (۱) بیانگر نقش مالچ پلاستیکی در افزایش تعداد دانه در میوه است.

تعداد دانه در میوه

طبق نتایج حاصل از تجزیه واریانس در جدول ۲، تعداد دانه در میوه در سطح احتمال پنج درصد تحت تأثیر تیمار سطوح مختلف آبیاری و مالچ قرار گرفت. مقایسه میانگین برای این ویژگی نشان داد که تیمار M+FW نسبت به دو تیمار M+0.5FW و FW دارای اختلاف آماری معنی‌دار بود. تعداد دانه در میوه کدو تخم کاغذی در تیمار M+0.75FW نسبت به دو تیمار FW و M+0.5FW به ترتیب



شکل ۴- اثر مالچ پلاستیکی بر تعداد دانه در میوه کدوی تخم کاغذی تحت سطوح مختلف رطوبتی. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌داری دارند. M و FW به ترتیب بیانگر آبیاری کامل و مالچ می‌باشند

Figure 4- The effect of plastic mulch on Number of grain per fruit in pumpkin seeds under different moisture levels. Means followed with different letters have a significant different at 5% probability levels (LSD test). FW and M represent full irrigation and mulch, respectively

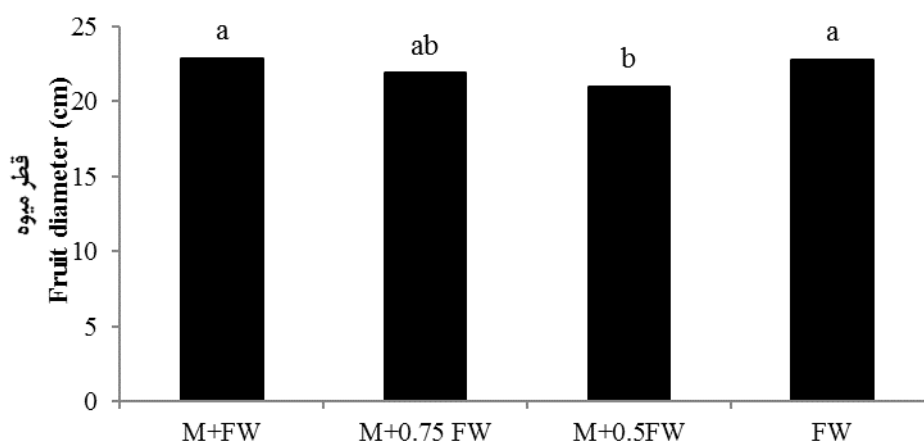
ویژگی قطر میوه در سطح احتمال پنج درصد تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و مالچ قرار گرفت. براساس مقایسه میانگین تیمار

قطر میوه

تجزیه واریانس ارائه شده در جدول ۲ حاکی از این است که

تفاوت ۸ درصدی را نشان می‌دهند. تفاوت بین دو تیمار FW با M+0.75FW از نظر آماری معنی‌دار نبود. اثر مالچ پلاستیکی بر افزایش قطر میوه را می‌توان شرایط مطلوب رطوبتی (۲۱) برای تداوم فتوسنتز گیاه نسبت داد.

سطوح مختلف آبیاری مشخص شد که بیشترین میزان قطر میوه در تیمار M+FW (با میانگین ۲۲/۹ سانتی‌متر) و کمترین آن در تیمار M+0.5FW (با میانگین ۲۱ سانتی‌متر) به دست آمد (شکل ۵)، که این دو سطح رطوبتی از لحاظ آماری دارای اختلاف معنی‌دار بودند و



شکل ۵- اثر مالچ پلاستیکی بر قطر میوه کدوی تخم کاغذی تحت سطوح مختلف رطوبتی. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌دار دارند. FW و M به ترتیب بیانگر آبیاری کامل و مالچ می‌باشند

Figure 5- The effect of plastic mulch on fruit diameter in pumpkin seeds under different moisture levels. Means followed with different letters have a significant different at 5% probability levels (LSD test). FW and M represent full irrigation and mulch, respectively

کلی استفاده از مالچ پلاستیکی سبب کاهش اتلاف آب از طریق تبخیر و تعرق توسط علف‌های هرز می‌شود و بنابراین آب بیشتری در اختیار گیاه کدوی تخم کاغذی قرار گیرد و از این طریق وزن هزار دانه نسبت به حالت عدم استفاده مالچ پلاستیکی افزایش یابد. ایجاد مالچ در سطح خاک موجب حفظ محتوای نسبی آب برگ کدو و افزایش کارایی فتوسنتزی آن شد (۲)، بنابراین مالچ در تداوم آسمیلاسیون و در نتیجه پرشدن دانه مؤثر است.

وزن هزار دانه

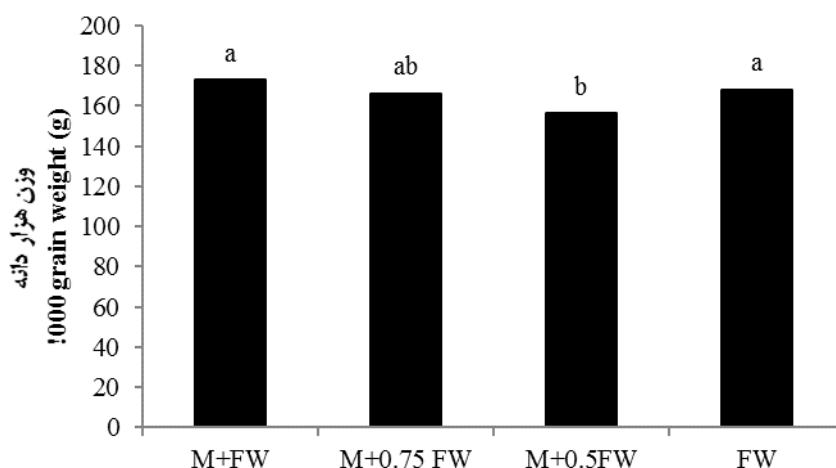
نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس نشان داد که ویژگی وزن هزار دانه تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و مالچ قرار گرفت (جدول ۳). بیشترین و کمترین وزن هزار دانه با میانگین (۱۷۳/۲ گرم و ۱۵۸/۲ به ترتیب به تیمار M+FW و M+0.5FW اختصاص داشت (شکل ۶). وزن هزار دانه در تیمار FW نسبت به تیمار M+0.75FW همانند تعداد دانه در میوه (شکل ۴) دارای اختلاف آماری نبود. به‌طور

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر مالچ پلاستیکی بر وزن هزار دانه، عملکرد دانه، کارایی مصرف آب، میزان روغن و عملکرد روغن کدوی تخم کاغذی تحت سطوح مختلف رطوبتی

Table 3- Analysis of variance the effect of plastic mulch on 1000-grain weight, grain yield, water use efficiency, oil content and oil yield of pumpkin fruit under different moisture levels

منبع تغییرات S.O.V	وزن هزار دانه 1000-grain weight	عملکرد دانه Grain yield	کارایی مصرف آب Water use efficiency	میزان روغن Oil content	عملکرد روغن Oil yield
بلوک Block	92.73 ^{ns}	125000 ^{**}	0.02 [*]	0.0001 [*]	51803 ^{**}
تیمار Treatment	922.6 [*]	14615 [*]	0.04 ^{**}	0.0006 ^{**}	20242 ^{**}
خطا Error	154.7	1732	0.003	0.00002	1892
ضریب تغییرات C.V (%)	7.89	2.52	11.19	1.58	9.76

ns, * and **: Non significant, significant $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively



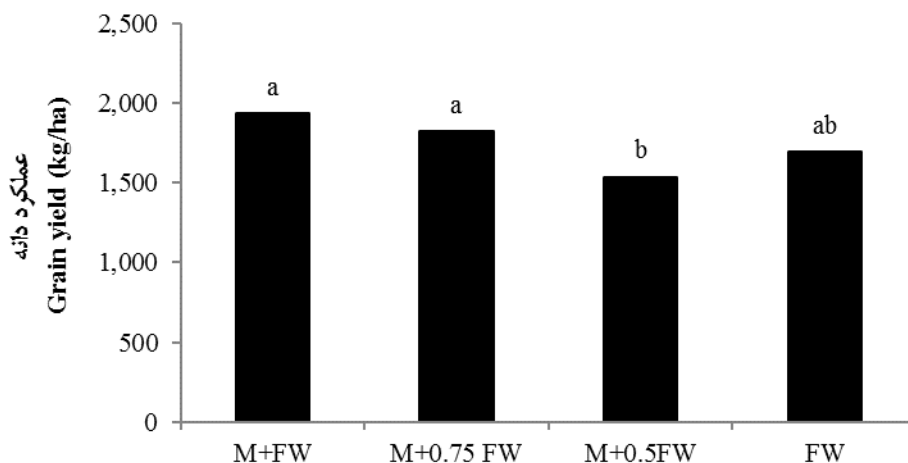
شکل ۶- اثر مالچ پلاستیکی بر وزن هزار دانه کدوی تخم کاغذی تحت سطوح مختلف رطوبتی. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌داری دارند. FW و M به ترتیب بیانگر آبیاری کامل و مالچ می‌باشند

Figure 6- The effect of plastic mulch on 1000- grain weight in pumpkin seeds under different moisture levels. Means followed with different letters have a significant different at 5% probability levels (LSD test). FW and M represent full irrigation and mulch, respectively

عملکرد دانه

FW دارای تفاوت ۷٪ بود و اختلاف آنها از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (شکل ۷). پایین بودن عملکرد دانه این دو تیمار را می‌توان به کاهش نسبی تعداد دانه در میوه و همچنین وزن دانه نسبت داد (شکل‌های ۴ و ۶). گزارش شده است که استفاده از مالچ بدون تأثیر منفی بر رشد و عملکرد کدو در حفظ رطوبت خاک به میزان ۱۵ درصد نقش دارد (۲ و ۲۰).

بر اساس جدول ۳ مشخص شد که اثر سطوح مختلف آبیاری و مالچ بر عملکرد دانه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین برای ویژگی عملکرد دانه نشان داد که بیشترین و کمترین میزان عملکرد دانه به ترتیب به تیمارهای M+FW و M+0.5FW اختصاص یافت. ویژگی عملکرد دانه بین دو تیمار M+0.75FW با



شکل ۷- اثر مالچ پلاستیکی بر عملکرد دانه کدوی تخم کاغذی تحت سطوح مختلف رطوبتی. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌داری دارند. FW و M به ترتیب بیانگر آبیاری کامل و مالچ می‌باشند

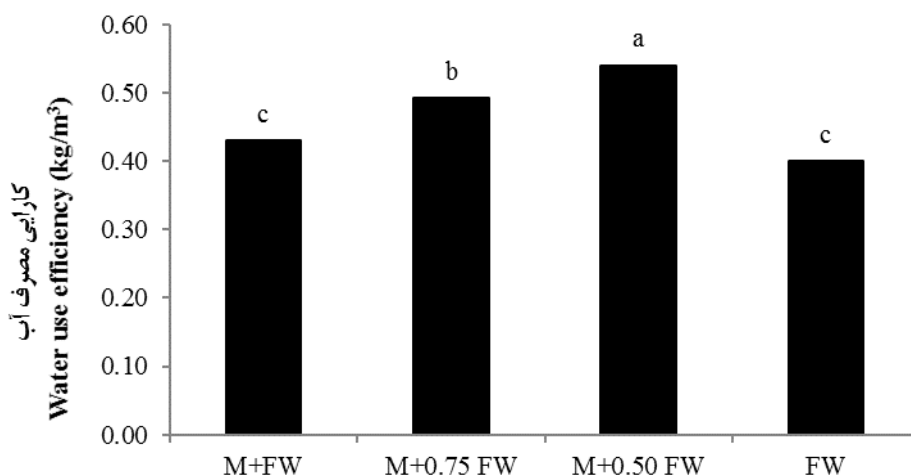
Figure 7- The effect of plastic mulch on grain yield in pumpkin seeds under different moisture levels. Means followed with different letters have a significant different at 5% probability levels (LSD test). FW and M represent full irrigation and mulch, respectively

کارایی مصرف آب

اثر تیمار سطوح مختلف آبیاری و مالچ بر ویژگی کارایی مصرف

عملکرد در تیمار $M+0.5FW$ و $M+0.75FW$ نتوانست موجب کاهش کارایی مصرف آب گردد. نکته دیگر این است که افزایش عملکرد ناشی از مالچ در تیمار $M+FW$ نیز کارایی مصرف آب را در مقایسه با FW افزایش نداد. بنابراین استفاده از مالچ پلاستیک تحت شرایط تنش خشکی موجب کاهش میزان مصرف آب در کل دوره رشد و افزایش چشمگیر کارایی مصرف آب می‌گردد (شکل ۸) و در چنین شرایطی کارایی مصرف آب در گیاه کدو تحت مالچ به‌طور معنی‌داری بیشتر از شرایط بدون مالچ است (۲ و ۲۰).

آب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). طبق شکل ۸ مقایسه میانگین مشخص نمود در این پژوهش بالاترین کارایی مصرف آب متعلق به تیمار $M+0.5FW$ و کمترین آن متعلق به تیمار FW بود. اختلاف میزان کارایی مصرف آب بین تیمار $M+0.75FW$ با آبیاری کامل یا تیمار شاهد (FW) 0.09 کیلوگرم در متر مکعب بود که از نظر آماری دارای اختلاف معنی‌دار بودند. بین تیمارهای آبیاری کامل + مالچ ($M+FW$) و آبیاری کامل (FW) از نظر صفت میزان کارایی مصرف آب اختلاف آماری وجود نداشت. در واقع کارایی مصرف آب بیشتر تحت تأثیر آب مصرفی قرار گرفت و کاهش



شکل ۸- اثر مالچ پلاستیکی بر کارایی مصرف آب در کدوی تخم کاغذی تحت سطوح مختلف رطوبتی. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌داری دارند. M و FW به ترتیب بیانگر آبیاری کامل و مالچ می‌باشند

Figure 8- The effect of plastic mulch on water use efficiency in pumpkin seeds under different moisture levels. Means followed with different letters have a significant different at 5% probability levels (LSD test). FW and M represent full irrigation and mulch, respectively

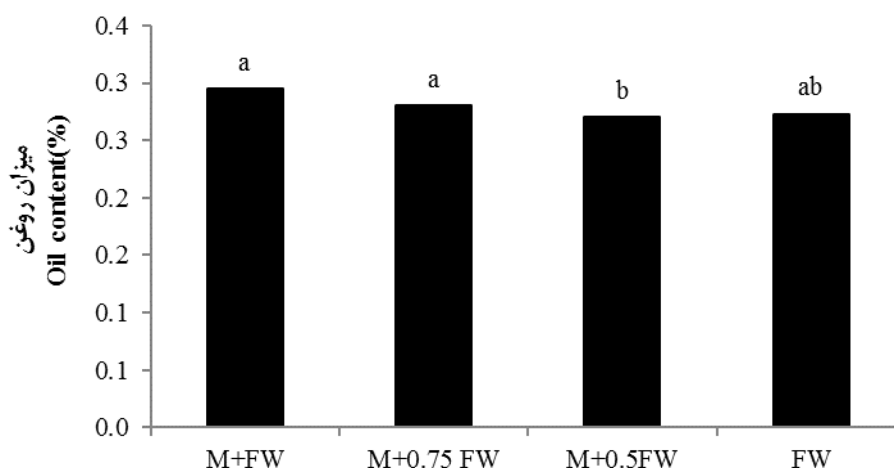
خشکی بر درصد روغن گزارش کرد.

میزان روغن

نتایج حاصل از تجزیه واریانس در جدول ۳ نشان می‌دهد که میزان روغن در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و مالچ قرار گرفت. بر طبق شکل ۹ مقایسه میانگین مشخص شد که بین تیمارهای $M+FW$ ، $M+0.75FW$ و FW تفاوت آماری وجود نداشت. بیشترین و کمترین میزان روغن به ترتیب به تیمارهای $M+FW$ و $M+0.5FW$ تعلق داشت، که اختلاف آنها ۸ درصد می‌باشد. بین دو تیمار $M+0.75FW$ و FW تفاوت آماری معنی‌دار وجود نداشت. با توجه به نتایج فوق می‌توان بیان کرد که میزان روغن در هنگام تنش کمبود آب به علت کوتاه شدن طول دوره رشد و طول مدت سنتز روغن کاهش می‌یابد. لذا در شرایط مناسب آبیاری از مدت زمان بیشتری جهت پر شدن دانه برخوردار بوده و میزان روغن نیز افزایش می‌یابد. آبراهام (۳) نتایج مشابهی را درباره اثر معنی‌دار تنش

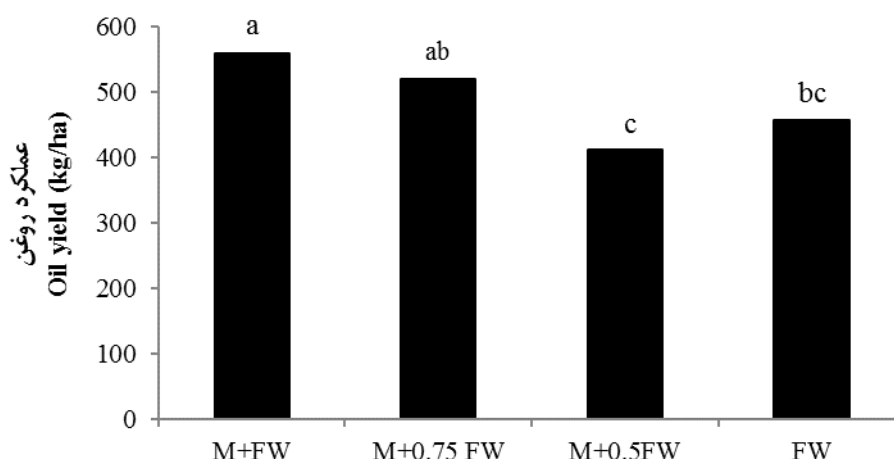
عملکرد روغن

تجزیه واریانس ارائه شده در جدول ۳ حاکی از این است که عملکرد روغن در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و مالچ قرار گرفت. مقایسه میانگین عملکرد روغن نشان داد که بیشترین میزان عملکرد روغن ($558/4$ کیلوگرم در هکتار) به تیمار $M+FW$ و کمترین میزان ($411/8$ کیلوگرم در هکتار) به تیمار $M+0.5FW$ تعلق داشت (شکل ۱۰). تیمار $M+0.75FW$ با FW دارای اختلاف آماری معنی‌دار نبود. استفاده از مالچ ضمن حفظ رطوبت خاک قابلیت دسترسی مناسب تر ریشه به عناصر غذایی را افزایش می‌دهد. حمزه‌ئی و بابایی (۸) در آزمایشی گزارش دادند که تنش آبی عملکرد روغن را در گیاه کدوی تخم کاغذی کاهش داد.



شکل ۹- اثر مالچ پلاستیکی بر میزان روغن در کدوی تخم کاغذی تحت سطوح مختلف رطوبتی. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌داری دارند. FW و M به ترتیب بیانگر آبیاری کامل و مالچ می‌باشند

Figure 9- The effect of plastic mulch on oil content in pumpkin seeds under different moisture levels. Means followed with different letters have a significant different at 5% probability levels (LSD test). FW and M represent full irrigation and mulch, respectively



شکل ۱۰- اثر مالچ پلاستیکی بر عملکرد روغن در کدوی تخم کاغذی تحت سطوح مختلف رطوبتی. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌داری دارند. FW و M به ترتیب بیانگر آبیاری کامل و مالچ می‌باشند

Figure 10- The effect of plastic mulch on oil yield in pumpkin seeds under different moisture levels. Means followed with different letters have a significant different at 5% probability levels (LSD test). FW and M represent full irrigation and mulch, respectively

جهت جلوگیری از مصرف علف‌کش‌ها مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین استفاده از مالچ پلاستیکی برای صرفه جویی در مصرف آب جهت تولید کدوی تخم کاغذی در مناطق مرکزی کشور که با بحران آب مواجه هستند، توصیه می‌شود.

سپاسگزاری

بدینوسیله از حمایت مالی دانشگاه شهرکرد و مساعدت مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری قدردانی می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت استفاده از مالچ پلاستیکی در شرایط بدون محدودیت آب موجب افزایش عملکرد و در شرایط محدودیت آب آبیاری علاوه بر جلوگیری از کاهش عملکرد جهت صرفه‌جویی در مصرف آب در مناطق گرم و خشک کشور و افزایش کارایی مصرف آب اهمیت دارد. علاوه بر این، مالچ پلاستیک شفاف رشد علف‌های هرز را در کشت گیاه دارویی کدوی تخم کاغذی به شدت کاهش داد که این امر می‌تواند در پژوهش‌های آتی

منابع

- 1- Abbasi H., Agha-Alikhani M., and Hamzei J. 2017. Effect of irrigation intervals, black plastic mulch and biofertilizers on quantitative and qualitative characteristics of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). Iranian Journal of Field Crops Research, 15:392-412. (In Persian).
- 2- Abd El-Mageed T.A., Semida W.M., and Abd El-Wahed M.H. 2016. Effect of mulching on plant water status, soil salinity and yield of squash under summer-fall deficit irrigation in salt affected soil. Agricultural Water Management, 173:1-12.
- 3- Abraham, N.A. 2001. Determinants of Sunflower seed quality for processing (growth and development of the seed (Chapter 1). University of Pretoria, Pp. 22.
- 4- Afshar H., Sadrghaen S.H., and Mehrabadi H.R. 2013. Evaluation of application of plastic mulch on water used and seed cotton yield. Journal of Water and Soil, 26:1421-1427. (In Persian).
- 5- Ekinci M., and Dursan A. 2009. Effect of different mulch materials on plant growth, some quality parameters and yield in melon (*Cucumis melo* L.) cultivars in high altitude environmental condition. Pakistan Journal of Botany, 41:1891-1901.
- 6- FAO. 1998. Crop Evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. Department of Natural Resources Management and Environment. <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e0e.htm>.
- 7- Farhadi A. 2003. Investigation of the application of poly ethylen mulch and irrigation methods to reduce water and sand consumption in vegetables. 8th Congress on Irrigation and Evaporation Reduction, 7 to 8 February, Bahenar University of Kerman. (In Persian).
- 8- Hamzaei J., and Babaei M. 2015. Effect of irrigation and nitrogen fertilizing on phenology, grain and oil yield of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) in Hamadan region. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production. 25(2): 1-13. (In Persian).
- 9- Jafari P., Molla-Hosseini H., and Silispour M. 2007. Investigation effect of cantaloupe planting pattern in two methods of traditional and use mulch. Journal of Research in Agricultural Science, 2(2): 61-71. (In Persian).
- 10- Kasirajan S., and Ngouajio M. 2012. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural application: a review. Agronomy for Sustainable Development, 32: 501-529.
- 11- Koocheki A, and Sarmadnia G.1997. Physiology of Crop Plants (Translation). Jahadeh Daneshgahi Press, Mashhad. 400p. (In Persian).
- 12- Maged A.E. 2006. Effect of mulch types on soil environmental conditions and their effect on the growth and yield of cucumber plants. Journal Applied Science Research, 2(2): 67-73.
- 13- Naser-Esfahani M. 1996. Investigation of control possibility of several important diseases in cucumber field by solarization. 1th Congress of Horticulture Sciences, Karaj, Iran. Pp:24-27. (In Persian).
- 14- Nazemi A., Khazaei H., Boromand R., Rezazadeh Z., and Hosseini A. 2008. Effect of drought stress and defoliation on sunflower (*Helianthus annuus*) in controlled conditions. Desert, 12: 99-104.
- 15- Norjoo A., Hanareh M., and Hatami S. 2010. Effect of black polyethylene mulch on quantity of tomato and water use efficiency. Iranian Journal of Irrigation & Drainage, 4:242-250. (In Persian).
- 16- SAS Institute Inc. 2002. The SAS System for Windows, Release 9.1 Statistical Analysis Systems Institute, Cary, North Carolina, USA.
- 17- Simsek M., and Comlekcioglu N. 2011. Effects of different irrigation regimes and nitrogen levels on yield and quality of melon (*Cucumis melo* L.). African Journal of Biology, 10:10009-10018.
- 18- Vaziri Zh., Salamat A.R., Entesari M.R., Maschi M., Heidari N., Dehghani Sanich H. 2008. Evaporation and Transpiration of Plants (Instructions for Calculating Water Requirements for Plants). Iranian Irrigation and Drainage Committee, 389p. (In Persian).
- 19- Wagner F. 2000. The health value of styrian pumpkin-seed oil-science and fiction. In Proceeding 1th International Oil Pumpkin Conference. 9th-13th Augst, Lower. Australia. Pp.122-123.
- 20- Yaghi T., Arslan A., and Naoum F. 2013. Cucumber (*Cucumis sativus* L.) water use efficiency (WUE) under plastic mulch and drip irrigation. Agricultural Water Management, 128: 149-157.
- 21- Zhao H., Xiong Y-C., Li F-M., Wang R-Y., Qiang Sh-C., Yao T-F., and Mo F. 2012. Plastic film mulch for half growing-season maximized WUE and yield of potato via moisture-temperature improvement in a semi-arid agroecosystem. Agricultural Water Management, 104: 68-78.



Effect of Transparent Poly Ethylene Mulch on Production and Water Use Efficiency of Hull-Less Seed Pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) under Different Levels of Moisture

M. Nekookhoo¹ - S. Fallah^{2*} - R. Barzegar³

Received: 30-07-2017

Accepted: 09-12-2017

Introduction: Water resources are very limited for agricultural production. Therefore, optimal use of available water resources and increased water use efficiency in agriculture are necessary. Application of poly ethylene mulch is one of the approaches that can be effective in increasing water use efficiency. The water deficient trend is increasing in agricultural lands of the Iran and, on the other hand, the yield components of hull-less seed pumpkin are sensitive to drought stress. Therefore, the aim of this study was to determine the effect of transparent polyethylene mulch on the performance and water use efficiency of hull-less seed pumpkin under different irrigation rates.

Materials and Methods: This experiment was carried out in the central part of Isfahan, Northern Baraan (32° and 32'N, 51° and 52' E, and 1534 m above sea level) in a randomized complete block design with three replications, during 2016. Treatments consisted of full irrigation+ poly ethylene mulch (M+FW), 0.75% full irrigation+ poly ethylene mulch (M+0.75FW), 0.50% full irrigation+ poly ethylene mulch (M+0.5 FW), and full irrigation without mulch (FW). In April, the cultivation operations include mechanical planting, mulch were done. The spacing of the rows was 150 cm and the spacing between plants was 70 cm. The irrigation was applied until the plant was fully established and then drought stress was begun based on above irrigation treatments. The studied traits were number of fruits per plant, average fruit weight (kg), fruit yield (ton ha⁻¹), number of seeds per fruit, fruit diameter (cm), 1000 grains weight (g), grain yield (kg ha⁻¹), water use efficiency (kg m⁻³), oil content (%) and oil yield (kg ha⁻¹). Statistical analysis was performed using SAS software and comparisons of the means were made using the least significant difference (LSD) test at the 5% probability level.

Results and Discussion: The highest number of fruits per plant belonged to M+FW treatment (with an average of 3.22) and the lowest was recorded in M+0.5FW treatment (with an average of 2.44). This difference between treatment FW and M+0.75FW can be due to the high moisture under the poly ethylene mulch. The highest fruit weight (3.60 kg) was obtained in M+FW treatments, which had a significant difference with other treatments. The difference weight of fruit in M + FW treatment was 14% compared to FW irrigation treatments. The highest fruit yield (95.72 ton ha⁻¹) belonged to M+FW treatment and the lowest one (79.78) belonged to M+0.5FW treatment. The difference in fruit yield in M+0.75FW compared to FW treatment was 6%, but it was not significant. The number of seeds per fruit in M+0.75FW compared to FW and M+0.5FW treatments showed a difference of 13% and 17%, respectively which they were significant only with M+0.5FW treatment. With increasing drought stress, the amount of photosynthetic assimilate decreased, which reduced the number of seeds per fruit. The highest 1000 grains weight (173.13 g) belonged to M+FW treatment and the lowest one belonged to M+0.5FW (156.18 g). 1000 seeds weight in FW treatment was not significant compared to M+0.75FW treatment. Drought stress during plant development decreased the leaf area index in the plant. Application of plastic mulch reduces the effect of drought stress on leaf growth and its photosynthesis by decreasing water loss by evapotranspiration and transpiration. The difference grain yield between two treatments M+0.75FW with FW was 7% and this difference was not significant. Only significant difference was observed among M+0.5FW treatment with other treatments. The effect of different levels of moisture on water use efficiency was significant at 1% probability level. The highest water use efficiency was recorded in M+0.5FW treatment and the lowest was recorded in FW treatment. The difference in water use efficiency between M+0.75FW with full irrigation (FW) was 0.99 kg m⁻³, which was significant. Difference in water use efficiency between M+FW and FW was

1 and 2- Master Student and Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

(*- Corresponding Author Email: Falah1357@yahoo.com)

3- Assistant Professor, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

not significant for water use efficiency. The use of plastic mulch reduced water loss throughout the plant growth period and significantly increased water use efficiency. There was a significant difference among M+FW, M+0.75FW and FW for oil content. The highest and lowest oil contents belonged to M+FW and M+0.5FW, respectively. The maximum oil yield (558 kg ha^{-1}) belonged to M+FW and the lowest one (412 kg ha^{-1}) was obtained in M+0.5FW.

Conclusion: Transparent plastic mulch under water stress conditions can reduce the effect of drought stress on hull-less seed pumpkin by preserving water and other beneficial effects, including weeds reduction. Therefore, the use of this type of mulch is recommended for the cultivation of hull-less seed pumpkin in the central areas of the country facing the water crisis.

Keywords: Fruit, Irrigation, Oil, Plasticulture



بررسی فرآیند معدنی شدن نیتروژن آلی تحت تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدیلی

فاطمه رخس^{۱*} - احمد گلچین^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۲

چکیده

کانی‌های رسی تأثیر زیادی بر پویایی ماده آلی خاک دارند و رس‌ها با حفاظت فیزیکی از ماده آلی سرعت تجزیه آن را کاهش می‌دهند. هدف این پژوهش بررسی تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدیلی بر معدنی شدن نیتروژن آلی و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی بود. برای این منظور مقادیر مشخصی از کانی‌های رسی کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت اشباع شده با کاتیون‌های سدیم، کلسیم و آلومینیوم با شن خالص مخلوط شدند تا خاک‌های مصنوعی با مقدار رس، کاتیون تبدیلی و نوع رس متفاوت در سه تکرار تهیه شود. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی (۳×۳×۳) اجرا شد. بقایای گیاهی یونجه به خاک‌های مصنوعی اضافه و خاک‌ها با فلور میکروبی یک خاک طبیعی تلقیح و به مدت ۶۰ روز خوابانیده شدند و مقدار نیتروژن آمونیومی و نیتراتی هر ۱۵ روز یک‌بار اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد در مدت دو ماه خوابانیدن، درصد نیتروژن معدنی شده، در شن خالص بیشتر از خاک‌هایی با مقادیر ۵ و ۱۰ درصد رس بود که این امر نشان می‌دهد مقدار رس بر ظرفیت خاک‌ها در نگهداشت نیتروژن آلی مؤثر است. نتایج همچنین نشان داد که با افزایش مقدار رس، مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی افزایش یافت. بیشترین و کمترین درصد نیتروژن معدنی شده و نیتروژن زیست‌توده میکروبی به ترتیب در خاک‌هایی با کاتیون‌های تبدیلی کلسیم و آلومینیوم اندازه‌گیری شدند. درصد نیتروژن معدنی شده در مدت دو ماه خوابانیدن در خاک‌هایی با رس کائولینیت حداکثر و در خاک‌هایی با رس مونت‌موریلونیت حداقل بود. مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی نیز در خاک‌هایی با رس مونت‌موریلونیت کمتر از خاک‌هایی با رس کائولینیت و ایلیت بود.

واژه‌های کلیدی: آمونیوم، زیست‌توده، سطح ویژه، ظرفیت تبادل کاتیونی، نترات

و ۴۹).

مقدمه

یکی از این مکانیسم‌ها محبوس شدن ذرات ریز ماده آلی داخل خاکدانه‌ها و تخلخل‌هایی است که برای موجودات تجزیه کننده قابل دسترس نمی‌باشند. خاک‌های رسی تخلخل‌های ریز فراوانی دارند که برای میکروب‌ها قابل دسترس نبوده و قرار گرفتن ذرات ماده آلی در این تخلخل‌ها آن‌ها را از تجزیه میکروبی حفظ می‌کند (۴۹). باکتری‌ها نمی‌توانند به تخلخل‌هایی که کوچک‌تر از سه برابر اندازه آن‌ها می‌باشد، وارد شوند و حدود ۹۰ درصد از تخلخل موجود در خاک‌های رسی کوچک‌تر از اندازه باکتری‌ها می‌باشد، در نتیجه ماده آلی موجود در این تخلخل‌ها برای باکتری قابل دسترس نبوده و از تجزیه میکروبی حفظ می‌شوند (۴۶). مکانیسم دیگری که منجر به حفظ ماده آلی در برابر تجزیه میکروبی می‌شود تشکیل کمپلکس‌های آلی-معدنی است. رس‌ها ذرات بسیار فعال خاک هستند که به دلیل داشتن بار و سطح ویژه بالا مواد آلی کلوییدی را جذب و به تشکیل کمپلکس‌های پایدار ماده آلی-رس در خاک کمک می‌کنند (۴۹). آنزیم‌های برون سلولی که توسط ریز جانداران برای تجزیه ماده آلی ترشح می‌شوند جذب رس‌ها شده و غیرفعال می‌شوند در نتیجه ماده آلی موجود در کمپلکس‌های آلی-معدنی از تجزیه میکروبی حفظ

مواد آلی خاک شامل بقایای گیاهی و جانوری، زیست‌توده و متابولیت‌های میکروبی و قارچی است که در خاک تولید و یا به خاک اضافه می‌شوند. مواد آلی خاک در درجات مختلف پوسیدگی بوده و شامل ترکیبات ساده و پیچیده و مولکول‌های بزرگ و کوچک هستند. شناخت سازوکارهای پایدار کننده ماده آلی در خاک، امری ضروری برای تعیین نقش ماده آلی در تغذیه گیاهان، ذخیره ماده آلی در خاک و جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای است (۴۴). پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که کانی‌های رسی نقش مهمی در پایداری ماده آلی در خاک و به خصوص ترکیب‌های آلی نیتروژن دار دارند (۲۴، ۲۵ و ۳۱). پیوند شیمیایی بین مولکول‌های ماده آلی و سطوح کانی‌ها منجر به کاهش تجزیه ماده آلی و افزایش پایداری کمپلکس‌های آلی-معدنی، در مقابل تجزیه میکروبی می‌شود (۲۲). رس‌ها از طریق مکانیسم‌های مختلف ماده آلی خاک را از تجزیه سریع میکروبی حفظ می‌کنند (۴۲).

۱ و ۲- دانشجوی دکتری و استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه زنجان
(Email: rakhsh.fatemeh@znu.ac.ir) (*- نویسنده مسئول)
DOI: 10.22067/jsw.v31i6.65861

می‌شود. هر دو مکانیسم که حفاظت فیزیکی خاک از ماده آلی نامیده می‌شود منجر به کاهش سرعت تجزیه ماده آلی و ذخیره آن در خاک‌های رسی می‌شوند (۴۲ و ۴۹).

نیتروژن در خاک هم به فرم معدنی (آمونیم و نترات) و هم به فرم آلی وجود دارد (۱۸) ولی بیشتر به فرم آلی در خاک ذخیره می‌شود. در حقیقت ۹۵ درصد نیتروژن خاک‌ها به شکل ترکیبات آلی در خاک وجود دارد (۲۴، ۳۱ و ۳۶) که اندازه تقریبی این مخزن ۷۲۵ گرم نیتروژن در متر مربع است درحالی‌که اندازه مخزن نیتروژن معدنی ۶ گرم نیتروژن در متر مربع می‌باشد (۳۶). معدنی شدن نیتروژن یک فرآیند میکروبی است که تحت تأثیر فاکتورهایی مانند دما و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌ها قرار دارد. تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر معدنی شدن نیتروژن آلی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار رس خاک بر سرعت معدنی شدن نیتروژن مؤثر است و سرعت معدنی شدن نیتروژن در خاک‌هایی با بافت درشت بیشتر از خاک‌هایی با بافت ریز است. خاک‌های ریز بافت مقدار رس بیشتری دارند و به دلیل وجود تخلخل ریز فراوان در این خاک‌ها، ماده آلی از تجزیه میکروبی حفظ می‌شود (۹). ترکیبات نیتروژن‌دار می‌توانند بر سطح رس‌ها جذب شوند و رس‌ها انتقال این مولکول‌ها به آب خاک را به تأخیر انداخته و با جذب و غیرفعال کردن آنزیم‌های برون سلولی که توسط موجودات تجزیه کننده و برای شکستن مولکول‌های آلی ترشح می‌کنند سبب کاهش سرعت تجزیه میکروبی این ترکیبات می‌شوند (۲۶). ظرفیت جذب ترکیبات نیتروژن‌دار در خاک به نوع مکانیسم پیوندی، نوع و مقدار رس و شیمی مواد آلی بستگی دارد. ترکیبات نیتروژن‌دار در محدوده گسترده‌ای از pH و با سرعت به مواد معدنی متصل می‌شوند (۴۱ و ۵۴) و اغلب چند مکانیسم مختلف، همزمان در بخش‌های مختلف یک مولکول آلی نیتروژن‌دار باعث این اتصال می‌شوند. پل‌های کاتیونی و به‌خصوص تبادل لیگاندی مکانیسم‌های پیوندی قوی هستند که باعث اتصال ترکیبات آلی نیتروژن‌دار به رس‌ها می‌شوند، درحالی‌که نیروهای وان‌دروالسی و پیوند هیدروژنی، پیوندهای ضعیفی برای این منظور به حساب می‌آیند (۳۷ و ۴۹). آنیون‌های آلی از طریق بار منفی کانی‌های رسی دفع می‌شوند ولی از طریق کاتیون‌های چند ظرفیتی تبدالی با سطح رس پیوند برقرار می‌کنند. کاتیون‌های چند ظرفیتی شامل Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Fe^{3+} و Al^{3+} هستند که بار منفی سطح رس‌ها و گروه‌های عاملی اسیدی ماده آلی (مانند -COO) را خنثی کرده و مانند پلی بین دو سطح باردار عمل می‌نمایند (۲۶). اندازه و ساختار مولکول آلی نیتروژن‌دار در جذب بر روی سطح رس‌ها مؤثر است (۴۹). به‌طور کلی، طول عمر و پایداری مواد آلی بستگی به قدرت پیوند این مواد با کاتیون‌های تبدالی رس‌ها مانند کلسیم، آهن و آلومینیوم و کاتیون‌های ساختمانی آن‌ها دارد (۳۱). کاتیون‌های تبدالی همچنین با تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و تأثیر بر

خاکدانه‌سازی و فعالیت میکروبی می‌توانند تأثیر شگرفی بر پویایی ماده آلی داشته باشند (۱۶). مطالعات نشان می‌دهند که سرعت معدنی شدن ماده آلی خاک همبستگی مثبتی با مقدار رس خاک یا ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) آن دارد (۵۵). در نتیجه سرعت معدنی شدن ماده آلی و تجزیه بقایای گیاهی در خاک‌های شنی سریع‌تر از خاک‌های رسی می‌باشد (۱۷). سرعت معدنی شدن کمتر در خاک‌های رسی به دلیل حفاظت فیزیکی خاک از ماده آلی و زیست‌توده میکروبی می‌باشد (۴۶). کانی‌های رسی فیلسیلیکاته نقش مهمی در نگهداشت نیتروژن آلی دارند (۸ و ۱۷). کوارتز و کانی‌های رسی غیر منبسط شونده مانند کائولینیت پیوندی ضعیفی با ماده آلی خاک دارند درحالی‌که فیلسیلیکات‌های لایه‌ای منبسط شونده مانند مونت‌موریلونیت با سطوح داخلی زیاد توانایی بیشتری برای جذب ماده آلی دارند (۴۹ و ۵۴). وگل و همکاران (۴۷) گزارش کردند که ماده آلی به‌طور یکنواخت به سطح بیرونی ذرات رس متصل نمی‌شود، بلکه گوشه‌ها و سطوح ناهموار، مکان‌های اصلی اتصال ماده آلی هستند. اگرچه تأثیر بافت خاک بر نگهداشت و پویایی ماده آلی خاک مورد مطالعه قرار گرفته است (۱۷). ولی تأثیر نوع رس کمتر مورد بررسی قرار گرفته (۱۰ و ۳۵) و تأثیر کاتیون‌های تبدالی بر پویایی و نگهداشت ماده آلی خاک کاملاً ناشناخته است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر نوع و مقدار رس، نوع کاتیون تبدالی و اثر متقابل آن‌ها بر معدنی شدن نیتروژن بقایای گیاهی یونجه و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های مصنوعی صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

مخلوط‌های شن و رس (خاک‌های مصنوعی)^۱ برای بررسی تأثیر نوع رس، نوع کاتیون تبدالی و مقدار رس بر معدنی شدن نیتروژن بقایای گیاهی و نیتروژن زیست‌توده میکروبی مورد استفاده قرار گرفتند. رس‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل کائولینیت جورجیا (KG-2)، ایلایت ایلینوس (IH-36) و مونت‌موریلونیت وایومینگ (SWy-3) از مرکز نگهداری کانی‌های رسی^۲ آمریکا تهیه شدند و با سه کاتیون مختلف سدیم، کلسیم و آلومینیوم برای تهیه رس‌هایی با کاتیون تبدالی یکسان^۳ اشباع شدند. رس‌های دارای کاتیون تبدالی یکسان، در نسبت‌های صفر، ۵ و ۱۰ درصد وزنی برای تهیه ۲۷ نوع خاک مصنوعی مختلف (۵۰ گرمی) با شن خالص تهیه شده، مخلوط شدند.

