



- ارزیابی مدل هیدرولوژیک SWAT در شبیه‌سازی بیلان آب در حوضه‌های آبریز مناطق نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود)..... ۸۴۹
محمدامین امینی- غزاله ترکان- سیدسعید اسلامیان- محمدجواد زارعیان- علی اصغر بسالت پور
- اثر شوری آب و کمبود ازت خاک، بر ضریب K_p و مقدار آب سهل‌الوصول ذرت..... ۸۶۵
رضا سعیدی- عباس ستوده‌نیا- هادی رضائی‌اعتدالی- بیژن نظری- عباس کاویانی
- اثر مدیریت آبشویی بر تغییرات شوری در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (مطالعه موردی: سمنان)..... ۸۷۹
حسین دهقانی سانج- حمیدرضا حاجی آقا‌بزرگی- علی اصغر قائمی- مسعود نوشادی
- طراحی و بهینه‌سازی جذب فلز سنگین کروم (VI) از محلول‌های آبی توسط ذرات پوست میوه تمبره‌ندی فعال شده با اسیدسولفوریک..... ۸۹۱
مرتضی شاهمرادی- امیر تائبی- هستی هاشمی نژاد
- بررسی رابطه خاک- لندفرم در جنوب هرات، غرب افغانستان..... ۹۰۵
فرسیلا محمودیان- علیرضا کریمی- امیر لکزبان
- مدل‌سازی ریاضی و مقایسه تنفس ناشی از بستره در دو خاک جنگلی و کشاورزی..... ۹۱۹
محسن برین- احسان احسان ملاح- فرخ اسدزاده
- اثر تلقیح بذر با/تویاکتر و/آزوسپیریوم بر عملکرد و برخی خصوصیات کمی و کیفی گلرنگ در تاریخ کاشت مختلف..... ۹۳۱
سعید حکم علی پور- مهدی پناهیان کیوی- منوچهر شیری چناقد
- بررسی ارتباط فرآیندهای فرسایش‌بارانی با درصد شیب و محتوای رطوبتی پیشین در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک..... ۹۴۳
علی بیلانی- علیرضا واعظی
- اثر مکش آب خاک و پتانسیم بر عملکرد و شاخص‌های بیوشیمیایی پرتقال تامسون ناول (*Citrus sinensis* L. Osbeck.)..... ۹۶۱
طاهره رئیس- بیژن مرادی- پرهیز گلعین
- بررسی اثر اسید هیومیک و اسید فولویک بر روی عملکرد گندم و کارایی مصرف آب تحت تنش خشکی..... ۹۷۷
مریم پورمراد- محمدجعفر ملکوتی- محمدمهدی طهرانی
- کارایی صمغ عربی در بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک‌های شور- سدیمی و غیرشور- سدیمی اطراف دریاچه ارومیه..... ۹۸۷
زهرا حبیبی- مهدی رحمتی- علی اصغر غلیلو- اسماعیل کریمی
- تأثیر کاربرد گوگرد و کود دامی بر عملکرد و کیفیت میوه خرمای رقم برخی..... ۱۰۰۳
حجت دیالمی- محمدرضا گرشاسبی
- ارزیابی شبیه‌سازی دما و بارش مدل‌های اقلیمی CMIP در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم (مطالعه موردی: مناطق عمده تولید گندم دیم در ایران)..... ۱۰۱۳
مجنتی شکوهی- سید حسین ثنائی نژاد- محمد بنایان اول
- بررسی مقدار تریتوم (H) در نزولات جوی و تعیین سن نسبی منابع آب‌های زیرزمینی در غرب کرمانشاه..... ۱۰۲۹
حسین محمدزاده- طوبی سلیمانی ولیکنندی

Contents

- Assessment of SWAT Hydrological Model in Catchments' Water Balance Simulation Located in Semi-Arid Regions (Case Study: Zayandeh-Rud River Basin)..... 863
M. A. Amini- Gh. Torkan- S. Eslamian- M. J. Zareian- A. A. Besalatpour
- Effect of Water Salinity and Soil Nitrogen Deficiency on Ks-Coefficient and Readily Available Water of Maize..... 878
R. Saeidi- A. Sotoodehnia- H. Ramezani Etedali- B. Nazari- A. Kaviani
- Effect Leaching Management on the Salinity Changes in the Drip Irrigation System (A Case Study: Semnan)..... 890
H. Dehghanisanij - H. Haji Agha Bozorgi - A.A. Ghaemi- M. Noshadi
- Design and Optimization of Heavy Metal Chromium (VI) from Aqueous Solutions by Tamarind Fruit Shell Activated with Sulfuric Acid..... 904
M. Shahmoradi- A. Taebi- H. Hasheminejad
- Investigation of the Soil-Landform Relationship in South of Herat, Western Afghanistan..... 918
F. Mahmoudian - A. Karimi- A. Lakzian
- Mathematical Modeling and Comparison of the Substrate Induced on Forest and Agricultural Soils..... 930
M. Barin - E. Ehsan-Malahat- F. Asadzadeh
- The Effect of Seed Inoculation with *Azotobacter* and *Azospirillum* on Yield and some Qualitative and Quantitative Characteristics of Safflower at Different Planting Date..... 942
S. Hokmalipour - M. Panahyan Kivi- M. Shiri Janagard
- Investigation of the Relationships between Rainfall Erosion Processes, Slope and Antecedent Water Content in Semi-Arid Soils..... 959
A. Baliani - A.R. Vaezi
- Soil Water Potential and Potassium Application Effects on Yield and Biochemical Characteristics of Thomson Navel Orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck.)..... 975
T. Raiesi - B. Moradi- B. Golein
- Study on the Effect of Humic Acid and Fulvic Acid on the Wheat Yield and Water Use Efficiency under Drought Stress..... 985
M. Pourmorad - M. Malakouti- M.M. Tehrani
- The Efficiency of Arabic Gum on Improvement of Physical and Chemical Properties of Saline- Sodic and non-Saline- Sodic Soils Near Lake Urmia..... 1001
Z. Habibi - M. Rahmati- A. Alilou- E. Karimi
- Effect of Sulfur and Manure on Yield and Quality of Date Fruit c.v Barhee..... 1012
H. Dialami - M. R.Garshasbi
- Evaluation of Simulated Precipitation and Temperature from CMIP Climate Models in Regional Climate Change Studies (Case Study: Major Rainfed Wheat-Production Areas in Iran)..... 1027
M. Shokouhi - S.H. Sanaei Nejad- M. Bannayan Aval
- Investigating the Amount of Ttritium (H) in Precipitations and Determining the Relative Age of Groundwater Resources in West of Kermanshah..... 1041
H. Mohammadzadeh - T. Soleymani Vlikandi

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه ۲۱/۲۰۱۵ مورخه ۱۳۶۸/۴/۱۱ و درجه علمی-پژوهشی شماره ۲۶۵۲۴ تاریخ ۱۳۷۳/۱۰/۱۹ از

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد ۳۲ شماره ۵ آذر - دی سال ۱۳۹۷

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)

تقوائیان، صالح

استادیار - آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، امریکا)

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)

قدیری، حسین

استاد - خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)

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: چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده کشاورزی - ص. پ. ۹۱۷۷۵-۱۱۶۳ - دبیرخانه نشریات علمی - نشریه آب و خاک

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

- ۸۴۹ ارزیابی مدل هیدرولوژیک SWAT در شبیه‌سازی بیلان آب در حوضه‌های آبریز مناطق نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود)
محمدامین امینی - غزاله ترکان - سیدسعید اسلامیان - محمدجواد زارعیان - علی اصغر بسالت پور
- ۸۶۵ اثر شوری آب و کمبود ازت خاک، بر ضریب K_s و مقدار آب سهل‌الوصول ذرت
رضا سعیدی - عباس ستوده‌نیا - هادی رمضانی‌اعتدالی - بیژن نظری - عباس کاویانی
- ۸۷۹ اثر مدیریت آبشویی بر تغییرات شوری در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (مطالعه موردی: سمنان)
حسین دهقانی سانج - حمیدرضا حاجی آقائزگی - علی اصغر قائمی - مسعود نوشادی
- ۸۹۱ طراحی و بهینه‌سازی جذب فلز سنگین کروم (VI) از محلول‌های آبی توسط ذرات پوست میوه تمبرهندی فعال شده با اسیدسولفوریک
مرتضی شاهمرادی - امیر تائبی - هستی هاشمی نژاد
- ۹۰۵ بررسی رابطه خاک - لندفرم در جنوب هرات، غرب افغانستان
فرسیلا محمودیان - علیرضا کریمی - امیر لکزیان
- ۹۱۹ مدل‌سازی ریاضی و مقایسه تنفس ناشی از بستره در دو خاک جنگلی و کشاورزی
محسن برین - احسان احسان ملاح - فرخ اسدزاده
- ۹۳۱ اثر تلقیح بذر با/ازتوباکتر و/آزوسپیریولوم بر عملکرد و برخی خصوصیات کمی و کیفی گلرنگ در تاریخ کاشت مختلف
سعید حکم علی پور - مهدی پناهیان کیوی - منوچهر شیرینی جنافرد
- ۹۴۳ بررسی ارتباط فرآیندهای فرسایش بارانی با درصد شیب و محتوای رطوبتی پیشین در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک
علی بلیانی - علیرضا واعظی
- ۹۶۱ اثر مکش آب خاک و پتاسیم بر عملکرد و شاخص‌های بیوشیمیایی پرتقال تامسون ناول (*Citrus sinensis* L. Osbeck.)
طاهره رئیس - بیژن مرادی - بهروز گلچین
- ۹۷۷ بررسی اثر اسید هیومیک و اسید فولویک بر روی عملکرد گندم و کارایی مصرف آب تحت تنش خشکی
مریم پورمراد - محمدجعفر ملکوتی - محمد مهدی طهرانی
- ۹۸۷ کارایی صمغ عربی در بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک‌های شور - سدیمی و غیرشور - سدیمی اطراف دریاچه ارومیه
زهرا حبیبی - مهدی رحمتی - علی اصغر علیلو - اسماعیل کریمی
- ۱۰۰۳ تأثیر کاربرد گوگرد و کود دامی بر عملکرد و کیفیت میوه خرماي رقم برحی
حجت دیالمی - محمدرضا گرشاسبی
- ۱۰۱۳ ارزیابی شبیه‌سازی دما و بارش مدل‌های اقلیمی CMIP در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم (مطالعه موردی: مناطق عمده تولید گندم دیم در ایران)
مجتبی شکوهی - سید حسین ثنائی نژاد - محمد بنایان اول
- ۱۰۲۹ بررسی مقدار تریتیوم (H) در نزولات جوی و تعیین سن نسبی منابع آب‌های زیرزمینی در غرب کرمانشاه
حسین محمدزاده - طوبی سلیمانی ولیکنندی



ارزیابی مدل هیدرولوژیک SWAT در شبیه‌سازی بیلان آب در حوضه‌های آبریز مناطق نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود)

محمدامین امینی^{۱*} - غزاله ترکان^۲ - سیدسعید اسلامیان^۳ - محمدجواد زارعیان^۴ - علی اصغر بسالت پور^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

چکیده

شبیه‌سازی و برآورد مؤلفه‌های بیلان آب از جمله اقدامات مورد نیاز جهت برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب در سطح حوضه‌های آبریز می‌باشد. مدل SWAT یکی از مدل‌های نیمه توزیعی برای شبیه‌سازی حوضه آبریز است که به نحو مطلوبی از ویژگی‌های فیزیکی حوضه برای محاسبه بیلان آب استفاده می‌کند. در پژوهش حاضر از این مدل جهت شبیه‌سازی بیلان آب در حوضه آبریز زاینده‌رود استفاده شده است. با وجود این که در زمینه استفاده از این مدل در بررسی‌های مربوط به حوضه‌های آبریز مطالعات گسترده‌ای انجام گرفته است ولی به دلیل ناکافی بودن و دقت پایین اطلاعات مکانی از جمله نوع خاک، نوع کاربری اراضی، همچنین پراکندگی و تعداد ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد استفاده جهت واسنجی و اجرای مدل، لزوم مطالعات دقیق‌تر در این زمینه به نظر می‌رسد. از این رو، از اطلاعات ۲۷ کلاس کاربری اراضی، ۵۷ کلاس بافت خاک و ۲۷ ایستگاه هواشناسی شامل داده‌های روزانه بارش و دمای حداقل و حداکثر استفاده گردید. همچنین تحلیل حساسیت، واسنجی (۲۰۰۰-۲۰۰۶) و صحت‌سنجی (۲۰۰۷-۲۰۰۹) مدل با استفاده از الگوریتم SUFI2 در برنامه SWAT-CUP و با بکارگیری از داده‌های ۶ ایستگاه هیدرومتری به صورت ماهانه انجام شد. نتایج حاصل از بکارگیری از این مدل واسنجی شده در حوضه آبریز زاینده‌رود نشان داد که از کل بارش سالانه ورودی به حوضه ۶۵/۹۸ درصد به صورت تبخیر و تعرق از حوضه خارج می‌گردد که دارای بیش‌ترین سهم در میان اجزای بیلان آب می‌باشد. همچنین رواناب سطحی با ۱۵ درصد، جریان آب زیرزمینی با ۱۳/۷ درصد، جریان جانبی با ۱/۵ درصد و تغذیه آبخوان عمیق با ۰/۸ درصد به ترتیب سایر بخش‌های بیلان آب را در این حوضه تشکیل می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم SUFI2، تحلیل حساسیت، صحت‌سنجی، واسنجی، SWAT-CUP

مقدمه

استفاده پایدار از منابع آب به چالشی مهم در جهان بدل گردیده که نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و آینده‌نگرانه در این زمینه می‌باشد.

شناخت و درک مفهوم بیلان آب^۶ یکی از پیش نیازهای ضروری در راستای مدیریت پایدار منابع آب در سطح حوضه‌های آبریز می‌باشد. این مفهوم به بررسی تبادلات آب در یک محدوده براساس اصل بقای ماده در چرخه آب تأکید دارد. بر طبق این تعریف، کلیه آب‌هایی که در یک زمان معین وارد یک محدوده خاص می‌گردند، به مصرف رسیده، ذخیره شده و یا به صورت‌های مختلف از محدوده مشخص شده خارج می‌گردد که مجموعه بیلان را تشکیل می‌دهند. مهم‌ترین عناصر بیلان آب از دیدگاه مدیریت منابع آب شامل بارش، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، جریان آب زیرزمینی و جریان جانبی

نقش آب در زندگی بشر به عنوان یک ماده حیاتی برای توسعه اقتصادی، رشد کشاورزی و صنعت با توجه به رویکرد افزایش جمعیت و توسعه شهرنشینی انکارناپذیر است. امروزه بسیاری از مناطق جهان با کمبود آب شیرین و آلودگی آب مواجه هستند از این رو، دسترسی و

۱ و ۲- دانشجویان دکتری منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
(*- نویسنده مسئول: Email: Aminiamin2016@gmail.com)

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴- دکتری آبیاری و زهکشی، مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو

۵- دکتری علوم خاک، مؤسسه Inter3 برلین آلمان

DOI: 10.22067/jsw.v32i5.68815

می‌باشند. بنابراین، می‌توان اجزاء منابع آب موجود در یک سیستم را در دوره‌های زمانی مختلف، مورد مقایسه قرار داده و درجه تأثیر هر یک را در تغییرات بیلان آبی سیستم‌های هیدرولوژیکی شناسایی کرد (۱۶).

امروزه برای مطالعه و برنامه‌ریزی پایدار و مؤثر در مدیریت جامع حوضه‌های آبریز، از مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. SWAT^۱ نمونه‌ای از مدل‌های هیدرولوژیک با مبنای فیزیکی است که بر اساس ویژگی‌های حوضه آبریز و شرایط اقلیمی آن به شبیه سازی در مقیاس بزرگ و همچنین پایش فرآیندهای مرتبط با چرخه آب می‌پردازد (۱۴).

محققین بسیاری مدل SWAT را برای تحلیل مسائل مربوط به حوضه آبریز در جهان مورد استفاده قرار داده‌اند.

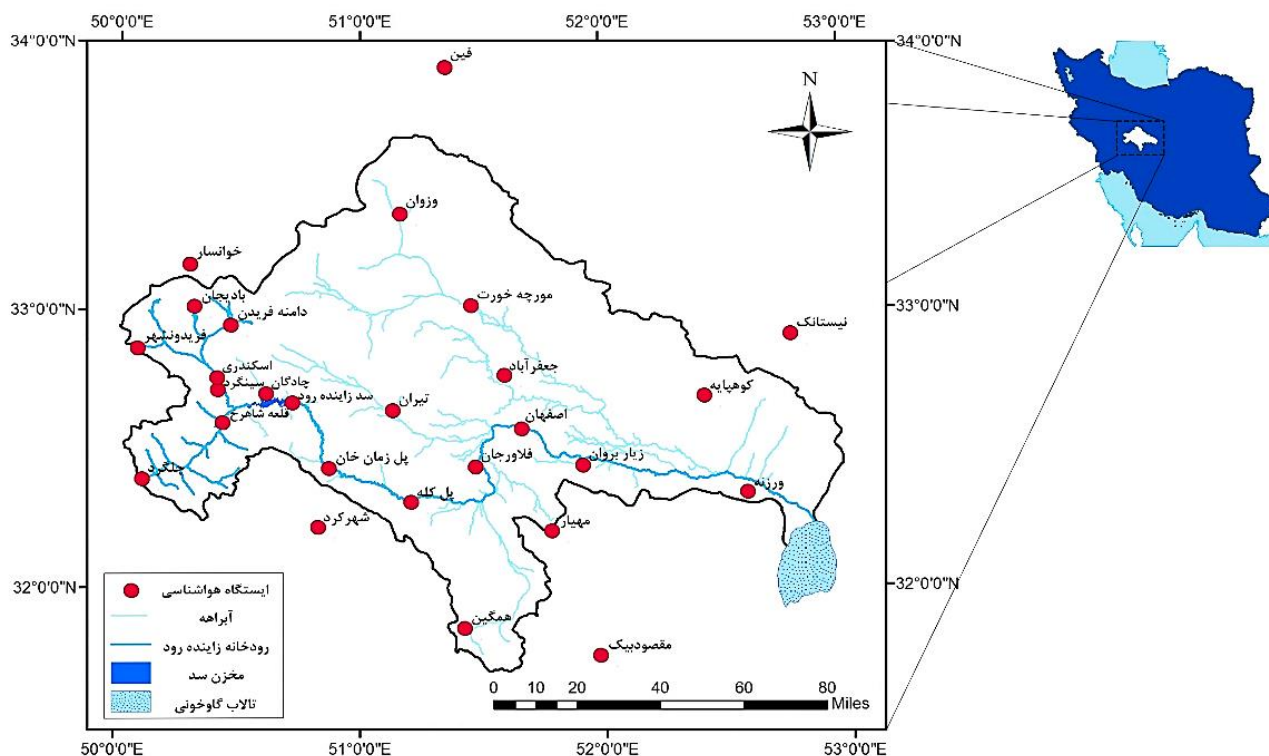
فرامرزی و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWAT اجزای بیلان آب شامل جریان آب آبی، جریان آب سبز و ذخیره آب سبز را در مقیاس زیرحوضه و در مقیاس زمانی ماهانه را در سراسر ایران شبیه‌سازی کردند. ایشان در مطالعه خود با استفاده از دبی رودخانه‌ها، مدل هیدرولوژیک ایران را صحت‌سنجی و واسنجی نمودند. نتایج برای اکثر رودخانه‌های کشور قابل قبول بوده و نشان داد که لحاظ کردن عملیات آبیاری، اثر معنی‌داری بر محاسبه بیلان آب در استان‌های دارای زراعت آبی دارد. همچنین نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که مناطقی که در آن‌ها دخالت بشر (مانند ساخت سد، مخازن، جاده‌ها، تونل‌ها و فعالیت صنعتی) زیاد بوده، بدترین نتایج واسنجی را دارا بوده و عدم قطعیت بیشتری در این نواحی مشاهده شده است (۳). آدگان و همکاران (۲۰۱۴) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی بیلان آب حوضه آبریز جیبا (12992 km^2) واقع در شمال نیجریه استفاده کردند. خروجی مدل آن‌ها نشان دهنده انطباق مطلوب بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده داشت، به نحوی که شاخص‌های NSE و R^2 محاسبه شده برای هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی، بیشتر از ۰/۷ به دست آمد. آنها همچنین گزارش کردند که مدل SWAT می‌تواند یک ابزار مؤثر برای پیش‌بینی بیلان آب و عملکرد آب^۲ در مدیریت پایدار منابع آب باشد (۲). قورابا (۲۰۱۵) مؤلفه‌های هیدرولوژیک حوضه آبریز سد سیملی در پاکستان را با استفاده از SWAT مدل‌سازی کردند. واسنجی مدل از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۱ و صحت‌سنجی از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ انجام شد. بر اساس ضریب تعیین (R^2)، عملکرد مدل برای هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی قابل قبول گزارش شد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که اگر مدل SWAT به درستی کالیبره شده باشد، می‌تواند برای سیاست‌های مدیریت آب در مناطق نیمه خشک به طور مؤثر استفاده

شود (۶). جورج و ساتیان (۲۰۱۶) رفتار هیدرولوژیک زیرحوضه کورومالی در حوضه رودخانه کاراوانور در هند را به وسیله مدل SWAT شبیه‌سازی کردند. کارایی مدل توسط ضریب ناش-ساتکیف (NSE) و ضریب تعیین (R^2) سنجیده شد، به نحوی که این مقادیر برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۹۶ و برای دوره صحت سنجی ۰/۹۰ و ۰/۹۹ محاسبه گردید. به علاوه، نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که سهم پارامتر جریان آب زیرزمینی ۶۴٪ جریان جانبی ۱۲٪ و رواناب سطحی ۹٪ از بارندگی سالانه می‌باشد (۵). شفیی و همکاران (۱۳۹۲) از مدل نیمه توزیعی SWAT در حوضه نیشابور با مساحت ۹۳۵۰ کیلومتر مربع برای شبیه‌سازی جریان در یک دوره ۸ ساله استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد استفاده از مدل‌های نیمه-توزیعی به دلیل پیچیدگی سیستم هیدرولوژیک در منطقه مورد مطالعه از نتایج مطلوبی برخوردار نمی‌باشد (۱۷). گلشن و همکاران (۱۳۹۴) کارایی مدل SWAT را در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز هراز شامل زیرحوضه‌های کره‌سنگ، رزن، چلاو و پنجاب با مساحت‌های مختلف ارزیابی کردند. آن‌ها به منظور تحلیل حساسیت، از الگوریتم SUFI2 برای پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی رواناب منطقه استفاده نمودند. نتایج ایشان حاکی از دقت بالای مدل SWAT در شبیه‌سازی زمان وقوع و میزان دبی اوج در ایستگاه‌های بررسی شده بود (۸). حسینی و همکاران (۱۳۹۵) از مدل SWAT به منظور برآورد جریان زیرزمینی در ۶ حوضه جنوب غرب کشور شامل حوضه‌های گلگل، باغان، مرغاب، شکستیان، تنگ بریم، دراگاه استفاده نمودند. به جز حوزه شکستیان استان فارس، نتایج این پژوهش حاکی از کارایی قابل قبول و مطلوب مدل در برآورد بیلان در حوضه‌های مورد مطالعه بود (۹). ضیایی (۱۳۹۵) با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS و با بکارگیری از الگوریتم SEBAL به تحلیل عددی اجزای بیلان آب در حوضه زاینده‌رود پرداختند، نتایج ایشان نشان داد که میانگین بارش سالانه، رواناب، تبخیر و تعرق و تغذیه به ترتیب ۶۲۹۸، ۱۶۹۵، ۴۴۸۴ و ۸۸/۸۴ میلیون متر مکعب برای سال ۲۰۱۳ می‌باشد (۱۹). کوهستانی (۱۳۹۵) از مدل SWAT برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های منابع آب (آب آبی و سبز) در حوضه زاینده‌رود در سه دوره اقلیمی پایه، آینده بلند مدت (۲۰۲۰-۲۱۰۰) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۶۰) استفاده نموده و جهت انجام تحلیل حساسیت، واسنجی و تحلیل عدم قطعیت از الگوریتم SUFI2 استفاده نمود. نتایج نشان داد که مدل SWAT دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه در مرحله واسنجی داشت و مقادیر شاخص‌های آماری، توانایی مناسب مدل در شبیه‌سازی روند تغییرات جریان و رواناب را نشان دادند (۱۰). در پژوهش حاضر از مدل SWAT جهت شبیه‌سازی بیلان آب در حوضه آبریز زاینده‌رود استفاده شده است. با وجود این که در زمینه استفاده از این مدل در بررسی‌های مربوط به حوضه‌های آبریز مطالعات گسترده‌ای انجام گرفته است ولی به دلیل ناکافی بودن و

حوضه زاینده‌رود با مساحتی معادل ۲۶۹۱۷ کیلومتر مربع، در منطقه نیمه‌خشک مرکزی ایران و در میان عرض جغرافیایی ۳۱ تا ۳۴ شمالی و طول جغرافیایی ۴۹ تا ۵۳ درجه شرقی قرار دارد (۱۸). حوضه زاینده رود از شمال به حوضه آبریز دریاچه نمک، از غرب و جنوب غرب به حوضه آبریز کارون و دز، از شرق به حوضه آبریز دق سرخ و کویر سیاه کوه و از جنوب به حوضه آبریز شهرضا محدود می‌گردد. مرتفع ترین نقطه حوضه کوه کربوش با ارتفاع ۳۹۷۴ متر از سطح دریا و کم ارتفاع ترین نقطه حوضه تالاب گاوخونی با ارتفاع ۱۴۵۰ متر از سطح دریا می باشد (۱۱). حوضه زاینده‌رود شدیداً تحت تأثیر تغییرات بارندگی زیادی است، به‌طوری که ناحیه چلگرد در سمت غرب حوضه دارای بارش میانگین سالانه بیش از ۱۴۰۰ میلی‌متر بوده در حالی که در شرق حوضه و در کنار تالاب گاوخونی بارش سالانه از ۱۰۰ میلی‌متر تجاوز نمی‌کند (۱۵). رودخانه زاینده‌رود بزرگ‌ترین رودخانه در این حوضه و همچنین فلات مرکزی ایران است که نقشی مهم و حیاتی در تأمین آب شرب، صنعت و کشاورزی منطقه مرکزی ایران دارد (۷). این رودخانه از کوه‌های زاگرس در غرب استان اصفهان سرچشمه گرفته و ضمن طی ۳۵۰ کیلومتر به سمت شرق به باتلاق گاوخونی در جنوب شرقی اصفهان می‌ریزد. شکل ۱ موقعیت کلی حوضه آبریز زاینده‌رود را نشان می‌دهد.

دقت پایین اطلاعات مکانی از جمله نوع خاک، نوع کاربری اراضی، همچنین پراکندگی و تعداد ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد استفاده جهت واسنجی و اجرای مدل، لزوم مطالعات دقیق‌تر در این زمینه به نظر می‌رسد. از این رو، در این مطالعه تلاش شده است با نگاهی دقیق‌تر بر عواملی که پیش‌تر گفته شد و همچنین استفاده از پارامترهای بیشتر در امر واسنجی مدل نسبت به مطالعات پیشین دقت نتایج حاصل از این مدل افزایش یابد. بدین منظور از اطلاعات ۲۷ کلاس کاربری اراضی، ۵۷ کلاس خاک، ۲۷ ایستگاه هواشناسی شامل داده‌های روزانه بارش و دمای حداقل و حداکثر، ۶ ایستگاه هیدرومتری و ۱۷ مؤلفه مؤثر بر رواناب در حوضه آبریز زاینده‌رود جهت واسنجی استفاده گردید. این حوضه یکی حوضه‌های آبریز بزرگ ایران است که در تأمین آب شرب، صنعت و کشاورزی پایین دست خود نقشی حیاتی دارد. از این رو، با توجه به توانایی مطلوب مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیک حوضه آبریز، هدف اصلی در پژوهش حاضر شبیه‌سازی هیدرولوژیک با نگاهی جامع‌تر و همچنین برآورد بیلان آب در حوضه آبریز زاینده‌رود برای دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در حوضه آبریز زاینده‌رود

Figure 1- The location of studied meteorological stations in the Zayandeh-Rud River Basin

مواد و روش‌ها

SWAT یک مدل هیدرولوژیک نیمه‌توزیعی در مقیاس حوضه آبریز است. این مدل برای پیش‌بینی اثرات بلند مدت شیوه‌های مدیریت اراضی بر روی اجزای بیلان آب، رسوبات و عملکرد مواد شیمیایی کشاورزی در حوضه‌های آبریز بزرگ با شرایط متنوع مدیریتی، نوع خاک و کاربری اراضی توسعه داده شده است. برای دستیابی به این اهداف، در این مدل از اطلاعات مربوط به آب و هوا، ویژگی‌های خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و شیوه‌های مدیریت اراضی به جای استفاده از معادلات رگرسیونی به‌منظور توصیف رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی در حوزه آبریز، استفاده می‌شود. از این رو، فرآیندهای فیزیکی مرتبط با حرکت آب، حرکت رسوبات، رشد محصولات و چرخه مواد مغذی به طور مستقیم با استفاده از این داده‌ها توسط مدل شبیه‌سازی می‌شوند. این مدل یک مدل پیوسته زمانی است و در گام‌های زمانی ساعتی، روزانه و یا طولانی مدت (سالانه) اجرا می‌شود. چرخه هیدرولوژیک که به وسیله مدل SWAT شبیه‌سازی می‌شود، بر پایه روابط پیوستگی بیلان آب است (۱۴):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

که در رابطه فوق، t زمان (روز)، SW_t مقدار نهایی آب موجود در خاک (میلی‌متر)، SW_0 مقدار اولیه آب موجود در خاک (میلی‌متر)، R_{day} مقدار بارش در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز i ام (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز i ام (میلی‌متر) و W_{seep} مقدار آبی است که از پروفیل خاک به ناحیه غیر اشباع خاک در روز i ام وارد می‌شود (میلی‌متر).

در مدل SWAT دو روش برای تخمین رواناب سطحی وجود دارد: روش شماره منحنی (CN)^۱ و روش نفوذ گرین و امپت^۲. در این پژوهش از روش شماره منحنی و طبق رابطه ۲ استفاده شده است:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (2)$$

پارامتر S به صورت مکانی با تغییرات خاک، کاربری اراضی، مدیریت و شیب منطقه و به صورت زمانی با تغییرات آب موجود در خاک تغییر می‌کند. S به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

که در روابط فوق، Q_{surf} رواناب سطحی (میلی‌متر)، R_{day} عمق بارش روزانه (میلی‌متر)، S پارامتر نگهداشت رطوبت (میلی‌متر) و CN

پارامتر خصوصیات حوضه از نظر نفوذپذیری می‌باشد. این پارامتر بی بعد بوده و تابعی از جنس زمین، پوشش گیاهی موجود و رطوبت خاک است.

مدل SWAT جریان زیرسطحی جانبی را در یک مقطع دو بعدی و در مسیر جریان به طرف پایین یک شیب تپه، شبیه‌سازی می‌کند. در برآورد موج جنبشی جریان زیرسطحی اشباع یا جریان جانبی، فرض می‌شود که خطوط جریان در منطقه اشباع با مرز غیراشباع موازی بوده و شیب هیدرولیکی برابر شیب کف است. در نهایت، دبی در خروجی از شیب تپه از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$Q_{lat} = 0.024 \left(\frac{2SW_{ly,excess} K_{sat} S_{lp}}{\Phi_d L_{hill}} \right) \quad (4)$$

که در رابطه فوق، Q_{lat} دبی در خروجی تپه (میلی‌متر در روز)، $SW_{ly,excess}$ مقدار آب قابل زهکشی در لایه مورد نظر (میلی‌متر)، K_{sat} هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی‌متر در ساعت)، S_{lp} شیب (ارتفاع در واحد فاصله)، Φ_d تخلخل قابل زهکشی خاک (میلی‌متر بر میلی‌متر) و L_{hill} طول تپه (متر) می‌باشند.

همچنین برای محاسبه جریان آب زیرزمینی (جریان پایه) از معادله ۵ استفاده می‌شود (۲):

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \exp[-\alpha_{gw} \Delta t] + W_{rchg,sh} (1 - \exp[-\alpha_{gw} \Delta t]) \quad (5)$$

که در رابطه فوق، $Q_{gw,i}$ جریان آب زیرزمینی یا جریان پایه در روز i ام (میلی‌متر)، $Q_{gw,i-1}$ جریان آب زیرزمینی یا جریان پایه در روز $i-1$ ام (میلی‌متر)، α_{gw} ثابت کاهش جریان پایه، Δt زمان (روز) و $W_{rchg,sh}$ مقدار آب وارد شده به آبخوان کم عمق در روز i ام (میلی‌متر) می‌باشند.

مدل SWAT از سه روش گوناگون برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده می‌کند. این روش‌ها عبارتند از: هارگریوز-سامانی^۳، پریستلی-تیلور^۴ و روش پنمن-مانتیس^۵. انتخاب و به‌کارگیری از هر یک از این روش‌ها به داده‌های اقلیمی موجود وابسته است. در این پژوهش از روش هارگریوز-سامانی که برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل تنها به پارامتر درجه حرارت و تابش خورشیدی دریافتی (وابسته به عرض جغرافیایی) نیاز دارد، استفاده شده است.

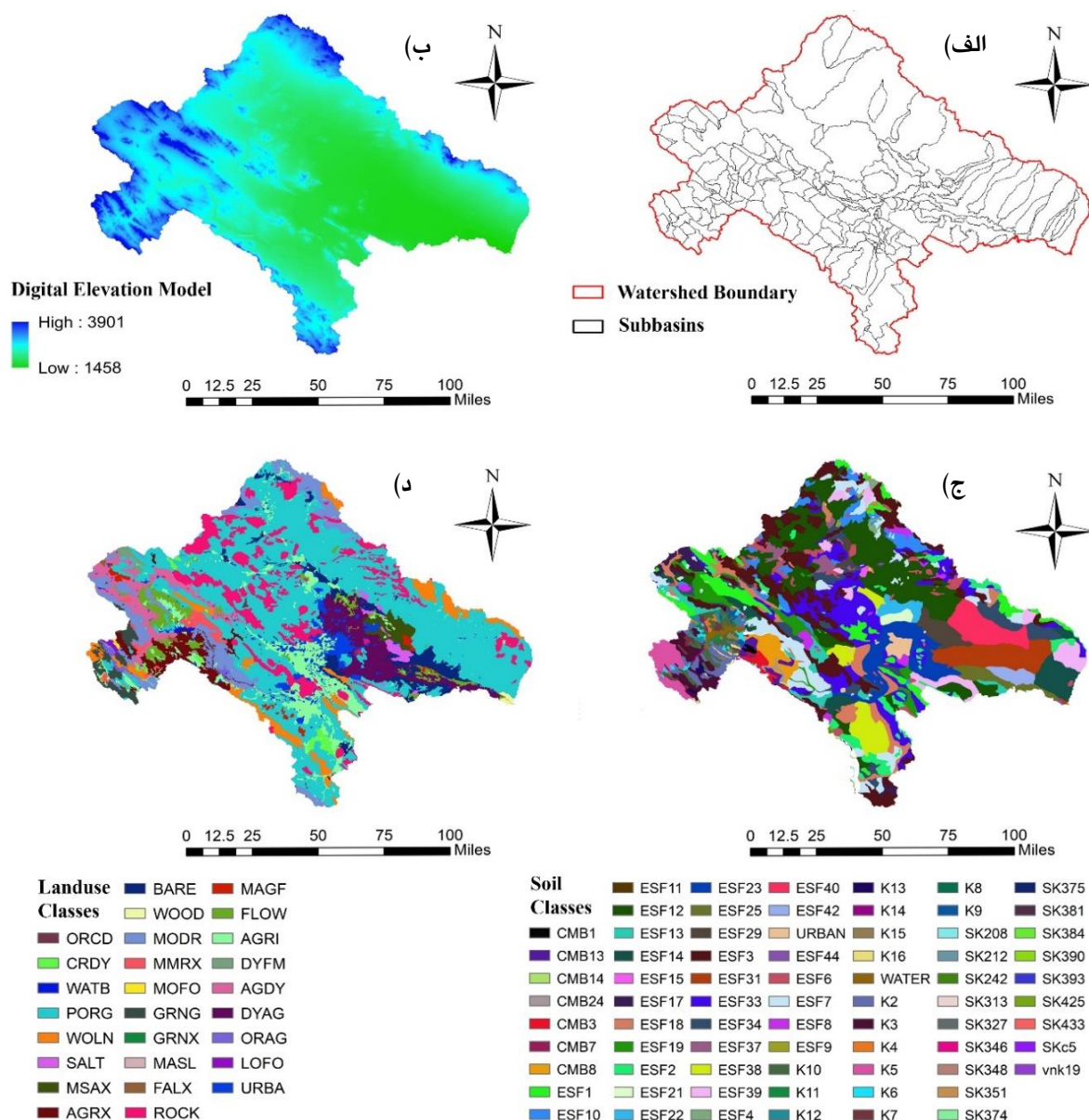
3- Hargreaves-Samani

4- Priestley-Taylor

5- Penman-Monteith

1- SCS Curve Number Method

2- Green and Ampt Method



شکل ۲- (الف) زیرحوضه‌ها، (ب) مدل رقمی ارتفاعی، (ج) نقشه خاک، (د) نقشه کاربری اراضی

Figure 2- (A) Sub-Basins, (B) Digital Elevation Model (DEM), (C) Soil Map, (D) Lanuse Map

کلاس (۵-، ۱۰-، ۲۰-۵، ۲۰-۱۰ و بیش از ۲۰ درجه) تفکیک گردید. در گام بعد، ابتدا شاخص‌های فیزیوگرافی مختلف حوضه آبریز از مدل رقمی ارتفاعی تعیین شده و سپس مرز حوضه آبریز با توجه به توپوگرافی منطقه ترسیم و حوضه آبریز به ۲۰۳ زیرحوضه تقسیم گردید. به منظور ایجاد واحدهای پاسخ هیدرولوژیک^۱ (HRUs)، بدون در نظر گرفتن حد آستانه، از واحدهای پاسخ هیدرولوژیک غالب در هر

اطلاعات مورد نیاز و مدل‌سازی

اطلاعات مورد نیاز برای شروع مدل‌سازی شامل اطلاعات مکانی و داده‌های هواشناسی هستند. در پژوهش حاضر ابتدا اطلاعات مکانی ورودی شامل لایه رقمی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر، لایه کاربری اراضی شامل ۲۷ نوع کاربری و لایه خاک با ۷۳ نوع خاک (براساس گروه هیدرولوژیک خاک، تعداد لایه‌های خاک، مواد آلی خاک و...) به مدل فراخوانی شدند (شکل ۳). همچنین لایه شیب براساس توپوگرافی و خصوصیات فیزیوگرافی منطقه مطالعاتی به ۴

پارامتر، آنالیز حساسیت مطلق^۵ برای همه پارامترها، تعیین دامنه عدم قطعیت اولیه برای هر پارامتر جهت نمونه برداری لاتین هاپیر کیوب^۶، نمونه برداری به روش لاتین هاپیر کیوب در هر مرحله اجرا، محاسبه تابع هدف برای هر مرحله شبیه سازی، محاسبه حساسیت نسبی، محاسبه عدم قطعیت و ارائه دامنه جدید برای هر پارامتر به منظور کاهش عدم قطعیت می باشد (۱). دامنه پارامترها به صورت تجربی و یا بر مبنای بررسی های انجام شده پیشین در منطقه مورد مطالعه انتخاب می شود. در الگوریتم SUFI2، ۷ تابع هدف متفاوت تعریف شده است و واسنجی مدل تا رسیدن مقادیر هر یک از توابع هدف به مقدار بهینه ادامه می یابد. در این پژوهش برای بهینه سازی تابع هدف از ضریب نش - ساتکیف استفاده شد که از رابطه ۶ قابل محاسبه است:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (6)$$

در رابطه فوق، n تعداد مشاهدات، Q_m و Q_s به ترتیب مقادیر رواناب اندازه گیری و برآورد شده (متر مکعب بر ثانیه) و $\bar{Q}_m$ به ترتیب میانگین مقادیر اندازه گیری و برآورد شده رواناب (متر مکعب بر ثانیه) می باشد. مقدار عددی ضریب NSE از منفی بی نهایت تا ۱ (مقدار بهینه) متغیر بوده و هر چه به ۱ نزدیک تر باشد بیان گر آن است که مدل برآورد بهتری داشته است. عموماً اگر شاخص نش - ساتکیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد کارایی مدل عالی، اگر بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد رضایت بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد غیر قابل قبول فرض می شود (۱۳).

پس از واسنجی، صحت مدل با استفاده از پارامترهای به دست آمده در مرحله واسنجی و از مقادیر مشاهداتی که در مرحله واسنجی مورد استفاده قرار نگرفته است، سنجیده می شود. در صورت شبیه سازی قابل قبول، مدل برای کاربرد آماده خواهد بود.

در پژوهش حاضر از داده های اندازه گیری شده ۶ ایستگاه هیدرومتری سد تنظیمی، پل زمان خان، پل کله، دیزچه، لنج و موسیان در مسیر رودخانه زاینده رود به منظور واسنجی و صحت سنجی نتایج شبیه سازی مدل استفاده شده است. دوره زمانی شبیه سازی برای واسنجی (۱۹۹۸-۲۰۰۶) و برای صحت سنجی (۲۰۰۷-۲۰۰۹) انتخاب شد و مدل اجرا گردید که در آن سال های ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹ به عنوان دوره تعادل جویی^۷ به منظور دستیابی به عملکرد بهینه در واسنجی مدل تعیین شدند. موقعیت مکانی و مشخصات ایستگاه های هیدرومتری منتخب در حوضه آبریز زاینده رود به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۱ ارائه گردیده است.

زیرحوضه برای آن زیرحوضه استفاده شد. از این رو، در مجموع ۲۰۳ واحد پاسخ هیدرولوژیک ایجاد گردید. این واحدها از نظر ویژگی های هیدرولوژیک (نوع کاربری اراضی، گروه هیدرولوژیک خاک و کلاس شیب) مشابه یکدیگر هستند و مبنای محاسبات مدل را تشکیل می دهند. در ادامه داده های هیدروکلیماتیک شامل داده های بارندگی، دمای کمینه و بیشینه، سرعت باد و رطوبت نسبی بر پایه زمانی روزانه از ۲۷ ایستگاه هواشناسی (۲ ایستگاه هم دید^۱، ۷ ایستگاه باران سنجی، ۸ ایستگاه اقلیم سنجی و ۱۰ ایستگاه تخیخ سنجی) موجود در منطقه مطالعاتی به مدل وارد شد (شکل ۲). همچنین داده های مربوط به جریان از دو ایستگاه هیدرومتری واقع در شاخه اصلی رودخانه زاینده رود اخذ گردید. در پایان مدل به منظور شبیه سازی مؤلفه های بیلان آب برای دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ اجرا شد.

تحلیل حساسیت

در مدل های هیدرولوژیک پارامترهای فیزیکی زیادی در حال اندرکنش هستند و اندازه گیری دقیق آن ها در حوضه های بزرگ امکان پذیر نیست و یا نیازمند صرف وقت و هزینه زیاد است. جهت دستیابی به این هدف بررسی کارایی مدل پیش از استفاده از آن از طریق آنالیز حساسیت، واسنجی و صحت سنجی ضروری است.

قدم اول در بررسی کارایی مدل انجام آنالیز حساسیت برای تعیین پارامترهای حساس در اجرای مدل به منظور واسنجی می باشد. از طریق آنالیز حساسیت، میزان تغییر در مقادیر خروجی مدل به ازای تغییر در میزان ورودی های آن محاسبه شده و پارامترهای حساس در اجرای مدل تعیین می گردد. روش های مورد استفاده برای انجام آنالیز حساسیت در حالت کلی به دو گروه تحلیل های موضعی و سراسری طبقه بندی می شوند. تحلیل موضعی که به روش OAT (یک فاکتور در یک زمان^۲) نیز شناخته می شود در حقیقت واکنش شبیه سازی مدل را به تغییرات پیوسته هر پارامتر در شرایط ثابت بودن سایر پارامترها مورد بررسی قرار می دهد (۱۲). در پژوهش حاضر آنالیز حساسیت از روش تحلیل موضعی انجام شد و نتایج حاصل با استفاده از آزمون t -test مورد ارزیابی قرار گرفت. این ارزیابی به دامنه پارامترها وابسته است.

در پژوهش حاضر به منظور واسنجی مدل از الگوریتم SUFI2^۳ در چارچوب نرم افزار SWAT-CUP استفاده شد. در این برنامه فرض می شود که هر پارامتر به طور یکنواخت در یک دامنه با عدم قطعیت معین توزیع شده است. الگوریتم SUFI2 طی ۹ گام اجرا می شود. مراحل واسنجی شامل: تعریف تابع هدف^۴، تعریف دامنه برای هر

5- Absolute sensitivity analysis

6- Latin hypercube

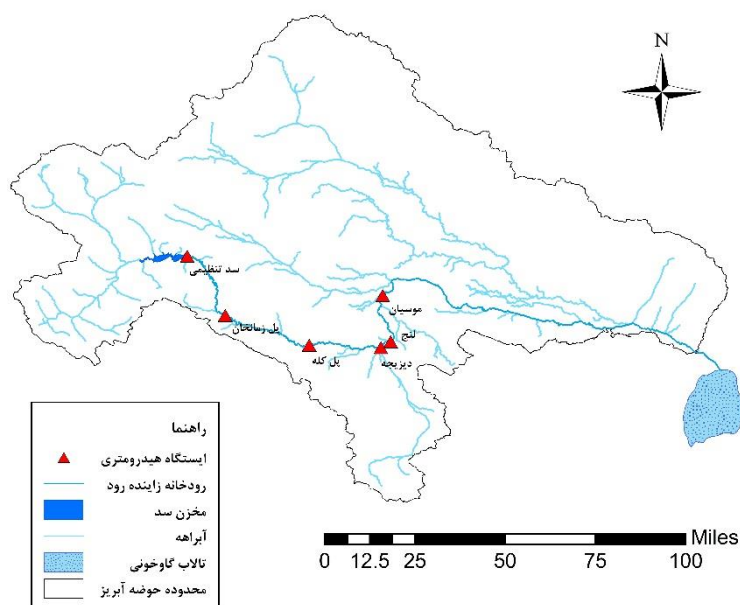
7- Warm up

1- Synoptic station

2- One factor at a time

3- Sequential uncertainty fitting algorithm

4- Objective function



شکل ۳- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه در حوضه آبریز زاینده‌رود

Figure 3- The location of studied hydrometric stations in the Zayandeh-Rud River Basin

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب برای واسنجی و صحت‌سنجی در حوضه آبریز زاینده‌رود

Table 1- Specifications of selected hydrometric stations for calibration and validation in Zayandeh-Rud River basin

شماره	نام ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
No.	Station	Elevation (m)	Latitude	Longitude
1	سد تنظیمی	2130	32.7188	50.7846
2	پل زمان‌خان	1880	32.4983	50.8947
3	پل کله	1715	32.3794	51.2313
4	دیزپچه	1653	32.3697	51.5188
5	لنج	1646	32.3933	51.5575
6	موسیان	1600	32.5769	51.5261

نتایج و بحث

نتایج بدست آمده از تحلیل حساسیت نشان داد که با توجه به ویژگی‌های حوضه آبریز مورد مطالعه، مدل SWAT نسبت به ۱۷ پارامتر مؤثر بر رواناب حساسیت بیشتری دارد. همچنین پارامترهای انتخاب شده تأیید کننده نتایج پژوهش‌های پیشین انجام گرفته در منطقه است (۱۷). در جدول ۲ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترها آورده شده است.