1- Artificial soils

2 - Source Clays Repository of the Clay Minerals

3- Homoionic

جدول ۱- برخی ویژگی‌های رس‌ها و بقایای یونجه مورد استفاده در آزمایش
Table 1- Some characteristics of the clay and alfalfa residues used in this study

کانی‌های رسی Clay minerals	سطح ویژه Specific surface area (SSA) (m ² g ⁻¹) نوع کاتیون اشباع شده Saturated cation		Na-Clay		pH			EC (μS cm ⁻¹)		
					نوع کاتیون اشباع شده Saturated cation			نوع کاتیون اشباع شده Saturated cation		
	Na	Ca	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC	چگالی بار سطح Charge density ^b	Na	Ca	Al	Na	Ca	Al
	EGME ^a		mmol _c kg ⁻¹	mmol _c m ⁻²						
کائولینیت Kaolinite	41	18	85	2.07 × 10 ⁻³	7.0	7.7	5.6	23	34	13.3
ایلیت Illite	195	150	202	1.03 × 10 ⁻³	6.1	7.0	5.2	23	36	26
مونت‌موریلونیت Montmorillonite	799	680	820	1.02 × 10 ⁻³	5.5	6.6	5.0	24	46	32
بقایای یونجه Alfalfa residues	کربن آلی OC		نیترژن کل Total nitrogen		C/N					
	%		%		-					
	48.21		3.7		13					

Specific surface area as determined by ethylene glycol monoethyl ether
Charge density=CEC/ Specific surface area (7)

سطح ویژه (با استفاده از اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر)
چگالی بار سطح= ظرفیت تبادل کاتیونی/ سطح ویژه

تهیه شن خالص و رس‌هایی با کاتیون تبدیلی یکسان

ذرات شن مورد استفاده در خاک‌های مصنوعی تا حذف کامل نمک‌های محلول و ذرات رس شسته شدند. ذرات شن ابتدا از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و آن دسته از ذراتی که بر روی الک ۰/۵ میلی‌متر باقی ماندند، برای آزمایش استفاده گردید. در ابتدا برای حذف کربن آلی، ذرات شن در دو مرحله در کوره در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۴ ساعت حرارت داده شدند. سپس ذرات شن با اسید کلریدریک ۲ مولار تا حذف کامل کربنات‌ها (عدم جوشش با اسید کلریدریک) شسته شدند. در ادامه ذرات شن با آب مقطر شسته و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آن خشک شدند. برای تهیه رس‌هایی با کاتیون‌های تبدیلی یکسان، نمونه‌هایی از رس‌های خالص کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت با محلول یک مولار NaCl اشباع شدند تا سدیم تبدیلی منجر به انتشار آن‌ها گردد. سپس رس‌ها تا خروج املاح اضافی با آب مقطر شسته شدند و به کمک دستگاه التراسونیک پراکنده و ذرات کوچک‌تر از ۲ میکرومتر به روش ته‌نشینی جدا شدند (۲۰). ذرات رس کوچک‌تر از ۲ میکرومتر برای تهیه رس‌هایی با کاتیون تبدیلی یکسان به کار برده شدند و با سه

کاتیون سدیم، کلسیم و آلومینیوم از طریق مصرف محلول‌های یک مولار NaCl، CaCl₂ و AlCl₃ سه بار اشباع شدند (۱۷). بعد از اشباع کردن رس‌ها با کاتیون‌های مختلف، نمونه‌های رس به‌طور جداگانه در لوله دیالیز ریخته شدند و تا خروج کامل املاح اضافی و یون کلر در آب مقطر قرار گرفتند. عدم وجود یون کلر در آب مقطری که لوله‌های دیالیز در آن قرار گرفته بودند با محلول نیترات نقره یک مولار بررسی گردید (۵۴). رس‌های تیمار شده به کمک دستگاه فریزدرایر^۱ خشک شده و در دمای اتاق تا زمان استفاده نگهداری شدند. همچنین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) رس‌ها با استفاده از استات آمونیوم در pH=۷ (۲۰) و سطح ویژه رس‌ها با استفاده از اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر (۷) تعیین گردیدند (جدول ۱).

تهیه و خواباندن نمونه‌ها

بقایای یونجه مورد استفاده در آزمایش در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد برای ۷۲ ساعت در آن خشک و از الک یک میلی‌متری عبور داده شده بودند. مقدار کربن آلی بقایا به روش اکسیداسیون

عصاره‌گیری با سولفات پتاسیم (۱) و مقدار نیتروژن موجود در عصاره‌ها به روش کلدال (۵) اندازه‌گیری گردید. درصد نیتروژن معدنی شده از تقسیم کردن مجموع نیتروژن آمونیومی و نیتراتی هر مرحله بر مقدار نیتروژن آلی موجود در ابتدای آن مرحله تعیین گردید.

تجزیه و تحلیل اطلاعات

آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل با سه فاکتور نوع رس، مقدار رس و نوع کاتیون تبدالی ($3 \times 3 \times 3$) در سه تکرار و با مجموع ۸۱ واحد آزمایشی اجرا گردید. تجزیه واریانس به کمک نرم‌افزار SAS 9.4 صورت گرفت و مقایسه میانگین داده‌ها به کمک آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شدند.

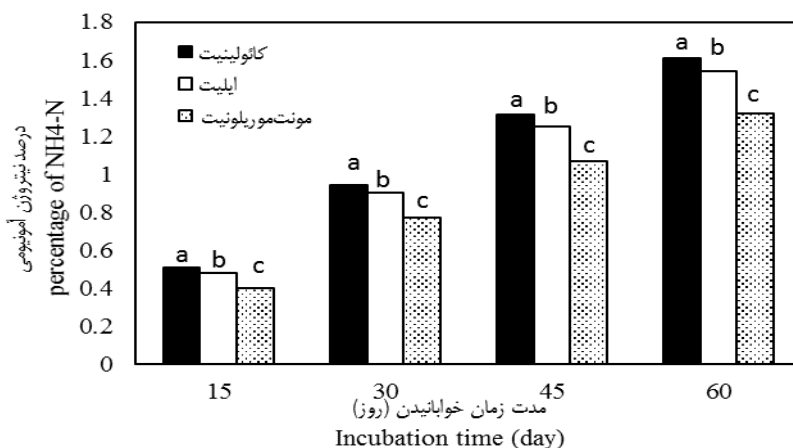
نتایج و بحث

تأثیر نوع رس

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در طی دوره خوابانیدن تأثیر نوع رس، بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول‌های ۲ و ۳). با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها، درصد نیتروژن آمونیومی افزایش یافت. بعد از گذشت ۶۰ روز از خوابانیدن نمونه‌ها به ترتیب ۱/۶۱، ۱/۵۴ و ۱/۳۲ درصد از نیتروژن آلی بقایای یونجه در رس‌های کاتولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت به‌صورت آمونیوم معدنی شدند (شکل ۱). سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) بالاتر رس مونت‌موریلونیت در مقایسه با کاتولینیت و ایلیت (جدول ۱) احتمالاً عامل کاهش سرعت معدنی شدن بقایای گیاهی یونجه و درصد نیتروژن آمونیومی در خاک‌ها بود (۱۰).

بررسی نتایج نشان داد که درصد نیتروژن نیتراتی در طی دوره خوابانیدن بیشتر از درصد نیتروژن آمونیومی بود. با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها، درصد نیتروژن نیتراتی افزایش یافت. بعد از گذشت ۶۰ روز از خوابانیدن نمونه‌ها به ترتیب ۳/۹۹، ۳/۸۳ و ۳/۲۷ درصد از نیتروژن آلی بقایای یونجه در رس‌های کاتولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت به‌صورت نیترات معدنی شدند (شکل ۲). تشکیل کمپلکس‌های آلی و معدنی (۳) و رفتن ترکیبات آلی نیتروژن‌دار در بین لایه‌های رس‌های سیلیکاته منبسط شونده مانند مونت‌موریلونیت آن‌ها را از تجزیه میکروبی حفظ می‌کند. در نتیجه تولید آمونیوم کاهش یافته و متعاقب آن تولید نیترات از آمونیوم نیز کاهش می‌یابد (۱۰).

مرطوب (۵۲) و مقدار نیتروژن کل بعد از هضم مرطوب نمونه گیاهی به روش کلدال (۱) تعیین گردیدند (جدول ۱). بقایای یونجه نیز در سه مرحله و هر بار به مدت ۲ ساعت برای حذف کامل فلور میکروبی در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار یک اتمسفر در اتوکلاو قرار گرفتند و استریل شدند (۴۸، ۴۹). در آزمایش خوابانیدن به مقدار ۲/۵ گرم بقایای گیاهی یونجه (۵ درصد وزنی)، به ۵۰ گرم از خاک‌های مصنوعی با مقادیر مختلف رس (صفر، ۵ و ۱۰ درصد وزنی)، کاتیون‌های تبدالی مختلف (سدیم، کلسیم و آلومینیوم) و نوع رس متفاوت (کاتولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت) اضافه شد. نمونه‌ها در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و در رطوبت ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه برای ۶۰ روز (دو ماه) در تاریکی خوابانیده شدند. نمونه‌های تهیه شده از خاک‌های مصنوعی استریل و فاقد جامعه میکروبی بودند به همین دلیل قبل از خوابانیدن خاک‌ها و بعد از اضافه کردن بقایای یونجه استریل به خاک‌های مصنوعی استریل، نمونه‌ها با استفاده از مایه تلقیح استخراج شده از یک خاک طبیعی تلقیح شدند. برای تهیه مایه تلقیح، یک نمونه مرکب از افق شخم یک خاک طبیعی (عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری، کربن آلی = ۰/۵ درصد، pH=۷، هدایت الکتریکی = ۸۶۴ میکرو زیمنس بر متر) تحت کشت گیاه یونجه استفاده شد. برای تهیه مایه تلقیح ۱۰ گرم خاک در ۹۰ میلی‌لیتر آب مقطر (سوسپانسیون ۱:۹ خاک به آب مقطر) ریخته شد و نمونه به مدت ۲ ساعت به هم زده شد. سپس محلول رویی این سوسپانسیون برای اطمینان از حذف کامل رس‌ها، به مدت ۱۲ دقیقه با دور ۱۰۰۰، سانتریفیوژ گردید. پس از حذف رس‌ها، محلول رویی به یک لوله فالکون جدید منتقل و مجدداً به مدت ۳۰ دقیقه با دور ۴۰۰۰ سانتریفیوژ و محلول به دست آمده به‌عنوان مایه تلقیح با نسبت ۱:۱۰ به نمونه‌های خاک‌های مصنوعی اضافه گردید (۳۴). میزان مایه تلقیح برای هر نمونه ۵ میلی‌لیتر بود که با مقدار کافی آب مقطر مخلوط شد تا نمونه‌ها به‌طور یکنواخت با مایه تلقیح آغشته شوند. سپس نمونه‌های تلقیح شده هوا خشک شدند با توجه به این‌که در ادامه آزمایش نمونه‌ها در رطوبت ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه خوابانیده شدند و از آنجا که این مقدار رطوبت در رس‌های مختلف مقادیر متفاوتی آب را شامل می‌شود و میزان آب اضافه شده به همراه مایه تلقیح میکروبی برای همه نمونه یکسان بود بنابراین ابتدا نمونه‌ها هوا خشک و سپس با افزودن مقادیر متفاوت آب به نمونه‌ها، آن‌ها را به رطوبت ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه رساندیم. تیمارها به مدت ۶۰ روز در تاریکی خوابانیده شدند و هر ۱۵ روز یک‌بار، یعنی پس از گذشت ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ روز (از شروع خوابانیدن)، مقدار نیتروژن آمونیومی و نیتروژن نیتراتی به‌وسیله عصاره‌گیری با کلرید پتاسیم و با استفاده از روش رنگ‌سنجی (۱) اندازه‌گیری شدند. همچنین در پایان دوره خوابانیدن (۶۰ روز) مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی به روش تدخین با کلروفرم و



شکل ۱- تأثیر نوع رس بر درصد نیتروژن آمونیومی در طول زمان خوابانیدن

 Figure 1- The effects of clay type on percentage of NH₄⁺-N during the incubation time

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدیلی بر درصد نیتروژن آمونیومی و نیتروژن نیتراتی

 Table 2- The analysis of variance of data showing the effects of clay types, clay contents and exchangeable cations on percentage of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Squares							
		نیتروژن آمونیومی (NH ₄ ⁺ -N)				نیتروژن نیتراتی (NO ₃ ⁻ -N)			
		%				%			
		مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)				مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)			
		15 day	30 day	45 day	60 day	15 day	30 day	45 day	60 day
Clay types	2	0.08**	0.21**	0.42**	0.62**	0.23**	1.03**	2.32**	3.77**
Clay contents	2	0.42**	1.65**	4.33**	6.83**	14.15**	22.78**	32.52**	44.91**
Exchangeable cations	2	0.03**	0.12**	0.29**	0.49**	0.12**	0.32**	0.68**	1.13**
Clay types × Clay contents	4	0.02**	0.06**	0.13**	0.18**	0.06**	0.31**	0.69**	1.13**
Clay types × Exchangeable cations	4	0.002 ^{ns}	0.005*	0.018**	0.027**	0.007**	0.004**	0.008**	0.018**
Clay contents × Exchangeable cations	4	0.009**	0.036**	0.082**	0.133**	0.37**	0.081**	0.170**	0.284**
Clay types × Clay contents × Exchangeable cations	8	0.001 ^{ns}	0.003 ^{ns}	0.010**	0.018**	0.012**	0.021**	0.024**	0.046**
Error	54	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003
Coefficient of variation (%)	-	7.74	4.51	3.73	3.32	3.27	1.96	1.49	1.42

** و * به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی دار و ns اختلاف معنی دار نیست

**and * significant at 1% and 5% and ns, not significant respectively

پیوند ضعیفی با مولکول‌های آلی دارند ولی ذرات رس (سزکویی اکسیدها و سیلیکات‌های لایه‌ای) با برقراری تبادل لیگاندی و پل‌های کاتیونی قوی منجر به حفظ ماده آلی در برابر تجزیه میکروبی می‌شوند (۴۰).

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها تأثیر نوع رس بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۳). بیشترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در رس کائولینیت به میزان ۷/۹۳ میلی گرم در ۵۰ گرم خاک خشک و کمترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در رس مونت‌موریلونیت

با توجه به شکل ۳ با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها، مقدار نیتروژن معدنی شده افزایش یافت. بعد از گذشت ۶۰ روز از خوابانیدن نمونه‌ها به ترتیب ۵/۶۵، ۵/۴۲ و ۴/۶۴ درصد از نیتروژن آلی بقایای یونجه در رس‌های کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت معدنی شدند (شکل ۳). کوگل-کنابرک و همکاران (۲۷) گزارش کردند با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی رس‌ها، ماده آلی قابل دسترس برای ریز جانداران کاهش می‌یابد. رس‌های ۲:۱ به دلیل سطح ویژه و بار سطحی بیشتر از رس‌های ۱:۱ مقدار ماده آلی بیشتری را جذب و نگهداری کرده و در نتیجه تجزیه ماده آلی کاهش می‌یابد. ذرات شن

فعالیت و تنوع جمعیت میکروبی بر آن تأثیرگذار است (۱۶). مقدار نیتروژن زیست توده میکروبی کمتر با معدنی شدن کندتر نیتروژن آلی در خاک‌های حاوی رس مونت‌موریلونیت مطابقت دارد که احتمالاً دلیل آن تهویه نامطلوب خاک‌های حاوی رس مونت‌موریلونیت و کاهش انتشار اکسیژن در این خاک‌ها می‌باشد که منجر به کاهش سرعت تجزیه مواد آلی و در نتیجه کاهش مقدار نیتروژن معدنی شده در این خاک‌ها می‌شود (۲۱).

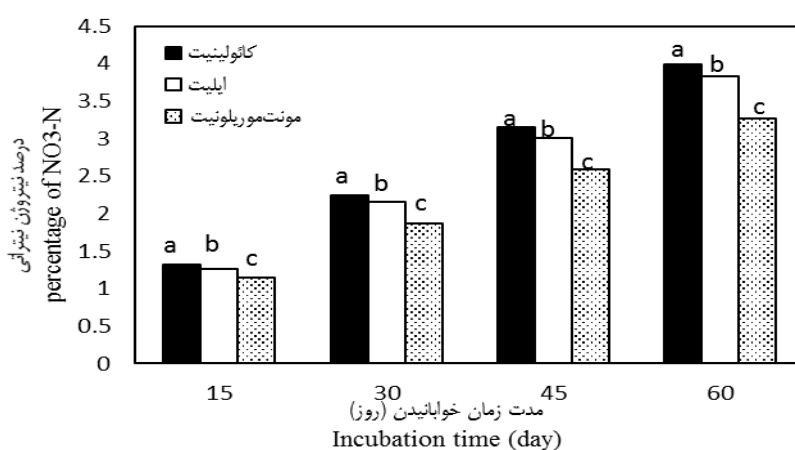
به میزان ۶/۲۳ میلی گرم در ۵۰ گرم خاک خشک اندازه‌گیری گردید (شکل ۴). وگل و همکاران (۴۹) در بررسی مقدار نیتروژن زیست توده میکروبی در خاک‌های مصنوعی حاوی رس مونت‌موریلونیت و ایلیت مشاهده کردند که مقدار زیست توده میکروبی در خاک‌های مصنوعی حاوی رس مونت‌موریلونیت به طور معنی داری کمتر از خاک‌های مصنوعی حاوی رس ایلیت بود. معدنی شدن نیتروژن ماده آلی توسط فلور میکروبی خاک صورت می‌گیرد و به نظر می‌رسد که اندازه،

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر درصد نیتروژن معدنی شده و مقدار نیتروژن زیست توده میکروبی
Table 3- The analysis of variance of data showing the effects of clay types, clay contents and exchangeable cations on percentage of mineralized nitrogen and microbial biomass nitrogen

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Squares					
		نیتروژن معدنی شده Mineralized nitrogen				نیتروژن زیست توده میکروبی Microbial biomass nitrogen	
		%				mg N/50 g dry soil	
		مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)					
		15 day	30 day	45 day	60 day		
Clay types	2	0.58**	2.20**	4.81**	7.63**	19.49**	
Clay contents	2	19.20**	36.86**	61.92**	86.69**	173.48**	
Exchangeable cations	2	0.27**	0.83**	1.85**	3.16**	248.93**	
Clay types × Clay contents	4	0.16**	0.58**	1.27**	2.02**	6.37**	
Clay types × Exchangeable cations	4	0.006 ^{ns}	0.009**	0.015**	0.04**	9.20**	
Clay contents × Exchangeable cations	4	0.073**	0.21**	0.472**	0.81**	65.22**	
Clay types × Clay contents × Exchangeable cations	8	0.007*	0.016**	0.024**	0.054**	3.13**	
Error	54	0.003	0.003	0.003	0.004	0.63	
Coefficient of variation (%)	-	3.31	1.91	1.36	1.29	11.17	

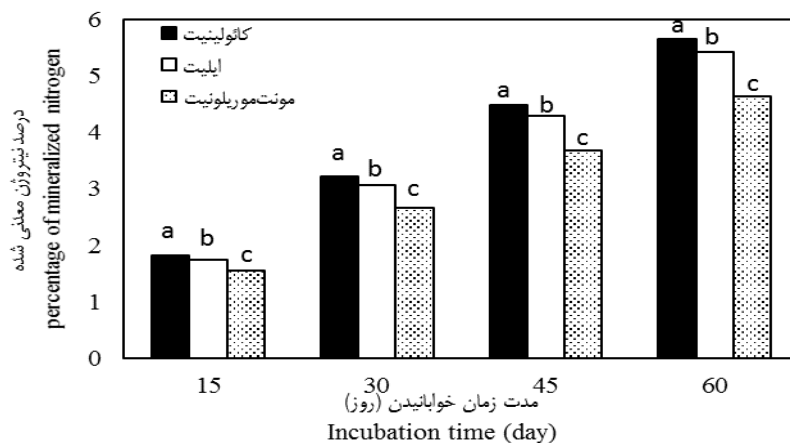
** و * به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی دار و ns اختلاف معنی دار نیست

**and * significant at 1% and 5% and ns, not significant respectively



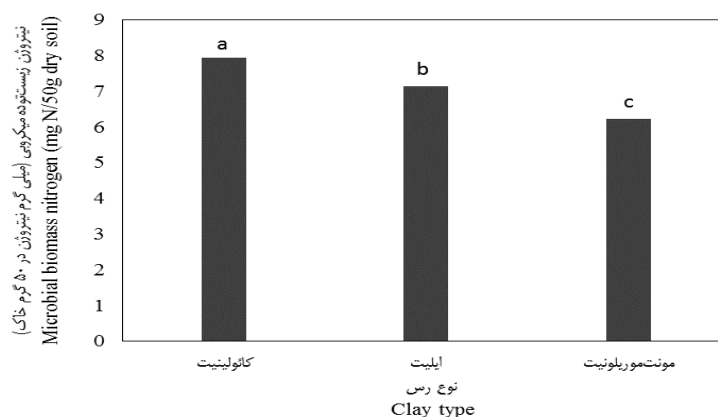
شکل ۲- تأثیر نوع رس بر درصد نیتروژن نیتراتی در طول زمان خوابانیدن

Figure 2- The effects of clay type on percentage of NO₃-N during the incubation time



شکل ۳- تأثیر نوع رس بر درصد نیتروژن معدنی شده در طول زمان خوابانیدن

Figure 3- The effects of clay type on percentage of mineralized nitrogen during the incubation time



شکل ۴- تأثیر نوع رس بر نیتروژن زیست توده میکروبی

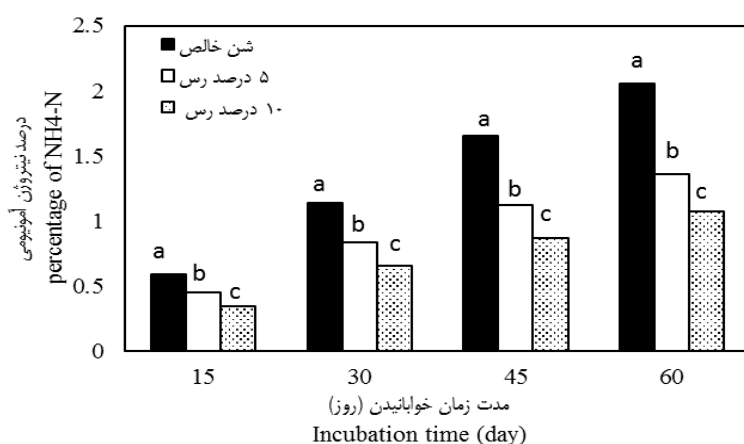
Figure 4- The effects of clay type on microbial biomass nitrogen

می‌کنند. مطالعات ورونی و دری (۵۱) نشان داد که افزایش مقدار رس منجر به کاهش معدنی شدن نیتروژن در خاک می‌شود. بخش بزرگی از نیتروژن معدنی به فرم آمونیوم توسط رس‌ها و مواد معدنی تثبیت می‌شود (۳۹). مطالعات نشان می‌دهد خاک‌های رسی مقدار آمونیوم بیشتری از خاک‌های با بافت سبک جذب می‌کنند (۱۲).

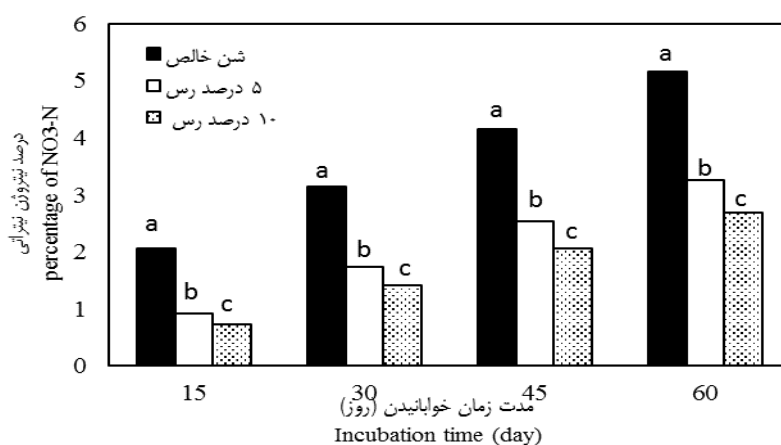
بررسی نتایج نشان داد که درصد نیتروژن نیتراتی در طی دوره خوابانیدن بیشتر از درصد نیتروژن آمونیومی بود. با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها، درصد نیتروژن نیتراتی افزایش یافت. بعد از گذشت ۶۰ روز از خوابانیدن نمونه‌ها به ترتیب ۵/۱۵، ۳/۲۵ و ۲/۶۹ درصد از نیتروژن آلی بقایای یونجه در تیمارهای شن خالص، ۵ درصد رس و ۱۰ درصد رس به صورت نیترات معدنی شدند (شکل ۶). با افزایش مقدار رس خاک و کاهش اندازه خاکدانه‌های ایجاد شده، معدنی شدن نیتروژن در خاک کاهش می‌یابد (۵۴).

تأثیر مقدار رس

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها تأثیر مقدار رس، بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول‌های ۲ و ۳). با گذشت زمان درصد نیتروژن آمونیومی افزایش یافت. بیشترین درصد نیتروژن آمونیومی بعد از گذشت ۶۰ روز از انکوباسیون نمونه‌ها و کمترین درصد نیتروژن آمونیومی ۱۵ روز بعد از انکوباسیون آن‌ها اندازه‌گیری شد (شکل ۵). همچنین صرف نظر از مدت زمان خوابانیدن با افزایش مقدار رس در نمونه‌ها از مقدار معدنی شدن نیتروژن به صورت آمونیوم کاسته شد. بیشترین درصد نیتروژن آمونیومی بعد از گذشت ۶۰ روز و در تیمار شاهد به میزان ۲/۰۵ درصد اندازه‌گیری شد (شکل ۵). تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که مواد معدنی نقش مهمی در پایداری مواد آلی و ترکیبات حاوی نیتروژن در خاک دارند (۲۵، ۳۲) و رس‌ها و اکسیدهای پدوژنیک نیتروژن آلی را در برابر تجزیه میکروبی حفظ



شکل ۵- تأثیر مقدار رس بر درصد نیتروژن آمونیومی در طول زمان خوابانیدن
Figure 5- The effects of clay content on percentage of NH₄⁺-N during the incubation time



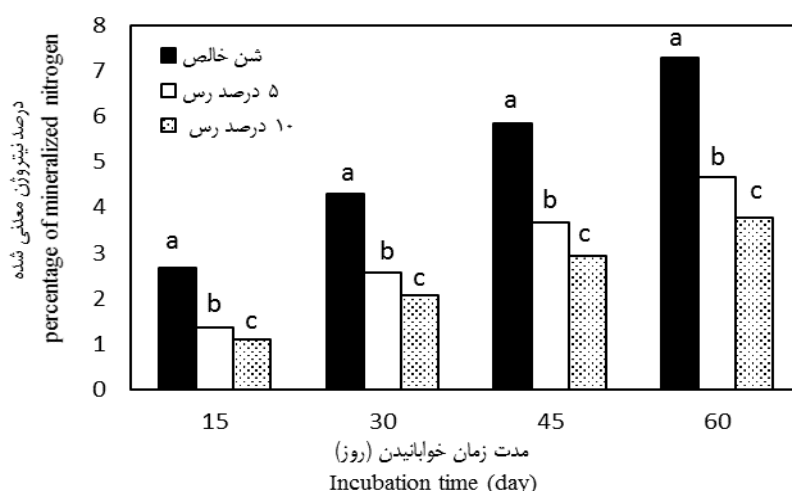
شکل ۶- تأثیر مقدار رس بر درصد نیتروژن نیتراتی در طول زمان خوابانیدن
Figure 5- The effects of clay content on percentage of NO₃⁻-N during the incubation time

شنی و رسی در مطالعات مختلف نشان داده شده است (۲۴). خاک‌هایی با مقادیر رس متفاوت، سطوح متفاوتی برای جذب ترکیبات آلی دارند؛ بنابراین مقدار رس بر ظرفیت خاک‌ها در حفظ و ذخیره نیتروژن آلی تأثیرگذار است. محققین مختلف نشان داده‌اند که جذب سطحی نیتروژن آلی با افزایش سطح خاک‌ها افزایش می‌یابد (۲۲) و (۲۳). نتیجه مطالعه کالیس و همکاران (۲۴) نشان داد مونت‌موریلونیت منجر به تشکیل کمپلکس‌های پایدار اسید هومیک و رس شده و ماده آلی خاک در برابر تجزیه میکروبی حفظ گردید.

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها تأثیر مقدار رس بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج نشان داد که با افزایش مقدار رس در خاک‌های مصنوعی مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی افزایش یافت. بیشترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در تیمار ۱۰ درصد رس به میزان

با گذشت زمان درصد نیتروژن معدنی شده افزایش یافت. بیشترین درصد نیتروژن معدنی شده بعد از گذشت ۶۰ روز از انکوباسیون نمونه‌ها و کمترین درصد نیتروژن معدنی شده ۱۵ روز بعد از انکوباسیون آن‌ها اندازه‌گیری گردید (شکل ۷). همچنین صرف‌نظر از مدت زمان خوابانیدن با افزایش مقدار رس در نمونه‌ها از مقدار معدنی شدن نیتروژن کاسته شد. با بررسی اثر متقابل مقدار رس و مدت زمان خوابانیدن مشخص شد که بیشترین درصد نیتروژن معدنی شده بعد از گذشت دو ماه از خوابانیدن و در شن خالص به میزان ۷/۲۸ درصد اندازه‌گیری گردید (شکل ۷). معدنی شدن نیتروژن بقایای گیاهی در شن خالص (شاهد) بسیار بیشتر از خاک‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد رس بود. سرعت معدنی شدن کمتر نیتروژن در خاک‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد رس به دلیل حفاظت فیزیکی بیشتر خاک از مواد آلی و زیست‌توده میکروبی است (۱۸). نتایج مشابهی برای خاک‌های

۹/۲۶ میلی گرم در ۵۰ گرم خاک خشک و کمترین مقدار نیتروژن زیست توده میکروبی در تیمار شاهد به میزان ۴/۳۱ میلی گرم در ۵۰ گرم خاک خشک اندازه گیری شد (شکل ۸).

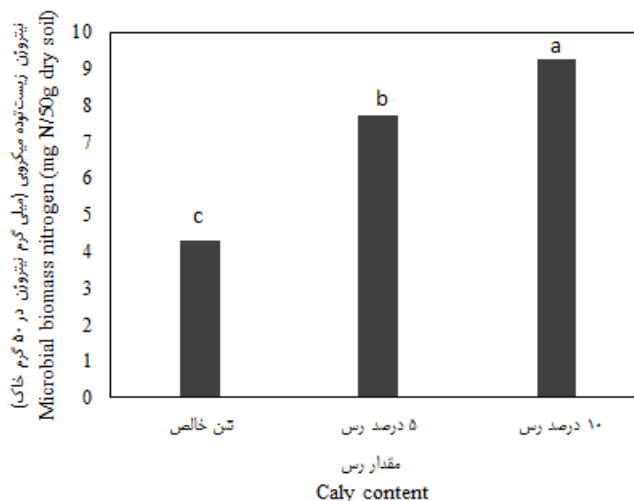


شکل ۷- تأثیر مقدار رس بر درصد نیتروژن معدنی شده در طول زمان خوابانیدن

Figure 7- The effects of clay content on percentage of mineralized nitrogen during the incubation time

احتمالاً کاهش تنش آبی و کاهش فعالیت شکارچیان به دلیل افزایش حفاظت فیزیکی خاک از زیست توده میکروبی در خاک هایی با بافت ریزتر می باشد. بافت خاک می تواند به طور مستقیم با حفاظت میکروب ها از شکارچی ها و به طور غیرمستقیم با نگهداشت بیشتر ماده آلی، بر مقدار نیتروژن زیست توده میکروبی خاک تأثیرگذار باشد. به طور معمول، نیتروژن زیست توده میکروبی بیشتر در خاک هایی با بافت ریز به دلیل مقدار بیشتر ماده آلی و حفاظت بیشتر میکروب ها از شکارچیان توسط خاکدانه ها می باشد (۳۱).

همبستگی مثبتی بین مقدار رس خاک و مقدار نیتروژن زیست توده میکروبی در خاک وجود داشت و این امر نشان می دهد ظرفیت خاک برای حفظ زیست توده میکروبی بستگی به مقدار رس آن دارد (۳۱). افزایش معنی دار مقدار نیتروژن زیست توده میکروبی با افزودن ۵ درصد رس نشان می دهد که مقدار اندکی رس (۵ درصد) می تواند از میکروب ها در برابر شکارچیان حفاظت کند و با افزودن بر این مقدار شرایط محیط رشد آن ها بهبود می یابد. دلیل اصلی افزایش مقدار نیتروژن زیست توده میکروبی در خاک هایی با مقدار رس بالا



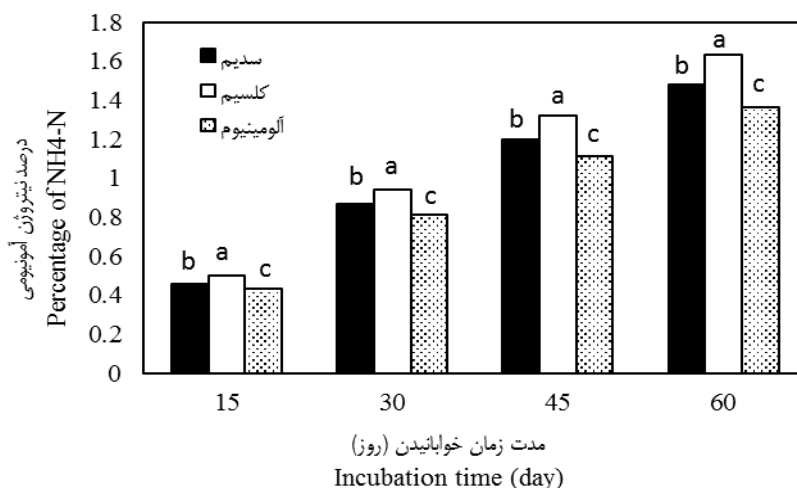
شکل ۸- تأثیر مقدار رس بر نیتروژن زیست توده میکروبی

Figure 8- The effects of clay content on microbial biomass nitrogen

تأثیر نوع کاتیون تبدالی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد در طی دوره خوابانیدن تأثیر نوع کاتیون تبدالی، بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول‌های ۲ و ۳). با توجه به نتایج مقایسه میانگین داده‌ها بیشترین

درصد نیتروژن آمونیومی در طی ۶۰ روز خوابانیدن نمونه‌ها و در تیمار رس اشباع از کاتیون کلسیم به میزان ۱/۶۳ درصد اندازه‌گیری شد، در صورتی که تیمار حاوی رس اشباع از کاتیون آلومینیوم دارای کمترین درصد نیتروژن آمونیومی (۱/۳۶ درصد) بود و کاتیون سدیم اثرات متوسطی بر درصد نیتروژن آمونیومی داشت (شکل ۹).

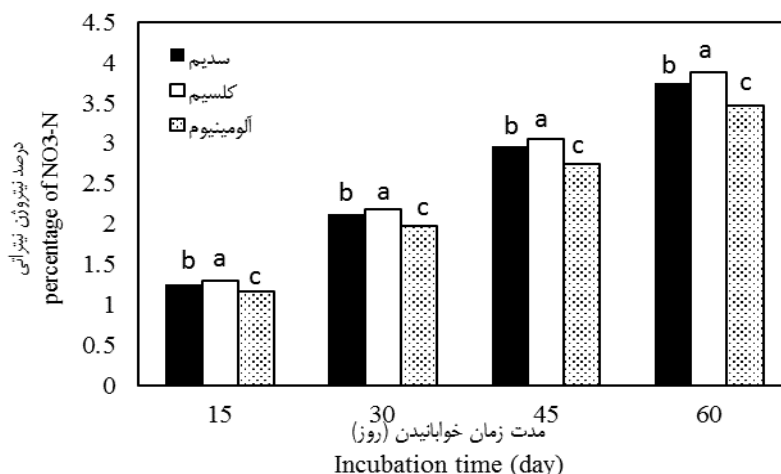


شکل ۹- تأثیر نوع کاتیون تبدالی بر درصد نیتروژن آمونیومی در طول زمان خوابانیدن

Figure 9- The effects of exchangeable cation on percentage of NH₄⁺-N during the incubation time

(۳/۴۷ درصد) بود. کاتیون سدیم اثرات متوسطی بر درصد نیتروژن نیتراتی داشت (شکل ۱۰). همچنین صرف‌نظر از نوع کاتیون تبدالی در طی دوره خوابانیدن نمونه‌ها کمترین درصد نیتروژن نیتراتی در ۱۵ روز اول خوابانیدن نمونه‌ها مشاهده شد (شکل ۱۰).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیشترین درصد نیتروژن نیتراتی در طی ۶۰ روز خوابانیدن نمونه‌ها و در تیمار رس اشباع از کاتیون کلسیم (۳/۸۸ درصد) به دست آمد در صورتی که تیمار حاوی رس اشباع از کاتیون آلومینیوم دارای کمترین درصد نیتروژن نیتراتی



شکل ۱۰- تأثیر نوع کاتیون تبدالی بر درصد نیتروژن نیتراتی در طول زمان خوابانیدن

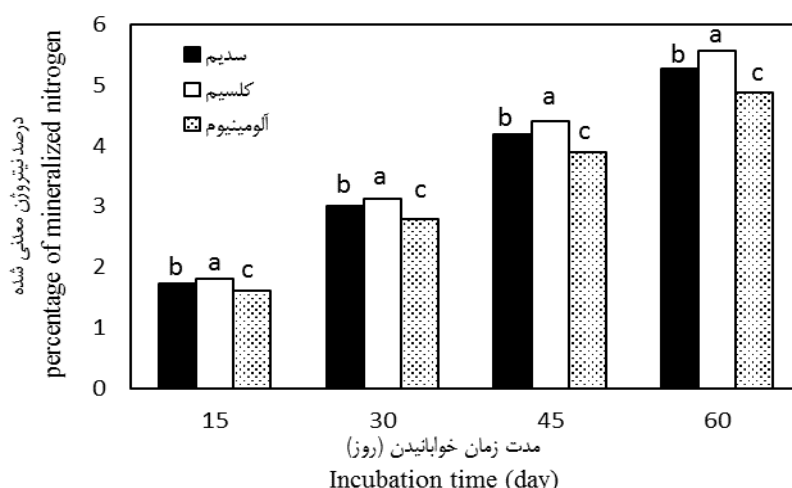
Figure 10- The effects of exchangeable cation on percentage of NO₃⁻-N during the incubation time

معدنی ۶۰ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها و در رس‌های اشباع از کلسیم (۵/۵۳ درصد) و کمترین مقدار نیتروژن معدنی ۱۵ روز بعد از

صرف‌نظر از نوع کاتیون تبدالی با افزایش زمان خوابانیدن نمونه‌ها، مقدار نیتروژن معدنی شده افزایش یافت. بیشترین مقدار نیتروژن

به انتشار رس و ایجاد تهویه نامطلوب و شرایط فیزیکی ضعیف در خاک‌ها می‌شود، توسط مطالعات مختلف تأیید شده است. خاک‌های سدیمی به‌خصوص خاک‌های حاوی رس مونت‌موریلونیت در شرایط مرطوب به‌شدت دیسپرس شده و مواد ژل‌مانندی در خاک ایجاد می‌کنند؛ بنابراین معدنی شدن کمتر نیتروژن آلی در خاک‌های حاوی سدیم در مقایسه با خاک‌های حاوی کلسیم به دلیل فقدان شرایط هوازی مناسب می‌باشد.