از پارامترهای حساس انتخاب شده در مرحله آنالیز حساسیت جهت واسنجی مدل استفاده شد. در مرحله بعد پارامترهای حساس به نرم‌افزار SWAT-CUP وارد گردید. سپس این پارامترها با الگوریتم SUFI2، ۱۰۰۰ بار مورد تکرار قرار گرفتند و در نهایت مقدار بهینه برای هر پارامتر مشخص شد. در جدول ۳ مقادیر بهینه و حدود مقادیر

پارامترهای منتخب در دوره واسنجی (۲۰۰۶-۲۰۰۰) ارائه شده است. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT (داده‌های مشاهده ای، شبیه‌سازی شده و باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد) به صورت نمونه برای دو ایستگاه هیدرومتری پل زمان‌خان و لنج جهت بررسی کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبریز زاینده‌رود به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۴ مقادیر بدست آمده از شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ضریب ناش-ساتکلیف و ضریب تعیین در هر ۶ ایستگاه هیدرومتری در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب بزرگتر از ۰/۵۶ و ۰/۶۹ می‌باشد که بیانگر آن است که مدل در شبیه‌سازی رواناب توانایی قابل قبولی داشته است.

جدول ۲- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترها برای حوضه زاینده‌رود

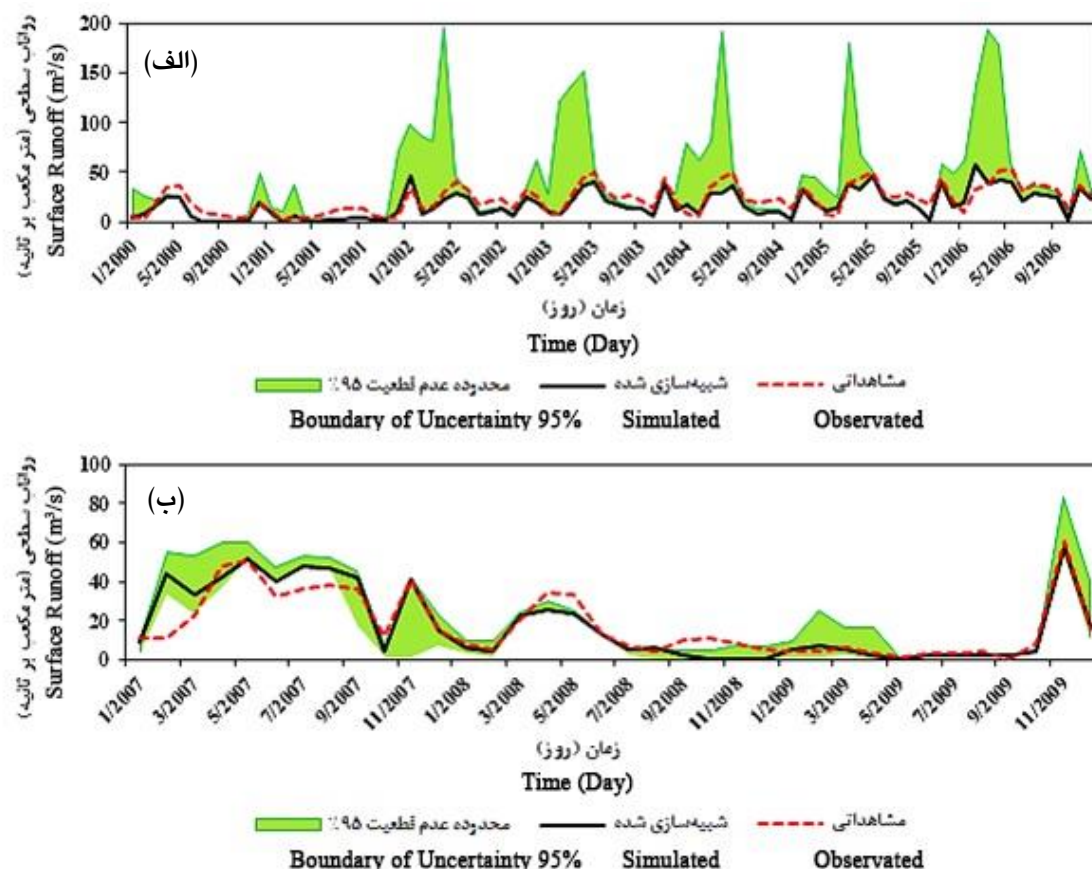
Table 2- Results of sensitivity analysis of parameters for the Zayandeh-Rud River basin

پارامتر حساس	رتبه	آماره p	آماره t	پارامتر حساس	رتبه	آماره p	آماره t
Sensitive parameters	Rank	p-value	t-state	Sensitive parameters	Rank	p-value	t-state
GW_DELAY	13	0.2225	2.74	CH_K2	2	0.0435	-14.61
GW_REVAP	1	0.0117	24.35	CH_N2	17	0.6467	0.62
SFTMP	16	0.3373	-1.71	CN2	12	0.1941	-3.18
SMTMP	6	0.1419	-4.41	SOL_K	4	0.0671	-9.46
SMFMX	11	0.1630	3.82	SOL_BD	3	0.0572	-11.11
SMFMN	5	0.1100	5.73	SOL_AWC	7	0.1505	4.15
TIMP	14	0.2300	2.65	EPCO	9	0.1595	3.91
ALPHA_BF	10	0.1619	-3.85	ESCO	15	0.2831	-2.1
				RCHRG_DP	8	0.1549	4.03

جدول ۳- مقادیر بهینه و حد بالا و پایین پارامترهای منتخب در دوره واسنجی (۲۰۰۶-۲۰۰۰)

Table 3- Optimal and upper and lower limit of selected parameters during calibration period (2000-2006)

نام پارامتر Parameter name	شرح پارامتر Description	نوع تغییرات پارامتر* Method of changing parameter value	واحد Unit	حدود پارامتر Range of parameter		مقدار بهینه Optimum value
				بالا Maximum	پایین Minimum	
CH_K2	هدایت هیدرولوژیکی مؤثر در کانال اصلی	v	mm/hr	114	101.5	103.47
CH_N2	ضریب مانینگ برای کانال اصلی	r	-	0.13	0.102	0.11
CN2	شماره منحنی نفوذ (SCS) برای شرایط اولیه رطوبت	r	-	0.281	0.197	0.24
SOL_K	هدایت هیدرولیکی اشباع	r	mm/hr	-0.32	-0.15	-0.31
SOL_BD	وزن مخصوص ظاهری خاک	r	g/cm ³	-0.167	-0.095	-0.11
SOL_AWC	ظرفیت ذخیره آب موجود در خاک	r	mm H ₂ O/mm soil	0.28	0.21	0.27
EPCO	ضریب جبران کننده جذب رو به بالای آب توسط گیاه	v	-	0.41	0.29	0.41
ESCO	ضریب جبران کننده تبخیر از سطح خاک	v	-	0.501	0.41	0.46
RCHRG_DP	کنترل نفوذ به آبخوان عمیق	v	-	0.32	0.229	0.27
GW_DELAY	زمان تأخیر برای تغذیه آبخوان	v	days	159	132.7	135.52
GW_REVAP	ضریب تبخیر مجدد در آب زیرزمینی	v	-	0.115	0.085	0.11
SFTMP	دمای بارش برف	v	° C	-1.81	-1	-1.69
SMTMP	دمای آستانه برای ذوب برف	v	° C	-1.92	-0.95	-1.28
SMFMX	فاکتور بیشینه ذوب برف در تابستان	v	mm/C.day	11.36	9.72	10.67
SMFMN	فاکتور کمینه ذوب برف در زمستان	v	mm/C.day	8.95	7.5	7.92
TIMP	فاکتور تأخیر دمای فشرده‌سازی برف	v	-	0.7	0.5	0.65
ALPHA_BF	ثابت پسروری جریان پایه	v	Day	0.08	0	0.035

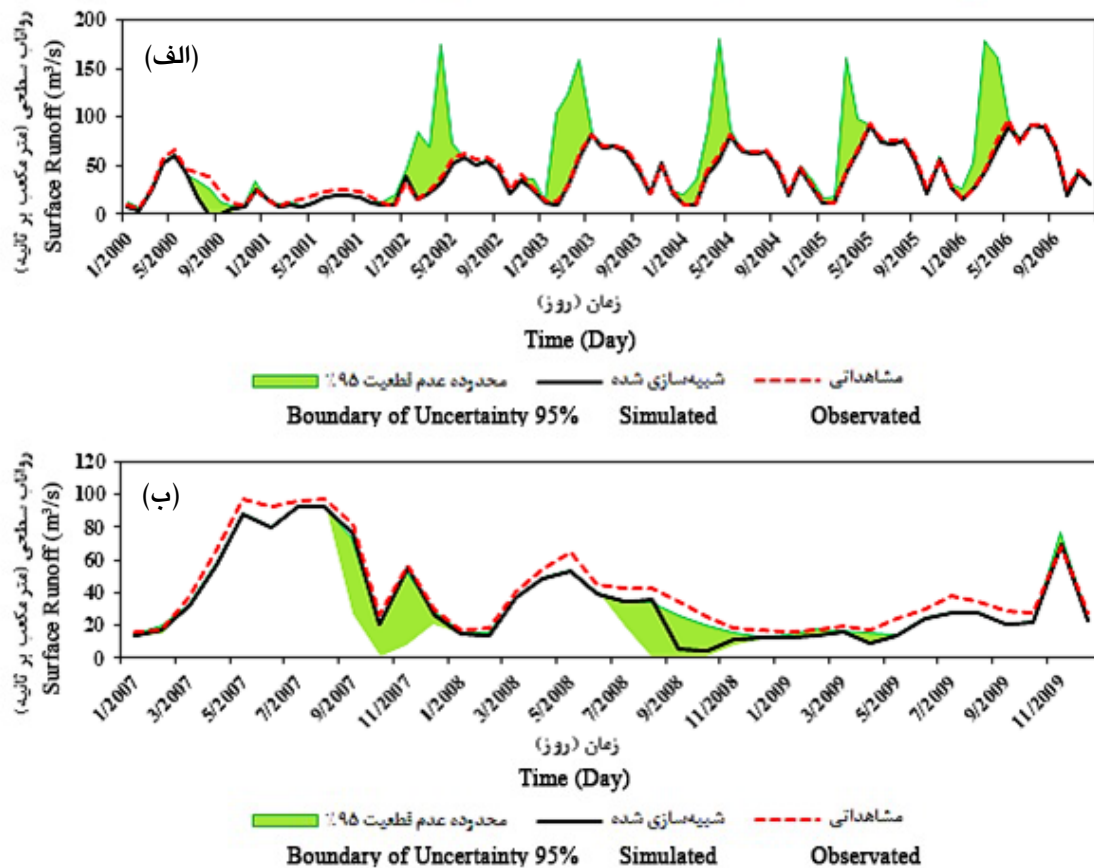


شکل ۴- نتایج واسنجی (الف) و صحت سنجی (ب) مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI-2 برای شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه هیدرومتری پل زمان‌خان

Figure 4- Validation results (a) and validation results (b) of the SWAT model using the SUFI-2 algorithm for the runoff simulation at Polzamankhan's hydrometric station

جدول ۴- مقایسه آماری دبی روزانه شبیه‌سازی و مشاهدات در دوره واسنجی

ایستگاه هیدرومتری Hydrometric station	طول دوره آماری Statistical period		آماره نش ساتکیف NS		ضریب تعیین R ²	
	صحت‌سنجی Validation	واسنجی Calibration	صحت‌سنجی Validation	واسنجی Calibration	صحت‌سنجی Validation	واسنجی Calibration
	Validation	Calibration	Validation	Calibration	Validation	Calibration
سد تنظیمی	36	84	0.97	0.97	0.97	0.98
پل زمان‌خان	36	84	0.88	0.93	0.95	0.95
پل کله	36	84	0.90	0.89	0.95	0.95
دیزیچه	36	84	0.83	0.56	0.85	0.70
لنج	36	84	0.77	0.63	0.82	0.78
موسیان	36	84	0.69	0.68	0.83	0.79



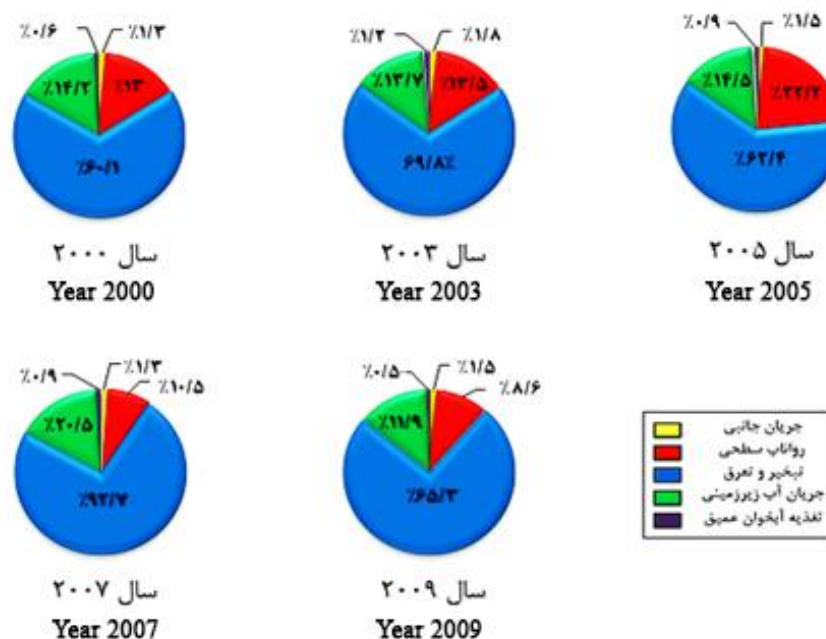
شکل ۵- نتایج واسنجی (الف) و صحت سنجی (ب) مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI-2 برای شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه هیدرومتری لنج

Figure 5- Validation results (a) and validation results (b) of the SWAT model using the SUFI-2 algorithm for the runoff simulation at Lenj's hydrometric station

به تبخیر و تعرق واقعی می‌باشد که محدوده تغییرات آن بنا به نوع بارش در منطقه مورد تحقیق از ۶۰/۱٪ (سال ۲۰۰۰) تا ۹۲/۷٪ (سال ۲۰۰۷) متغیر می‌باشد. پس از تبخیر و تعرق، رواناب سطحی با میزان تغییرات ۲۲/۲٪ (سال ۲۰۰۵) تا ۸/۶٪ (سال ۲۰۰۹) و جریان آب زیرزمینی با میزان تغییرات ۱۴/۲٪ (سال ۲۰۰۰) تا ۲۰/۵٪ (سال ۲۰۰۷) از نوسانات نسبتاً بالا و سهم زیادی در بیلان حوضه برخوردار بودند. این نتایج نشان می‌دهد جریانی جانبی با دامنه تغییرات ۱/۳٪ تا ۱/۹٪ تغییر قابل توجهی در این سال‌ها نداشته است. همچنین تغذیه آبخوان عمیق با دامنه تغییرات ۱/۲٪ تا ۰/۵٪ به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۹ کمترین سهم را به خود اختصاص داده است.

سهم مؤلفه‌های بیلان آب از بارش سالانه در حوضه آبریز زاینده‌رود

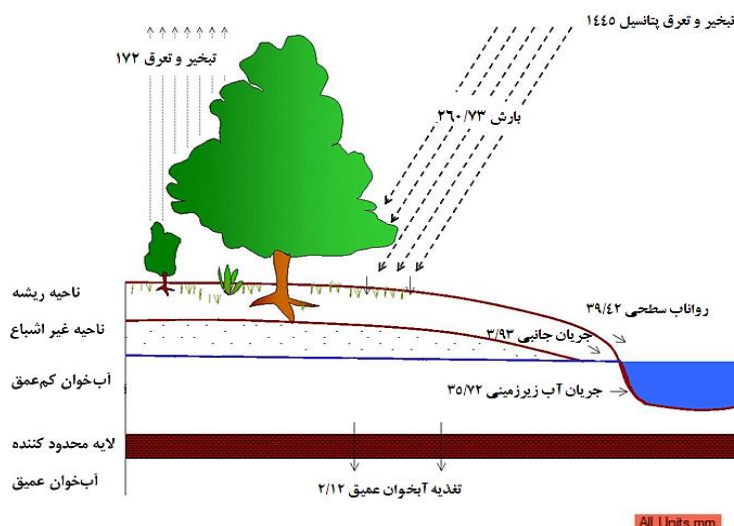
پس از واسنجی مدل و اطمینان از کارایی مطلوب مدل در شبیه سازی فرآیندهای هیدرولوژیک برای منطقه، مدل واسنجی شده برای دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ به صورت ماهانه اجرا شد. سهم مؤلفه‌های تشکیل دهنده بیلان شامل تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، جریان جانبی، جریان آب زیرزمینی و تغذیه آبخوان عمیق از بارش سالانه حوضه محاسبه گردید. در شکل ۶ سهم هر یک از اجزای بیلان آب از بارش سالانه در حوضه آبریز زاینده‌رود برای سال‌های منتخب طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ ارائه شده است. حجم آب قابل استحصال از مرلفه‌های جریان نشان می‌دهد که بیش‌ترین سهم بیلان آب مربوط



شکل ۶- سهم هر یک از پارامترهای بیلان آب از بارش سالانه در حوضه آبریز زاینده‌رود برای سال‌های منتخب طی دوره ۲۰۰۹ تا ۲۰۰۰
Figure 6- Contribution of each water balance parameter from annual precipitation in the Zayandeh-Rud River Basin for years 2000-2009

سایر مطالعات انجام شده از جمله ضیایی در محاسبه بیلان کمی منابع آب در حوضه آبریز زاینده‌رود با استفاده از تصاویر سنجش از دور و همچنین فرامرزی و بسالت‌پور در ارتباط با کاربرد مدل نیمه توزیعی SWAT در مدل‌سازی هیدرولوژیک حوضه آبریز زاینده‌رود تأیید کننده توانایی این مدل در شبیه‌سازی و محاسبه بیلان کمی منابع آب حوضه آبریز می‌باشند که نتایج نسبتاً مشابهی با این پژوهش داشته‌اند.

با توجه به قرار داشتن در ناحیه نیمه‌خشک و عرض جغرافیایی میانه، منطقه مورد مطالعه از میزان تبخیر و تعرق پتانسیل بالایی برخوردار است. به طوری که تبخیر و تعرق (۶۵/۹۸ درصد) بیش‌ترین سهم تلفات بارش سالانه در منطقه را تشکیل می‌دهند. همچنین پس از تبخیر و تعرق، به‌ترتیب رواناب سطحی (۱۵ درصد)، جریان آب زیرزمینی (۱۳/۷ درصد)، جریان جانبی (۱/۵ درصد) و تغذیه آبخوان عمیق (۰/۸ درصد) سایر سهم باقی‌مانده از بارش را تشکیل می‌دهند.

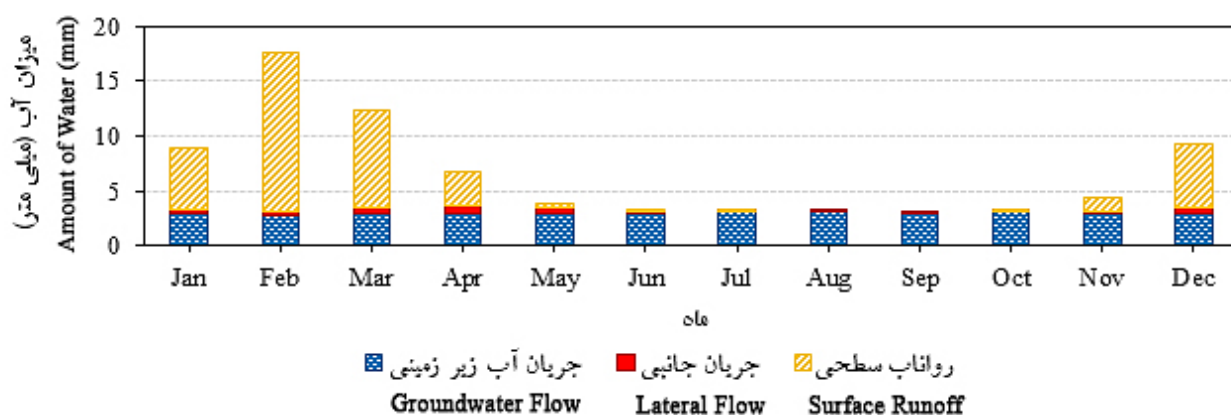


شکل ۷- میانگین سالانه مؤلفه‌های بیلان آب محاسبه شده توسط مدل SWAT برای دوره زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۰۰ در حوضه آبریز زاینده‌رود
Figure 7- Average annual water balance components for the period 2000-2009 in the Zayandeh-Rud River Basin

آبریز زاینده‌رود در شکل ۷ قابل مشاهده است.

مقدار آب ورودی به رودخانه (از منابع مختلف) در زمستان و اوایل بهار بیشترین مقدار و در اواخر تابستان به کمترین میزان می‌رسد. در تمامی ماه‌های سال، آب زیرزمینی به صورت جریان پایه بخش ثابتی از آب رودخانه را تأمین می‌کند. همچنین برخلاف رواناب سطحی که از اواسط پاییز تا اوایل بهار بیش‌ترین سهم از جریان رودخانه را تأمین می‌کند، جریان جانبی در بیشتر ماه‌های سال سهم بسیار کمی از جریان رودخانه را شامل می‌شود (شکل ۸).

مطالعات ضیایی (۱۳۹۵) نشان داد که میانگین رواناب، تبخیر و تعرق و تغذیه به ترتیب ۲۶/۹، ۷۱/۲ و ۱/۴۱ درصد نسبت به بارش ورودی به حوضه آبریز برای سال ۲۰۱۳ است (۳). همچنین فرامرزی و بسالت‌پور (۲۰۱۵) گزارش داده‌اند که میانگین بارش برف، ذوب برف، رواناب سطحی، تغذیه آب زیر زمینی و تبخیر و تعرق واقعی ۱۹/۵ و ۱۴/۶ و ۲۵/۶ و ۶/۰۹ و ۶۳/۴ درصد برای دوره زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۹ می‌باشد (۹). میانگین سالانه مؤلفه‌های بیلان آب محاسبه شده توسط مدل SWAT برای دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ در حوضه



شکل ۸- سهم رواناب سطحی، جریان آب زیرزمینی، جریان جانبی در تامین جریان ماهانه رودخانه زاینده‌رود

Figure 8- Contribution of surface runoff, groundwater flow, lateral flow in the supply of monthly flow of Zayandeh-Rud River Basin

نتیجه‌گیری

صورت جریان جانبی و ۰/۸ درصد به صورت تغذیه آبخوان عمیق از حوضه خارج می‌گردد. همچنین این نتایج نشان دهنده هدر رفت ذخایر آبی موجود در خاک و منابع زیرزمینی حوضه از طریق تبخیر و تعرق است که بیش‌ترین سهم تلفات بارش سالانه در منطقه را تشکیل می‌دهد. از این رو، اقدامات جدی در راستای جلوگیری از هدر رفت آب از طریق تبخیر و تعرق در منطقه ضروری به نظر می‌رسد. از نتایج این پژوهش می‌توان برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و اقدامات مدیریتی قابل اجرا در منطقه که به‌صورت سناریوهایی به مدل ارائه می‌شود، استفاده کرد.

در پژوهش حاضر، بخش هیدرولوژیک مدل SWAT در حوضه آبریز زاینده‌رود مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج صحت‌سنجی مدل نشان داد این مدل در برآورد بیلان آب در حوضه آبریز زاینده‌رود از کارایی مناسبی برخوردار است و می‌تواند در حوضه‌های آبریز مشابه و تحلیل سناریوهای مختلف مورد استفاده واقع شود. با توجه نتایج بدست آمده از اجرای مدل به‌صورت ماهانه طی دوره شبیه‌سازی (۲۰۰۹-۲۰۰۰)، از کل بارش سالانه ورودی به حوضه به‌ترتیب ۶۵/۹۸ درصد به صورت تبخیر و تعرق، ۱۵ درصد به صورت رواناب سطحی، ۱۳/۷ درصد به صورت جریان آب زیرزمینی، ۱/۵ درصد به

منابع

- 1- Abbaspour K.C. 2009. SWAT-CUP, SWAT Calibration and uncertainty programs, version 2 (user manual), EAWAG, 105p.
- 2- Adeogun A.G., Sule B.F., and Salami A.W. 2014. Validation of SWAT model for prediction of water yield and water balance: case study of upstream catchment of Jebba dam in Nigeria. International Journal Computer Math. Science, 8(2): 264-270.
- 3- Faramarzi M., Abbaspour K.C., Schulen R., and Yang H. 2009. Modelling blue and green water resources

- availability in Iran. *Hydrology Proceedings*, 23(3): 486-501.
- 4- Faramarzi M., and Besalatpour A.A. 2015. Hydrological modelling of Zayandeh Rud river basin using SWAT model. Isfahan Regional Water Organization, Final Report.
- 5- George S., and Sathian K.K. 2016. Assessment of water balance of a watershed using SWAT model for water resources management. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 5(4): 177-184.
- 6- Ghoraba S.M. 2015. Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3): 583-594.
- 7- Gohari A., Eslamian S., Mirchi A., Abedi-Koupaei J., Massah Bavani A., and Madani K. 2013. Water transfer as a solution to water shortage: a fix that can backfire. *Journal Hydrology*, 491(1): 23-39.
- 8- Golshan M., Kaviani A., Rouhani H., and Esmali Ouri A. 2015. Effect of Scale on SWAT Model Performance in Simulation of Runoff (Case Study: Haraz Catchment in Mazandaran Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(2): 293-303. (In Persian)
- 9- Hosseini M., Ghafouri M., Makarian Z., and Tabatabaei M. R. 2016. Estimate of the water balance in the basins reaching the Persian Gulf using the Semi-distributed SWAT Model. *Journal of Soil and Water Sciences*, 78(1): 183-194. (In Persian)
- 10- Kouhestani S. 2016. Evaluation of effects of climate change on the availability of blue and green water resources in Zayandeh-rud Basin. Ph.D. thesis Water Resources Engineering. College of Agriculture, Isfahan University of Technology. (In Persian)
- 11- Madani K., and Marino M.A. 2009. Expert knowledge based modeling for integrated water resources planning and management in the Zayandehrud River Basin. *Water Resource Management*, 23(11): 2163-2187.
- 12- Morgan R.P.C., and Nearing M.A. 2011. Handbook of erosion modelling. 1th, John Wiley & Sons, Ltd., Atrium.
- 13- Nash J.E., and Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282-290.
- 14- Neitsch S., Arnold J., Kiniry J., and Williams J. 2011. Soil and water assessment tool: theoretical documentation, version 2009, Texas Water Resource Institute, USA.
- 15- Safavi H.R., Golmohammadi M.H., and Sandoval-Solis S. 2015. System dynamics analysis for management Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Journal of Hydrology*, 528: 773-789.
- 16- Sathian K.K., and Shyamala P. 2009. Application of GIS Integrated SWAT Model for Basin Level Water Balance. *Indian Journal of Soil Conservation*, 37: 100-105.
- 17- Shafei M., Ansari H., Davari K., and Ghahreman B. 2013. Calibration and uncertainty analysis of a semi-distributed model in a semi-arid region. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources. Water and Soil Science*. 17(64): 137-148. (In Persian)
- 18- Zareian M. J., Eslamian S., and Safavi H.R. 2014. A modified regionalization weighting approach for climate change impact assessment at watershed scale. *Theoretical and Applied Climatology*, 22(3-4): 497-516.
- 19- Ziaei H.R. 2016. Numerical analysis of water balance components of Zayandeh-Rud basin using remote sensing. MS.c Thesis in Water Resources Engineering. College of Agriculture, Isfahan University of Technology. (In Persian)



Assessment of SWAT Hydrological Model in Catchments' Water Balance Simulation Located in Semi-Arid Regions (Case Study: Zayandeh-Rud River Basin)

M. A. Amini^{1*}- Gh. Torkan²- S. Eslamian³- M.J. Zareian⁴- A.A. Besalatpour⁵

Received: 04-12-2017

Accepted: 29-07-2018

Introduction: Understanding the concept of water balance is one of the most important prerequisites for sustainable management of water resources in the watersheds. Therefore, the components of water resources in a catchment system should be compared at different time periods, and also the effect of each of them should be identified on varied hydraulic components of the hydrological systems. The SWAT model is an example of a physically based hydrologic model which can be used for large-scale simulating and monitoring of water cycle processes based on the characteristics of the catchment area and its climatic conditions. The main object of this study is the hydrologic simulation and water balance estimation for the period 2000-2009 in the Zayandeh-Rud River Basin.

Materials and Methods: The Zayandeh-Rud River Basin is located in the arid and semi-arid central region of Iran. This area is very variable in terms of rainfall. As well as the state of water resources and water consumption is very complicated in this catchment. In the present study, the soil and water assessment tool (SWAT) used to simulate water balance in the Zayandeh-Rud River Basin. The input required data included digital elevation model, land use map, soil texture map and meteorological information including daily rainfall data and minimum and maximum temperature data were introduced to the model and the model was implemented with these data. The sensitivity of the flow-effective parameters was determined using the p-value and t-state criteria by the SUFI2 algorithm in the SWAT-CUP program. The model was calibrated monthly and validated with the selected parameters in the sensitivity analysis using the Nash-Sutcliffe criteria and the coefficient of determination by the application of the data of six stations including. Calibration of the model was conducted for 2000-2006 and validation of the model for the years 2007-2009.

Results and Discussion: The results of sensitivity analysis showed that considering the characteristics of the study area, the SWAT model is more sensitive to the 17 effective parameters on runoff. The selected parameters also confirm the results of previous research carried out in the region. The sensitive parameters selected in the sensitivity analysis step were used to calibrate the model. In the next step, the parameters of SWAT-CUP software were entered. After that, these parameters were repeated 1000 times with the SUFI2 algorithm, and the optimal value for each parameter was determined. The Nash-Sutcliffe coefficient and the coefficient of determination in the six hydrometric stations are greater than 0.56 and 0.69 in calibration and verification periods respectively, which indicates that the model has a satisfactory ability to run in runoff simulation. The contribution of the components of the water balance including evapotranspiration, surface runoff, lateral flow, groundwater flow, and deep aquifer recharge was calculated from annual basin precipitation. The amount of extracted water from the hydrological components indicated that the largest share of the water balance was related to actual evapotranspiration, the range of variations in the type of precipitation in the study area ranged from 60.1% (2000) to 92.7 % (2007). After evapotranspiration, surface runoff with a change of 22.2% (2005) to 8.6% (2009) and groundwater flow with a change of 14.2% (2000) to 20.5% (the year 2007) had relatively high fluctuations and a large share in the basin balance. These results indicate that the lateral flow with a range of 3.1 to 1.9% had no significant change in these years. Also, the deep aquifer recharge with the range of 1.2 to 1.5% was the lowest in 2003 and 2009, respectively.

Conclusion: The results showed that the calibrated model for the Zayandeh-Rud River Basin had a desirable performance for both calibration and validation periods. Therefore, the SWAT model has acceptable

1 and 2- Ph.D. Students, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: Aminiamin2016@gmail.com)

3- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

4- Ph.D. of Departement of Water Resources Research, Water Research Institute (WRI), Ministry of Energy, Tehran, Iran

5- Ph.D. of Inter 3 GmbH- Institut für Ressourcenmanagement, Berlin, Germany

performance for simulating the water balance of the area. In addition, the results of this study showed that 65.98% of the total annual precipitation in the basin is in form of evapotranspiration, which compares to the other water balance components has the highest part. As well as surface runoff with 15%, groundwater flow with 13.7%, lateral flow with 1.5%, and deep aquifer recharge with 0.8% have other parts of the water balance components in Zayandeh-Rud River Basin. The results also indicate that the highest water losses in the soil and groundwater resources of the basin are due to evapotranspiration. Therefore, serious measures to prevent the loss of water through evapotranspiration in the region to be necessary. The results of this research can be used to predict the effects of climate change and the applicable management practices in the region, which are presented in scenarios to the model.

Keywords: Calibration, Sensitivity analysis, SUFI2 Algorithm, SWAT-CUP, Validation



اثر شوری آب و کمبود ازت خاک، بر ضریب K_s و مقدار آب سهل الوصول ذرت

رضا سعیدی^۱ - عباس ستوده‌نیا^{۲*} - هادی رضمانی‌اعتدالی^۳ - بیژن نظری^۴ - عباس کاویانی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۰۴

چکیده

برای مطالعه تأثیر شوری آب و کمبود ازت خاک (تنش حاصلخیزی)، بر مقدار ضریب K_s و آب سهل الوصول (RAW) ذرت، آزمایشی به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، در سال ۱۳۹۶ و در قزوین انجام شد. تیمارهای هدایت الکتریکی آب شامل چهار مقدار (S_0) ، (S_1) ، (S_2) ، (S_3) و (S_4) و دسی‌زیمنس بر متر و تیمارهای ازت خاک در چهار سطح (N_0) ، (N_1) ، (N_2) و (N_3) و درصد مصرف کود ازت، در سه تکرار و در کرت‌هایی به مساحت ۹ متر مربع به اجرا درآمد. هم‌زمان با افزایش مقاومت روزنه‌ها در اثر تنش‌های محیطی وارده بر گیاه، آبیاری کرت‌ها انجام شد. ضریب RAW با اندازه‌گیری رطوبت خاک قبل از آبیاری و ضریب K_s ، از تقسیم مقدار تبخیر و تعرق گیاه تحت تنش بر گیاه شاهد، محاسبه شد. تغییرات ضریب K_s از تیمار S_0N_0 تا S_3N_3 ۱ تا ۰/۶۳ بود. برای برآورد ضریب K_s از روی مقادیر تنش‌های شوری و ازت، توابع مختلف بین ضریب K_s و نسبت‌های $\frac{S_i}{S_0}$ و $\frac{N_i}{N_0}$ برازش داده شد. در نهایت تابع درجه دوم با ضریب تبیین ۰/۹۸۴ به عنوان تابع بهینه تخمین K_s انتخاب شد. با تغییر حاصلخیزی از N_0 به N_3 در تیمارهای S_0 ، S_1 ، S_2 و S_3 مقدار RAW به ترتیب: ۶۳/۷، ۵۸/۷، ۵۵/۴ و ۴۲ درصد و با تغییر شوری آب از S_0 به S_3 در تیمارهای N_0 ، N_1 ، N_2 و N_3 مقدار RAW به ترتیب: ۵۱/۷، ۴۶/۳، ۴۲/۷ و ۴۲ درصد برآورد شد. نتایج نشان داد که تنش شوری آب و کمبود ازت خاک، بر افزایش مقاومت روزنه، کاهش تبخیر و تعرق گیاه و حفظ محتوای آب خاک مؤثر بود. پس در شرایط وجود تنش‌های محیطی، می‌توان با کاهش حجم آب آبیاری، علاوه بر تأمین آب مورد نیاز گیاه، از هدررفت آب جلوگیری به‌عمل آورد.

واژه‌های کلیدی: ازت، تبخیر و تعرق، ذرت، رطوبت قابل جذب، شوری آب

مقدمه

عنوان تنش‌های شوری و حاصلخیزی، بر مقدار تبخیر و تعرق گیاه مؤثرند. تنش شوری، جذب نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و آهن را در ذرت کاهش داده و باعث افزایش مقاومت روزنه‌ها می‌شود (۹). در تحقیقی روی گیاهان حساس به شوری، گزارش شد که افزایش تنش شوری، باعث افزایش مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها شد. در این شرایط و با افزایش مقاومت روزنه گیاه، تعرق گیاه کاهش یافت (۱۹). با فرض اینکه افزایش شوری خاک باعث کاهش تبخیر و تعرق ذرت می‌شود، آزمایشی برای تعیین مقدار ازت مورد نیاز خاک، در چهار سطح شوری آب و چهار مقدار کود نیتروژن انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش شوری باعث بسته شدن روزنه‌ها و تجمع NO_3^- در خاک شد. بنابراین با کاهش تبخیر و تعرق در اثر شوری آب، نیاز به ازت هم کاهش یافت (۱۴). به منظور تعیین ضریب K_s گندم در شرایط تنش آبی، آزمایشی در سطوح مختلف آبیاری شامل: ۰ (دیم)، ۵۵، ۷۰ و ۸۵ درصد تبخیر و تعرق گندم انجام شد. نتایج نشان داد که در شرایط کم آبیاری فوق، به ترتیب: ۳۳، ۲۱، ۱۳ و ۸ درصد از مقدار تبخیر و تعرق گندم، نسبت به شرایط آبیاری کامل کاسته شد (۷). آزمایشی دیگر، برای تعیین اثر کود نیتروژن بر تبخیر و تعرق ذرت، تحت سه رژیم

برآورد تبخیر و تعرق واقعی محصولات زراعی، برای تعیین نیاز آبیاری آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌طور معمول عوامل اقلیمی، گیاهی و شرایط مدیریتی منطقه مورد کشت، بر مقدار تبخیر و تعرق گیاه مؤثر بوده و آن را نسبت به مقدار پتانسیل (در شرایط استاندارد)، متمایز می‌کند. در صورت مساعد نبودن شرایط فوق برای تبخیر و تعرق، گیاه با تنش مواجه شده و از عملکرد محصول کاسته می‌شود. برآورد صحیح مقدار تبخیر و تعرق واقعی گیاه، برنامه‌ریزان کشاورزی را قادر خواهد ساخت تا با مشخص کردن نیاز آبی و مقدار بارندگی مؤثر، برنامه‌ریزی‌های لازم را برای تأمین آب مورد نیاز گیاه، انجام دهند (۱۶). برخی از عوامل نامساعد محیطی و مدیریتی در کشت محصولات، مانند شوری آب آبیاری و کمبود ازت خاک، به

۱، ۲، ۳ و ۴ - به ترتیب دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشیار و استادیاران گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (۵)

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

ضریب K_s به عنوان ضریب کاهش تبخیر و تعرق گیاه، می توان تبخیر و تعرق واقعی گیاه را برآورد نموده و از مصرف بی مورد آب خودداری کرد. همچنین در فاصله بین دو آبیاری، با اندازه گیری مقاومت روزنه گیاه و شناسایی زمان افزایش مقاومت روزنه ها و بسته شدن آن ها، می توان محدوده دسترسی گیاه به رطوبت سهل الوصول داخل خاک را شناسایی نمود. با این کار و در شرایط تنش های مذکور، از نظر محاسبه حجم و دور آبیاری، تفاوت هایی نسبت به شرایط استاندارد وجود داشته که در راستای برنامه ریزی مناسب آبیاری به کار خواهد رفت. بنابراین هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر شوری آب و کمبود ازت خاک، بر مقدار ضریب K_s و حد تخلیه سهل الوصول آب توسط ذرت می باشد.

مواد و روش ها

این تحقیق، در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) قزوین، در موقعیت عرض جغرافیایی $32^{\circ} 19' 36''$ شمالی و طول جغرافیایی $50^{\circ} 07' 50''$ شرقی و ارتفاع 1382 متر از سطح دریا انجام شد. آب موجود برای آبیاری، آب چاه با هدایت الکتریکی $0.5 \frac{dS}{m}$ و اسیدیته 7.2 بود. قبل از اجرای طرح، با نمونه برداری از اعماق $0-30$ و $30-60$ سانتی متری در 5 نقطه از خاک مزرعه، آنالیز شیمیایی خاک به شرح جدول ۱ انجام شد. با توجه به جدول (۱) مصرف انواع کودهای؛ اوره، سوپر فسفات تریپل، سولفات پتاسیم، گوگرد و کود دامی به ترتیب به مقدار 350 ، 200 ، 200 ، 200 و 15000 کیلوگرم در هکتار، برای کشت ذرت علوفه ای، توسط آزمایشگاه خاک توصیه شده و غیر از اوره (ازت)، بقیه کودها قبل از کشت به خاک اضافه شد. کمبود مقدار ازت خاک (تنش حاصلخیزی) و شوری بیش از حد تحمل آب آبیاری (تنش شوری)، از عوامل مؤثر بر کاهش تبخیر و تعرق و عملکرد گیاهان به شمار می روند. در این تحقیق، دو تیمار شوری آب و کمبود ازت خاک در چهار سطح و سه تکرار، به همراه یک کرت شاهد، به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی به اجرا درآمد. گیاه مورد مطالعه، ذرت با رقم سینگل کراس 704 بوده و روش کاشت آن، به صورت جوی و پشته در کرت هایی با ابعاد 3×3 متر و با فاصله $1/5$ متر از هم، انتخاب شد. در تحقیقات گذشته ابعاد کرت ها؛ 3×3 متر و 3×5 متر گزارش شد (۱۰ و ۱۲). همچنین در تحقیقات دیگر، تراکم ذرت علوفه ای بین 75000 تا 95000 در هکتار انتخاب شد. به عنوان مثال؛ تراکم 80000 بوته و تراکم $87-70$ هزار بوته در هکتار، بهترین گزینه برای رقم سینگل کراس 704 گزارش شد (۱۸ و ۱۲). بنابراین در این تحقیق، تراکم بذر 80000 بوته در هکتار، فاصله پشته ها 75 سانتیمتر و فاصله بین بذور، $16/67$ سانتیمتر در طول پشته بود.

آبیاری؛ کامل، محدود (75% آبیاری کامل) و دیم انجام شد. تیمارهای نیتروژن شامل مصرف کود ازت به مقدار؛ 0 ، 84 ، 140 ، 196 و 252 کیلوگرم بر هکتار بود. نتایج نشان داد که شرایط دیم و آبیاری محدود، نسبت به آبیاری کامل و مصرف کم تر ازت نسبت به مصرف کامل آن، بر کاهش ضریب K_s تأثیر معنی داری داشت (۲۰). تحقیقی در دو سال زراعی 2009 و 2010 و در کشت ذرت، در سه سطح آبیاری؛ (I_1) کامل، (I_2) 75 و (I_3) 50 درصد نیاز آبی، سه تیمار شوری آب شامل؛ هدایت الکتریکی $(S_1) 0/6$ ، $(S_2) 2$ و $(S_3) 4$ دسی زیمنس بر متر و سه تیمار مصرف ازت شامل؛ $(N_1) 0$ ، $(N_2) 150$ و $(N_3) 300$ کیلوگرم بر هکتار، انجام شد. نتایج نشان داد با تغییر مقدار آبیاری از I_1 به I_3 ، 43 درصد از مقدار تعرق ذرت کاسته شد. همچنین با افزایش هدایت الکتریکی آب از S_1 به S_3 ، 12 درصد از تعرق ذرت کاسته شد (۶). در سال های 2011 و 2012 آزمایشی با سه تیمار شوری آب و چهار تیمار مصرف کود ازت بر روی پنبه انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش شوری آب و کاهش مصرف ازت، تبخیر و تعرق پنبه کاهش یافته و محتوای آب خاک محفوظ ماند. همچنین مصرف کود ازت، آسیب شوری را کاهش و بهره وری مصرف آب را افزایش داد (۱۵). در نشریه شماره 56 آبیاری و زهکشی فائو، گزارش شد که مقاومت روزنه های برگ، از ویژگی های گیاه بوده که مقدار آن بر پایه گونه های گیاهی و مدیریت زراعی متفاوت است. مقاومت روزنه ای تحت تأثیر اقلیم و آب قابل استفاده خاک بوده و با محدود شدن دسترسی گیاه به آب خاک، مقاومت افزایش و تعرق کاهش می یابد. طبق تعریف در نشریه فائو- 56 ، هرگاه سرعت جریان به سمت ریشه گیاه برای تأمین آب مورد نیاز تعرق کافی نباشد، آن نقطه رطوبتی خاک، حد آب سهل الوصول (RAW) برای گیاه است. در این زمان، گیاه با افزایش مقاومت روزنه ها و بستن جزئی آن ها، از شدت تعرق می کاهد. علاوه بر دمای هوا، رطوبت محیط و باد، عواملی نظیر شوری آب و کاهش حاصلخیزی خاک، دسترسی ریشه گیاهان به آب خاک را کاهش می دهند. در منابع علمی، حد RAW به طور متوسط برای گیاه ذرت $0/65$ گزارش شد (۳). بر اساس تحقیقاتی در کلرادو آمریکا، مقدار RAW ذرت در مراحل رشد 4 برگ، 16 برگ، خمیری شدن دانه ها و رسیدگی به ترتیب؛ 50 ، $60-70$ ، 50 و $60-70$ درصد گزارش شد (۵). در تحقیق دیگر، ضریب RAW به عنوان یک روش برنامه ریزی آبیاری معرفی شد که برای هر محصول و دوره رشد آن متفاوت است. RAW، تابعی از پارامترهای هواشناسی و اقلیمی و خصوصاً تنش های محیطی در خاک (خشکی، حاصلخیزی، شوری و ...)، تعریف شد (۲۳). تحقیقات گذشته نشان می دهد که تنش شوری آب و کمبود ازت خاک (تنش حاصلخیزی) به عنوان تنش های محیطی، بر افزایش مقاومت روزنه، کاهش تبخیر و تعرق گیاه و حفظ محتوای آب خاک مؤثر بوده است. در این شرایط، با کاربرد مقدار

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی خاک، قبل از کشت

Table 1- Results of chemical analysis of soil before cultivation

نوع تجزیه Analysis type	نتایج تجزیه خاک در عمق ۶۰-۳۰ (سانتی متر) ۳۰-۰ (سانتی متر)	
	The results of soil analysis in depth 0-30 (Centimeter) 30-60 (Centimeter)	
مقدار آب در خاک اشباع (درصد) Watre amount in saturation soil (percentage)	29	42
هدایت الکتریکی خاک (دسی‌زیمنس بر متر) Electrical conductivity of soil (dS/m)	0.33	0.33
اسیدیته خاک اشباع Saturated soil acidity	7.4	7.46
کربن آلی (درصد) Organic carbon (percentage)	0.06	0.09
ازت کل (درصد) Total nitrogen (percentage)	0.06	0.1
فسفر قابل جذب (پی پی ام) Absorbable phosphorus (p.p.m)	4	1
پتاسیم قابل جذب (پی پی ام) Absorbable potassium (p.p.m)	288	60
بافت خاک Soil texture	SL	SL
رس (درصد) Clay (percentage)	10	8
سیلت (درصد) Silt (percentage)	33	24.5
شن (درصد) Sand (percentage)	57	67.5
رطوبت وزنی در حد ظرفیت زراعی (درصد) Moisture content at field capacity (percentage)	23	22
رطوبت وزنی در نقطه پژمردگی (درصد) Moisture content at wilting point (percentage)	14	13.5

انتخاب شد (۳). مطابق با چهار سطح عملکرد فوق، تیمارهای S_0 ، S_1 ، S_2 و S_3 به ترتیب شامل؛ آب آبیاری با هدایت الکتریکی ۵/۰، ۲/۱، ۳/۵ و ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر بود. برای تهیه آب شور مورد نیاز برای آبیاری، با توجه به تحقیقات گذشته از نمک صنعتی استفاده شد (۱۰). به این صورت که در حجم یک لیتر آب، مقدار نمک لازم برای رسیدن به EC مدنظر محاسبه شد. سپس بر اساس رابطه به‌دست آمده، حجم آب شور مورد نیاز برای آبیاری کرت‌ها، در تانک‌های بزرگ تهیه شد. برای اطمینان بیشتر، همواره EC آب ورودی به کرت‌ها توسط دستگاه EC متر کنترل شد. در مجموع و با عنایت به شکل (۱)، تعداد ۱۶ تیمار تنش شوری و حاصلخیزی، در سه تکرار به اجرا درآمد.