خوابانیدن نمونه‌ها و در رس‌های اشباع از آلومینیوم (۱/۵۷ درصد) اندازه‌گیری گردید (شکل ۱۱). معدنی شدن کربن و نیتروژن تحت تأثیر pH خاک قرار دارد و با کاهش pH خاک فعالیت میکروبی و در نتیجه تجزیه مواد آلی در خاک کاهش می‌یابد (۳۰) به همین دلیل در تیمار حاوی رس اشباع شده با کاتیون آلومینیوم معدنی شدن نیتروژن به دلیل pH پایین و مسمومیت آلومینیوم، کمتر بود (۴۶). کاتیون‌های تبدالی با تغییر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، معدنی شدن مواد آلی را کنترل می‌کنند (۱۷). این امر که سدیم تبدالی منجر



شکل ۱۱- تأثیر نوع کاتیون تبدالی بر درصد نیتروژن معدنی شده در طول زمان خوابانیدن

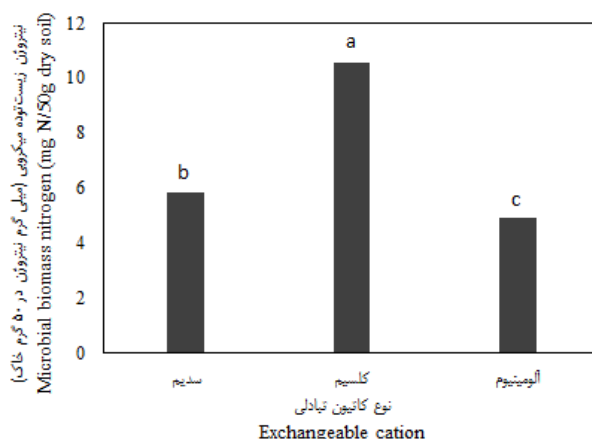
Figure 11- The effects of exchangeable cation on percentage of mineralized nitrogen during the incubation time

کاتیونی باشد. مطالعات نشان داده است که کاتیون‌های تبدالی چند ظرفیتی مانند کلسیم و منیزیم ظرفیت جذب سطحی رس‌ها را به‌وسیله ایجاد پل کاتیونی بین بار منفی سطح رس و بار منفی گروه‌های عاملی مواد آلی، افزایش می‌دهند و این اتصال مواد آلی را از تجزیه سریع حفظ می‌کند. سرعت معدنی شدن سریع‌تر نیتروژن بقایای گیاهی در خاک‌های کلسیمی در مقایسه با خاک‌های سدیمی نشان می‌دهد که نقش غیرمستقیم این کاتیون‌ها بر معدنی شدن و نگهداشت نیتروژن آلی، قوی‌تر از نقش مستقیم این کاتیون‌ها است. مطالعات مختلفی تأثیر رس و یا خصوصیات وابسته به آن را در پایداری بقایای آلی و زیست‌توده میکروبی خاک‌ها نشان داده‌اند (۱۷). با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها تأثیر نوع کاتیون تبدالی بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج نشان داد بیشترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در تیمار حاوی رس اشباع از کاتیون کلسیم به میزان ۱۰/۵۷ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک به دست آمد در صورتی که تیمار حاوی رس اشباع از کاتیون آلومینیوم دارای کمترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی (۴/۹۲ میلی‌گرم در ۵۰

کلسیم تبدالی، ساختمان خاک و در نتیجه شرایط هوازی و رطوبتی را به نفع ریز جانداران خاک بهبود می‌دهد که منجر به افزایش معدنی شدن نیتروژن آلی بقایای گیاهی می‌شود (۱۷). مطالعات بسیاری تأثیر شدید اسیدیته و سمیت آلومینیوم را بر ریز جانداران خاک نشان داده‌اند (۵۳). سمیت آلومینیوم برای ریز جانداران خاک علت معدنی شدن کندتر نیتروژن بقایای گیاهی در این خاک‌ها است. زران و همکاران (۵۶) نشان دادند که آلومینیوم تبدالی در رس بنتونیت منجر به کاهش تعداد سلول‌های زنده در مقایسه با بنتونیت اشباع شده با کلسیم شد. در آزمایشی معدنی شدن کربن گلوکز در رس بنتونیت اشباع شده با آلومینیوم بعد از یک وقفه ۱۰ روزه شروع شد که این امر به دلیل pH پایین و سمیت آلومینیوم برای ریز جانداران خاک بود (۱۷). به نظر می‌رسد تأثیر کاتیون‌های تبدالی بر تجزیه بقایای گیاهی بخشی به دلیل تأثیر این کاتیون‌ها بر رشد میکروب‌ها و فعالیت‌های متابولیکی آن‌ها از طریق تأثیر بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی محیط رشد آن‌ها باشد. در حقیقت به نظر می‌رسد تأثیر غیرمستقیم کاتیون‌های تبدالی بر تجزیه بقایای گیاهی بیشتر از نقش مستقیم آن‌ها در اتصال مواد آلی به سطح رس‌ها از طریق پل

آنزیم‌ها شده و در نتیجه تجزیه ماده آلی کاهش می‌یابد (۲۴). همچنین وجود آلومینیوم در خاک منجر به کاهش pH خاک شده در نتیجه رشد و فعالیت ریز جانداران و فعالیت آنزیمی کاهش می‌یابد (۳۱).

گرم خاک خشک) بود (شکل ۱۲). مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های سدیمی در مقایسه با خاک‌های کلسیمی کمتر بود که این امر می‌تواند به دلیل فقدان شرایط هوازای مناسب در خاک سدیمی باشد (۵۳). سمیت آلومینیوم برای ریز جانداران سبب کاهش فعالیت آنزیم‌ها در نتیجه کمپلکس شدن، فلوکوله شدن یا رسوب



شکل ۱۲- تأثیر نوع کاتیون تبادلی بر نیتروژن زیست‌توده میکروبی

Figure 12- The effects of exchangeable cation on microbial biomass nitrogen

نیتراتی و نیتروژن معدنی با افزایش مقدار رس در خاک‌های مصنوعی برای هر سه نوع رس کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت کاهش یافتند و درصد نیتروژن آمونیومی، نیتراتی و معدنی در رس کائولینیت بیشتر از رس ایلیت و مونت‌موریلونیت بود (جدول‌های ۴ و ۵).

اثر متقابل نوع و مقدار رس

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در طی دو ماه خوابانیدن نمونه‌ها اثر متقابل نوع و مقدار رس، بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول‌های ۲ و ۳). درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن

جدول ۴- تأثیر نوع و مقدار رس بر درصد نیتروژن آمونیومی و نیتروژن نیتراتی

Table 4- The effects of clay type and clay content on percentage of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$

نوع رس × مقدار رس Clay type × Clay content		نیتروژن آمونیومی ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)				نیتروژن نیتراتی ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)			
		%				%			
		مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)				مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)			
		15 day	30 day	45 day	60 day	15 day	30 day	45 day	60 day
Kaolinite	0	0.59 a	1.14 a	1.65 a	2.05 a	2.07 a	3.14 a	4.16 a	5.15 a
	5	0.55 b	0.97 b	1.32 b	1.60 b	1.05 b	1.96 b	2.86 b	3.64 b
	10	0.38 d	0.72 d	0.96 d	1.19 d	0.86 d	1.66 c	2.44 d	3.17 d
Illite	0	0.59 a	1.14 a	1.65 a	2.05 a	2.07 a	3.14 a	4.16 a	5.15 a
	5	0.45 c	0.88 c	1.17 c	1.43 c	0.93 c	1.75 c	2.58 c	3.33 c
	10	0.39 d	0.68 de	0.92 d	1.14 e	0.79 e	1.56 e	2.30 e	3.00 e
Montmorillonite	0	0.59 a	1.14 a	1.65 a	2.05 a	2.07 a	3.14 a	4.16 a	5.15 a
	5	0.35 d	0.65 e	0.85 e	1.05 f	0.77 e	1.49 f	2.16 f	2.79 f
	10	0.26 e	0.53 f	0.71 f	0.86 g	0.58 f	0.99 g	1.45 g	1.89 g

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد ندارند

In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests

بررسی نتایج نشان داد صرف نظر از نوع رس، با افزایش مقدار رس از درصد نیتروژن آمونیومی کاسته شد (جدول ۴). با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها درصد نیتروژن آمونیومی افزایش یافت. بیشترین درصد نیتروژن آمونیومی ۶۰ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در شن خالص به میزان ۲/۰۵ درصد و کمترین درصد نیتروژن آمونیومی ۱۵ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در خاک‌هایی با ۱۰ درصد رس مونت‌موریلونیت به میزان ۰/۲۶ درصد اندازه‌گیری شد (جدول ۴). در طی دوره خوابانیدن، با افزایش مقدار رس در نمونه‌های خاک صرف نظر از نوع رس، درصد نیتروژن نیتراتی کاهش یافت. بیشترین درصد نیتروژن نیتراتی ۶۰ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در شن خالص به میزان ۵/۱۵ درصد و کمترین درصد نیتروژن آمونیومی ۱۵ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در خاک‌هایی با ۱۰ درصد رس مونت‌موریلونیت به میزان ۰/۵۸ درصد اندازه‌گیری شد (جدول ۴). با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها معدنی شدن نیتروژن افزایش یافت. بیشترین درصد نیتروژن معدنی شده ۶۰ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در شن خالص به میزان ۷/۲۸ درصد و کمترین درصد نیتروژن معدنی شده ۱۵ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در خاک‌هایی با ۱۰ درصد رس مونت‌موریلونیت به میزان ۰/۸۴ درصد اندازه‌گیری شد (جدول ۵). سطح ویژه بالاتر و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) بیشتر مونت‌موریلونیت در مقایسه با کائولینیت و ایلیت (جدول ۱) منجر به کاهش مقدار و درصد نیتروژن معدنی شد. سطح ویژه برای جذب

نیتروژن در خاک‌ها بستگی به مینرالوژی رس‌ها دارد. وگل و همکاران (۴۸) مشاهده کردند که مدت طولانی بعد از اضافه کردن کود آلی به خاک‌های مصنوعی با مینرالوژی متفاوت مقدار کربن و نیتروژن آلی در خاک‌های مصنوعی حاوی مونت‌موریلونیت در مقایسه با خاک‌های مصنوعی حاوی ایلیت بیشتر بود؛ بنابراین زمانی که کانی‌های خالص با مواد آلی خوابانیده می‌شوند، ممکن است مینرالوژی تأثیری بر پویایی کربن و نیتروژن آلی در کوتاه مدت نداشته باشد (۳۴) ولی زمانی که این خاک‌های مصنوعی به مدت طولانی خوابانیده می‌شوند، مقدار کربن و نیتروژن آلی بیشتری در خاک‌های حاوی رس مونت‌موریلونیت مشاهده شد (۴۸). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل نوع و مقدار رس، بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی با افزایش مقدار رس در نمونه‌ها، صرف نظر از نوع رس، افزایش یافت. همچنین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در رس کائولینیت بیشتر از رس ایلیت و مونت‌موریلونیت بود (جدول ۵). بیشترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های دارای ۱۰ درصد رس کائولینیت به میزان ۱۰/۳۵ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک و کمترین نیتروژن زیست‌توده میکروبی در تیمار شاهد (شن خالص) به میزان ۴/۳۱ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک اندازه‌گیری شد (جدول ۵).

جدول ۵- تأثیر نوع و مقدار رس بر درصد نیتروژن معدنی شده و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی

Table 5- The effects of clay type and clay content on percentage of mineralized nitrogen and microbial biomass nitrogen

نوع رس × مقدار رس Clay type × Clay content		نیتروژن معدنی شده Mineralized nitrogen %				نیتروژن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass nitrogen mg N/50 g dry soil	
		مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)					
		15 day	30 day	45 day	60 day		
Kaolinite	0	2.67 a	4.29 a	5.85 a	7.28 a	4.31 e	
	5	1.60 b	2.94 b	4.20 b	5.28 b	9.12 b	
	10	1.24 d	2.39 d	3.43 d	4.39 d	10.35 a	
Illite	0	2.67 a	4.29 a	5.85 a	7.28 a	4.31 e	
	5	1.38 c	2.64 c	3.77 c	4.80 c	7.33 cd	
	10	1.18 e	2.25 e	3.24 e	4.17 e	9.79 ab	
Montmorillonite	0	2.67 a	4.29 a	5.85 a	7.28 a	4.31 e	
	5	1.13 e	2.15 f	3.03 f	3.86 f	6.73 d	
	10	0.84 f	1.53 g	2.17 g	2.77 g	7.65 c	

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد ندارند

In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests

اثر متقابل نوع رس و کاتیون تبادلی

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثر متقابل نوع رس و کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژنی معدنی در تمام دوره خوابانیدن در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند ولی اثر متقابل نوع رس و کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن آمونیومی در ۳۰ روز خوابانیدن در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول‌های ۲ و ۳). همچنین اثر متقابل نوع رس و کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن آمونیومی و نیتروژنی معدنی در ۱۵ روز اول خوابانیدن معنی‌دار نبود (جدول‌های ۲ و ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در طی دوره خوابانیدن، بیشترین درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی در خاک حاوی کائولینیت با کاتیون تبادلی کلسیم و کمترین درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی در خاک حاوی مونت‌موریلونیت با کاتیون تبادلی آلومینیوم مشاهده شدند، درحالی‌که کاتیون تبادلی سدیم اثر حد واسطی بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی در هر سه نوع رس داشت (جدول‌های ۶ و ۷). بیشترین درصد نیتروژن آمونیومی ۶۰ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در خاک حاوی رس کائولینیت با کاتیون تبادلی کلسیم به میزان ۱/۸۱ درصد اندازه‌گیری گردید (جدول ۶). همچنین بررسی نتایج نشان داد در طی دوره خوابانیدن بیشترین درصد نیتروژن نیتراتی صرف‌نظر از نوع رس در خاک‌های اشباع شده با کاتیون کلسیم و کمترین درصد نیتروژن نیتراتی در خاک‌های اشباع شده با کاتیون آلومینیوم مشاهده شدند (جدول ۶). بیشترین درصد نیتروژن نیتراتی در خاک حاوی رس کائولینیت با کاتیون تبادلی کلسیم به میزان ۴/۱۸ درصد (۶۰ روز بعد از خوابانیدن) و کمترین درصد نیتروژن نیتراتی در خاک حاوی رس مونت‌موریلونیت با کاتیون تبادلی آلومینیوم به میزان ۱/۰۹ درصد (۱۵ روز بعد از خوابانیدن) اندازه‌گیری شدند (جدول ۶).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها درصد نیتروژن معدنی افزایش یافت. بیشترین درصد نیتروژن معدنی ۶۰ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها، در خاک حاوی رس کائولینیت با کاتیون تبادلی کلسیم به میزان ۶/۰۶ درصد اندازه‌گیری گردید (جدول ۷). در تمام دوره خوابانیدن خاک‌های کلسیمی بیشترین و خاک‌های آلومینیومی کمترین درصد نیتروژن معدنی را صرف‌نظر از نوع رس داشت (جدول ۷). نتایج نشان داد که تأثیر مینرالوژی رس بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی در خاک‌های کلسیمی مشخص‌تر و بیشتر از خاک‌های سدیمی و آلومینیومی بود. مطالعه مستقیم تأثیر مینرالوژی رس بر نگهداشت و پویایی مواد آلی کمیاب است و دانش ما در این زمینه محدود و اطلاعات موجود ضدونقیض می‌باشد. ولی به‌طور کلی

پذیرفته شده است که نگهداشت مواد آلی خاک در حضور کانی‌های رسی به ترتیب آلفان < اسمکتایت < ایلیت < کائولینیت کاهش می‌یابد (۶، ۵۰). مینرالوژی خاک در تعیین مقدار کربن آلی ذخیره شده در خاک‌ها و زمان بازگشت آن اهمیت زیادی دارد (۴). چون برهمکنش بین ذرات مواد معدنی و مواد آلی از مینرالوژی خاک، به دلیل سطح ویژه (SSA) و میزان بار متفاوت کانی‌های مختلف خاک، تأثیر می‌پذیرد (۴۴). به نظر می‌رسد نتایج متفاوت و متضاد تأثیر مینرالوژی رس بر نگهداشت و پویایی مواد آلی تا اندازه‌ای مربوط به نوع کاتیون‌های تبادلی موجود در مکان‌های تبادلی کانی‌های رسی باشد. در پژوهش حاضر تأثیر مینرالوژی رس بر تجزیه بقایای گیاهی زمانی که سدیم کاتیون تبادلی کانی‌های رسی است، کمتر مشخص می‌باشد. مکانیسم‌های مختلفی چگونگی تأثیر مینرالوژی بر معدنی شدن مواد آلی در خاک را مورد بررسی قرار داده‌اند. برای مثال، فرض می‌شود که کانی‌های رسی به‌طور مستقیم با میکروب‌ها در ارتباط هستند بنابراین سرعت متابولیسم میکروب‌ها با تغییر محلول خاک و پیوند آنزیم‌های برون سلولی تغییر می‌کند و در نتیجه فعالیت میکروب‌ها و تجزیه ماده آلی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (۴۵).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل نوع رس و نوع کاتیون تبادلی بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۳). بیشترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک حاوی رس کائولینیت با کاتیون تبادلی کلسیم (۱۲/۵۷ میلی گرم در ۵۰ گرم خاک خشک) و کمترین نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک حاوی رس مونت‌موریلونیت با کاتیون تبادلی آلومینیوم (۴/۶۸ میلی گرم نیتروژن در ۵۰ گرم خاک خشک) اندازه‌گیری شد و کاتیون تبادلی سدیم اثر حد واسطی بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در هر سه نوع رس داشت (جدول ۷). این امر به‌خوبی نشان می‌دهد که سدیم تبادلی باعث ایجاد شرایط فیزیکی نامطلوب در خاک می‌شود بنابراین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی کمتر در خاک‌های سدیمی در مقایسه با خاک‌های کلسیمی می‌تواند به دلیل شرایط فیزیکی نامطلوب در این خاک‌ها باشد. در خاک‌های آلومینیومی با مینرالوژی متفاوت مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌هایی با رس مونت‌موریلونیت به‌طور معنی‌داری کمتر بود. ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه بالاتر رس مونت‌موریلونیت، سمیت آلومینیوم در محیط خاک را افزایش داده و بنابراین تعداد سلول‌های زنده کاهش می‌یابد و در نتیجه از تجزیه بقایای گیاهی کاسته می‌شود. به نظر می‌رسد شرایط فیزیکوشیمیایی محیط رشد میکروب‌ها و در نتیجه فعالیت ریز جانداران خاک توسط کاتیون‌های تبادلی تغییر می‌یابد که این تأثیر غیرمستقیم کانی‌های رسی، منجر به تفاوت در تجزیه بقایای گیاهی می‌شود؛ زیرا تغییرات فیزیکوشیمیایی ایجاد شده در خاک در نتیجه تغییر کاتیون‌های تبادلی در رس‌هایی با

ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه بالاتر، بیشتر می‌باشد (۱۵).

جدول ۶- تأثیر نوع رس و کاتیون تبدیلی بر درصد نیتروژن آمونیومی و نیتروژن نیتراتی

Table 6- The effects of clay type and exchangeable cation on percentage of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$

نوع رس × نوع کاتیون تبدیلی Clay type × Exchangeable cation		نیتروژن آمونیومی ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)			نیتروژن نیتراتی ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)			
		%			%			
		مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)			مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)			
		30 day	45 day	60 day	15 day	30 day	45 day	60 day
Kaolinite	Na	0.94 b	1.28 c	1.57 c	1.34 b	2.29 b	3.19 b	1.02 b
	Ca	1.03 a	1.47 a	1.81 a	1.41 a	2.36 a	3.29 a	4.18 a
	Al	0.86 cd	1.19 de	1.46 de	1.23 d	2.11 e	2.98 d	3.76 d
Illite	Na	0.88 c	1.22 d	1.51 d	1.27 c	2.18 d	3.06 c	3.88 c
	Ca	0.95 b	1.33 b	1.65 b	1.33 b	2.24 c	3.17 b	4.04 b
	Al	0.86 cd	1.19 de	1.46 de	1.19 e	2.02 f	2.80 e	3.56 e
Montmorillonite	Na	0.79 e	1.09 f	1.36 f	1.16 e	1.90 h	2.62 g	3.31 g
	Ca	0.83 d	1.16 e	1.43 e	1.17 e	1.95 g	2.70 f	3.41 f
	Al	0.70 f	0.95 g	1.17 g	1.09 f	1.78 i	2.45 h	3.10 h

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد ندارند
In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests

جدول ۷- تأثیر نوع رس و کاتیون تبدیلی بر درصد نیتروژن معدنی شده و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی

Table 7- The effects of clay type and exchangeable cation on percentage of mineralized nitrogen and microbial biomass nitrogen

نوع رس × نوع کاتیون تبدلی Clay type × Exchangeable cation		نیتروژن معدنی شده Mineralized nitrogen			نیتروژن زیست توده میکروبی Microbial biomass nitrogen mg N/50 g dry soil
		%			
		مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)			
		30 day	45 day	60 day	
Kaolinite	Na	3.24 b	4.50 b	5.63 c	6.27 d
	Ca	3.40 a	4.79 a	6.06 a	12.57 a
	Al	2.98 d	4.19 d	5.63 c	4.95 ef
Illite	Na	3.08 c	4.31 c	5.44 d	5.73 de
	Ca	3.21 b	4.53 b	5.75 b	10.55 b
	Al	2.89 e	4.02 e	5.07 f	5.14 ef
Montmorillonite	Na	2.69 g	3.74 g	4.71 h	5.42 ef
	Ca	2.79 f	3.88 f	4.89 g	8.58 c
	Al	2.49 h	3.43 h	4.31 i	4.68 f

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد ندارند
In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests

اثر متقابل نوع کاتیون تبدیلی و مقدار رس

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در طول دوره خوابانیدن اثر متقابل نوع کاتیون تبدیلی و مقدار رس، بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی شده در سطح احتمال

یک درصد معنی‌دار شدند (جدول‌های ۲ و ۳). در تمام دوره خوابانیدن با افزایش سطح رس صرف‌نظر از نوع کاتیون‌های تبدیلی از درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی کاسته شد. بیشترین درصد نیتروژن آمونیومی و نیتروژن نیتراتی ۶۰ روز بعد از

مهم‌ترین فرایندهای طبیعی برای کاهش تجزیه ماده آلی خاک است. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر متقابل نوع کاتیون تبدیلی و مقدار رس بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۳). با افزایش مقدار رس صرف‌نظر از نوع کاتیون تبدیلی مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی، افزایش یافت. بیشترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های کلسیمی با ۱۰ درصد رس به میزان ۱۵/۱۳ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک اندازه‌گیری شد و کمترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در تیمار شاهد به میزان ۴/۳۱ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک مشاهده گردید (جدول ۹). به نظر می‌رسد تأثیر کاتیون‌های تبدیلی بر تجزیه نیتروژن بقایای گیاهی از طریق تأثیر بر رشد میکروبی و فعالیت متابولیکی و تغییر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی محیط رشد میکروب‌ها صورت می‌گیرد. از آنجایی که معدنی شدن بقایای گیاهی توسط فلور میکروبی خاک صورت می‌گیرد، این نتیجه استنباط می‌شود که حداقل بخشی از این فرآیند به‌وسیله اندازه، فعالیت و تنوع جمعیت میکروبی خاک تنظیم می‌شود (۱۶، ۴۰، ۴۱).

خوابانیدن نمونه‌ها در شن خالص به ترتیب به میزان ۲/۰۵ و ۵/۱۵ درصد و کمترین درصد نیتروژن آمونیومی و نیتروژن نیتراتی ۱۵ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در خاک‌هایی آلومینیومی با ۱۰ درصد رس به ترتیب به میزان ۰/۳۰ و ۰/۶۴ درصد اندازه‌گیری گردیدند (جدول ۸). با افزایش زمان خوابانیدن نمونه‌ها، درصد نیتروژن معدنی افزایش یافت. بیشترین درصد نیتروژن معدنی در تیمار شاهد (شن خالص) به میزان ۷/۲۸ درصد ۶۰ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها و کمترین درصد نیتروژن معدنی در مدت زمان ۱۵ روز بعد از خوابانیدن در خاک آلومینیومی با ۱۰ درصد رس به میزان ۰/۹۴ درصد اندازه‌گیری گردید (جدول ۹). به دلیل تأثیر مضر سدیم و آلومینیوم بر محیط خاک، تأثیر مقدار رس بر معدنی شدن نیتروژن بقایای گیاهی زمانی که این کاتیون‌ها، به‌عنوان کاتیون تبدیلی بر روی سطح رس قرار دارند، واضح‌تر است. تفاوت در معدنی شدن نیتروژن بین خاک‌هایی با مقادیر صفر و ۵ درصد رس بسیار بیشتر از تفاوت در معدنی شدن نیتروژن بین خاک‌هایی با مقادیر ۵ و ۱۰ درصد رس بود. این امر نشان می‌دهد که خاک‌هایی با ۵ درصد رس سطح کافی برای پایداری نیتروژن آلی عرضه می‌کنند. واکنش ماده آلی با مواد معدنی خاک یکی از

جدول ۸- تأثیر نوع کاتیون تبدیلی و مقدار رس بر درصد نیتروژن آمونیومی و نیتروژن نیتراتی

Table 8- The effects of exchangeable cation and clay content on percentage of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$

نوع کاتیون تبدیلی × مقدار رس Exchangeable cation × Clay content		نیتروژن آمونیومی ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)				نیتروژن نیتراتی ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)			
		%				%			
		مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)				مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)			
		15 day	30 day	45 day	60 day	15 day	30 day	45 day	60 day
Na	0	0.59 a	1.14 a	1.65 a	2.05 a	2.07 a	3.14 a	4.16 a	5.15 a
	5	0.46 c	0.84 c	1.10 c	1.33 c	0.92 c	1.77 c	2.59 c	3.32 c
	10	0.33 e	0.63 e	0.84 f	1.05 f	0.79 d	1.46 e	2.12 e	2.74 f
Ca	0	0.59 a	1.14 a	1.65 a	2.05 a	2.07 a	3.14 a	4.16 a	5.15 a
	5	0.50 b	0.95 b	1.31 b	1.61 b	1.03 b	1.87 b	2.73 b	3.53 b
	10	0.41 d	0.73 d	1.00 d	1.24 d	0.79 d	1.54 d	2.27 d	2.96 d
Al	0	0.59 a	1.14 a	1.65 a	2.05 a	2.07 a	3.14 a	4.16 a	5.15 a
	5	0.39 d	0.63 e	0.84 f	1.05 f	0.80 d	1.56 d	2.27 d	2.90 e
	10	0.30 e	0.57 f	0.75 g	0.90 g	0.64 e	1.22 f	1.81 f	2.37 g

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد ندارند

In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests

نتیجه‌گیری کلی

گیرند. با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها درصد نیتروژن معدنی افزایش یافت. نتایج پژوهش نشان داد که معدنی شدن نیتروژن آلی و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی تحت تأثیر ویژگی‌های کانی‌های رسی قرار می‌گیرد و برهمکنش مواد آلی و معدنی مهم‌ترین فرآیندی است که باعث کاهش تجزیه ماده آلی در خاک می‌شود. مقدار نیتروژن معدنی شده و نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌هایی با

مخلوط کردن بقایای گیاه یونجه با خاک‌های مصنوعی و خوابانیدن آن‌ها این امکان را فراهم کرد تا تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدیلی بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی، نیتروژن معدنی و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی مورد بررسی قرار

رس کائولینیت با ظرفیت تبادل کاتیونی کمتر، بیشتر از خاک‌هایی با رس مونت‌موریلونیت و ایلیت بود.

جدول ۹- تأثیر نوع کاتیون تبدلی و مقدار رس بر درصد نیتروژن معدنی شده و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی
Table 9- The effects of exchangeable cation and clay content on percentage of mineralized nitrogen and microbial biomass nitrogen

نوع کاتیون تبادلی × مقدار رس Exchangeable cation × Clay content		نیتروژن معدنی شده Mineralized nitrogen				نیتروژن زیست توده میکروبی Microbial biomass nitrogen
		%				
		مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)				
		mg N/50 g dry soil				
		15 da y	30 day	45 day	60 day	
Na	0	2.67 a	4.29 a	5.85 a	7.28 a	4.31 e
	5	1.38 c	2.63 c	3.72 c	4.69 c	6.08 d
	10	1.12 e	2.09 e	2.97 f	3.82 f	7.03 c
Ca	0	2.67 a	4.29 a	5.85 a	7.28 a	4.31 e
	5	1.53 b	2.83 b	4.06 b	5.18 b	12.27 b
	10	1.20 d	2.28 d	3.29 d	4.23 d	15.13 a
Al	0	2.67 a	4.29 a	5.85 a	7.28 a	4.31 e
	5	1.19 d	2.27 d	3.22 e	4.07 e	4.84 e
	10	0.94 f	1.80 f	2.57 g	3.29 g	5.62 d

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد ندارند
In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests

آلومینیوم اندازه‌گیری گردید. کاتیون‌های تبدلی با تغییر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی محیط رشد میکروب‌ها و احتمالاً کنترل اندازه، فعالیت و تنوع جمعیت میکروبی، معدنی شدن نیتروژن آلی و مقدار زیست‌توده میکروبی تولید شده را کنترل می‌کنند. از آنجایی که کانی‌های مختلف دارای سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی متفاوتی هستند و تغییرات فیزیکوشیمیایی ایجاد شده در محیط خاک در نتیجه تغییر کاتیون تبدلی در خاک‌هایی با ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه بالاتر، بیشتر است، به همین دلیل به نظر می‌رسد که تأثیر مینرالوژی بر پویایی مواد آلی و زیست‌توده میکروبی تا اندازه‌ای ناشی از نوع کاتیون تبدلی موجود در مکان‌های تبدلی سطح رس‌ها باشد.

معدنی شدن نیتروژن بقایای گیاهی در شن خالص بیشتر از خاک‌های دارای ۵ و ۱۰ درصد رس بود که نشان می‌دهد مقدار رس خاک‌ها بر ظرفیت آن‌ها برای حفظ و ذخیره نیتروژن آلی مؤثر است. از آنجا که خاک‌هایی با مقدار رس متفاوت سطح و ظرفیت تبادل کاتیونی متفاوتی دارند، بنابراین ذخیره نیتروژن آلی در این خاک‌ها تا اندازه‌ای توسط سطح، ظرفیت تبادل کاتیونی و حفاظت فیزیکی عرضه شده توسط آن‌ها کنترل می‌شود. معدنی شدن نیتروژن بقایای گیاهی و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌هایی با کاتیون‌های تبدلی مختلف، متفاوت بود. بیشترین و کمترین مقدار نیتروژن معدنی شده و نیتروژن زیست‌توده میکروبی به ترتیب در خاک‌های با کاتیون تبدلی کلسیم و خاک‌هایی با کاتیون تبدلی

منابع

- 1- Alef K., and Nannipieri P. 1995. Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry, Academic Press, London.
- 2- Anderson J.M., and Ingram J.S.I. 1993. In Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods, CAB International, Wallingford, U. K.
- 3- Baldock J.A., and Skjemstad J.O. 2000. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack, Journal of Organic Geochemistry, 31: 697-710.
- 4- Barré P., Fernandez-Ugalde O., Virto I., Velde B., and Chenu C. 2014. Impact of phyllosilicate mineralogy on organic carbon stabilization in soils: incomplete knowledge and exciting prospects, Geoderma, 235-236: 382-395.
- 5- Brooks P. C., Kragt J. F., Powlson D. S., and Jenkinson D. S. 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen. The effects of fumigation time and temperate, Journal of Soil Biology and Biochemistry, 17(6): 831-835.

- 6- Bruun T.B., Elberling B., and Christensen B.T. 2010. Labiality of soil organic carbon in tropical soils with different clay minerals, *Journal of Soil Biology and Biochemistry*, 42: 888-895.
- 7- Chorom M., and Rengasamy P. 1995. Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type, *European Journal of Soil Science*, 46(4): 657-665.
- 8- Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Denef K.D., and Paul E. 2013. The Microbial efficiency matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter, *Global Change Biology*, 19: 988-995.
- 9- Deb S.K., and Shukla M.K. 2011. A review of dissolved organic matter transport processes affecting soil and environmental quality, *Journal of Environmental and Analytical Toxicology*, 1 (2): 1-11.
- 10- Deenik J. 2006. Nitrogen mineralization potential in important agricultural soils of Hawaii, *Soil and Crop Management*, 16: 1-5.
- 11- Denef K., and Six J. 2005. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macro aggregate formation and stabilization, *European Journal of Soil Science*, 56: 469-479.
- 12- Denef K., Six J., Merckx R., and Paustian K. 2002. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy, *Journal of Plant and Soil*, 246: 185-200.
- 13- El-Sharkawi H.M. 2012. Effect of nitrogen sources on microbial biomass nitrogen under different soil types, *ISRN Soil Science*. 1-7.
- 14- Eltantawy I.M. and Arnold P.W. 1973. Reappraisal of ethylene glycol mono-ethyl ether (EGME) method for surface area estimation of clays, *Journal of Soil Science*, 24: 232-238.
- 15- Feng W., Plante A., and Six J. 2013. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles, *Biogeochemistry*, 112: 81-93.
- 16- Fontaine S., and Barot S. 2005. Size and functional diversity of microbe populations control plant persistence and long-term soil carbon accumulation, *Ecology Letters*, 8: 1075-1087.
- 17- Golchin A., Clarke P., and Oades J.M. 1996. The heterogeneous nature of microbial products as shown by solid-state ¹³C CPIMAS NMR spectroscopy, *Biogeochemistry*, 34: 71-97.
- 18- Grandy A.S., Strickland M.S., Lauber C.L., Bradford M.A., and Fierer N. 2009. The influence of microbial communities, management, and soil texture on soil organic matter chemistry, *Geoderma*, 150: 278-286.
- 19- Houlton B.Z., and Morford S.L. 2015. A new synthesis for terrestrial nitrogen inputs, *Journal of Soil*, 1: 381-397.
- 20- Jackson M.L. 1979. *Soil Chemical Analysis, Advanced Course*, Prentice Hall incorporated. p. 895.
- 21- Jansen B., Nierop K.G.J., and Verstraten J.M. 2002. Influence of pH and metal/carbon ratios on soluble organic complexation of Fe (II), Fe (III) and Al (III) in soil solutions determined by diffusive gradients in thin films, *Analytica Chimica Acta*, 454: 259-270.
- 22- Kahle M., Kleber M., and Jahn R. 2004. Retention of dissolved organic matter by phyllosilicate and soil clay fractions in relation to mineral properties, *Organic Geochemistry*, 35: 269-276.
- 23- Kaiser K., and Guggenberger G. 2003. Mineral surfaces and soil organic matter, *European Journal of Soil Science*, 54: 219-236.
- 24- Kalisz B., Lachacz A., and Glazewski R. 2010. Transformation of some organic matter components in organic soils exposed to drainage, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 34: 245-256.
- 25- Kleber M., Sollins P., and Sutton R. 2007. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces, *Biogeochemistry*, 85: 9-24.
- 26- Knicker H. 2011. Soil organic N an under-rated player for C sequestration in soils, *Journal of Soil Biology and Biochemistry*, 43: 1118-1129.
- 27- Kögel-Knabner I., Guggenberger G., Kleber M., Kandeler E., Kalbitz K., Scheu S., Eusterhues K., and Leinweber P. 2008. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171: 61-82.
- 28- Masion A., Vilgea-Ritter A., Rose J., Stone W.E., Teppen E.B.J., Rybacki D., and Bottero J.E.Y. 2000. Coagulation-flocculation of natural organic matter with Al salts: speciation and structure of the aggregates, *Environmental Science and Technology*, 34: 3242-3246.
- 29- Mikutta R., Kleber M., Torn M.S., and Jahn R. 2006. Stabilization of soil organic matter: Association with minerals or chemical recalcitrance, *Biogeochemistry*, 77: 25-56.
- 30- Motavalli P.P., Palm C.A., Parton Z.W.J., Elliott E.T., and Frey S.D. 1995. Soil pH and organic C dynamics in tropical forest soils, *Journal of Soil Biology and Biochemistry*, 27 (12): 1589-1599.
- 31- Muller T., and Hoper H. 2004. Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content: consequences for model applications, *Journal of Soil Biology and Biochemistry*, 36 (6): 877-888.
- 32- Nannipieri P., and Eldor P. 2009. The chemical and functional characterization of soil N and its biotic components, *Journal of Soil Biology and Biochemistry*, 41: 2357-2369.

- 33- Nguyen B.V., Olk D.C., and Cassman K.G. 2004. Characterization of humic acid fractions improves estimates of nitrogen mineralization kinetics for lowland rice soils, *Soil Science Society of American Journal*, 68: 1266-1277.
- 34- Pronk G.J., Heister K., and Kögel-kanber I. 2013. Is turnover and development of organic matter controlled by mineral composition, *Journal of Soil Biology and Biochemistry*, 67: 235-244.
- 35- Rayment G.E., and Lyons D.J. 2011. Total Soil-N, Semi Micro Kjeldahl Automated Color, FIA. In: Rayment G.E. and Lyons D.J. (eds.). *Soil Chemical Methods-Australasia*, CSIRO Publishing, Melbourne.
- 36- Reichert J.M., Norton L.D., Favaretto N., Huang C.H., and Blume E. 2009. Settling velocity, aggregate stability, and interrill erodibility of soils varying in clay mineralogy, *Soil Science Society of American Journal*, 73: 1369-1377.
- 37- Rillig M.C., Caldwell B.A., Wösten H.A.B., and Sollins P. 2007. Role of proteins in soil carbon and nitrogen storage: controls on persistence, *Biogeochemistry*, 85: 25-44.
- 38- Sanderman J., and Maddern T. 2014. Similar composition but differential stability of mineral retained organic matter across four classes of clay minerals, *Biogeochemistry*, 121: 409-424.
- 39- Scherer H.W., Feils E., and Beuters P. 2014. Ammonium fixation and release by clay minerals as influenced by potassium, *Plant, Soil and Environment*, 60 (7): 325-331.
- 40- Schimel J.P., and Schaeffer S.M. 2012. Microbial control over carbon cycling in soil, *Front Microbiologica*, 3: 1-11.
- 41- Schmidt M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., Kogel-Knabner I., Lehmann J., and Manning D.A.C. 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property, *Nature*, 478: 49-56.
- 42- Scott E., and Rothstein D.E. 2014. The dynamic exchange of dissolved organic matter percolating through six diverse soils, *Journal of Soil Biology and Biochemistry*, 69: 83-92.
- 43- Six J., and Paustian K. 2014. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool, *Journal of Soil Biology and Biochemistry*, 68: 4-9.
- 44- Six J., Elliott E.T., and Paustian K. 2000. Soil macro aggregate turnover and micro aggregate formation: a mechanism for C sequestration under no tillage agriculture, *Journal of Soil Biology and Biochemistry*, 32: 2099-2103.
- 45- Smernik R., and Skjemstad J. 2009. Mechanisms of organic matter stabilization and destabilization in soils and sediments: conference introduction, *Biogeochemistry*, 92: 3-8.
- 46- Vaieretti M.V., Pérez H.N., and Gurvich D.E. 2005. Decomposition dynamics and physico-chemical leaf quality of abundant species in montane woodland in central Argentina, *Journal of Plant and Soil*, 21: 205-278.
- 47- Van Veen J.A., and Kuikman P.J. 1990. Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms. *Biogeochemistry*, 11: 213-233
- 48- Vogel C., Babin D., Pronk G.J., Heister K., Smalla K., and Kögel-Knabner I. 2014. Establishment of macro-aggregates and organic matter turnover by microbial communities in long-term incubated artificial soils, *Journal of Soil Biology and Biochemistry*, 79: 57-67.
- 49- Vogel C., Heister K., Buegger F., Tanuwidjaja I., Haug S., Schlöter M., and Kögel-Knabner I. 2015. Clay mineral composition modifies decomposition and sequestration of organic carbon and nitrogen in fine soil fractions, *Biology and Fertility of Soils*, 1-17.
- 50- Von Lützow M., Kogel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., and Flessa H. 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions, *European Journal of Soil Science*, 57: 426-445.
- 51- Voroney P., and Derry D. 2008. Origin and distribution of nitrogen in soil. *Agronomy*, 49: 1-30.
- 52- Walkley A., and Black I.A. 1934. An Examination of degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method, *Journal of Soil Science*, 37: 29-37.
- 53- Wood M., and Cooper J.E. 1988. Acidity, aluminum and multiplication of *Rhizobium Trifolii*: possible mechanisms of aluminum toxicity, *Journal of Soil Biology and Biochemistry*, 20: 95-99.
- 54- Yoder L. 1919. Adaptation of the mohr volumetric method to general determinations of chlorine, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 11(8): 755-755.
- 55- Yu W.H., Li N., Tong D.S., Zhou C.H., Lin C.X.C., and Xu C.Y. 2013. Adsorption of proteins and nucleic acids on clay minerals and their interactions: A review, *Applied Clay Science*, 80: 443-452.
- 56- Zech W., Nicola S., Guggenberger G., Kaiser K., Lehmann J., Miano T.M., Miltner A., and Schroth G. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in tropics, *Geoderma*, 79: 117-161.
- 57- Zwarun A.A., Bloomfield B.J., and Thomas G.W. 1971. Effect of soluble and exchangeable aluminum on a soil *Bacillus*, *Soil Science Society of American Journal*, 35: 460-463.



Investigation of Mineralization of Organic Nitrogen under the Influence of Type, Content of Clay and Exchangeable Cations

F. Rakhsh^{*1} - A. Golchin²

Received: 30-07-2017

Accepted: 13-12-2017

Introduction: Mobilization and stabilization of organic matter in soils represent a set of complex processes involving the processing and decomposition of organic matter by diverse communities of soil fauna and microorganisms, as well as chemical-physical interactions with mineral particles of soil. Clay minerals have high effects on the soil organic matter dynamics. Clay minerals with the physical protection of organic matter play an important role in reducing the rate of decomposition of organic matter. The effects of soil texture on the soil organic matter dynamics have been investigated in many studies, but the effects of exchangeable cations and clay types on mineralization of organic nitrogen and microbial biomass nitrogen have not been given much attention. For this reason, the aim of this study was to evaluate the effects of types and clay contents and exchangeable cations on the mineralization of organic nitrogen and microbial biomass nitrogen.

Material and Methods: Appropriate amounts of homoionic Na-, Ca- and Al- clays from Georgia kaolinite, Illinois illite and Wyoming montmorillonite were mixed with pure sand to prepare artificial soils with different clay contents, exchangeable cations, and clay types. The artificial soils have zero, 5 and 10% clay from Georgia kaolinite, Illinois illite and Wyoming montmorillonite that their clay minerals saturated with Ca, Na and Al. Alfalfa plant residues were incorporated into the artificial soils and the soils were inoculated with microbes from a natural soil and incubated for 60 days and concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ were measured every 15 days. In the artificial soil samples, microbial biomass nitrogen was measured by the fumigation-extraction method in the end time of incubation period.