بر اساس توصیه کودی حاصل از آنالیز خاک، به هر کرت ۱۳/۵ کیلوگرم کود دامی (۱۵ تن در هکتار)، ۱۸۰ گرم (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) از هر نوع کود سوپرفسفات‌تریپل، سولفات پتاسیم و گوگرد، قبل از کاشت بذور داده شد. در تاریخ ۹۶/۴/۶ بذرها کاشته شده و تاریخ جوانه زنی اولیه آن‌ها ۹۶/۴/۱۱ بود. در این طرح، تنش حاصلخیزی در قالب مصرف کود اوره (ازته) و در چهار سطح بود. تیمارهای N_0 ، N_1 ، N_2 و N_3 به ترتیب؛ مصرف ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد از کود ازت مورد نیاز، بر اساس توصیه کودی بود. مقادیر متفاوت کود اوره یکبار در زمان ۶-۷ برگی گیاه (توصیه آزمایشگاه خاک) و بار دیگر، قبل از ظهور گل‌های نر به کرت‌ها داده شد. از سوی دیگر، پس از کاشت بذر و استقرار گیاه (پنج برگی شدن گیاه)، تنش شوری توسط آبیاری گیاه با آب شور و در چهار سطح اعمال شد. حداکثر هدایت الکتریکی مجاز آب آبیاری (EC_{iw}) که منجر به کاهش محصول نشود، برای ذرت علوفه‌ای $\frac{1}{2} \left(\frac{dS}{m} \right)$ گزارش شد. بنابراین تیمارهای شوری آب بر اساس پتانسیل عملکرد ذرت در چهار سطح ۱۰۰، ۹۰، ۷۵ و ۵۰ درصد

شکل ۱- شبکه تیمارها

اندازه‌گیری رطوبت خاک کرت‌ها، با توجه به روابط (۱) و (۲)، تبخیر و تعرق گیاهان شاهد و تحت تنش برآورد شد. در صورتی که تبخیر و تعرق گیاه تحت تنش (ET_{c-adj}) کمتر از تبخیر و تعرق گیاه شاهد (ET_c) بوده باشد، با تقسیم ET_{c-adj} بر ET_c ضریب تنش K_s محاسبه شد. مقدار ضریب K_s در کرت‌های تحت کنترل (شاهد)، برابر با عدد یک و با اعمال تنش، این عدد کوچکتر از یک برآورد شد.

در رابطه (۱)، $(ET)_i$: تبخیر و تعرق روزانه گیاه در کرت کنترل (شاهد)، $(\theta_{i-1} - \theta_i)$: اختلاف رطوبت روزانه خاک در کرت کنترل (شاهد)، pb: چگالی ظاهری خاک $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ و D_{rz} : عمق ریشه گیاه (cm) می‌باشد.

در رابطه (۲)، $(ET_{c-adj})_i$: تبخیر و تعرق روزانه گیاه در کرت تحت تنش و $(\theta'_{i-1} - \theta'_i)$: اختلاف رطوبت روزانه خاک در کرت تحت تنش می‌باشد.

در این طرح، مقادیر روزانه تبخیر و تعرق ذرت، در همه کرت‌ها اندازه‌گیری شده و ضرایب K_s از روی آن‌ها محاسبه شد. مقادیر RAW نیز، با اندازه‌گیری رطوبت خاک کرت‌ها قبل از انجام آبیاری برآورد شد. سپس با کمک نرم‌افزار SPSS، موارد اندازه‌گیری شده مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفته و تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها، توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

با به کارگیری داده‌های برداشت شده از طرح، مقدار ضریب K_S در شرایط وجود مقادیر متفاوتی از تنش‌های شوری آب و کمبود ازت، از طریق رابطه (۳) قابل پیش‌بینی است. در این رابطه، صرفاً تأثیر تنش‌های مذکور در نظر گرفته شده و سایر عوامل مؤثر، ثابت نگه‌داشته شد.

در رابطه (۳)، K_S : ضریب تنش تبخیر و تعرق ذرت، $\frac{N_i}{N_0}$: مقدار کود ازت داده شده به زمین نسبت به حاصلخیزی کامل، $\frac{S_i}{S_0}$: مقدار

تعیین زمان آبیاری، منوط به رسیدن رطوبت خاک به حد RAW (آب سهل الوصول) بود. اگر آب خاک کمتر از مقدار RAW شود، سرعت جریان به سمت ریشه برای تأمین آب مورد نیاز گیاه، کافی نخواهد بود. در این پژوهش، زمان رسیدن رطوبت خاک به حد RAW با اندازه‌گیری مقدار مقاومت روزه برگ‌های ذرت توسط دستگاه پرومتر AP4 تعیین شد. در روزهای بعد از آبیاری، با اثرگذاری تنش‌های محیطی بر گیاه، مقدار مقاومت روزه گیاه نسبت به روزهای اولیه پس از آبیاری، افزایش یافته و روزه‌ها به‌طور جزئی بسته‌شد. در این زمان رطوبت وزنی خاک اندازه‌گیری شده و از تقسیم آن بر مقدار رطوبت بین دو حد FC و PWP خاک مزرعه، مقدار RAW محاسبه شد. با توجه به تنوع تیمارها، زمان واکنش روزه‌ها به تنش متفاوت بوده و بعد از مشاهده واکنش، آبیاری کرت‌ها انجام شد. برای این کار، حجم آب ورودی کرت، منطبق با درصد کمبود رطوبت خاک از حد RAW تا FC، در واحد عمق ریشه گیاه و سطح کرت، در برنامه اکسل محاسبه شده و توسط کنترلر آب کنترل شد. با توجه به اختلاف ناچیز رطوبت خاک و فاصله‌دار بودن کرت‌ها، امکان تبادل رطوبت بین آن‌ها وجود نداشت. ولی برای افزایش اطمینان، در روزهای اولیه کشت و همزمان با آبیاری کرت‌ها، فواصل بین آن‌ها (پیاده‌رو) آبیاری سنگین شده و بلافاصله روی پیاده‌روها پلاستیک کشیده شد. این کار مانع تابش نور خورشید به خاک پیاده‌روها، مکش آب و جابجایی رطوبت بین کرت‌ها شد.

1- Time Domain Reflectometry

افزایش مقدار شوری آب فراتر از آستانه تحمل گیاه، ضریب K_s کاهش یافته و در سطوح S_1 ، S_2 و S_3 به ترتیب؛ $0/۷۷$ و $0/۸۸$ و $0/۹۵$ شد. در شکل ۳ و در شوری قابل تحمل آب آبیاری ($0/۵ \frac{ds}{m}$)، تغییرات ضریب K_s نسبت به تغییر مقدار کود ازت مصرفی در خاک، مشخص شد. در این حالت، با کاهش مقدار ازت خاک، ضریب K_s کاهش یافته و در سطوح N_1 ، N_2 و N_3 به ترتیب؛ $0/۹۸$ ، $0/۹۶$ و $0/۹۵$ شد. با توجه به شیب خط در شکل ۲ و ۳، مشاهده شد که به ازای افزایش یک دسی‌زیمنس بر متر شوری آب و کاهش ۲۵ درصد در مصرف ازت، به ترتیب؛ $۴/۵$ و $۱/۷$ درصد از مقدار K_s کاسته شد. تحلیل مشابهی نیز در نشریه شماره ۵۶ آبیاری و زهکشی فائو گزارش شد که به ازای افزایش یک دسی‌زیمنس بر متر شوری خاک از آستانه ($0/۵ \frac{ds}{m}$) $۱/۸$ ، $۷/۴$ درصد از عملکرد ذرت علوفه‌ای کاسته شد. بنابراین مشخص شد که هر کدام از تنش‌های شوری و کمبود ازت، به تنهایی بر کاهش تبخیر و تعرق گیاه مؤثر بوده و در این میان، اثر تنش شوری بیشتر بود. برای بررسی اثر توأمان تنش‌های مذکور بر ضریب K_s ، تجزیه واریانس داده‌ها به روش دانکن طبق جدول ۴ انجام شد. نتایج نشان داد که تأثیر دو تنش مذکور بر مقدار K_s ، در سطح یک درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین داده‌ها در جدول ۵ بیان می‌کند که افزایش شوری آب و کاهش ازت خاک، باعث کاهش مقدار K_s شد. در مقادیر مختلف مصرف ازت، میانگین ضریب K_s در سطح شوری S_0 ، S_1 ، S_2 و S_3 ، به ترتیب؛ $0/۹۷$ ، $0/۹۲$ ، $0/۸۶$ و $0/۶۸$ شد. دلیل نتایج به دست آمده این است که با افزایش شوری آب، پتانسیل اسمزی آب در خاک کاهش یافته و گیاه برای به دست آوردن آب، باید انرژی بیشتری مصرف کند. به همین خاطر، از مقدار تعرق گیاه کاسته شده و محتوای آب خاک محفوظ می‌ماند. از سوی دیگر، وجود یون‌های Na^+ و Cl^- به صورت محلول در خاک شور، علاوه بر بروز سمیت در گیاه، باعث اختلال در فرایند جذب آب و عناصر غذایی مانند نیتروژن، از خاک به گیاه می‌شوند (۲). تحقیق مشابهی در سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶ در کشت گندم و با تیمارهای شوری آب آبیاری شامل؛ (S_1)، (S_2)، (S_3) و (S_4) ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش شوری آب آبیاری، پتانسیل آب خاک کاهش یافته و ضریب K_s به ترتیب؛ ۱، ۱، $0/۹۳$ و $0/۸۲$ شد (۱). در تحقیق دیگر، افزایش شوری آب آبیاری از ۲ به ۷ دسی‌زیمنس بر متر، سبب کاهش تبخیر و تعرق ذرت دانه‌ای به میزان $۲۴/۸$ درصد گزارش شد. به عبارت دیگر شیب کاهش ضریب K_s در این تحقیق، $۴/۹$ درصد محاسبه شد که به نتایج پژوهش کنونی نزدیک است (۱۱). در تحقیقی اثر افزودن کود ازت بر تبخیر و تعرق ذرت، در کشور ایتوی بررسی شد. به ترتیب از شرایط خاک فقیر تا شرایط حاصلخیزی کامل، تعرق ذرت از ۱۴۶ به ۳۵۵ میلی‌متر افزایش یافت. بنابراین مصرف ازت بر افزایش مقدار ضریب K_s مؤثر بود (۸). در تحقیق

هدایت الکتریکی آب آبیاری نسبت به شوری قابل تحمل برای ذرت و A_0 : بردار ثابت سایر عوامل مؤثر بر ضریب K_s است. در رابطه فوق، متغیرهای مستقل و وابسته بی‌بعد هستند. برای یافتن توابع قابل برازش بین متغیرهای مستقل و وابسته، از توابع پیشنهاد شده در نرم‌افزار اکسل استفاده شد. این توابع شامل؛ فرم‌های خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی بوده که به عنوان توابع تولید K_s -شوری-حاصلخیزی، به ترتیب در روابط (۴) الی (۸) آورده شد. در نرم‌افزار SPSS، ضرایب توابع تولید، برآورد شده و برای تعیین معنی داری آن‌ها، از آماره F استفاده شد. آماره F نشان‌دهنده معنی‌دار بودن کلی تابع می‌باشد. در تحقیقات گذشته، از رابطه (۳) برای مدل‌سازی عملکرد گوجه فرنگی، تحت تأثیر مقادیر مختلف آب کاربردی و شوری آب آبیاری در منطقه کرج استفاده شد (۱۷).

$$K_s = A_0 + A_1 \left(\frac{N_i}{N_0} \right) + A_2 \left(\frac{S_i}{S_0} \right) \quad (۴)$$

$$K_s = A_0 \cdot \left(\frac{N_i}{N_0} \right)^{A_1} \cdot \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^{A_2} \cdot e^{[A_3 \left(\frac{N_i}{N_0} \right) + A_4 \left(\frac{S_i}{S_0} \right)]} \quad (۵)$$

$$K_s = A_0 + A_1 \ln \left(\frac{N_i}{N_0} \right) + A_2 \ln \left(\frac{S_i}{S_0} \right) \quad (۶)$$

$$K_s = A_0 + A_1 \left(\frac{N_i}{N_0} \right) + A_2 \left(\frac{N_i}{N_0} \right)^2 + A_3 \left(\frac{S_i}{S_0} \right) + A_4 \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^2 + A_5 \left(\frac{N_i}{N_0} \right) \cdot \left(\frac{S_i}{S_0} \right) \quad (۷)$$

$$K_s = A_0 \left(\frac{N_i}{N_0} \right)^{A_1} \cdot \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^{A_2} \quad (۸)$$

با داشتن داده‌های مشاهده‌ای (Observation) و پیش‌بینی شده (Predict) ضریب K_s و استفاده از آماره‌های مربوطه شامل؛ حداکثر خطا (ME)، میانگین ریشه دوم خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2)، کارایی مدل‌سازی (EF) و ضریب باقیمانده مدل (CRM)، اعتبار توابع ارزیابی شده و تابع بهینه تعیین می‌گردد. معادلات مربوط به آماره‌های فوق، در روابط (۹) الی (۱۳) آورده شد.

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (۹)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \times \frac{100}{O} \quad (۱۰)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۱۱)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۱۲)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (۱۳)$$

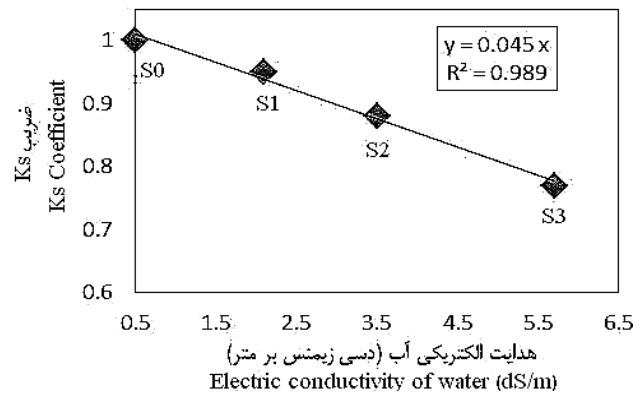
نتایج و بحث

ضریب تنش تبخیر و تعرق ذرت (K_s)

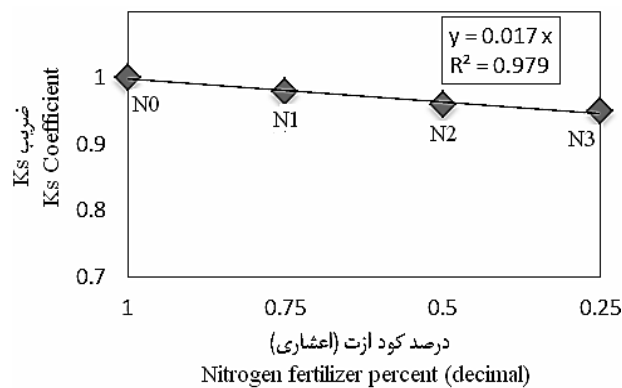
در این تحقیق، پس از اندازه‌گیری مقدار تبخیر و تعرق ذرت در شرایط تحت کنترل و تنش، اقدام به محاسبه ضریب (K_s) شد. با توجه به نوع و مقدار تنش وارده به هر کرت، مقدار K_s متفاوت بود. در شکل ۲ و در سطح حاصلخیزی ۱۰۰ درصد (کامل)، حساسیت ضریب K_s نسبت به تغییر هدایت الکتریکی آب مشاهده می‌شود. با

معادلات برآورد نیاز آبی گیاهان به کار می‌رود، در شرایط استاندارد و بدون تنش تعیین شده‌است و اگر از این معادلات در شرایط غیر استاندارد (با وجود تنش) استفاده شود، بی‌تردید بیش از نیاز گیاه، آب مصرف شده‌است. پس در شرایط بحرانی کمبود آب، لزوم این تحقیقات و به‌کارگیری نتایج آن‌ها برای استفاده بهینه و کاهش مصرف آب، بیش از گذشته احساس می‌شود.

دیگر، اثر مصرف کود نیتروژن بر تبخیر و تعرق دو رقم گندم حساس و مقاوم به کم‌آبی در چین مطالعه شد. با افزودن ۲۷۰ کیلوگرم بر هکتار کود نیتروژن، میانگین مجموع تبخیر و تعرق در سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۱۲ برای گندم حساس و مقاوم به کم‌آبی به ترتیب ۲۱/۷ و ۱۸/۷ درصد افزایش یافت (۲۴). با توجه به نتایج تحقیقات گذشته، تنش‌های محیطی (شوری و کمبود ازت) تأثیر به‌سزایی در برآورد نرخ تبخیر و تعرق واقعی گیاه دارند. هم‌اکنون، آن چیزی که به‌عنوان



شکل ۲- تغییرات ضریب K_s ، نسبت به تغییرات شوری آب در سطح ازت کامل
Figure 2- Changes in K_s coefficient, relative to salinity changes at full nitrogen level



شکل ۳- تغییرات ضریب K_s ، نسبت به تغییرات ازت خاک، در شوری قابل تحمل
Figure 3- Changes in K_s coefficient, relative to soil nitrogen changes, in acceptable salinity

درجه دوم و توانی، به‌عنوان مدل‌های رگرسیونی انتخاب شده و با برازش آن‌ها بین داده‌های $\frac{S_i}{S_0}$ و $\frac{N_i}{N_0}$ قابلیت آن‌ها برای تعیین مقدار ضریب K_s ارزیابی شد. محدودیت این قبیل مدل‌ها، وابستگی آن‌ها به شرایط خاص مکانی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. اما نسبت به سایر روش‌های تئوری و تجربی که بر پایه فرضیات متعددی هستند، ترجیح داده می‌شوند. پس از برازش توابع مذکور در نرم‌افزار SPSS، ضرایب ثابت هر کدام از توابع طبق جدول ۲ برآورد شد. بنابراین با استفاده از توابع تعیین شده، ابتدا مقادیر K_s تخمین زده شد. سپس مقادیر تخمینی و واقعی K_s از طریق روابط (۹) الی (۱۳) و

تابع تولید ضریب K_s - شوری - حاصلخیزی

نتایج حاصل از بررسی ضریب K_s نشان داد که اثر توأمان افزایش شوری آب (تنش شوری) و کاهش مقدار ازت خاک (تنش حاصلخیزی)، بر کاهش تبخیر و تعرق ذرت مؤثر بود. بنابراین سعی شد که بین تنش‌های مذکور و ضریب تنش تبخیر و تعرق ذرت (K_s)، رابطه‌ای برازش داده شود. وزن پارامترهای تنش، به‌صورت نسبت‌های $\frac{S_i}{S_0}$ و $\frac{N_i}{N_0}$ که هر دو بی‌بعد هستند، تعیین شد. افزایش تنش حاصلخیزی با کاهش نسبت $\frac{N_i}{N_0}$ و افزایش تنش شوری با افزایش نسبت $\frac{S_i}{S_0}$ همراه بود. در این تحقیق، توابع خطی، نمایی، لگاریتمی،

و خشکی، برای برآورد عملکرد گوجه‌فرنگی در کرج، تابع درجه دوم به عنوان تابع بهینه معرفی شد (۱۷). در تحقیق دیگر، تابع درجه دوم به عنوان تابع بهینه تولید برای بذر یونجه (۲۲) و تولید گندم (۱۳) گزارش شد. تعیین مقدار ضریب تنش (K_s)، موجب تشخیص مقدار واقعی تبخیر و تعرق گیاه و برنامه‌ریزی متناسب آبیاری با نیاز آبی گیاه می‌گردد. در تحقیقات گذشته گزارش‌هایی در مورد تأثیر تنش شوری و کمبود ازت بر کاهش نرخ تبخیر و تعرق و ضریب تنش (K_s) ذرت، ارائه شد. اما در مورد مدل‌سازی و تعیین کمی این ضریب از روی نسبت بی‌بعد تنش‌های وارده بر گیاه، تحقیقی انجام نشد. پرواضح است تخمین ضریب K_s از روی وزن تنش‌های محیطی، دستاورد کاربردی برای مصرف بهینه آب و ازت در شرایط تنش‌های مذکور بوده که در نوع خود دارای نوآوری حائز اهمیتی است.

مطابق جدول ۳ مورد مقایسه قرار گرفت. برای اولویت بندی توابع، هر تابعی که آماره RMSE و ME آن حداقل بوده و یا آماره‌های R^2 و EF آن نزدیک به یک باشد، به عنوان تابع بهینه انتخاب شد. با توجه به جدول ۳، از نظر تمام آماره‌ها به غیر از آماره CRM، تابع درجه دوم به عنوان تابع بهینه، عملکرد خوبی برای تخمین ضریب K_s داشت. از نظر آماره ME و R^2 ، فرم خطی و از نظر RMSE و EF، فرم نمایی در اولویت بعدی قرار گرفت. فرم لگاریتمی و توانی هم به ترتیب در اولویت چهارم و پنجم انتخاب قرار گرفتند. مقادیر CRM نشان داد که به ترتیب در توابع؛ درجه دوم، خطی، نمایی، لگاریتمی و توانی، مقادیر K_s بیشتر از مقدار واقعی برآورد شد. پس تابع درجه دوم با ضریب تبیین ۰/۹۸۴ به عنوان تابع بهینه برای تخمین مقدار ضریب K_s ذرت در قزوین انتخاب شد. به طور مشابه در شرایط توأمان شوری

 جدول ۲- ضرایب فرم‌های مختلف توابع تولید کود- شوری- ضریب K_s

ضرایب	فرم خطی	فرم نمایی	فرم لگاریتمی	فرم درجه دوم	فرم توانی
Coefficients	Linear form	Exponential form	Logarithmic form	Polynomial form	Power form
A_0	0.959	0.895	1.039	0.982	1.038
A_1	0.103	-0.038	0.052	-0.061	0.059
A_2	- 0.028	0.093	-0.101	0.072	-0.108
A_3	-	0.18	-	-0.012	-
A_4	-	-0.054	-	-0.002	-
A_5	-	-	-	0.013	-
آماره F	**85.8	**2178	**974	**5027	**783
Statistical F					

** : نشان دهنده معنی دار بودن کلی تابع، در سطح احتمال یک درصد است.

***: Indicates the overall significance of the function at a probability level of one percent

جدول ۳- پارامترهای آماری محاسبه شده برای ارزیابی اعتبار توابع تولید

Table 3- Statistical parameters of calculated to evaluate the validity of production functions

نوع تابع	ME (%)	RMSE	R^2	EF	CRM
Function type					
خطی	0.048 ⁽²⁾ *	3.51 ⁽³⁾	0.959 ⁽²⁾	0.928 ⁽³⁾	34×10^{-4} ⁽⁴⁾
Linear					
نمایی	0.051 ⁽³⁾	2.89 ⁽²⁾	0.946 ⁽³⁾	0.951 ⁽²⁾	11×10^{-4} ⁽³⁾
Exponential					
لگاریتمی	0.114 ⁽⁴⁾	6.99 ⁽⁴⁾	0.718 ⁽⁴⁾	0.717 ⁽⁴⁾	-3.5×10^{-4} ⁽²⁾
Logarithmic					
درجه دوم	0.033 ⁽¹⁾	1.77 ⁽¹⁾	0.984 ⁽¹⁾	0.982 ⁽¹⁾	60×10^{-4} ⁽⁵⁾
Polynomial					
توانی	0.123 ⁽⁵⁾	7.38 ⁽⁵⁾	0.65 ⁽⁵⁾	0.684 ⁽⁵⁾	-3.3×10^{-4} ⁽¹⁾
Power					

*: اعداد داخل پرانتز نشان دهنده اولویت انتخاب مدل، بر اساس شاخص‌های آماری است

*: The numbers in brackets indicate the priority of choosing a model, based on statistical indices

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه در طرح

Table 4- Analysis of variance of the traits studied in the plot

منابع تغییر Sources of variance	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean of squares	
		ضریب K_s K_s Coefficient	حد RAW Limit of RAW
تکرار Replication	2	3×10^{-6} ns	8.1×10^{-6} ns
شوری Salinity	3	** 588	** 0.082
ازت خاک Nitrogen of soil	3	** 0.041	** 0.006
شوری $\times$ ازت خاک Salinity $\times$ Nitrogen of soil	9	** 0.016	** 0.001
خطا Error	30	1.2×10^{-5}	6×10^{-6}

ns و **: به ترتیب غیرمعنی داری و معنی داری در سطح احتمال یک درصد

ns and **: Non significant and significant at a probability level of one percent, respectively

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل شوری آب و کمبود ازت بر K_s و RAW

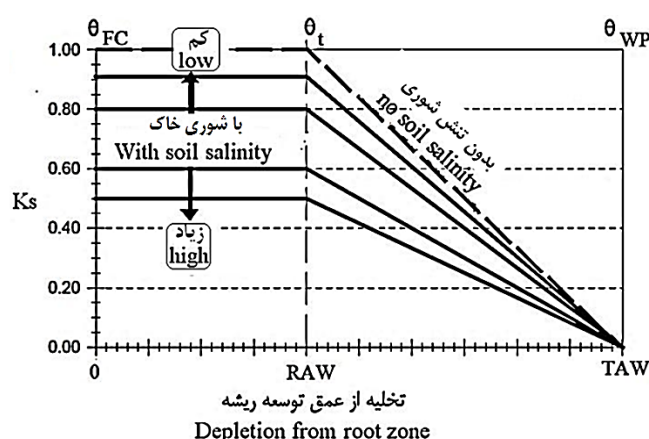
Table 5- Comparison of the average interactions of water salinity and nitrogen deficiency on K_s and RAW

تیمار Treatment	ضریب K_s K_s Coefficient	حد RAW Limitation of RAW
S0N0	1 a	0.665 a
S0N1	0.98 b	0.646 b
S0N2	0.96 c	0.641 c
S0N3	0.95 d	0.637 cd
S1N0	0.95 d	0.636 d
S1N1	0.93 e	0.62 e
S1N2	0.9 f	0.6 f
S1N3	0.88 g	0.587 g
S2N0	0.88 g	0.586 g
S2N1	0.87 h	0.582 h
S2N2	0.86 i	0.573 i
S2N3	0.83 j	0.554 j
S3N0	0.77 k	0.517 k
S3N1	0.69 l	0.463 l
S3N2	0.64 m	0.427 m
S3N3	0.63 n	0.42 n

رطوبت سهل الوصول (RAW)

وجود نمک‌های محلول در آب خاک باعث کاهش پتانسیل اُسمزی آب قابل جذب برای گیاه می‌شود. میزان جذب آب توسط ریشه گیاه، به انرژی پتانسیل آب خاک و نه مقدار آن، وابسته است. در نشریه شماره ۵۶ آبیاری و زهکشی فائو، گزارش شد که با کاهش پتانسیل آب خاک در شرایط تنش شوری، با افزایش مقاومت و بسته شدن جزئی روزنه‌ها از شدت تعلق گیاه کاسته می‌شود. از سوی دیگر و در شرایط تنش شوری، گیاه برای بدست آوردن آب باید انرژی بیشتری مصرف کند. پس بخشی از انرژی که گیاه برای رشد و نمو به آن نیاز دارد، صرف به‌دست آوردن آب شده و تبخیر و تعلق و در

نهایت رشد آن کاهش می‌یابد (۲۱). اگر رطوبت خاک بیشتر از مقدار سهل‌الوصول در شرایط استاندارد باشد، وجود شوری آب و کمبود ازت خاک (تنش‌های محیطی)، با کم کردن پتانسیل آب خاک و انرژی لازم برای جذب آب، می‌توانند بر مقدار آب قابل جذب توسط گیاه مؤثر باشند. با توجه به شکل ۴، تأثیر تنش شوری بر مقدار ضریب K_s مشاهده می‌شود (۴). تغییرات K_s در شکل مذکور، صرفاً به‌علت تنش شوری بوده و بقیه شرایط (مانند حاصلخیزی خاک) در حد استاندارد می‌باشد. در این شکل، با کاهش رطوبت از حد RAW و نزدیک شدن به TAW، گیاه با تنش آبی مواجه شده و اثر این تنش نیز بر ضریب K_s قابل مشاهده است.



شکل ۴- تأثیر تنش شوری بر مقدار ضریب K_s (فائو-۵۶)

Figure 4- Effect of salinity stress on K_s coefficient (FAO-56)

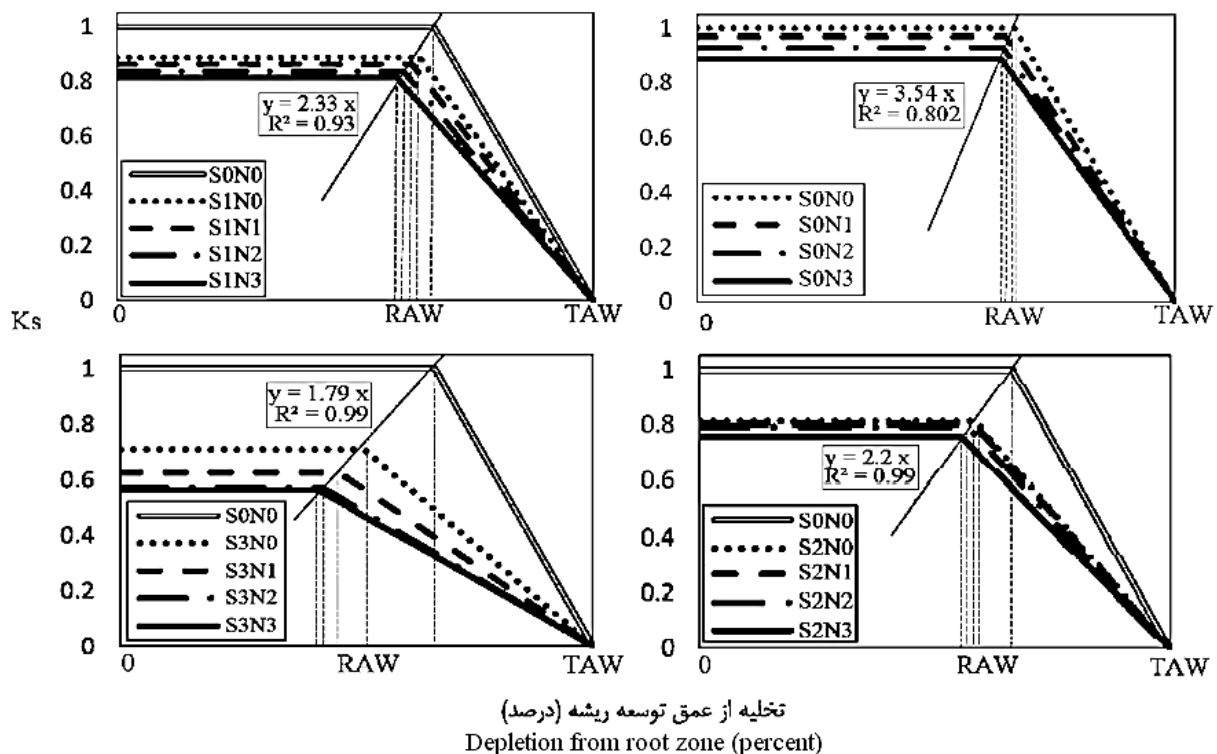
نکته قابل تحقیق در شکل ۴ این است که با وجود افزایش تنش، حد ثابتی برای RAW در نظر گرفته شده است. همان طور که گفته شد، در زمان اعمال تنش شوری، انرژی گیاه برای تخلیه رطوبت خاک، با آنچه که در شرایط استاندارد وجود دارد، متفاوت است. در این شرایط، مقدار حاصلخیزی خاک نیز بر توان جذب گیاه، بی تأثیر نخواهد بود. با توجه به گزارش های نشریه شماره ۵۶ فائو، حد رطوبت سهل الوصول برای کرت های شاهد و تحت تنش، با اندازه مقاومت روزه های برگ ارتباط دارد. با کم شدن رطوبت خاک از حد FC و رسیدن به RAW، مقاومت روزه افزایش یافته و به طور جزئی روزه ها بسته می شوند. در این تحقیق و در فاصله بین دو آبیاری، در شرایط استاندارد محیط (S_0N_0) و شرایط تنش شوری آب و کمبود ازت خاک (تنش حاصلخیزی)، مقاومت روزه برگ های ذرت با دستگاه پرومتر AP_4 اندازه گیری شد. از روزه های ابتدای پس از آبیاری، مقاومت روزه ها در کرت های تحت تنش و تحت کنترل متفاوت بود و مقدار آن تا روزهایی که گیاه رطوبت را به سهولت دریافت می کرد، ثابت بوده و یا تغییرات کمی داشت. اما با کاهش پتانسیل آب خاک، افزایش ناگهانی در مقدار مقاومت روزه ها و بسته شدن جزئی آن ها مشاهده شد. در این زمان، با اندازه گیری رطوبت خاک در محل فعالیت ریشه ها، مقدار رطوبت تخلیه شده بر مقدار رطوبت بین دو حد FC و تقسیم مقدار رطوبت تخلیه شده بر مقدار رطوبت بین دو حد FC و TAW، مقدار RAW محاسبه شد. نتایج نشان داد که مقدار کاهش آب خاک در کرت ها متفاوت بود. در طول دوره رشد، متوسط مقدار RAW برای شرایط استاندارد محیط (S_0N_0) ، ۶۶/۵ درصد بود. اما با توجه به شکل ۵ و ۶ و جدول ۴، افزایش شوری آب و کاهش ازت خاک، علاوه بر ضریب K_s بر مقدار RAW نیز تأثیر معنی داری داشت. با مقایسه میانگین داده ها در جدول ۵، مشاهده شد که در تیمارهای S_0, S_1, S_2 و S_3 ، با تغییر مقدار ازت از N_0 به N_3 ، مقدار

RAW به ترتیب: ۶۳/۷، ۵۸/۷، ۵۵/۴ و ۴۲ درصد شد. همچنین در تیمارهای N_0, N_1, N_2 و N_3 ، با تغییر مقدار شوری آب از S_0 به S_3 ، مقدار RAW به ترتیب: ۵۱/۷، ۴۶/۳، ۴۲/۷ و ۴۲ درصد اندازه گیری شد. با توجه به هدف این تحقیق، فقط تأثیر تنش های شوری و کمبود ازت بر حد RAW بررسی شده و ورودی به بحث تنش خشکی نشد. پس به صورت پیش فرض (شکل ۴)، نمودار تیمارها در شکل ۵ و ۶ در حد پرمردگی TAW به یک نقطه ختم شد. بی تردید تنش های مورد نظر بر حد TAW تأثیر گذار بوده و برای مطالعه بیشتر، می توان به بررسی آن پرداخت. در شکل های ۵ و ۶، شیب خط حاصل از برازش بین نقاط مربوط به RAW و K_s مشاهده می شود. در تفسیر اعداد شیب ها، می توان به کاهش مقدار آن ها همزمان با افزایش تنش های مربوطه اشاره نمود. شیب زیاد، نشان دهنده تأثیر پذیری کم RAW از تنش موجود می باشد. به دلیل تأثیر بیشتر تنش شوری بر مقدار RAW، تغییر مقدار ازت در شکل ۵ نسبت به تغییر شوری در شکل ۶، دارای شیب بیشتری می باشد. در تأیید نتایج فوق، گزارش شد که تبخیر و تعرق گیاه تحت تأثیر ویژگی های گیاه، شرایط محیطی و عملیات کشت می باشد. علاوه بر نوع گیاه، مراحل رشد، عوامل محیطی و مدیریت زراعی نیز در برآورد تبخیر و تعرق مؤثر بود (۴). پس تنش های محیطی با تبخیر و تعرق و مقدار آب قابل جذب توسط گیاه، رابطه مستقیمی دارد. در تحقیق دیگر گزارش شد که رطوبت سهل الوصول، رابطه ای بین شاخص های گیاهی و شاخص های مربوط به خاک است. این روش برای زمانی تعیین شده که محدودیت محیطی، تنش رطوبتی باشد. اما این شرایط همواره برقرار نبوده و محدودیت های محیطی دیگری غیر از تنش آبی (مثل شوری آب و ...)، بر مقدار رطوبت سهل الوصول تأثیر گذارند (۲۳). در نشریه شماره ۵۶ فائو، حد RAW به مقدار تبخیر و تعرق گیاه بستگی دارد. در این نشریه مقدار RAW در شرایط استاندارد برای ذرت، ۰/۵۵ گزارش

نتیجه گیری

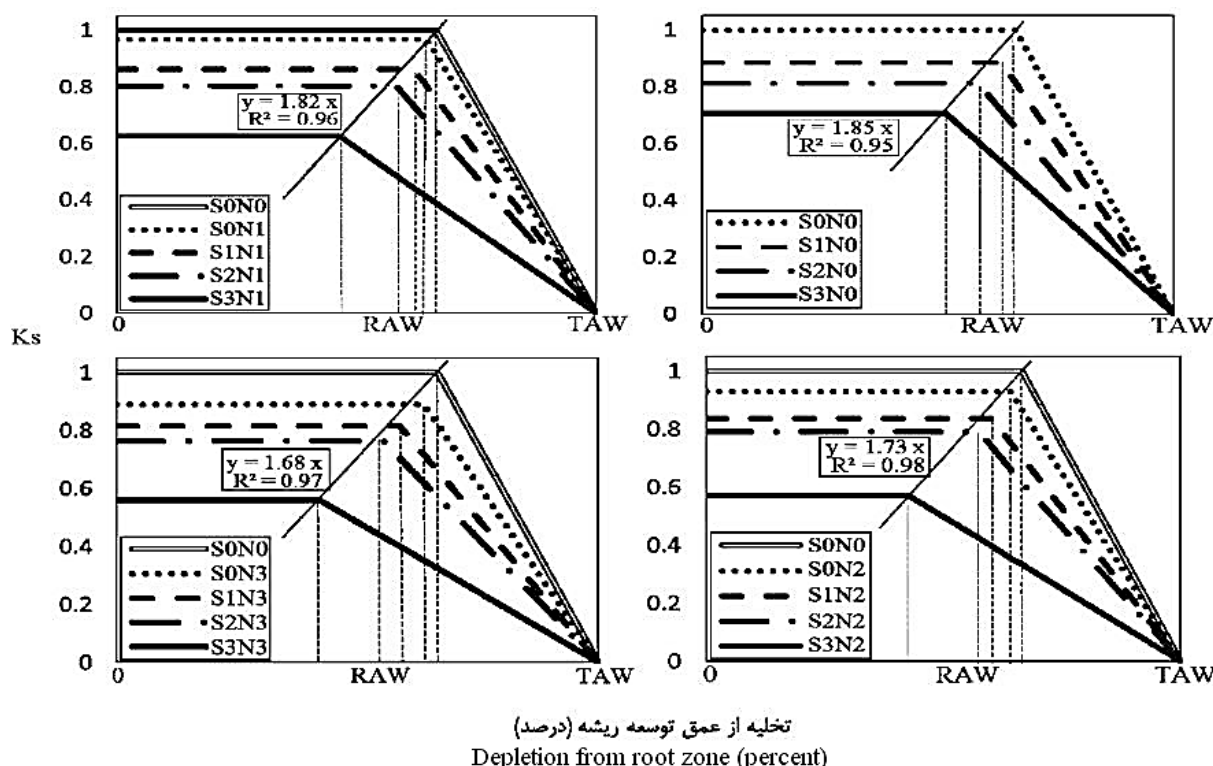
با توجه به بحران کنونی کمیت و کیفیت منابع آبی در بخش کشاورزی و نیاز روزافزون بشر به تولیدات گیاهی، لزوم استفاده صحیح از نابع و تأمین آب مورد نیاز گیاه، ضروری به نظر می‌رسد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش شوری آب آبیاری و کمبود ازت خاک، با کم کردن پتانسیل آب خاک و انرژی گیاه برای جذب آب، باعث افزایش مقاومت روزنه، کاهش تبخیر و تعرق ذرت و کاهش سهولت در دسترسی به آب موجود در خاک شد. تأثیر توأمان دو تنش مذکور بر کاهش مقدار ضریب K_s و آب سهل الوصول (RAW)، در سطح یک درصد معنی‌دار شد. میزان تغییرات دو ضریب K_s و RAW از تیمار S_0N_0 تا S_3N_3 به ترتیب: ۱ تا ۰/۶۳ و ۶۶/۵ تا ۴۲ درصد بود. برای تخمین ضریب K_s از روی مقدار تنش موجود، توابع تولید در فرم‌های؛ خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی، بین نسبت‌های بی‌بعد $\frac{S_i}{S_0}$ و $\frac{N_i}{N_0}$ برازش داده شد. نتایج نشان داد تابع درجه دوم با ضریب تبیین ۰/۹۸۴ و بعد از آن، توابع خطی و نمایی، عملکرد خوبی برای تخمین ضریب K_s داشتند. با توجه به دستاورد این تحقیق، با محاسبه ضریب تنش K_s از روی نسبت تنش‌های وارده به گیاه، می‌توان تبخیر و تعرق واقعی ذرت را نسبت به شرایط پتانسیل منطقه قزوین برآورد نمود.

شد. اما اعلام شد که در اقلیم گرم و خشک به‌علت بالا بودن دما، علی‌رغم مرطوب بودن خاک، بازهم تنش آبی مشاهده می‌شود و مقدار RAW، ۱۰ تا ۲۵ درصد کمتر از مقدار تعیین شده است. افزایش دما به‌عنوان تنش آبی، بر قدرت جذب آب توسط گیاه مؤثر بوده و باعث کاهش تبخیر و تعرق گیاه می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت، تنش‌هایی که باعث کاهش تبخیر و تعرق گیاه می‌شوند، به‌طور مستقیم بر کاهش مقدار RAW نسبت به شرایط استاندارد، مؤثر می‌باشند. تحت این شرایط، آبیاری گیاه بر اساس تبخیر و تعرق پتانسیل منطقه، بیش از نیاز واقعی گیاه است. از سوی دیگر کاهش آب قابل جذب توسط گیاه، منجر به کاهش عملکرد محصول و ایجاد خلأ عملکرد نسبت به شرایط پتانسیل منطقه می‌گردد. شناخت دقیق مقدار رطوبت سهل الوصول در شرایط تنش‌های شوری و کمبود ازت، کمک کاربردی به مصرف بهینه آب و افزایش کارایی مصرف آب و ازت در جهت افزایش عملکرد محصول می‌نماید. در شرایط تنش‌های محیطی با مشاهده کاهش عملکرد محصول، اغلب از سوی کشاورزان، آبیاری بیشتر برای رسیدن به عملکرد پتانسیل منطقه انجام می‌گیرد. اما با توجه به دستاورد کاربردی این پژوهش (نوآوری)، لزومی برای افزایش آبیاری مشاهده نشده و افزایش ازت خاک برای دستیابی بیشتر گیاه به محتوای آب خاک، مؤثر می‌باشد.



شکل ۵- تغییر مقدار RAW، با تغییر مقدار ازت خاک در شوری ثابت

Figure 5- Change in RAW, by changing the amount of soil nitrogen in constant salinity



شکل ۶- تغییر مقدار RAW، با تغییر مقدار شوری آب در سطح ازت ثابت

Figure 6- Change in RAW, by changing the amount of water salinity in constant nitrogen level

شرایط استاندارد محیط وجود ندارد. بنابراین با تأیید یافته‌های مربوط به مقدار تبخیر و تعرق ذرت، می‌توان برای تعیین آب مورد نیاز گیاهان در برنامه‌ریزی‌های آبیاری و مصرف بهینه آب، اقدام دقیق‌تری نسبت به گذشته انجام داد. بی‌تردید با کمتر کردن حجم آب مصرفی در شرایط وجود تنش‌های محیطی، ضمن برآورده شدن نیاز آبی واقعی گیاه، در مصرف آب صرفه‌جویی خواهد شد.

به این ترتیب حجم آب ورودی به زمین مطابق با نیاز واقعی گیاه تنظیم شده و از مصرف زیادتر آن جلوگیری می‌شود. همچنین در شرایط تنش شوری، افزایش ازت خاک راه کار مناسبی است که باعث افزایش ضریب K_s و تبخیر و تعرق ذرت و در نهایت عملکرد بیشتر محصول می‌گردد. از سوی دیگر با بررسی محدوده RAW مشخص شد که در شرایط تنش‌های مذکور، امکان جذب آب توسط گیاه، مانند

منابع

- 1- Abedinpour M. 2017. Wheat water use and yield under different salinity of irrigation water. *Water and Land Development*, 33: 3-9.
- 2- Akhtari A., Homaei M., and Hoseini Y. 2014. Modeling plant response to salinity and soil nitrogen deficiency. *Journal of Water and Soil Resources Protection*, 3(4): 33-50. (In Persian with English abstract)
- 3- Alizade A. 2007. design of surface irrigation systems (2th ed.). Mashhad. (In Persian)
- 4- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation Drainage Paper No.56, FAO. Rome, Italy: 1-326.
- 5- Al-Kaisi M.M., and Broner I. 1992. Crop Water Use and Growth Stages. Colorado State University Extension. No. 4.715
- 6- Azizian A., and Sepaskhah A.R. 2014. Maize response to water, salinity and nitrogen levels: yield-water relation, water-use efficiency and water uptake reduction function. *Journal of Plant Production*, 8 (2): 183- 214.
- 7- Ebrahimi-Pak N. A. 2010. Estimation of wheat evapotranspiration under full irrigation and water stress conditions. P. 1-10. 10th Irrigation Seminar and Evaporation Reduction. Kerman Shahid Bahonar University. (In Persian with English abstract)
- 8- Erkossa T., Awulachew S.B., and Aster D. 2011. Soil fertility effect on water productivity of maize in the upper

- blue Nile basin, Ethiopia. *Journal of Agricultural Sciences*, 2(3): 238-247.
- 9- Farooq M., Hussain M., Wakeel A., and Kadambot H. M. 2015. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. *Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)*, 35: 461-481.
- 10- Hasanli M., Afrasyab P., and Ebrahimian H. 2015. Evaluation of Aqua crop and SALTMED models in estimating of corn yield and soil salinity. *Journal of Soil and Water Research*, 46(3): 487-498. (In Persian with English abstract)
- 11- Heidarinia M., Naseri A.A., Boroomand-nasab S., and Albaji M. 2016. The Effect of Irrigation With Saline Water On Evapotranspiration and Water Use Efficiency of Maize Under Different Crop Management. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 40(1.1): 99-110. (In Persian with English abstract)
- 12- Heydargolinejad M., Gadimzade M., and Fayyaz A. 2003. Effect of Plant Density on Quality of Forage of Cultivars of Hybrid Corn, Based on Agronomic Characteristics. *Journal of Agricultural Science*, 34(2): 418-425. (In Persian with English abstract)
- 13- Kalra N., Chakraborty D., Ramesh Kumar P., Jolly M., and Sharma P.K. 2007. An approach to bridging yield gaps, combining response to water and other resource inputs for wheat in northern India, using research trials and farmers' fields data, *Agricultural Water Management*, 2471: 11.
- 14- Lacerda C.F., Ferreira J.F. S., Liu X., and Suarez D.L. 2016. Evapotranspiration as a Criterion to Estimate Nitrogen Requirement of Maize Under Salt Stress. *Agronomy and Crop Science*, 202: 192-202.
- 15- Min W., Hou Z., Ma L., Zhang W., Ru S., and Ye J. 2014. Effects of water salinity and N application rate on water- and N-use efficiency of cotton under drip irrigation. *Journal of Arid Land*, 6(4): 454-467.
- 16- Mir-Musavi S. H., Panahi H., Akbari H., and Akbarzadeh Y. 2012. Calibration methods for estimating of potential evapotranspiration of reference plant (ET_0) and calculate the need for an olive plant (ETC) in Kermanshah province. *Journal of Geography and Environmental Sustainability*, 3: 45-64. (In Persian)
- 17- Mohammadi M., Liaghat A.M., and Molavi H. 2010. Optimization of Water Use and Determination of Tomato Sensitivity Coefficients under Combined Salinity and Drought Stress in Karaj. *Journal of Water and Soil*, 24(3): 583-592. (In Persian with English abstract)
- 18- Nasrollahi A. 2014. Investigating the effect of different managements of drip irrigation with saline water on yield of corn in root zone. Ph.D. dissertation, Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian with English abstract)
- 19- Renault S., Wolfe S., Markham J., and Avila-Sakar G. 2016. Increased resistance to a generalist herbivore in a salinity-stressed non-halophytic plant. *AoB PLANTS*, 8:1-10.
- 20- Rudnick D.R., and Irmak S. 2014. Impact of Nitrogen Fertilizer on Maize Evapotranspiration Crop Coefficients under Fully Irrigated, Limited Irrigation, and Rainfed Settings. *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 12: 1-15.
- 21- Saadat S., and Homaei M. 2015. Modeling sorghum response to irrigation water salinity at early growth stage. *Agricultural Water Management*, 152:119-124.
- 22- Shock C.C., Feibert E.B.G., Saunders L.D., and Klauzer J. 2007. Deficit Irrigation for Optimum Alfalfa Seed Yield and Quality. *Agronomy*, 99: 992-998
- 23- Verdinejad V.R., Besharat S., Abghari H., and Ahmadi H. 2011. Estimation of Maximum Allowable Deficit in Different Growth Stages of Fodder Mays Using Canopy-Air Temperature Difference. *Journal of Water and Soil*, 25(6): 1344-1352. (In Persian with English abstract)
- 24- Zhong Y., and Shangguan Zh. 2014. Water Consumption Characteristics and Water Use Efficiency of Winter Wheat under Long-Term Nitrogen Fertilization Regimes in Northwest China. *Journal of Scientific Reports*, 9(6): 38-47.



Effect of Water Salinity and Soil Nitrogen Deficiency on K_s -Coefficient and Readily Available Water of Maize

R. Saeidi¹- A. Sotoodehnia^{2*}- H. Ramezani Etedali³- B. Nazari⁴- A. Kaviani⁵

Received: 17-02-2018

Accepted: 26-08-2018

Introduction: Estimating the actual evapotranspiration of the crops, is so important for determining the irrigation needs. Typically, the climatic, vegetative and management parameters are effective on actual evapotranspiration. If the crops are exposed to salinity, fertility and other stresses, reduce actual evapotranspiration and yield. The correct estimation of the actual evapotranspiration of crop will allow agricultural planners to the better agricultural water management. Previous researches show water stress and soil nitrogen deficiency (as management stresses), effect on increasing of stomatal resistance and reducing of crops evapotranspiration. Thus, goal of this study was to investigate the effect of salinity and soil nitrogen deficiency on the amount of K_s coefficient and readily available water of maize.

Materials and Methods: This study was conducted in research farm at University of Imam Khomeini International, Qazvin, Iran during June to November 2017. In this research, the effects of saline water and soil nitrogen deficiency on Maize (SC 704) evapotranspiration, were investigated. The applied treatments included irrigation with saline water (in four levels: 0.5 (S_0), 1.2 (S_1), 3.5 (S_2) and 5.7 (S_3) dS/m) and soil fertility (in four levels: nitrogen fertilizer consumption at 100 (N_0), 75 (N_1), 50 (N_2) and 25% (N_3)). The experimental design used in this research was a completely randomized block design with three replications. In this experiment, maize seeds were cultivated in the plots with Length and width of 3×3 meters. The prometer device (Model: AP4) was also used to measure stomatal resistance of maize leaf. Determining the irrigation schedule, was based on the soil moisture reached to the limit of RAW (Readily Available Water). At the same time, with increasing stomatal resistance, RAW was calculated and irrigation was done. Evapotranspiration of the under stress plants were ET_{c-adj} and evapotranspiration of S_0N_0 treatment was ET_c . The stress factor (K_s) is calculated by ET_{c-adj}/ET_c . The values of RAW and K_s were analyzed by SPSS software. K_s coefficient was modeled with amounts of salinity stresses and soil nitrogen deficiency.

Results and Discussion: The results of this study showed that the interaction between two factors of salinity stress and nitrogen deficiency on the K_s and RAW parameters (in level: 1%) are significant. K_s coefficient at the levels of S_1 , S_2 and S_3 , were 0.95, 0.88 and 0.77, respectively. In saline water of 0.5 (dS/m), the K_s coefficient of N_1 , N_2 and N_3 were 0.98, 0.96 and 0.95, respectively. With increasing the 1(dS/m) salinity of water and 25% reduction in nitrogen consumption, decreased the K_s amount about 4.5% and 1.7%, respectively. The reason of results is that with increasing of water salinity, decreases the osmotic potential of water in the soil and the crop needs to consume more energy to obtain water. Thus, amount of crop transpiration is reduced and soil water content is remained. The linear, exponential, logarithmic, polynomial and power functions were fitted between $\frac{N_i}{N_0}$ and $\frac{S_i}{S_0}$ data. The ability of the above functions to estimate the K_s coefficient value was evaluated. The polynomial function has a good function for estimating the K_s coefficient. In the S_0 , S_1 , S_2 and S_3 treatments, by changing the fertility value from N_0 to N_3 , amounts of RAW were 63.7, 58.7, 55.4 and 42% , respectively. Also in N_0 , N_1 , N_2 and N_3 treatments, with changing the salinity of water from S_0 to S_3 , RAW values were 51.7, 46.3, 42.7 and 42%, respectively. Therefore, stresses that reduce crop evapotranspiration are effective on reducing the amount of RAW. In this situation, the actual water requirement of the crop is less than the potential evapotranspiration of the area.

Conclusions: Increasing water salinity and nitrogen deficiency decrease evapotranspiration of maize and increase soil water content. By calculating the stress coefficient (K_s), it is possible to estimate the actual evapotranspiration of maize, in Qazvin. Thus, the amount of irrigation water is adjusted according to the actual water requirement of maize. Under salt stress conditions with increasing the soil nitrogen, Can be increased the K_s coefficient and evapotranspiration of maize. Therefore, calculating the crop's water requirement based on the

1, 2, 3, 4 and 5- Ph.D. Student of Irrigation and Drainage Engineering, Associate Professor and Assistant Professors, Department of Water Engineering, Imam Khomeini International University, Respectively

existence of strtesse, it will help to saving water.

Keywords: Absorbable moisture, Evapotranspiration, Maize, Nitrogen, Water salinity



اثر مدیریت آبشویی بر تغییرات شوری در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (مطالعه موردی: سمنان)

حسین دهقانی سانج^{*۱} - حمیدرضا حاجی آقابزرگی^۲ - علی اصغر قائمی^۳ - مسعود نوشادی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

چکیده

اعمال آبشویی همراه با مدیریت صحیح آبیاری یکی از روش‌های مؤثر در کاهش میزان شوری خاک است. در این پژوهش تأثیر مدیریت آبشویی بر تغییرات میزان شوری در سه رژیم آبیاری منطبق بر مدیریت زارع (I_1)، نیاز آبی (I_2) و نیاز آبی و آبشویی (I_3) در باغ پسته‌ای در منطقه‌ی صفائیه، از توابع شهرستان سرخه در استان سمنان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش بیان‌گر عملکرد بهتر دو رژیم I_2 و I_3 در خارج کردن سدیم از منطقه ریشه بود و رژیم آبیاری I_2 به دلیل کاهش بیشتر میزان سدیم در مقابل حجم آب کاربردی کمتر و نیز بهتر عمل کردن در طول دوره رشد مناسب‌تر از رژیم آبیاری I_3 بود. از لحاظ میزان منیزیم رژیم I_2 نسبت به رژیم I_1 و I_3 موفق‌تر عمل کرد. اعمال بیش از حد مجاز آب نه تنها اثر مطلوبی بر خارج کردن املاح از منطقه ریشه ندارد بلکه ممکن است باعث تجمع املاح و آسیب رساندن به گیاه شود. بیش‌ترین مقدار کلسیم موجود در خاک متعلق به رژیم I_2 و I_3 به‌ترتیب برابر با $52/3$ و $58/1$ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و کم‌ترین مقدار این عنصر مربوط به رژیم I_1 و I_2 برابر با $40/8$ میلی‌اکی‌والان بر لیتر بود. از لحاظ میزان SAR رژیم I_2 با کاهش معنی‌دار بیش‌تری مواجه بود و نسبت به رژیم‌های دیگر برتری داشت. در زمان پس از اولین آبیاری در میزان EC_e در عمق‌های 25 و 75 سانتی‌متر اختلاف معنی‌داری وجود نداشت، ولی در عمق 50 سانتی‌متری EC_e کاهش معنی‌داری داشت. بیش‌ترین میزان EC_e با مقدار $14/5$ دسی‌زیمنس بر متر در عمق 75 سانتی‌متری از سطح خاک در زمان 98 روز پس از اولین آبیاری مشاهده شد. اعمال آبشویی باعث کاهش میزان SAR در انتهای فصل رشد نسبت به ابتدای فصل رشد گردید و این کاهش در میزان SAR در اثر اعمال آبشویی در رژیم آبیاری I_2 بیشتر بود و نسبت به دو رژیم آبیاری دیگر موفق‌تر عمل کرد. لذا تا شروع فصل رشد بعدی که از بهار شروع می‌شود میزان SAR کم‌تری را در خاک ذخیره کرده که می‌تواند اثرات زیان‌آور آن را تعدیل کند.

واژه‌های کلیدی: پسته، تجمع املاح، خاک‌های شور، عمق خاک، مدیریت آبیاری، SAR

مقدمه

هنگامی رخ می‌دهد که نمک‌های محلول آب در خاک تجمع می‌یابند تا سطح تولید کشاورزی، سلامت محیطی و اقتصاد را تحت تأثیر قرار دهد. در مراحل اولیه، شوری بر متابولیسم موجودات خاک تأثیر می‌گذارد و باعث کاهش بهره‌وری خاک می‌شود، اما در مراحل توسعه، تمام گیاهان و سایر موجودات زنده در خاک را از بین می‌برد و در نتیجه زمین‌های حاصلخیز و تولیدی را به اراضی بی‌ثمر و بیابان‌زایی تبدیل می‌کند (۱۷ و ۲۹). همچنین شوری خاک به دلیل جلوگیری از جذب آب و عناصر غذایی، یکی از محدودیت‌های رشد گیاهان زراعی محسوب می‌شود و به عنوان مشکلی بزرگ در بین گیاهان تحت کشاورزی آبی در نظر گرفته شده است (۱۸). اگرچه خاک شور می‌تواند بازده قابل‌قبولی از محصول را تولید کند اما استفاده از آب آبیاری شور منجر به کاهش آب در دسترس برای گیاه می‌شود که این به نوبه خود می‌تواند باعث پایین بودن قطر ساقه و کاهش عملکرد میوه شود (۲۴). بنابراین، در برنامه‌های کشاورزی در زمین‌های تحت

شور شدن خاک یک مشکل جهانی است که توسعه کشاورزی را محدود می‌کند و زندگی انسان‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۳۰). با توجه به تحقیقات صورت گرفته عوامل متعددی مانند آب و هوا و آبیاری (بارش، کسر آبشویی)، نوع خاک و شوری اصلی خاک، شوری آب آبیاری، یکنواختی توزیع سیستم و آبیاری با آب شور تغییرات شوری خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱۳ و ۲۷). شوری خاک

۱- دانشیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، البرز، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: h.dehghansanj@areeo.ac.ir)

۲، ۳ و ۴- به‌ترتیب کارشناس ارشد آبیاری زهکشی و دانشیاران، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

مقدار بوده و کشاورزان بر اساس تجربه تلاش می‌کنند با آبیاری‌های خارج فصل نسبت به آیشویی خاک اقدام کنند. کاربرد سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در باغات این فرض را می‌تواند به همراه داشته باشد که آیشویی توسط سیستم انجام شود و توسط بسیاری از طراحان این سامانه‌ها در دفترچه طراحی منظور می‌شود. لیکن مطالعه مدیریت آبیاری و آیشویی در این سامانه‌ها و اثرات آن بر کاهش میزان املاح خاک و نحوه توزیع آن در شرایط مدیریت کشاورز و بخصوص شرایط خشک و نیمه‌خشک که با محدودیت آب آبیاری مواجه هستند اهمیت زیادی دارد و برای تدقیق در طراحی و مدیریت آبیاری نیاز است. هدف از پژوهش حاضر بررسی و تعیین مدیریت آیشویی مناسب در کنترل شوری و سایر املاح موجود در خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۹۱ در یک باغ پسته در منطقه صفائی، از توابع شهرستان سرخه در استان سمنان با طول و عرض جغرافیایی $53^{\circ}12'$ و $35^{\circ}28'$ و با ارتفاع ۱۱۶۰ متر از سطح دریا انجام شد. اجرای پروژه در مساحتی حدود ۲ هکتار از این باغ که دارای درختان پسته با سن تقریبی ۱۰ سال بود صورت گرفت. آرایش درختان بر روی ردیف ۳ متر و بین ردیف ۷ متر بود. آب آبیاری باغ از طریق دو حلقه چاه تأمین می‌شد که آبدهی هر یک حدود ۵-۶ لیتر بر ثانیه بود. آب این چاه‌ها در استخر با گنجایش ذخیره حدود ۱۶۰۰-۱۵۰۰ متر مکعب جمع‌آوری و توسط برای سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی باغ مورد استفاده قرار می‌گرفت. سیستم پمپاژ مجهز به سیستم فیلتراسیون از نوع اسکن فیلتر بود. سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی باغ تجهیز شده به لوله‌های قطره‌چکان‌دار داخل خط (in-line) شرکت یورودریپ نصب شده در عمق ۴۰ سانتی‌متری بود. قطره‌چکان‌های این لوله‌ها از نوع تنظیم‌کننده فشار، با فاصله ۸۰ سانتی‌متری و آبدهی ۲/۲۶ لیتر در ساعت بود. لوله‌های قطره چکان‌دار در فاصله یک متر از درخت و با آرایش دو ردیفه در اطراف ردیف درختان نصب شده بودند. به منظور اطمینان از یکنواختی پخش آب در مزرعه از شاخص‌های ضریب یکنواختی کریستیانسن (CU) و ضریب یکنواختی پخش آب مزرعه (DU) استفاده شد. اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه CU و DU در تاریخ ۱۰ خرداد در مزرعه اندازه گیری و با استفاده از معادلات ۱ و ۲ مقدار آنها به ترتیب ۹۶/۷ و ۹۵/۱ درصد به دست آمد که عالی درجه‌بندی می‌شوند (۱۵).

$$CU = 100 \times \left(1 - \frac{\sum |q_i - q_{iave}|}{\sum q_i}\right) \quad (1)$$

$$DU = (1.6 CU - 60) \quad (2)$$

در این روابط q_i آبدهی قطره‌چکان‌ها است. جهت تعیین خصوصیات

آبیاری، مقادیر شوری خاک‌ها باید تا میزان مطلوب، به منظور بازده اقتصادی تولیدات زراعی و باغی کاهش داده شده و کنترل گردد. یکی از روش‌های مؤثر جهت جلوگیری از تجمع شوری و املاح نمک در محیط ریشه گیاهان و خسارات ناشی از آن بر گیاهان، استفاده از آیشویی اراضی است. آیشویی می‌تواند با کاهش دادن تجمع املاح نمک در محیط ریشه، شرایط مناسبی را برای رشد گیاهان زراعی فراهم کند، از این‌رو برآورد زمان و میزان آب مصرفی می‌تواند در جلوگیری از تجمع نمک‌های مضر در محیط ریشه مفید باشد (۶ و ۱۹). چندین محقق مزیت‌های تأثیر آیشویی بر بهبود خاک و عملکرد محصول را گزارش کرده‌اند (۹، ۱۲ و ۱۴). روند کاهشی مقدار pH، هدایت الکتریکی و املاح محلول در خاک پس از اعمال هفت نوبت آبیاری (به عنوان آیشویی) گزارش شده است (۳۰). بررسی تغییرات غلظت املاح در زهاب خروجی از ستون‌های خاک نشان داد که بیش‌ترین میزان املاح در اولین مرحله آیشویی از ستون‌های خاک خارج شد و با تکرار عملیات آیشویی در مراحل بعد، غلظت آن به صورت غیرخطی کاهش یافت و به مقدار تقریباً ثابتی رسید (۱۶). در پژوهشی با دو روش آیشویی غرقاب متناوب و پاششی نشان داده شد که روش آیشویی غرقاب متناوب عملکرد بهتری را در خارج کردن شوری و املاح خاک را از خود نشان داد (۵ و ۷). کاهش معنی‌دار میزان نسبت جذبی سدیم با استفاده از گچ محلول در آب برای اصلاح خاک‌های شور و سدیمی در پژوهشی در برزیل گزارش شد (۲۵). روند کاهش میزان درصد سدیم قابل‌تبادل در اثر فرایند آیشویی و نیز کاهش ۴۰/۶ درصدی میزان درصد سدیم قابل‌تبادل نسبت به میزان اولیه گزارش شد (۲۲). همچنین در تحقیق دیگری کاهش میزان نسبت جذبی سدیم و درصد سدیم تبادلی تا حدود ۲۱ درصد در اعماق مختلف خاک در اثر کاربرد روش آیشویی غرقاب متناوب نیز گزارش شده است (۲۳). با توجه به تحقیقات بالا در نقاط مختلف جهان مشاهده شد که با اعمال روش‌های مختلف آیشویی سعی در کاهش میزان شوری و املاح خاک شد تا خسارات ناشی از شوری و تجمع املاح را در منطقه ریشه گیاهان به حداقل رسانده و مانع از کاهش عملکرد محصولات زراعی و باغی شوند. با توجه به این‌که تجمع نمک در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی قسمتی از نگرانی مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک است، مناطقی که میزان تبخیر و تعرق بالا و بارندگی کم در آن‌ها می‌تواند منجر به تجمع مقدار زیادی از نمک در نزدیکی سطح خاک شود از این‌رو استفاده از آیشویی نمک از سطح به عمق خاک، جایی که نمک‌ها دیگر تهدیدی برای نهال‌ها نیستند لازم است. زراعت پسته در کشور ما در شرایط آب و خاک شور و محدودیت منابع آبی انجام می‌شود. بر اساس استاندارد فائو ۲۹ (۴) سطح تحمل درختان پسته به شوری آب آبیاری و شوری خاک به ترتیب برابر با ۱/۱ و ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر است. این در حالی است که شوری آب آبیاری در بسیاری از باغات پسته کشور بیش از این

خاک نمونه‌گیری از اعماق ۰-۲۵، ۲۵-۵۰ و ۵۰-۷۵ cm خاک انجام شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. از دو حلقه چاه مزرعه در جدول ۲ آمده است.

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

عمق خاک	بافت خاک	رس	شن	سیلت	جرم مخصوص ظاهری خاک	رطوبت وزنی در ظرفیت زراعی	رطوبت وزنی در نقطه پژمردگی دائم
Soil depth (cm)	Soil texture	Clay (%)	Sand (%)	Silt (%)	BD (g/cm ³)	FC (%)	PWP (%)
0-25	لوم شنی Sandy Loam	6	81	13	1.62	11.85	4.39
25-50	لوم شنی Sandy Loam	4	77	19	1.56	11.97	5.12
50-75	لوم شنی Sandy Loam	4	81	15	1.55	12.88	5.52

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی و کیفی آب آبیاری
Table 2- Chemical and qualitative properties of the irrigation water

شاخص	مواد جامد محلول در آب	هدایت الکتریکی	اسیدیته	نسبت جذب سدیم	سولفات	کربنات هیدروژن	کلر	کربنات	پتاسیم	سدیم	منیزیم	کلسیم	چاه
لانژیلر	TDS	EC	pH	SAR	SO ₄ ⁻²	HCO ₃	Cl ⁻	CO ₃ ⁻²	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Well
LSI	Mg/l	dS/m			Meq/l								
0.36	5070	7.95	7.16	8.88	35.8	2.25	49	-	0.62	42.2	17.9	27.2	1
0.43	3890	6.10	7.17	5.2	37.05	2.65	27.5	-	0.51	24.1	16.8	26.3	2

رژیم آبیاری I₃ - برابر با مجموع نیاز آبیاری (I₂) و آب آبشویی بود (LR+I₂).

بر اساس استاندارد فائو ۲۹ (۴) سطح تحمل درختان پسته به شوری آب آبیاری و شوری خاک به ترتیب برابر با ۱/۱ و ۱/۷ دسی زیمنس بر متر است. لذا اعمال ضریب بر اساس اعمال تنش شوری ممکن نبود. با توجه به شرایط منبع آب در مزرعه تنها امکان اعمال ۱۵ درصد به عنوان آبشویی فراهم بود که اعمال گردید.

برای محاسبه حجم آب مصرفی در رژیم دوم آبیاری، تبخیر و تعرق پتانسیل (ET₀) با استفاده از اطلاعات روزانه هواشناسی و با روش پنمن-مانتیث (PM) تعیین گردید (۲)، سپس با استفاده از ضریب گیاهی (K_c) برای پسته در دوره‌های مختلف رشد برای منطقه سمنان (شکل ۱)، تبخیر و تعرق گیاه مطابق رابطه (۳) به دست آمد:

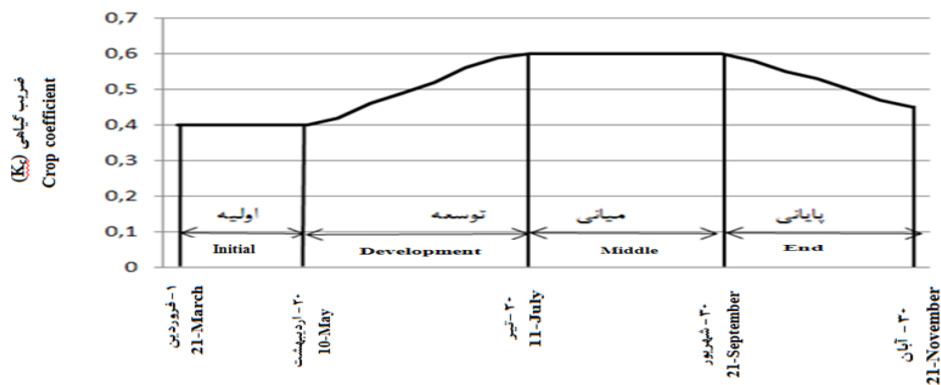
$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (3)$$

که در آن ET_c: تبخیر و تعرق روزانه گیاه (mm/day)، ET₀: تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm/day)، K_c: ضریب گیاهی روزانه برای پسته در دوره‌های مختلف رشد برای منطقه سمنان (۸) است.

با توجه به نتایج بررسی کیفیت آب اسیدیته هر یک از چاه‌های آبیاری (چاه شماره ۱ و ۲) که به ترتیب برابر ۷/۱۶ و ۷/۱۷ بود، درجه کیفیت این آب‌ها در طبقه‌بندی متوسط قرار داشت (۲) و استفاده از آب این چاه‌ها برای روش آبیاری قطره‌ای دارای درجه محدودیت کم تا متوسط بود.

آبیاری باغ مورد مطالعه به این صورت بود که از ابتدای فروردین سال زراعی ۹۲ آبیاری به روش متداول در مزرعه انجام شد ولی از ۹۲/۲/۲۵ لغایت ۹۲/۷/۳۰ در جهت رسیدن به اهداف تحقیق سه رژیم آبیاری در قطعه آزمایشی اعمال گردید که به شرح زیر می‌باشند: رژیم آبیاری I₁- در این رژیم، آبیاری طبق مدیریت زارع که مبتنی بر ترکیبی از پیشنهاد دفترچه طراحی و تجربه و شرایط مزرعه بوده است، صورت گرفت و حجم آب داده شده، زمان آبیاری و دور آبیاری آن ثبت گردید.

رژیم آبیاری I₂ - در این رژیم، از داده‌های بهنگام هواشناسی مزرعه (داده‌های روزانه) برای محاسبه تبخیر و تعرق (روش پنمن - مانتیث اصلاح شده و پیشنهادی فائو (PMF-56)) استفاده شد و نیاز آبیاری محاسبه شد. دور آبیاری قطعه آزمایش همان دور آبیاری تیمار I₁ بود و تنها ساعت آبیاری با توجه به میزان آب آبیاری تغییر کرد.



شکل ۱- ضریب گیاهی و طول دوره‌های مختلف رشد گیاه پسته
Figure 1- The crop coefficient and different growth stages of pistachio.

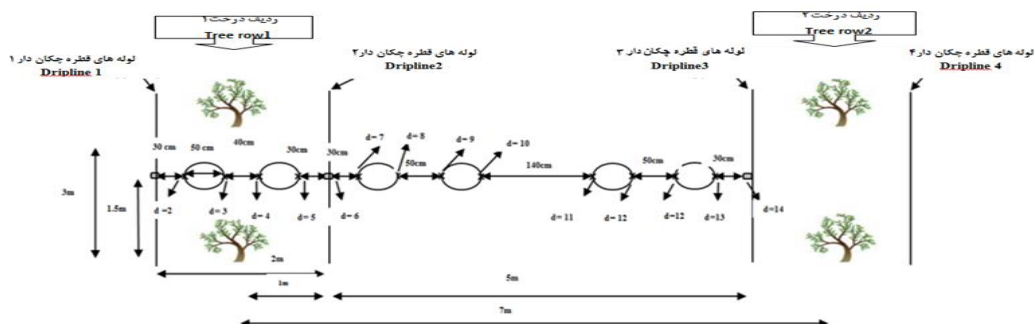
هدایت الکتریکی (EC_{iw})

برای اندازه‌گیری میزان شوری در خاک در دوره‌های رشد گیاه به ترتیب شامل دوره اولیه رشد (Initial stage)، توسعه (Development stage)، میانی (Middle stage)، و پایانی (End stage) از حد فاصل بین دو لوله قطره‌چکان‌دار اطراف ردیف درختان نمونه‌هایی وزنی قبل و بعد از آبیاری برداشت شد. بدین منظور با حفر دو چاله به قطر ۵۰ سانتی‌متر در بین دو لوله قطره‌چکان‌دار ۱ و ۲ و در وسط دو درخت و به فاصله ۳۰ سانتی‌متری از هر لوله قطره‌چکان‌دار، روی لوله‌های قطره‌چکان‌دار (در روی لوله‌های قطره‌چکان‌دار شماره ۱ و ۲ و ۳، و در اعماق ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری و در خارج از حدفاصل لوله قطره‌چکان‌دار ۱ و ۲ با حفر دو چاله به قطر ۵۰ سانتی‌متر، به فاصله ۳۰ سانتی‌متری خارج از لوله‌های قطره‌چکان‌دار ۲ و ۳ (به سمت ردیف کناری درختان) و در راستای وسط دو تنه درخت نمونه‌ها برداشت شد (شکل ۲).

عمق خالص آب آبیاری (dn) بر اساس ET_c و با احتساب سطح سایه-انداز درختان که بر اساس شرایط مزرعه ۴۳ درصد تعیین گردید و دور آبیاری یک روز در میان محاسبه شد (۲۰). عمق ناخالص آبیاری (dg) بر حسب (mm) از رابطه‌ی (۴) به دست آمد:

$$dg = \frac{dn}{E_a} \quad (4)$$

مقدار راندمان آبیاری مورد انتظار در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ۹۰ درصد تعیین و در محاسبه عمق ناخالص آبیاری اعمال شد. برای کلیه تیمارها کنتور حجمی نصب شده بود. برای تیمارهای ۲ و ۳ میزان آب آبیاری محاسبه و با استفاده از کنتور حجمی اعمال گردید. حجم کل مقدار آب آبیاری (dg) با دور آبیاری یک روز در میان (F) در تیمارهای رژیم آبیاری I_1 ، I_2 و I_3 به ترتیب برابر ۶۲۵۴/۲۹، ۹۲۹۰/۷۹ و ۱۰۶۸۲/۲۴ مترمکعب در هکتار بود.



شکل ۲- الگوی محل نمونه‌گیری‌ها
Figure 2- Pattern of sampling locations

○ چاله نمونه‌گیری حفر شده توسط متراکتور به قطر ۵۰ سانتی‌متر
× محل نمونه‌گیری‌های دستی در اعماق ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر از سطح خاک

آنالیزهای آماری

پسته و وارد شدن به مراحل میانی و پایانی رشد از تجمع املاح EC_e و SAR نسبت به دوره توسعه رشد گیاه کاسته شد که سایر پژوهش‌ها نیز این نتیجه‌گیری را تأیید می‌کنند (۱، ۱۰ و ۲۱). گذشت زمان در میزان تجمع املاح منیزیم، سدیم و کلسیم رفتار متفاوتی را نشان داد و به این صورت بود که در زمان ۱۵۲ روز نسبت به زمان ۹۸ روز پس از اولین آبیاری کاهش یافت، اما با وارد شدن به مرحله میانی و در زمان ۲۰۸ روز نسبت به زمان ۱۵۲ روز دارای افزایش معنی‌داری بود. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ بالاترین میزان EC_e سدیم، منیزیم، کلسیم و SAR در زمان ۹۸ روز پس از اولین آبیاری مشاهده شد.

اثرات رژیم‌های آبیاری و مراحل مختلف رشد بر تغییرات املاح در عمق‌های مختلف خاک

نتایج حاصل از این بررسی نشان داد در رژیم آبیاری I_1 میزان EC_e در زمان ۲۰۸ روز نسبت به زمان ۹۸ و ۱۵۲ روز پس از اولین آبیاری افزایش یافت. در رژیم آبیاری I_2 بالاترین میزان EC_e با مقدار ۱۵ دسی‌زیمنس بر مترو در زمان ۹۸ روز بعد از اولین آبیاری اتفاق افتاد که با وارد شدن به مراحل میانی و پایانی گیاه و با افزایش نیاز آبی گیاه و نیز افزایش حجم آب مصرفی در طول دوره رشد گیاه به ترتیب میزان تجمع املاح نسبت به دوره توسعه رشد گیاه پسته با کاهش معنی‌داری روبرو بود. در رژیم آبیاری I_3 روند تغییرات متفاوت بود و میزان EC_e در زمان ۱۵۲ روز نسبت به زمان ۹۸ روز پس از اولین آبیاری با کاهش روبرو بود و افزایش میزان EC_e در زمان ۲۰۸ روز نسبت به زمان ۱۵۲ روز پس از اولین آبیاری مشاهده شد. کاهش معنی‌دار میزان EC_e در انتهای فصل رشد نسبت به ابتدای فصل رشد متعلق به رژیم I_2 بود که این موضوع بیان‌گر موفق‌تر عمل کردن رژیم I_2 در آبشویی EC_e در طول دوره رشد پسته بوده است (جدول ۵) که دلیل آن را می‌توان ناشی از تأثیر مثبت آبشویی از سطح خاک در طول فصل رشد گیاه پسته دانست که باعث شسته شدن املاح از سطح خاک به اعماق پایین‌تر از سطح خاک دانست که باعث تجمع بیشتر EC_e در لایه‌های زیرین می‌شود که سایر پژوهش‌ها نیز این نتیجه‌گیری را تأیید می‌کنند (۲۶ و ۲۸).

در رژیم آبیاری I_1 بین زمان ۹۸ و ۱۵۲ روز از اولین آبیاری از لحاظ میزان سدیم تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد اما زمان ۲۰۸ روز پس از اولین آبیاری نسبت به زمان ۱۵۲ روز دارای افزایش معنی‌دار بود. در رژیم آبیاری I_2 و I_3 با توجه به حجم زیاد آب آبیاری در مقایسه با رژیم آبیاری I_1 ، تجمع سدیم در زمان‌های ۱۵۲ و ۲۰۸ روز نسبت به زمان ۹۸ روز پس از اولین آبیاری کاهش یافت. نتایج تأثیر آبشویی در هر یک از تیمارهای پژوهش بر میزان سدیم نشان می‌دهد

به منظور بررسی اثرات مختلف تیمارهای رژیم آبیاری، عمق خاک، زمان بعد از اولین آبیاری و نیز اثرات متقابل دو و سه‌طرفه آن‌ها بر صفات مورد بررسی، از طرح آزمایشی فاکتوریل در کرت‌های خردشده در سه تکرار استفاده شد، به‌طوری‌که زمان به‌عنوان کرت اصلی در سه زمان انتخاب شده به عنوان نماینده برای هر کدام از دوره‌های رشد گیاه پسته به ترتیب شامل ۶ تیرماه (۹۸ روز بعد از اولین آبیاری: به عنوان نماینده دوره توسعه رشد)، ۲۹ مرداد ماه (۱۵۲ روز بعد از اولین آبیاری: به عنوان نماینده دوره میانی رشد) و ۲۳ مهر ماه (۲۰۸ روز بعد از اولین آبیاری: به عنوان نماینده دوره پایانی رشد) و همچنین آبیاری در هر سه رژیم و عمق خاک در سه سطح ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری به صورت فاکتوریل در نظر گرفته شدند. در آبیاری قطره ای که خاک به‌طور کامل اشباع نمی‌شود و حجم آبیاری به علت دور آبیاری کوتاه (۲ تا ۳ روز) پایین است، اثر هر آبیاری بر محیط خاک مهم تلقی می‌شود. به منظور آنالیزهای آماری از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ استفاده گردید و همچنین مقایسه میانگین‌های اثرات اصلی و نیز اثرات متقابل به روش آزمون چند دامنه دانکن (DMRT) انجام گردید.

نتایج و بحث

بررسی تأثیر آبشویی بر میزان املاح EC_e ، سدیم، منیزیم، کلسیم و نسبت جذب سدیم

نتایج تجزیه واریانس تیمارهای طرح نشان داد که اثر تکرار بر میزان سدیم در سطح ۱ درصد و بر سایر صفات اختلاف معنی‌داری نداشت. تأثیر اثر مستقل زمان بعد از اولین آبیاری، رژیم آبیاری، عمق خاک و نیز اثرات متقابل دوطرفه زمان بعد از اولین آبیاری و رژیم آبیاری، زمان بعد از اولین آبیاری و عمق خاک و نیز اثر متقابل سه طرفه زمان بعد از اولین آبیاری، رژیم آبیاری و عمق خاک بر تمامی صفات مورد بررسی در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد ولی اثر متقابل عمق خاک و رژیم آبیاری بر میزان کلسیم معنی‌دار نشد اما بر سایر صفات در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۳).

مقایسه میانگین‌های صفات مورد بررسی در سطوح مختلف زمان بعد از اولین آبیاری

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که میزان EC_e و SAR تحت تأثیر زمان بعد از اولین آبیاری در زمان‌های ۱۵۲ و ۲۰۸ روز نسبت به ۹۸ روز پس از اولین آبیاری با کاهش معنی‌داری مواجه بود. نتایج نشان داد که با گذشت زمان و سپری شدن روزهای پس از رشد گیاه

جدول ۳- تجزیه واریانس میزان EC_e ، سدیم، منیزیم، کلسیم و نسبت جذب سدیم بر پایه اطلاعات سه زمان نمونه‌گیری ۹۸ روز بعد از اولین آبیاری (دوره توسعه رشد)، ۱۵۲ روز بعد از اولین آبیاری (دوره میانی رشد) و ۲۰۸ روز بعد از اولین آبیاری (دوره پایانی رشد)

Table 3- Variance analysis of EC_e , sodium, magnesium, calcium and adsorption sodium ratio based on three time of sampling, 98 days after the first irrigation (Development Stage), 152 days after the first irrigation (Middle Stage) and 208 days after the first irrigation (End Stage)

منابع تغییرات Sources of changes	درجه آزادی df	صفات مورد بررسی Characteristics examined				
		هدایت الکتریکی EC_e (dS/m)	سدیم Na (meq/lit)	منیزیم Mg (meq/lit)	کلسیم Ca (meq/lit)	نسبت جذب سدیم SAR
تکرار Rep.	2	1.3 ^{ns}	193.9 **	5.1 ^{ns}	1.3 ^{ns}	0.889 ^{ns}
زمان Time	1	84.4**	13414.2**	1015.3**	831.0**	84.786**
خطا Error	2	3.8	22.5	6.8	6.7	0.573
رژیم آبیاری Regime irrigation	2	36.7**	4042.3**	276.9**	190.8**	22.132**
عمق خاک Soil depth	2	75.1**	2185.1 **	397.7**	30.5**	12.026**
عمق خاک* رژیم آبیاری Regime irrigation* Soil depth	2	8.5**	1267.6**	31.6**	9.1 ^{ns}	14.761**
رژیم آبیاری* زمان Regime irrigation* Time	2	87.1**	4773.0**	179.0**	48.1**	40.620**
عمق خاک* زمان Soil depth* Time	4	17.0**	593.3**	77.8**	23.9**	3.821**
عمق خاک* رژیم آبیاری* زمان Time* Regime irrigation* Soil depth	8	**52.1	1138.8**	93.8**	23.0**	8.314**
خطا Error	28	19.6	61.8	7.1	4.7	0.675
ضریب تغییرات CV%		6.8	10.9	11.2	6.8	11.5

** معنی‌دار در سطح ۱٪، * معنی‌دار در سطح ۵٪، ns: غیر معنی‌دار

** Significant level 1%, * Significant level 5%, ns: Non-significant

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های صفات مورد بررسی در سطوح مختلف زمان بعد از اولین آبیاری

Table 4- Averages comparison of examined characteristics at different levels of time after the first irrigation

زمان بعد از اولین آبیاری (روز) Time after the first irrigation (day)	صفات مورد بررسی Examined characteristics				
	هدایت الکتریکی EC_e (dS/m)	سدیم Na (meq/lit)	منیزیم Mg (meq/lit)	کلسیم Ca (meq/lit)	نسبت جذب سدیم SAR
98	12.9 ^a	116.8 ^a	83.4 ^a	53.1 ^a	12.1 ^a
152	10.5 ^b	72.6 ^c	28.0 ^b	42.1 ^c	8.7 ^b
208	11.3 ^b	89.5 ^b	83.8 ^a	49.0 ^b	9.5 ^b

* ۹۸ روز (دوره توسعه رشد)، ۱۵۲ روز: (دوره میانی رشد) و ۲۰۸ (دوره پایانی رشد)

* 98 day (Development stage), 152 day (Middle stage), 208 day (End stage)

اعدادی که دارای حروف غیرمشابه هستند در سطح ۱٪ دارای اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

Numbers with non-like characters have a significant difference at 1% level

که آبخوئی باعث کاهش میزان شوری، خاک شده است ولی در این دوره‌ها تأثیر آن در کاهش میزان سدیم خاک محسوس‌تر از شوری خاک و سایر املاح خاک بود که این ناشی از ضریب آبخوئی بالا در ترکیبات سدیمی است که نتایج با سایر تحقیقات همخوانی دارد (۱۱). نتایج بیانگر مشاهده شدن کاهش این عنصر مضر در خاک تحت رژیم‌های آبیاری I_2 و I_3 بود که دلالت بر عملکرد بهتر این دو رژیم در خارج کردن سدیم از منطقه ریشه داشتند و در نهایت رژیم آبیاری I_2 به دلیل کاهش بیش‌تر میزان سدیم در مقابل حجم آب کاربردی کم‌تر و نیز بهتر عمل کردن در طول دوره رشد مناسب‌تر از رژیم آبیاری I_3 شناخته شد (جدول ۵).

تغییرات میزان منیزیم در رژیم آبیاری I_1 و I_2 مشابه با روند تغییرات میزان سدیم در خاک بود، اما در رژیم آبیاری I_3 نیز بالاترین میزان منیزیم در زمان ۹۸ و ۲۰۸ روز پس از اولین آبیاری به ترتیب با

مقادیر ۴۲/۵ و ۴۳/۳ میلی‌اکی‌والان بر لیتر مشاهده شد (جدول ۵). رژیم I_2 نسبت به رژیم I_1 و I_3 در کاهش تجمع میزان منیزیم موفق‌تر عمل کرد چرا که در رژیم آبیاری I_1 ، میزان منیزیم در مرحله پایانی رشد با افزایش روبرو بود و رژیم آبیاری I_3 هم هیچ تغییر معنی‌داری را در میزان منیزیم ایجاد نکرد و فقط رژیم آبیاری I_2 میزان عنصر منیزیم را در طول دوره رشد کاهش داد و این امر نشان‌دهنده مناسب بودن این تیمار در مقایسه با سایر تیمارها در جهت کاهش شوری خاک و ایجاد بستر مناسب برای رشد محصول است. از نتایج چنین برداشت می‌شود که اعمال بیش از حد مجاز آب نه تنها اثر مطلوبی بر خارج کردن املاح از منطقه ریشه ندارد بلکه ممکن است باعث تجمع املاح و آسیب رساندن به گیاه شود. هم‌چنین به جهت افزایش آب مصرفی می‌تواند منجر افزایش هزینه شود.

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل دو طرفه رژیم آبیاری و زمان بعد از اولین آبیاری، عمق خاک و زمان بعد از اولین آبیاری بر میزان شوری (EC_e) سدیم (Na)، منیزیم (Mg)، کلسیم (Ca) و نسبت جذبی سدیم (SAR)

Table 5- Averages comparison of bilateral interactions effects of irrigation regimes and time after the first irrigation, soil depths and time after the first irrigation on the amount of EC_e , sodium (Na), magnesium (Mg), calcium (Ca) and sodium adsorption ratio (SAR)

اثرات متقابل Interactions effects		تیمار Treatment	صفات مورد بررسی Characteristics examined				نسبت جذب سدیم SAR
			هدایت الکتریکی EC _e (dS/m)	سدیم Na (meq/lit)	منیزیم Mg (meq/lit)	کلسیم Ca (meq/lit)	
رژیم آبیاری و زمان بعد از اولین آبیاری Irrigation regime and time after the first irrigation	I ₁	98	10.8 ^{de}	80.5 ^{cd}	31.0 ^{bc}	48.9 ^{cd}	9.0 ^{cd}
		152	9.7 ^e	74.9 ^d	26.8 ^c	40.8 ^f	9.1 ^{cd}
		208	11.4 ^{cd}	93.3 ^{bc}	39.8 ^a	49.9 ^{bc}	9.9 ^{bc}
	I ₂	98	15.0 ^a	127.8 ^a	41.6 ^a	52.3 ^a	13.1 ^a
		152	11.1 ^{de}	74.1 ^d	27.0 ^c	40.8 ^f	9.0 ^{cd}
		208	9.9 ^{de}	66.5 ^d	33.2 ^b	46.5 ^{de}	7.4 ^d
	I ₃	98	13.0 ^b	142.1 ^a	42.5 ^a	58.1 ^a	14.2 ^a
		152	10.7 ^{de}	86.8 ^d	30.1 ^{bc}	44.8 ^e	8.0 ^d
		208	12.7 ^{bc}	108.8 ^b	43.3 ^a	50.5 ^{bc}	11.1 ^b
عمق خاک و زمان بعد از اولین آبیاری Soil depth and time after the first irrigation	25	98	11.4 ^{bc}	106.6 ^a	35.1 ^{cd}	52.3 ^{ab}	11.3 ^{ab}
		152	10.2 ^c	72.3 ^b	27.3 ^e	44.5 ^{cd}	8.6 ^c
		208	10.2 ^c	79.4 ^b	34.4 ^{cd}	49.6 ^{ab}	8.6 ^c
	50	98	13.0 ^{ab}	113.9 ^a	38.1 ^{bc}	53.6 ^a	11.8 ^{ab}
		152	10.1 ^c	73.0 ^b	26.9 ^e	40.0 ^e	9.0 ^c
		208	10.6 ^c	72.1 ^b	35.1 ^{cd}	47.0 ^{bc}	9.0 ^c
	75	98	14.5 ^a	129.9 ^a	41.9 ^{ab}	53.5 ^a	13.2 ^a
		152	11.1 ^c	72.5 ^b	29.6 ^{de}	41.5 ^{de}	8.6 ^c
		208	13.1 ^{ab}	107.1 ^a	46.7 ^a	50.3 ^{ab}	10.7 ^{bc}

* ۹۸ روز (دوره توسعه رشد)، ۱۵۲ روز: (دوره میانی رشد) و ۲۰۸ (دوره پایانی رشد)

* 98 day (Development stage), 152 day (middle stage), 208 day (End stage)

اعدادی که دارای حروف غیرمشابه هستند در سطح ۱٪ دارای اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

Numbers with non-like characters have a significant difference at 1% level

روز بعد از آبیاری اختصاص یافت (جدول ۵). با سپری شدن زمان طی فصل رشد، در مرحله پایانی رشد (۲۰۸ روز پس از اولین آبیاری) نسبت به مرحله توسعه رشد (۹۸ روز پس از اولین آبیاری) در رژیم آبیاری I_2 و I_3 میزان تجمع SAR با کاهش معنی‌داری روبه‌رو بود. همانند املاح شوری، سدیم و منیزیم، رژیم I_2 با کاهش معنی‌دار بیش‌تری در میزان SAR مواجه بود و بیانگر این است که این رژیم نسبت به رژیم‌های دیگر برتری دارد.

اثرات متقابل رژیم‌های آبیاری، عمق خاک و مراحل مختلف رشد بر تغییرات املاح خاک

با سپری شدن زمان طی فصل رشد، در رژیم آبیاری I_1 و در عمق ۲۵ سانتی‌متری میزان EC_e در مرحله پایانی رشد نسبت به مرحله توسعه رشد (۹۸ روز پس از اولین آبیاری) افزایش پیدا کرد و در اعماق ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. در رژیم آبیاری I_2 در هر سه عمق خاک میزان EC_e در مرحله پایانی رشد نسبت به مرحله توسعه رشد (۹۸ روز بعد از اولین آبیاری) با کاهش معنی‌دار روبرو بود و در رژیم آبیاری I_3 در اعماق ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متری میزان EC_e در مرحله پایانی رشد (۹۸ روز پس از اولین آبیاری) نسبت به مرحله توسعه رشد (۹۸ روز پس از اولین آبیاری) کاهش و در عمق ۷۵ سانتی‌متری افزایش معنی‌داری داشت (جدول ۶). هم‌چنین نتایج بیانگر این موضوع است که با گذر زمان در طی فصل رشد تنها در رژیم آبیاری I_2 و در هر سه عمق خاک در مرحله پایانی رشد (۲۰۸ روز پس از اولین آبیاری) نسبت به مرحله توسعه رشد (۹۸ روز پس از اولین آبیاری) با کاهش مقدار EC_e روبه‌رو بود.

از نظر میزان سدیم در رژیم آبیاری I_1 و در عمق خاک ۲۵ سانتی‌متری بین زمان ۹۸ و ۱۵۲ روز اختلاف معنی‌داری به وجود نیامد اما در زمان ۲۰۸ روز نسبت به زمان ۹۸ و ۱۵۲ روز افزایش معنی‌دار نشان داد. در اعماق خاک ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری میزان سدیم در زمان ۱۵۲ روز نسبت به زمان ۹۸ روز کاهش معنی‌داری یافت و زمان ۲۰۸ روز نسبت به زمان ۱۵۲ روز با افزایش روبرو بود. به طور کلی در رژیم آبیاری I_2 در هر یک از اعماق خاک با افزایش زمان میزان سدیم کاهش یافت ولی در عمق خاک ۲۵ سانتی‌متری بین سطوح زمان ۱۵۲ و ۲۰۸ روز اختلاف معنی‌دار نبود و در رژیم آبیاری I_3 در اعماق ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متری میزان سدیم در مرحله پایانی رشد نسبت به مرحله توسعه رشد (۹۸ روز پس از اولین آبیاری) کاهش و در عمق ۷۵ سانتی‌متری افزایش معنی‌دار داشت. در رژیم آبیاری I_1 بیشترین میزان تجمع منیزیم در زمان ۲۰۸ روز بعد از اولین آبیاری و در مرحله پایانی رشد به زمان ۹۸ و ۱۵۲ روز بعد از اولین آبیاری مشاهده شد (جدول ۶).