Results and Discussion: The results of this study showed that the percentage of mineralized nitrogen in the two-month incubation period, was higher in the pure sand than in soils containing 5% and 10% clay, indicating that clay contents influence the capacity of soils to protect and store organic nitrogen. Microbial biomass nitrogen increased as the amount of clay in the soil increased. The highest and lowest amounts of microbial biomass nitrogen measured in soils with 10% clay (9.26 mg per 50 g dry soil) and pure sand (4.31 mg per 50 g dry soil), respectively. There was a significant influence of exchangeable cations on the percentage of mineralized nitrogen and microbial biomass nitrogen. The microbial biomass nitrogen and the percentage of mineralized nitrogen were highest in Ca-soils and lowest in Al-soils. The percentage of mineralized organic nitrogen in two months of incubation period was highest in soils with Georgia kaolinite clay and lowest in soil with Wyoming montmorillonite clay. The amounts of microbial biomass nitrogen in soils with Wyoming montmorillonite clay were lower than soils with Georgia kaolinite and Illinois illite clays. The percentage of mineralized organic nitrogen increased as the incubation period increased. The results of this study indicated that organic nitrogen mineralization rates and microbial biomass nitrogen were affected by types and clay contents and exchangeable cations and interaction of organic matter with clays and is an important process as it slows soil organic matter decomposition.

Conclusions: Mixing the alfalfa residues with artificial soils and incubation samples allowed to study the effects of types and clay contents and exchangeable cations on the percentage of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, mineralized nitrogen, and microbial biomass nitrogen. Soils with different clay contents have different surface areas and cation exchange capacities; therefore, it is concluded that organic nitrogen storage of soils is, partly, controlled by the surface areas, cation exchange capacity and physical protection provided by the soils. Nitrogen mineralization and the amounts of microbial biomass nitrogen were different in soils with different exchangeable cations. It is concluded that exchangeable cations exert their influence on microbial biomass and hence nitrogen dynamics by controlling the size and activity of the microbial population through modifying the physicochemical characteristics of microbial habitats. Since various clay minerals have different specific surface areas and cation exchange capacity and the physicochemical changes induced in the soil environment as a result of variations of exchangeable cations is much greater in soils with higher cation exchange capacity and specific surface area. It

1 and 2- Ph.D. Student and Professor of Soil Science Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran
(*- Corresponding Author Email: rakhsh.fatemeh@znu.ac.ir)

seems the effects of clay mineralogy on the dynamics of organic materials and microbial biomass, in part, arise from the type of exchangeable cations present on the exchange sites of the clay minerals.

Keywords: Ammonium, Biomass, Cation Exchange Capacity, Nitrate, Specific surface



شناسایی مولکولی و تعیین خصوصیات محرک رشدی سویه‌های باکتری جدا شده از ریزوسفر گندم

ویدا همتی^۱ - هادی اسدی رحمانی^{۲*} - شکوفه رضایی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۷

چکیده

باکتری‌های محرک رشد گیاه از طریق مکانیسم‌های مختلف مانند حل‌کنندگی فسفات، تولید اکسین و سیدروفور باعث افزایش عملکرد گیاهان زراعی می‌شوند. در این تحقیق جداسازی و شناسایی باکتری‌های ریزوسفر گندم انجام شد و برخی از خصوصیات محرک رشدی از قبیل تولید اکسین، سیدروفور و حل‌کنندگی فسفات معدنی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. برای غربالگری ژنتیکی ۲۰ جدایه مورد بررسی از روش آنالیز محدودگر دی‌ان‌ای ریبوزومی تکثیری یا ARDRA استفاده شد. بدین منظور پس از انجام PCR با استفاده از آغازگرهای عمومی 27F و 1492R برای تکثیر ناحیه ژنی 16S rDNA، از آنزیم‌های برشی HpaII و RsaI برای هضم ناحیه ژنی 16S rDNA استفاده شد. نتایج غربالگری ژنتیکی نشان داد پس از هضم ناحیه تکثیر شده با آنزیم‌های برشی تنوع قابل ملاحظه‌ای مشتمل بر هفت الگوی برشی قابل مشاهده است. گونه‌های *Chryseobacterium* و *Pedobacter duraquae*، *Novosphingobium aromaticivorans*، *C. taiwanense*، *C. piperi*، *C. lathyri*، *ginsenosidimutans* و *Sphingomonas koreensis* شناسایی شدند. نتایج نشان داد که تمامی جدایه‌ها قادر به تولید اکسین بودند که بیشترین اکسین تولید شده (۲۵/۹۳ میلی گرم در لیتر) مربوط به جدایه F1 بود. همچنین تنها سه جدایه F3، F45 و F46 توانایی تولید سیدروفور در محیط CAS آگار را دارا بودند. در مورد توان حل‌کنندگی فسفات معدنی، نتایج نشان داد که تنها دو جدایه توانایی حل‌کنندگی فسفات را داشتند که در این میان جدایه F6 (۴/۱۶ قطر هاله به کلنی) بیشترین توان حل‌کنندگی را داشت.

واژه‌های کلیدی: اکسین، باکتری‌های محرک رشد گیاه، سیدروفور

مقدمه^۱

تأثیرات مثبتی بر رشد و عملکرد گیاهان می‌باشند در بیشتر گزارشات مورد اشاره قرار گرفته است. این باکتری‌ها که با عنوان محرک رشد گیاه (PGPR) نامیده می‌شوند شامل گونه‌های متعددی از باکتری‌های متعلق به جنس‌هایی مانند *Azospirillum*، *Azotobacter*، *Bacillus*، *Herbaspirillum* و *Pseudomonas* می‌باشند. هر چند مطالعات نشان داده است که باکتری‌های ریزوسفری تنوع زیادی داشته و هر روزه جنس‌های جدیدی به این گروه اضافه می‌گردد (۲۳). این باکتری‌ها دارای جمعیت بیشتری در ناحیه ریزوسفری می‌باشند که به واسطه تجمع انواع ترکیبات آلی آزاد شده از ریشه‌ها است که غنی از عناصر و مواد غذایی مورد نیاز باکتری‌هاست (۳۴).

باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد از طریق مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم اثرات مفیدی را بر روی گیاه اعمال می‌کنند (۲۵). در روش مستقیم، باکتری‌های محرک رشد به طور مستقیم و با استفاده از روش‌های مختلف باعث بهبود و افزایش رشد گیاه می‌شوند. تولید و ترشح تنظیم‌کننده‌های رشد مثل اکسین، سیتوکنین و جبریلین، انحلال فسفات‌های معدنی و یا آلی نامحلول، تثبیت نیتروژن

گندم یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی در تولید فرآورده‌های غذایی محسوب می‌شود. کشت گندم بدلیل افزایش روز افزون جمعیت و مصرف سرانه بالای نان محور اصلی سیستم‌های زراعی در دنیا ارزیابی گردیده است. در کشاورزی نوین با توجه به افزایش جمعیت انسانی و در پی بحران‌های آلودگی محیط زیستی بدلیل استفاده از سموم و کودهای شیمیایی، اتخاذ راهکارهای مناسب که چنین خطراتی را نداشته باشند، ضروری است که یکی از این راهکارها مصرف کودهای زیستی در سیستم‌های زراعی است (۳۳). کاربرد باکتری‌هایی که در ریزوسفر گیاهان زراعی ساکن بوده و دارای

۱ و ۳ - دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج
۲ - دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

(*) - نویسنده مسئول: (Email: asadi_1999@yahoo.com)
DOI: 10.22067/jsw.v31i6.65753

شناسایی مولکولی جدایه‌های باکتریایی

جهت استخراج DNA ژنومی از جدایه‌های مورد بررسی از روش مبتنی بر CTAB استفاده شد (۱۴). برای تکثیر ناحیه 16S rDNA از ترکیب آغازگرهای 27F (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') و 1492R (5'-TACGGTTACCTTGTTACGACTT-3') به ترتیب به عنوان آغازگرهای مستقیم و معکوس استفاده شد (۲۱). فرآیند تکثیر PCR با استفاده از یک دستگاه ترموسایکر (Techne, Genius FGEN02TP, USA) صورت گرفت. در این واکنش از پنج میکرولیتر بافر تکثیر PCR، سه میکرولیتر نمونه حاوی DNA، ۱/۵ واحد DNA Taq polymerase، ۰/۴ میلی‌مولار dNTP، دو میلی‌مولار $MgCl_2$ و ۰/۴ میکرومولار آغازگرها و آب دیونیزه سترون تا حجم ۵۰ میکرولیتر استفاده گردید. در این واکنش واسرشته‌سازی اولیه در دمای ۹۴ درجه سلسیوس به مدت ۴ دقیقه و برنامه حرارتی شامل ۳۰ چرخه واسرشته‌سازی DNA در دمای ۹۴ درجه سلسیوس به مدت ۴۵ ثانیه، اتصال آغازگرها در دمای ۵۲ درجه سلسیوس به مدت ۴۵ ثانیه، توسعه DNA در دمای ۷۲ درجه سلسیوس به مدت ۱۲۰ ثانیه و توسعه نهایی در دمای ۷۲ درجه سلسیوس به مدت ۷ دقیقه استفاده گردید.

آنالیز محدودگر DNA ریبوزمی تکثیری

برای غربالگری ژنتیکی جدایه‌های مورد بررسی از روش آنالیز محدودگر DNA ریبوزمی تکثیری^۱ یا ARDRA استفاده شد. بدین منظور پس از PCR با استفاده از آغازگرهای عمومی 27F و 1492R برای تکثیر ناحیه ژنی 16S rDNA، از آنزیم‌های برشی HpaII و RsaI برای هضم ناحیه ژنی 16S rDNA استفاده شد. در این واکنش از ۵ میکرولیتر بافر، ۱۰ میکرولیتر محصول PCR، ۱/۵ واحد آنزیم برشی و آب دیونیزه سترون تا حجم ۵۰ میکرولیتر استفاده گردید و سپس دو ساعت در ۳۷ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا عمل برش ناحیه ژنی انجام شود. سپس به مدت ۲۰ دقیقه در ۶۵ درجه سانتی‌گراد برای غیرفعال کردن آنزیم قرار داده شد و در نهایت چندشکلی ایجاد شده ناشی از برش با آنزیم‌های محدودگر و طول قطعات برش خورده بر روی ژل الکتروفورز دو درصد مورد ارزیابی قرار گرفت.

از بین جدایه‌هایی که الگوی برشی مشابهی توسط آنزیم‌های برشی داشتند، یکی انتخاب گردید و محصول تکثیر شده مربوط به ناحیه 16S rDNA جهت خالص‌سازی و تعیین توالی نوکلئوتیدی از طریق شرکت تکاپوزیست تهران به شرکت Bioneer کره جنوبی ارسال شد. پس از دریافت توالی‌های نوکلئوتیدی، جهت رؤیت آن‌ها و

اتمسفری و تولید آنزیم‌های مثل آنزیم (ACC) - دی‌آمیناز از جمله مکانیسم‌های مستقیم می‌باشند (۱۸ و ۲۴). توانایی تولید اکسین در باکتری‌هایی از قبیل *Azotobacter*، *Alcaligenes*، *Flavobacterium*، *Entrobacter*، *Azospirillum*، *Pseudomonas*، *Rhizobium* و *Xanthomonas* به اثبات رسیده است (۵ و ۲۸). در روش غیرمستقیم، این باکتری‌ها با استفاده از مواد بازدارنده از قبیل آنزیم‌ها و یا ترکیباتی مانند سیانید هیدروژن و یا از طریق افزایش مقاومت طبیعی گیاه میزبان موجب کاهش و یا توقف کامل بیمارگرهای گیاه میزبان می‌شوند. گزارش شده است که باکتری *Pseudomonas stutzeri* با تولید آنزیم کیتیناز سبب لیز شدن هیف‌های قارچ *Fusarium solani* گردیده است (۷ و ۱۰).

باکتری‌های افزاینده رشد با کمک به جذب آب و عناصر غذایی توسط گیاه، باعث بهبود جوانه‌زنی و کمک به گیاه برای رشد در شرایط تنش‌های محیطی می‌شوند (۳۵). شائوکات و همکاران (۳۱) گزارش کردند که جدایه‌های *Azospirillum*، *Azotobacter* و *Pseudomonas* تأثیر مثبت و معنی‌داری بر روی جوانه‌زنی و رشد گیاهچه ذرت نشان دادند. همچنین سیدشریفی و خاوازی (۳۰) گزارش کردند که تلقیح بذر ذرت هیبرید SC-434 با باکتری *Azospirillum* باعث تسریع در رشد گیاهچه و مؤلفه‌های جوانه‌زنی بذر ذرت می‌شود. هدف از این مطالعه شناسایی جدایه‌های باکتریایی و غربالگری مولکولی آنها با استفاده از روش آنالیز محدودگر دی‌ان‌ای ریبوزمی تکثیری یا ARDRA، بررسی صفات محرک رشد یعنی قابلیت تولید اکسین، سیدروفور و حل‌کنندگی فسفات این جدایه‌ها، و در نهایت بررسی تأثیر آنها بر صفات مربوط به جوانه‌زنی بذر گندم بود.

مواد و روش‌ها

باکتری‌های مورد استفاده

در این تحقیق ۲۰ جدایه باکتری که طی مطالعات گذشته از خاک‌های ریزوسفر گندم از استان‌های تهران، قزوین، زنجان، آذربایجان شرقی و غربی، کردستان و همدان جداسازی شده بودند مورد استفاده قرار گرفتند (۴). برای خالص‌سازی و نگهداری، یک کلنی از هر جدایه در محیط نوترینت آگار (NA) Nutrient Agar کشت داده و گرماگذاری در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد به مدت دو الی چهار روز انجام گرفت تا باکتری‌ها به میزان کافی رشد کنند، بعد از آن در دمای چهار درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. باکتری‌ها مورد رنگ‌آمیزی گرم قرار گرفته و از نظر شکل ظاهری مورد مطالعه قرار گرفتند. در این تحقیق از دو باکتری شناسایی شده موجود در کلکسیون میکروبی موسسه تحقیقات خاک و آب شامل *Azospirillum* و *Pseudomonas fluorescens* strain R169 *lipoferum* strain OF به عنوان شاهد استفاده گردید.

محاسبه گردید (۲۹). محیط کشت اسپربر شامل ۱۰ گرم در لیتر گلوکز، ۰/۵ گرم در لیتر عصاره مخمر، ۰/۱ گرم در لیتر CaCl_2 ، ۰/۲۵ گرم در لیتر $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ، ۲/۵ گرم در لیتر $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ و ۱۰ گرم در لیتر آگار می‌باشد که با pH حدود ۷/۲ تنظیم می‌شود.

تأثیر جدایه‌های باکتریایی بر صفات مربوط به جوانه‌زنی

برای بررسی تأثیر جدایه‌هایی باکتریایی، صفات مربوط به جوانه زنی شامل وزن تر و خشک ریشه و گیاهچه، طول ریشه‌چه و ساقه-چه، درصد، سرعت و متوسط سرعت جوانه‌زنی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

بذر گندم رقم چمران از بانک ژن مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تهیه گردید. به منظور ضدعفونی، بذرها بمدت ۴۵ ثانیه در محلول هیپوکلریت سدیم یک درصد قرار گرفتند و بلافاصله چندین بار با آب مقطر سترون شسته شدند. به منظور اجرای تیمار تلقیح باکتریایی، باکتری‌ها تا فاز لگاریتمی تکثیر گردیدند و جمعیت باکتری‌ها در حدود $9/8 \times 10^7$ CFU/ml تنظیم شد. بذره‌های استریل به فلاسک‌های حاوی مایه تلقیح باکتری‌ها منتقل شده و بمدت ۳۰ دقیقه بر روی شیکر دورانی قرار گرفتند. در مرحله بعد تعداد ۱۰۰ عدد بذر در داخل پتری‌دیش‌های استریل حاوی کاغذ صافی در سه تکرار قرار داده شد. سپس درب پتری‌دیش‌ها با پارافیلیم بسته شده و درون انکوباتور با درجه حرارت ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. هر روز بذرها از نظر جوانه‌زنی مورد بررسی قرار گرفتند. تا پایان روز هفتم تعداد ۱۰ بذر از تکرارها برداشت شد و صفات مربوط به جوانه‌زنی شامل وزن تر و خشک ریشه، وزن تر و خشک گیاهچه، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، درصد، سرعت و متوسط سرعت جوانه‌زنی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (۱۶ و ۱۹).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

آزمایش به صورت طرح کاملاً تصادفی انجام گردید. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار آماری SAS 9.1 و برای انجام مقایسه میانگین داده‌ها از روش آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد استفاده گردید.

نتایج و بحث

استخراج DNA به روش CTAB به عنوان روش مطلوب و مناسب جهت استخراج DNA ۲۰ جدایه بدست آمده ارزیابی شد. تکثیر ناحیه 16S rDNA در واکنش زنجیره‌ای پلیمرز، تکثیر بخشی از ژنوم به طول تقریبی ۱۵۰۰ جفت باز را در کلیه جدایه‌های مورد بررسی نشان داد. پس از هضم ناحیه تکثیر شده 16S rDNA با آنزیم‌های برشی HpaII (شکل ۱) و RsaI (شکل ۲)، هفت الگوی

ایجاد ناحیه کانتینگ از نرم‌افزار Vector NTI نسخه ۱۰ استفاده شد. توالی‌های اصلاح شده با فرمت FASTA ذخیره شدند و هر یک از توالی‌ها با استفاده از ابزار جستجوی BLAST (۳) با توالی‌های موجود در بانک ژن NCBI و EzTaxon مقایسه شدند.

ارزیابی قابلیت تولید سیدروفور

آزمون تولید سیدروفور با استفاده از محیط CAS Blue Agar انجام شد (۲). برای تهیه این محیط چهار محلول شامل محلول معرف Fe-Cas، محلول بافر PIPES، محلول غذایی و محلول کارآمینواسید به طور مجزا تهیه، سترون و سپس با هم مخلوط شدند. پلیت‌های شامل CAS Agar پس از انجماد با تیغ استریل به چهار قسمت مساوی تقسیم شدند و از سوسپانسیون تازه جدایه‌ها با جمعیت (4×10^8) CFU/ml به اندازه پنج میکرولیتر در وسط هر قسمت به روش قطره‌گذاری تلقیح شدند. توانایی تولید سیدروفور از روی تغییر رنگ آبی به نارنجی و با اندازه‌گیری هاله نارنجی رنگ تشکیل شده در اطراف کلنی باکتری‌ها ارزیابی گردید. هم‌چنین قطر کلنی باکتری و نسبت قطر هاله به قطر کلنی نیز اندازه‌گیری و محاسبه شد. این آزمایش در سه تکرار انجام شد.

ارزیابی قابلیت تولید اکسین

به منظور بررسی توان تولید اکسین جدایه‌ها، ابتدا باکتری‌ها به مدت ۴۸ ساعت در محیط کشت Tryptic Soy Broth (TSB) کشت داده شدند. سپس ۵۰ میکرولیتر از سوسپانسیون باکتری به ۲۵ میلی‌لیتر محیط TSB منتقل گردید. بعد از ۴۸ ساعت سوسپانسیون باکتری به مدت ۱۵ دقیقه و با نیروی ۱۰۰۰۰g سانتریفیوژ گردید و یک میلی‌لیتر از محلول بالایی با دو میلی‌لیتر معرف سالکوسکی مخلوط گردید. این مخلوط به مدت ۲۵ دقیقه در دمای اتاق نگهداری و سپس با استفاده از اسپکتروفتومتر میزان جذب نور آن در ۵۳۵ نانومتر قرائت گردید (۸). مقدار تولید اکسین هر جدایه با مقایسه مقدار جذب نور آن با منحنی تهیه شده از ایندول استیک اسید محاسبه شد.

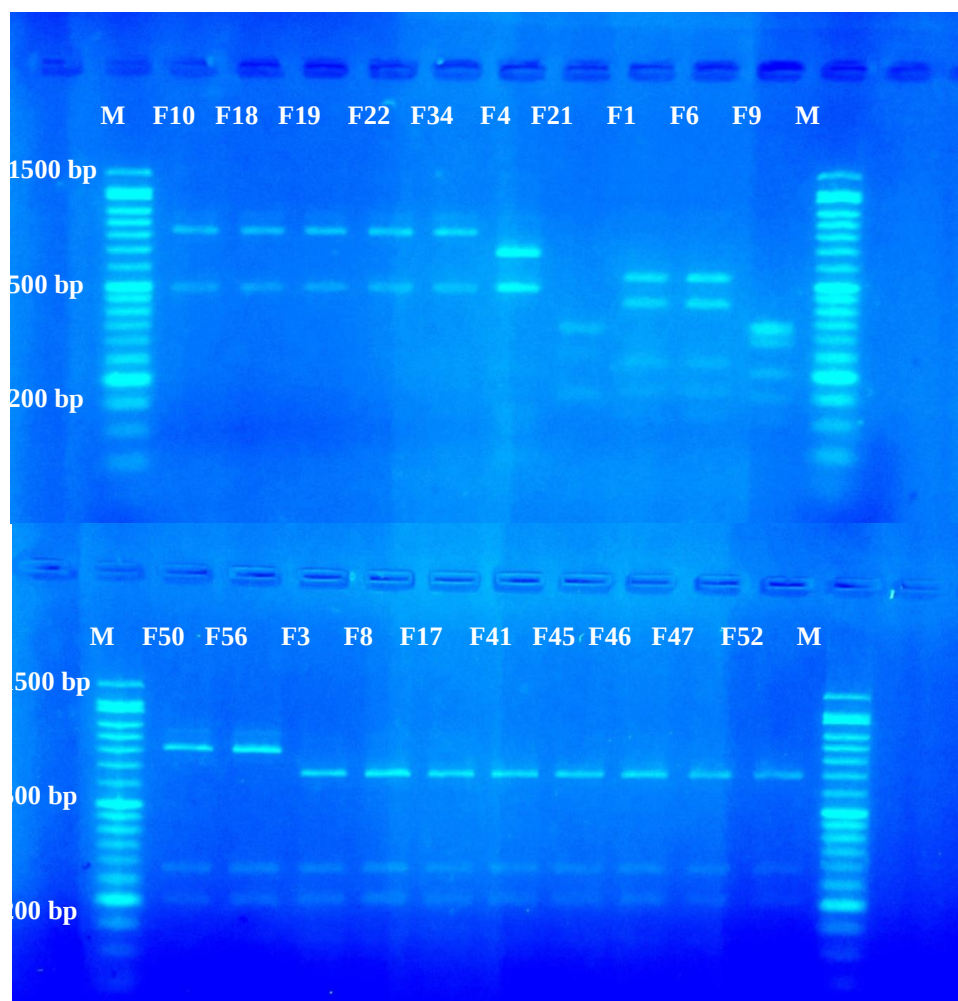
ارزیابی توان حل‌کنندگی فسفات معدنی

به منظور بررسی توان حل‌کنندگی فسفات معدنی، ابتدا باکتری‌ها به مدت ۴۸ ساعت در محیط کشت Tryptic Soy Broth (TSB) کشت داده شدند و از سوسپانسیون جدایه‌ها به اندازه دو میکرولیتر روی محیط کشت اسپربر به روش قطره‌گذاری تلقیح شدند. سپس تشتک پتری به مدت ۵ روز در انکوباتور با دمای 28 ± 2 درجه سلسیوس قرار گرفت. ظهور هاله شفاف در پیرامون کلنی باکتری به عنوان نشانه حل‌کنندگی فسفات در نظر گرفته شد. برای ارزیابی نسبی انحلال فسفات، نسبت قطر کل (هاله + کلونی) بر قطر کلونی

تولید سیدروفور

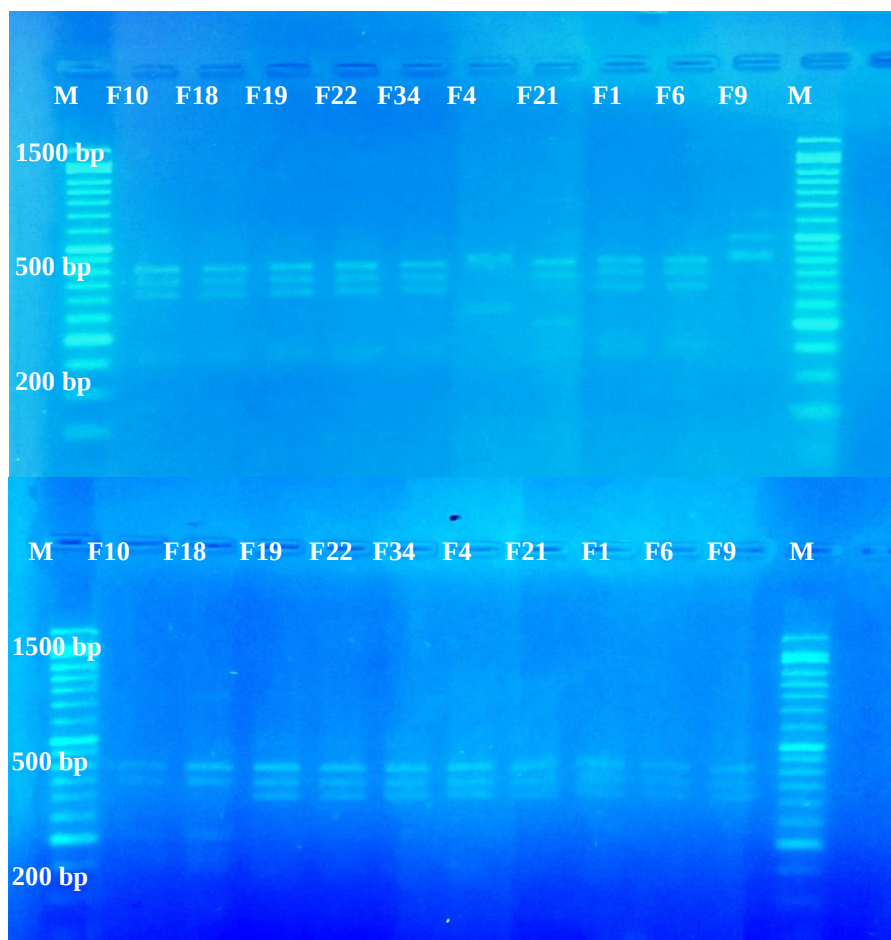
در این آزمایش، نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری توان تولید سیدروفور نشان داد که تنها سه جدایه (F46، F45، F3) توانایی تولید سیدروفور را داشتند که در این میان جدایه F46 (با میانگین ۲/۸۶ قطر هاله به کلنی) بیشترین توانایی تولید را دارا بود (شکل ۳). چن و همکاران (۱۲) نشان دادند که سیدروفور تولید شده توسط باکتری *Pseudomonas putida* حلالیت آهن، مس، منگنز و روی را افزایش داد.

برشی مشاهده گردید که از هر کدام یک نمونه برای توالی‌یابی فرستاده شد. گونه‌های *Chryseobacterium ginsenosidimutans*، *C. taiwanense*، *C. piperi*، *C. lathyri*، *Pedobacter aromaticivorans*، *Novosphingobium duraquae* و *Sphingomonas koreensis* شناسایی شدند (جدول ۱).



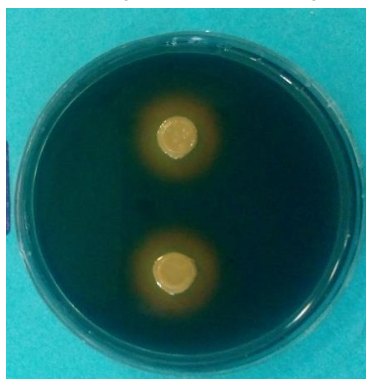
شکل ۱- 16S rDNA-RFLP. قطعه حاصل از PCR ناحیه 16S rDNA (1500bp) با آنزیم محدودگر Hpa II برش داده شده است. جدایه‌های F10، F18، F19، F22 و F34: *Chryseobacterium ginsenosidimutans*؛ جدایه F4: *Sphingomonas koreensis*؛ جدایه F21: *Chryseobacterium taiwanense*؛ جدایه‌های F1، F6 و F9: *Pedobacter duraquae*؛ جدایه F3: *Novosphingobium aromaticivorans*؛ جدایه‌های F50 و F56: *Chryseobacterium piperi*؛ جدایه‌های F3، F8، F9، F17، F41، F45، F46، F47 و F52: *Chryseobacterium lathyri*. M: DNA ladder 100bp

Figure 1- 16S rDNA-RFLP. The amplified 16S rDNA PCR fragment (1500bp) was digested by HpaII restriction enzyme. F10, F18, F19, F22 and F34: *Chryseobacterium ginsenosidimutans*. F4: *Sphingomonas koreensis*. F21: *Chryseobacterium taiwanense*. F1, F6, F9: *Pedobacter duraquae*. F3, F8, F9, F17, F41, F45, F46, F47 and F52: *Chryseobacterium lathyri*. M: DNA ladder 100bp



شکل ۲- 16S rDNA-RFLP. قطعه حدود 1500bp حاصل از PCR ناحیه 16S rDNA با آنزیم محدودگر RsaI برش داده شده است. جدایه‌های F10، F18، F19، F22 و F34: *Chryseobacterium ginsenosidimutans*، جدایه F4: *Sphingomonas koreensis*، جدایه F21: *Chryseobacterium taiwanense*، جدایه‌های F1 و F6: *Pedobacter duraquae*، جدایه F9: *Novosphingobium aromaticivorans*، جدایه‌های F50 و F56: *Chryseobacterium piperi* و جدایه‌های F3، F8، F9، F17، F41، F45، F46، F47 و F52: *Chryseobacterium lathyri*. M: سایز مارکر 100bp.

Figure 2- 16S rDNA-RFLP. The amplified 16S rDNA PCR fragment (1500bp) was digested by RsaI restriction enzyme. F10, F18, F19, F22 and F34: *Chryseobacterium ginsenosidimutans*. F4: *Sphingomonas koreensis*. F21: *Chryseobacterium taiwanense*. F1, F6: *Pedobacter duraquae*. F9: *Novosphingobium aromaticivorans*. F50 and F56: *Chryseobacterium piperi*. F3, F8, F9, F17, F41, F45, F46, F47 and F52: *Chryseobacterium lathyri*. M: DNA ladder 100bp



شکل ۳- تولید سیدروفور در جدایه F46
Figure 3- Siderophore productions by F46

جدول ۱- باکتری‌های شناسایی شده ریزوسفر گندم

Table 1- Identification of bacteria from the wheat rhizosphere

جدايه باکتری Bacterial isolates	شکل کلونی Whole colony	حاشیه Edge	ارتفاع Elevation	واکنش گرم Gram	رنگ Color	نام باکتری Bacterial name	شماره ذخیره GenBank accession No.	مشابهت Similarity
F1	Circular	Entire	Flat	-	Cream- Yellow	<i>Pedobacter duraquae</i>	KU924006	%99
F3	Circular	Entire	Flat	-	Yellow	<i>Chryseobacterium lathyri</i>	KU923998	%99
F4	Circular	Entire	Flat	-	Yellow	<i>Sphingomonas koreensis</i>	KU924008	%99
F6	Circular	Entire	Flat	-	Cream- Yellow	<i>Pedobacter duraquae</i>		
F8	Circular	Entire	Flat	-	Yellow	<i>Chryseobacterium lathyri</i>		
F9	Circular	Entire	Convex	-	Orange- Yellow	<i>Novosphingobium aromaticivorans</i>	KU924009	%99
F10	Circular	Entire	Convex	-	Orange	<i>Chryseobacterium ginsenosidimutans</i>	KU924004	%99
F17	Circular	Entire	Flat	-	Yellow	<i>Chryseobacterium lathyri</i>		
F18	Circular	Entire	Convex	-	Orange	<i>Chryseobacterium ginsenosidimutans</i>		
F19	Circular	Entire	Convex	-	Orange	<i>Chryseobacterium ginsenosidimutans</i>		
F21	Circular	Entire	Convex	-	Orange	<i>Chryseobacterium taiwanense</i>	KU924003	%99
F22	Circular	Entire	Convex	-	Orange	<i>Chryseobacterium ginsenosidimutans</i>		
F34	Circular	Entire	Convex	-	Orange	<i>Chryseobacterium ginsenosidimutans</i>		
F41	Circular	Entire	Flat	-	Yellow	<i>Chryseobacterium lathyri</i>		
F45	Circular	Entire	Flat	-	Yellow	<i>Chryseobacterium lathyri</i>		
F46	Circular	Entire	Flat	-	Yellow	<i>Chryseobacterium lathyri</i>		
F47	Circular	Entire	Flat	-	Yellow	<i>Chryseobacterium lathyri</i>		
F50	Circular	Entire	Flat	-	Orange	<i>Chryseobacterium piperi</i>	KU924005	%99
F52	Circular	Entire	Flat	-	Yellow	<i>Chryseobacterium lathyri</i>		
F56	Circular	Entire	Flat	-	Orange	<i>Chryseobacterium piperi</i>		

توان تولید اکسین

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر جدایه‌های مختلف ریزوسفر گندم بر میزان توان تولید اکسین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین میزان توان تولید اکسین با میانگین ۲۵/۹۳ میلی‌گرم در لیتر توسط جدایه F1 تولید گردید و کمترین آن از

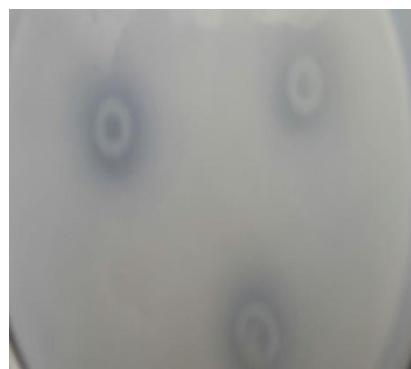
جدایه F18 به‌دست آمد (جدول ۲). در بررسی انجام شده توسط بنت و همکاران (۸) مشخص شد که جدایه‌های *Pseudomonas fluorescens* توانایی تولید مقادیر اکسین را در حضور غلظت‌های مختلف تریپتوفان و عدم حضور آن داشتند. در پژوهش‌های انجام شده روی ۲۵ جدایه *Pseudomonas fluorescens* مشخص گردید که متوسط میزان تولید اکسین ۲/۴۴ میکروگرم بر میلی‌لیتر بود و

تمامی جدایه‌ها قابلیت تولید اکسین را داشتند و دامنه آن از ۱/۳ تا ۴/۵ میکروگرم بر میلی‌لیتر در بین جدایه‌ها متغیر بود (۳۲).

احمد و همکاران (۱) نشان دادند که جدایه‌های *Pseudomonas* در دامنه ۵/۳۴ تا ۵۳/۲ میکروگرم در میلی‌لیتر قابلیت تولید اکسین را دارا می‌باشند. نتایج خاکی‌پور و همکاران (۲۲) نشان داد که مقدار اکسین تولیدی در سویه‌های *Pseudomonas fluorescens* از ۰ تا ۳۱/۶ و توسط *Pseudomonas putida* از ۰ تا ۲۴/۰۸ میلی‌گرم در لیتر متغیر بود.

حل‌کنندگی فسفات معدنی

نتایج به‌دست آمده از سنجش توان حل‌کنندگی فسفات باکتری‌ها نشان داد که تنها دو جدایه F6 (با میانگین ۴/۱۶ قطر هاله به کلنی) و F56 (با میانگین ۲/۵ قطر هاله به کلنی) دارای توانایی حل‌کنندگی فسفات بوده، اما سایر جدایه‌ها فاقد این ویژگی بودند (شکل ۴). نتایج نوری و سعود (۲۷) و مقامی و همکاران (۲۶) نشان داد که تمامی جدایه‌های *Pseudomonas fluorescens* مورد مطالعه قادر به انحلال تری‌کلسیم فسفات در محیط جامد بودند.



شکل ۴- حل‌کنندگی فسفات معدنی و ایجاد هاله توسط جدایه F6
Figure 4- Phosphate solubilization and halo zone production by F6

تأثیر جدایه‌های باکتریایی بر صفات مربوط به جوانه‌زنی

بررسی نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های این تحقیق نشان داد که اثر جدایه‌های بومی ریزوسفر گندم بر صفات جوانه‌زنی گندم نظیر وزن تر و خشک ریشه، وزن تر گیاهچه، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، درصد، سرعت و متوسط سرعت جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد و وزن خشک گیاهچه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین وزن تر گیاهچه در جدایه F19 (با میانگین ۰/۴۴ گرم) به‌دست آمد که با جدایه F22 از نظر آماری اختلاف معنی‌داری نداشت. همچنین کمترین وزن تر گیاهچه نیز در جدایه F41 و تیمار بدون تلقیح (با میانگین ۰/۱۰۸) مشاهده شد (جدول ۲). مقایسه میانگین

داده‌ها نشان داد که بیشترین وزن خشک گیاهچه در جدایه F18 (با میانگین ۰/۰۳۳۶ گرم) به‌دست آمد (جدول ۲). بیشترین وزن تر ریشه در جدایه F18 (۰/۷۷۱ گرم) و بیشترین وزن خشک ریشه در شاهد مثبت OF (۰/۱۹۴ گرم) به‌دست آمد (جدول ۲).

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین طول ساقه‌چه از جدایه F45 با میانگین ۷/۰۴ سانتی‌متر به‌دست آمد. همچنین کمترین طول ساقه‌چه نیز در تیمار بدون تلقیح با میانگین ۳/۵۸ سانتی‌متر حاصل شد (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین طول ریشه‌چه از جدایه شاهد مثبت R169 با میانگین ۶/۴۲ سانتی‌متر به‌دست آمد (جدول ۲). از آنجایی که باکتری‌های محرک رشد سبب افزایش طول و سطح ریشه‌چه می‌شوند، در نتیجه بدلیل دسترسی بیشتر به آب و عناصر غذایی، رشد گیاه افزایش می‌یابد (۶). جاراک و همکاران (۲۰) نشان دادند که تلقیح گیاه ذرت با باکتری‌های *Bacillus sp. Q5a*، *Pseudomonas sp. Q4b* و *Azotobacter chroococcum strain 8* باعث افزایش معنی‌دار عملکرد گیاه می‌گردد. بذره‌های ذرت تلقیح یافته با باکتری *Azospirillum* از افزایش در طول ریشه‌چه، ساقه‌چه و نسبت ریشه‌چه به ساقه‌چه بیشتری نسبت به عدم تلقیح برخوردار بود (۳۰).

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین درصد جوانه‌زنی در جدایه شاهد مثبت OF با میانگین ۳۳/۳۳ درصد و بعد از آن در جدایه‌های F19 و F41 با میانگین ۳۳ حاصل شد. کمترین درصد جوانه‌زنی نیز در جدایه F3 با میانگین ۲۷/۳۳ درصد مشاهده شد (جدول ۲). غلامی و همکاران (۱۷) نشان دادند تلقیح بذر ذرت با باکتری‌های محرک رشد باعث بهبود درصد جوانه‌زنی و رشد گیاهچه ذرت می‌شود. المیلیجی (۱۵) گزارش کرد پوشش‌دار کردن بذر ذرت با جدایه‌های *Pseudomonas fluorescens* باعث بهبود میزان ظهور و درصد جوانه‌زنی گیاهچه‌ها در مزرعه شد.

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین سرعت جوانه‌زنی از جدایه F45 (با میانگین ۵۳/۹۹ روز بر تعداد) به‌دست آمد. همچنین کمترین سرعت جوانه‌زنی در جدایه F9 با میانگین ۳۲/۷ روز بر تعداد حاصل شد (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین متوسط سرعت جوانه‌زنی از جدایه شاهد مثبت OF با میانگین ۳/۸۵ روز بر تعداد به‌دست آمد. همچنین کمترین این صفت نیز در جدایه F9 با میانگین ۲/۷۰ روز بر تعداد حاصل شد (جدول ۲).

نتایج کاکماکسی و همکاران (۱۱) نشان داد که با تلقیح بذره‌های جو با باکتری‌های محرک رشد گیاه، افزایش وزن ریشه‌های جو حاصل گردید. در مطالعه‌ای که توسط کروس و همکاران (۱۳) انجام گرفت، بذره‌های گندم تلقیح شده با *Azospirillum* هیچ اختلاف معنی‌داری را در درصد جوانه‌زنی در مقایسه با شاهد تلقیح نشده نشان ندادند.