در طی فصل رشد، در رژیم آبیاری I_1 و در هر سه عمق خاک

رژیم I_1 در میزان کلسیم موجود در خاک که عنصری مفید محسوب می‌شود اختلاف معنی‌داری ایجاد نشد و این تغییرات کم در آبخویی کلسیم ناشی از ضریب آبخویی پایین ترکیبات کلسیمی است، ولی رژیم‌های I_2 و I_3 باعث کاهش میزان کلسیم موجود در خاک شدند. بیش‌ترین مقدار کلسیم موجود در خاک متعلق به رژیم I_2 و I_3 به ترتیب به ترتیب برابر با $۵۲/۳$ و $۵۸/۱$ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در زمان ۹۸ روز پس از اولین آبیاری و کم‌ترین مقدار این عنصر هم به رژیم I_1 و I_2 به ترتیب با مقادیر $۴۰/۸$ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در ۱۵۲ روز بعد از آبیاری اختصاص یافت (جدول ۵). با سپری شدن زمان طی فصل رشد، در مرحله پایانی رشد (۲۰۸ روز پس از اولین آبیاری) نسبت به مرحله توسعه رشد (۹۸ روز پس از اولین آبیاری) در رژیم آبیاری I_2 و I_3 میزان تجمع SAR با کاهش معنی‌داری روبه‌رو بود. همانند املاح شوری، سدیم و منیزیم، رژیم I_2 با کاهش معنی‌دار بیش‌تری در میزان SAR مواجه بود و بیانگر این است که این رژیم نسبت به رژیم‌های دیگر برتری دارد.

تغییرات میزان منیزیم در رژیم آبیاری I_1 و I_2 مشابه با روند تغییرات میزان سدیم در خاک بود، اما در رژیم آبیاری I_3 نیز بالاترین میزان منیزیم در زمان ۹۸ و ۲۰۸ روز پس از اولین آبیاری به ترتیب با مقادیر $۴۲/۵$ و $۴۳/۳$ میلی‌اکی‌والان بر لیتر مشاهده شد (جدول ۵). رژیم I_2 نسبت به رژیم I_1 و I_3 در کاهش تجمع میزان منیزیم موفق‌تر عمل کرد چرا که در رژیم آبیاری I_1 ، میزان منیزیم در مرحله پایانی رشد با افزایش روبرو بود و رژیم آبیاری I_3 هم هیچ تغییر معنی‌داری را در میزان منیزیم ایجاد نکرد و فقط رژیم آبیاری I_2 میزان عنصر منیزیم را در طول دوره رشد کاهش داد و این امر نشان‌دهنده مناسب بودن این تیمار در مقایسه با سایر تیمارها در جهت کاهش شوری خاک و ایجاد بستر مناسب برای رشد محصول است. از نتایج چنین برداشت می‌شود که اعمال بیش از حد مجاز آب نه تنها اثر مطلوبی بر خارج کردن املاح از منطقه ریشه ندارد بلکه ممکن است باعث تجمع املاح و آسیب رساندن به گیاه شود و هم‌چنین به جهت افزایش آب مصرفی در مناطقی مانند منطقه مورد مطالعه که دارای آب و هوایی خشک و آب در دسترس کم است نیز ممکن است هزینه‌ها را نیز بالا ببرد.

رژیم I_1 در میزان کلسیم موجود در خاک که عنصری مفید محسوب می‌شود اختلاف معنی‌داری ایجاد نشد و این تغییرات کم در آبخویی کلسیم ناشی از ضریب آبخویی پایین ترکیبات کلسیمی است، ولی رژیم‌های I_2 و I_3 باعث کاهش میزان کلسیم موجود در خاک شدند. بیش‌ترین مقدار کلسیم موجود در خاک متعلق به رژیم I_2 و I_3 به ترتیب به ترتیب برابر با $۵۲/۳$ و $۵۸/۱$ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در زمان ۹۸ روز پس از اولین آبیاری و کم‌ترین مقدار این عنصر هم به رژیم I_1 و I_2 به ترتیب با مقادیر $۴۰/۸$ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در ۱۵۲

۶). در رژیم آبیاری I₁، در هر یک از اعماق خاک میزان کلسیم در مرحله میانی رشد (زمان ۱۵۲ روز) نسبت به مرحله توسعه رشد (زمان ۹۸ روز) دارای کاهش معنی‌دار بود. در رژیم آبیاری I₂ در اعماق خاک ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متری، زمان ۲۰۸ روز نسبت به زمان ۹۸ روز با افزایش میزان کلسیم مواجه بود. در رژیم آبیاری I₃ و در عمق خاک ۲۵ سانتی‌متری کم‌ترین میزان کلسیم در زمان‌های ۱۵۲ و ۲۰۸ روز مشاهده شد (جدول ۶).

میزان منیزیم افزایش معنی‌داری یافت ولی تغییرات در کاهش میزان منیزیم در مرحله پایانی رشد (۲۰۸ روز پس از اولین آبیاری) نسبت به مرحله توسعه رشد (۹۸ روز پس از اولین آبیاری) در رژیم آبیاری I₂ چشمگیرتر بود. در رژیم آبیاری I₃ در اعماق خاک ۲۵ و ۵۰ سانتی متری میزان منیزیم در مرحله پایانی رشد (۲۰۸ روز پس از اولین آبیاری) نسبت به مرحله توسعه رشد (۹۸ روز پس از اولین آبیاری) کاهش و در عمق ۷۵ سانتی‌متری افزایش معنی‌داری داشت (جدول

جدول ۶- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل سه‌طرفه رژیم آبیاری، عمق خاک و زمان بعد از اولین آبیاری بر میزان شوری (ECe) سدیم (Na)، منیزیم (Mg)، کلسیم (Ca) و نسبت جذبی سدیم (SAR)

Table 6- The three-way interactions effects of irrigation regimes, soil depth and time after the first irrigation on the amount of ECe, sodium (Na), magnesium (Mg), calcium (Ca) and sodium adsorption ratio (SAR)

رژیم آبیاری Irrigation regime	عمق نمونه‌گیری Soil depth (cm)	زمان بعد از اولین آبیاری* Time after the first irrigation	صفات مورد بررسی Characteristics Examined				نسبت جذب سدیم SAR
			هدایت الکتریکی ECe (dS/m)	سدیم Na (meq/lit)	منیزیم Mg (meq/lit)	کلسیم Ca (meq/lit)	
I ₁	25	98	9.9 ^{lm}	67.6 ^{hi}	29.3 ^{hi}	46.3 ^{gh}	8.1 ^{hi}
		152	9.1 ^o	67.6 ^{hi}	22.8 ^m	43.0 ^{ij}	9.5 ^{ef}
		208	11.1 ^{hi}	96.5 ^{fg}	37.3 ^{de}	51.1 ^{cd}	10.2 ^e
	50	98	10.9 ^{hi}	91.3 ^{fg}	29.8 ^{hi}	50.8 ^{de}	10.1 ^e
		152	9.4 ^{no}	76.9 ^{hi}	23.0 ^{lm}	83.6 ^l	9.7 ^{ef}
		208	11.3 ^{gh}	90.3 ^g	35.9 ^{ef}	45.9 ^{gh}	10.0 ^e
	75	98	11.8 ^{ef}	79.5 ^h	33.9 ^{fg}	49.7 ^{ef}	8.7 ^{ef}
		152	10.5 ^{ij}	70.9 ^{ij}	33.6 ^{fg}	40.8 ^{jk}	8.2 ^{hi}
		208	11.9 ^{ef}	93.1 ^{fg}	46.1 ^{bc}	52.8 ^c	9.3 ^{fg}
I ₂	25	98	12.1 ^{ef}	117.5 ^e	37.3 ^{de}	52.3 ^{cd}	12.4 ^d
		152	11.3 ^{gh}	76.9 ^{hi}	27.3 ^{jk}	39.7 ^{kl}	9.4 ^{ef}
		208	9.6 ^{mn}	69.7 ^{ij}	34.8 ^{ef}	47.8 ^{fg}	7.7 ^{ij}
	50	98	14.6 ^c	99.9 ^f	39.8 ^d	53.4 ^c	10.3 ^e
		152	10.1 ^{kl}	66.6 ^{jk}	26.3 ^{kl}	39.3 ^l	8.3 ^{hi}
		208	9.0 ^o	59.8 ^l	29.8 ^{hi}	45.9 ^{gh}	6.8 ^k
	75	98	18.3 ^a	166.0 ^a	47.8 ^b	51.3 ^{cd}	16.7 ^a
		152	11.8 ^{ef}	78.8 ^h	27.3 ^{jk}	43.5 ^{hi}	9.4 ^{fg}
		208	11.0 ^{hi}	69.9 ^{ij}	35.1 ^{ef}	45.8 ^{gh}	7.7 ^{jk}
I ₃	25	98	12.3 ^e	131.8 ^d	38.8 ^d	58.3 ^{ab}	13.4 ^c
		152	10.2 ^{jk}	63.1 ^{kl}	31.9 ^{gh}	50.8 ^{de}	6.9 ^k
		208	10.0 ^{lm}	72.0 ^{hi}	31.2 ^{gh}	50.0 ^{de}	8.0 ^{ij}
	50	98	13.6 ^d	150.4 ^c	44.7 ^c	56.6 ^b	15.0 ^b
		152	10.9 ^{hi}	75.6 ^{hi}	30.6 ^{hi}	42.2 ^{ij}	8.9 ^{gh}
		208	11.5 ^{fg}	96.1 ^{fg}	39.6 ^d	49.1 ^{ef}	10.2 ^e
	75	98	13.3 ^d	144.2 ^c	43.9 ^c	59.6 ^a	14.2 ^{bc}
		152	11.0 ^{hi}	67.8 ^{jk}	27.9 ^{ij}	41.5 ^{jk}	8.2 ^{hi}
		208	16.5 ^b	158.2 ^b	59.1 ^a	52.3 ^{cd}	15.0 ^b

* ۹۸ روز (دوره توسعه رشد)، ۱۵۲ روز: (دوره میانی رشد) و ۲۰۸ (دوره پایانی رشد)

* 98 day (Development stage), 152 day (Middle stage), 208 day (End stage)

اعدادی که دارای حروف غیرمشابه هستند در سطح ۱٪ دارای اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

Numbers with non-like characters have a significant difference at 1% level

خاک در طول فصل رشد با اعمال آبیاری در حال کاهش بود. در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی که خاک به‌طور کامل اشباع نمی‌شود، این نتیجه‌گیری دارای اهمیت است. با توجه به نتایج، رژیم آبیاری I_2 با کاهش معنی‌دار مقدار سدیم و منیزیم موجود در خاک در طی فصل رشد دارای کارایی بهتر و مناسب‌تری است. کاهش میزان کلسیم هم که عنصری مفید است را می‌توان به این موضوع نسبت داد که کلسیم اضافه شده به خاک توسط آبیاری، جایگزین سدیم و منیزیم شده است و اثر این عناصر را تعدیل نموده است. این روند در خصوص نسبت جذب سدیم نیز مشاهده شد. بنابر این پیشنهاد می‌شود در یک مزرعه تجهیز شده به سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، آب آبیاری در انتهای فصل و به‌صورت آبیاری سطحی و یا آبیاری قطره‌ای سنگین انجام شود. چون کاربرد آب آبیاری بیش از نیاز گیاه و به عنوان آب آبیاری تنها منجر به ورود بیشتر املاح به خاک می‌شود.

سپاسگزاری

اطلاعات ارائه شده در این مقاله نتایج پروژه پژوهشی با عنوان "شاخص‌های طراحی، اجرا و مدیریت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و ارزیابی آن در باغات سمنان" است که با حمایت مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی به اجرا رسیده است. همچنین از شرکت بنیز تجهیز که بستر این پژوهش را در مزرعه الگویی آن شرکت فراهم کرده است و همکاری صمیمانه و دلسوزانه مدیر مزرعه تشکر و قدردانی می‌شود.

در رژیم آبیاری I_1 در عمق خاک ۲۵ سانتی‌متری در مرحله پایانی رشد نسبت به زمان ۹۸ روز بعد از اولین آبیاری بالاترین میزان SAR مشاهده شد ولی در رژیم آبیاری I_2 روند تغییرات متفاوت با رژیم آبیاری I_1 بود و با افزایش زمان میزان SAR به‌طور معنی‌داری در مرحله پایانی رشد کاهش یافت. در رژیم آبیاری I_3 در هر یک از اعماق خاک میزان SAR در زمان ۱۵۲ روز نسبت به زمان ۹۸ روز دارای کاهش معنی‌دار و زمان ۲۰۸ روز نسبت به زمان ۱۵۲ روز دارای افزایش معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که رژیم آبیاری I_2 موفق‌تر از دو رژیم دیگر عمل کرد و تا فصل رشد بعدی که از بهار شروع می‌شود نسبت جذب سدیم کم‌تری را در خاک ذخیره کرده و اثرات زیان‌آور آن را تعدیل می‌نماید.

نتیجه‌گیری

اعمال آبیاری باعث کاهش میزان SAR در انتهای فصل رشد نسبت به ابتدای فصل رشد گردید و این کاهش در میزان SAR اثر اعمال آبیاری در رژیم آبیاری I_2 که تأمین آب آبیاری بر اساس نیاز آبی گیاه بود، بیشتر بوده و نسبت به دو رژیم آبیاری دیگر موفق‌تر عمل کرد. لذا رژیم آبیاری I_2 تا شروع فصل رشد بعدی که از بهار شروع می‌شود میزان SAR کم‌تری را در خاک ذخیره کرده که می‌تواند اثرات زیان‌آور آن را تعدیل کند. میزان EC_e در طول فصل رشد روند کاهشی داشت و فرایند آبیاری در پروفیل خاک مشاهده شد. رژیم آبیاری I_2 بهترین شرایط را در دور ساختن میزان تجمع شوری و انتقال آن به اعماق پایین‌تر دارا بود. میزان املاح سدیم موجود در

منابع

- 1- Aga Khani AS. 2005. Effect of salinity of irrigation water and soil leaching on wheat yield. Irrigation and Drainage Master's thesis, Faculty of Agriculture, Technology University of Isfahan. (In Persian with English abstract)
- 2- Alizadeh A. 1388. Drip irrigation (principles and operations). Second edition. Imam Reza University Press, 92-238. (In Persian)
- 3- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 300(9): D05109.
- 4- Ayers R.S., and Westcot D.W. 1985. Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy, 29: 1-117.
- 5- Behbahanizadeh Rezaeian Z., Pazira E., Panahpour E., and Zohrabi N. 2017. Comparison of different methods of leaching of soluble salts from the profile of saline and sodium salts. Journal of Water Science and Engineering, 7(15): 79-93. (In Persian with English abstract)
- 6- Corwin D.L., Rhoades J.D., and Simunek J. 2007. Leaching requirement for soil salinity control: steady-state versus transient models. Agricultural Water Management, 90(3): 165-180.
- 7- Cote C.M., Bristow K.L., and Ross P.J. 2000. Increasing the efficiency of solute leaching. Soil Science Society of America Journal, 43: 1100-1106.
- 8- Farshi A. A., Shariati M. H., Jarollahi R., Ghaemi M. H., Shabifar M., and Tolaei MM. 1997. Estimated water requirement major plants agricultural and horticultural of country. Soil and Water Research Institute, Publication of Agriculture Education in Karaj, 394p. (In Persian)
- 9- Feizi M. 1993. The effects of water quality and quantity on soil salinization of Rudasht Zone of Isfahan restrict.

- Journal of Soil and Water, 8: 16–34. (In Persian with English abstract)
- 10- Feyzi M. 1998. Investigating the effects of different salting water management on cotton yield. Agricultural Research Center, Esfahan, Final report, 1-18. (In Persian with English abstract)
- 11- Feizi M. 2012. Effect of water quality and management on soil chemical properties. Soil Research (Soil and Water Science), 27(2): 239–252. (In Persian with English abstract)
- 12- Flagella Z., Giuliani M. M., Rotunno T., Di Caterina R., and De Caro A. 2004. Effect of saline water on oil yield and quality of a high oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrid. European Journal of Agronomy, 21: 267-272.
- 13- Ganjegunte G.K., Leinauer B., Schiavon M., and Serena M. 2013. Using electro-magnetic induction to determine soil salinity and sodicity in turf root zones. Agronomy Journal, 105: 836–844.
- 14- Garcia-Sanchez F., Carvajal M., Porras I., Botia P., and Martinez V. 2003: Effects of salinity and rate of irrigation on yield, fruit quality and mineral composition of 'Fino 49' lemon. European Journal of Agronomy, 19: 427–437.
- 15- Ghassemzadeh Mojaveri F. 1990. Evaluation of irrigation systems of farms. Mashhad: Astan Quds Razavi. Bhnshr company, 329p. (In Persian)
- 16- Hosseini Nia M., Hasanpour F., Naghavi H., and Abbasi F. 2017. Comparative effects of chemical amendments on salt leaching from a saline-sodic soil in Kerman under laboratory condition. Journal of Soil Management and Sustainable, 7(2): 119– 134. (In Persian with English abstract)
- 17- Jones A., Panagos P., Barcelo S., Bouraoui F., Bosco C., Dewitte O., Gardi C., Hervás J., Hiederer R., and Jeffery S. 2012. The state of soil in Europe -a contribution of the JRC to the European environment agency's environment state and outlook R- SOER 2010.
- 18- Kaya C., Higgs D., and Kimak H. 2001. The effects of high salinity and supplementary Phosphorus and Potassium on physiology and Nutrition development of spinach. Bulgarian Journal of Plant Physiology, 27: 47-59.
- 19- Konukcu F., Gowing G.W., and Rose D.A. 2005. Dry Drainage: a sustainable solution to water logging and salinity problems in irrigation areas. Agricultural Water Management, 83(1): 1-12.
- 20- 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 with English abstract)
- 21- Landi A. 1993. Investigating the effect of irrigation water quality and leaching ratio on drainage quality and distribution of salt in soil profile. Irrigation and Drainage Master's thesis, Faculty of Agriculture, Technology University of Isfahan (In Persian with English abstract)
- 22- Li F.H., and Keren R. 2009. Calcareous sodic soil reclamation as affected by corn stalk application and incubation: A laboratory study. Pedosphere, 19: 465-475.
- 23- Mostafazadeh-Fard B., Heidarpour M., Aghakhani A., and Feizi M. 2008. Effects of leaching on soil desalinization for wheat crop in an arid region. Plant Soil and Environment, 54(1), p.20.
- 24- Oron G., Demalach Y., Gillerman L., David I., and Rao V.P. 1999. Improved saline-water use under subsurface drip irrigation. Agricultural Water Management, 39: 19–33.
- 25- Rodrigues da Silveria K., Rosas Ribeiro M., Bezerra de Oliveira L., John Heck R., and Rodrigues da Silveira R. 2008. Gypsum-saturated water to reclaim alluvi saline-Sodic and Sodic soils. Scientia Agricola, 65: 69-76.
- 26- Sayyari N., Ghahraman B., and Davari K. 2007. Study of soil cations under substrate drip irrigation system (SDI) in Rafsanjan Pistachio garden with saline water. Science and Agriculture Industry, 21(1): 43-56. (In Persian with English abstract)
- 27- Schiavon M., Leinauer B., Serena M., Maier B., and Sallenave R. 2014. Plant growth regulator and soil surfactants' effects on saline and deficit irrigated warm-season grasses: I. Turf quality and soil moisture. Crop Science, 54(6): 2815-2826.
- 28- Taheri M., Abbasi M., Mostafavi K., and Vahedi S. 2016. Patterns of soil salinity and sodium under surface and subsurface drip irrigation in olive trees. Journal of Water and Irrigation Engineering, 7(26): 127-141. (In Persian with English abstract)
- 29- Tóth G., Montanarella L., and Rusco E. 2008. Threats to soil quality in Europe. EUR 23438 EN. Institute for Environment and Sustainability, Land Management and Natural Hazards Unit, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 162p.
- 30- Wang S., Feng Q., Zhou Y., Mao X., Chen Y., and Xu H. 2017. Dynamic changes in water and salinity in saline-alkali soils after simulated irrigation and leaching. PloS one, 12(11), p.e0187536.



Effect Leaching Management on the Salinity Changes in the Drip Irrigation System (A Case Study: Semnan)

H. Dehghanisani^{1*}- H. Haji Agha Bozorgi²- A.A. Ghaemi³- M. Noshadi⁴

Received: 23-04-2018

Accepted: 29-07-2018

Introduction: The main problem of salinity, in addition to reducing agricultural and horticulture products is the gradual decline of their cultivation area. Several factors such as climate and irrigation (precipitation, fraction of leaching), soil type and soil salinity, salinity of irrigation water, uniform distribution of the system and irrigation with saline water affects the soil salinity changes. Therefore, in irrigated agriculture, soil salinity should be reduced and controlled to an optimal level of the economic production. Leaching with proper irrigation management is one of the effective ways to reduce soil salinity.

Materials and Methods: The study was conducted during 2012-2013 in as pistachio garden located in the Safaeieh region of Semnan province. The garden was 100 ha and 2 ha of that was selected for this study with 10 years old pistachio trees equipped to subsurface drip irrigation system. The treatments of this study were three irrigation regimes; control (I_1), Irrigation based on irrigation requirement (I_2) and I_2 plus leaching requirement (I_3), three soil depth of 25, 50, and 75 cm from soil surface and time before and after irrigation. The drip line laterals include emitters with 2.26 lph flow rate was buried in 40 cm soil depth. Soil samples to evaluation salt concentration were collected from 25, 50, and 75 soil depth before and after irrigation. To study the impact of different irrigation regimes, soil depth and time (before and after irrigation) and also their bilateral impact a factorial design in randomize block was applied.

Results and Discussion: The results showed that ECe and SAR accumulation decreased after development, growth stage and continued to end growth stage. The results showed that I_2 and I_3 irrigation regimes were more effective in reducing the amount of sodium from the root zone and the I_2 irrigation regime showed better performance in comparison to I_3 irrigation regime. Regarding the amount of magnesium in the soil, the I_2 irrigation regime was more successful than the I_1 and I_3 regimens. In I_1 irrigation regime, the amount of magnesium at the end growth stage increased compared to the beginning growth stage. Significant decrease in ECe level at the end growth stage compared to the beginning growth stage belonged to the I_2 irrigation regime, which suggests that I_2 irrigation regime was more successful in ECe leaching during the period of pistachio growth, which attributed to the potential for leaching from the soil surface to the depths below the soil surface. The results showed that excessive water application under saline conditions for any reason, such as leaching not only does not have a beneficial effect on the removal of salts from the root zone, but also may lead to accumulation of salts and damage to the plant. The highest amount of calcium in the soil was recorded 98 days after the first irrigation under the I_2 and I_3 irrigation regimes which was 52.5 and 58.1 Meq/l, respectively. The lowest amount of this element The I_1 and I_2 regimens were 40.8 meq/l, respectively, which were recorded in 152 days after the first irrigation. In terms of SAR, the lowest value in the I_2 regime was more noticeable than other irrigation regimes. The effects of soil depth of time after the first irrigation showed that there was no significant difference at the depth of 25 cm and 75 cm at the end growth stage compared with the valued recorded in beginning growth stage, but at a depth of 50 cm there was a significant reduction in ECe. The highest ECe value equaled to 14.5 dS/m was recorded at a depth of 75 cm in 98 days after first irrigation. In the I_1 irrigation regime at all three depths of 25, 50 and in the I_3 irrigation regime at a depth of 75 cm the amount of SAR at the end growth stage were not less than that in beginning growth stage, however, the reduction in SAR was recorded in the I_2 irrigation regime at all three depths.

Conclusions: Irrigation regime I_2 was successful to control the SAR in different soil depth compared to the other two irrigation regimes, which is very important for the next irrigation season to moderate the harmful effects on blossoms. Moreover, it is suggested that in a field, equipped with a subsurface drip irrigation system, leaching water at the end of the season by surface irrigation or heavy subsurface drip irrigation during the rainfall to leach out the accumulated salt to lower soil layers.

Keywords: Irrigation management, Pistachio, Saline soil, Salt accumulation, SAR, Soil depth

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

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

2, 3 and 4- M.Sc. Student and Associate Professors, Faculty of Agriculture, Shiraz University



طراحی و بهینه‌سازی جذب فلز سنگین کروم (VI) از محلول‌های آبی توسط ذرات پوست میوه تمبره‌ندی فعال شده با اسیدسولفوریک

مرتضی شاهمرادی^{۱*} - امیر تائبی^۲ - هستی هاشمی نژاد^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۰۵

چکیده

در این تحقیق، میزان پتانسیل حذف فلز سنگین کروم (VI) از محلول‌های آبی توسط پوسته میوه تمبره‌ندی اصلاح شده با اسیدسولفوریک بررسی شد. روش سطحی پاسخ بر اساس روش D-optimal برای بهینه‌سازی جذب کروم (VI) توسط ذرات پوسته میوه تمبره‌ندی اصلاح شده به کار رفت. پنج متغیر مستقل از جمله، دز جاذب برابر (1-7g/L)، سرعت لرزاننده (شیکر) برابر (50-200rpm)، pH اولیه محلول برابر (۱-۱۰)، غلظت اولیه محلول کروم (VI) برابر (5-150mg/L) و زمان تماس برابر (30-120min) برای پیش‌بینی بازدهی حذف فلز سنگین کروم (VI) به کار رفت. اهمیت متغیرهای مستقل و تقابل آنها توسط آنالیز واریانس (ANOVA) بررسی شد. با استفاده از بهینه‌سازی به مقادیر بهینه دز جاذب برابر 3g/L، سرعت لرزاننده برابر 200rpm، pH برابر 1، غلظت محلول کروم برابر 150mg/L و زمان تماس برابر 90min به بیشینه ظرفیت جذب محلول کروم (VI) برابر 23mg/g دسترسی پیدا کردیم؛ نتایج آزمایشات جذب با مدل ایزوترم فرنرندلیچ سازگاری بیشتری داشت.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، پوسته میوه تمبره‌ندی، روش رویه پاسخ، محلول کروم ۶ بار مثبت، D-optimal

مقدمه

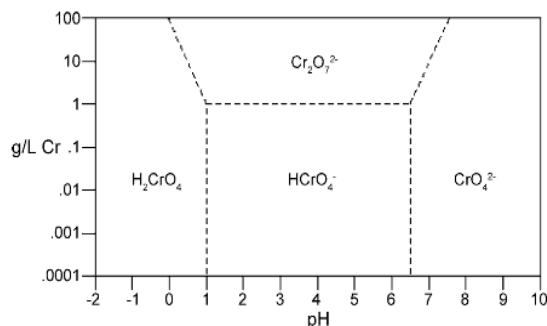
الکتروشیمیایی، تبخیر، استخراج حلال، اسمز معکوس، ترسیب شیمیایی و جذب برای کاهش کروم (VI) از محلول آب و فاضلاب استفاده می‌شود (۲۰). اصلی‌ترین عیب خیلی از این روش‌ها هزینه اجرایی بالا و مشکلات دفع لجن باقیمانده می‌باشد. در میان تکنیک‌ها، روش جذب به دلیل سادگی، شرایط اجرایی و اقتصادی متوسط ترجیح داده می‌شود. در فرآیند جذب، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی جاذب برای دستیابی به بازدهی جذب بالا خیلی اهمیت دارد. اخیراً، جاذب‌های کربن فعال با قیمت پایین که از مواد موجود و ارزان تهیه می‌گردند؛ به میزان زیادی توسعه پیدا کرده‌اند (۳۱ و ۱). کربن فعال به دلیل مساحت سطح بالا، خصوصیات محیط میکرو متخلخل و طبیعت شیمیایی سطح آن، پتانسیل بالایی برای حذف فلزات سنگین از فاضلاب صنایع را دارا می‌باشد. تعدادی از مطالعات برای حذف کروم (VI) با استفاده از جاذب‌های استفاده شده از قبیل کربن میوه گردو (۱۸ و ۱۳)، کربن فعال پوست نارگیل (۹)، کربن فعال زغال چوب (۴)، کربن سویا (۱)، کربن تایر (۲۴)، کربن سبوس برنج (۱۶) و (۱۷)، کربن پوسته انار (۸ و ۲۲) و غیره گزارش شده است.

در مطالعه حاضر، ذرات کربن فعال پوسته میوه تمبره‌ندی فعال شده با اسید سولفوریک برای بهبود حذف کروم (VI) از محلول آبی استفاده شد. در فرآیند جذب، حذف فلز کروم (VI) در یک سیستم

صنایع چرم‌سازی، آبکاری، فرآوری فلزات، تولید چوب، نقاشی و رنگ‌ها، نساجی، ساخت فولاد و بطری‌سازی از صنایع اصلی آلودگی به فلز سنگین کروم هستند (۵). کروم در ۲ حالت اکسیداسیون اصلی شامل کروم (VI) و کروم (III) قرار دارد. کروم (VI) خطرناک‌تر، سرطان‌زاتر و سمی‌تر از موجودات زنده در مقایسه با کروم (III) می‌باشد. به علاوه، غلظت پایین کروم (VI) می‌تواند موجب بروز مشکلات سلامتی از جمله آسیب به کبد در مقایسه با کروم (III) گردد. همچنین، غلظت‌های پایین‌تر کروم (VI) می‌تواند موجب بروز مشکلات سلامتی از جمله آسیب به کبد و سرطان پوست گردد (۲۷). محدوده قابل پذیرش برای کروم (VI) برای تخلیه به آب‌های سطحی و آب قابل آشامیدن به ترتیب برابر 0.1 و 0.05mg/l می‌باشد (۳). بنابراین تصفیه فاضلاب حاوی کروم (VI) با غلظت بالا و رسیدن به سطح مطلوب ضروری است. چندین روش شامل اکسیداسیون - کاهش شیمیایی، تعویض یونی، الکترودیالیز، ترسیب

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد، استاد و استادیار دانشکده مهندسی عمران - محیط زیست، دانشگاه صنعتی اصفهان
(* نویسنده مسئول: Email: shahmoradimorteza1989@gmail.com)
DOI: 10.22067/jsw.v32i5.64308

خشک شده توسط کوبیدن به ذرات کوچک تبدیل شدند. ذرات خرد شده از درون صافی با اندازه ۲۰۰ میکرون عبور داده شدند. این ذرات به منظور فعال سازی شیمیایی و نشست یون H^+ بر روی پوسته ها با اسیدسولفوریک غلیظ تماس داده شدند (۹۸٪ w/w) و در نسبت وزنی ۱:۱ و در آون با دمای $150^\circ C$ برای ۲۴ ساعت قرار داده شدند. سپس مواد هیدراته شده با آب مقطر شست و شو داده شدند و در داخل محلول سدیم بی کربنات ۱٪ به مدت ۲ روز برای حذف اسید اضافی قرار گرفتند. مواد با آب مقطر شست و شو داده شدند و در دمای $100^\circ C$ برای ۵ ساعت خشک شدند (۲۹). با انجام این عملیات فعال سازی، یون H^+ بر روی سطح جاذب نشسته و موجب افزایش جذب نمونه های کروم می گردد که در این تحقیق نمونه های کروم بیشتر به صورت $(HCrO_4)^-$ و $(CrO_4)^{2-}$ می باشد و بار الکتریکی آن ها منفی است و به طور قطع با نشست یون H^+ بر روی سطح جاذب موجب جذب حداکثری نمونه های غالب کروم می شود.



شکل ۱- نمونه فرم های مختلف Cr^{6+} در غلظت های مختلف کروم (VI) و pH های مختلف (۲۴)

Figure 1- Different forms of Cr^{6+} in various concentrations of chromium (VI) and different pH (24)

طراحی آزمایشات

مدل سازی جذب کروم (VI) توسط پوسته میوه تمبره ندی اصلاح شده به روش بهینه سازی عوامل مؤثر در حذف شامل $pH (X_A)$ ، $1-10$ ، دز جاذب (X_B) $1-7$ g/L، غلظت اولیه فلز کروم (X_C) $5-150$ mg/L، زمان تماس (X_D) $30-120$ min و سرعت شیکر (X_E) $50-200$ rpm انجام شد. با استفاده از روش D-optimal پنج متغیره، تعداد کل آزمایشات (N)، ۳۱ عدد بدست آمد. لازم است خاطر نشان کرد که طراحی آزمایش ها در جدول ۱ با توجه به تعیین محدوده بازه متغیرها توسط شخص آزمایش کننده انجام گرفت و اما انتخاب تصادفی مقادیر اصلی سطوح داخل متغیرها (مثلا pH) توسط نرم افزار Design Expert صورت گرفت.

گسسته بستگی به چندین متغیر فرآیند از جمله غلظت اولیه محلول کروم (VI)، pH محلول، سرعت لرزاننده و زمان تماس و غیره دارد. بهینه سازی متغیرهای فرآیند برای دستیابی به بیشینه بازدهی فرآیند برای حذف آلاینده ضروری است. بررسی هر عامل به طور جداگانه برای حذف کروم (VI) خیلی زمان بر است (۱۲). رویکرد طراحی آماری آزمایشگاهی که تعداد آزمایشات را کاهش می دهد؛ مدل مناسبی برای بهینه سازی فرآیند ایجاد می کند و اثر تقابل متغیرها را برای پاسخ ارزیابی می کند. اخیراً، چندین نوع روش طراحی آزمایش در بهینه سازی فرآیند شیمیایی چند متغیره به کار رفته است (۷، ۱۱، ۱۹، ۲۳، ۲۶ و ۲۸). روش رویه سطح پاسخ (Response surface of methodology) یک مجموعه روش آماری و ریاضی خاص برای طراحی آزمایش در این زمینه است.

با این وجود، هیچ مطالعه ای در مورد بهینه سازی حذف کروم (VI) توسط ذرات پوسته تمبره ندی اصلاح شده با اسید سولفوریک گزارش نشده است. بنابراین در مطالعه حاضر، بررسی کاهش کروم (VI) از محلول آبی توسط پوسته میوه تمبره ندی فعال شده با اسیدسولفوریک از طریق طراحی و بهینه سازی آزمایشگاهی متغیرهای فرآیند با استفاده از فرآیند رویه سطح پاسخ انجام شد. تاثیر متغیرهای اجرایی از قبیل غلظت اولیه یون های کروم (VI)، pH اولیه محلول، دز جاذب، زمان تماس و سرعت لرزاننده به منظور بهینه سازی کاهش حذف کروم (VI) از محلول آبی توسط ذرات پوسته میوه تمبره ندی بررسی شد.

مواد و روش ها

مواد

محلول کروم (VI) توسط حل کردن مقادیر از پیش تعیین شده وزنی پودر پتاسیم دی کرومات ($K_2Cr_2O_7$) در آب مقطر آماده شد. همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می شود؛ نمونه های غالب کروم برای غلظت کمتر از 1000 mg/L و pH کمتر از ۱ برابر (H_2CrO_4) و نمونه غالب کروم برای غلظت بیش تر از 1000 mg/L و pH بین ۱ تا ۶٫۵ برابر $(Cr_2O_7)^{2-}$ و برای pH بیش تر از ۶٫۵ نمونه غالب کروم به صورت $(CrO_4)^{2-}$ می باشد. لازم به ذکر است فرم غالب محلول کروم با توجه به محدوده pH و غلظت آلاینده کروم (VI) در این تحقیق بیش تر به صورت $(HCrO_4)^-$ و $(CrO_4)^{2-}$ می باشد.

آماده سازی ذرات پوسته میوه تمبره ندی توسعه یافته

پوسته های میوه تمبره ندی از بخش مرکزی ایران (استان اصفهان) تهیه شد. پوسته ها با آب مقطر شسته شدند و در آون در دمای $110^\circ C$ برای ۴ ساعت قرار داده شدند. سپس پوسته های

جدول ۱- محدوده آزمایشگاهی و سطوح متغیرهای مستقل استفاده شده در فرآیند جذب

شماره آزمایش Test number	سطح حقیقی متغیر Actual level variable					بازدهی (%) Y (%)	ظرفیت جذب (mg/g) Adsorption capacity
	X _A	X _B (g/L)	X _C (mg/L)	X _D (min)	X _E (rpm)		
1	1	7	5.0	60	100	81.6	0.58
2	4	1	150.0	30	150	8.1	12.15
3	7	7	150.0	90	50	31.8	6.81
4	10	5	5.0	30	100	37.8	0.38
5	7	1	150.0	120	100	10.2	15.30
6	5.5	4	77.5	75	125	48.3	9.36
7	1	3	150.0	90	50	25	12.50
8	5.5	4	77.5	75	125	47	9.11
9	10	5	101.7	120	200	48.3	9.82
10	10	3	101.7	30	200	27.1	9.18
11	4	7	101.7	30	200	54.4	7.90
12	1	3	101.7	30	50	26.6	9.01
13	10	5	5.0	30	100	39.5	0.40
14	7	1	53.3	30	50	14	7.47
15	1	3	150.0	90	200	46	23.00
16	7	7	5.0	90	200	86.8	0.62
17	1	7	101.7	120	100	53.9	7.83
18	10	7	53.3	90	50	39.1	2.98
19	1	3	150.0	90	200	45.5	22.75
20	4	3	5.0	30	200	50.1	0.84
21	1	1	5.0	60	100	24.6	1.23
22	10	1	5.0	90	150	18.3	0.92
23	10	7	53.3	90	50	42	3.20
24	4	7	101.7	30	50	46.5	6.75
25	10	3	150.0	60	50	19.4	9.70
26	7	1	5.0	90	50	17.4	0.87
27	10	7	150.0	60	150	26.1	5.59
28	7	7	5.0	90	200	84	0.60
29	1	1	53.3	120	150	28.1	14.99
30	1	5	5.0	120	150	78.2	0.78
31	4	5	5.0	120	50	60.3	0.60

(R²) تعیین شدند.

آزمایشات مشخصات مواد

مورفولوژی ذرات پوسته میوه تمبره‌ندی اصلاح شده با استفاده از روش اسکن میکروسکوپ الکترونی (SEM مدل LEO430، کمبریج، انگلستان) تعیین شد. اندازه‌گیری‌های جذب بر روی اسپکتروفتومتر تشخیص اشعه UV مدل لامبدا ۳۵ انجام شد. مقادیر جذب در طول موج 540nm برای محلول کروم (VI) تنظیم شد.

آزمایشات جذب

تأثیر ۵ متغیر مستقل بر روی جذب کروم (VI) از محلول آبی توسط ذرات پوسته میوه تمبره‌ندی در یک محیط گسسته بررسی شد. تمامی آزمایشات مطابق با روش ماتریس D-optimal انجام شد. برای جذب کروم (VI) توسط ذرات پوسته میوه تمبره‌ندی، مقادیر وزنی متفاوت از پوسته میوه تمبره‌ندی برابر (۱-۷gr/L) با 50ml از

متغیر پاسخ برابر Y (درصد بازدهی حذف ذرات پوسته میوه تمبره‌ندی برای محلول کروم [VI] در محلول آبی می‌تواند به صورت زیر بیان شود؛

$Y=f(X_A, X_B, X_C, X_D, X_E)$ که در این معادله X_D, X_C, X_E و X_B, X_A مقادیر کدی متغیرهای فرآیند هستند که به ترتیب برابر pH، دز جاذب، غلظت اولیه آلاینده کروم، زمان تماس و سرعت لرزاننده می‌باشند. مدل چندوجهی با توجه به متغیرات مطابق زیر بیان می‌شود:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_A + \beta_2 X_B + \beta_3 X_C + \beta_4 X_D + \beta_5 X_E + \beta_6 X_A X_B + \beta_7 X_A X_C + \beta_8 X_A X_D + \beta_9 X_B X_C + \beta_{10} X_D X_E + \beta_{11} X_A^2 + \beta_{12} X_B^2 + \beta_{13} X_D^2 + \beta_{14} X_E^2 \quad (\text{معادله ۱})$$

ضرایب مدل (β_i) تخمین زده می‌شوند و برای تخمین مقادیر پاسخ برای ترکیبات مختلف، مقادیر کدی متغیرات استفاده می‌شوند. دقت مدل انتخابی و اهمیت آماری ضرایب رگرسیون با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) آزمایش شدند (۳۰). مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده متغیر پاسخ (Y) برای محاسبه ضرایب تشخیص

شد و pH محلول‌ها در محدوده ۱۰-۱ با اضافه کردن محلول 0.1M HCl و یا 0.1 M NaOH تنظیم شد. سپس 0.2g از ذرات پوسته میوه تمبره‌ندی به محلول اضافه شد. بعد از آن، محلول برای ۳ روز در دمای 20°C نگهداری شد. در نهایت، pH محلول اندازه‌گیری شدند. pH_{zpc} در pH ای که در آن معادل pH نهایی است؛ گزارش داده شد.

نتایج و بحث

مشخصات جاذب

تصویر زیر میکروسکوپ الکترونی اسکنی (SEM) گرفته شده از پوسته میوه تمبره‌ندی با بافت سطحی، تخلخل و ساختار فیبری ذرات اصلاح شده را نشان می‌دهد (شکل ۲). تصویر سطحی نشان می‌دهد که ذرات تا حدودی گرد هستند، مورفولوژی سخت و درشت ذرات پوسته میوه تمبره‌ندی می‌تواند مکان‌های فعال بیشتری را نسبت به مورفولوژی نرم فراهم کند. بنابراین برای جذب کروم (VI) از محلول آبی یک حسن محسوب می‌شود (۳۲).

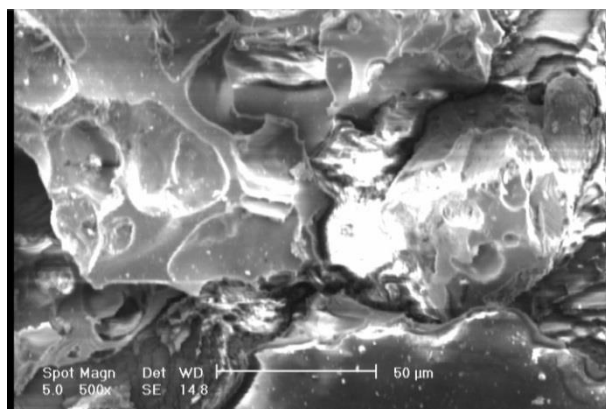
محلول کروم (VI) با غلظت‌های متفاوت (50-150mg/l) ترکیب شد. محلول آبی کروم (VI) توسط حل کردن مقادیر از پیش تعیین شده پودر K₂Cr₂O₇ در آب مقطر آماده شد. pH محلول توسط محلول هیدروکلریک اسید 1M یا سدیم هیدروکسید 1M در محدوده ۱۰-۱ تنظیم شد. غلظت باقیمانده یون‌های کروم (VI) در فاز محلول توسط اسپکتروفتومتر تشخیص اشعه UV در 540nm به وسیله ایجاد رنگ دی فنیل کربازید تعیین شد (۲). ظرفیت جذب (mg/g) سیستم بی متالیک به صورت زیر محاسبه شد (۲۸):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \quad (\text{معادله ۲})$$

جایی که C₀ و C_e به ترتیب غلظت‌های اولیه و نهایی محلول کروم (VI) هستند (mg/L). V و W به ترتیب بیان کننده حجم و جرم محلول ذرات پوسته تمبره‌ندی هستند.

تعیین نقطه بار صفر (pH_{pzc})

pH_{pzc} برای کربن پوسته میوه تمبره‌ندی به صورت زیر تعیین شد. 50ml از محلول 0.1M NaCl در مجموعه‌ای از ظروف ریخته



شکل ۲- تصویر SEM ذرات پوسته میوه تمبره‌ندی

Figure 2- SEM figure of tamarind fruit shell Particles

یک مدل سازی رگرسیونی چند اسمی بین متغیر پاسخ (بازدهی جذب، %) و مقادیر کدهای شده متناظر (X_A, X_B, X_C, X_D, X_E) از پنج متغیر مختلف به ترتیب (pH، دز جاذب، غلظت اولیه آلاینده، زمان تماس و سرعت لرزاننده) ایجاد شده است و سرانجام بهترین مدل برازش شده مطابق زیر بدست آمد:

$$\begin{aligned} \text{Cr(VI) Removal} = & -1.45707 + (2.33859 \times A) + \\ & (16.49039 \times B) - (0.088442 \times C) + (0.38981 \times D) - \\ & (0.21339 \times E) - (0.31612 \times A \times B) + (0.010177 \times A \times \\ & C) - (9.00583 \times 10^{-3} \times A \times D) - (0.030666 \times B \times C) + \\ & (1.41491 \times 10^{-3} \times D \times E) - (0.27283 \times A^2) - (0.79395 \times \\ & B^2) - (2.86523 \times 10^{-3} \times D^2) + (8.81771 \times 10^{-4} \times E^2) \end{aligned}$$

(معادله ۳)

مدل سازی رویه پاسخ

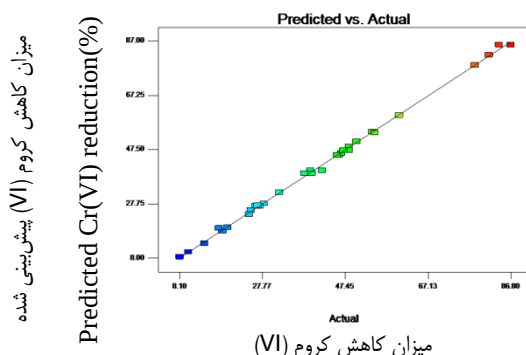
طراحی آزمایشگاهی و مدل رگرسیون

اثرات تقابلی متغیرهای گزینشی برای کاهش کروم (VI) توسط ذرات پوسته میوه تمبره‌ندی اصلاح شده در محیط آبی با استفاده از روش طراحی D-optimal توسعه پیدا کرد.

یک مدل مربعی برای توسعه ارتباط مناسب ریاضی بین پاسخ و متغیرهای فرآیند شامل pH، دز جاذب، غلظت اولیه آلاینده کروم (VI)، زمان تماس و سرعت لرزاننده انتخاب شد. حداکثر ظرفیت جذب ذرات پوسته میوه تمبره‌ندی برای یون‌های کروم (VI) برابر 23mg/g بدست آمد.

کیفیت برازش مدل توسط ضریب تشخیص (R^2) بین مقادیر آزمایشگاهی و تخمینی از متغیر پاسخ در شکل ۳ تخمین زده شده است.

آنالیز واریانس (ANOVA) برای آزمایش اهمیت مدل بررسی شد (۳۰). نتایج ANOVA (جدول ۲) از مدل رگرسیونی، مدل مربعی را پیشنهاد داد که دارای اهمیت بالایی است.



Measured Cr(VI) reduction(%)

شکل ۳- میزان همبستگی نتایج آزمایش واقعی و مقادیر پیش بینی شده مدل

Figure 3- The correlation value between the actual test results and the predicted values of the model

هر طرح آزمایش ۳ متغیر در سطوح مرکزی‌شان ثابت در نظر گرفته شدند pH اولیه محلول برابر ۵، دز جاذب: 3.5g/L، زمان تماس: 75 دقیقه، غلظت اولیه آلاینده: 75mg/L، سرعت لرزاننده: 100rpm) و متعاقباً ۵ طرح کلی ۳ بعدی برای پاسخ‌ها در نظر گرفته شدند.