جدول ۲ - میزان اکسین تولیدی در جدایه‌های مختلف باکتری‌های محرک رشد و تاثیر این جدایه‌ها بر وزن تر و خشک گیاهچه و ریشه‌چه، طول ریشه‌چه و ساقچه، درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و متوسط سرعت جوانه‌زنی بذر گندم
Table 2- The auxin production in different isolates of growth promoting bacteria and the effect of bacterial isolates on wheat germination traits such as radicle and plumule fresh and dry weight, radicle and plumule length, germination percentage, germination rate, and germination average rate

Treatment	میزان اکسین (اکسین)	میزان جدایه‌های باکتری (Bacterial auxin)	وزن تر گیاهچه (گرم)	وزن خشک گیاهچه (گرم)	وزن تر ریشه‌چه (گرم)	وزن خشک ریشه‌چه (گرم)	طول ریشه‌چه (سانتی متر)	طول ساقچه (سانتی متر)	درصد جوانه‌زنی (روز بر تعداد)	سرعت جوانه‌زنی (روز بر تعداد)	متوسط سرعت جوانه‌زنی (روز بر تعداد)
			Wet weight of plants (g)	Dry weight of plants (g)	Wet weight of roots (g)	Dry weight of roots (g)	Root length (cm)	Shoot length (cm)	Seed germination (%)	Germination speed (per day)	Mean germination speed (per day)
F1	25.93a	0.266bcd	0.0286a-g	0.0286a-g	0.522cdef	0.163b-h	5.26b-d	5.23c-h	32.66abc	49.07abc	3.666a-d
F3	21.16b	0.209cdef	0.0250f-i	0.0250f-i	0.618abc	0.167a-g	5.89abc	5.72c-g	27.33h	33.23hi	2.756ij
F4	20.26cd	0.187ef	0.0293a-f	0.0293a-f	0.367f	0.164b-h	5.31a-d	5.50c-g	32.33a-d	43.33defg	3.436c-g
F6	18.13e	0.223cdef	0.0283b-g	0.0283b-g	0.483cdef	0.155c-h	5.04cde	5.33d-h	32.66abc	45.41cde	3.560b-e
F8	20.80bc	0.244bcdef	0.0290a-f	0.0290a-f	0.507cdef	0.147f-h	3.44g	5.22e-h	30.66c-e	41.15efg	3.266fgh
F9	20.00cd	0.253bcde	0.0263d-h	0.0263d-h	0.571bc	0.153c-h	3.85fg	5.39d-h	27.66h	32.70i	2.703j
F10	10.13h	0.2770bcd	0.0283b-g	0.0283b-g	0.579bc	0.149e-h	5.77abc	6.02a-f	31.66a-e	38.16gh	3.183gh
F17	15.73f	0.252bcde	0.0260e-h	0.0260e-h	0.630abc	0.153d-h	4.60def	5.22e-h	31.00b-f	46.19cde	3.443c-g
F18	1.90k	0.296b	0.0336a	0.0336a	0.771a	0.138h	6.27ab	6.55abc	31.00b-f	46.65cd	3.453c-g
F19	11.50g	0.440a	0.0280b-g	0.0280b-g	0.722ab	0.183ab	5.17b-e	4.86gh	33.00ab	46.05cde	3.583b-e
F21	9.8h	0.268bcd	0.0270c-h	0.0270c-h	0.590bc	0.136h	5.43a-d	5.33d-h	29.00fgh	46.69cd	3.313efg
F22	3.40j	0.373a	0.0253c-h	0.0253c-h	0.550cd	0.150e-h	5.07cde	4.87gh	32.00a-e	44.45cde	3.416d-g
F34	5.06i	0.241bcdef	0.0326ab	0.0326ab	0.514cdef	0.169abcdef	5.84abc	5.08fgh	31.66a-e	47.75bcd	3.570b-e
F41	18.06e	0.108g	0.0276b-g	0.0276b-g	0.388ef	0.182abc	4.06efg	4.33hi	33.00ab	52.32ab	3.803ab
F45	17.83e	0.232 bcdef	0.0313abcd	0.0313abcd	0.504cdef	0.180abcd	5.59abcd	7.04a	32.66abc	53.99a	3.810ab
F46	11.70g	0.225bcdef	0.0236e-j	0.0236e-j	0.567bc	0.156b-h	5.47a-d	5.83b-g	31.00b-f	44.29cdef	3.373efg
F47	16.06f	0.243bcdef	0.0222hij	0.0222hij	0.622abc	0.178abcde	5.03cde	4.97fgh	30.00efg	42.49defg	3.240fgh
F50	20.73bc	0.278bc	0.0320abc	0.0320abc	0.601bc	0.176abcdef	5.81abc	6.50abc	32.00a-e	53.03ab	3.703abc
F52	4.06j	0.174fg	0.0200ij	0.0200ij	0.540cde	0.171abcdef	5.10cde	5.54c-g	31.66a-e	46.76cd	3.510c-f
F56	19.76d	0.2770bcd	0.0316abc	0.0316abc	0.585bc	0.169a-g	5.32a-d	6.39a-d	30.33def	44.39cdef	3.360efg
OF	-	0.202def	0.0293a-f	0.0293a-f	0.469cdef	0.194a	5.97abc	6.30a-e	33.33a	53.53a	3.856a
R169	-	0.229bcdef	0.0303abcde	0.0303abcde	0.480cdef	0.152d-h	6.42a	6.89ab	31.00b-f	44.48cde	3.336efg
Blank	-	0.108g	0.0196j	0.0196j	0.400def	0.140gh	3.41g	3.58i	28.00gh	39.04fj	3.016hi

اعداد با حروف مشترک در هر ستون دارای اختلاف معنی‌دار نمی‌باشند (P<0.05)
Numbers followed by the same letter are not significantly differentns (P<0.05)

نتیجه‌گیری کلی

باکتری‌های محرک رشد گیاهی با روش‌های متعددی موجب افزایش رشد و نمو گیاهان مختلف می‌شوند. این باکتری‌ها علاوه بر محلول کردن فسفر خاک، تولید سیدروفور و سیانید هیدروژن، با تولید هورمون‌هایی مانند انواع اکسین، جیبرلین و سیتوکنین، رشد و نمو گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با توجه به نتایج حاصله، داشتن خصوصیات محرک رشدی مختلف از قبیل تولید سیدروفور، اکسین و انحلال ترکیبات نامحلول فسفر این جدایه‌ها و بهبود صفات جوانه‌زنی گندم، می‌توان از این جدایه‌ها برای تهیه مایه تلقیح مناسب پس از انجام آزمون‌های مزرعه‌ای در راستای افزایش فراهمی عناصر غذایی و بهبود رشد گیاهان مختلف از جمله غلات استفاده کرد.

این مسئله ممکن است به دلیل محدودیت‌های تحمیل شده توسط ممانعت‌های باکتری در زمین مانند بقاء، تحرک، جذب به ذرات خاک و رقابت با میکروارگانیسم‌های بومی باشد. از دلایل دیگر عدم جوانه زنی دانه‌های غلات و حبوبات، دورمانسی^۱ می‌باشد. دورمانسی خارجی دانه، زمانی رخ می‌دهد که آب و هوا اجازه ورود به دانه را نداشته و دانه موفق به جذب آب نشده و نهایتاً باعث کاهش جوانه‌زنی دانه می‌شود. از آنجایی که یک دانه دورمانت ممکن است به‌طور بالقوه به تمام مراحل متابولیکی مورد نیاز جهت تکمیل جوانه‌زنی دست یابد ولی هنوز به دلیل برخی موارد ناشناخته، محور طولی ریشه‌چه برای توسعه و امتداد یافتن با شکست مواجه می‌شود (۹). احتمال بر این است که افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی مشاهده شده در پژوهش حاضر، به دلیل شکسته شدن یا کوتاه شدن دوره دورمانسی تحت تأثیر تیمار با جدایه‌های باکتریایی باشد.

منابع

- 1- Ahmad F., Ahmad L., and Saghir M. 2005. Indole acetic acid production by the indigenous isolates of *Azotobacter* and fluorescent *Pseudomonas* in the presence and absence of tryptophan. *Turkish Journal of Biology*, 29:29-34.
- 2- Alexander D.B., and Zuberer D.A. 1991. Use of chrome azurol S reagents to evaluate siderophore production by rhizosphere bacteria. *Biology and Fertility of Soils*, 12(1):39-45.
- 3- Altschul S.F., Madden T.L., Schäffer A.A., Zhang J., Zhang Z., Miller W., and Lipman D.J. 1997. Gapped BLAST and PSI-BLAST: a new generation of protein database search programs. *Nucleic Acids Research*, 25(17): 3389-3402.
- 4- Asadi Rahmani H., and Rafiei S. 2013. Survey the ability of *flavobacterium* sp. bacteria in solubilization of insoluble phosphate. *Journal of Cellular and Molecular Researches (Iranian Journal of Biology)*, 26(4): 472-479. (in Persian with English abstract)
- 5- Asghar H.N., Zahir Z.A., and Arshad M. 2004. Screening rhizobacteria for improving the growth, yield, and oil content of canola (*Brassica napus* L.). *Australian Journal of Agricultural Research* 55:187-194.
- 6- Banerjee M., Yesmin R.L., and Vessey J.L. 2006. Plant-growth- promoting rhizobacteria as biofertilizers and biopesticides. P. 137-181. In: Handbook of microbial biofertilizers. Ed., Rai, M., K., Food Production Press. U.S.A.
- 7- Benizri E., Baudoin E., and Guckert A. 2001. Root colonization by inoculated plant growth-promoting rhizobacteria. *Biocontrol Science and Technology*, 11(5):557-574.
- 8- Bent E., Tvzsun S., Chanway C.P., and Enebak S. 2001. Alterations in plant growth and root hormone levels of lodge pole pines inoculated with rhizobacteria. *Canadian Journal of Microbiology*, 47:793-800.
- 9- Bradford K.J. 1996. Population-based models describing seed dormancy behaviour: Implications for experimental design and interpretation. In *Plant Dormancy*, Lang, G.A. (ed). Oxford, UK: CAB International. P. 313-339.
- 10- Cakmakci R.I., Donmez M.F., and Erdogan U. 2007. The effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria on barely seedling growth, nutrient uptake, some soil properties, and bacterial counts. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 31:189-199.
- 11- Cassán F., Vanderleyden J., and Spaepen S. 2014. Physiological and agronomical aspects of phytohormone production by model plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) belonging to the genus *Azospirillum*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 33(2):440-459.
- 12- Chen Y., Jurkevitch E., Bar-Ness E., and Hadar Y. 1994. Stability constants of pseudobactin complexes with transition metals. *Soil Science Society of America Journal*, 58:390-396.
- 13- Creus C.M., Sueldo R.J. and Barass C.A. 1996. *Azospirillum* inoculation in pregerminating wheat seeds. *Canadian Journal of Microbiology*, 42:83-86.
- 14- Doyle J.J., and Doyle J.L. 1987. A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. *Phytochemical Bulletin*, 19:11-15.
- 15- El-Meleigi M.A. 1998. Effect of *Pseudomonas* isolates applied to corn, sorghum and wheat seeds on seedling

1- Dormancy

- growth and corn yield. Canadian Journal of Plant Sciences, 69: 101-108.
- 16- Forouzi M., Ehteshami S.M.R., Esfahani M., and Rabiee M. 2015. Effect of seed size on emergence rate, germination indices, seedling growth and yield of four bread wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). Cereal Research, 5(1):67-82. (in Persian with English abstract)
- 17- Gholami A., Shahsavani S., and Nezarat S. 2009. The Effect of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on germination, seedling growth and yield of maize. Proceedings of Word Academy of Science, Engineering and Technology, 37: 2070-3740.
- 18- Glick B.R., Jacobson C.B., Schwarze M.M.K., and Pasternak J.J. 1994. 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid deaminase mutants of the plant growth-promoting rhizobacterium *Pseudomonas putida* GR12-2 do not stimulate canola root elongation. Canadian Journal of Microbiology, 40:911-915.
- 19- International Seed Testing Association (ISTA). 2008. Handbook of vigor test methods (2nd ed.). International Seed Testing Association, Zurich, Switzerland.
- 20- Jarak M., Mrkovački N., Bjelić D., Jošić D., Hajnal-Jafari T., and Stamenov D. 2012. Effects of plant growth promoting rhizobacteria on maize in greenhouse and field trial. African Journal of Microbiology Research 6(27):5683-5690.
- 21- Jiang H., Dong H., Zhang G., Yu B., Chapman L.R., and Fields M.W. 2006. Microbial diversity in water and sediment of Lake Chaka, an athalassohaline lake in northwestern China. Applied and Environmental Microbiology, 72(6):3832-3845.
- 22- Khakipour N., Khavazi K., Mojallali H., Pazira E., and Asadi Rahmani H. 2008. Production of auxin hormone by fluorescent pseudomonads. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science, 4:687-692.
- 23- Khalid A., Arshad M., and Zahir Z.A. 2004. Screening plant growth promoting rhizobacteria for improving growth and yield wheat. Journal of Applied Microbiology, 96:473-480.
- 24- Kloepper J.W., and Schroth M.N. 1978. Plant growth-promoting rhizobacteria on radish. Proceeding of 4th International Conference of Plant Pathological Bacteriology, 879-882. Angeres.
- 25- Kloepper J.W., Lifshitz R., and Zablutowicz R.M. 1989. Free-living bacterial inocula for enhancing crop productivity. Trends in Biotechnology, 7(2):39-44.
- 26- Maghami M., Olamaee M., Rasuli Sadaghiani M.H., and Dordipour E. 2013. Isolation and identification of *Pseudomonas fluorescens* and evaluation of their plant growth promoting properties in soils Golestan province. Journal of Soil Management and Sustainable Production, 3(2):251-264. (in Persian with English abstract)
- 27- Noori M.S.Sh., and Saud H.M. 2012. Potential plant growth-promoting activity of *Pseudomonas* sp. isolated from paddy soil in Malaysia as biocontrol agent. Plant Pathology and Microbiology, 3:1-4.
- Patten C., and Glick B.R. 1996. Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid. Canadian Journal of Microbiology, 42:207-220
- 28- Rashid M., Khalil S., Ayub N., Alam S., and Latif F. 2004. Organic Acids productions solubilization by phosphate solubilizing microorganisms (PSM) under in vitro conditions. Pakistan Journal of Biological Sciences, 7:187-196.
- 29- Seyed Sharifi R., and Khavazi K. 2012. Effect of seed inoculation with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on germination components and seedling growth of corn (*Zea mays* L.). Journal of Agroecology, 3(4):506-513. (in Persian with English abstract)
- 30- Shaukat K., Affrasayab S., and Hasnain S. 2006. Growth responses of (*Helianthus annus*) to plant growth-promoting rhizobacteria used as a biofertilizer. Journal of Agriculture Research, 1(6):573-581.
- 31- Soltani Tolarood A., Salehrastin N., Khavazi K., Asadi H., and Abaszadeh P. 2008. Isolation and study plant growth promoting properties of *Pseudomonas fluorescens* species in soils of Iran. Iranian Journal of Soil and Water Science, 21:187-199. (In Persian)
- 32- Srivastava N.H., Bhandari V., and Bhatt A.B. 2014. PGPR Isolated from rhizospheric soil of *Zanthoxylum armatum* DC. in Garhwal Himalaya. International Journal of Herbal Medicine, 2(1):100-108.
- 33- Thomashow L.S., and Waller D.M. 1994. Role of a phenazine antibiotic from *Pseudomonas fluorescens* in biological control of *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*. Journal of Bacteriology, 170:3499-3508.
- 34- Wu S.C., Cao Z.H., Li Z.G., and Cheung K.C. 2005. Effect of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: a greenhouse trial. Geoderma, 125:155-166.



Identification and Evaluation of PGP Traits in Some Bacterial Strains Isolated from Wheat Rhizosphere

V. Hemati¹ - H. Asadi Rahmani^{2*} - Sh. Rezaei³

Received: 30-07-2017

Accepted: 18-12-2017

Introduction: Wheat is one of the most important food crops. In modern agriculture, due to the increase in human population and the detrimental effects of pesticides such as environmental pollution, concerns about human and animal health, adapting suitable alternatives which have none of these dangerous effects would be necessary. This is possible by increasing the production of bio-fertilizers. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) are the beneficial rhizosphere bacteria that can enhance plant growth directly or indirectly through a wide variety of mechanisms. PGPR can stimulate plant growth directly by supplying nutrients such as phosphorous and nitrogen or by the production of phytohormones such as auxins, cytokinins (CK), gibberellins (GAs) or ACC deaminase synthesis. They can also promote plant development indirectly by the suppression of pathogens by different mechanisms such as biosynthesis of antimicrobial molecules or antibiosis induced systemic resistance (ISR), rhizosphere competition, cell wall degrading enzymes like chitinase and HCN production. In this study, amplified ribosomal DNA restriction analysis was performed for screening the bacterial isolates. Then phosphate solubilization, siderophore and auxin release activities and effect of bacterial isolates on wheat seed germination traits were studied.

Materials and Methods: In order to isolate wheat rhizosphere bacteria, soil samples were taken from the wheat rhizosphere of Tehran, Qazvin, Zanjan, West and East Azerbaijan, Kurdistan and Hamadan provinces. Genomic DNA of each isolate was extracted by using a modified cetyl trimethylammonium bromide (CTAB) method. Amplified ribosomal DNA restriction analysis with HpaII and RsaI restriction enzymes was done for genetic screening. Growth stimulating factors were evaluated by auxin production, siderophore production, and inorganic phosphate solubilizing activity. Siderophore production was determined by measuring the diameters of the colony (mm) and of any orange halo (mm) formed from the blue medium surrounding bacterial growth on CAS Blue Agar medium. To examine P_i solubilization capability, 2μ bacteria suspension was placed on the plates containing Sperber's medium. Cultures were incubated at $25 \pm 2^\circ$, when the diameters of the colony and of the halo zone surrounding it were measured and the mean $\pm$ SE of the ratios of halo (mm)/colony (mm) calculated. In order to evaluate the production of auxin, isolates were grown in 100ml flasks containing 25ml TSB medium for 48h on a rotary shaker. 1 ml supernatant was mixed with 2ml of Salkowsky reagent after centrifugation at 10000g for 15min. The absorbance of the complex was read at 535nm in a Spectrophotometer. To investigate the effect of bacterial isolates on germination traits, radicle and plumule fresh and dry weight, radicle and plumule length, germination percentage, germination rate, and germination average rate were measured. The data were analyzed with using SAS 9.1. Mean comparisons were performed by LSD and main effective interaction was found significant at $P < 0.05$.

Results and Discussion: 20 isolates of wheat rhizosphere bacteria were subjected to amplified ribosomal DNA restriction analysis. The 16S rDNA region was amplified by polymerase chain reaction and PCR products were digested by HpaII and RsaI restriction enzymes. From each pattern, one sample was sent to sequencing. Different species including; *Chryseobacterium ginsenosidimutans*, *C. lathyri*, *C. piperi*, *C. taiwanense*, *Novosphingobium aromaticivorans*, *Pedobacter duraquae*, and *Sphingomonas koreensis* were identified from the wheat rhizosphere. Bacteria were tested for their plant growth promoting qualities. All of the strains produced auxin from 1.90 to 25.93. Mean comparison of the data showed that the highest level of auxin was produced with F1 and the lowest amount was observed by F18. Phosphate solubilization measured as a halo zone on Sperber's medium was observed with F6 and F56 isolates. The ratio of the diameter of the halo zone to the colony diameter was 2.86 with F6. The highest level of siderophore production by wheat rhizosphere bacteria, observed as halo formation around colonies on CAS Blue Agar medium, was obtained with F46, followed by F45 and F3. The ratio of the diameter of the orange halo surrounding bacterial growth to the colony diameter was 2.86 with F46. The result showed that the effect of wheat

1 and 3- M.Sc. Student and Assistant Professor of Islamic Azad University, Karaj Branch, Iran

2- Associate Professor of Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization

(* - Corresponding Author Email: asadi_1999@yahoo.com)

rhizosphere bacteria on germination traits such as radicle fresh and dry weight, plumule fresh weight, radicle and plumule length, germination percentage, germination rate, and germination average rate was significant at the one percent level and the effect of wheat rhizosphere bacteria on plumule fresh weight was significant at the five percent level.

Conclusion: Plant growth promoting bacteria enhance the growth and development of plants with different ways. These bacteria affect the growth and development of crops by phosphate solubilization, production of hydrogen cyanide, siderophore, and hormones such as auxin, gibberellic acid and cytokinins. According to the result, due to growth promoting characteristics such as siderophore and auxin production, phosphate solubilization, and the improvement of the seed germination traits, it can be possible to prepare bacterial inoculant for the field experiment in order to increase the availability of nutrients and improve the growth of plants.

Keywords: Auxin, PGPR, Siderophore, Wheat



رابطه خاک با اقلیم و سطوح ژئومورفیک در منطقه راین استان کرمان

لیلی نژادزمانی^۱ - محمد هادی فرپور^{۲*} - اعظم جعفری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۱۵

چکیده

عوامل خاک‌سازی در تشکیل و تکامل خاک‌های هر منطقه مؤثر می‌باشند. در بین عوامل خاک‌سازی تأثیر متقابل اقلیم و توپوگرافی (اشکال اراضی) بر شدت هوازدگی و تخریب مواد مادری، روند پیدایش و تکامل خاک‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این پژوهش به بررسی اثرات توأم اقلیم و ژئومورفولوژی بر خصوصیات خاک می‌پردازد. منطقه مورد مطالعه از ارتفاعات کوه هزار واقع در نزدیکی شهر راین آغاز و به سطوح فلات واقع در نزدیکی شهر بم ختم شد. رژیم‌های رطوبتی خاک منطقه، زیریک و اریدیک و رژیم حرارتی آن، مزیک می‌باشد. تعداد ۹ خاکرخ در اشکال اراضی پدیمت سنگی، پدیمت پوشیده، دشت دامنه‌ای، فلات و دشت، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج افزایش قابلیت هدایت الکتریکی از پدیمت سنگی به طرف دشت و کاهش آن را در رژیم زیریک نسبت به اریدیک نشان داد. وجود افق آرجیلیک در خاکرخ ۵، مربوط به اقلیم کنونی و در خاکرخ‌های ۸ و ۹، مربوط به رطوبت قابل دسترس بیش‌تر در اقلیم گذشته است. تغییر رده خاک در سطح پدیمت سنگی از اریدی سول به اینسپتی سول به علت تغییر رژیم رطوبتی می‌باشد. پوشش‌ها و پرشدگی‌های کلسیت، گچ و رس و بلورهای منفرد گچ و صفحات در هم قفل شده گچ از عوارض خاک‌ساخت غالب منطقه بودند. کانی‌های ایلیت، کلریت، کائولینیت، اسمکتیت و کوارتز در اشکال اراضی پدیمت سنگی و پدیمت پوشیده و کانی پالیگورسکیت منحصرراً در شکل اراضی پدیمت پوشیده مشاهده گردید. نتایج بیان‌گر ارتباط نزدیک خاک با اقلیم و ژئومورفولوژی می‌باشند. تغییر اقلیم و توپوگرافی در منطقه بر خصوصیات خاک‌ها و در نهایت طبقه‌بندی خاک‌های منطقه مؤثر بوده است.

واژه‌های کلیدی: افق آرجیلیک، اقلیم گذشته، بم، پالیگورسکیت، عوارض خاک‌ساخت

مقدمه

به میزان قابل توجهی به تغییرات اقلیمی وابسته است (۶). رامشنی و ابطحی (۴۹) در بررسی تأثیر اقلیم در تحول خاک‌ها بیان نمودند که با افزایش بارندگی و کاهش درجه حرارت، خاک‌ها از تکامل خاکرخی و تنوع افق‌های بیش‌تری برخوردار می‌شوند؛ به طوری که در منطقه با حداقل بارندگی و حداکثر درجه حرارت، افق کلسیک با ساختمان ضعیف، در منطقه با بارندگی و حرارت متوسط افق‌های کلسیک و کمبیک به نسبت قوی و در منطقه با حداکثر بارندگی، افق‌های کلسیک و کمبیک به نسبت قوی تا قوی، افق آرجیلیک و افق سطحی مالیک نمایان‌گر می‌شوند. دنکین و فی (۱۱) در بررسی خاک‌های منطقه ناتال واقع در جنوب آفریقا، ارتباط نزدیکی بین خصوصیات خاک و شرایط اقلیمی به‌ویژه میانگین بارندگی سالانه یافتند. آن‌ها گزارش نمودند که با افزایش مقدار بارندگی از ۲۰۰ به ۱۲۰۰ میلی‌متر، نسبت رس از ۵ درصد در مواد آلی به ۳۰ درصد در افق B افزایش یافته است. البوت و دورهان (۱۳) تکامل خاک‌ها را در نوادا (آمریکا) مطالعه و بیان نمودند که تکامل این خاک‌ها، تحت تأثیر هوازدگی و رژیم رطوبتی افزایش یافته است. در مطالعه آن‌ها رژیم رطوبتی حاضر، رطوبت کافی برای شست‌و شوی رس و تشکیل افق

اقلیم یک عامل خاک‌سازی مؤثر در تشکیل و طبقه‌بندی خاک محسوب می‌شود. اقلیم، عاملی فعال در پدیده خاک‌سازی است که تغییر آن موجب تغییر بیش‌تر ویژگی‌های خاک و دیگر اجزای اکوسیستم می‌شود و در سرعت تکاملی خاک اثر می‌گذارد (۹). به عقیده بوک‌هیم و داگلاس (۵) در طول یک دوره زمانی تحت تأثیر اقلیم تغییراتی در خاک ایجاد می‌شود. این تغییرات ممکن است خاک را به یک حالت پایدار رسانند و یا تغییرات جزئی خاک در طی زمان ادامه یابند. عوامل اقلیمی از طریق بارندگی، دما، تبخیر و تعرق، یخبندان، باد و تشعشع روی بعضی از فرآیندهای خاک‌سازی تأثیر می‌گذارند (۲۷). توپوگرافی نیز به عنوان یکی از عوامل تشکیل خاک، اثر قابل ملاحظه‌ای بر توزیع مکانی رطوبت، دما و به دنبال آن مقدار ماده آلی خاک دارد (۵۷). در مدت زمان طولانی، مقدار ماده آلی خاک

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، استاد و استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
(*) - نویسنده مسئول: (Email: farpoor@uk.ac.ir)

آرجیلیک را در خاک‌ها فراهم نموده است.

خاک‌های قدیمی یا مدفون بیان‌گر تغییرات اقلیمی هستند و اطلاعات بالارزشی را در ارتباط با شرایط اقلیم گذشته منطقه در اختیار قرار می‌دهند. این خاک‌ها در ایران مرکزی گسترش قابل توجهی دارند (۵۲). نودرت و همکاران (۴۴) با مطالعه خاک‌های مدفون واقع در رسوبات رودخانه‌ای دشت‌های شمالی آمریکا، ارتباط معنی‌داری بین ویژگی‌های خاک‌ها و شرایط آب‌وهوایی دوران زمین‌شناسی هولوسن و پلیستوسن (اقلیم گذشته) به‌دست آوردند. نتایج تحقیق فرپور و همکاران (۱۴) در منطقه نوق رفسنجان نشان داد که افق آرجیلیک این منطقه در اثر اقلیم مرطوب‌تر گذشته تشکیل شده است. تغییرات اقلیمی از طریق تأثیر روی نوع و درجه فرآیندهای خاک‌سازی می‌تواند اثر معنی‌داری روی ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی خاک داشته باشد (۴۸). به نظر سائز و همکاران (۵۰) سنگ‌شناسی و اقلیم روی توزیع و تحول کانی‌های رسی در خاک تأثیر متقابل دارند. به‌علاوه، مطالعات کانی‌شناسی رسی در درک مراحل خاک‌سازی مفید بوده و به‌عنوان شاخصی از فرآیندهای خاک‌سازی محسوب می‌گردند (۷).

به‌منظور مطالعات مورفولوژی و تکامل خاک‌ها، بهره‌گیری از مطالعات میکرومورفولوژی ضروری است (۵۵). خرمالی و ابطی (۳۳) معتقدند که عوارض خاک‌ساخت تخلیه آهک، نمایان‌گر رژیم مرطوب منطقه هستند. آهک‌زدایی عامل غالب در تکامل آن دسته از خاک‌های آهکی است که افق آرجیلیک دارند. خاک‌های دارای مقادیر زیاد کلسیت اغلب دارای بی‌فابریک کلسیتیک کریستالیک هستند. لیاقت و خرمالی (۳۶) در تحقیقات خود نشان دادند که مرطوب و خشک شدن متوالی خاک در رژیم رطوبتی زیریک، سبب ایجاد شکل‌های متنوع آهکی می‌شود. این در حالی است که در رژیم بودیک، شکل‌های مختلف رسی ایجاد شده و شکل‌های گچی به سبب اقلیم خشک در رژیم رطوبتی اریدیک مشاهده می‌گردند.

خاک و ژئومورفولوژی بسیار به یکدیگر وابسته می‌باشند و اگر در بررسی تشکیل و طبقه‌بندی خاک، مفاهیم ژئومورفولوژی لحاظ شود فرآیندهای تشکیل خاک بهتر درک می‌شوند (۲۲). آنجوس و همکاران (۲) با بررسی خاک‌های مختلف بیان داشتند که شدت خاک‌سازی تا حد زیادی به خصوصیات سطوح ژئومورفولوژی وابسته است و خصوصیات این سطوح باعث تغییر درجه هوازدگی، میزان شست و شوی املاح محلول خاک، مراحل و فرآیندهای شست و شوی انتقال مواد، عمق تجمع املاح و در نهایت عمق سولوم می‌گردد. گایل (۲۱) گزارش نمود که خاک‌های واقع در دشت‌های آبرفتی، دارای تکامل خاکرخی بیش‌تر و افق کلسیک قوی‌تر هستند. تومانیان و همکاران (۵۶) نحوه تشکیل خاک را در واحدهای فیزیوگرافی در منطقه اصفهان بررسی نمودند. نتایج نشان داد که افق‌های گچی در ارتباط با سطوح ژئومورفولوژی از توالی تکاملی متفاوتی به لحاظ

میکرومورفولوژی برخوردار هستند. در مراحل اولیه تکامل (بخش‌های بالایی مخروط‌افکنه) بلورهای گچ به‌صورت مجزا و یا به‌صورت خوشه‌ای در داخل خلل‌و‌فرج دیده شدند. در بخش‌های وسط و پایین مخروط‌افکنه، گچ به‌صورت پوشش‌های داخلی و یا پرشدگی مشاهده شد. در افق‌های متکامل‌تر (دشت‌های سیلابی فرسایش یافته یا فلات‌ها)، بلورهای فیبری گچ به‌هم متصل شده و به‌طور عمودی نسبت به سنگریزه‌ها و سطح خاک قرار داشتند.

با توجه به نبود گزارش‌های خاک‌شناسی در منطقه راین از یک سو و اهمیت زیاد مطالعات خاک-ژئومورفولوژی در درک فرآیندهای ژئومورفیکی و خاک‌سازی، تکامل اشکال اراضی و مدیریت خاک‌ها از سوی دیگر، این پژوهش با توجه به تنوع سطوح ژئومورفیک و تغییرات اقلیمی در منطقه مطالعاتی برای دستیابی به اهداف ذیل صورت پذیرفت:

- ۱- بررسی ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیکی، شیمیایی، کانی‌شناسی رسی و میکرومورفولوژی خاک‌ها در ارتباط با سطوح ژئومورفیک تحت شرایط اقلیمی متفاوت
- ۲- مطالعه نحوه پیدایش و رده‌بندی خاک‌های منطقه مطالعاتی

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

پژوهش حاضر در منطقه راین واقع در جنوب شرقی استان کرمان و در دامنه کوه هزار انجام گرفت (شکل ۱). خاک‌های منطقه مطالعاتی دارای رژیم رطوبتی زیریک (خاکرخی‌های ۳ و ۵) و اریدیک (خاکرخی‌های ۱، ۲، ۴، ۶، ۷، ۸ و ۹) و رژیم حرارتی مزیک می‌باشند (۳). از نظر زمین‌شناسی منطقه راین از ۳ بلوک مجزا شامل بلوک کوه هزار-کوه شیرینک در جنوب (مربوط به اواخر دوران پالئوسن)، بلوک کوه جوپار در شمال (شامل سازندهای ژوراسیک، رسوبات کرتاسه و رسوبات پالئوسن) و بلوک کوه سکنج در شمال شرقی (مربوط به اواخر دوران کرتاسه) تشکیل شده است. محل اتصال این سه بلوک به‌وسیله گسل‌های منطقه‌ای که توسط رسوبات نئوژن و کوآترنری پوشیده شده‌اند مشخص می‌گردد (۱).

منطقه مورد مطالعه دارای پوشش گیاهی نواحی خشک و نیمه‌خشک شامل آلاله، آویشن، پونه، مریم‌گلی و گون می‌باشد (۱۹).

مطالعات صحرایی

برای انجام این پژوهش، ابتدا با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی (۱:۲۵۰۰۰)، نقشه‌های زمین‌شناسی (۱:۲۵۰۰۰)، تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارت و مطالعات صحرایی، اشکال اراضی پدیمت سنگی، پدیمت پوشیده، دشت دامنه‌ای، فلات و دشت در منطقه مطالعاتی شناسایی و تفکیک شدند. سپس تعداد ۹ خاکرخی روی اشکال اراضی

مزبور حفر، تشریح (۵۳) و از افق‌های ژنتیکی آن‌ها برای انجام آزمایش‌های مورد نظر نمونه‌برداری شد (شکل ۱). پس از انجام آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی، کانی‌شناسی رسی و میکرومورفولوژی، خاک‌های منطقه مطالعاتی توسط سامانه رده‌بندی آمریکایی (۵۴) و طبقه‌بندی جهانی (۲۵) رده‌بندی شدند.

تجزیه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک ابتدا هوا خشک، کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. آزمایش‌های معمول فیزیکی و شیمیایی شامل اندازه‌گیری بافت به روش هیدرومتر (۸)، واکنش خاک در گل اشباع توسط دستگاه پ‌هاش سنج مدل Jenway، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع با دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی مدل Jenway، کربنات کلسیم معادل با روش تیتراسیون برگشتی (۴۶)، گچ به روش ترسیب با استون (۴۲)، ماده آلی به روش اکسایش تر (۴۱)، سدیم محلول به وسیله دستگاه نشر اتمی مدل Jenway و کلسیم و منیزیم محلول به وسیله تیتراسیون (۳۵) تعیین گردید.

برای تجزیه کانی‌شناسی رس، نمونه خاک‌های افق Bk- خاک‌های ۳، افق A- خاک‌های ۵، افق Btkb- خاک‌های ۵ و افق C- خاک‌های ۵ انتخاب گردیدند. پس از طی مراحل آماده‌سازی به روش جکسون (۲۶) و کیتریک و هوپ (۳۴)، بخش رس موجود در نمونه‌های خاک با استفاده از سانتریفیوژ جدا و چهار تیمار مختلف شامل اشباع با منیزیم، اشباع با منیزیم و اتیلن‌گلیکول، اشباع با پتاسیم و اشباع با پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس تهیه شد. نمونه‌های آماده شده به وسیله دستگاه پراش پرتو ایکس مدل d5000 Siemens در زاویه ۲θ بین صفر تا ۴۰ درجه در ولتاژ ۴۰ کیلوولت و آمپراژ ۳۰ میلی‌آمپر بررسی و نمودارهای پراش پرتو ایکس مربوطه حاصل شد.

برای مطالعات میکرومورفولوژی در زمان تشریح خاک‌ها، کلوخه‌های دست نخورده از افق Bk- خاک‌های ۴، افق Btkb- خاک‌های ۵، افق By1- خاک‌های ۶، افق‌های Bk و Bkkm1- خاک‌های ۷، افق Btkb- خاک‌های ۸ و افق Btk- خاک‌های ۹ تهیه گردید. مقاطع نازک تهیه شده (۴۰) با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مدل Bulb مورد مطالعه، تشریح (۵۵) و عکس‌برداری قرار گرفتند.

نتایج و بحث

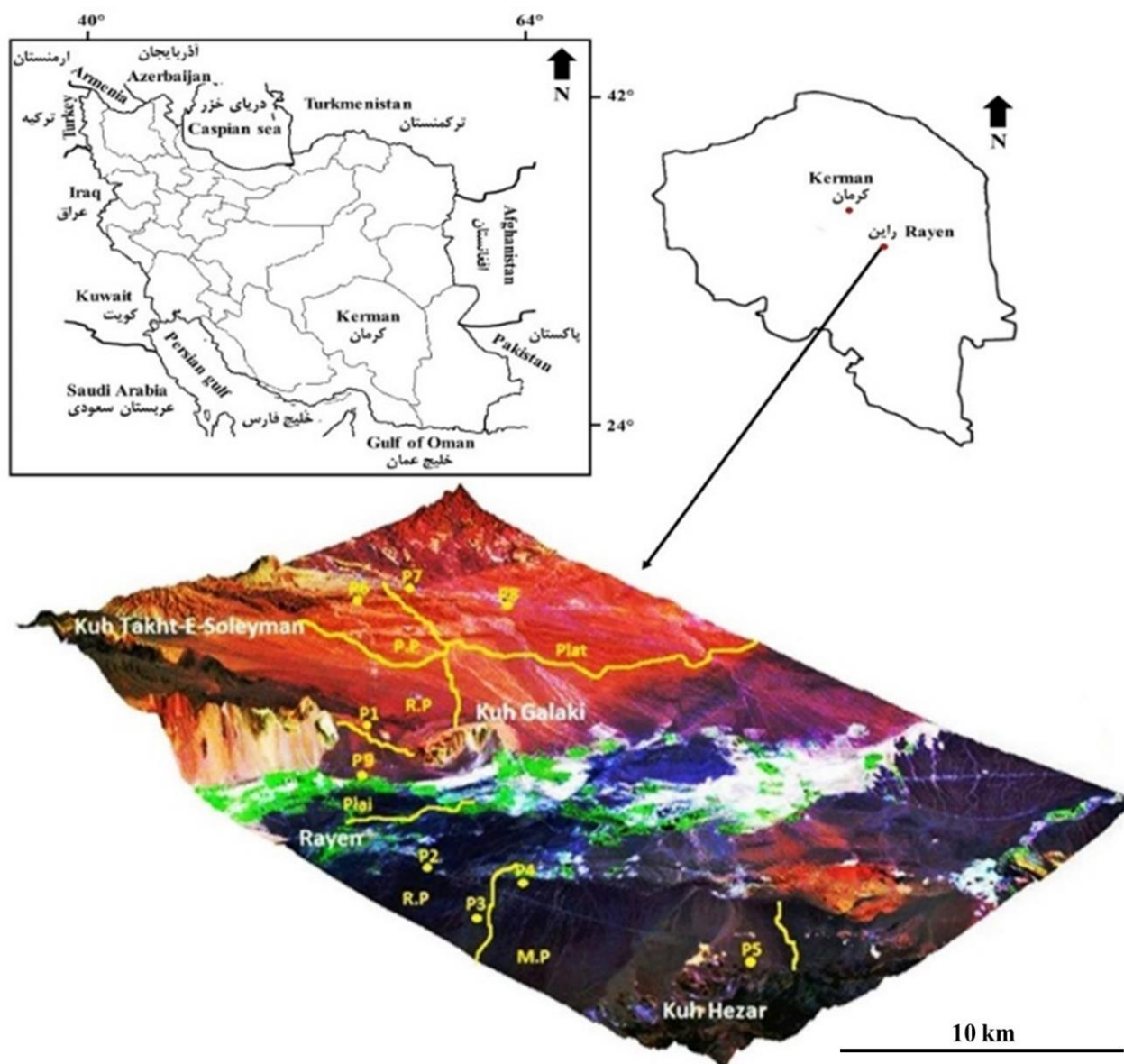
خصوصیات فیزیکی و شیمیایی

موقعیت اشکال اراضی و خاک‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. خاک‌های ۱ (۲۱۶۹ متر از سطح دریا) در رژیم رطوبتی اریدیک روی نهشته‌های جوان کواترنری در شکل اراضی پدیمت سنگی واقع شده است. خاک‌های ۲ (۲۲۷۶ متر از سطح دریا) نیز در این رژیم رطوبتی و شکل اراضی روی سازند گچی نئوژن قرار دارد (جدول‌های

۱ و ۲). در این دو خاک‌های (۱ و ۲) میزان شوری، کربنات کلسیم و SAR به دلیل شیب زیاد و حرکت املاح به طرف سطوح پایین‌دست، با افزایش عمق کاهش یافت. بافت خاک این دو خاک‌ها نیز در اعماق به دلیل کاهش تأثیر عوامل هواپیدگی درشت‌تر از سطح خاک می‌باشد. رده‌بندی هر دو خاک مزبور بر اساس سامانه رده‌بندی آمریکایی (۵۴) به صورت Typic Haplocambids می‌باشد (جدول ۲). با توجه به این‌که تنها عامل خاک‌سازی متغیر در این دو خاک‌ها ماده مادری می‌باشد، نتایج مبین آن است که تغییر ماده مادری به تنهایی تغییر چشمگیری در خصوصیات خاک ایجاد ننموده و هیچ یک از دو خاک‌ها، از تکامل چندانی برخوردار نبوده و فقط افق کمبیک در آن‌ها تشکیل گردیده است.

خاک‌های ۳ (۲۳۰۱ متری از سطح دریا) در رژیم رطوبتی زیریک روی سازند جوان کواترنری در شکل اراضی پدیمت سنگی واقع گردیده و شامل افق‌های A، Bk، C و Cy می‌باشد (جدول ۱). شست‌و شوی نسبتاً زیاد این خاک‌ها به دلیل تغییر رژیم رطوبتی از اریدیک به زیریک (برخلاف خاک‌های ۱ و ۲) منجر به زیاد شدن میزان رس، شوری و رطوبت اشباع خاک با افزایش عمق گردیده است. در طی مطالعات صحرایی، اشکال ثانویه کربنات کلسیم به شکل توده‌های نرم و میسلیوم در این خاک‌ها مشاهده شدند. با توجه به معیارهای تعریف شده در سامانه رده‌بندی آمریکایی (۵۴) در این خاک‌ها افق مشخصه کلسیک تشکیل شده است. میزان کربنات کلسیم در خاک نشان دهنده درجه تکامل، نوع افق کلسیک و وضعیت عناصر غذایی در خاک است (۳۷). حلالیت زیاد گچ همراه با رژیم رطوبتی زیریک باعث تجمع گچ در عمق ۱۶۰ سانتی‌متری و تشکیل افق Cy در این خاک‌ها گردیده است. در کل می‌توان گفت که این خاک دارای تکامل و تنوع خاک‌زایی است و دارای افق مشخصه سطحی اکریک و افق مشخصه زیرسطحی کلسیک می‌باشد. رده‌بندی این خاک در سامانه رده‌بندی آمریکایی (۵۴) به صورت Typic Calcixerepts می‌باشد (جدول ۲).

نتایج حاکی از این است که تغییر رژیم رطوبتی خاک از اریدیک به زیریک منجر به تغییر رده خاک از اریدی‌سول به اینسپتی‌سول در خاک‌های ۳ نسبت به خاک‌های ۱ گردیده است؛ زیرا هر دو خاک‌ها، دارای سازند زمین‌شناسی و سطح ژئومورفیک یکسان می‌باشند. زراعت پیشه و همکاران (۵۹) با مطالعه یک ردیف اقلیمی در شرق استان گلستان گزارش نمودند که در منطقه با رژیم رطوبتی یودیک و رژیم حرارتی مزیک، خاک‌های مالی‌سول با افق‌های زیرسطحی آرجیلیک و کلسیک تکامل یافته، تشکیل شده‌اند، در حالی‌که در منطقه با رژیم رطوبتی زیریک و رژیم حرارتی ترمیک خاک‌های مالی‌سول تنها دارای افق کمبیک و خاک‌های اینسپتی‌سول شامل افق‌های سطحی اکریک و زیرسطحی کمبیک و کلسیک می‌باشند.