تأثیر ۵ متغیر مختلف فرآیند بر روی فاکتور پاسخ (جذب کروم [VI]) به صورت بصری در نمودار رویه پاسخ ۳ بعدی (شکل ۳a-e) نشان داده شده است. شکل ۳a نمودار رویه پاسخ ۳ بعدی برای بازدهی جذب کروم (VI) به عنوان تابعی از pH محلول و دز جاذب در زمان تماس ثابت (60 دقیقه)، غلظت اولیه کروم (75mg/L) و سرعت لرزاننده (100rpm) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود جذب فلز کروم (VI) به صورت آرام با افزایش pH محلول کاهش می‌یابد (چون در pH بالاتر، افزایش غلظت $(OH)^-$ را شاهد هستیم که این یون دارای رقابت با یون‌های $(HCrO_4)^-$ و $(CrO_4)^{2-}$ برای جذب بر روی سطح جاذب هست؛ اما تغییر pH تأثیر خیلی زیادی بر روی بازدهی حذف ندارد) و همچنین بازدهی حذف آلاینده کروم (VI) با افزایش دز جاذب در طی آزمایش به دلیل بالا رفتن تعداد مکان‌های فعال برای جذب افزایش می‌یابد.

تأثیر تقابلی دز جاذب و غلظت اولیه محلول کروم (VI) در فرآیند جذب توسط ذرات پوسته میوه تمبره‌ندی در شکل ۳b و در pH محلول ثابت برابر ۵، زمان تماس ۶۰ دقیقه و سرعت لرزاننده 100rpm نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش دز جاذب و کاهش غلظت محلول کروم (VI)، بازدهی حذف به دلیل وجود رقابت بیشتر برای جذب به سطوح جاذب افزایش می‌یابد.

در شکل ۳ مقدار نسبتاً بالایی از R^2 (0.9987) وابستگی و همبستگی بالایی را بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده پاسخ نشان داد. علاوه بر این در جدول ۲ آنالیز واریانس آزمایشات نشان داده شده است. در این جدول وجود میزان نسبتاً بالایی از ضریب تشخیص تنظیم شده ($R^2_{adj}=0.9975$) نشان از بالا بودن اهمیت مدل دارد.

همانطور که در جدول شماره ۲ ملاحظه می‌گردد میزان عدد p-value کمتر از ۰.۰۰۰۱ هست که نشان دهنده بالا بودن درجه اهمیت مدل مورد نظر می‌باشد. همچنین میزان عدم برازش (Lack of fit) برابر ۰.۹۴۵۸ بدست آمده است که هرچقدر این عدد نزدیک به عدد ۱ باشد نشان دهنده آن هست که میزان برازش و تطابق مدل با داده‌های آزمایشگاهی بیشتر است.

نمودارهای رویه پاسخ ۳ بعدی

نمودارهای رویه پاسخ ۳ بعدی (3D) متغیرهای وابسته‌ای هستند که به عنوان تابعی از ۲ متغیر غیروابسته که در محدوده‌های آزمایشگاهی تغییر می‌کنند و متغیر سوم بازدهی حذف محلول کروم (VI) که بر حسب درصد می‌باشد؛ بیان می‌گردد. در حالی که با حفظ تمامی متغیرهای دیگر در سطوح ثابت (معمولاً مرکز داده‌ها) می‌توان ارتباطی بین این ۲ متغیر و متغیر پاسخ که بازدهی حذف می‌باشد برقرار کرد (۱۰ و ۲۱). به منظور بدست آوردن درک بهتر از تأثیرات متغیرهای مستقل و تقابلشان با متغیر وابسته، طرح رویه پاسخ ۳ بعدی برای پاسخ‌های اندازه‌گیری شده بر اساس مدل مربعی ساخته شد. بنابراین، مدل مربعی در این مطالعه ۵ متغیر مستقل دارد که برای

جدول ۲- تحلیل واریانس برای مدل مربعی کاهش یافته رویه پاسخ

Table 2- Analysis of variance for reduced square quadratic response model

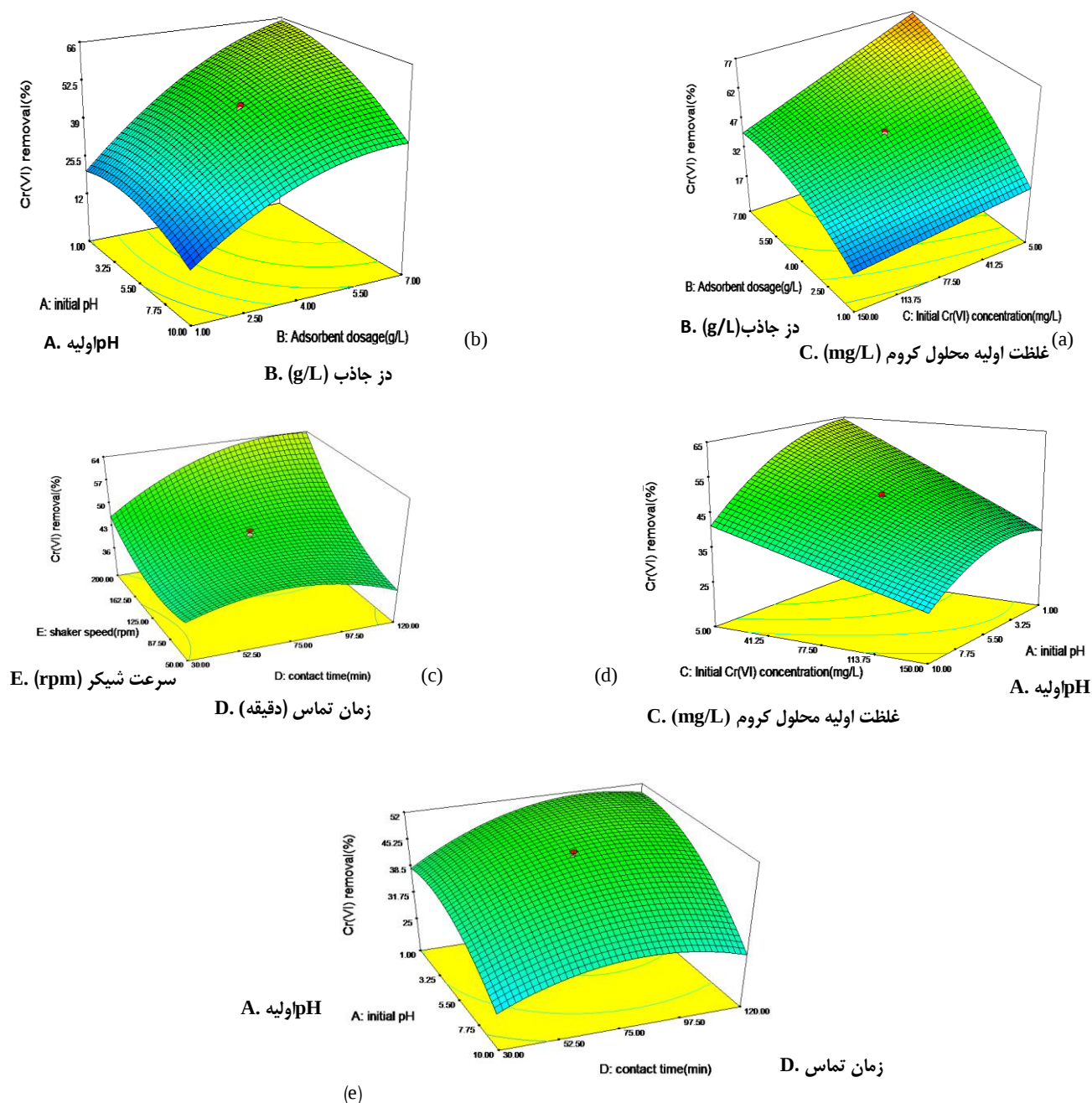
منبع Source	مجموع مربعات Sum of squares	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean square	F Value	p-value Prob > F	
مدل Model	13693.94	14	978.14	869.88	< 0.0001	Significant
A-اولیه pH A-initial pH	1166.16	1	1166.16	1037.09	< 0.0001	
B- دز جاذب (g/L) B-Adsorbent dosage (g/L)	5037.63	1	5037.63	4480.08	< 0.0001	
C-غلظت اولیه محلول کروم- C-Initial Cr (VI) concentration (mg/L)	2369.68	1	2369.68	2107.41	< 0.0001	
D- زمان تماس (min) D-contact time (min)	224.1	1	224.1	199.3	< 0.0001	
E- سرعت لرزاننده (rpm) E-shaker speed (rpm)	1288.64	1	1288.64	1146.02	< 0.0001	
AB	160.88	1	160.88	143.07	< 0.0001	
AC	122.3	1	122.3	108.76	< 0.0001	
AD	22.68	1	22.68	20.17	0.0004	
BC	453.68	1	453.68	403.47	< 0.0001	
DE	197.45	1	197.45	175.6	< 0.0001	
A ²	146.27	1	146.27	130.08	< 0.0001	
B ²	256.89	1	256.89	228.45	< 0.0001	
D ²	176.22	1	176.22	156.72	< 0.0001	
E ²	117.97	1	117.97	104.91	< 0.0001	
باقیمانده Residual	17.99	16	1.12			
عدم برازش Lack of Fit	7.45	11	0.68	0.32	0.9458	not significant
خطای خالص Pure error	10.54	5	2.11			
Cor total	13711.93	30				

R-Squared=0.9987, Adj R-Squared=0.9975, Pred R-Squared=0.9958, Adeq Precision=104.7267

تمبرهندی در دز جاذب (3.5g/L)، زمان تماس ۶۰ دقیقه و سرعت لرزاننده (100rpm) نشان داده شده است. همچنین اثر تقابلی pH اولیه و زمان تماس بر روی بازدهی حذف کروم (VI) توسط ذرات پوسته میوه تمبرهندی اصلاح شده در شکل ۳.e با سرعت لرزاننده ثابت 100rpm، دز جاذب 3.5g/L، غلظت اولیه محلول کروم (VI) برابر 75mg/L نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش زمان تماس در مقادیر پایین pH، بازدهی حذف محلول کروم (VI) افزایش می یابد.

همچنین تأثیر سرعت دور لرزاننده (شیکر) و زمان تماس بر روی بازدهی جذب محلول کروم (VI) با استفاده از ذرات پوسته تمبرهندی اصلاح شده در شکل ۳.c و در pH ثابت برابر ۵، دز جاذب 3.5g/L و غلظت اولیه کروم (VI) برابر 75mg/L نشان داده شده است. باید متذکر شد که بازدهی حذف کروم (VI) با افزایش هم-زمان سرعت لرزاننده و زمان تماس به دلیل وجود زمان و تقابل بیشتر برای جذب محلول کروم (VI) افزایش می یابد.

در شکل ۳.d اثر تقابلی pH اولیه و غلظت اولیه محلول کروم (VI) برای فرآیند حذف کروم (VI) توسط ذرات پوسته میوه



شکل ۴- نمودار سطح پاسخ نشان‌دهنده اثر (a) pH اولیه محلول و دز جاذب (b) غلظت اولیه کروم و دز جاذب (c) زمان تماس و سرعت شیکر (d) pH و غلظت اولیه کروم و (e) pH و زمان تماس اولیه

Figure 4- The response surface graph shows the effect of (a) initial pH and adsorbent dose (b) the initial concentration of chromium and adsorbent dose (c) contact time and shaker speed (d) pH and initial chromium concentration; and (e) pH and initial contact time

آزمایشگاهی انجام شد. مقادیر کدسازی شده بهینه ۵ متغیر مستقل انتخابی شامل pH محلول برابر ۱، دز جاذب برابر ۷g/L، غلظت اولیه آلاینده برابر ۵mg/L، زمان تماس برابر ۱۲۰ دقیقه و سرعت لرزاننده

بهینه‌سازی حذف فلز کروم (VI)

در این تحقیق از روش بهینه‌سازی متغیرهای مستقل برای افزایش بازدهی حذف کروم (VI) به وسیله مدل مربعی و در محدوده

مدل‌های ایزوترم لانگمویر به صورت زیر توضیح داده می‌شوند:

$$\frac{C_e}{q_e} = \left(\frac{1}{Q_M}\right) + \left(\frac{1}{KQ_M}\right) \quad (\text{معادله ۴})$$

در معادله ۴، q_e (mg/g) ظرفیت جذب تعادلی فلز کروم، C_{eq}

(mg/L) میزان غلظت نهایی فلز کروم در محلول، Q_{max}

حداکثر ظرفیت جذب محلول کروم و K (mL/g) ثابت لانگمویر می

باشد. پارامترهای مدل لانگمویر توسط رسم نمودار C_e/q_e در مقابل

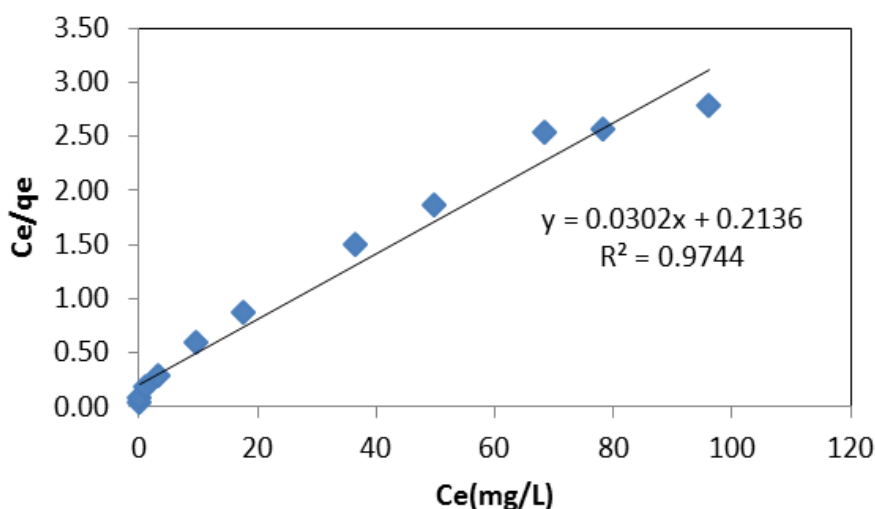
پارامتر C_e بدست آمد و نتایج در جدول ۳ لیست شده‌اند (شکل 4.a).

برابر 200rpm تخمین زده شد. حداکثر بازدهی جذب کروم (VI) برابر ۸۶٫۸٪ تعیین شد که به نسبت بالایی نزدیک به مقادیر پیش‌بینی شده در بازدهی حذف کروم (VI) توسط مدل پاسخ دارد (۹۸٫۶٪).

مدل‌های ایزوترم

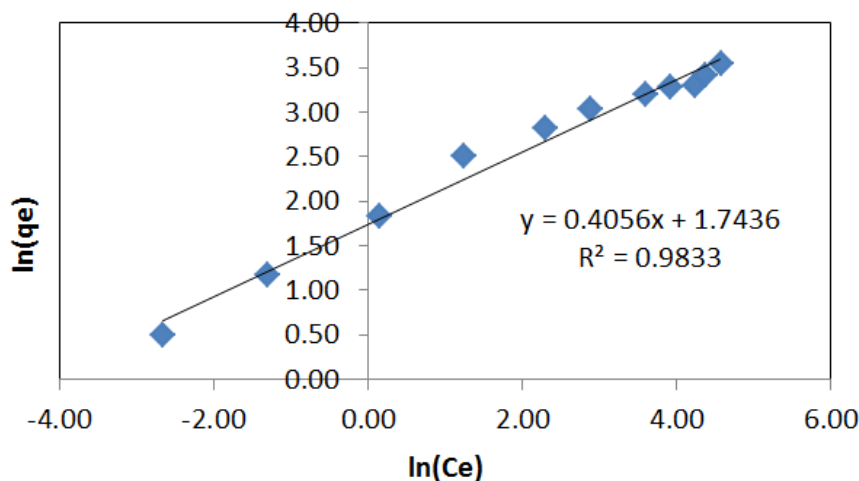
در این بخش از داده تعادل حذف فلز کروم (VI) به وسیله ذرات پوسته میوه تمبره‌ندی اصلاح شده توسط مدل‌های ایزوترم لانگمویر و فرندلیچ توضیح داده شده است.

(الف)



غلظت نهایی محلول کروم (mg/L)

(ب)



شکل ۵- نمودارهای جذب فلز سنگین کروم (VI) توسط جاذب پوسته تمبره‌ندی اصلاح شده (ا) ایزوترم لانگمویر (ب) ایزوترم فرندلیچ

Figure 5- Chromium (VI) heavy metal adsorption charts by modified tamarind fruit shell a) Langmuir isotherm b) Freundlich isotherm

در مقابل $\ln(C_e)$ که لگاریتم غلظت نهایی فلز کروم (VI) در نمونه آب بعد از انجام فرآیند جذب می‌باشد؛ بدست می‌آید (شکل ۵.b). برای ایزوترم لانگمویر، Q_m حداکثر ظرفیت جذب لانگمویر می‌باشد، K ثابت تعادل لانگمویر می‌باشد که در جدول ۳ لیست شده است.

همچنین مدل ایزوترم فرنرندلیج به صورت زیر توضیح داده شده است:

$$\ln q_e = \ln K_f + Fr \ln C_e \quad (\text{معادله ۵})$$

جایی که K_f و Fr (mg/g) ثابت‌های فرنرندلیج هستند. پارامترهای مدل فرنرندلیج با رسم نمودار $\ln(q_e)$ که لگاریتم ظرفیت جذب می‌باشد

جدول ۳- پارامترهای ایزوترم برای جذب یون کروم (VI) توسط جاذب پوسته میوه تمبره‌ندی

Table 3- Isotherm Parameters for Chromium (VI) ion adsorption by tamarind fruit shell adsorbent

جاذب Adsorbent	ایزوترم Isotherm					
	لانگمویر Langmuir			فرنرندلیج Freundlich		
	Q_m	K	R^2	K_f	Fr	R^2
پوسته میوه تمبره‌ندی Tamarind fruit shell	33.11	0.1414	0.974	5.72	0.406	0.983

مطالعه مقایسه‌ای

حداکثر ظرفیت جذب یون‌های کروم (VI) که توسط پوسته میوه تمبره‌ندی اصلاح شده جذب می‌شوند در مقایسه با دیگر جاذب‌ها در مقالات گزارش شده است و نتایج آن در جدول ۴ لیست شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود ظرفیت جذب پوسته میوه تمبره‌ندی برای جذب یون‌های کروم (VI) قابل مقایسه و حتی در بیشتر موارد هم بیشتر از جاذب‌هایی شبیه به این جاذب در مقالات دیگر می‌باشد.

با مقایسه ضرائب تشخیص (R^2) مدل‌های مطالعه شده، بدیهی است که مدل ایزوترم فرنرندلیج توصیف بهتری از داده تعادل جذب یون کروم (VI) توسط جاذب پوسته میوه تمبره‌ندی در مقایسه با مدل ایزوترم لانگمویر دارد.

جدول ۴- مقایسه ظرفیت جذب جاذب‌های پوسته میوه تمبره‌ندی اصلاح شده برای جذب یون‌های کروم (VI) با دیگر جاذب‌های گزارش شده در دیگر مقالات

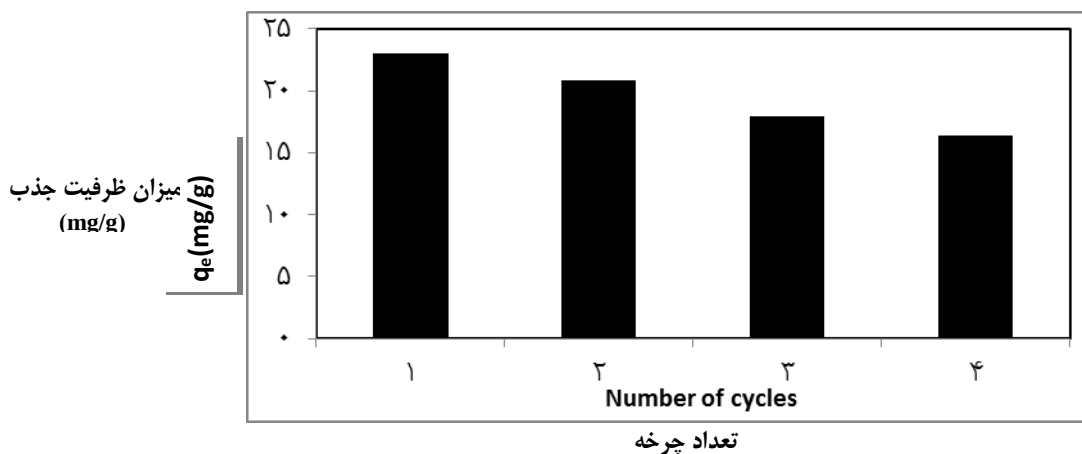
Table 4- Comparison of adsorption capacity of modified tamarind fruit shell adsorbent for adsorbing chromium (VI) ions with other adsorbents reported in other articles

جاذب Adsorbent	ظرفیت جذب (mg/g) Adsorption capacity (mg/g)	مرجع Reference
خاک اره Saw dust	15.82	[33]
اسفنجیان Native saltbush(leaves)	1.7	[33]
Walnut hull پوسته گردو	22	[33]
خاک اره Saw dust	1.5	[33]
چوب ذرت Maize cob	13.8	[33]
پوست میوه تمبره‌ندی اصلاح شده Modified tamarind fruit shell	23	This study

مطالعات واجذب

استفاده مجدد از جاذب در ۴ مرحله سیکل جذب/واجذب با استفاده از محلول ترکیبی NaCl (1.0M) + HCl (0.5 M) در pH :1، دز جاذب: 3g/L، غلظت اولیه فلز کروم (VI) برابر 100mg/L ، زمان تماس: ۹۰ دقیقه و سرعت لرزاننده: 200rpm انجام پذیرفته است که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. بعد از ۴ مرحله جذب و واجذب، ظرفیت جذب از 23mg/g در اولین مرحله به 16.4mg/g در مرحله چهارم کاهش داده می‌شود. نتایج

نشان داد که میزان کاهش در ظرفیت جذب یون‌های کروم (VI) توسط پوسته میوه تمبره‌ندی آن چنان زیاد نیست. مطالعات جذب/واجذب نشان داد که یون‌های کروم (VI) به آسانی با ترکیب محلول NaCl (1.0 M) + HCl (0.5 M) واجذب می‌شوند. نتایج بدست آمده تا حدودی نشان داد که پوسته میوه تمبره‌ندی اصلاح شده می‌تواند به صورت مکرر بدون کاهش قابل ملاحظه در عملکرد جذب مورد استفاده مجدد قرار بگیرد.



شکل ۶- میزان جذب کروم (VI) بعد از چهار چرخه جذب/واجذب با محلول NaCl (1.0 M)+ HCl (0.5 M)

Figure 6- The adsorption rate of chromium (VI) after four cycles of adsorption / desorption with HCl (0.5 M) + NaCl (1.0 M)

جدول ۵- مقادیر پارامتر دقت مدل رویه سطح پاسخ (Response surface of methodology)

Table 5- The values of the model accuracy of Response surface of methodology

پارامتر Parameter	مقادیر Values
مجموع مربعات (R^2)	0.9987
مجموع مربعات اصلاح شده ($\text{adj}R^2$)	0.9975
مجموع مربعات پیش‌بینی شده ($\text{pred}R^2$)	0.9958

ذرات پوسته میوه تمبره‌ندی به کار رفت. رویکرد ریاضی پیشنهاد شده، آنالیز بحرانی تأثیرات تقابلی شبیه‌سازی و تأثیر پارامترهای تأثیرگذار pH ، دز جاذب، غلظت اولیه محلول کروم (VI)، زمان تماس و سرعت لرزاننده را به منظور کاهش کروم (VI) فراهم کرد. مقادیر بهینه pH محلول، دز جاذب، غلظت اولیه آلاینده کروم (VI)، زمان تماس و سرعت لرزاننده به ترتیب برابر ۱، 7g/L ، 5mg/L ، 120

نتیجه‌گیری

جذب فلز سنگین کروم (VI) توسط پوسته میوه تمبره‌ندی به عنوان یک جاذب به وسیله تغییر متغیر pH محلول، دز جاذب، غلظت اولیه محلول کروم (VI)، زمان تماس و سرعت لرزاننده (شیب) مورد مطالعه قرار گرفت. طراحی آزمایش D-optimal به همراه مدل‌سازی رویه پاسخ برای بیشینه کردن حذف کروم (VI) از محلول آبی توسط

نشان داده شده است:

نتایج مقادیر ضریب تشخیص (R^2) در جدول ۵ نشان دهنده آن هست که میزان این مقادیر نزدیک به عدد ۱ می‌باشد و بنابراین مدل رویه سطح پاسخ از نوع D-optimal یک روش موثر برای پیش‌بینی مدل‌سازی حذف فلز سنگین کروم (VI) از محلول آبی محسوب می‌شود.

دقیقه و 200rpm تخمین زده شد. بازدهی حذف پیشنهادی کروم تحت شرایط بهینه برابر 98.6% تخمین زده شد که 14% بیشتر از مقدار غیربهینه آزمایشگاهی (86.8%) بود. دقت ریاضی مدل مربعی اصلاح شده برای حذف کروم (VI) توسط سیستم پوسته میوه تمره‌ندی اصلاح شده از طریق روش‌های تشخیص آماری گوناگون بررسی شد. مقادیر پیش‌بینی شده مدل رویه پاسخ با مقادیر تعیینی آزمایشگاهی تطبیق خوبی را نشان می‌دهد که نتایج آن در جدول ۵

منابع

- 1- Abrowski D., Hubicki Z., Podko Scielny P., and Robens E. 2004. Selective of the heavy metal ions from waters and industrial wastewater by ion-exchange method. *Chemosphere*, 56: 91-106.
- 2- Ahmad R. 2004. Sawdust: Cost effective scavenger for the removal of chromium (iii) ions from aqueous solutions. *Water, Air and Soil Pollution*, 163: 169-183.
- 3- Alaerts G.J., Jitjaturant V., and Kelderman P. 1989. Use of coconut shell based activated carbon for chromium (VI) removal. *Water Science Technology*, 21: 1701-1704.
- 4- Alam M.Z., Muyibi S.A., and Toramae J. 2007. Statistical optimization of adsorption processes for removal of 2, 4-dichlorophenol by activated carbon derived from oil palm empty fruit bunches. *Journal Environment Science*, 19: 674-677.
- 5- Aliabadi M., Irani M., Ismaeili J., and Najafzadeh S. 2014. Design and evaluation of chitosan/ hydroxyapatite composite nanofiber membrane for the removal of heavy metal ions from aqueous solution. *Journal Taiwan Inst Chem Engineering*, 45: 518-526.
- 6- American Public Health Association. 1998. Standard methods for examination of water and wastewater.
- 7- Annadurai G., Juang R.S., and Lee D.J. 2001. Adsorption of heavy metals from water using banana and orange peels. *Water Science Technology*, 47: 185-190.
- 8- Babu B.V. 2008. Adsorption of Cr (VI) using activated neem leaves: kinetic studies. *Springer Science+Business Media*, 14: 85-92.
- 9- Celevi O., Uzum C., Shahwan T., and Erten H.N. 2007. A radiotracer study of the adsorption behavior of aqueous Ba^{2+} ions on nanoparticles of zero-valent iron. *Journal Hazardous Materials*, 148: 761-767.
- 10- Cimino G., Passerini A., and Toscano G. 2000. Removal of toxic cations and Cr (VI) from aqueous solution by hazelnut shell. *Water Research*, 34: 2955-2962.
- 11- Dinesh M., and Charles U. 2006. Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water. *Journal of Hazardous Materials*, 137: 762-811.
- 12- Gunaraj V., and Murugan N. 1999. Application of response surface methodology for predicting weld bead quality in submerged arc welding of pipes. *Journal Mater. Process. Technology*, 88: 266-275.
- 13- Gupta Suresh., and Babu B.V. 2009. Utilization of waste product (tamarind seeds) for the removal of Cr (VI) from aqueous solutions: Equilibrium, kinetics, and regeneration studies. *Journal of Environmental Management*, 90: 3013-3022.
- 14- Gupta V.K., Shrivastava A.K. and Jain N. 2001. Biosorption of chromium (VI) from aqueous solutions by green algae *spirogyra* species. *Water Research*, 25: 4079-4090.
- 15- Hamadi N.K., Chen X.D., Farid M.M., and Lu M.G.Q. 2001. Adsorption kinetics for the removal of chromium(VI) from aqueous solution by adsorbents derived from used tyres and sawdust. *Chem. Engineering Journal*, 84(2): 95-105.
- 16- Hamilton M.J., and Mann-Whitney U. 2004. September 2 Sample Test (a. k. a. Wilcoxon Rank Sum Test), Department of Anthropology. University of New Mexico, Albuquerque, NM, USA.
- 17- Kobya M. 2004. Removal of Cr (VI) from aqueous solutions by adsorption onto hazelnut shell activated carbon: kinetic and equilibrium studies. *Bioresour. Technology*, 91: 317-321.
- 18- Liu H.L., and Chiou Y.R. 2005. Optimal decolorization efficiency of Reactive Red 239 by UV/TiO photocatalytic process coupled with response surface methodology. *Chem. Engineering Journal*, 112: 173-179.
- 19- Low K.S., Lee C.K., and Ay N.G. 1999. Column study on the sorption of Cr (VI) using quaternized rice hulls, *Bioresour. Technology*, 68: 205-208.
- 20- Mahvi A.H., Naghipour D., Vaezi F., and Nazmara S. 2005. Teawaste as an adsorbent for heavy metal removal from industrial wastewaters. *American Journal of Applied Sciences*, 2: 272-275.
- 21- Mohan D., and Pittman Jr Ch. 2006. Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water, *Journal Hazardous Materials*, 137: 762-811.

- 22- Myers R.H., and Montgomery D.C. 2001. Response Surface Methodology, second edWiley.
- 23- Periasamy K., Srinivasan K., and Murugan P.R. 1991. Studies on chromium (VI) removal by activated ground nut husk carbon. Indian Journal Environment Health, 33: 433-439.
- 24- Ricou-Hoeffer P., Lecuyer I., and Lecloires P. 2001. Experimental design methodology applied to adsorption of metallic ions on to fly ash. Water Research, 35: 965-976.
- 25- Sahu J.N., Acharya J., and Meikap B.C. 2009. Response surface modeling and optimization of chromium (VI) removal from aqueous solution using Tamarind wood activated carbon in batch process, Journal Hazardous Material, 172: 818-825.
- 26- Selomulya C., Meeyoo V., and Amal R. 1999. Mechanisms of Cr (VI) removal from water by various types of activated carbons. Journal Chem. Technology Biotechnology, 74: 111-122.
- 27- Selvi K., Pattabhi S., and Kadirvelu K. 2001. Removal of Cr (VI) from aqueous solution by adsorption onto activated carbon. Bioresour. Technology, 80: 87-89.
- 28- Singh K.P., Malik A., Sinha S., and Ojha P. 2008. Liquid-phase adsorption of phenols using activated carbons derived from agricultural waste material. Journal Hazardous Material, 150: 626-641.
- 29- Srinivasan K., Balasubramanian N., and Ramakrishnan T.V. 1988. Studies on chromium removal by rice husk carbon. Indian Journal Environment Health, 30: 376-387.
- 30- Srinivasan K., Balasubramanian N., and Ramakrishna T.V. 1991. Studies on chromium (VI) removal by activated groundnut husk carbon. Indian Journal Environment Health, 33: 433-439.
- 31- Tan I.A.W., Ahmad A.L., and Hameed B.H. 2008. Optimization of preparation conditions of activated carbons from coconut husk using response surface methodology. Chem. Engineering Journal, 137: 462-470.
- 32- Xiangyu W., Chau C., Ying C., and Huiling L. 2009. Dechlorination of chlorinated methanes by Pd/Fe bimetallic nanoparticles. Journal Hazardous Material, 161: 815-823.



Design and Optimization of Heavy Metal Chromium (VI) from Aqueous Solutions by Tamarind Fruit Shell Activated with Sulfuric Acid

M. Shahmoradi^{*1}- A. Taebi²- H. Hasheminejad³

Received: 20-06-2017

Accepted: 27-08-2018

Introduction: The industries of leather, plating, metal processing, wood production, painting, textile, steel making and bottling are the main industries for pollution of heavy metal chromium. Chromium in the two main oxidation states consists of chromium (VI) and chromium (III). Chromium (VI) is more dangerous, more cancerous and toxic for living organisms compared with chromium (III). In addition, low chromium (VI) concentration can cause health problems, including damage to the liver, as compared with chromium (III). In addition, lower concentrations of chromium (VI) can cause health problems including liver damage and skin cancer. Acceptable limits of chromium (VI) for discharging to surface water and drinkable water are 0.1 and 0.05 mg L⁻¹, respectively. Therefore, wastewater treatment for reaching the desired level of chromium (VI) is essential. There are several methods including chemical oxidation-reduction, ion exchange, electro dialysis, electrochemical treatment, evaporation, solvent extraction, reverse osmosis, chemical treatment and adsorption to reduce chromium (VI) from aqueous and sewage solutions. The main drawback of many of these methods is the high operating cost and remaining sludge disposal problems. Among the techniques, the adsorption method is preferred because of its simplicity, medium-performance and economic conditions. In the adsorption process, the physical and chemical properties of adsorbent are very important for achieving high adsorption efficiency. In the present study, activated particles with sulfuric acid were used to improve the removal of chromium (VI) from aqueous solution. In the adsorption process, the removal of chromium (VI) metal depends on several process variables in a discrete system such as the initial concentration of chromium (VI) solution, adsorbent dose, solution pH, vibrational speed and contact time. Optimizing process variables is necessary to achieve the maximum process efficiency for removing pollutants. A laboratory statistical design approach is necessary to reduce the number of experiments, create an appropriate model for process optimization and also evaluate the effect of response variability. Recently, several types of test design methods have been used to optimize the multivariate chemical process. Response surface of methodology is a set of statistical and mathematical methods for designing experiments in this field. Nevertheless, no study has been carried out on the optimization of the removal of chromium (VI) by particles of the shell modified with sulfuric acid.

Materials and Methods: Chromium (VI) solution was prepared by dissolving potassium dichromate (K₂Cr₂O₇) in distilled water. It should be noted that the dominant form of chromium solution in terms of pH and chromium (VI) contaminant concentrations is (HCrO₄)⁻ and (CrO₄)²⁻ in this study.

Preparation of modified tamarind fruit shell: Tamarind fruit shells were prepared from the central part of Iran (Isfahan province). The shells were washed with distilled water and placed in an oven at 110 °C for 4 hours. The dried shells were crushed and then passed through a filter with a size of 200 microns. The resultant particles were contacted with concentrated sulfuric acid (98 % w/w) for chemical activation and H⁺ ion saturation in a 1: 1 weight ratio and in an oven at 150 °C for 24 hours. The particles were then washed with distilled water and placed in a 1% sodium bicarbonate solution for 2 days. The material was then washed with distilled water and dried at 100 °C for 5 hours. With this activation operation, H⁺ ions are located on the adsorbent surface and increase the adsorption of chromium samples. In this study, chromium samples are more (HCrO₄)⁻ and (CrO₄)²⁻ which have an electric charge. These negative samples are definitely adsorbed to the shells by placing H⁺ ions on the surface of the adsorbent.

Adsorption-Tests: The effect of 5 independent variables on chromium (VI) adsorption of aqueous solution was investigated by the particles of tamarind fruit shells in a discrete medium. All experiments were performed in accordance with the D-optimal matrix method. To adsorb chromium (VI) by tamarind fruit shells, different weights of the tamarind fruit shell (1-7 gr/L) were combined with 50 ml of chromium (VI) solution and different concentrations (50-150 mg/L). The chromium aqueous solution (VI) was prepared by dissolving preset amounts of K₂Cr₂O₇ powder in distilled water. The pH of the solution was adjusted by a solution of 1 M hydrochloric acid

1, 2 and 3- M.Sc. Graduated Student, Professor and Assistant Professor of Civil and Environmental Technology, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, Respectively

(*- Corresponding Author Email: shahmoradimorteza1989@gmail.com)

or 1 M sodium hydroxide over the range of 1-10. The residual concentration of chromium ions (VI) in the soluble phase was determined by spectrophotometer detection of UV rays at 540 nm by the formation of diphenyl carbazide color. Adsorption Capacity (mg g^{-1}) of the bimetallic system was calculated as follows:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W}$$

where C_0 and C_e are the primary and final concentrations of chromium (VI) (mg L^{-1}), respectively. V and W represent the volume and mass of the solution containing the tamarind fruit shell particles, respectively.

Results: The adsorption of heavy metal chromium (VI) by the modified tamarind fruit shell as a sorbent was studied by changing the pH of the solution, the adsorbent dose, the initial concentration of chromium (VI), contact time and vibrational velocity (shaker). The design of the D-optimal experiment, along with the response surface procedure modeling, was used to maximize the removal of chromium (VI) from the aqueous solution by the particle of the tamarind fruit shell.

Keywords: Cr (VI) aqueous solution, D-optimal Optimization, Response surface of methodology, Tamarind fruit shell



بررسی رابطه خاک - لندفرم در جنوب هرات، غرب افغانستان

فرسیلا محمودیان^۱ - علیرضا کریمی^{۲*} - امیر لکزیان^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۸

چکیده

خاک به عنوان یکی از اجزای اصلی لندفرمها، تغییر و تحولات آنها به یکدیگر وابسته است و شناسایی رابطه خاک - لندفرم، پایه مطالعات شناسایی خاک است. هدف از این مطالعه شناسایی فرایندهای ژئومورفیک و خاکسازي تغییر و تحول خاکهای در جنوب هرات افغانستان بود. بدین منظور، ۵ خاکرخ در امتداد یک برش از سطوح ژئومورفیک مخروط افکنه، حد واسط مخروط افکنه و دشت دامنه‌ای، دشت دامنه‌ای و دشت سیلابی تشریح و نمونه‌برداری شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، کانی‌شناسی رس و ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی خاکها تعیین شد. متکامل‌ترین خاک با افق آرچیلیک - کلسیک (Btk) در سطح ژئومورفیک مخروط افکنه مشاهده شد. در سطوح ژئومورفیک دیگر، به دلیل اضافه شدن رسوبات، خاک تکامل نداشته است. در اراضی حد واسط مخروط افکنه - دشت دامنه‌ای و بخش از دشت دامنه‌ای، به دلیل گود افتادگی این اراضی، املاح، در سطح تجمع پیدا کرده‌اند و هدایت الکتریکی خاکها تا بیش از ۴۰ دسی‌زیمنس بر متر می‌رسید. در دشت سیلابی به دلیل نوسانات آب زیر زمینی، خاکها شرایط احیایی و اکسیدی را نشان می‌دادند. ایلیت، کلریت، اسمکتیت، کانولینیت، پالیگورسکیت کانی‌های غالب در بخش رس خاک می‌باشند. وجود پوشش‌های رسی روی نودول کربنات‌های ثانویه در افق Btk نشان دهنده دوره‌های تناوب خشک و مرطوب اقلیم می‌باشند. تغییر و تحولات خاک در منطقه مورد مطالعه در جنوب هرات، با خاک‌های مناطق خشک ایران مشابهت دارد.

واژه‌های کلیدی: تغییر و تحول خاک، تشکیل خاک، کانی‌شناسی رس، مخروط افکنه

مقدمه

قهوه‌ای یا قرمزی که داند نشان دهنده شرایط گرم‌تر و مرطوب‌تر در گذشته است. وجود کربنات‌های ثانویه و گچ در این خاکها توالی فرایندهای خاکسازي است که باعث تشکیل خاکهای پلی‌ژنتیک می‌شود که نشان از تغییرات پیوسته اقلیم و تغییر فرایندهای خاکسازي دارد (۲، ۱۸، ۲۴، ۳۱ و ۲۵).

در لندفرم‌های پائین دامنه و در دشت‌های سیلابی حاشیه رودخانه‌ها، معمولاً به دلیل رسوبگذاری‌های متوالی، فرصت تشکیل خاک و تکامل آن کمتر وجود دارد. در این لندفرم‌ها رسوبگذاری و تفاوت در زهکشی، نقش اساسی در ویژگی‌های خاکها دارد. معمولاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک، افق‌های کلسیک و کمبیک و در صورت زهکشی نامناسب، خاک‌های شور و احیایی در این این لندفرم‌ها معمول هستند (۱۵ و ۲۱).

علاوه بر ویژگی‌هایی که در مقیاس ماکرومورفولوژی در صحرا قابل تشخیص هستند. ویژگی‌های میکرومورفولوژی و کانی‌شناسی، برای تعیین شدت و ضعف فرایندهای خاکسازي، تغییرات اقلیمی و تقدم و تأخر فرایندهای خاکسازي استفاده می‌شود. افزایش کانی‌های اسمکتیت، در افق‌های آرچیلیک و همچنین تغییرات آنها بین خاک‌های قدیمی، نشان دهنده تفاوت در شدت فرایندهای

تشکیل خاک در بستر لندفرم‌ها انجام می‌شود و تغییر و تحول آنها به یکدیگر وابسته می‌باشد. شناسایی ارتباط خاک - لندفرم پایه مطالعات پدولوژی، پالتوپدولوژی و نقشه‌برداری خاک است (۱۳ و ۱۵). امروزه با توجه درک اهمیت خاکها به عنوان شاهد ارزنده از نحوه تغییرات محیطی و تأثیر فرایندهای ژئومورفیک در تغییر و تحول خاکها، از اطلاعات خاک برای بازسازی تاریخچه تغییر و تحول لندفرم‌ها استفاده می‌شود (۳۳).

در مناطق خشک، ترتیب و توالی رسوبگذاری و تشکیل خاک، در لندفرم‌های دامنه‌ای، به ویژه در مخروط افکنه و پدیمنت در نقاط مختلف دنیا شناسایی شده است (۲، ۱۳، ۱۵ و ۱۷). انتقال و تجمع رس که منجر به تشکیل افق آرچیلیک می‌شود از معمول‌ترین افق‌های تشکیل شده در مناطق خشک است که با رنگ متمایل به

۱، ۲ و ۳ - به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشیار و استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(* - نویسنده مسئول: Email: karimi-a@um.ac.ir)

ژئومورفیک شناسایی شده از سمت شمال به جنوب منطقه شامل مخروط افکنه، اراضی پست حد واسط مخروط افکنه و دشت دامنه‌ای شور، دشت دامنه‌ای غیرشور و دشت سیلابی بود. شکل ۱ موقعیت منطقه و محل حفر خاکرخ‌ها را در سطوح ژئومورفیک مختلف نشان می‌دهد.

براساس واحدهای مختلف ژئومورفیک شناسایی شده، تعداد ۵ خاکرخ در امتداد یک برش از مخروط افکنه به سمت هریود حفر شد. خاکرخ‌ها تشریح و از افق‌های ژنتیکی نمونه برداری شد. خاک‌ها بر اساس سیستم رده‌بندی آمریکایی (۳۵) طبقه بندی شدند. یک نمونه دست نخورده برای مطالعات میکرومورفولوژی از برخی از افق‌ها برداشته شد.

آنالیزهای آزمایشگاهی

آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی

پس از هوا خشک کردن نمونه‌ها و عبور دادن آنها از الک ۲ میلی‌متری، آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی روی آنها انجام شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (۵)، اسیدیته خاک در حالت گل اشباع با دستگاه pH سنج، قابلیت هدایت الکتریکی پس از استخراج عصاره اشباع در نسبت ۲:۱ آب به خاک با استفاده از دستگاه هدایت سنج الکتریکی تعیین گردید (۸). کربنات کلسیم معادل به روش خنثی کردن با اسیدکلریدریک و تیتراسیون اسید اضافی با سود (۳۰)، مکربن آلی به روش اکسیداسیون تر (۲۸) و آهن دی‌تیونات به روش سیترات-دی تیونات-بی کربنات (۲۷) اندازه‌گیری شد.

کانی‌شناسی بخش رس و میکرومورفولوژی

برای تفکیک جزء رس از روش کیتیک و هوپ (۲۶) استفاده شد. از هر نمونه رس، تیمارهای اشباع با منیزیم، منیزیم و اتلین گلیکول، پتاسیم و پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس آماده و توسط دستگاه پراش پرتو ایکس مدل زمینس D-5000 در ولتاژ ۴۰ کیلوولت و شدت جریان ۳۰ میلی‌آمپر در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی شمال غرب ایران مورد آنالیز قرار گرفتند.

برای انجام مطالعات میکرومورفولوژی کلوخه‌های دست نخورده با ترکیبی از ۶۰ درصد رزین پلی استر، ۴۰ درصد استن به عنوان رقیق کننده، ۲۸ قطره اسید استاریک و ۱۴ قطره کبالت به عنوان سخت کننده، اشباع و سخت شدند. از نمونه‌های سخت شده برش‌های به ضخامت ۲ میلی‌متر تهیه شد و پس از چسباندن روی لام ضخامت آنها توسط سایش با پودر کاربراندوم به حدود ۳۰ میکرون رسید. مقاطع نازک تهیه شده توسط میکروسکوپ پلاریزان در دو حالت نور پلاریزه عادی (PPL) و نور پلاریزه متقاطع (XPL) بر اساس روش استوپس (۳۶) مورد مطالعه قرار گرفتند.

خاک‌سازی است. همچنین، بر اساس وجود پدوفیچرهای مرکب کربنات‌ها و پوشش‌های رسی، تغییر در شرایط خاک‌سازی تعیین می‌شود (۱۵، ۲۵ و ۳۲).

در کشور عمدتاً کوهستانی افغانستان، با توجه به شرایط سیاسی و اجتماعی حاکم بر افغانستان اطلاعاتی از خاک‌ها در این کشور موجود نیست؛ حال آنکه با توجه به قرار گرفتن این کشور بین مناطق خشک ایران و ارتفاعات هیمالیا، مطالعه خاک‌ها و تغییر و تحول آنها می‌تواند دانش ما را در باره تشکیل خاک و تغییر و تحول آنها در مقیاس جهانی افزایش دهد.

شهر هرات در غرب افغانستان بین سفید کوه در شمال و سیاه کوه در جنوب واقع شده است. در دامنه ارتفاعات غربی سفید کوه در شمال هرات، مخروط افکنه‌های گسترده‌ای وجود دارد که منتهی به دشت هرات و دشت سیلابی رودخانه هریود می‌شود. مطالعه خاک‌ها تشکیل شده در امتداد این لندفرم‌ها، اطلاعات مناسبی در زمینه تغییر و تحول خاک‌های منطقه در دوره‌های مختلف فراهم می‌کند. هدف از این مطالعه شناسایی خاک‌ها در امتداد یک برش از مخروط افکنه به سمت رودخانه هریود در جنوب هرات، بررسی ویژگی‌های مورفولوژیکی، کانی‌شناسی و میکرومورفولوژیکی خاک‌های مورد مطالعه و بررسی تغییر و تحول و مقایسه آنها با مناطق دیگر جهان بود.