شکل ۱- اشکال اراضی و موقعیت خاکرخ‌ها در منطقه مورد مطالعه. Plat: فلات، Plai: دشت، R.P: پدیمت سنگی، M.P: پدیمت پوشیده، PP: دشت دامنه‌ای، P: موقعیت خاکرخ‌ها روی اشکال اراضی

Figure 1- Location of the study area indicating geomorphic surfaces and representative pedons, Plat: Plateau, Plai: Plain, R.P: Rock Pediment, M.P: Mantled Pediment, P.P: Piedmont plain

مالی سول و در رژیم رطوبتی یودیک، آلفی سول مشاهده می‌گردد. خاکرخ ۴ (۲۲۳۴ متر از سطح دریا) در رژیم رطوبتی اریدیک روی سازند جوان کواترنری در شکل اراضی پدیمت پوشیده واقع شده است. در افق کلسیک این خاکرخ، کربنات کلسیم ثانویه به صورت پاکت‌های پودری در مطالعات صحرایی مشاهده شد. به دلیل رطوبت کم خاکرخ ۴، سازند نتوژن موجود در بالادست، منبع احتمالی گچ و کربنات برای این خاکرخ می‌باشند.

در ضمن در رژیم رطوبتی اریدیک و رژیم حرارتی ترمیک اریدی سول‌ها با افق‌های سطحی اکریک و زیرسطحی کمبیک و کلسیک و خاک‌های جوان انتی سول فاقد تکامل خاکرخی تشکیل گردیده‌اند. قرقره‌چی (۲۰) با بررسی میکرومورفولوژی و تحول خاک‌ها در یک ردیف اقلیمی از اراضی خاک‌های لسی استان گلستان، دریافت که در رژیم اریدیک، خاک‌هایی با حداقل تکامل از رده اریدی سول دیده می‌شوند، در مقابل در رژیم رطوبتی زیریک، اینسپتی سول و

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاکرها

Table 1- Selected physical and chemical properties of pedons

افق Horizon	عمق (cm) Depth	شن % Sand	سیلت % Silt	رس % Clay	ذرات درشت % Gravel	بافت Texture	pH	EC dS m ⁻¹	SAR (mmol L ⁻¹) ^{0.5}	کربنات کلسیم % Calcium carbonate	گچ % Gypsum
خاکرغ ۱ (Pedon 1) - پدیمت سنگی (Rock pediment) 57° 29' 38" E, 29° 38' 56" N											
A	0-10	50	21	29	14	SCL	4.8	0.8	0.8	5.15	ng
Bw	10-50	82	7	11	52	SL	9.7	0.5	0.3	5.11	ng
C	50-145	78	9	13	57	SL	7.7	0.4	0.5	5.11	ng
خاکرغ ۲ (Pedon 2) - پدیمت سنگی (Rock pediment) 57° 26' 53" E, 29° 33' 56.1" N											
A	0-10	37	20	43	19	C	7.6	1.2	0.6	14	ng
Bw	10-50	53	23	24	36	SCL	7.1	0.9	0.6	8	10
C1	50-80	83	8	9	58	LS	7.0	0.6	0.7	4	ng
C2	80-100	86	6	8	58	S	7.5	0.6	0.4	4	ng
خاکرغ ۳ (Pedon 3) - پدیمت سنگی (Rock pediment) 57° 27' 29.3" E, 29° 30' 51.5" N											
A	0-10	80	11	9	20	LS	8.1	0.4	0.6	9.5	ng
Bk	10-70	78	13	9	51	SL	7.9	0.4	0.2	15	ng
C	70-160	86	5	9	57	LS	8.7	0.5	0.3	6.5	ng
Cy	160-180	64	27	19	53	SL	7.2	3.7	3.1	10	16
خاکرغ ۴ (Pedon 4) - پدیمت پوشیده (Mantled pediment) 57° 27' 39.9" E, 29° 31' 51.5" N											
A	0-10	52	27	21	11	SL	7.5	1.1	0.6	16.5	ng
Bk	10-40	76	11	13	18	SL	7.3	3.3	0.9	16	20
C	40-100	84	11	5	66	LS	7.4	3.3	0.9	4	ng
خاکرغ ۵ (Pedon 5) - پدیمت پوشیده (Mantled pediment) 57° 39' 21.7" E, 29° 27' 25.4" N											
A	0-20	80	19	1	54	LS	7.9	0.6	0.7	8	ng
C	20-100	80	14	6	52	LS	7.8	0.9	0.3	6.5	ng
Btkb	100-130	68	15	19	47	SL	7.8	1.1	1.6	15	ng
خاکرغ ۶ (Pedon 6) - دشت دامنه‌ای (Piedmont plain) 57° 33' 47" E, 29° 45' 06" N											
A	0-10	56	25	19	22	SL	7.6	1.7	1.7	24	ng
Bk	10-30	82	3	15	59	SL	7.4	2.5	1.06	50	12
By1	30-70	64	11	25	51	SCL	7.2	3.4	1.2	45.5	44
By2	70-110	84	5	11	54	LS	7.1	5.3	1.2	46.5	36
By3	110-150	84	5	11	49	LS	7.3	5.4	0.6	46.5	24
Bky	150-200	70	7	23	47	SCL	7.7	5.5	1.5	40.5	11
خاکرغ ۷ (Pedon 7) - فلات (Plateau) 57° 35.5' 35.8" E, 29° 44' 45.5" N											
A	0-25	59	21	20	42	SCL	7.9	0.8	1.01	2	ng
Bk	25-95	45	19	36	75	SCL	7.4	1.4	0.6	28.5	ng
Bkkm1	95-150	57	26	17	66	SL	7.2	3.6	0.8	54.3	32
Bkkm2	150-170	55	28	17	53	SL	7.1	2.7	1.8	45.3	24
خاکرغ ۸ (Pedon 8) - فلات (Plateau) 57° 37' 53.5" E, 29° 41' 46.6" N											
A	0-20	75	17	8	36	SL	7.6	1.3	0.5	17	20
C1	20-30	81	16	3	35	LS	7.4	1.1	0.7	22.5	ng
C2	30-100	87	7	6	65	S	7.2	0.7	1.1	34	ng
Btkb	100-140	69	13	18	55	SL	7.5	0.6	1.2	30	ng
خاکرغ ۹ (Pedon 9) - دشت (Plain) 57° 38' 12.5" E, 29° 41' 25.9" N											
A	0-10	70	20	10	10	SL	8.2	0.3	1.1	10.5	ng
Btk	10-30	78	9	13	31	SL	7.6	0.8	1.4	15	ng
C1	30-55	76	12	12	46	SL	7.5	1.2	3.4	5	ng
C2	55-90	72	16	12	54	SL	7.3	1.4	2.3	6.5	ng
C3	90-120	88	6	6	40	S	7.6	1.2	0.9	2.5	ng
C4	120-190	88	6	6	48	S	7.5	1.4	0.6	14	ng

ng: negligible

اعمق خاکها نسبت داد. رده‌بندی خاکرغ ۴ بر اساس سامانه رده‌بندی آمریکایی (۵۴) به‌صورت Typic Haplocalcids می‌باشد (جدول ۲).

قابلیت هدایت الکتریکی در این خاکرغ با افزایش عمق، افزایش یافته است. روند افزایشی قابلیت هدایت الکتریکی با افزایش عمق را می‌توان به کاهش شیب، کمتر شدن میزان شست و شوی املاح در این خاکها به سمت اراضی پایین‌دست و در نتیجه تجمع املاح در

جدول ۲- رژیم‌های رطوبتی، سازندهای زمین‌شناسی و طبقه‌بندی خاک‌ها
Table 2- Moisture regimes, geologic formations and soil classification

رده‌بندی آمریکایی (2014) Soil Taxonomy (2014)	طبقه‌بندی جهانی (2015) WRB (2015)	سازند زمین‌شناسی Geological formation	رژیم رطوبتی Moisture regime	خاک‌رخ Pedon
Typic Haplocambids	Calcaric Skeletic Cambisol (Protocalcic, Loamic)	کواترنری Quaternary	اریدیک Aridic	1
Typic Haplocambids	Calcaric Skeletic Cambisol (Endoarenic, Protocalcic, Epiloamic)	نئوژن Neogene	اریدیک Aridic	2
Typic Calcixerepts	Skeletic Calcisol (Endoarenic, Hypocalcic, Amphiloamic)	کواترنری Quaternary	زریک Xeric	3
Typic Haplocalcids	Skeletic Calcisol (Katoarenic, Hypocalcic, Epiloamic)	کواترنری Quaternary	اریدیک Aridic	4
Typic Xerorthents	Calcaric Skeletic Regosol (Arenic) over Skeletic Luvic Calcisol (Hypocalcic, Loamic)	کواترنری Quaternary	زریک Xeric	5
Typic Calcigypsis	Skeletic Calcic Gypsisol (Endoarenic, Anoloamic)	نئوژن Neogene	اریدیک Aridic	6
Calcic Petrocalcids	Skeletic Petric Calcisol (Hypercalcic, Loamic)	کواترنری Quaternary	اریدیک Aridic	7
Typic Torriorthents	Calcaric Skeletic Regosol (Arenic) over Skeletic Luvic Calcisol (Loamic)	کواترنری Quaternary	اریدیک Aridic	8
Typic Calciargids	Skeletic Luvic Calcisol (Hypocalcic, Loamic)	کواترنری Quaternary	اریدیک Aridic	9

تکامل خاک است.

خاک‌رخ ۶ (۲۴۶۲ متر از سطح دریا) در رژیم رطوبتی اریدیک روی رسوبات نئوژن گچی در شکل اراضی دشت دامنه‌ای واقع شده است (شکل ۱). شوری نسبتاً زیاد این خاک‌رخ به دلیل کم‌تر شدن شیب و در نتیجه تجمع املاح در افق‌های پایین‌تر و وجود تشکیلات غنی از گچ و املاح قابل توجه است. فرپور و همکاران (۱۴) منشأ گچ را در ایران مرکزی در نتیجه فعالیت‌های کوه‌زایی اواخر کرتاسه تا میوسن می‌دانند. در اثر این فعالیت‌ها دریای عمیق تتیس به چندین دریاچه کم عمق بسته مجزا تقسیم گردیده است. تبخیر آب این دریاچه‌ها در اثر آب و هوای گرم و خشک ترشیری باعث تبلور کانی گچ در سواحل این دریاچه‌ها شده است. لازم به ذکر است که فرپور و همکاران (۱۴) پدیمت‌های کنونی را به‌عنوان سواحل دریاچه‌های کم عمق در نظر گرفته‌اند که در منطقه مورد مطالعه به‌علت ارتفاع بسیار زیاد کوه هزار به نظر می‌رسد که آب تا حد این پدیمت‌ها بالا نبوده است. پس می‌توان سطوح دشت دامنه‌ای در این منطقه را به‌عنوان سواحل دریاچه قدیمی به حساب آورد. بنابراین، احتمالاً منشأ گچ در این سطح ژئومورفولوژی، به این فعالیت‌ها ارتباط دارد. در صحرا تجمعات کربنات کلسیم ثانویه به‌صورت توده‌های نرم در سطوح خاکدانه‌ها به میزان نسبتاً زیاد مشاهده شد. همچنین در این خاک‌رخ، گچ ثانویه به‌صورت آویزه‌های ریز و کوچک که به سمت اعماق مقدار آن‌ها زیاد می‌شد، مشاهده گردید. خاک‌های این موقعیت ژئومورفیک می‌توانند به‌عنوان منبع گچ برای اراضی پایین‌دست به حساب آیند. رده‌بندی

خاک‌رخ ۵ (۲۳۲۷ متر از سطح دریا) در رژیم رطوبتی زریک روی نهشته‌های جوان کواترنری در شکل اراضی پدیمت پوشیده قرار دارد (شکل ۱). این خاک‌رخ دارای افق C ناشی از انباشت سنگریزه، فاقد شواهد خاک‌زایی و دارای رنگ خشک روشن است. میزان سنگریزه با افزایش عمق کاهش می‌یابد. روند افزایشی قابلیت هدایت الکتریکی با افزایش عمق ناشی از آب‌شویی عمقی نمک است. یکی از نکات جالب توجه در این خاک‌رخ، وجود افق مدفون شده Btkb در زیر افق C است. پوشش‌ها و پرشدگی‌های رسی همراه با پوسته‌های رسی، تجمع کربنات کلسیم ثانویه به شکل پودر و میسیلیوم روی سطوح خاکدانه‌ها و افزایش درصد رس به سمت عمق، وجود این افق مدفون را تأیید می‌نمایند (جدول ۱). به نظر می‌رسد که رطوبت کافی در رژیم رطوبتی زریک باعث خروج کربنات‌ها از افق‌های بالایی و به دنبال آن انتقال رس و تشکیل افق Btk گردیده است. بنابراین، تشکیل افق آرچیلیک در این خاک‌رخ به دلیل تغییر رژیم رطوبتی از اریدیک به زریک می‌باشد. بیات و فرپور (۴) نیز وجود افق آرچیلیک را در خاک‌های شهرستان بردسیر واقع در اقلیم زریک گزارش نمودند. به‌طور کلی خاک‌رخ ۵، دارای دو نوع خاک جوان و مدفون می‌باشد که نقش مؤثر اقلیم در خصوصیات آن انکارناپذیر است. در سامانه رده‌بندی آمریکایی (۵۴) خاک جوان رویی به‌صورت Typic Xerorthents رده‌بندی گردید (جدول ۲). هاپکینز و فرانزن (۲۴) دریافتند که افق آرچیلیک عمیق‌تر دارای رس بیش‌تر و پوسته‌های رسی ضخیم‌تر می‌باشد که این امر نشان‌گر طولانی‌تر بودن دوره

این خاک در سامانه رده‌بندی آمریکایی (۵۴) به صورت Typic Calcigypsid می‌باشد (جدول ۲).

خاکرخ ۷ (۲۲۲۶ متر از سطح دریا) در رژیم رطوبتی اریدیک روی سطح پایدار فلات و سازند قدیم کواترنر قرار دارد (شکل ۱). این خاکرخ دارای مقادیر زیاد کربنات کلسیم است که مقدار آن با افزایش عمق، افزایش می‌یابد. در این خاکرخ افق پتروکلسیک در عمق ۱۷۰-۹۵ سانتی‌متری مشاهده شد. ظاهراً دو مکانیسم متفاوت در تشکیل افق پتروکلسیک این خاکرخ نقش دارد. با توجه به توده‌های بزرگ و ضخیم سنگ آهک کرتاسه در منطقه مورد مطالعه، این گونه می‌توان گفت که احتمالاً افق پتروکلسیک روی سنگ مادر آهکی و به صورت درجا به وجود آمده است. فرپور و همکاران (۱۶) در پلایای سیرجان با اقلیم اریدیک و معاذلهی و فرپور (۳۸) در منطقه بافت با اقلیم زیریک، افق پتروکلسیک را گزارش نمودند. رده‌بندی این خاک در سامانه رده‌بندی آمریکایی (۵۴) به صورت Calcic Petrocalcids می‌باشد (جدول ۲).

خاکرخ ۸ (۲۱۴۸ متر از سطح دریا) در رژیم رطوبتی اریدیک روی نهشته‌های قدیمی کواترنری در سطح پایدار فلات قرار گرفته است (شکل ۱). این خاکرخ دارای افق‌های C با رنگ نارنجی زرد ضعیف و خاکستری مایل به زرد فاقد شواهد خاک‌زایی و افق تجمع رس و کربنات به صورت توأم می‌باشد (جدول ۱). با توجه به افزایش رس از ۶ به ۱۸ درصد در زیر افق‌های C و حضور پوشش‌های رسی این افق تحت عنوان Btkb نام‌گذاری شد. با توجه به اقلیم خشک کنونی منطقه می‌توان گفت که افق آرچلیک در این خاکرخ مربوط به اقلیم مرطوب‌تر گذشته است. شواهد وجود آب و هوای مرطوب‌تر در گذشته ایران مرکزی توسط خرمالی و همکاران (۳۱)، خادمی و مرموت (۳۰) و فرپور و همکاران (۱۵) نیز گزارش شده است. رطوبت قابل دسترس بیش‌تر در اقلیم گذشته باعث شست و شوی کربنات‌ها و تشکیل افق Bk و به دنبال آن تسهیل انتقال رس و تشکیل افق Btk شده است. بعد از آن، تغییر رژیم رطوبتی و خشک شدن اقلیم باعث نهشته شدن رسوبات جدید روی افق آرچلیک و مدفون شدن آن گردیده است. عامل کلیدی برای تجمع رس، وجود دوره‌های خشکی است تا رس منتقل شده نگهداری شود (۱۷). این خاکرخ دارای دو خاک جوان رویی و مدفون زیرین می‌باشد. با توجه به قرارگیری این خاکرخ در نهشته‌های قدیمی کواترنری، قدیمی بودن این خاک دور از انتظار نمی‌باشد. این خاک در سامانه رده‌بندی آمریکایی (۵۴) به صورت Typic Torriorthents رده‌بندی شد (جدول ۲).

خاکرخ‌های ۷ و ۸ در رژیم رطوبتی اریدیک روی نهشته‌های قدیم کواترنر در سطح ژئومورفیک پایدار فلات واقع گردیده‌اند. تنها عامل توجیه کننده وجود افق پتروکلسیک و آرچلیک در این خاکرخ‌ها، وجود اقلیم مرطوب‌تر در گذشته است که با توجه به قدیمی بودن هر دو سطح این امر دور از ذهن نیست.

خاکرخ ۹ (۱۹۹۶ متر از سطح دریا) در رژیم رطوبتی اریدیک روی نهشته‌های حدواسط کواترنری در شکل اراضی دشت واقع شده است (شکل ۱). به دلیل کم شدن شیب منطقه، رسوبات این سطح درشت بافت می‌باشند. خاک درشت بافت و در نتیجه شست و شوی زیاد در این سطح می‌تواند از دلایل کم بودن میزان املاح نسبت به سطح دشت دامنه‌ای باشد (جدول ۱). افزایش میزان رس، حضور پوسته‌های رسی در سطوح خاکدانه‌ها و حفرات و حضور پوشش‌های رسی در مقطع نازک شواهدی از تغییر مکان رس‌ها و ایجاد افق آرچلیک محسوب می‌گردند. خروج کربنات‌ها از افق‌های بالایی در رطوبت بیش‌تر زمان گذشته باعث تسهیل انتقال رس و تشکیل افق آرچلیک در اقلیم خشک امروزی شده است. تتلون و همکاران (۴۳) معتقدند افق آرچلیک در مناطق خشک و نیمه‌خشک، پدیده‌ای معمول می‌باشد. رده‌بندی این خاک در سامانه رده‌بندی آمریکایی (۵۴) به صورت Typic Calcigypsid می‌باشد (جدول ۲).

مطالعات کانی‌شناسی رسی

مطالعات کانی‌شناسی رسی روی خاک‌های واقع بر اشکال اراضی پدیمت سنگی و پدیمت پوشیده واقع در رژیم رطوبتی زیریک انجام شد. کانی‌های اسمکتیت، کلریت، ایلیت و کائولینیت در سطح پدیمت سنگی شناسایی گردید (شکل ۲ الف). همچنین دیفرکتوگرام‌های پرتو ایکس مربوط به نمونه‌های خاکرخ ۵ واقع بر سطح پدیمت پوشیده، حضور کانی‌های اسمکتیت، کلریت، ایلیت، کائولینیت و پالیگورسکیت را تأیید می‌نمایند (شکل ۲ ب، پ، ت). کانی‌های ایلیت و کلریت در هر دو شکل اراضی، منشأ زمین‌ساخت داشته و افزایش شدت پیک این کانی‌ها با عمق در سطح پدیمت پوشیده نیز مؤید این مطلب می‌باشد (شکل ۲ ب، پ، ت). نقش توارث در منشأ کانی کلریت در هر دو سطح ژئومورفیک مورد مطالعه مشهود می‌باشد. عدم وجود شرایط مناسب برای تشکیل کانی کلریت شامل آب‌شویی شدید، اسیدیته کم‌تر از ۶ دمای زیاد و خارج شدن هیدروکسیدهای بین‌لایه‌ای، مؤید وراثتی بودن کانی کلریت می‌باشد. خرمالی و ابطی (۳۳) معتقدند که فراوانی کلریت در خاک‌های منطقه هوتن مربوط به حضور آن در سنگ بستر می‌باشد. حضور این کانی در خاک‌های ایران مرکزی، به وجود آن در سنگ مادر نسبت داده شده است و در نتیجه بیان‌گر پایداری آن در شرایط تشکیل در محیط خاک می‌باشد (۲۹، ۳۳). همچنین با توجه به عدم شرایط اقلیمی لازم برای تشکیل کانی کائولینیت، منشأ مادری برای این کانی در خاک‌های منطقه مورد انتظار است. کائولینیت یک کانی ثانویه است که در شرایط گرم و مرطوب می‌تواند بر اثر پدیده خاک‌سازی ایجاد شود. تشکیل این کانی در شرایط خشک و نیمه‌خشک امکان‌پذیر نمی‌باشد (۲۸). از سوی دیگر وجود رشته کوه‌های آذرین هزار در منطقه، امکان تشکیل

از سوی دیگر، رطوبت کافی در رژیم رطوبتی زیریک، باعث خروج کربنات‌ها از افق‌های بالایی و افزایش نسبت منیزیم به کلسیم در افق‌های زیرین شده و شرایط مناسب را برای ایجاد کانی پالیگورسکیت ایجاد کرده است. حضور کانی پالیگورسکیت در اطراف بلورهای کلسیت در افق کلسیک توسط محققین مختلف در ایران مرکزی گزارش گردیده است (۲۹ و ۵۱). حضور کانی پالیگورسکیت در رژیم رطوبتی زیریک توسط محققین بسیاری گزارش شده است (۳۲ و ۵۱).

مطالعات میکرومورفولوژی

توصیف میکرومورفولوژیک خاکرخ‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. مطالعه مقاطع نازک مربوط به سطح پدیمت سنگی عوارض خاک‌ساخت کلسیت را به صورت پرشدگی و پوشش نشان داد (شکل ۳ الف، ب). در مطالعات میکرومورفولوژی شکل اراضی پدیمت پوشیده، عوارض خاک‌ساخت پوشش کلسیت، نادول کلسیت، پوشش رس و مرکب پوشش کلسیت- پوشش رس مشاهده شد (شکل ۳ پ، ت). حضور پوشش‌های رسی به همراه پرشدگی‌های کلسیت در خاکرخ ۵ شاهدهی از انتقال رس و آهک از افق‌های بالایی به افق‌های تحتانی در نتیجه نفوذ آب در اقلیم زیریک است. حضور عوارض خاک‌ساخت مرکب در خاک‌ها دلیلی بر پلی‌ژنتیک بودن آن‌ها می‌باشد (۳۰).

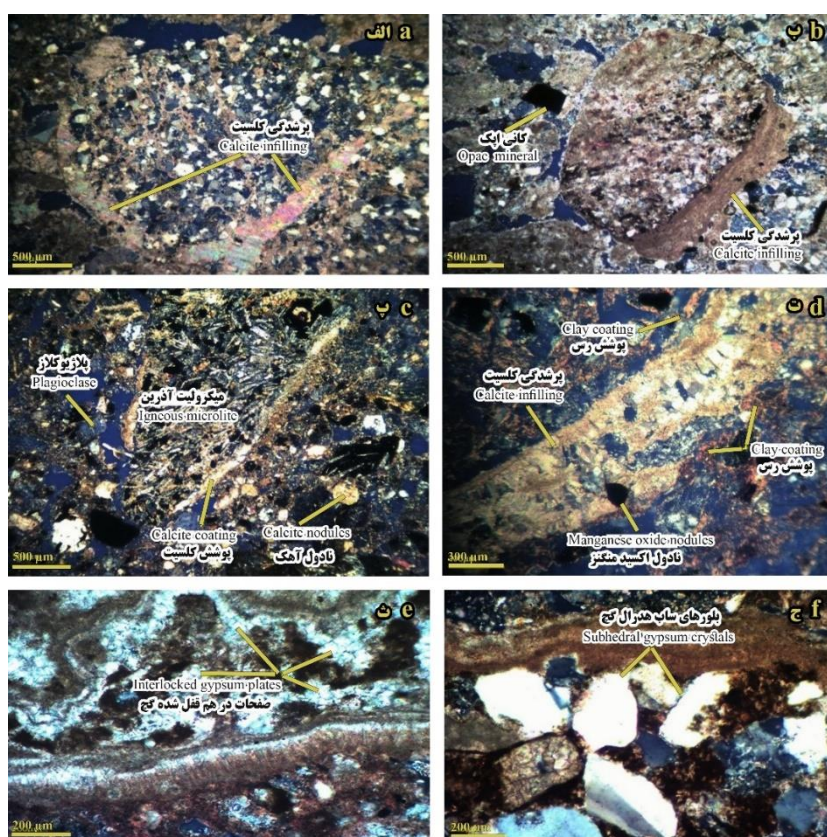
جدول ۳- توصیف ویژگی‌های میکرومورفولوژی خاکرخ‌ها

Table 3- Micromorphological description of pedons

خاکرخ Pedon	افق Horizon	عوارض خاک‌ساخت Pedofeatures	بی فابریک b-fabric	نسبت ذرات درشت به ریز C/F related	حفرات - ساختمان Pore- Structure
3	Bk	پوشش کلسیت - Calcite coating پرشدگی کلسیت - Calcite infilling	کلسیتیک کریستالیک Calcitic crystallitic	2/8 پورفیریک دو فاصله، مونیک ریز Double-spaced porphyric, Fine monic	کانال - مکعبی بدون زاویه خوب Channel- Well subangular blocky
4	Bk	پوشش کلسیت - Calcite coating پرشدگی کلسیت - Calcite infilling نادول کلسیت - Calcite nodule	کلسیتیک کریستالیک Calcitic crystallitic	4/6 پورفیریک تک فاصله Single-spaced porphyric	وگ - مکعبی بدون زاویه متوسط Vugh- Moderately subangular blocky
5	Btkb	عارضه مرکب پوشش کلسیت - پوشش رس Juxtaposed calcite coating - clay coating نادول اکسید منگنز - Mn oxide nodule	لکه‌ای موزاییکی Mosaic speckled	6/4 پورفیریک بسته، کیتونیک Close porphyric, Chitonic	وگ، کانال - مکعبی بدون زاویه خوب Vugh, Channel- Well subangular blocky
6	By	بلورهای ساب‌هدرال گچ Subhedral gypsum crystals صفحات درهم قفل شده گچ Interlocked plates of gypsum	ذره محور Granostriated	7/3 پورفیریک بسته Close porphyric	وگ، کانال - مکعبی بدون زاویه متوسط Vugh, Channel- Moderately subangular blocky
7	Bk	پوشش کلسیت - Calcite coating پرشدگی کلسیت - Calcite infilling	کلسیتیک کریستالیک Calcitic crystallitic	2/8 پورفیریک تک فاصله Single-spaced porphyric	وگ - مکعبی بدون زاویه متوسط Vugh- Moderately subangular blocky
7	Bkkm1	پوشش کلسیت - Calcite coating پرشدگی کلسیت - Calcite infilling صفحات درهم قفل شده گچ Interlocked plates of gypsum	کلسیتیک کریستالیک Calcitic crystallitic حفره محور Porostriated ذره محور Granostriated	6/4 کیتونیک Chitonic	وگ - توده‌ای Vugh- Massive
8	Btkb	پوشش کلسیت - Calcite coating پرشدگی کلسیت - Calcite infilling پوشش رسی - Clay coating	کلسیتیک کریستالیک Calcitic crystallitic لکه‌ای موزاییکی Mosaic speckled کلسیتیک کریستالیک Calcitic crystallitic	6/4 پورفیریک بسته، کیتونیک Close porphyric, Chitonic	وگ، کانال - مکعبی بدون زاویه خوب Vugh, Channel- Well subangular blocky
9	Btk	پوشش کلسیت - Calcite coating پوشش رسی - Clay coating	لکه‌ای موزاییکی Mosaic speckled حفره محور Porostriated	5/5 پورفیریک تک فاصله Single-spaced porphyric	وگ‌های ستاره‌ای - دانه‌ای متوسط Star shaped Vugh- Moderately granular

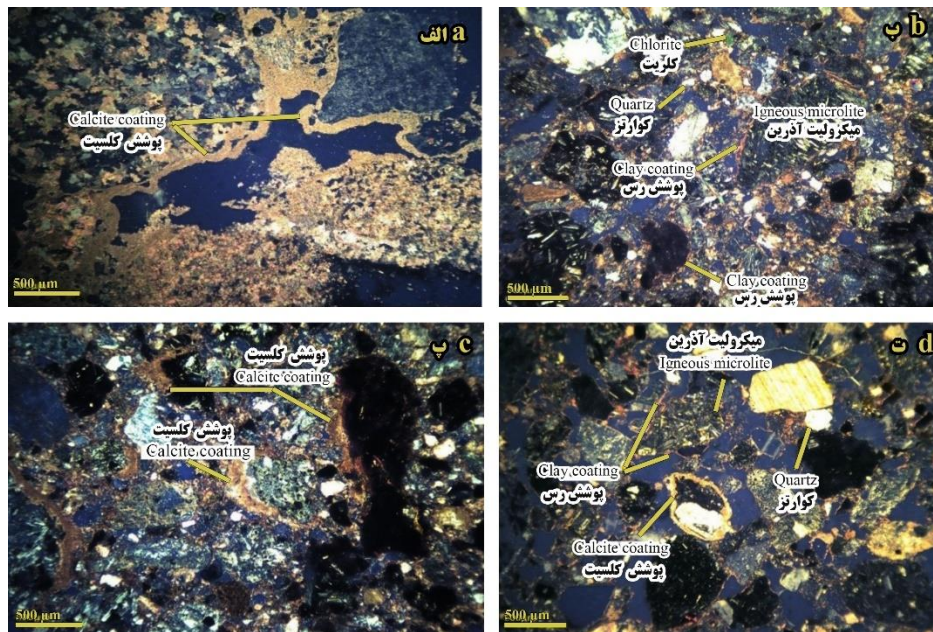
رسوب گذاری متناوب در اقلیم مرطوب تر گذشته است (۱۲). به طور کلی، پوشش های لامینار، آخرین مرحله تشکیل افق پتروکلسیک و محصول فزاینده افزایش متوالی کربنات ها است که با تغییر رژیم رطوبتی، حرارتی و محلول شیمیایی در زمان طولانی تر شکل گرفته و خود معرف تغییر شرایط اقلیمی می باشد (۳۹). در این افق، بی فابریک کلسیتیک کریستالیک به علت وجود ذرات کلسیت در متن خاک و ساختمان توده ای به علت سخت و سیمانی بودن به چشم می خورد (جدول ۳). به علاوه، در مطالعات میکرومورفولوژی خاکرخ ۷ صفحات درهم قفل شده گچ نیز مشاهده شد که می تواند در نتیجه اضافه شدن گچ به این خاک بعد از تشکیل افق پتروکلسیک باشد. به طور معمول انتظار وجود آهک و گچ در مجاورت هم به دلیل تفاوت در حلالیت آن ها نمی رود. اما در تحقیق حاضر، هر دو کانی به طور هم زمان مشاهده شدند.

وجود نادل های منگنز نیز نشانه آشکاری از پدوژنز و وجود شرایط اکسید و احیاء در اقلیم مرطوب منطقه مورد مطالعه است. همچنین موقعیت نادل اکسید منگنز (شکل ۳ ت) که به فاصله کمی از حفرات قرار دارد می تواند نشان گر وجود شرایط احیایی تر در فضای خلل و فرج و شرایط اکسیدی تر در ماتریکس خاک باشد (۵۸). در مقاطع نازک خاکرخ ۶ واقع در سطح دشت دامنه ای (منبع گچ در منطقه مورد مطالعه)، عوارض خاک ساخت گچ به صورت صفحات درهم قفل شده در قالب پرشدگی ها و بلورهای ساب هدرال گچ مشاهده شدند (شکل ۳ ث، ج). در سطح قدیمی فلات (خاکرخ ۷) عوارض خاک ساخت کلسیت به صورت پوشش و پرشدگی در افق پتروکلسیک نمود پیدا کردند (شکل ۴ الف) که ناشی از انحلال و آبشویی آهک از افق های فوقانی می باشند. حال با توجه به انحلال کم آهک و قدیمی بودن سطح، اقلیم مرطوب تر گذشته توجیه کننده این عوارض خاک ساخت است. همچنین تشکیل افق پتروکلسیک همراه با پوشش لایه های مطبق و خطی نشان دهنده آبشویی و



شکل ۳- مقاطع نازک (XPL) افق Bk - خاکرخ ۳ (الف، ب)، افق Bk - خاکرخ ۴ (پ)، افق Btkb - خاکرخ ۵ (ت)، افق By1 - خاکرخ ۶ (ث)، افق By1 - خاکرخ ۶ (ج)

Figure 3- Thin sections (XPL) of Bk horizon- pedon 3 (a, b), Bk horizon- pedon 4 (c), Btkb horizon- pedon 5 (d), By1 horizon- pedon 6 (e), By1 horizon- pedon 6 (g)



شکل ۴- مقاطع نازک (XPL) افق Bkkm1- خاکرخ ۷ (الف)، افق Btkb- خاکرخ ۸ (ب، پ)، افق Btk- خاکرخ ۹ (ت)
Figure 4- Thin sections (XPL) of Bkm1 horizon- pedon 7 (a), Btkb horizon- pedon 8 (b, c), Btk horizon- pedon 9 (d)

اراضی است که باعث ایجاد زمان کافی برای شست و شوی کربنات‌ها از افق سطحی و انتقال به طرف پایین ذرات رس می‌شود (۳۱). به دلیل وجود رشته کوه آذرین هزار در منطقه در اکثر مقاطع مورد مطالعه در اشکال اراضی مختلف میکرولیت‌های آذرین به چشم می‌خورند.

نتیجه‌گیری

- ۱- تشکیل افق آرجیلیک در سطوح فلات و دشت واقع در رژیم رطوبتی اریدیک به رطوبت قابل دسترس بیش‌تر در اقلیم گذشته نسبت داده شد.
- ۲- موقعیت ژئومورفیک تأثیر به‌سزایی بر میزان فرآیندهای آهکی شدن، گچی شدن، سخت و سیمانی شدن افق‌ها داشته است.
- ۳- اقلیم، عامل مؤثری در تعیین منشأ کانی‌های رسی (زمین‌ساخت یا خاک‌ساخت) بود.
- ۴- مطالعات میکرومورفولوژی، قدیمی‌بودن خاک‌های واقع بر سطح فلات را از طریق وجود پوشش‌های کلسیت در افق پتروکلسیک خاکرخ ۷ و عوارض خاک‌ساخت مرکب خاکرخ ۸ به اثبات رساند.
- ۵- تغییر رژیم رطوبتی از اریدیک به زیریک باعث تغییر رده از اریدی سول به اینسپتی سول (۵۴) گردید. در مقابل، رده‌بندی خاک‌ها در سامانه رده‌بندی جهانی (۲۵) تغییر نیافت.
- ۶- اقلیم و سطح ژئومورفیک بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، میکرومورفولوژی و کانی‌شناسی خاک‌ها و در نهایت طبقه‌بندی خاک‌های منطقه مؤثر بوده است.

اگر گچ قبل از آهک تجمع می‌یافت، با توجه به حلالیت بالاتر گچ نسبت به آهک، می‌بایست در هنگام تجمع آهک، گچ شسته می‌شد. لذا، اگرچه پوشش گچی روی پوشش آهکی (پوشش مرکب) دیده نشده است، اما دلیل دیگری غیر از قدیمی‌تر بودن آهک‌های تجمع یافته نسبت به گچ نمی‌تواند وجود داشته باشد. به این مفهوم که ابتدا آهک در زمان‌های مرطوب‌تر تجمع یافته و سپس با ایجاد دوره‌های خشک‌تر و افزایش گچ، این کانی نیز به خاک اضافه گردیده و در مجاور آهک قرار گرفته است.

در مطالعه مقاطع نازک افق Btkb خاکرخ ۸، عوارض خاک‌ساخت کلسیت به‌صورت لایه‌ای در اطراف خاکدانه‌ها و کانی‌ها به همراه پوشش رس مشاهده شد (شکل ۴ ب، پ). حال با توجه به وجود رژیم رطوبتی اریدیک، این امر مؤید قدیمی بودن این افق و ارتباط آن با اقلیم گذشته است. بی‌فابریک کلسیتیک کریستالیک و نیز بی‌فابریک لکه‌ای در این افق به‌وضوح مشاهده شدند (جدول ۳). بی‌فابریک لکه‌ای در نتیجه آب‌شویی بخشی از آهک به اعماق زیرین و ویژگی بی‌رفرنژانس رس ایجاد شده است (۱۸).

در بررسی‌های میکرومورفولوژی افق Btk سطح کم‌شیب دشت، پوشش‌های رس و پوشش‌های کلسیت مشاهده شدند (شکل ۴ ت). به‌نظر می‌رسد رطوبت قابل دسترس بیش‌تر در اقلیم گذشته در ابتدا باعث خروج کربنات‌ها از افق‌های بالایی و در نهایت باعث انتقال و تجمع رس در این افق شده است. هم‌چنین این افق دارای بی‌فابریک‌های کلسیتیک کریستالیک و لکه‌ای می‌باشد (جدول ۳). تشکیل افق آرجیلیک با بی‌فابریک لکه‌ای نشان دهنده پایداری

منابع

- 1- Ahmadipour H., and Maleki L. 2009. Volcanology and pathogenesis of Hezar volcanic complex in south west of Rayen (Kerman Province). Iranian Journal of Geology, 3 (10): 47-58. (in Persian)
- 2- Anjos L.H., Fernandes M.R., Pereira M.G., and Franzmeier D.P. 1998. Landscape and pedogenesis of an Oxisols-Inceptisols-Ultisols sequence in southeastern Brazil. Soil Science Society of America Journal, 62: 1651-1659.
- 3- Banaei H.M. 1998. Soil Moisture and Temperature Regimes Map of Iran (1:2500000). Soil and Water Research Institute, Iran.
- 4- Bayat A., Farpoor M.H., and Jafari A. 2016. Physicochemical properties, micromorphology and clay mineralogy of soils affected by geological formations, geomorphology and climate. Journal of Water and Soil, 30 (5): 1515-1530. (in Persian with English abstract)
- 5- Bockheim J.G., and Douglass D.C. 2006. Origin and significance of calcium carbonate in soils of southwestern Patagonia. Geoderma, 136: 751-762.
- 6- Bojko O., and Kabala C. 2017. Organic carbon pools in mountain soils-sources of variability predicted changes in relation to climate and land use changes. Catena, 149: 209-220.
- 7- Bonifacio E., Falsone G., Simonov G., Sokolova T., and Tolpeshta I. 2009. Pedogenic Processes and clay transformations in bisequal soils of the southern Taiga zone. Geoderma, 149: 66-75.
- 8- Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agron, 54: 464-465.
- 9- Bull W.B. 1991. Geomorphic Response to Climatic Change. Oxford University Press, New York.
- 10- Dixon J.B., and Weed S.B. 1989. Minerals in Soil Environments. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- 11- Donkin M.J., and Fey M.V. 1993. Relationships between soil properties and climatic indices in southern Natal. Geoderma, 59: 197-212.
- 12- Drees L.R., and Wilcing L.D. 1987. Micromorphic record and interpretations of carbonate forms in the rolling plains of Texas. Geoderma, 40: 157-175.
- 13- Elliott P.E., and Dorhan P.J. 2009. Clay accumulation and argillic-horizon development as influenced by aeolian vs. local parent material on quartzite and limestone-derived alluvial fans. Geoderma, 151: 98-108.
- 14- Farpoor M.H., Eghbal M.K., and Khademi H. 2003. Genesis and micromorphology of saline and gypsiferous Aridisols on different geomorphic surfaces in Nough area, Rafsanjan. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science, 7 (3): 71-93. (in Persian)
- 15- Farpoor M.H., Khademi H., and Eghbal M.K. 2002. Genesis and distribution palygorskite and associated clay minerals in Rafsanjan soils on different geomorphic surface. Iran Agricultural Research, 21: 39-60.
- 16- Farpoor M.H., Neyestani M., Eghbal M.K., and Esfandiarpour Borujeni I. 2012. Soil-geomorphology relationships in Sirjan playa, south central Iran. Geomorphology, 138: 223-230.
- 17- Fedoroff N., Courty M.A., and Thompson M.L. 1990. Micromorphological evidence of paleoenvironmental change in Pleistocene and Holocene paleosols. Developments in Soil Science, 19: 653-665.
- 18- Fitzpatrick E.A. 1993. Soil Microscopy and Micromorphology. John Wiley and Sons, Chichester.
- 19- Geographic Institute and Defence Ministry. 2003. Geographic Glossary of Kerman Province Villages, Kerman City.
- 20- Ghergherechi S. 2007. Micromorphology and Genesis of the Soils Formed on a Climotoposequence, north-south western Golestan Province. M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian)
- 21- Gile L.H. 1993. Carbonate stages in study soils of the Leasburg surface, southern New Mexico. Soil Science, 156: 101-110.
- 22- Graham R.C., and Boul S.W. 1990. Soil-geomorphic relations on the Blue Ridge Front: II. Soil characteristics and pedogenesis. Soil Science Society of America Journal, 54 (5): 1367-1377.
- 23- Hojati S., Khademi H., and Cano A.F. 2010. Palygorskite formation under the influence of saline and alkaline groundwater in central Iranian soils. Soil Science, 175: 303-312. (in Persian)
- 24- Hopkins D.G., and Franzen D.W. 2003. Argillic horizons in stratified drift: luverne end moraine, eastern North Dakota. Soil Science Society of America Journal, 67: 1790-1796.
- 25- IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, Italy.
- 26- Jackson M.L. 1975. Soil Chemical Analysis: Advanced Course. University of Wisconsin, College of Agriculture, Department of Soils, Madison, Wisconsin.
- 27- Jafari M., and Sarmadian F. 2003. Fundamentals of Soil Science. Tehran University Press. (In Persian)
- 28- Jolicoeur S., Ildefons P., and Bouchard M. 2000. Kaolinite and gibbsite weathering of biotite within saprolites and soils of central Virginia. Soil Science Society of America Journal, 64: 1118-1129.