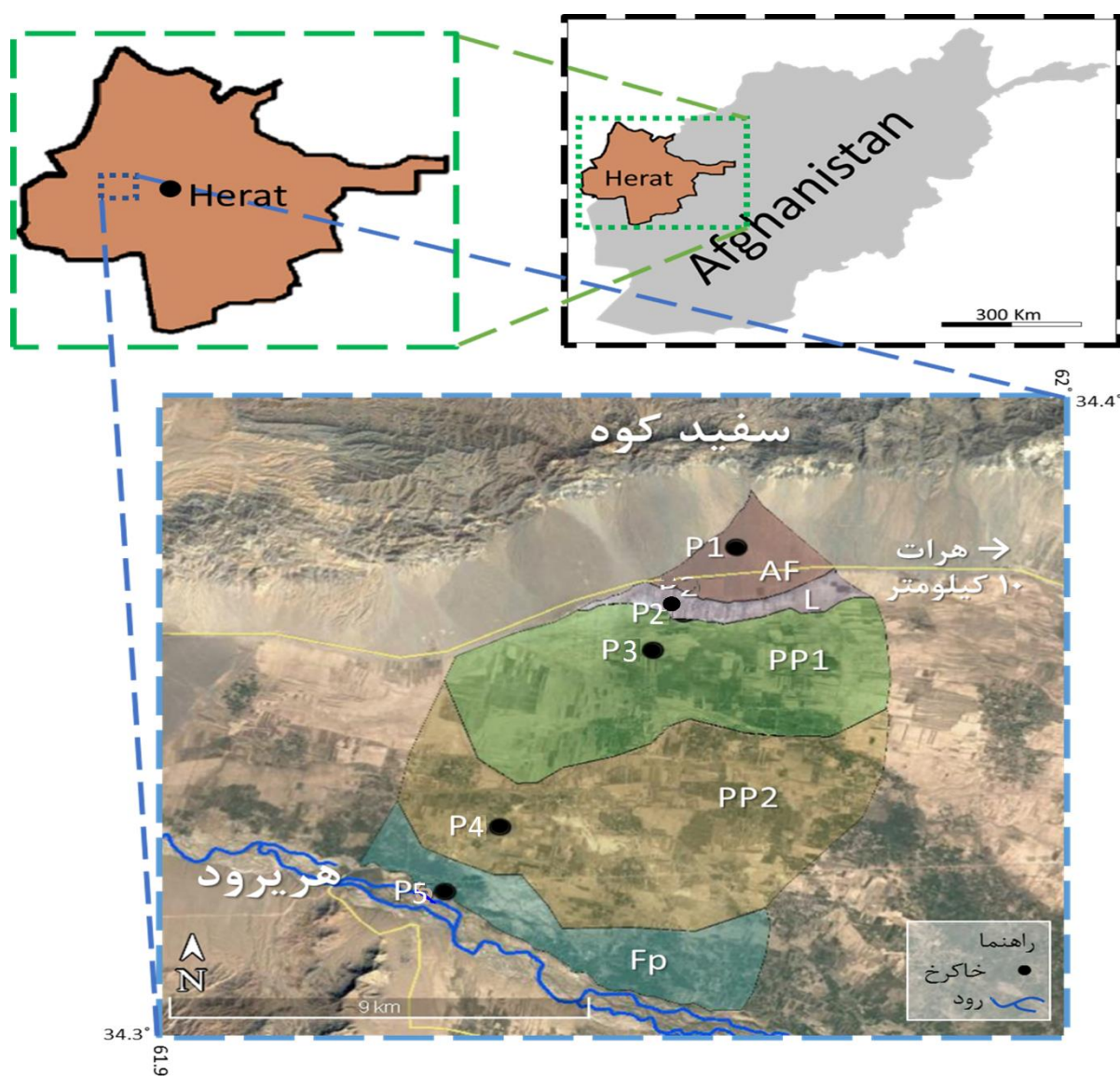
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

هرات در غرب افغانستان قرار دارد. در جنوب این شهر، دشت هرات بین طول‌های جغرافیایی $33^{\circ} 25' 34''$ تا $31^{\circ} 20' 43''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ} 25' 34''$ تا $31^{\circ} 20' 43''$ شمالی قرار گرفته است. این دشت بین دامنه‌های سفیدکوه در شمال تا رودخانه هریود در جنوب منطقه قرار گرفته است (شکل ۱). بیشترین ارتفاع در منطقه مورد مطالعه ۹۱۰ متر در سفید کوه است که به ۸۷۰ متر در رودخانه هریود می‌رسد. میانگین بارندگی و دمای سالانه به ترتیب ۲۵۰ میلی‌متر و $16/1^{\circ}$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و دارای اقلیم خشک با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد می‌باشد. رژیم رطوبتی خاک‌های مورد مطالعه اریدیک و رژیم حرارتی ترمیک است.

نمونه‌برداری

برای مطالعه خاک‌ها، یک برش از مخروط افکنه در دامنه سفید کوه تا رودخانه هریود انتخاب شد که سطوح ژئومورفیک مختلف در امتداد این برش بر اساس بازدیدهای صحرایی، نقشه‌های توپوگرافی و تفسیر تصاویر گوگل‌ارث شناسایی شدند (شکل ۱). سطوح



شکل ۱- موقعیت سطوح ژئومورفیک و محل حفر خاکرخ‌ها در منطقه مورد مطالعه در غرب افغانستان؛ P1 تا P5: محل خاکرخ، AF: مخروط افکنه، L: حدواسط مخروط افکنه و دشت دامنه‌ای، PP1 و PP2: به ترتیب دشت دامنه‌ای شور و غیرشور و Fp: دشت سیلابی

Figure 1- Location of geomorphic surfaces and soil profiles in the study area in western Afghanistan; P1 to P5: soil profiles, Af: Alluvila fan, L: Alluvial fan-piedmont plain transition, PP1 and PP2: Saline and non-saline piedmont plain, Fp: Flood plain

نتایج و بحث

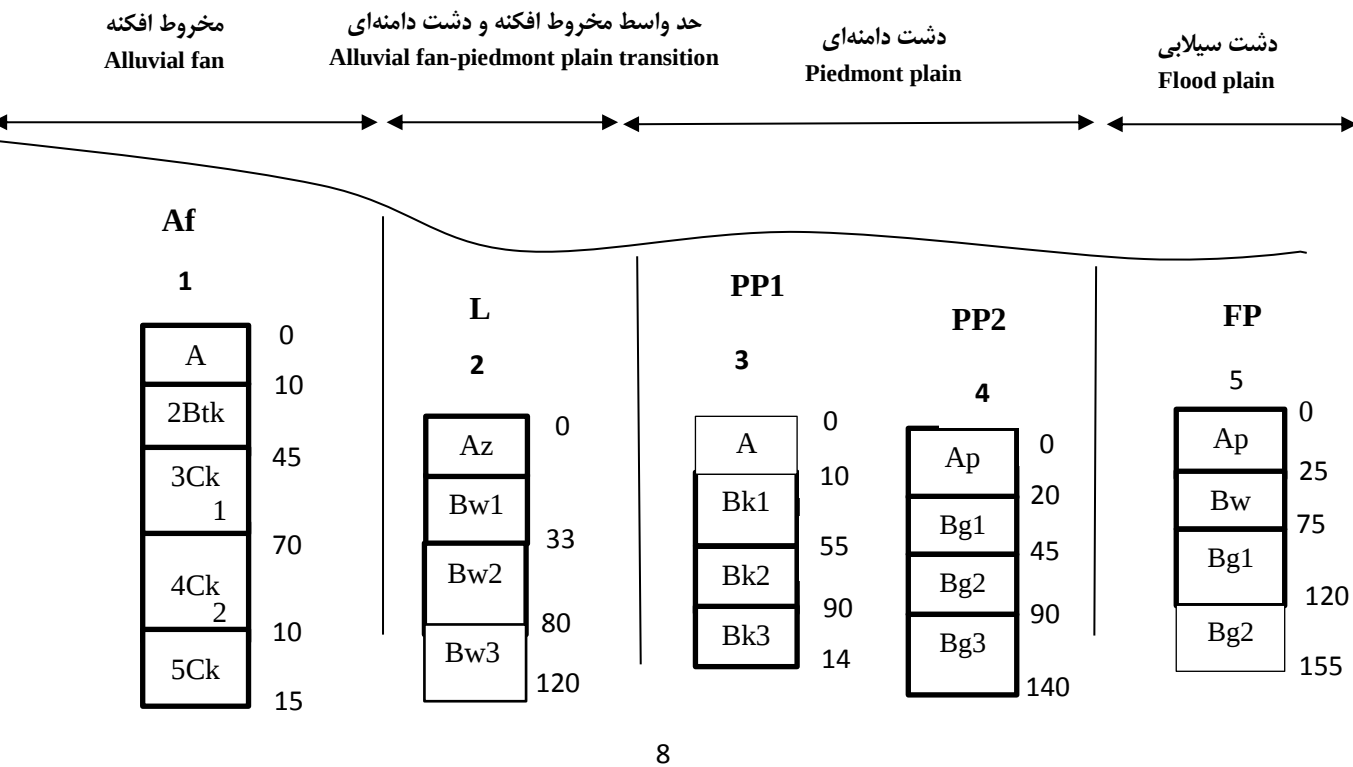
توصیف خاک‌ها

شکل ۲ سطوح ژئومورفیک، موقعیت خاکرخ‌ها و توالی افق‌ها در هر خاکرخ را نشان می‌دهد. در خاکرخ شماره ۱ بر اساس شواهد صحرایی و میکرومورفولوژی یک افق آرجیلیک-کلسیک (Btk) در زیر افق سطحی A مشاهده شد که متکامل‌ترین افق در خاک‌های مورد مطالعه است. رنگ این افق قهوه‌ای (7.5YR 5/4) است که در

نواحی خشک، به دلیل شرایط هوازدگی در زمان تشکیل این افق، رنگ خاک به سمت قرمز یا قهوه‌ای متمایل می‌شود. قرمز شدن خاک در مقایسه با مواد مادری نشانه‌ای از تکامل خاک است و هرچه درجه قرمزی بیشتر باشد هوازدگی و تکامل افق‌ها بیشتر است (۱)، (۴ و ۲۴). در زیر افق 2Btk لایه‌های بدون تکامل قرار گرفته‌اند که تفاوت در مقدار سنگریزه (جدول ۱)، تفاوت در شکل سنگریزه‌ها و همچنین، لایه‌بندی مشخص حاصل از تناوب رسوبگذاری، به عنوان انقطاع سنگی شناسایی شدند. در این لایه‌ها، کربنات‌ها به شکل

در زمان تشکیل افق آرجیلیک در این خاک‌ها، منطقه مورد مطالعه پایدار بوده است و پایداری مورفولوژیکی منطقه همراه با سایر شرایط مساعد برای جا به جای رس در طول خاکرخ (مانند اقلیم مرطوب) منجر به تشکیل افق آرجیلیک در این منطقه شده است.

پندانت در زیر سنگریزه‌ها مشاهده شدند و به همین دلیل از علامت k برای نشان دادن این تجمع استفاده شد. به اعتقاد خرمالی و همکاران (۲۵) وجود یک افق آرجیلیک در مواد مادری آهکی در آب و هوای نیمه‌خشک می‌تواند به یک فرآیند قدیمی در شرایط ژئومورفولوژیک پایدار اشاره نماید. بنابراین، می‌توان اظهار داشت که



شکل ۲- نمایش شماتیک از موقعیت خاکرخ‌ها و ترتیب و توالی افق‌ها در سطوح ژئومورفیک مختلف (ضخامت لایه‌ها بر حسب سانتی متر است)
Figure 2- Schematic representation of soil profiles locations and horizons in geomorphic surfaces (The thickness of the layers is in centimeter)

بر متر می‌رسد.

دشت دامنه‌ای، اراضی با شیب کم تا مسطح با خاک‌های عمیق، بافت سنگین و بدون سنگریزه هستند که براساس میزان هدایت الکتریکی به دو سطح ژئومورفیک شور و غیرشور تقسیم شد. سطح ژئومورفیک شور که با فاصله کمی از منطقه پست قرار دارد تحت تأثیر رواناب‌های منتقل شده از مخروط افکنه شور شده است؛ به‌طوری که سله‌های نمکی تشکیل شده در سطح خاک مشاهده می‌شود. در سطح ژئومورفیک غیرشور دشت دامنه‌ای به دلیل گود افتادگی منطقه و سرازیر شدن هرز آب‌ها از اطراف به این اراضی طی فصول پر باران سال، شرایط احیایی اشباع از سطح به‌صورت دوره‌ای ایجاد شده است.

سطح ژئومورفیک حدواسط مخروط افکنه- دشت دامنه‌ای به صورت یک نوار باریک بین مخروط افکنه و دشت دامنه‌ای قرار گرفته است و حالت مقعر دارد، که باعث ایجاد شرایط غرقابی در ماه‌های مرطوب سال می‌شود. خاکرخ ۲ در این سطح قرار دارد که افق‌های زیر افق Az، فقط بر اساس استحکام به افق‌های Bw1 تا Bw3 تقسیم شدند (شکل ۲). سیلت بخش غالب ذرات را در این خاکرخ را تشکیل می‌دهد و فاقد سنگریزه است (جدول ۱). آب وارده از اراضی مخروط افکنه، بالا بودن سطح آب زیرزمینی (در فاصله ۲ متری از سطح زمین) و تبخیر و تعرق باعث تجمع املاح در قسمت‌های سطحی این خاکرخ شده است؛ به‌طوری که سطوح پف کرده نمکی به صورت سله در سطح خاک به وضوح قابل مشاهده است. EC در افق سطحی، ۴۰ دسی‌زیمنس بر متر است که در لایه‌های زیرین به شدت کاهش پیدا می‌کند و به ۱/۵ دسی‌زیمنس

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مورفولوژیکی خاک‌های مورد مطالعه
Table 1- Some physical, chemical and morphological properties of the studied soils

افق Horizon	عمق Depth	رنگ خشک Dry color	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	سنگریزه Gravel	کربنات کلسیم معادل CCE	کربن آلی خاک SOC	هدایت الکتریکی EC	بافت خاک Soil texture	اسیدیته pH
(cm)		%						(dSm ⁻¹)			
Pedin 1, Alluvial fan, Typic Calciargids خاکرس شماره ۱، انتهای مخروط افکنه											
A	0-10	7.5YR 5/4	15	8	77	54	14	0.3	1.8	LS	7.3
2Btk	10-45	7.5YR 5/4	19	5.5	75.5	45	15	0.6	2	LS	7.3
3Ck1	45-70	10YR 6/3	12.4	22.9	64.7	66	13.2	0.4	3.8	SL	7.9
4Ck2	0-100	10YR 6/3	15.7	42	42.3	73	13.2	0.5	3.3	L	7.7
5Ck3	100-150	10YR 6/3	15	45	40	62	13	0.3	3.2	L	7.8
Pedin 2, Alluvial fan-piedmont plain transition, Typic Haplocambids خاکرس شماره ۲، حدواسط مخروط افکنه-دشت دامنه‌ای											
Az	0-8	7.5YR 5/2	15.7	25.3	59	-	13.2	1.7	40	LS	8.5
Bw1	8-33	7.5YR7/2	32.4	51.9	15.7	-	16.4	1.2	2.8	SiCL	8.1
Bw2	33-80	7.5YR7/2	12	72	16	-	15.1	1.1	2	SiL	8.1
Bw3	80-120	7.5YR7/2	12.5	72	14.5	-	13.5	1	1.5	SiL	8
Pedin 3, Saline piedmont plain, Aquic Haplocambids خاکرس شماره ۳، دشت دامنه‌ای شور											
A	0-10	5YR 5/3	15.6	68.8	15.7	-	15.6	1.7	49	SiL	8.6
Bk1	10-55	5YR 5/3	12.3	65.4	22.3	-	13	1.2	15.8	SiL	8.3
Bk2	55-90	5YR 5/3	12.3	72	15.7	-	15.1	1.5	10	SiL	8.1
Bk3	90-145	5YR 5/3	14	71.5	14.5	-	14.1	1.1	8.3	SiL	8
Pedin 4, Non-saline piedmont plain, Typic Aquicambids خاکرس شماره ۴، دشت دامنه‌ای غیرشور											
Ap	0-20	7.5YR 6/2	52.3	32	15.7	-	16.6	1.8	1.4	C	7.7
Bg1	20-45	10YR 6/1	52.3	35.3	12.3	-	16.6	0.8	1.1	C	7.7
Bg2	45-90	2.5YR 6/2	45.7	32	22.3	-	16.6	0.4	1.2	C	8.1
Bg3	90-140	7.5YR 7/2	35.7	45.3	19	-	16.5	0.6	1	SiCL	8.2
Pedin 5, Flood plain, Typic Aquicambids خاکرس شماره ۵، دشت سیلابی											
Ap	0-25	7.5YR 6/2	16	44	40	-	13	1	1.2	L	7.9
Bw	25-75	2.5YR 6/4	19	42	39	-	15.6	0.8	1.3	L	8.1
Bg1	75-120	2.5YR 6/4	20	39	41	-	12	0.5	1	L	7.1
Bg2	120-155	2.5YR 6/5	17.5	37	38	5	13.5	0.4	1	L	8

منقوط‌های به رنگ خاکستری و آبی روشن مشاهده می‌شود. وجود رگه‌های با رنگ قرمز در افق‌های سفید و آبی رنگ این خاک‌خ نشانه‌ای از تناوب شرایط اکسیداسیون و احیا است.

آخرین سطح دشت سیلابی رودخانه هریود است و رسوبات آن عمدتاً توسط این رودخانه تامین می‌شود. اراضی این منطقه جز اراضی حاصلخیز کشاورزی محسوب می‌شود. توسعه، تکامل و خصوصیات مورفولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی این خاک‌ها به شدت تحت تأثیر شرایط خشک و مرطوب در اثر نوسانات آب زیرزمینی و همچنین فاصله از رودخانه هریود است. خاک‌خ ۵ در این واحد، تحت تأثیر اشباع از آب زیرزمینی قرار داشت. لایه‌بندی در این خاک‌خ نشان‌دهنده تناوب رسوبگذاری رودخانه‌ای است و در عمق ۱۳۰ سانتی‌متری این خاک‌خ رسوبات درشت در اندازه سنگریزه در خاک دیده می‌شود. با افزایش عمق و ایجاد شرایط نامناسب زهکشی زمینه خاک به رنگ خاکستری تیره مایل به سیاه تبدیل می‌شود که حاکی از شرایط احیایی در این منطقه است. به علت تناوب دوره‌های خشک و مرطوب در طول سال، افق (Bg1) این خاک‌خ مملو از

خاک‌خ شماره ۳ بر روی سطح ژئومورفیک شور دشت دامنه‌ای قرار دارد (شکل ۱). هدایت الکتریکی در افق سطحی تا ۴۹ دسی‌زیمنس بر متر است که با افزایش عمق از مقدار آن کاسته می‌شود و در افق Bk3 به ۸/۳ دسی‌زیمنس بر متر می‌رسد (جدول ۱). هیچ یک از افق‌ها بر اساس کلید شناسایی خاک (۳۵) شرایط تشکیل افق سالیک را نداشتند. در این خاک‌خ کربنات‌های ثانویه به صورت رشته‌های نازک مشاهده شدند ولی نظر به این که مقدار کربنات کلسیم معادل کمتر از ۱۵ درصد بود و همچنین کربنات ثانویه مشاهده شده در مقیاس ماکرومورفولوژی به کمتر از ۵ درصد می‌رسید. لذا افق کلسیک شناسایی نشد.

خاک‌خ شماره ۴ روی سطح ژئومورفیک غیرشور دشت دامنه‌ای قرار دارد و EC در همه افق‌ها حدود ۱ دسی‌زیمنس بر متر است. تکامل در این خاک‌خ، ناشی از ساختمان و ایجاد رنگ‌دانه ناشی از نوسان سطح آب در خاک محدود شده است. در همه افق‌ها، به دلیل بالا بود سفره آب زیرزمینی شرایط اکسید و احیا دیده می‌شود. در افق‌های تحتانی Bg2 و Bg3 شرایط اکسید و احیایی به صورت

منقوطه‌های قرمز رنگ اکسید آهن است. به نظر می‌رسد در منطقه تحتانی خاکرخ، افق (Bg2) جایی که رنگ خاک خاکستری تیره است شرایط احیایی حاکم است و در افق (Bg1) که به سطح خاک نزدیک‌تر است به دلیل وجود اکسیژن کافی شرایط اکسیدی فراهم شده و آهن رسوب کرده است.

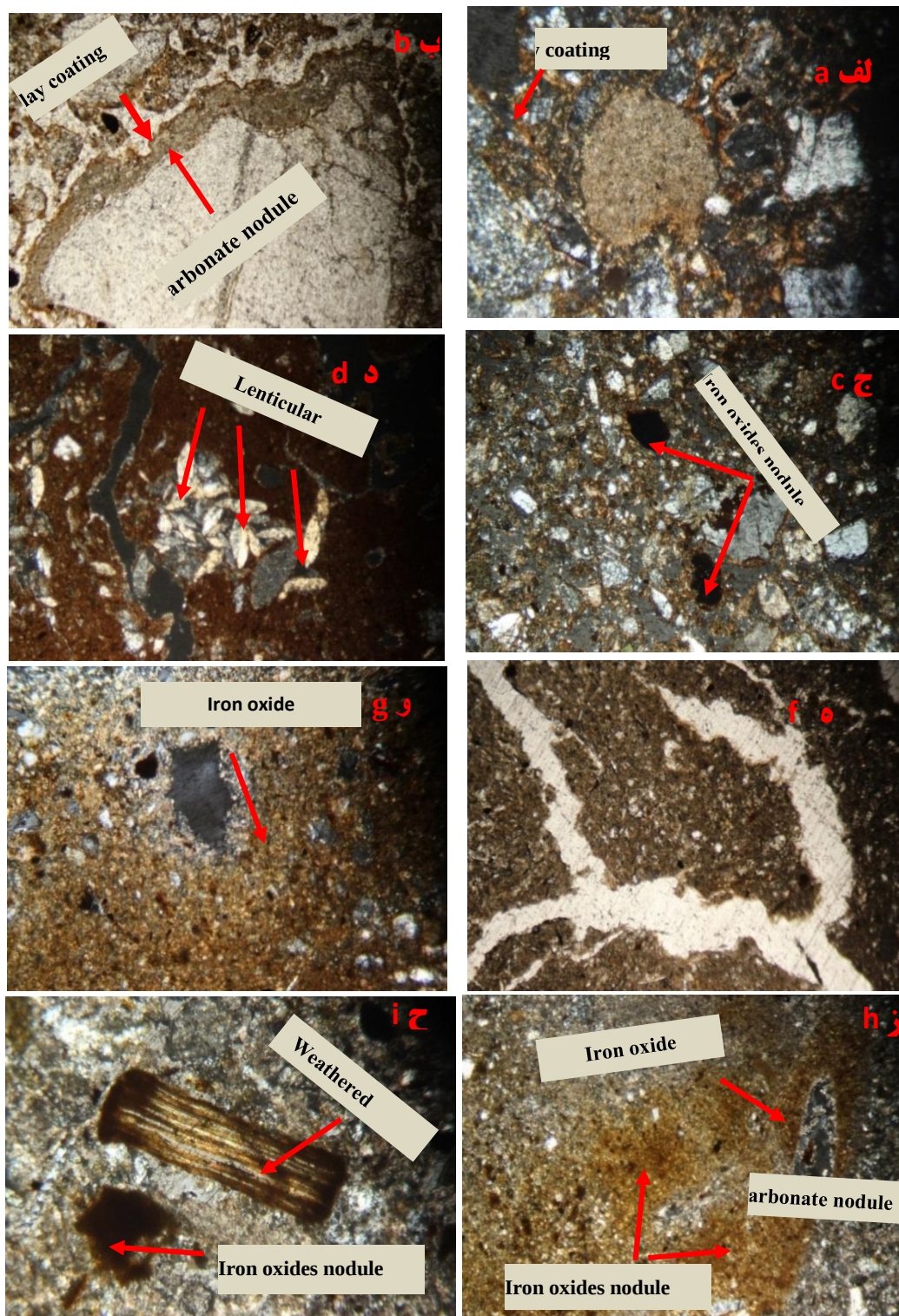
میکرومورفولوژی

در مطالعه مقاطع نازک، خاکرخ‌های مورد مطالعه، پوشش‌های رسی روی نودول‌های کربنات کلسیم افق آرچلیک (Btk) در خاکرخ شماره ۱ واقع در سطح ژئومورفیک مخروط افکنه مشاهده شد (شکل ۳ الف). وجود پوشش‌های رسی روی نودول‌های کربنات‌ها نشان دهنده این مطلب است که ابتدا تجمع کربنات‌ها در این افق صورت گرفته و به دنبال آن رس‌ها طی دوره‌های مرطوب از افق‌های بالایی به افق تحتانی انتقال یافته و به صورت پوششی اطراف نودول‌های کربنات قرار گرفته است. توالی پوشش رس و کربنات‌ها روی ذرات درشت (شکل ۳ ب) نشان دهنده پلی‌ژنتیک بودن این خاک است (۱۶ و ۳۸). وجود دوره‌های خشک نیز به عنوان عامل کلیدی برای تجمع رس گزارش گردیده است به این صورت که دوره‌های خشک، این امکان را فراهم می‌آورند تا رس انتقال یافته نگهداری شود (۱۱). در افق Btk این خاکرخ علاوه بر تجمع کربنات‌های ثانویه و پوسته‌های رسی، نودول‌های آهن از دیگر پدیده‌های خاک‌سازی د است که می‌تواند به دلیل آزاد شدن آهن و رسوب به صورت اکسیدهای آهن در زمان تشکیل افق آرچلیک

باشد (شکل ۳ ج).

در خاکرخ شماره ۳ که روی سطح ژئومورفیک شور دشت دامنه ای قرار دارد بلورهای ریز گچ به صورت عدسی شکل مشاهده گردید (شکل ۳ د). بلورهای گچ عدسی شکل، عمدتاً از نوع گوشه‌دار (II-hedral) است که می‌تواند نشان‌دهنده تشکیل در جای آنها باشد. فرم عدسی‌شکل گوشه‌دار فراوان‌ترین شکل بلورهای گچ در مناطق خشک و نیمه خشک است (۸). به‌طور کلی دمای زیاد در مناطق پست، همراه با بافت ریز خاک و کمبود سنگریزه، از عوامل تأثیرگذار در تشکیل بلورهای گچ سوزنی و عدسی شکل می‌باشد (۱۳). اولیایی و ابطحی (۲۹) بیان نمودند، فوق اشباع بودن محلول خاک از سولفات کلسیم در حفرات کوچک خاک به مدت طولانی، موجب رشد بلورهای عدسی شکل گچ می‌شود.

در خاکرخ شماره ۴ واقع در سطح ژئومورفیک غیرشور، ساختمان بلوکی شکل مشاهده گردید. (شکل ۳ ه). در افق Bg1 خاکرخ شماره ۵ در دشت سیلابی، علاوه بر نودول‌های آهن، کوتینگ، هاپیوکوتینگ و کواسی کوتینگ اکسیدهای آهن در اطراف حفرات به چشم می‌خورد (شکل ۳ و و ز). موقعیت نودول اکسید آهن که به فاصله کمی از حفرات قرار دارد می‌تواند نشانگر شرایط احیایی‌تر در فضای خلل و فرج و شرایط اکسیدی‌تر در ماتریکس خاک باشد؛ بنابراین اکسیدهای محلول با حرکت به ماتریکس خاک و برخورد با شرایط اکسید، به صورت نامحلول درآمده و به صورت نودول رسوب و تجمع پیدا کرده‌اند. شکل ۳ ح، بیوتیت هواپدیده شده را به صورت لایه لایه در این افق نشان می‌دهد.



شکل ۳- الف) پوشش‌های رسی بر روی نودول کربنات‌ها و ب) توالی پوشش رسی و کربنات‌ها بر روی ذرات درشت و ج) نودول‌های اکسید آهن در افق Btk خاکرخ ۱ در نور XPL، د) در نور XPL، د) پرشدگی ناقص حفرات توسط بلورهای عدسی شکل گچ در افق Bk1 خاکرخ شماره ۳ در نور XPL، ه) ساختمان بلوکی زاویه دار در افق Bg1 خاکرخ شماره ۴. نور XPL، ز و ح) هیپوکوتینگ و پوشش اکسید آهن و ح) بیوتیت هوا دیده در افق Bg1 خاکرخ شماره ۵

Figure 3- a) Clay coating on carbonate nodule, b) sequence of clay and carbonate coating on coarse fragment and c) iron oxides nodule in Btk horizon of pedon 1 (XPL), d) incomplete infilling of lenticular gypsum in Bk1 horizon of pedon 3 (XPL), e) subangular blocky microstructure in Bg1 of pedon 4, (XPL), g and h) hypocoating and coating of iron oxides and h) weathered biotite in Bg1 of pedon 5 (XPL)

کانی شناسی خاکها

پراش نگاشت بخش رس افق 2Btk خاکرخ شماره ۱ واقع در سطح ژئومورفیک مخروط افکنه در شکل ۴ الف نشان داده است. قله ۱۴/۱۹ آنگستروم در تیمار اشباع با منیزیم (Mgsat) که بخشی از آن در تیمار اشباع با منیزیم با اتیلن گلیکول (Eg Mg) به قله ۱۷/۶۵ آنگستروم منتقل شده و در تیمار K550 حذف و به شدت ۱۰ آنگستروم اضافه شده است دلیلی بر وجود اسمکتیت است. قله ۲۵/۹۵ آنگستروم در تیمار منیزیم اتیلن گلیکول در این نمونه دلیل بر وجود کانی مختلط میکا- کلریت است. قله های ۷/۱، ۴/۷۶ و ۳/۵۴ به ترتیب رده های دوم، سوم و چهارم کلریت را تشکیل می دهند. قله های ۷/۱ و ۳/۵۴ در تیمار Mg-sat مربوط به رده های اول و دوم کانی کائولینیت است که با رده های دوم و چهارم کلریت هم پوشانی دارند. حذف قله ۷/۱ آنگستروم در تیمار K550 نیز دلیلی بر وجود کائولینیت است. با توجه به نبود شرایط لازم برای تشکیل این کانی در خاک های خشک منطقه مورد مطالعه، می توان نتیجه گیری کرد که این کانی از مواد مادری به ارث رسیده است که در مطالعات انجام شده در مناطق خشک ایران به آن اشاره شده است (۱۳، ۲۴ و ۹).

قله های ۱۰/۳۷ و ۶/۲۹ آنگستروم در این نمونه وجود کانی پالیگورسکیت را نشان می دهد. پالیگورسکیت یک کانی معمول در افق های کلسیک در مناطق خشک ایران است. دلیل آن را به کاهش نسبت Ca/Mg در اثر رسوب کربنات کلسیم ربط می دهند که شرایط را برای تشکیل این کانی فراهم می کند (۱۳ و ۲۴). بوزوا و همکاران (۶) کانی های رسی فیبری در افق های کلسیک و پتروکلسیک را در شمال شرقی پاتاگونیا گزارش کردند.

در افق Bw خاکرخ شماره ۲ واقع در سطح ژئومورفیک حد واسط مخروط افکنه و دشت دامنه ای کانی های میکا، کلریت و کمی اسمکتیت مشاهده شد (۴ ب). پراش نگاشت افق Bk خاکرخ شماره ۳ واقع در سطح ژئومورفیک شور دشت دامنه ای تقریباً مشابه خاکرخ شماره ۱ است (شکل ۴ ج) با این تفاوت که قله ۲۳/۸۵ آنگستروم در تیمار منیزیم اشباع اتیلن گلیکول مربوط به کانی مختلط ایلیت- کلریت در این خاکرخ است. همچنین، شدت زیاد قله ۱۶/۹۳ آنگستروم در تیمار Mg-Eg نشان دهنده افزایش اسمکتیت است. در این افق هم پالیگورسکیت نیز شناسایی شد.

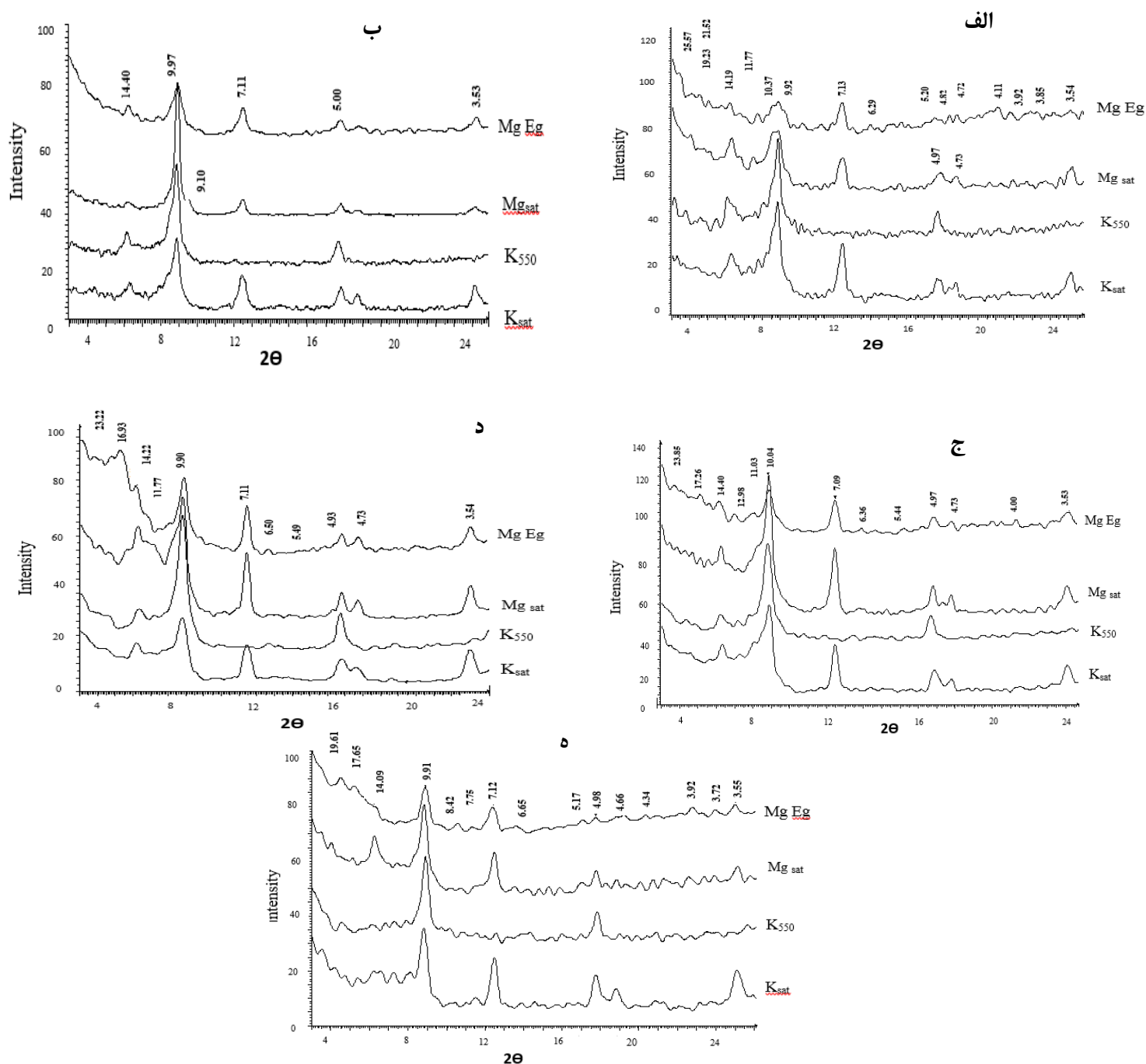
در خاکرخ شماره ۴ واقع در سطح ژئومورفیک غیر شور دشت دامنه ای که در آن، شرایط احیایی اشباع از سطح ایجاد شده است، به نظر می رسد وجود مواد آلی و رطوبت مناسب موجب تغییر و تحول کانی ها بویژه تشکیل کانی های مختلط شده است (شکل ۴ ج). کانی های کلریت، ایلیت، اسمکتیت، کائولینیت در این خاکرخ وجود دارند. اما وجود قله ۲۳/۲۲ آنگستروم مربوط به کانی مختلط کلریت-

ایلیت می باشد. قله ۱۱/۷۷ آنگستروم در تیمار پتاسیم و حرارت نشان دهنده کانی مختلط اسمکتیت- ایلیت است. از سوی دیگر شرایط لازم جهت تشکیل اسمکتیت از قبیل pH بالا و محلول خاک غنی از کاتیون های بازی در این خاکرخ مهیا گردیده است. بیرکلند (۳) معتقد است که سرعت تشکیل رس های انبساط پذیر (مانند اسمکتیت) با افزایش رطوبت زیاد شده و بیشترین میزان رس در محیط مرطوب و گرم ایجاد می شود. از این رو انتظار می رود بخشی از اسمکتیت موجود در این خاکرخ از طریق نوتشکیلی از محلول خاک حاصل شده باشد.

در خاکرخ شماره ۵ که در دشت سیلابی واقع شده است و تحت تأثیر شرایط اکسید و احیا قرار دارد نیز کانی های اسمکتیت، ایلیت، کلریت و کائولینیت شناسایی شد (شکل ۴ ه). به علت تیز بودن قله ۵ آنگستروم در این نمونه که رده دوم ایلیت را تشکیل می دهد به نظر می رسد ایلیت در این افق از نوع دی اکتاهدرال باشد (۱۲).

تشکیل و تغییر و تحول خاکها

وجود خاک های قدیمی، لایه های متناوب که نشان از انقطاع های سنگی در سطح ژئومورفیک مخروط افکنه داشت نشان دهنده مسیرهای متفاوت تغییر و تحول خاک و دوره های مختلف فرسایش و رسوب گذاری بودند. مدل ینی (۱۹) خاک را نتیجه تشکیل پنج عامل خاک سازی معرفی می کند که در زمان صفر از مواد مادری شروع می شود و به سمت نقطه تکامل خود که تحت تأثیر اقلیم و پوشش گیاهی در شرایط پایدار از نظرتوپوگرافی پیش می رود. ولی، تغییرات اقلیمی باعث تغییر در فرایندهای پدوژنیک و ژئومورفیک می شود و در نتیجه خاک، لزوماً به سمت تکامل پیش نخواهد رفت. بر اساس مدل جانسون و واتسون- استگنر (۲۰)، خاک تحت تأثیر فرایندهای پیش رونده و پس روند ممکن است به سمت تکامل یا در خلاف جهت آن حرکت کند. بنابراین، مدل جانسون و واتسون- استگنر (۲۰) برای توضیح تغییر و تحول خاک های مناسب است. مورفولوژی خاکرخ ۱ در مخروط افکنه، نشان دهنده فرایندهای پیش رونده و پس رونده تغییر و تحول خاک در تشکیل این خاک هستند. وجود لایه های با مقادیر متفاوت سنگریزه در زیر افق آرجیلیک در خاکرخ ۱، نشان دهنده دوره های فرسایش و رسوب و شرایط ناپایدار لندفرم است. تشکیل افق آرجیلیک نشان دهنده دوره ثبات و فراهم بودن شرایط اقلیمی برای فرایندهای هواپدیدی و پدوژنیک است که سبب انتقال رس شده است. پس از یک دوره ثبات، افق های سطحی در اثر فرسایش از بین رفته و باعث قرار گرفتن افق آرجیلیک- کلسیک در سطح خاک گردیده است.



شکل ۴- الف) پراش نگاشت رس افق Btk خاکرخ شماره ۱، ب) افق Bw خاکرخ شماره ۲ و ج) افق Bk خاکرخ شماره ۳، د) افق Bg1 خاکرخ شماره ۴ و ه) افق Bg1 خاکرخ شماره ۵: Mg-Sat: اشباع با منیزیم، Mg-Eg: اشباع نمونه با منیزیم و اتیلین گلیکول، K: اشباع با پتاسیم و K550: اشباع با پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سانتی گراد

Figure 4- XRD diffractograms of clay fraction of a) Btk horizon of pedon 1, b) Bw horizon of pedon 2, c) Bk horizon of Pedon 3, d) Bg1 horizon of Pedon 4 and e) Bg1 horizon of pedon 5; Mg-Sat: Mg saturated, Mg-Eg: Mg and ethylene glycol saturated, K: K saturated and K550: K saturated and heated at 550 °C

کهل (۲۳) عدم حضور افق‌های A را در خاک‌های قدیمی به فرسایش شدید در اثر تغییرات شدید اقلیمی در دوره‌های یخچالی و از

نمایانگر تغییر اقلیم تعبیر کردند.

در دشت دامنه‌ای و دشت سیلابی، به دلیل اضافه شدن رسوبات، خاک‌های فرصت تکامل زیادی نداشته‌اند و حداکثر تکامل خاک، تجمع کمی کربنات‌های ثانویه است. در مطالعات انجام شده، در ایران، معمولاً، متکامل‌ترین خاک‌ها در دامنه و در مخروط افکنه‌ها و پدیمنت است که دارای افق Btk هستند ولی در دشت‌ها حداکثر تکامل تشکیل افق Bk است (۱۵ و ۲۱). در دشت سیلابی نیز، رسوبگذاری‌های متوالی اجازه تکامل خاک را نداده است که لایه‌بندی قابل تشخیص آنها مؤید این مطلب است.

نتیجه‌گیری

بر اساس یافته‌های این مطالعه، رابطه خاک- لندفرم در دشت هرات افغانستان، مشابه تشکیل و تغییر و تحول خاک با مناطق خشک ایران است. بر اساس ویژگی‌های مورفولوژیکی و میکرومورفولوژیکی، در مخروط افکنه منطقه مورد مطالعه یک خاک قدیمی دارای افق کلسیک- آرجیلیک (Btk) شناسایی شد که در شرایط مرطوب‌تر و گرم‌تر از زمان حاضر تشکیل شده است. توالی رسوبات بدون تحول و خاک قدیمی، دلالت بر توالی رسوبگذاری و تشکیل خاک دارند. وضعیت تغییر و تحول خاک در مخروط افکنه در جنوب هرات، مشابه با مناطق مرکزی، شرقی و شمال شرقی ایران است که افق کلسیک-آرجیلیک (Btk) که باقیمانده یک خاک قدیمی است به صورت مدفون در زیر لایه‌های رسوبی جدید شناسایی شد. در دشت دامنه‌ای و دشت سیلابی به دلیل رسوبگذاری‌های متوالی، خاک‌ها تکامل زیادی ندارند و مهم‌ترین فرآیند پدوژنیک، انتقال کربنات‌ها است. همچنین، انتقال آب از ارتفاعات و تجمع آنها در مناطق پست باعث ایجاد شرایط احیایی و شور شدن خاک شده است.

دست رفتن این افق‌های نسبت می‌دهد. کریمی و همکاران (۲۲) در مطالعات خود روی لس‌های جنوب مشهد به این نتیجه رسیدند که پس از یک دوره مناسب خاک‌سازی در آخرین دوره بین یخچالی، بخش سطحی خاک قدیمی و حتی بخشی از افق آرجیلیک در این منطقه در اثر فرسایش از بین رفته است.

تشکیل افق آرجیلیک در خاک‌های این منطقه با توجه به اقلیم کنونی (مقدار کم بارندگی، ۲۵۰ میلی‌متر) منطقه امکان پذیر نمی‌باشد و در یک اقلیم مرطوب‌تر در گذشته که رطوبت کافی و شرایط برای پراکنش و حرکت رس مهیا بوده است تشکیل شده است. بنابراین، افق‌های آرجیلیک در این منطقه یک عارضه باقی مانده از اقلیم‌های مرطوب‌تر گذشته هستند. غفارپور (۱۴) براساس نتایج مطالعه پذیرفتاری مغناطیسی افق آرجیلیک تشکیل شده در منطقه مبارک آباد با توسعه یافتگی بالا و ضخامت زیاد (۱۶۰ سانتی‌متر) بیان نمود که احتمالاً میزان متوسط سالیانه بارندگی در زمان تشکیل این افق بیش از ۱۲۰۰ میلی‌متر بوده است. این موضوع توسط عبدالخالق ابراهیم (۱) و بوخیم و هارتمنگ (۴) نیز گزارش شده است. شانکر و همکاران (۳۴) وتانر (۳۷) نیز اظهار داشتند برای انتقال کربنات‌ها و تشکیل افق کلسیک حد اقل ۴۰۰ میلی‌متر بارندگی لازم است. کربنات‌های لیتوژنیک در شرایط موجود رطوبتی خاک و فشار جزیی نسبتاً زیاد دی‌اکسید کربن خاک حل گردیده و یون‌های کلسیم، منیزیم و کربنات همراه با آب نفوذی به سمت پایین حرکت نموده و با کاهش رطوبت خاک رسوب می‌نمایند که تکرار این اعمال در سالیان دراز سبب تشکیل افق کلسیک گردیده است. تجمع رس و کربنات در افق آرجیلیک- کلسیک به صورت توأم، نشان دهنده پلی ژنتیک بودن خاک است. کریمی و همکاران (۲۲) نیز تجمع کربنات‌ها در رسوبات لسی مناطق خشک شمال شرق ایران را در زمان‌های از هولوسن که اقلیم مرطوب‌تر از زمان حاضر بوده است نسبت دادند. کارلستون و همکاران (۱۰) یک افق کلسیک محتوی رس انتقال یافته معمولاً را

منابع

- 1- Abdelkhalik Ibrahim M.A. 2011. Argillic horizons and clay-sized particles - an alternative interpretation of their dynamics in sola development and across catenas. Ph.D. Thesis, Iowa State University, 127p.
- 2- Bayat O., Karimzadeh H.R., Karimi A., Eghbal M.K., and Khademi H. 2013. Pedogeomorphic evolution of an alluvial fan in central Iran. Journal of Rane and Watershed Management, 66: 192-206.
- 3- Birkeland P.W. 1999. Soils and Geomorphology, 3rd edition. Oxford University Press, New York.
- 4- Bockheim J.G., and Hartemink A.E. 2013. Distribution and classification of soils with clay-enriched horizons in the USA, Geoderma, 209-210: 153-160.
- 5- Boixadera J., Poch R.M., Garcia-Gonzalez M.T., and Vizcayno C. 2003. Hydromorphic and clay-related processes in soils from the Llanosde Moxos (Northern Bolivia), Catena 54: 403-424.
- 6- Bouza P.J., Simon M., Aguilar J., del Valle H., and Rostagno M. 2007. Fibrus-clay mineral formation and soil evolution in Aridisols of northeastern Patagonia, Argentina, Geoderma, 139: 38-50.
- 7- Buck B. J., and Van Hoesen J. G. 2002. Snowball morphology and SEM analysis of pedogenic gypsum. Southern New Mexico. USA, Journal of Arid Environments, 51: 469-487.
- 8- Chapman H.D. 1965. Cation exchange capacity. In Methods of Soil Analysis. Part 2. Black, C. A. (ed.). American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

- 9- Chorom M., Baghernejad M., and Jafari S. 2009. Influence of rotation cropping and sugarcane production on the clay mineral assemblage, *Applied Clay Science*, 385-395.
- 10- Christenson G.E., and Purcell C. 1985. Correlation and age of Quaternary alluvial fan sequences. Basin and Range province. Southwestern United States. in: Weide D.I., Faber M.L., (Eds.), *Soils and Quaternary geology of the Southwestern United States*. Geological Society of America Boulder, pp. 115-121.
- 11- Day P. 1965. Particle fractionation and particle-size Analysis. In *Methods of Soil Analysis*, Part 1 edition, Black, C.A. American Society of Agronomy, Madison, WI. Pp: 545-567.
- 12- Dixon J.B., and Schuzele D. 2002. *Soil mineralogy with environmental applications*. Soil sciencesociety of America, Madison, Wisconsin. USA.
- 13- 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.
- 14- Ghafarpour A., Khormali F., Balsam W., Karimi A., and Ayoubi Sh. 2016. Climatic interpretation of loess-paleosol sequences at Mobarakabad and Aghband, Northern Iran, *Quaternary Research*, 86: 95-109.
- 15- Ghasemzadeh Ganjehie M., Karimi A., Zeinadini A., and Khorassani R. 2017. Investigation of clay mineralogy, micromorphology and evolution of soils in Bajestan playa. *Journal of Water and Soil*, 30: 2046-2059.
- 16- Gunal H., and Ransom M.D. 2006. Clay illuviation and calcium carbonate accumulation along a precipitation gradient in Kansas. *Geoderma*, 68: 59-69.
- 17- Harvey A.M., Mather A.E., and Stokes M. 2005. Alluvial fans geomorphology, sedimentology, dynamics-introduction. A review of alluvial-fan research. in: Harvey, A. M. Mather A. E. and Stokes, M. (Eds.), *Alluvial Fans Geomorphology, Sedimentology and Dynamics*. Geological Society of London, pp. 1-7.
- 18- Irannejad M., and Farpoor M.H. 2012. Genesis, clay mineralogy, and micromorphology of paleosols located on Givdary alluvial fan, Rafsanjan. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 19: 761-772.
- 19- Jenny H. 1941. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill, New York.
- 20- Johnson D.L., and Watson-Stegner D. 1987. Evolution model of pedogenesis. *Journal of Soil Science*, 143: 349-366.
- 21- Karimi A., Esfandiarpour I., and Ghasemzadeh Ganjehie M. 2017. Description of soil evolution in southern Mashhad city using the conceptual models of Jenny, and Johnson and Watson-Stegner. *Pedosphere*, In Press.
- 22- Karimi A., Frechen M., Khademi H., Kehl M., and Jalalian A. 2011. Chronostratigraphy of loess deposits in northeast Iran, *Quaternary International*, 234: 124-132.
- 23- Kehl M. 2010. Loess, loess-like sediments, soils and climate change in Iran, *Relief, Boden, Paläoklima*, 208p.
- 24- Khademi H., and Mermut A.R. 1998. Source of palygorskite in gypsiferous Aridisols and associated sediments from central Iran, *Clay Minerals*, 33: 561-578.
- 25- Khormali F., Abtahi A., Mahmoodi S., and Stoops G. 2003. Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semi-arid regions of southern Iran, *Catena*, 53: 273-301.
- 26- Kittrick J.A., and Hope E.W. 1963. A procedure for particle size separation of soils for x-ray diffraction. *Journal of Soil Sciences*, 35: 621-629.
- 27- Mehra O.P., and Jackson M.L. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite citrate system with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 7: 317-327.
- 28- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total Carbon, Organic matter. In: A.L. Page et al. (Ed.), *Method of Soil Analysis*. Part 2. 2 nd ed., Agron. Monger. No. 9. ASA and SSSA. Madison, WI. 539-577.
- 29- Owliaie H.R., Abtahi A., and Heck R.J. 2006. Pedogenesis and clay mineralogical investigation of soils formed on gypsiferous and calcareous materials, on transect southwestern Iran. *Geoderma*, 134: 62-81.
- 30- Page S.E., Wust R.A.J., Wriess D., Rieley J.O., Shotyk W., and Limins S. 2004. A Record of Late Pleistocene and Holocene carbon accumulation and implication for past, present and future carbon dynamics. *Journal of Quaternary Science*, 19: 625-635.
- 31- Pope R., Wilkinson K., Skourtsos E., Triantaphyllou M., and Ferrier G. 2008. Clarifying stages of alluvial fan evolution along the Sfakian piedmont, Southern Crete: New evidence from analysis *Advance, Soil Science*, 1: 172-200.
- 32- Sanjari S., Farpoor M.H., Karimian Eghbal M., and Esfandiarpour Borojeni I. 2011. Genesis, micromorphology and clay mineralogy of soils located on different geomorphic surface in Jiroft area. *Journal of Soil and Water (Agricultural Science and Technology)*, 25: 411-425.
- 33- Schaetzl R.J., and Thompson M L. 2015. *Soils Genesis and Geomorphology*. 2nd edition, Cambridge University Press, New York. Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. USDA. SCS. Agric. U.S. Gov. Print office. Washington. D.C. 362p.
- 34- Shankar N., and Achyuthan H. 2007. Genesis of calcic and petrocalcic horizons from Combatore, Tamil Nadu: Micromorphology and geochemical studies. *Quaternary International*, 175: 140-154.
- 35- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. USDA. SCS. Agric. U.S. Gov. Print office. Washington. D.C. 362p.
- 36- Stoops G. 2003. *Guidelines for the Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*. Soil Science

Society of America Journal, Madison, 182p.