- 29- Khademi H., and Mermut A.R. 1998. Source of palygorskite gypsiferous Aridisols and associated sediments from central Iran. *Clay Minerals*, 33: 561-578.
- 30- Khademi H., and Mermut A.R. 2003. Micromorphology and classification of Argids and associated gypsiferous Aridisols from central Iran. *Catena*, 54: 430-455.
- 31- Khormali F., Abtahi A., and Stoops G. 2006. Micromorphology of calcitic features in highly calcareous soils of Fars Province, southern Iran. *Geoderma*, 132: 31-46.
- 32- Khormali F., Abtahi A., Mahmoodi S., and Stoops G. 2003. Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semiarid regions of southern Iran. *Catena*, 53: 273-301.
- 33- Khormali F., and Abtahi A. 2003. Origin and distribution of clay minerals in calcareous arid and semi-arid soils of Fars Province, southern Iran. *Clay Minerals*, 38: 511-527.
- 34- Kittrick J.A., and Hope E.W. 1963. A procedure for the particle size separation of soil for x-ray diffraction analysis. *Soil Science Society*, 96: 312-325.
- 35- Lanyon L.E., and Heald W.R. 1982. Magnesium, calcium, strontium and barium. p. 247-260. In A.L. Page et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 2*. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 36- Liaghat M., and Khormali F. 2010. Micromorphology of development of some loess-derived soils of western Golestan Province along a climo-topo-biosequence. *Journal of Water and Soil Conservation*, 18 (1):1- 32. (in Persian with English abstract)
- 37- Malkooti M.J., and Homayi M. 1994. *Soil Fertility in Arid Regions*. Tarbiat Modarres University Press. (In Persian)
- 38- Moazallahi M., and Farpoor M.H. 2012. Soil genesis and clay mineralogy along xeric-aridic climotoposequence in south central Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14: 683-696.
- 39- Monger H.C., and Adams H.P. 1996. Micromorphology of calcite-silica deposits, Yucca Mountain, Nevada. *Soil Science Society of America Journal*, 60: 519-530.
- 40- Murphy C.P. 1986. *Thin Section Preparation of Soils and Sediments*. AB Academic Publishers, Berkhamsted, Herts, UK.
- 41- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic matter. p. 539-577. In A.L. Page et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 2*. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 42- Nelson R.E. 1982. Carbonate and gypsum. p. 181-196. In A.L. Page et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 2*. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 43- Nettleton W.D., Flach K.W., and Brusher B.R. 1969. Argillic horizons without clay skins. *Soil Science Society of America, Proceedings*, 33: 121-125.
- 44- Nodert L., Von Fischer J., and Tieszen L. 2007. Late Quaternary temperature record from buried soils of the North American Great Plains. *Geology*, 35: 159-162.
- 45- Owliaie H.R., Abtahi A., and Heck R.J. 2006. Pedogenesis and clay mineralogical investigation of soils formed on gypsiferous and calcareous materials, on a transect, southwestern Iran. *Geoderma*, 134: 62-81.
- 46- Page A.L., Miller R.H., and Kenney D.R. 1992. *Methods of Soil Analysis. Part 2*. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 47- Paquet H., and Millot C. 1972. Geochemical evolution of clay minerals in the weathered products and soils of Mediterranean climates. p. 199-202. In *Proceedings of the 9th International Clay Conference*. Madrid, Spain.
- 48- Phillips J., Turkington A.V., and Marine D.A. 2008. Weathering and vegetation affection early stages of soil formation. *Catena*, 72: 21-28.
- 49- Rameshni K., and Abtahi A. 1995. Effect of climate and topography on the formation of the soils of Kuhgiluyeh area. In *Proceedings of the 4th Congress of Soil Science*. Isfahan, Iran.
- 50- Saez A., Ingles M., Cabrera L., and Heras A. 2003. Tectonic paleo environmental forcing of clay-mineral assemblages in non marine setting: the Oligocene-Miocene Aspones Basin (Spain). *Sedimentary Geology*, 159: 305-324.
- 51- Salehi M.H., Khademi H., and Eghbal M.K. 2002. Genesis of clay minerals in soils from Chaharmahal Bakhtiari Province, Iran. *Book of Abstracts of the Conference on Sustainable Use and Management of Soils in Arid and Semiarid Region*. Cartagena, Spain.
- 52- Sanjari S., Farpoor M.H., Eghbal M.K., and Esfandiarpour Boroujeni I. 2011. Genesis, micromorphology and clay mineralogy of soils located on different geomorphic surfaces in Jiroft area. *Journal of Water and Soil*, 25 (2): 411-425. (in Persian with English abstract)
- 53- Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C., and Soil Survey Staff. 2012. *Field Book for Describing and Sampling Soils, Version 3.0*. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, Nebraska.
- 54- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th edition. United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C., USA.
- 55- Stoops G. 2003. *Guidelines for the Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.

- 56- Toomanian N., Jalalian A., Eghbal M.K. 2001. Genesis of gypsum enriched soils in north-west Isfahan, Iran. *Geoderma*, 99: 199-224.
- 57- Yoo K., Amundson R., Heimsath A.M., and Dietrich W.E. 2006. Spatial patterns of soil organic carbon on hillslopes: integrating geomorphic processes and the biological C cycle. *Geoderma*, 130: 47-5.
- 58- Zarate M.A., Kemp R.A., and Blasi A.M. 2002. Identification and differentiation of Pleistocene paleosols in northern Pampas of Bueneos Aires, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 15: 303-310.
- 59- Zeraatpishe M., and Khormali F. 2011. The investigation of soil formation and evolution of losses derived soils in a climosequence, case study: eastern of Golestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 18 (2): 45-64. (in Persian with English abstract)



Soil Genesis as Affected by Climate and Geomorphic Surface in Rayen Area, Kerman Province

L. Nezhad zamani¹- M.H. Farpoor²- A. Jafari³

Received: 25-09-2017

Accepted: 06-11-2017

Introduction: Genesis and development of soils are highly affected by soil forming factors and processes. Climate and topography (landform) are among the factors affecting weathering of parent material and genesis and development of soils in an area. Besides, various morphological, physical, and chemical properties, micromorphology, and clay mineralogy of soils at different geomorphic positions are usually affected by different soil forming factors including parent material and climate. The objectives of the present research were to study the effect of climate and geomorphology on physicochemical properties, micromorphology, and clay mineralogy of the soils in Rayen area, Kerman Province.

Materials and Methods: The study area starts from Hezar mountain elevations close to Rayen city (south east of Kerman Province) and extends to plateaus surfaces around Bam city. Quaternary and Neogene formations were found from geology point of view. Mean annual precipitation is in the range of 200-300 mm. Five landforms including rock pediment, mantled pediment, piedmont plain, plateaus, and valley were investigated during field work followed by topography, geology, and Google map studies in the area. According to 1:2500000 map provided by Soil and Water Research Institute, xeric and aridic soil moisture regimes together with mesic soil temperature regime were found in the area. Nine representative pedons were studied based on climatic regimes and different geomorphic surfaces. Pedons 1 and 2 were located on rock pediment with an aridic soil moisture regime. On the other hand, pedon 3 was located on the same surface, but with xeric moisture regime. Pedons 4 and 5 were also located on mantled pediment with aridic and xeric moisture regimes, respectively. Pedon 6 was located on piedmont plain and in the aridic moisture zone. Pedons 7, 8 (Plateaus), and 9 (Valley) were all in the aridic moisture zone. Physical and chemical properties, micromorphology, and clay mineralogy of soils were investigated and the soils were classified using USDA Soil Taxonomy (12th edition) and latest edition of World Reference Base for Soil Resources (WRB) systems.

Results and Discussion: Cambic, gypsic, argillic (or argic), calcic, and petrocalcic horizons were investigated during field and laboratory studies. Typic Haplocambids (pedons 1 and 2), Typic Calcixerepts (pedon 3), Typic Torriorthents (pedon 8), Calcic Petrocalcids (pedon 7), Typic Calcigypsis (pedon 6), Typic Xerorthents (pedon 5), Typic Haplocalcids (pedon 4), and Typic Calciargids (pedon 9) were classified using Soil Taxonomy (2014) and Gypsisols (pedon 6), Calcisols (pedons 3, 4, 7, and 9), Cambisols (pedons 1 and 2), and Regosols (pedons 5 and 8) Reference Soil Groups were determined using WRB (2015) system. Electrical conductivity increased from rock pediment toward valley and decreased from aridic toward xeric soil moisture regimes. Formation of argillic horizon in pedon 5 (Xeric moisture regime) was attributed to the climate of present time, but pedons 8 and 9 with aridic moisture regime could probably have experienced a climate with more available humidity for argillic horizon to be formed. Besides, petrocalcic horizon formation in pedon 7 was also attributed to a climate with more available humidity in the past. A buried soil (Btkb horizon) was determined in pedons 5 and 8 under the modern soil. Soil moisture regime change from aridic to xeric in rock pediment surface caused change of Aridisols to Inceptisols, but classification of soils in WRB system, was not affected. Secondary forms of calcium carbonate including powdery pocket, soft masses, and mycelium and secondary gypsum such as fine and coarse pendants were found during field studies. Calcite, gypsum, and clay coatings and infillings together with isolated gypsum crystals and gypsum interlocked plates were among dominant micromorphological pedofeatures investigated. Calcite coatings on aggregates and soil particles associated with clay coating prove the role of paleoclimate in soil formation. On the other hand, presence of manganese nodules is an evidence of oxidation/reduction condition taken place in the xeric moisture conditions of pedon 5 (rock pediment). Illite, chlorite, kaolinite, and smectite were investigated in both rock and mantled pediments, but palygorskite was only found in mantled pediments. Climate also played a significant role in

1, 2 and 3- M.Sc. Student, Professor and Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Respectively
(* - Corresponding Author Email: farpoor@uk.ac.ir)

determining the source (pedogenic or geogenic) of clay minerals.

Conclusions: Results of this study clearly showed the close relationship among soil formation, topography (geomorphic surface) and climate. Soil physicochemical properties, micromorphology, clay mineralogy, and soil classification were highly affected by climate and geomorphology.

Keywords: Argillic horizon, Bam, Paleoclimate, Palygorskite, Pedofeatures



بررسی رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی از برخی کانی‌های پتاسیم‌دار توسط عصاره‌گیرهای مختلف

ساناز اشرفی سعیدلو^{۱*} - میر حسن رسولی صدقیانی^۲ - عباس صمدی^۳ - محسن برین^۴ - ابراهیم سپهر^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳

چکیده

به منظور مقایسه سینتیک رهاسازی پتاسیم از کانی‌های پتاسیم‌دار و نیز انتخاب بهترین معادله سینتیکی توصیف کننده روند رهاسازی پتاسیم توسط عصاره‌گیرهای آلی و معدنی، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل در ۳ تکرار اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل ۳ نوع عصاره‌گیر (اسید اگزالیک ۰/۰۱ مولار، کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار، شاهد (آب مقطر))، ۳ کانی پتاسیم‌دار (فلدسپار، ایلیت و فلوگوپیت) و ۱۰ زمان (۱، ۲، ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۴، ۳۲، ۴۸ و ۶۴ ساعت) بودند. مقدار پتاسیم آزاد شده با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر طی زمان‌های مختلف در شرایط آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد و داده‌ها به معادلات سینتیکی مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، تابع توانی، پخشیدگی پارابولیک و الوویچ برازش داده شد. نتایج نشان دهنده اثر معنی‌دار نوع عصاره‌گیر بر سینتیک رهاسازی پتاسیم بود، بطوریکه میزان پتاسیم آزاد شده در نمونه‌های عصاره‌گیری شده با اسید اگزالیک در مقایسه با نمونه‌های عصاره‌گیری شده با کلرید کلسیم و شاهد (آب مقطر) به ترتیب ۱/۴۸ و ۲/۳۵ برابر بیشتر بود. کانی‌های مختلف نیز مقادیر متفاوتی از پتاسیم را آزاد نمودند. رهاسازی پتاسیم از فلوگوپیت نسبت به فلدسپار و ایلیت به ترتیب ۱/۹۹ و ۲/۹۵ برابر بیشتر بود. بیشترین غلظت پتاسیم نیز (۴۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار عصاره‌گیری شده با اسید اگزالیک و در حضور کانی فلوگوپیت مشاهده گردید. بطوری که مقدار پتاسیم در این تیمار ۳/۱۵ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. برازش معادلات سینتیکی نشان داد که معادلات تابع توانی و پخشیدگی پارابولیک با بیشترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین خطای استاندارد (SE)، بهترین مدل برای برازش داده‌ها بودند این در حالیست که مدل مرتبه دوم قادر به توجیه رهاسازی پتاسیم نبود. چنین استنباط می‌گردد که سینتیک رهاسازی پتاسیم توسط عوامل مختلفی از جمله نوع کانی و نوع عصاره‌گیر تحت تأثیر قرار می‌گیرد و عصاره‌گیر آلی توانایی بالاتری در استخراج پتاسیم غیر تبادلی از ساختار کانی‌ها دارد. همچنین تطبیق نتایج این تحقیق با معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک و تابع توانی حاکی از آن است که رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی از کانی‌ها می‌تواند متأثر از فرآیند پخشیدگی باشد و عبارت دیگر پخشیدگی پتاسیم به خارج از توده کانی، کنترل کننده سرعت آزاد شدن پتاسیم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اسید اگزالیک، رهاسازی پتاسیم، فلوگوپیت، معادلات سینتیکی، کلرید کلسیم

مقدمه

فعالیت پتاسیم در فاز محلول بسیار کم باشد (۲۲ و ۳۷). پتاسیم ساختمانی نیز که در ساختمان کانی‌های اولیه دارای پتاسیم نگه‌داری می‌شود، به آرامی در خاک هوازده شده و پتاسیم تبادلی و غیر تبادلی را تجدید می‌نماید (۳۳). بین اشکال مختلف پتاسیم رابطه تعادلی وجود دارد که این روابط تعادلی از نظر تغذیه گیاه دارای اهمیت بالایی هستند (۳۷، ۳۹ و ۴۰).

مهم‌ترین منابع پتاسیم در خاک‌ها آلومینوسیلیکات‌هایی مانند فلدسپارهای پتاسیم، میکاها و محصولات هوازدگی آن‌ها از جمله ورمی‌کولایت می‌باشند که حدود ۹۸ درصد از پتاسیم خاک را تشکیل می‌دهند (۲ و ۱۵). در تقسیم‌بندی کلی کانی‌های سیلیکاته، فلدسپارها در گروه تکتوسیلیکات‌ها قرار می‌گیرند. پتاسیم در فلدسپارها توسط پیوند کووالانسی درون چارچوب بلورها قرار گرفته است و رهاسازی پتاسیم تحت تأثیر هوازدگی صورت می‌گیرد (۲۹). در میکاها نیز که

پتاسیم یکی از عناصر غذایی ضروری و پرمصرف برای گیاهان محسوب می‌شود و در خاک معمولاً به اشکال محلول، تبادلی، غیر تبادلی و ساختمانی یافت می‌گردد (۱۵ و ۲۴). میزان پتاسیم محلول بسیار پایین است و حدود ۵ درصد از کل نیاز گیاه را در طی فصل رشد تأمین می‌نماید (۵ و ۲۴). پتاسیم غیر تبادلی از مکان‌های گوه‌ای و بین لایه‌ای میکاها که یون پتاسیم را تثبیت می‌کنند، آزاد می‌شود (۲۴). البته برای رها شدن پتاسیم از فرم غیر تبادلی لازم است

۱، ۲، ۳ و ۴ - به ترتیب دانشجوی دکتری علوم خاک، استادان، استادیار و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

(*) - نویسنده مسئول: (Email: sanazashrafi92@yahoo.com)

DOI: 10.22067/jsw.v31i6.67425

نوعی از فیلولسیلیکات‌های ۲:۱ می‌باشند، پتاسیم به وسیله نیروهای الکترواستاتیک نگه‌داری می‌شود (۲۹). هوادیدگی میکاها عمدتاً به وسیله غلظت یون هیدرونیوم در محیط خاک کنترل می‌گردد و ویژگی‌های ساختمانی کانی‌های میکایی مانند چرخش چهاروجهی، جهت‌گیری یون هیدروکسیل و اندازه ذرات در رهاسازی پتاسیم نقش مهمی ایفا می‌نمایند (۶). کانی‌های رسی موقعیت‌های مختلفی برای نگه‌داری پتاسیم دارند که شامل سطوح، لبه‌ها و لایه‌های داخلی می‌باشند. انرژی نگهداشت پتاسیم در هر یک از این موقعیت‌ها متفاوت است به‌طوری‌که پتاسیم موجود در سطوح با عمل تبادل، به راحتی خارج می‌شود در حالی که پتاسیم موجود در لبه‌ها و لایه‌های داخلی کانی‌ها به انرژی بیشتری جهت استخراج نیاز دارند، بنابراین می‌توان گفت که پتاسیم موجود در لایه‌های داخلی با قدرت بیشتری نسبت به سایر موقعیت‌ها نگه‌داری می‌گردد (۴ و ۷).

به منظور بررسی سرعت و روند رهاسازی پتاسیم از خاک‌ها، اجزای خاک و کانی‌های رسی، تاکنون عصاره‌گیرهای مختلفی از جمله اسید هیدروکلریک (۳۶)، اسیدهای آلی (۳ و ۲۵)، رزین‌های تبدلی (۹ و ۱۳)، تترا فیل بران سدیم (۷ و ۸) و نمک‌های معدنی (۱۷ و ۲۵) توسط محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در این بین اسیدهای آلی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند که از طریق تشکیل کمپلکس‌های آلی-فلزی، هوادیدگی کانی‌ها را تسهیل می‌نمایند. در بین اسیدهای آلی اسید اگزالیک، سیتریک و مالیک رایج‌تر می‌باشند و به مقدار بیشتری در محلول خاک وجود دارند و بر حرکت و وضعیت پتاسیم در خاک‌ها تأثیر می‌گذارند (۳۵). اسیدهای آلی با وزن مولکولی پایین به عنوان لیگاند عمل کرده و غلظت کل کاتیون‌های حل‌شده مانند آلومینیوم و آهن را در محلول خاک از طریق کمپلکس نمودن کاتیون‌های فلزی افزایش می‌دهند (۱۰، ۱۲ و ۱۶).

استفاده از اسیدهای آلی جهت عصاره‌گیری پتاسیم غیرتبادلی عمل ریشه را در جذب پتاسیم در حین کشت شبیه‌سازی می‌کند. مکانیزم اثر اسیدهای آلی به تفکیک یون هیدرونیوم و هم‌چنین تشکیل کمپلکس لیگاند آلی در محلول اسید نسبت داده می‌شود (۲۱). به این صورت که مولکول‌های سبک وزن اسیدهای آلی که دارای گروه‌های عامل COOH و OH می‌باشند، از طریق تشکیل کمپلکس با بعضی از یون‌های فلزی موجود در ساختار کانی‌ها تجزیه آن‌ها را تشدید می‌نمایند. ضمناً ضعیف شدن پیوند فلز-اکسیژن به ویژه در ساختمان اکتاهیدرال به علت پروتونه شدن گروه‌های OH و تشکیل کمپلکس درونی لیگاند‌های آلی با این فلزات باعث افزایش حلالیت کانی می‌گردد. سرعت رهاسازی پتاسیم تحت تأثیر نوع و مقدار اسید می‌باشد (۲۰). عوامل متعددی نظیر سرعت پخشیدگی اسیدهای آلی از محلول به محل واکنش در سطح کانی و سرعت پخشیدگی محصولات از محل انجام واکنش به توده محلول، زمان تماس بین

اسیدهای آلی و سطح کانی، درجه تفکیک اسیدهای آلی، موقعیت و نوع گروه‌های عاملی و تمایل اسیدهای آلی در تشکیل کمپلکس با فلزات، بر سرعت انحلال کانی‌های خاک و به تبع آن رهاسازی پتاسیم تأثیر می‌گذارند (۳۲).

سانگ و هوانگ (۱۹۸۸) با مطالعه اثر اسیدهای آلی سیتریک و اگزالیک بر رهاسازی پتاسیم از کانی‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که میزان رهاسازی پتاسیم به ترتیب زیر کاهش می‌یابد: بیوتیت < میکروکلین $\approx$ ارتوکلاز < مسکوویت (۳۵). پوهلمن و مک‌کول (۱۹۸۶) نیز دریافتند که سرعت رهاسازی عناصری نظیر منیزیم، پتاسیم و آلومینیوم توسط موادی با عوامل کمپلکس‌کننده (اسیدهای آلی) در مقایسه با مواد فاقد عوامل کمپلکس‌کننده بیشتر است. هم‌چنین آن‌ها گزارش نمودند که توانایی متفاوت اسیدهای آلی در رهاسازی پتاسیم به میزان پخشیدگی اسیدهای آلی در خاک، توانایی پخشیدگی کمپلکس فلز-اسید، زمان تماس اسید با سطح کانی، غلظت اسید در خاک و واکنش خاک بستگی دارد (۳۰). تو و همکاران (۲۰۰۷) تأثیر اسید اگزالیک را بر رهاسازی پتاسیم در چهار کانی پتاسیم‌دار بیوتیت، فلوگوپیت، مسکوویت و میکروکلین بررسی کردند و نتیجه گرفتند که پتاسیم رها شده از کانی‌ها به ترتیب بیوتیت < فلوگوپیت < مسکوویت < میکروکلین است (۳۴ و ۴۱). نوروزی و همکاران (۲۰۱۲) نیز در بررسی رهاسازی پتاسیم از دو کانی فلوگوپیت و مسکوویت به وسیله اسیدهای آلی سیتریک، اگزالیک و مالیک به روش عصاره‌گیری معمولی نشان دادند که سرعت رهاسازی پتاسیم توسط اسید سیتریک بیشتر از سایر اسیدها از جمله اسید اگزالیک است (۲۸). بحرینی طوحانی و همکاران (۲۰۱۰) با مطالعه سرعت آزاد شدن پتاسیم غیرتبادلی در دوازده سری غالب خاک‌های زراعی استان گلستان، با استفاده از دو عصاره‌گیر اسید سیتریک و کلرید کلسیم گزارش دادند که عصاره‌گیرهای مختلف میزان متفاوتی از پتاسیم غیرتبادلی را از خاک‌ها آزاد می‌کنند و در حضور اسید سیتریک مقدار پتاسیم رها شده بیشتر می‌باشد (۴). در بررسی توانایی اسید آلی و نمک معدنی در سیتیک رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی، بحرینی طوحانی و همکاران (۲۰۰۹) مشاهده نمودند که اسید آلی نسبت به کلرید کلسیم که یک نمک معدنی است، بطور میانگین میزان پتاسیم بیشتری را رهاسازی نمود. بطوریکه میانگین پتاسیم عصاره‌گیری شده توسط اسید اگزالیک ۲/۳۳ برابر میانگین پتاسیم عصاره‌گیری شده با کلرید کلسیم بود (۳).

تبدیل پتاسیم از شکلی به شکل دیگر جزئی از دینامیک پتاسیم در خاک بوده و در طول زمان ممکن است پتاسیم‌های ساختمانی و تثبیت شده به شکل محلول یا تبادلی و یا بالعکس و شکل‌های تبدلی و محلول به شکل تثبیت شده تبدیل شوند. از آنجایی که این تبدیل‌ها بر قابلیت دسترسی پتاسیم برای گیاه تأثیرگذارند، مطالعه فرآیندهای

وابسته به زمان، که تغییرات این اشکال را بررسی می‌کنند ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین اهداف این مطالعه شامل بررسی سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی، مقایسه توانایی عصاره‌گیرهای آلی و معدنی در رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی و توصیف سرعت آزاد شدن پتاسیم غیرتبادلی با معادلات سینتیکی مختلف بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل ۳ نوع عصاره‌گیر (اسید اگزالیك ۰/۰۱ مولار، کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار و شاهد (آب مقطر))، ۳ کانی پتاسیم‌دار (فلدسپار، ایلیت و فلوگوپیت) و ۱۰ زمان (۱، ۲، ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۴، ۳۲، ۴۸ و ۶۴ ساعت) بودند.

آماده‌سازی کانی‌های میکایی و سینتیک رهاسازی پتاسیم

کانی‌های مورد مطالعه شامل فلدسپار، فلوگوپیت و ایلیت بودند که ترکیب عنصری آن‌ها با استفاده از دستگاه طیف سنجی فلورسنس پرتوایکس (X-ray fluorescence or XRF) مدل S4 Pioneer شناسایی شدند (جدول ۱). کانی‌های مورد استفاده به وسیله آسیاب

جدول ۱- درصد اکسیدی عناصر اصلی تشکیل دهنده کانی‌های مورد مطالعه به روش XRF

Table 1- The oxidic amount of main elements constituent studied minerals with XRF method

نوع کانی Mineral type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI*	Total
	(%)											
فلدسپار Feldspar	64.5	17.44	0.01	0.25	2.76	13.67	0.11	0.01	-	0.01	0.42	99.28
فلوگوپیت Phlogopite	42.20	14.36	23.81	4.96	0.23	9.66	2.03	0.11	0.03	0.17	1.82	99.47
ایلیت Illite	47.32	34.24	0.08	1.82	0.62	10.74	0.09	0.11	0.03	0.06	4.44	99.26

*: کاهش وزن در دمای بالا (Loss on ignition)

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Q_1 - Q_2)^2}{n-2}}$$

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد توسط نرم افزار MSTAT-C، برازش مدل‌ها و رسم شکل‌ها توسط ۲۰۰۷ Excel انجام گرفت.

بررسی‌های سینتیکی

در این مطالعه از معادلات سینتیکی مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، تابع توانی، پخشیدگی پارابولیک و الویچ ساده شده در برازش داده‌های رهاسازی پتاسیم از کانی‌های پتاسیم‌دار استفاده شد (جدول ۲). (۱). معادلاتی که ضریب تبیین (R^2) بزرگتر و خطای استاندارد برآورد (SE) کمتری داشتند به عنوان معادلاتی که سرعت رهاسازی پتاسیم را بهتر توصیف می‌کنند، انتخاب گردیدند. خطای استاندارد برآورد بصورت زیر تعریف می‌شود که در آن، Q_1 و Q_2 به ترتیب مقدار پتاسیم غیرتبادلی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده به وسیله مدل در زمان t و n تعداد اندازه‌گیری می‌باشند.

جدول ۲- معادلات سینتیکی استفاده شده
 Table 2- Kinetic equations that were used

شماره Number	مدل Model	معادله Equation	واحد ضریب a Unit of a	واحد ضریب b Unit of b
1	مرتبه صفر Zero order	$(q_t - q_0) = q_0 - bt$	$q_0 = a = \text{mg kg}^{-1}$	$\text{mg kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$
2	مرتبه اول First order	$\ln (q_0 - q_t) = \ln q_0 - bt$	$\text{mg kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$	$(\text{mg kg}^{-1})^{-1}$
3	مرتبه دوم Second order	$1/q_t = a - bt$	mg kg^{-1}	$\text{mg kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$
4	تابع توانی Power function	$\ln q_t = \ln a + b \cdot \ln t$	mg kg^{-1}	$\text{mg kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$
5	الوویچ ساده شده Simple Elovich	$q_t = a + b \cdot \ln t$	mg kg^{-1}	$\text{mg kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$
6	پخشیدگی پارابولیک Parabolic diffusion	$q_t = a + b \cdot t^{0.5}$	mg kg^{-1}	$\text{mg kg}^{-1} \text{ min}^{-1/2}$

q_t : مقدار پتاسیم آزاد شده در زمان t ; q_0 : پتاسیم در زمان تعادل در انتهای آزمایش (حداکثر پتاسیم رها شده)، a و b ضرایب ثابت و t زمان بر حسب ساعت می‌باشد
 q_t : Amount of released potassium in time t , q_0 : potassium in balance time at the end of experiment (maximum released potassium), a and b are constant coefficients, t is time (hr)

نتایج و بحث

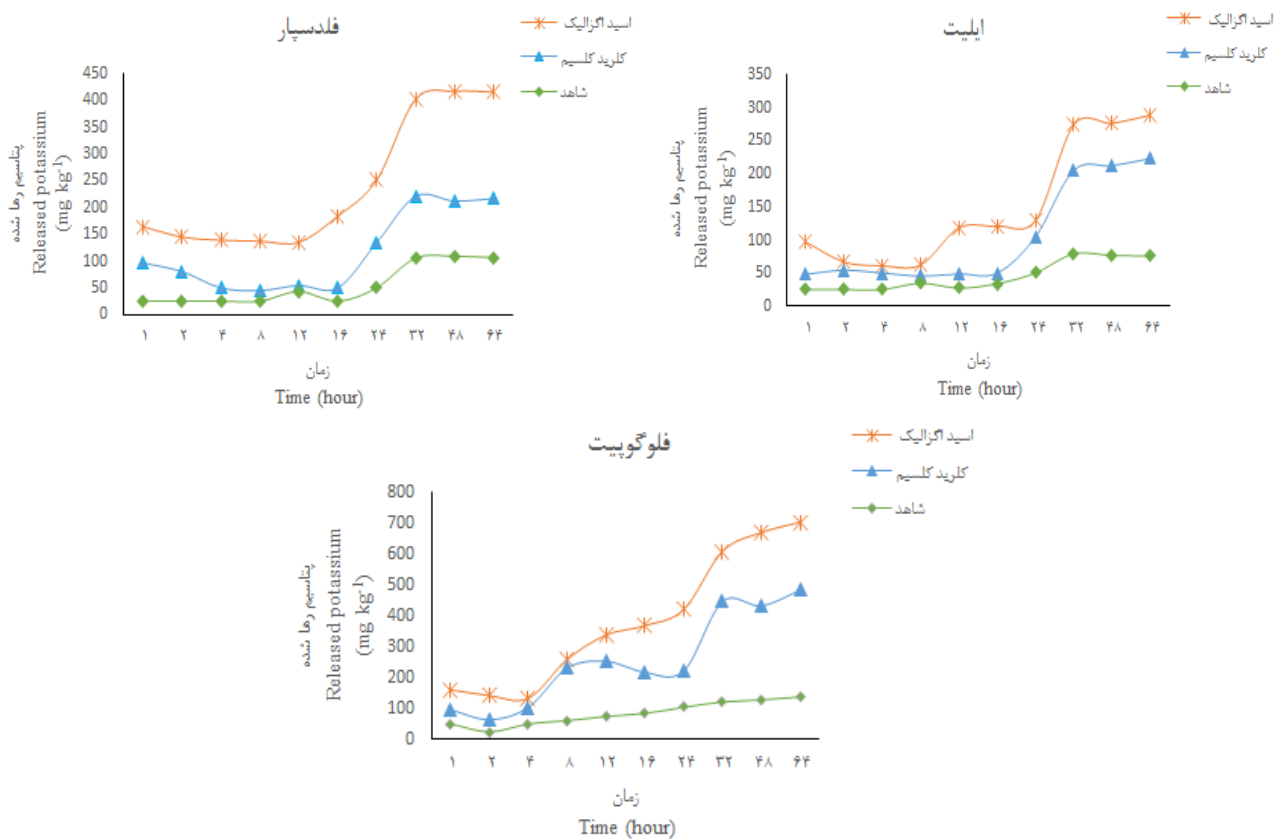
روند رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی

روند رهاسازی پتاسیم از کانی‌های فلدسپار، ایلیت و فلوگوپیت به وسیله عصاره‌گیرهای اسید اگزالیک و کلرید کلسیم در شکل ۱ ارائه گردیده است. الگوی رهاسازی پتاسیم در هر دو عصاره‌گیر مشابه است، اما اسید اگزالیک در مقایسه با کلرید کلسیم مقدار پتاسیم بیشتری را آزاد نموده است. بالا بودن مقدار پتاسیم در شرایط استفاده از اسید اگزالیک ۰/۰۱ مولار ناشی از حضور یون H^+ حاصل از تجزیه این اسید و هم-چنین قابلیت کمپلکس‌کنندگی لیگاندهای اگزالات است. اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم که دارای گروه‌های عاملی $COOH$ و OH هستند به واسطه‌ی توانایی تشکیل کمپلکس فلز- لیگاند آلی با برخی از یون‌های فلزی موجود در ساختمان کانی، تجزیه کانی را تشدید می‌نمایند (۲۱ و ۳۵). به عبارت دیگر اسیدهای آلی و آنیون‌های آن‌ها با تغییر دادن سرعت حلالیت کانی‌ها از طریق کاهش pH محلول یا تشکیل کمپلکس با کاتیون‌ها در سطح کانی و با تأثیر بر حالت اشباع محلول و حلالیت یون-های ساختاری کانی مانند Al^{+3} بر حلالیت کانی‌ها اثر می‌گذارند. این در حالیکه مکانیزم عمل یون کلسیم جانشینی است، بعبارت دیگر یون-های پتاسیم تبادلی موجود روی لبه‌ها و سطوح کانی‌ها به وسیله Ca^{2+} تبادل می‌شوند. اما اندازه بزرگتر کاتیون هیدراته کلسیم ($4/3 \text{ \AA}$) (۳۱) و نیز انرژی هیدراسیون بالایی که کلسیم نسبت به پتاسیم دارد باعث می-گردد که این کاتیون به سختی بتواند با پتاسیم‌های بین لایه‌ای تبادل شود لذا این عامل منجر به کاهش توانایی این عصاره‌گیر در آزاد نمودن پتاسیم می‌گردد. البته جانشینی کلسیم با پتاسیم موجود در سطح و لبه‌ها

به راحتی صورت می‌گیرد (۳ و ۳۱). بحرینی طوحانی و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که میانگین پتاسیم عصاره‌گیری شده با اسید اگزالیک ۲/۳۳ برابر میانگین پتاسیم عصاره‌گیری شده توسط کلرید کلسیم است (۳). هو و همکاران (۱۹۸۶) نیز گزارش نمودند که اسید اگزالیک بیشترین توانایی را در کلات کردن برخی یون‌های فلزی از جمله K^+ ، Mn^{2+} ، Zn^{2+} و Cu^{2+} دارد (۱۶). موسوی و همکاران (۲۰۱۴) با مقایسه توانایی کلرید کلسیم و عصاره‌گیرهای آلی شامل اسید اگزالیک و اسید سیتریک در رهاسازی پتاسیم از کانی‌های فلدسپار و موسکویت، نتیجه‌گیری نمودند که توانایی اسیدهای آلی در رهاسازی پتاسیم ۲/۵ تا ۳ برابر بیشتر از کلرید کلسیم است (۲۵).

نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار نوع عصاره‌گیر، نوع کانی و اثرات متقابل آن‌ها در مقدار رهاسازی پتاسیم بود ($P \leq 0/001$). بنابراین عصاره‌گیرهای مختلف اثرات متفاوتی در رهاسازی پتاسیم از کانی-های مختلف دارند. تأثیر زمان نیز بر مقدار پتاسیم آزاد شده معنی‌دار بود ($P \leq 0/001$) (جدول ۳).

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین رهاسازی پتاسیم و کمترین میزان pH مربوط به تیمار عصاره‌گیری شده با اسید اگزالیک و کانی فلوگوپیت بود. بطوریکه مقدار پتاسیم آزاد شده در این تیمار نسبت به تیمارهای عصاره‌گیری شده با اسید اگزالیک در حضور ۲/۱۳ و ۳/۳۱ برابر بیشتر و مقدار pH در تیمار عصاره‌گیری شده با اسید اگزالیک و کانی فلوگوپیت در مقایسه با شرایط حضور کانی‌های فلدسپار و ایلیت به ترتیب ۴ و ۷/۳ درصد کمتر بود (شکل ۲ و ۳). از نظر مقدار پتاسیم آزاد شده و pH کانی‌های ایلیت و فلدسپار در شرایط عصاره‌گیری با کلرید کلسیم و نیز در شرایط استفاده از آب مقطر (شاهد) اختلاف آماری معنی‌داری نشان ندادند (شکل ۲).



شکل ۱- روند رهاسازی پتاسیم از فلدسپار، ایلیت و فلوگوپیت

Figure 1- release of potassium from feldspar, illite and phlogopite

جدول ۳- تجزیه واریانس غلظت پتاسیم و pH

Table 3- Analysis variance of potassium concentration and pH

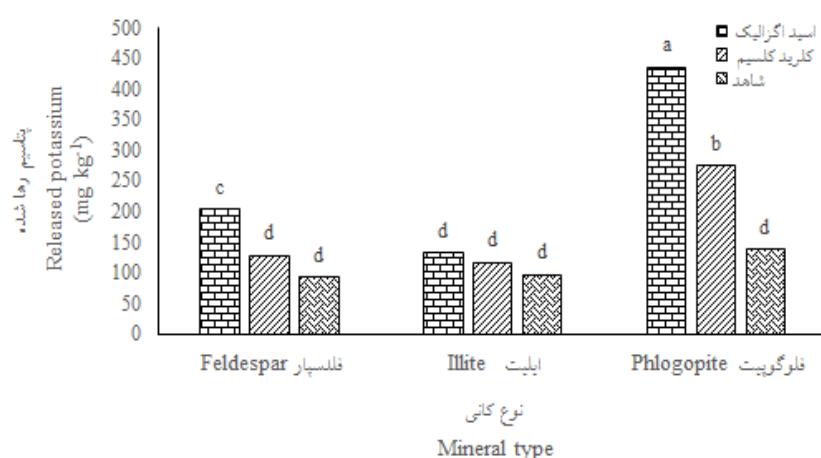
منابع تغییرات Source of variances	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean of squares	
		K	Ph
نوع عصاره گیر Extractant typ)	2	12.47***	631***
نوع کانی Mineral type	2	18.57***	3.65***
نوع عصاره گیر × نوع کانی Extractant type* Mineral type	4	3.52***	0.448***
زمان Time	9	9.34***	1.07***
نوع عصاره گیر × زمان Extractant type* Time	18	0.426***	0.509***
نوع کانی × زمان Mineral type* Time	18	0.903***	0.067 ^{ns}
نوع عصاره گیر × نوع کانی × زمان Extractant type* Mineral type* Time	36	0.409***	0.086***
اشتباه آزمایشی Experimental error	180	0.026	0.048
ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation		17.97	4.14

*** نشان دهنده وجود اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۰/۱ و ns نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار می باشد

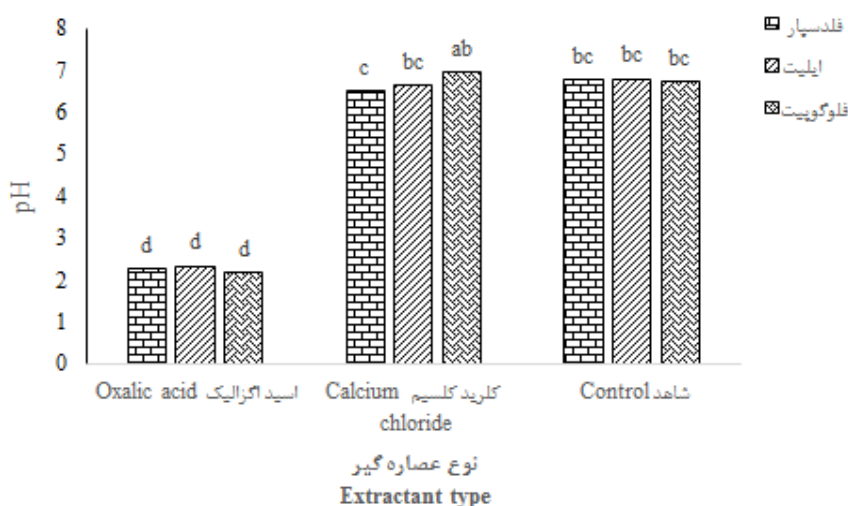
*** Show significant difference at 0.1% and ns show non-significant difference

حمله یون‌های هیدرونیوم و واکنش‌های کمپلکس‌کنندگی با لیگاندهای اگزالات، بسیار گسترده‌تر از حلالیت Al^{+3} موجود در ساختمان ایلیت است (۲۷). عبارت دیگر پایداری Al^{+3} در محلول اسیدهای آلی بیشتر بوده و این امر منجر به رهاسازی پتاسیم بیشتری از ساختمان فلوگوپیت می‌شود. هم‌چنین گروه‌های هیدروکسیل موجود در لایه اکتاهدرال میکاهای دی اکتاهدرال به سمت فضای خالی موجود در این لایه می‌روند، بنابراین پتاسیم با قدرت زیادی نگه‌داری می‌شود. اما در میکاهای تری اکتا به دلیل فاصله کمتری که بین گروه‌های هیدروکسیل لایه اکتاهدرال وجود دارد، پتاسیم بین لایه‌ها دارای پایداری کمی بوده و لذا آزادسازی پتاسیم افزایش می‌یابد (۳۷).

عوامل مختلفی در رهاسازی پتاسیم نقش دارند که خواص کانی‌های پتاسیم‌دار شامل ساختمان بلور، ترکیب شیمیایی کانی، جهت‌گیری گروه هیدروکسیل ساختمانی، موقعیت و محل بار لایه‌ای، درجه تخلیه پتاسیم و جانشینی بار لایه‌ای در کانی‌ها از آن جمله‌اند (۳۵). در کنار ترکیب شیمیایی، پیوندهای اتمی نیز نقش مهمی در رهاسازی پتاسیم ایفا می‌نمایند (۳۸). بطور کلی انتظار می‌رود کانی‌های تری اکتاهدرال (فلوگوپیت) نسبت به کانی‌های دی اکتاهدرال سریع‌تر هواده شده و پتاسیم بین لایه‌ای خود را در محلول آزاد نمایند. کاتیون‌های ورقه اکتاهدرال در بیوتیت و فلوگوپیت غالباً Fe^{+2} و Mg^{+2} و در ایلیت و موسکویت Al^{+3} می‌باشند. حلالیت Mg^{+2} و Fe^{+2} ساختمانی در فلوگوپیت از طریق



شکل ۲- میانگین غلظت پتاسیم رها شده از کانی‌ها در حضور عصاره‌گیرهای مختلف
Figure 2- Mean of released potassium from minerals in different extractant presence



شکل ۳- pH در حضور عصاره‌گیرهای مختلف
Figure 3- pH in the presence of different extractant

جدول ۴- اثرات نوع عصاره‌گیر، نوع کانی و زمان بر میزان رهاسازی پتاسیم
Table 4- Effects of extractant type, mineral type and time on potassium release amount

نوع عصاره‌گیر Extractant Type	زمان انکوباسیون Incubation time (hour)	میانگین پتاسیم آزاد شده Mean of released potassium (mg kg ⁻¹)		
		نوع کانی Mineral Type		
		فلدسپار Feldspar	ایلیت Illite	فلوگوپیت Phlogopite
اسید اگزالیک (OA)	1	164.5 ^{n-t}	96.92 ^{x-z, a-c'}	161.53 ^{n-t}
	2	145.3 ^{o-t}	66.92 ^{a-f'}	142.56 ^{p-t}
	4	139.4 ^{p-t}	61.31 ^{b-g'}	134.02 ^{t-x}
	8	137.5 ^{r-v}	62.65 ^{b-g'}	259.70 ^{i-m}
	12	135.4 ^{s-w}	118.50 ^{v-z, a}	338.58 ^{g-i}
	16	184.2 ^{n-t}	121.31 ^{v-z, a}	368.97 ^{gh}
	24	251.6 ^{i-o}	129.96 ^{u-y}	421.20 ^{de}
	32	402.77 ^{fg}	273.88 ^{i-l}	609.53 ^b
	48	415.5 ^{ef}	276.43 ^{h-k}	669.9 ^b
	64	415.8 ^{de}	288.18 ^{h-j}	703.74 ^a
کلرید کلسیم (CaCl ₂)	1	96.92 ^{x-z, a-c'}	48.46 ^{e-h'}	96.92 ^{x-z, a-c'}
	2	80.76 ^{yz, a-e'}	54.61 ^{e-g'}	64.61 ^{a-f'}
	4	50.31 ^{e-h'}	50.31 ^{e-h'}	104.48 ^{x-z, a-c'}
	8	45.23 ^{f-h'}	45.82 ^{f-h'}	231.7 ^{j-o}
	12	54.78 ^{e-g'}	48.94 ^{e-h'}	253.93 ^{j-n}
	16	50.31 ^{e-h'}	50.31 ^{e-h'}	218.29 ^{m-s}
	24	134.81 ^{t-x}	104.81 ^{w-z, ab}	222.22 ^{k-q}
	32	221.14 ^{l-s}	205.55 ^{n-s}	447.21 ^d
	48	221.41 ^{k-r}	212.41 ^{n-s}	432.83 ^{de}
	64	216.93 ^{m-s}	223.13 ^{j-p}	483.59 ^c
شاهد (Cont.)	1	25.51 ^{h'}	25.51 ^{h'}	51.02 ^{c-h'}
	2	25.97 ^{h'}	25.51 ^{h'}	25.51 ^{h'}
	4	25.51 ^{h'}	25.51 ^{h'}	51.02 ^{c-h'}
	8	25.51 ^{h'}	34.82 ^{gh'}	61.65 ^{b-g'}
	12	43.55 ^{f-h'}	27.57 ^{h'}	75.36 ^{z, a-f'}
	16	25.51 ^{h'}	34.01 ^{gh'}	85.03 ^{yz, a-d'}
	24	50.55 ^{d-h'}	50.55 ^{d-h'}	104.81 ^{w-z, ab}
	32	106.24 ^{w-z, ab}	79.44 ^{yz, a-f'}	122.21 ^{v-z}
	48	109.41 ^{v-z, a b}	76.77 ^{z, a-f'}	128.78 ^{u-y}
	64	106.81 ^{w-z, ab}	75.97 ^{z, a-f'}	138.30 ^{q-u}

* میانگین‌های با حروف مشابه بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($P \leq 0.05$) ندارند

به دلیل اتمام حروف، پس از حرف z از حروف کوچک همراه با علامت پریم (') استفاده شد

* Means with similar letters are not significant at 5% probability level, using LSD Test
After z, lowercase letters with prime symbol (') were used

می‌شود (۵ و ۱۴). تو و همکاران (۲۰۰۷) مشاهده نمودند که بین چهار کانی بیوتیت، موسکویت، فلوگوپیت و میکروکلین بیشترین پتاسیم آزاد شده تحت تأثیر اسید اگزالیک از دو کانی بیوتیت و فلوگوپیت بوده است (۴۱). حاتمی و همکاران (۲۰۱۳) نیز روند میکای دوجایی > فلدسپار پتاسیم > میکای سه جایی (بیوتیت و فلوگوپیت) را برای رهاسازی پتاسیم پیشنهاد نمودند (۱۴).

مقایسه میانگین اثرات نوع عصاره‌گیر، نوع کانی و زمان حاکی از آن است که توانایی اسید اگزالیک در رهاسازی پتاسیم بیشتر است. بطوریکه مقدار پتاسیم آزاد شده توسط اسید اگزالیک در مقایسه با

پایین بودن میزان رهاسازی پتاسیم در فلدسپار را می‌توان اینگونه توجیه نمود که با افزایش درجه پلیمریزاسیون سیلیکات‌ها، پایداری کانی افزایش می‌یابد. فلدسپارهای پتاسیم، از جمله سیلیکات‌های سه بعدی با ساختار بسیار متراکم بوده و دارای پیوند کووالانسی می‌باشند به همین دلیل حلالیت کمی دارند. برداشته شدن یون‌های فلزی موجود در ساختمان این کانی‌ها منجر به تضعیف ساختاری و در نتیجه انحلال آن‌ها می‌گردد. اما با توجه به اینکه دسترسی به یون‌های فلزی به احاطه شدن آن‌ها توسط مولکول‌های آب در چارچوب آلومینوسیلیکات‌ها وابسته است، انحلال فلدسپارها محدود به سطح

کلرید کلسیم و شاهد به ترتیب ۱/۶۱ و ۴/۱ برابر بیشتر بود. میزان رها سازی پتاسیم تحت تأثیر عصاره گیرهای مختلف در آغاز دوره انکوباسیون بیشتر بود اما با گذشت زمان از مقدار رها سازی کاسته شد و پس از ۱۲ ساعت مجدداً روند افزایشی نشان داد و در نهایت با سرعت ثابتی ادامه یافت (جدول ۴). روند رها سازی سریع اولیه و سپس یکنواخت شدن آن در مطالعات زیادی مشاهده شده است (۱۱ و

۲۵). بطور کلی رها سازی سریع اولیه را می توان به آزاد شدن پتاسیم از مناطق لبه ای و گوه ای شکل کانی های پتاسیم دار نسبت داد. با پیشروی رها سازی، لبه های کانی از هم جدا شده و پتاسیم های موجود در ساختمان کانی رها می شوند، بنابراین به دلیل افزایش فاصله پتاسیم های درونی از لبه ها و نیز افزایش قدرت جذب پتاسیم، رها سازی با سرعت و پخشیدگی کمتری صورت می گیرد (۱۳).

جدول ۵- ضرایب تبیین (r^2) و خطای استاندارد برآورد (SE) معادلات سینتیکی انتخابی

Table 5- Coefficients of determination (r^2) and standard error of estimate (SE) for selected kinetic equations

کانی Mineral	عصاره گیر Extractant	مرتبه اول First order		تابع توانی Power function		الوویچ ساده Simple Elovich		پخشیدگی پارابولیکی Parabolic diffusion		مرتبه صفر Zero order		مرتبه دوم Second order	
		R ²	SE	R ²	SE	R ²	SE	R ²	SE	R ²	SE	R ²	SE
فلدسپار Feldspar	اسید اگزالیک (OA)	0.96	1.69	0.97	0.125	0.81	1.44	0.96	0.619	0.98	9.69	0.49	0.8
	کلرید کلسیم (CaCl ₂)	0.95	1.49	0.97	0.136	0.80	0.941	0.96	0.422	0.98	6.19	0.5	1.29
	شاهد (Cont.)	0.96	0.143	0.99	0.117	0.81	0.738	0.84	1.59	0.97	0.78	0.37	25.5
ایلیت Illite	اسید اگزالیک (OA)	0.96	7.80	0.98	0.098	0.84	0.884	0.98	0.296	0.98	6.22	0.45	1.27
	کلرید کلسیم (CaCl ₂)	0.93	1.49	0.97	0.181	0.76	0.993	0.94	0.491	0.98	5.88	0.4	2.52
	شاهد (Cont.)	0.94	0.206	0.98	0.127	0.75	0.835	0.96	1.22	0.99	4.99	0.39	17.2
فلوگوپیت Phlogopite	اسید اگزالیک (OA)	0.95	2.07	0.99	0.136	0.82	3.29	0.97	1.31	0.97	11.32	0.39	0.82
	کلرید کلسیم (CaCl ₂)	0.96	1.64	0.98	0.164	0.87	1.68	0.99	0.445	0.97	13.63	0.28	1.77
	شاهد (Cont.)	0.97	0.404	0.99	0.097	0.82	1.05	0.97	1.51	0.98	3.58	0.44	2.67
میانگین Mean		0.953	1.88	0.98	0.131	0.808	1.31	0.952	0.87	0.977	7.36	0.41	5.98
دامنه تغییرات Range of variances	حداکثر (Max.)	0.97	7.80	0.99	0.181	0.87	3.29	0.99	1.59	0.99	13.63	0.5	25.5
	حداقل (Min.)	0.93	0.143	0.97	0.097	0.75	0.738	0.84	0.296	0.97	3.58	0.28	0.8

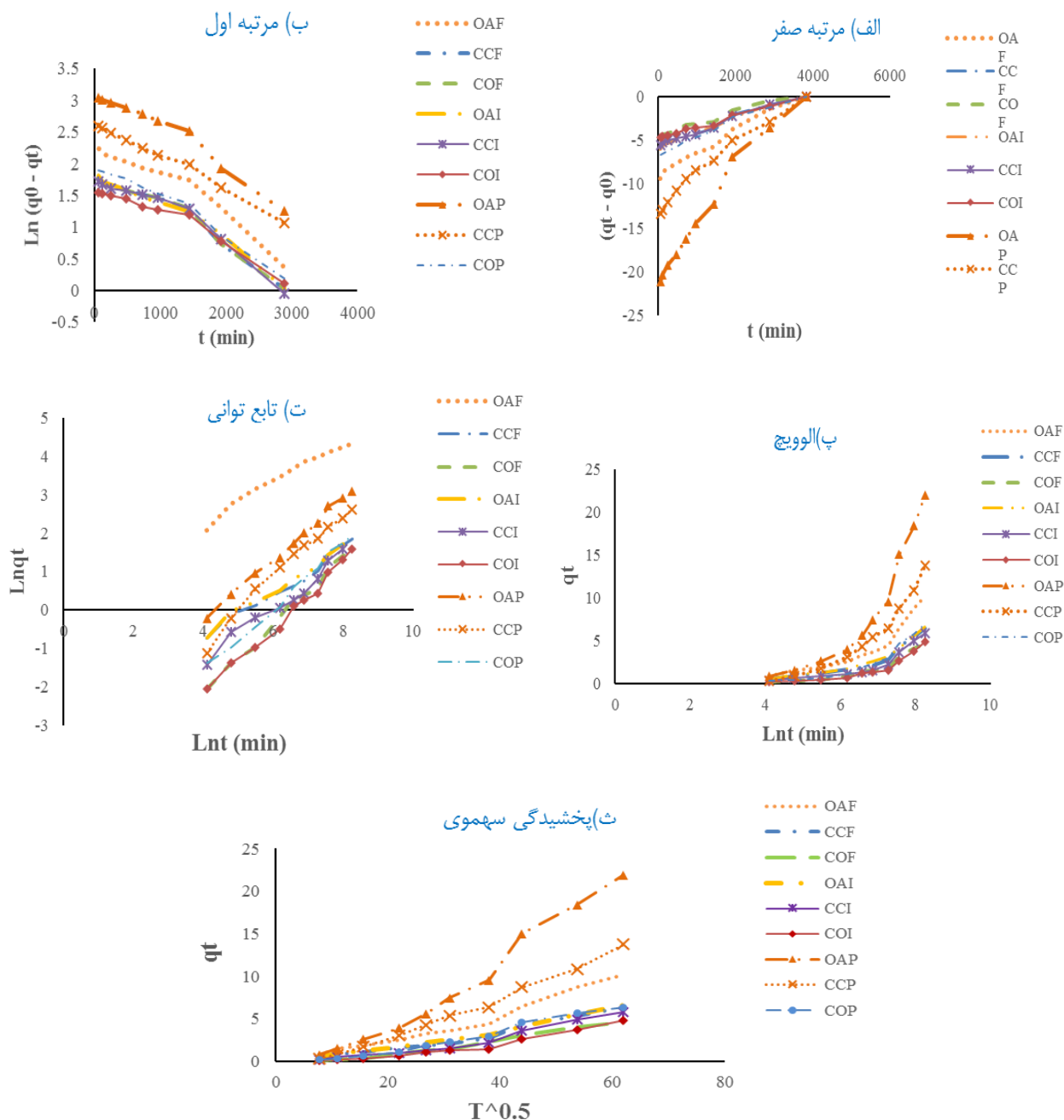
فرآیند رها سازی بر فرآیند تثبیت مجدد پتاسیم آزاد شده غالب شده و در نتیجه روند افزایشی در رها سازی پتاسیم مشاهده می شود (۲۷).

کاربرد معادلات

معادلات سینتیکی شامل معادله مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، پخشیدگی پارابولیک، الوویچ و تابع توانی برای بررسی سرعت رها سازی پتاسیم از کانی های مورد مطالعه، مورد برازش قرار گرفتند. در مواردی که چند معادله قادر به توصیف داده های سینتیکی باشند برای انتخاب بهترین معادله از ضرایب تبیین و خطای استاندارد برآورد استفاده می شود. بر این اساس معادله ای که بیشترین ضریب تبیین و کمترین خطای استاندارد برآورد را دارد، به عنوان بهترین معادله در

در حالیکه انتظار می رود با گذشت زمان و افزایش دوره انکوباسیون، میزان پتاسیم رها شده به تدریج افزایش یابد تا یکنواختی حاصل شود، مشاهده می شود که مقدار رها سازی پتاسیم توسط اسید اگزالیک و کلرید کلسیم در ۲ ساعت و در حضور کانی های فلدسپار و ایلیت نسبت به ۸ ساعت بیشتر است (جدول ۴). وجود این تناقض را می توان به جذب و یا تثبیت دوباره پتاسیم رها شده از کانی ها در زمان های کوتاه مدت نسبت داد (۲۸). بطوری که پتاسیم رها شده در زمان ۲ ساعت، در طی ۸ ساعت، دوباره جذب کانی شده و سپس تا زمان ۱۲ ساعت مجدداً فرصت می یابد تا از بین لایه ها و لبه های کانی به محلول آزاد شود و به این ترتیب روند افزایشی خود را ادامه دهد تا به حالت یکنواخت برسد. بعبارت دیگر در زمان ۱۲ ساعت

توجیه رهاسازی پتاسیم شناخته می‌شود (۱۱ و ۲۵).



شکل ۴- رابطه بین مقدار پتاسیم غیرتبادلی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های سینتیکی انتخاب شده

حروف OA, CC و CO به ترتیب نشان‌دهنده عصاره‌گیری با اسید اگزالیک، کلرید کلسیم و شاهد

حروف F, I و P نشان‌دهنده حضور فلدسپار، ایلایت و فلوگوپیت می‌باشند

Figure 4- Relationship of measured and predicted released potassium amount by selected kinetic models

OA, CC and CO show extracting with oxalic acid, calcium chloride and control (H_2O), respectively

F, I and P show feldspar, illite and phlogopite presence

جدول ۶- پارامترهای معادلات سینتیکی انتخابی
 Table 6- Parameters of selected kinetic equations

کانی Mineral	عصاره‌گیر Extractant	مرتبه اول First order		تابع توانی Power function		الوویچ ساده شده Simple Elovich		پخشیدگی پارابولیکی Parabolic diffusion		مرتبه صفر Zero order	
		a	b	a	b	a	b	a	B	a	b
فلدسپار Feldspar	اسید اگزالیک (OA)	-	2.346	0.5736	-	2.063	-9.087	0.17	-0.9531	0.0025	-
	کلرید کلسیم (CaCl ₂)	-	1.832	0.5907	-	1.3136	-5.85	0.1084	-0.6834	0.0016	-
	شاهد (Cont.)	-	1.554	0.875	-	1.049	-5.037	0.0864	-0.902	0.0012	-4.40
ایلیت Illite	اسید اگزالیک (OA)	-0.005	1.836	0.5903	-	1.3496	-5.992	0.1099	-0.5674	0.0016	-
	کلرید کلسیم (CaCl ₂)	-	1.811	0.7167	-	1.2295	-	0.1032	-1.0024	0.0015	-
	شاهد (Cont.)	-	1.635	0.862	-	1.0128	-4.928	0.0853	-0.998	0.0013	-
فلوگوپیت Phlogopite	اسید اگزالیک (OA)	-	3.271	0.7955	-	4.9	-	0.4021	-3.8433	0.0058	-
	کلرید کلسیم (CaCl ₂)	-	2.714	0.8662	-	3.0383	-	0.2446	-2.0785	0.0035	-
	شاهد (Cont.)	-	1.988	0.831	-	1.5481	-	0.1273	-1.2974	0.0018	-
میانگین Mean		-	2.109	0.744	-	1.944	-9.055	0.150	-1.3695	0.0023	-8.31
دامنه تغییرات Range of variances	حداکثر (Max.)	-0.005	3.714	0.875	-	4.9	-4.928	0.4021	-0.5674	0.0058	-4.40
	حداقل (Min.)	-	1.554	0.5736	-	1.0128	-	0.0853	-3.8433	0.0012	-

توصیف رهاسازی پتاسیم از خاک‌های آهکی استان فارس پیشنهاد نمودند. سرینیوسارائو و همکاران (۲۰۰۶) معادلات پارابولیک و مرتبه اول، فرشیدی راد و همکاران (۲۰۱۳) الوویچ، پخشیدگی و تابع توانی، جلیلی (۲۰۰۶) الوویچ، تابع توانی و پارابولیک، حسینی‌پور (۲۰۰۴) مرتبه اول، پارابولیک و تابع توانی را به عنوان بهترین معادله در خاک‌های مورد مطالعه معرفی نمودند (۱، ۱۱، ۱۵، ۱۸ و ۳۶). موسوی و همکاران (۲۰۱۳) نیز معادله تابع توانی را به عنوان بهترین معادله در توصیف رهاسازی پتاسیم تحت تأثیر عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم، اسید اگزالیک و سیتریک اسید معرفی نمودند (۲۵).

جدول ۶ پارامترهای معادلات سینتیکی را نشان می‌دهد. مقادیر b که شاخصی از آهنگ رهاسازی پتاسیم می‌باشد در معادلاتی که مطابقت بیشتری با سینتیک رهاسازی پتاسیم نشان می‌دهند، حائز اهمیت است. این پارامتر در معادلات تابع توانی و پخشیدگی پارابولیکی به ترتیب در محدوده ۵/۶۲- تا ۲/۵۲- و ۳/۸۴- تا ۰/۵۶- قرار

ضرایب تبیین و خطای استاندارد برآورد معادلات سینتیکی مختلف در توصیف رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس معیارهای ذکر شده، معادلات تابع توانی، پخشیدگی پارابولیک، الوویچ، مرتبه صفر و مرتبه اول رهاسازی پتاسیم را توصیف می‌کنند ولی از میان آن‌ها، معادلات تابع توانی و پخشیدگی پارابولیک به دلیل داشتن بالاترین R^2 و پایین‌ترین SE بهترین معادلات برای توصیف رهاسازی پتاسیم می‌باشند (شکل ۴). با توجه به اینکه معادله مرتبه دوم در این مطالعه قادر به توصیف رهاسازی پتاسیم نبود لذا در ادامه مورد بحث قرار نگرفته است. از آنجایی که سرعت آزاد شدن پتاسیم از معادلات پخشیدگی پارابولیک و تابع توانی پیروی می‌کند لذا رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی از کانی‌های مورد مطالعه یک فرآیند کنترل شده پخشیدگی است (۱۹). نتایج مشابهی در مطالعات مختلف گزارش شده است. عبدی و همکاران (۲۰۱۵) نیز معادلات الوویچ، تابع توانی، پخشیدگی و مرتبه اول را به عنوان معادلات مناسب در

میلی گرم بر لیتر بر ساعت می باشد. تفاوت در مقدار b نشان می دهد که توانایی عصاره گیرها و کانی ها در رهاسازی پتاسیم متفاوت است. پارامتر a (عرض از مبدأ معادله) بیان کننده آهنگ رهاسازی پتاسیم در ۲ ساعت اول رهاسازی و یا عبارت دیگر نشان دهنده مقدار اولیه پتاسیم آزاد شده است. در معادلات پخشیدگی پارابولیک و تابع توانی این پارامتر به ترتیب در محدوده $0.085-0.402$ و $0.0573-0.857$ میلی گرم بر لیتر می باشد. در دو معادله مذکور، پارامتر b در تمام نمونه ها کمتر از ۱ است و این امر حاکی از آن است که سرعت رهاسازی پتاسیم با زمان کاهش می یابد. این نتیجه در پژوهش های دیگری نیز گزارش شده است (۸، ۱۴ و ۲۶).

شیب معادله الوویچ (b) نشان دهنده سرعت رهاسازی پتاسیم بین لایه های و عرض از مبدأ (a) آن بیانگر سرعت اولیه رهاسازی پتاسیم است (۲۳). بر این اساس در این مطالعه، صرف نظر از نوع کانی برای اسید اگزالیکی و صرف نظر از نوع عصاره گیر، برای کانی فلوگوپیت عرض از مبدأ بیشترین مقدار است. به این معنی که تأثیر اسید اگزالیکی بر سرعت اولیه رهاسازی و سرعت رهاسازی بین لایه ای در کانی فلوگوپیت مؤثرتر از کلرید کلسیم می باشد.

نتیجه گیری

عوامل مختلفی بر روند رهاسازی پتاسیم تأثیر می گذارند. در بین عوامل گوناگون شاید بتوان نوع کانی را مهم ترین عامل تلقی نمود.

منابع

میکاهای تری اکتاهدرال نظیر فلوگوپیت در ورقه اکتاهدرال خود غالباً Fe^{+2} و Mg^{+2} دارند که سریعتر از میکاهای دی اکتاهدرال که حاوی Fe^{+3} و Al^{+3} می باشند، تحت تأثیر اسید آلی پتاسیم خود را آزاد می کنند. در این مطالعه، مقدار پتاسیم آزاد شده از فلوگوپیت در شرایط استفاده از اسید اگزالیکی در مقایسه با فلدسپار و ایلیت به ترتیب $2/13$ و $3/31$ برابر بیشتر بود. در بین عصاره گیرها نیز اسید اگزالیکی نسبت به کلرید کلسیم که یک نمک معدنی است، بطور میانگین میزان پتاسیم بیشتری را رهاسازی نمود. بطوریکه میانگین پتاسیم آزاد شده با اسید اگزالیکی $1/48$ برابر پتاسیم عصاره گیری شده توسط کلرید کلسیم بود. برآزش ۶ مدل سینتیکی مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، تابع توانی، پخشیدگی پارابولیکی و الوویچ نشان داد که معادله مرتبه دوم قادر به توصیف رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی از کانی ها نیست ولی ۵ معادله دیگر برای توصیف رهاسازی پتاسیم مناسب می باشند و در این بین معادلات تابع توانی و پخشیدگی پارابولیک به دلیل دارا بودن بیشترین ضریب تبیین و کمترین خطای استاندارد برآورد بعنوان بهترین مدل انتخاب شدند. تطبیق نتایج این تحقیق با معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک و تابع توانی حاکی از آن است که رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی از کانی ها می تواند متأثر از فرآیند پخشیدگی باشد و عبارت دیگر پخشیدگی پتاسیم به خارج از توده کانی کنترل کننده سرعت آزاد شدن پتاسیم می باشد.

- 1- Abdi S., Ghasemi-Fasaei R., Karimian N., and Feizian M. 2015. Availability and release kinetics of nonexchangeable potassium in some calcareous soils of Fars province, Journal of Water and Soil, 28: 766-777. (In Persian)
- 2- Al-Zubaidi A., Yanni S., and Bashour I. 2008. Potassium status in some Lebanese soils, Lebanese Science journal, 9:81-97.
- 3- Bahreini Touhan M., Dordipour E., and Khormali F. 2009. The comparison of $CaCl_2$ and organic acid ability in kinetics of non-exchangeable potassium release in dominant soils series in Golestan province, Journal of Water and Soil Conservation, 16 (3):59-81. (In Persian)
- 4- Bahreini Touhan M., Dordipour E., and Movahedi Naeini A.R. 2010. Kinetic of non-exchangeable potassium release using citric acid and $CaCl_2$ in dominant Farmlands soil series in Golestan province, Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources, 14 (53): 113- 126. (In Persian)
- 5- Barman A. K., Varadachari C., and Ghosh K. 1991. Weathering of silicate minerals by organic acids. I. Nature of cation solubilization, Geoderma, 53: 45-63.
- 6- Bolt M., Sumner E., and Kamphorst A. 1963. A study of the equilibria between three categories of potassium in an illitic soil, Soil Science Society of America Proceedings Journal, 27:294-299.
- 7- Cox A.E., Joern B.C., Brouder S.M., and Gao D. 1999. Plant- available potassium assessment with a modified sodium tetra phenyl boron method, Soil Science Society of America Proceedings Journal, 63: 902-911.
- 8- Darunsontaya T., Suddhiprakarn A., Kheoruenromne I., and Gilkes R.J. 2010. The kinetics of potassium release to sodium tetraphenylboron solution from the clay fraction of highly weathered soils, Applied Clay Science Journal, 50:376-385.
- 9- Dhillon S.K., and Dhillon K.S. 1990. Kinetics of release of non-exchangeable potassium by cation-saturated resins from Red (Alfisols), Black (Vertisols) and Alluvial (Inceptisols) soils of India, Geoderma, 47: 3-4. 283-300.
- 10- Drever J.I., and Stillings L.L. 1997. The role of organic acids in mineral weathering. Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects Journal, 120: 167-181.
- 11- Farshadirad A., Dordipour E., and Khormali, F. 2013. Kinetic of non-exchangeable potassium release with $CaCl_2$

- from soils and its components, *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 3 (1): 113-129. (In Persian)
- 12- Fox T.R., McFee W.W., and Kelly J. M. 1995. The influence of low molecular weight organic acids on properties and processes in forest soils. P. 43-62. In *Carbon forms and functions in forest soils*. Soil Science Society of America Incorporated, Madison, WI.
- 13- Goulding K.W.T. 1984. The availability of potassium in soils to crops as measured by its release to calcium saturated cation exchange resin, *Agricultural Science Journal*, 103: 265-275.
- 14- Hatami H., Karimi A., Fotovat A., and Khademi H. 2013. Release of soluble, exchangeable and non-exchangeable forms of potassium in selected silicate k-bearing minerals as influenced by oxalic acid, *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 18 (69): 23-34. (In Persian)
- 15- Hosseinpour A.R. 2004. Application of kinetic models in describing non-exchangeable potassium release in some soils of Hamadan, *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 8 (3): 85-94. (In Persian)
- 16- Hue N.V., Craddock G.R., and Adams F. 1986. Effect of organic acids on aluminum toxicity in subsoils, *Soil Science Society of America Journal*, 50: 28-34.
- 17- Jalali M. 2005. Release kinetics of non-exchangeable potassium in calcareous soils, *Communications in Soil Science and Plant Analysis Journal*, 36: 1903-1917.
- 18- Jalali M. 2006. Kinetics of non-exchangeable potassium release and availability in some calcareous soils of western Iran, *Geoderma*, 135: 63-71.
- 19- Jardin P.M., and Sparks D.L. 1984. Potassium-calcium exchange in a multireactive soil system: 1. Kinetics, *Soil Science Society American Journal*, 47:39-45.
- 20- Jones D.L. 1998. Organic acids in the rhizosphere-a critical review, *Plant and Soil Journal*, 205: 25-44.
- 21- Kononova M.M., Aleksandrova I.V. and Titova N.A. 1964. Decomposition of silicates by organic substances in the soil, *Soviet Soil Science Journal*, 63: 1005-1014.
- 22- Martin H.W., and Sparks D.L. 1983. Kinetics of non-exchangeable potassium release from two coastal plain soils, *Soil Science Society of America Journal*, 47: 883-887.
- 23- Mengel K., and Dou H. 1998. Release of potassium from the silt and sand fraction of loess-derived soils, *Soil Science Journal*, 163: 805-813.
- 24- Mengel K., and Kirkby E.A. 2001. *Principles of Plant Nutrition*. 5th ed., Illustrated. Springer Pub. USA.
- 25- Mousavi A., Khiamim F., Khademi H., and Shariatmadari H. 2014. The kinetics of potassium release from K-feldspar, compared with muscovite under the influence of different extractants, *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 67: 229-240. (In Persian)
- 26- Nilawonk W., Attanandana T., Phonphoem A., Yost R., and Shuai X. 2008. Potassium release in representative maize-producing soils of Thailand, *Soil Science Society of America Journal*, 72:791-797.
- 27- Norouzi S., and Khademi H. 2008. Potassium release from muscovite and phlogopite as influenced by selected organic acids, *Journal of Water and Soil*, 23 (1): 263-273. (In Persian)
- 28- Norouzi S., Khademi H., and Shirvani M. 2012. The kinetics of K release from muscovite and phlogopite with organic acids, *Journal of Soil and Water Research*, 42: 163-173. (In Persian)
- 29- Ogaard A.F., and Krogstad T. 2005. Release of interlayer potassium in Norwegian grassland soils, *Plant Nutrition and Soil Science Journal*, 168:80-88.
- 30- Pohlman A.A., and McColl J. 1986. Kinetics of metal dissolution from forest soils by soluble organic Acids, *Environmental Quality Journal*, 15 (1): 86-92.
- 31- Rich C.I. 1968. Mineralogy of soil potassium. P. 79-96. In *the Role of Potassium in Agriculture*. American Society of Agronomy: Madison, Wisconsin.
- 32- Russel E.W. 1961. *Soil Conditions and Plant Growth*. Longman, London.
- 33- Sharpley A.N. 1990. Reaction of fertilizer potassium in soils of different mineralogy, *Soil Science Journal*, 149:44-51.
- 34- Shu-Xin T.U., Zhi-Fen G.U.O., and Jin- He S.U.N. 2007. Effect of Oxalic Acid on potassium release from typical Chinese soils and minerals, *Pedosphere Journal*, 17 (4): 457-466.
- 35- Song S. K., and Huang P. M. 1988. Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids, *Soil Science Society of America Journal*, 52: 383-390.
- 36- Srinivasarao C., Rupa T. R., Subba Rao A., Ramesh G., and Bansal S. K. 2006. Release kinetics of nonexchangeable potassium by different extractants from soils of varying mineralogy and depth, *Communications in Soil Science and Plant Analysis Journal*, 37 (3): 473-491.
- 37- Sparks D. L., and Huang P. M. 1985. Physical chemistry of soil potassium. P. 201-276. In *physical chemistry of soil potassium*. Potassium in agriculture.
- 38- Sparks D. L., and Carski T. H. 1985. Kinetics of potassium exchange in heterogeneous system, *Applied Clay Science Journal*, 1: 89-101.
- 39- Sparks D. L. 1987. Potassium dynamics in soils, *Advances in Soil Science*, 6:1-63.
- 40- Sparks D. L. 1989. *Kinetics of Soil Chemical Processes*. Academic Press, Sandiego, CA.

- 41- Tu S. X., Guo Z. F., and Sun J. H. 2007. Effect of oxalic acid on potassium release from typical Chinese soils and minerals, *Pedosphere Journal*, 17: 457-466.
- 42- Keshavarz-Zarjani J., Aliasgarzadeh N., Oustan S.H., and Emadi M. 2014. Release of potassium and iron from biotite and phosphorous from tricalcium phosphate by seven strains of bacteria in vitro, *Journal of Soil and Water Science*, 27: 556-563.



Evaluation of Non-Exchangeable Potassium Release from K-Bearing Minerals by Different Extractants

S. Ashrafi-Saeidlou^{1*} - MH. Rasouli-Sadaghiani² - A. Samadi³ - M. Barin⁴ - E. Sepehr⁵

Received: 02-10-2017

Accepted: 04-12-2017

Introduction: Potassium is one of essential nutrients for plants and its importance in agriculture is well known. Non-exchangeable potassium that is mainly placed with in layers of K-bearing minerals, such as K-feldspar and mica, is considered as an important source of potassium for plant growth in most soils. Regarding that low molecular weight acids (LMW) play an important role in improving the bioavailability of soil nutrients such as non-exchangeable K (NEK), and the release rate of NEK plays a significant role in supplying necessary K for plants, the purpose of this study was comparison of potassium release kinetic from K-bearing including feldspar, illite as well as phlogopite minerals and choose the best kinetic equation describing potassium release process, influenced by organic as well as mineral extractants.

Material and Methods: The experiment carried out in a completely randomized design with three replications. Experiment factors were including extractant type (0.01 mol l⁻¹ oxalic acid, 0.01 mol l⁻¹ calcium chloride, control (deionized water)), potassium mineral type (feldspar, illite and phlogopite) and incubation time (1, 2, 4, 8, 12, 16, 24, 32, 48, and 64 hours). Elemental composition of minerals identified by Fluorescence spectroscopy device (S4 Pioneer). Used minerals in the experiment including feldspar, phlogopite and illite were ground and filtered through a 230 mesh sieve. In order to remove exchangeable K, samples were saturated by calcium chloride solution (with a ratio of 2:1), after washing with HCl, samples were dried at 105 °C for 48 hours. 100 mg of washed minerals, was weighed carefully and transferred to centrifuge tubes. Then 20 ml of each of extractants (oxalic acid and calcium chloride 0.01M) was added to the tubes. After 15 minutes shaking, tubes containing a mixture of minerals-extractants was carried out in a controlled incubation chamber for periods of 1, 2, 4, 8, 12, 16, 24, 32, 48 and 64 hours at 25 °C. After each period, samples were centrifuged at 3000 rpm for 10 minutes and filtered using Whatman paper (No. 41). pH and potassium concentration of samples were measured by pH meter and flame photometer, respectively. Data related to potassium release was fitted by zero order, first order, second order, power function, parabolic diffusion and ellovich equations.

Results and Discussion: Results showed that the effect of extractant type was significant on kinetic of potassium release, so that potassium release amount in samples extracted with oxalic acid was 1.48 and 2.35 times higher than samples extracted with calcium chloride and control (deionized water), respectively. Also, different minerals released various amounts of potassium. K release from phlogopite was 1.99 and 2.95 times higher than feldspar and illite, respectively. The maximum potassium concentration (440 mg kg⁻¹) was seen in phlogopite which was extracted with oxalic acid. So that, amount of potassium in this treatment was 3.15 times higher than control one. Furthermore, the effect of extraction time on K release was significant. So that, at the beginning of incubation period the release of potassium by different extractants was more, but its amount decreased over time and finally continued with a constant speed. Kinetic equation fitting showed that zero order, first order, power function, parabolic diffusion and ellovich equations are able to describe potassium release but second order model cannot justify it. Among these five equation, the power function and parabolic diffusion equations with the maximum coefficient of determination (R²) and the least standard error of estimate (SE), could reasonably describe the K release kinetics, so they are introduced as the best models for data fitting. The slope (b) and interception (a) of ellovich equation indicate interlayer and initial K release, respectively. Oxalic acid and phlogopite had the most amount of interception, it means that the impact of oxalic acid on initial and interlayer release rate of K in phlogopite, is more effective than calcium chloride.

Conclusions: It is concluded that different factors like mineral and extractant type influence kinetic of potassium release and organic extractant have more ability in extracting non-exchangeable potassium from minerals structure. Also, the adjustment of the results of this study with first order, parabolic diffusion and power

1, 2, 3, 4 and 5- Ph.D. Student of Soil Science, Professors, Assistance Professor and Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran, Respectively

(* - Corresponding Author Email: sanazashrafi92@yahoo.com)

function equations suggest that nonexchangeable potassium release from minerals can be affected by diffusion process from the surface of the study minerals, indicating that NEK release rate is controlled by K diffusion out of the mineral interlayer.

Keywords: Kinetic equations, Mineral salt, Organic acid, Phlogopite, Potassium release

Contents

Effect of Geological Feature on Regional Flood Frequency of Watersheds of North-East of Iran	1537
T. Taherpoor- B. Ghahraman- K. Davary	
Determine the Height of the Vertical Filter for Inhomogeneous Dams with Vertical Clay Core	1548
S. Salehi- K. Esmaili	
Evaluation of Corn Evapotranspiration and its Components and Relationship between Leaf Area Index and Components in Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems	1560
H. Dehghanisanij– E. Kanani– S. Akhavan	
Forecasting Kashkan River Flow using a Combination of Artificial Neural Network, Wavelet Analysis and K - Nearest Neighbor	1574
D. Yarahmadi- H. Mirhashemi	
Uncertainty of Downscaling Methods in Future Catchment Flow under Climate Change Effect	1586
M.R. Goodarzi- A.R. Faraji- M. Komasi	
Quantitative Sustainability Analysis of Aquifer System (Case Study: South Khorasan- Birjand Aquifer)	1601
H. Kardan Moghaddam- M. E. Banihabib- S. Javadi	
Effect of Land Uses on Soil Microbial Community and Spatial Variability in Mirabad Lands, Naghadeh	1610
Sh. Kaboudi- F. Shahbazi- N. Aliasgharzad- N. Najafi- N. Davatgar	
Effect of Organic Matter on Distribution of Chemical Forms of Cadmium in Soil in Corn Rhizosphere	1622
F. Lotfi- A. Fotovat- R. Khorassani- M. Bahreini Touhan	
Interactive Effects of Salinity and Cadmium Pollution on Microbial Respiration and Biomass in a Calcareous Soil Treated with Plant Residue	1636
E. Sadeghi- F. Raiesi- A. Hossienpur	
Increasing the Yield and Yield Components of Sunflower by Integrated Application of Phosphorus and Sewage Sludge under Optimum and Limited Irrigation Conditions	1650
S. Kazemalilou- N. Najafi- A. Reyhanitabar	
American Soil Taxonomy Compared to World Reference Base for Expressing Environmental Pollution, a Case Study: Lenjanat Region of Isfahan	1664
R. Mohajer- M.H. Salehi	
Simulation of Nitrogen Fertilizer Effect on Maize (<i>Zea mays</i>) Production by CERES-Maize Model under Kermanshah Climate Condition	1678
F. Mondani	
Effect of Transparent Poly Ethylene Mulch on Production and Water Use Efficiency of Hull-Less Seed Pumpkin (<i>Cucurbita pepo</i> L.) under Different Levels of Moisture	1690
M. Nekookhoo- S. Fallah- R. Barzegar	
Investigation of Mineralization of Organic Nitrogen under the Influence of Type, Content of Clay and Exchangeable Cations	1711
F. Rakhsh- A. Golchin	
Identification and Evaluation of PGP Traits in Some Bacterial Strains Isolated from Wheat Rhizosphere	1723
V. Hemati- H. Asadi Rahmani- Sh. Rezaei	
Soil Genesis as Affected by Climate and Geomorphic Surface in Rayen Area, Kerman Province	1739
L. Nezhad zamani- M.H. Farpoor- A. Jafari	
Evaluation of Non-Exchangeable Potassium Release from K-Bearing Minerals by Different Extractants	1754
S. Ashrafi-Saeidlou- M.H. Rasouli-Sadaghiani- A. Samadi- M. Barin- E. Sepehr	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol. 31

No. 6

2018

Published by: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Manager in Charge: Valizadeh, R. (Ruminant Nutrition) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editor in Chief: Fotovat, A. (Soil Science) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Alizadeh, A.	Irrigation and Drainage	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Astaraei, A. R.	Soil Science	Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Fotovat, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Ghaemi, A.A.	Irrigation and Drainage	Assoc. Prof., Shiraz University
Kamali, Gh.	Agricultural Meteorology	Assoc. Prof., Islamic Azad University, Tehran
Khormali, F.	Soil Science	Prof., Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan
Kiani, A.R.	Irrigation and Drainage	Prof., Agricultural and Natural Resources Res. Center of Golestan Province
Lakzian, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Mahdian, M.H.	Irrigation and Drainage	Prof., Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Mosaedi, A.	Irrigation and Civil Eng.	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Mousavi Baygi, M	Agricultural Meteorology	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Oustan, Sh.	Soil Science	Assoc. Prof., Tabrzi University
Sanaei-Nejad, S.H.	Agricultural Meteorology	Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Printed by: Ferdowsi University of Mashhad, Press.

Address: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 511 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

Web Site: <http://jm.um.ac.ir>

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).