- 37- Tanner L.H. 2010. Continental Carbonates as Indicators of Paleoclimate. In: D. M. Deocampo. Chapter 1 The Geochemistry of Continental Carbonates. Elsevier, 62: 1-59.
- 38- Ufnar D.F. 2007. Clay coatings from a modern soil chronosequence: A tool for estimating the relative age of well drained paleosols. Geoderma, 141: 181-200.



Investigation of the Soil-Landform Relationship in South of Herat, Western Afghanistan

F. Mahmoudian¹ - A. Karimi^{2*} - A. Lakzian³

Received: 04-12-2017

Accepted: 30-07-2018

Introduction: The soils developed in the context of the landforms and they evolve under influence of similar factors. Therefore, the identification of soil-landform relationship is the first step for the soil survey, pedology and paleopedology and geomorphology researches. Afghanistan is located between arid environments of Iran and cold and humid highlands of Himalaya. Due to special social and political conditions, little information existed on the soils of Afghanistan. Alluvial fans are the common land forms in arid environments which usually are archive of soil formation and sedimentation periods in the past. Landform assemblage in southern Herat (alluvial fans to piedmont plain and flood plain), could provide suitable information on the soil landform relationship in arid areas of Afghanistan. This study was the first pedology research in Afganistan. The objectives of this research was to identify the soils along a transect from alluvial fan to flood plain of Hariroud River, determine the clay mineralogy and micromorphological features of the soils and finally determine the soil evolution in the study area.

Material and Methods: The study area located in southern Herat between longitudes of 34° 20' 21" to 34° 25' 33" E and latitudes of 43° 20' 21" to 43° 25' 33" N. The mean annual precipitation and temperature of the study area are 250 mm and 16.1 °C. A transect from an alluvial fan from Sefidkouh Mountain to flood plain of Hariroud River were selected. The geomorphic surfaces along the studied transect were alluvial fan, alluvial fan-piedmont plain transition, saline and non-saline piedmont plain and flood plain. Five representative soil profiles along a transect of Alluvial fan, intermediate Alluvial fan- piedmont plain (lowland), piedmont plain and flood plain were described and sampled. Undisturbed samples were taken for thin section analysis and recognizing pedofeatures. The mineralogy of the clay fraction was determined using X-ray diffraction method.

Results and Discussion: Calcic-argillic (Btk) horizon was the most developed horizon which occurred in alluvial fan. Alternation of paleosol (Btk horizon) and undeveloped coarse-alluvial layers indicated alternation of soil formation and sedimentation periods in the past. Regarding the argillic horizon development conditions, the Btk is the relict features from a wetter climate in the past. Similar soils were observed in arid regions of Iran. The gleization and few secondary carbonates and salt accumulation was the pedogenic processes in other landforms. Bw horizon was common horizon in other studied soils. In Alluvial fan – piedmont plain transition geomorphic surface, due to depression in the landform, salt accumulated in the surface soil and electrical conductivity reached to 40 dS/m. However, salic horizon because of limited thickness was not identified. In non-saline piedmont plain and floodplain geomorphic surfaces, soils showed oxidizing and reducing conditions and consequently gleyic color pattern. Maximum EC (49 dS/m) was occurred in saline piedmont plain surface. The results showed that electrical conductivity values increased from alluvial fan toward lowland positions. Besides, fine soil textures were found in downward positions. The Soil Taxonomy classification of the soils were Typic Calciargids in alluvial fan, Aquic Haplocombids in alluvial fan-piedmont plain transition, non-saline piedmont plain and flood plain as well as Typic Haplocambids in saline piedmont plain. Chlorite, illite, palygorskite, smectite, and kaolinite were the main clay minerals. Chlorite and illite were inherited from parent materials. Micromorphological observations proved clay coating on carbonate nodules and coarse fractions in Btk horizon. The alternation of secondary carbonates on clay coating is the evidence of polygenetic soils and change of from wetter to drier climate. Also, iron oxides nodules in Btk horizon indicated suitable weathering conditions during clay accumulation. Lenticular gypsum was observed in the soil in saline piedmont plain geomorphic surface. Coating and hypocoating of iron oxides identified in flood plain soil. Results of this research showed the role of geomorphic processes and climate change in the soil evolution in the area.

Conclusion: The results of this study indicated the progressive and regressive processes which are preserved in the soil of alluvial fan. The Btk horizon in alluvial fan represent wetter condition than today. The morphological, mineralogical and micromorphological features of the soil in the alluvial fan were similar to

1, 2 and 3- M.Sc. Student, Associate Professor and Professor of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively

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

correspondence soil in arid environments of Iran. Continuous sedimentation in the piedmont plain and flood plain prevent the soil development in these landforms.

Keywords: Alluvial fan, Clay mineralogy, Soil evolution, Soil genesis

مدل سازی ریاضی و مقایسه تنفس ناشی از بستره در دو خاک جنگلی و کشاورزی

محسن برین^{۱*} - احسان احسان ملاح^۲ - فرخ اسدزاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

چکیده

یکی از ویژگی های مهم در ارزیابی جمعیت فعال میکروبی خاک تنفس ناشی از بستره (SIR) می باشد. این مطالعه با هدف بررسی تأثیر منبع کربن (گلوکز)، دما و دوره خواباندن در تنفس ناشی از بستره در دو خاک جنگلی و کشاورزی با استفاده از روش سطح پاسخ و بر مبنای طرح مرکب مرکزی انجام شد. بدین منظور دامنه های متفاوتی از این سه متغیر شامل مقدار گلوکز (۰/۵-۱۰ میلی گرم در گرم)، زمان خواباندن (۱۰-۱ ساعت) و دما (۳۰-۱۵ درجه سلسیوس) در نظر گرفته شده و طرح مرکب مرکزی با ۴۰ آزمایش برای دو خاک و بر اساس مقادیر کدبندی شده متغیرهای مستقل طراحی شد. نتایج نشان داد که میانگین مقدار SIR خاک جنگلی به دلیل دارا بودن ماده آلی بیشتر و جمعیت فعال میکروبی بالاتر تقریباً دو برابر خاک کشاورزی است. نتایج بیانگر کارآمدی مدل طراحی شده برای پیش بینی مقدار تنفس ناشی از بستره در دو خاک کشاورزی ($R^2 = 0/919$) و جنگلی ($R^2 = 0/823$) بود. از بین سه متغیر مورد بررسی در مدل طرح مرکب مرکزی، تأثیر خطی دما بر تنفس ناشی از بستره در هر دو خاک معنی دار بود. با این حال در خاک جنگلی مقدار بستره (گلوکز) تأثیر بسیار معنی دار و به مراتب بیشتری در مقایسه با خاک زراعی داشت که می تواند به دلیل بیشتر بودن مواد آلی قابل تجزیه در این خاک باشد.

واژه های کلیدی: تنفس خاک، جمعیت میکروبی، سطح پاسخ، کیفیت خاک

مقدمه

به تنفس خاک (که به آن تنفس پایه^۴ هم گفته می شود)، که نشان دهنده فعالیت های بیولوژیکی است اشاره کرد (۱۰ و ۱۱). تنفس پایه و یا معدنی شدن کربن آلی خاک فرآیندی است که طی آن، اکسیژن به عنوان گیرنده نهایی الکترون عمل می کند. فعالیت میکروبی خاک (شامل تنفس خاک) نقشی کلیدی در تجزیه مواد آلی خاک و همچنین بقایای افزوده شده به سطح خاک دارد (۲۷). یکی از شاخص های بسیار مهم در بررسی جمعیت فعال میکروبی خاک، تنفس برانگیخته یا تنفس ناشی از سوبسترا^۵ می باشد (۳۱). تنفس برانگیخته که میزان کربن معدنی متصاعد شده از تنفس میکروبی پس از اضافه کردن سوبسترای آسان تجزیه شونده مانند گلوکز می باشد، می تواند نشان دهنده میزان جمعیت فعال میکروبی و گاهی میزان فراهمی زیستی کربن برای هتروتروف ها باشد (۳). رسولی صدقیانی و همکاران (۲۹) بالا بودن تنفس ناشی از بستره در خاک های با کاربری جنگلی و مرتعی را نسبت به خاک های با کاربری باغی و زراعی، را به جمعیت فعال میکروبی در این خاک ها نسبت دادند. زیرا این شاخص نشان دهنده جمعیت فعال میکروبی خاک می باشد که معمولاً در کاربری های دست نخورده (جنگل و مرتع) بالاتر از زمین های تغییر کاربری یافته (باغ و زراعت) می باشد. کاهش تنفس

خاک یک سیستم زنده، پویا و پیچیده می باشد. قسمت عمده ای از این پیچیدگی را می توان به دلیل بخش زنده خاک دانست که دنیای اسرارآمیز و پیچیده ای از روابط بین موجودات و گیاه را در خود جای داده است (۲۳). به دلیل رابطه تنگاتنگ بین ساختار میکروبی با کیفیت خاک، گیاه و پایداری اکوسیستم، خصوصیات میکروبی خاک به عنوان بخشی از شاخص های سلامت خاک مطرح می باشند (۱۲ و ۱۶). به عقیده بوسی و همکاران (۵) شکی نیست که جمعیت میکروبی خاک به تغییرات محیط حساس هستند. مطالعات نشان داد که جمعیت میکروبی خاک با بهم خوردگی خاک، اصلاح خاک، روش های آبیاری، شخم و حتی نوع گیاه تغییر می کند. برخی شاخص های بیولوژیکی خاک وجود دارند که به تغییرات ایجاد شده در خاک (مانند تغییر کاربری اراضی) حساس می باشند از جمله شاخص های بیولوژیکی کیفیت خاک، که مورد ارزیابی قرار می گیرند می توان

۱، ۲ و ۳- به ترتیب استادیار، دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

(*)- نویسنده مسئول:

(Email: m.barin@urmia.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v32i5.68908

4- Basal Respiration

5- Substrate Induced Respiration

های مورد استفاده در این پژوهش از حوضه آبخیز دریاچه زریوار در استان کردستان و از دو کاربری زراعت و جنگل در مجاور همديگر برداشته شدند. یک بخش از نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی، پس از هوا خشک شدن در دمای اتاق از الک ۲ میلی متری عبور داده شدند. بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۴)، pH خاک در عصاره گل اشباع به روش پتانسیومتری (۱۹)، هدایت الکتریکی خاک (EC) در عصاره گل اشباع (۸)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش تیتراسیون (۲۶) و کربن آلی به روش والکی بلک (۲۴) تعیین شد (جدول ۱). براساس آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی معمول بر روی نمونه‌های خاک، از نظر توزیع اندازه ذرات به رغم اینکه دو کاربری در کلاس بافت جداگانه قرار گرفته‌اند، فراوانی ذرات اولیه در آن‌ها بسیار مشابه است. نمونه‌های خاک مورد استفاده شور نبوده و از نظر pH نیز در محدوده‌ی خنثی تا آهکی هستند. تفاوت اصلی در دو نمونه خاک مورد استفاده در مقدار ماده‌ی آلی آن‌ها است که در خاک جنگلی تقریباً دو برابر خاک با کاربری زراعی است. بخش دوم نمونه‌های خاک برای انجام آزمایش‌های بیولوژیکی (اندازه‌گیری تنفس ناشی از بستره یا سوبسترا) تا زمان آزمایش در یخچال نگهداری شدند. برای اندازه‌گیری تنفس ناشی از بستره از روش اندرسون و دومسج (۲) با تغییر دامنه‌ی کمی متغیرها استفاده شد.

متغیرهای مستقل مورد استفاده برای مدل‌سازی SIR در این تحقیق شامل دما و زمان خواباندن و همچنین مقدار گلوکز بود. دامنه‌ی مورد استفاده برای هر یک از این متغیرها در جدول ۱ ارائه شده است. طراحی آزمایش‌ها با ترکیب مقادیر مختلف هر یک از متغیرهای مستقل با استفاده از روش سطح پاسخ و بر مبنای طرح مرکب مرکزی انجام شد. در این روش مقدار هر یک از متغیرهای مورد نظر با استفاده از رابطه زیر کدبندی می‌شود (۱).

$$X_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta x} \quad (1)$$

در این رابطه X_i و X_0 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقدار کد شده‌ی متغیر، مقدار واقعی هر متغیر و مقدار میانگین دامنه‌ی هر متغیر است. Δx نیز مقدار تغییر گام هر پارامتر است. براساس جدول ۲ مقدار X_0 برای متغیرهای زمان خواباندن، مقدار گلوکز و دمای خواباندن به ترتیب برابر با ۵/۵ ساعت، ۵/۲۵ میلی‌گرم بر گرم و ۲۲/۵ درجه سلسیوس است. مقدار Δx نیز برای این متغیرها به ترتیب برابر با ۴/۵، ۴/۷۵ و ۷/۵ در نظر گرفته شد.

در روش سطح پاسخ از یک تابع چندجمله‌ای درجه دوم (معادله‌ی ۲) که شامل ترکیب خطی، درجه دوم و همچنین برهمکنش بین متغیرها براساس مقادیر کد شده است، برای پیش‌بینی متغیر وابسته استفاده شد.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_{0i} X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad i \neq j \quad (2)$$

ناشی از سوبسترا بر اثر تغییر کاربری اراضی نشان از کاهش جمعیت و فعالیت ریزجانداران خاک بر اثر کشت و کار طولانی مدت و کاهش ورود بقایای آلی می‌باشد (۴).

عوامل مختلفی از قبیل منبع کربن (گلوکز)، دما و دوره خواباندن در مقدار کمی تنفس ناشی از سوبسترا نقش دارند (۳۲). بنابراین بهینه‌سازی شرایط آزمایش یکی از معیارهای مهم برای تعیین تنفس ناشی از سوبسترا می‌باشد. در روش‌های معمول برای بررسی اثر عوامل مختلف بر شرایط رشد ریزجانداران‌های خاک و تنفس ناشی از سوبسترا یک عامل متغیر بوده و عوامل دیگر ثابت نگه داشته می‌شوند که این امر علاوه بر زمانبر بودن، پرهزینه نیز بوده و از سوی دیگر تضمینی برای مدل‌سازی دقیق و تشخیص شرایط کاملاً بهینه برای فعالیت متابولیکی ریزجانداران ارائه نمی‌دهد (۲۵). در این ارتباط روش‌های آماری نظیر طرح پلاکت-برمن و روش سطح پاسخ، می‌توانند ابزارهای مفیدی جهت تشخیص شرایط بهینه‌ی به‌منظور نیل به بیشینه کارایی این ریزجانداران در انجام فعالیت‌های زیستی نظیر تنفس ناشی از سوبسترا محسوب شوند (۲۸ و ۳۲).

روش‌های مذکور تکنیک‌هایی ترکیبی از روش‌های آماری و ریاضی به‌منظور طراحی آزمایش‌ها^۱ با هدف ایجاد مدل ریاضی پیش‌بینی کننده هستند که توانایی ارزیابی میزان تأثیر تعدادی عامل به-عنوان متغیرهای مستقل را بر روی یک پاسخ مطلوب به عنوان متغیر وابسته دارند (۲۲). در حقیقت در این روش‌ها از اطلاعات کمی حاصل از تعداد مناسبی از آزمایش‌ها به‌طور همزمان استفاده شده و با تلفیق آن‌ها از طریق تحلیل معادلات چندپارامتری، متغیر پاسخ، پیش‌بینی و یا بهینه‌سازی می‌گردد. روش سطح پاسخ با استفاده از طرح‌های مختلف مانند باکس-بنکن^۲ و یا طرح مرکب مرکزی^۳ انجام‌پذیر است. در سال‌های اخیر این روش‌ها به عنوان ابزارهایی توانمند در پژوهش‌های مربوط به مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند در علوم مهندسی و زیستی مورد استفاد قرار گرفته‌اند (۱ و ۲۱). بر این اساس هدف از پژوهش حاضر مدل‌سازی تأثیر منبع کربن (گلوکز)، دما و دوره خواباندن در تنفس ناشی از سوبسترا با استفاده از طرح مرکب مرکزی در دو نمونه خاک جنگلی و کشاورزی بوده و طی آن تلاش شده تا تأثیر عوامل فوق در دو خاک با کاربری متفاوت مورد مقایسه قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از دو نوع خاک، شامل خاک زراعی (با مواد آلی نسبتاً کم) و خاک جنگلی (با مواد آلی نسبتاً زیاد) استفاده شد. نمونه

1- Design of experiments (DOE)

2- Box-Behnken

3- Central composite design (CCD)

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک

Table 1- Selected physical and chemical properties of the soil samples

کاربری Land use	رس (%) Clay (%)	سیلت (%) Silt (%)	شن (%) Sand (%)	ماده آلی (%) OM (%)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) EC (dSm ⁻¹)	اسیدیته pH	کلاس بافتی Textural class
زراعت Agriculture	25	36	39	1.2	1.9	7.5	Loam
جنگل Forest	29	39	32	2.3	1.8	7.2	Clay loam

جدول ۲- دامنه مقادیر آزمایشی متغیرهای مورد استفاده در مدل‌سازی

Table 2- Range of the variables used in the modeling procedure

متغیرهای مستقل Independent variables	فاکتور X _i	دامنه و مقادیر Range and value		
		-1	0	+1
زمان (h) Time (h)	x ₁	1	5.5	10
گلوکز (mgg ⁻¹) Glucose (mgg ⁻¹)	x ₂	0.5	5.25	10
دما (°C) Temperature (°C)	x ₃	15	22.5	30

حالی که در خاک جنگلی اثر دما ($P < 0.01$) و گلوکز ($P < 0.05$) معنی‌دار بودند اما اثر زمان خواباندن بر این ویژگی غیرمعنی‌دار شد. در بخش درجه‌ی دوم معادله نیز اثر دما بر مقدار تنفس ناشی از بستره معنی‌دار شد ($P < 0.01$). نتایج جدول ۴ نشان‌دهنده‌ی این است که برهمکنش متغیرهای دما در زمان خواباندن و گلوکز در زمان خواباندن بر میزان تنفس ناشی از بستره به‌ترتیب در خاک کشاورزی و خاک جنگلی معنی‌دار شدند ($P < 0.01$).

براساس نتایج ارائه شده در جدول ۴ برای معنی‌داری هر یک از ضرایب تابع چند جمله‌ی طرح مرکب مرکزی و با در نظر گرفتن ضرایب دارای اثر معنی‌دار تابع پیش‌بینی‌کننده مقدار تنفس ناشی از بستره به‌صورت معادله ۳ (خاک کشاورزی) و ۴ (خاک جنگلی) قابل ارائه خواهد بود. در این معادله X_1 ، X_2 و X_3 به‌ترتیب مربوط به مقادیر کد شده زمان خواباندن، مقدار گلوکز و دما می‌باشند.

$$\begin{aligned} \text{SIR (mgCO}_2\text{g}^{-1}\text{day}^{-1}) &= 0.586 - 0.1194X_1 + \\ &0.154X_3 - 0.100X_2^2 - 0.116X_1X_3 \\ R^2 &= 91.98\% \quad R^2_{\text{adj.}} = 84.76\% \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{SIR (mgCO}_2\text{g}^{-1}\text{day}^{-1}) &= 1.13 - 0.1594X_2 + \\ &0.289X_3 + 0.201X_2X_1 \\ R^2 &= 82.32\% \quad R^2_{\text{adj.}} = 66.42\% \end{aligned} \quad (4)$$

معادله‌ی ۳ و ۴ بیانگر این است که دما (X_3) تأثیر مثبت و افزایش‌دهنده‌ی بر تنفس ناشی از بستره در هر دو خاک دارد. به منظور ارزیابی کارایی مدل حاصل از طرح مرکب مرکزی، در شکل ۱ مقادیر اندازه‌گیری شده تنفس ناشی از بستره از آزمایش‌ها و مقدار برآورد شده‌ی آن از معادله‌ی ۳ و ۴ در مقابل یکدیگر ترسیم شده‌اند. مدل طرح مرکب مرکزی توانایی مطلوبی در پیش‌بینی تنفس ناشی از بستره داشته و ۹۱/۹۸ درصد و ۸۲/۳۲ درصد از تغییرات تنفس ناشی

در این معادله، Y متغیر پاسخ (مقدار تنفس ناشی از بستره)، X_i و X_j متغیرهای مستقل کد شده، k تعداد متغیرهای مستقل، ε باقیمانده‌های مدل (اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده مدل) و β_0 ، β_1 ، β_{ij} نیز به ترتیب نشان‌دهنده‌ی اثر عرض از مبدأ (ضریب ثابت)، اثر توابع خطی، درجه دو و برهمکنش بین متغیرها است.

نتایج و بحث

در این مطالعه از طرح مرکب مرکزی بر پایه روش سطح پاسخ برای مدل‌سازی تنفس ناشی از بستره استفاده شد. بر این اساس مجموع ۴۰ آزمایش (برای دو نوع خاک) و با ترکیب سطوح متفاوتی از مقادیر کدبندی شده این متغیرها طراحی و اجرا گردید. دامنه‌ی تغییرات مقادیر هر کدام از متغیرها براساس مقادیر کد شده هر متغیر در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین در این جدول مقادیر مشاهده‌ی تنفس ناشی از بستره برای هر آزمایش ارائه شده است.

بر مبنای طرح مرکب مرکزی و براساس ورودی‌های جدول ۳ برای متغیرهای مستقل (شامل زمان خواباندن، مقدار گلوکز و دما) و متغیر پاسخ (مقدار تنفس ناشی از بستره) جدول ۴ برای ضرایب هر یک از پارامترهای خطی، درجه دوم و برهمکنش متغیرها به دست آمد. در این جدول ضرایب هر یک از بخش‌های معادله‌ی چندجمله‌ای به همراه سطح معنی‌داری آن‌ها براساس آماره P ارائه شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود، اثر خطی متغیرهای مستقل در خاک کشاورزی شامل دما و زمان خواباندن ($P < 0.01$) بر تنفس ناشی از بستره معنی‌دار اما اثر گلوکز غیرمعنی‌دار بود، در

از بستره به ترتیب در خاک کشاورزی و خاک جنگلی توسط مدل طرح مرکب مرکزی قابل تبیین است. صرف نظر از کارایی مناسب مدل در هر دو خاک جنگلی و کشاورزی مقادیر کمی تنفس ناشی از بستره در دو خاک تفاوت قابل توجهی داشتند به طوری که مقدار میانگین تنفس در آزمایش‌های مربوط به خاک جنگلی برابر با $0/97 \text{ (mgCO}_2\text{-CgSoil}^{-1}\text{day}^{-1})$ و در خاک کشاورزی برابر $0/50 \text{ (mgCO}_2\text{g}^{-1}\text{day}^{-1})$ بود که نشان دهنده افزایش تقریباً دو برابری تنفس در خاک جنگلی نسبت به خاک است (شکل ۱).

به منظور تحلیل حساسیت مدل‌های آماری توسعه داده شده، درصد تأثیر هر یک از پارامترهای مدل طرح مرکب مرکزی با استفاده از آماره پارتو در شکل ۲ نشان داده شده است. از بین متغیرهای مستقل بررسی شده به ترتیب زمان خواباندن، دما، توان دوم دما و برهمکنش زمان در دما بیشترین تأثیر را بر تنفس ناشی از بستره در خاک کشاورزی دارند و مقدار گلوکز، دما و برهمکنش گلوکز در زمان خواباندن بیشترین تأثیر را بر این ویژگی در خاک جنگلی داشتند (شکل ۲). درصد تأثیر زمان خواباندن، دما، توان دوم دما و برهمکنش زمان در دما در خاک کشاورزی به ترتیب برابر با $36/83$ ، $21/93$ ، $15/66$ و $20/80$ بوده و مجموع درصد اثرات این ۴ متغیر نیز برابر با

$95/24$ درصد است. در خاک جنگلی درصد تأثیر مقدار گلوکز، دما و برهمکنش گلوکز در زمان خواباندن به ترتیب برابر با $41/71$ ، $12/66$ و $20/27$ بوده و مجموع درصد اثرات این ۳ متغیر نیز برابر با $74/65$ درصد می‌باشد.

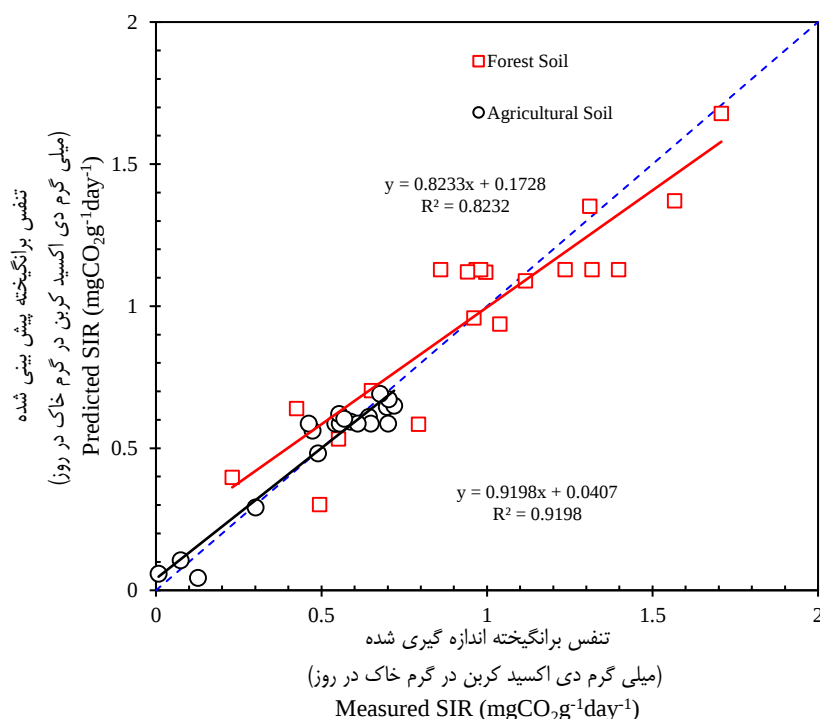
همچنین به منظور تحلیل باقیمانده‌های مدل‌های آماری ارائه شده، توزیع آماری مقادیر باقیمانده‌ی مدل طرح مرکب مرکزی نیز نرمال بوده و براساس علامت (مثبت و یا منفی بودن) مقادیر باقیمانده‌ی مدل می‌توان نتیجه گرفت که مدل مذکور فاقد بیش برآوردی و یا کم‌برآوردی سیستماتیک بوده و جهت خطای آن تابعی از مقدار تنفس ناشی از بستره نبوده و حالت تصادفی دارد (شکل ۳).

به منظور نشان دادن اثر ترکیبی متغیرها شامل زمان خواباندن، دما و مقدار گلوکز، نمودار کانتوری تغییرات مقدار تنفس ناشی از بستره برای این متغیرها به صورت دو به دو و بر اساس مدل طرح مرکب مرکزی ترسیم و در شکل ۴ ارائه شده است. در خاک کشاورزی تأثیر زمان خواباندن بر مقدار تنفس ناشی از بستره مشهود است که این اثر به‌ویژه در دماهای کم محسوس‌تر می‌باشد، با این حال حداکثر مقدار تنفس ناشی از بستره مربوط به مقادیر بالای دما و زمان آزمایش‌ها است.

جدول ۳- ماتریس مقادیر متغیرهای کد شده در مدل سازی روش طرح مرکب مرکزی

Table 3- Coded matrix of the variables used in the CCD modeling

شماره آزمایش Experiment number	مقادیر کد شده متغیرها Coded values of the variables		تنفس ناشی از بستره در خاک تنفس ناشی از بستره در خاک		
	n	گلوکز Glucose	دما Temperature	کشاورزی (میلی گرم دی اکسید کربن در گرم خاک در روز) SIR in agricultural soil (mgCO ₂ g ⁻¹ day ⁻¹)	جنگلی (میلی گرم دی اکسید کربن در گرم خاک در روز) SIR in forest soil (mgCO ₂ g ⁻¹ day ⁻¹)
1	-0.595	-0.595	0.595	0.588	0.996
2	0.595	-0.595	0.595	0.698	0.425
3	0.595	0.595	0.595	0.643	1.708
4	0.000	0.000	-1.000	0.127	0.230
5	0.595	0.595	-0.595	0.490	1.039
6	0.000	0.000	0.000	0.542	1.317
7	0.000	0.000	0.000	0.555	1.236
8	-0.595	0.595	-0.595	0.008	0.494
9	-0.595	0.595	0.595	0.719	1.311
10	0.000	0.000	0.000	0.701	1.398
11	-0.595	-0.595	-0.595	0.075	0.652
12	0.000	-1.000	0.000	0.703	0.793
13	0.000	0.000	0.000	0.649	0.968
14	0.595	-0.595	-0.595	0.553	0.551
15	0.000	0.000	0.000	0.609	0.981
16	0.000	0.000	1.000	0.473	1.567
17	0.000	1.000	0.000	0.569	0.941
18	0.000	0.000	0.000	0.461	0.860
19	1.000	0.000	0.000	0.677	1.116
20	-1.000	0.000	0.000	0.301	0.961

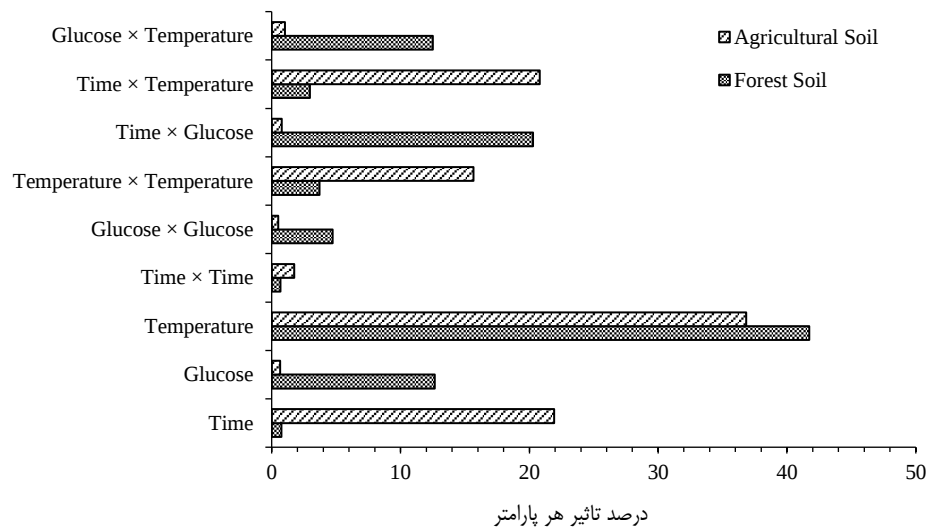


شکل ۱- مقایسه تنفس ناشی از بستره مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل طرح مرکب مرکزی در دو نوع خاک
Figure 1- Comparison of the measured and predicted SIR values for agricultural and forest soils with the CCD model

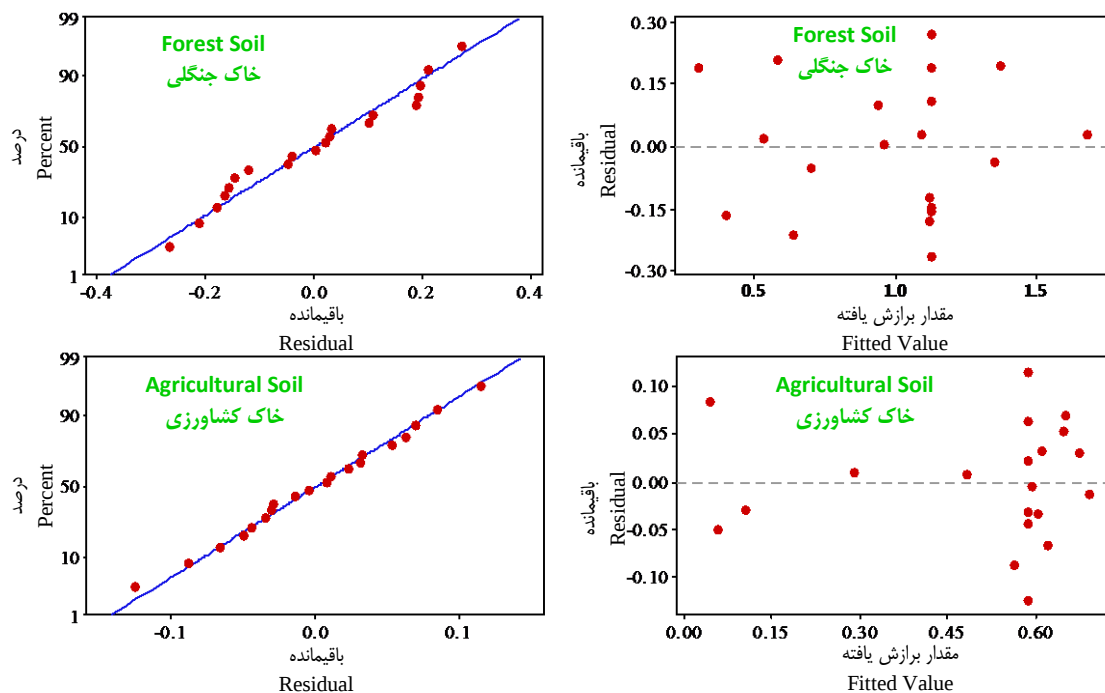
جدول ۴- ضرایب تابع چند جمله‌ای طرح مرکب مرکزی برای پیش‌بینی تنفس ناشی از بستره

Table 4- Coefficients of the full quadratic CCD model for predicting SIR

بخش مدل Part model	پارامترهای مدل Parameters	خاک جنگل Forest Soil			خاک کشاورزی Agricultural soil		
		آماره P P-value	آماره T T-value	ضریب Coefficient	آماره P P-value	آماره T T-value	ضریب Coefficient
ثابت مدل Constant	-	0.000	12.410	1.128	0.000	17.130	0.586
	زمان Time	0.533	0.650	0.039	0.000	5.240	0.119
خطی Linear	گلوکز Glucose	0.025	2.640	0.159	0.388	-0.900	-0.021
	دما Temperature	0.001	4.800	0.289	0.000	6.790	0.154
درجه‌ی دو Square	زمان × زمان Time × Time	0.546	-0.620	-0.037	0.159	-1.520	-0.034
	گلوکز × گلوکز Glucose × Glucose	0.128	-1.660	-0.097	0.427	0.830	0.018
	دما × دما Temp. × Temp.	0.173	-1.470	-0.086	0.001	-4.550	-0.101
	گلوکز × زمان Time × Glucose	0.028	2.560	0.202	0.463	-0.760	-0.023
برهمکنش Interaction	دما × زمان Time × Temp.	0.349	-0.980	-0.077	0.003	-3.900	-0.116
	دما × گلوکز Glucose × Temp.	0.072	2.010	0.158	0.402	0.870	0.026
		R ² = 82.32% R ² adj = 66.42%			R ² = 91.98% R ² adj = 84.76%		



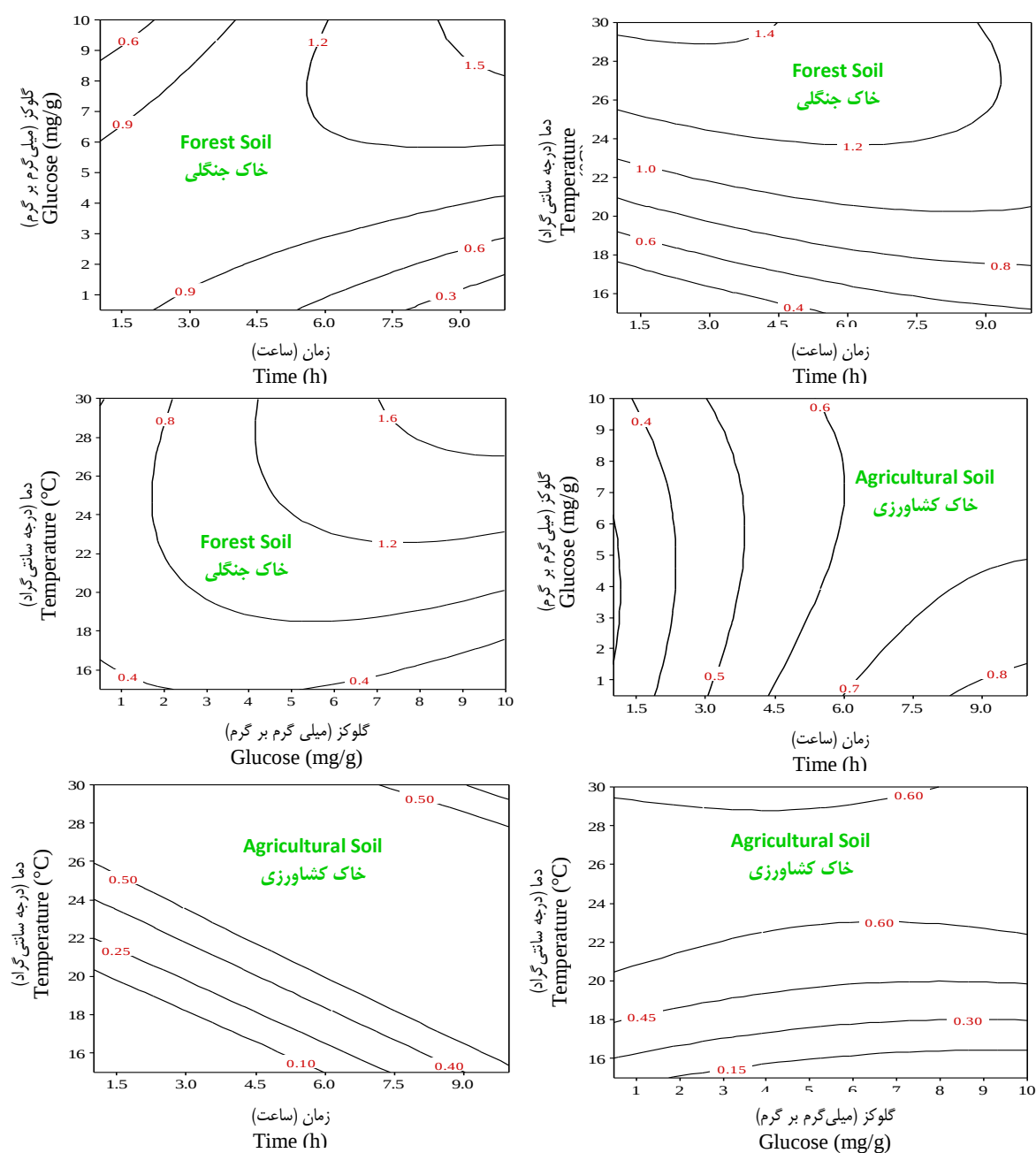
شکل ۲- نتایج تحلیل پارتو برای مقایسه اثر پارامترهای ورودی مدل طرح مرکب مرکزی بر مقدار تنفس ناشی از بستره
Figure 2- Pareto analysis for determining the percentage effects of each CCD model variables



شکل ۳- توزیع باقیمانده‌های مدل طراحی ترکیبی مرکزی
Figure 3- Distribution of the CCD model residuals

را برای فعالیت باکتری‌ها مهیا می‌کند تا حدودی توانسته‌اند مقدار تنفس ناشی از بستره را در خاک کشاورزی تحت تأثیر قرار دهند. در مجموع با افزایش زمان و دما مقدار تنفس ناشی از بستره افزایش محسوس داشته ولی با افزایش گلوکز، افزایش مقدار تنفس ناشی از بستره چندان قابل توجه نبوده است.

از سوی دیگر تغییر مقدار گلوکز چه در ارتباط با دما و یا زمان تأثیر نسبتاً کمی بر مقدار کمی تنفس ناشی از بستره داشته است. به نظر می‌رسد در خاک کشاورزی به دلیل مقدار اندک ماده آلی افزایش گلوکز تأثیر چندان قابل توجهی بر تغییر مقدار تنفس ناشی از بستره نداشته است (۲۹). با این حال دما و زمان به عنوان عواملی که شرایط



شکل ۴- نمایش کانتوری تغییرات مقدار تنفس ناشی از بستره در مقابل متغیرهای ورودی مدل طرح مرکب مرکزی زمان (Time, h)؛ غلظت گلوکز (Glucose, mg gl⁻¹)؛ دما (Temperature, C°)

Figure 4- Counter plot of the SIR values at different levels of the CCD model variables

مقدار تنفس ناشی از بستره بسیار زیاد است به طوری که حداکثر مقدار تنفس ناشی از بستره در این خاک مربوط به زمان طولانی تر و مقدار بیشینه گلوکز است. این امر به خوبی نشان می دهد که ابتدا با افزایش گلوکز تنفس ناشی از بستره در هر دو نوع خاک افزایش یافته

در خاک جنگلی روند تغییرات تنفس ناشی از بستره به طور مشخص در پاسخ به متغیرهای مستقل متفاوت از خاک کشاورزی است. برای نمونه در بررسی توأم اثر گلوکز و زمان در خاک جنگلی مشاهده می شود که اثر افزایش گلوکز به ویژه در زمان های بالا بر

بالا تر از حد معین آسیب غیرقابل جبرانی به اجزای سلولی وارد می گردد. ملیو و همکاران (۲۰) نشان دادند افزایش فعالیت میکروبی و رهاسازی دی اکسید کربن با افزایش دما در طول زمان خواباندن، رابطه مستقیم و خطی ندارند بلکه در ابتدا افزایش و سپس روند کاهشی دارد تا اینکه دوباره به همان تنفس معمولی خاک بر می گردد. پژوهندگان چندین دلیل برای این مساله ذکر کردند: ۱) به دلیل متفاوت بودن محدوده دمای بهینه رشد و فعالیت ریزجانداران خاک، افزایش دما ممکن است ترکیب جامعه میکروبی را تغییر دهد و متعاقب آن با از دست رفتن برخی گروه های میکروبی، آزادسازی کربن خاک کاهش می یابد (۶). ۲) و یا ممکن است به دلیل اتمام مواد آلی ساده تجزیه شونده باشد که سبب تحریک اولیه فعالیت میکروبی و کاهش میزان تنفس شده بود (۱۷). وجود فاز تأخیر در دمای بالاتر از دمای مطلوب جهت رشد باکتری می تواند به دلیل از دست رفتن فعالیت متابولیکی سلول در دماهای بالا باشد که این موضوع باعث به تأخیر افتادن فرآیند تقسیم سلولی می گردد تا زمانی که باکتری خود را با شرایط دمایی موجود سازگار کرده و رشد خود را مجدداً آغاز کند. از طرف دیگر تأخیر در رشد باکتری در دمای ۱۵ درجه سلسیوس به دلیل کاهش فعالیت آنزیم های اختصاصی است که باعث می شود مرحله لگاریتمی رشد باکتری طولانی شود (۱۸).

نتیجه گیری

نتایج کلی این پژوهش بیانگر کارایی مطلوب روش سطح پاسخ در مدل سازی تنفس ناشی از بستره در هر دو خاک بود. با این حال مقادیر کمی تنفس در خاک جنگلی تقریباً دو برابر خاک زراعی بود. نکته اساسی در مدل سازی تنفس ناشی از سوبسترا تأثیر متفاوت متغیرهای مستقل در دو نوع خاک است به نحوی که در خاک جنگلی مقدار گلوکز و دما به عنوان متغیرهای اساسی در افزایش مقدار تنفس ناشی از سوبسترا بودند در حالی که در خاک زراعی متغیرهای دما و زمان تعیین کننده تر بودند. به نظر می رسد افزایش ماده آلی سهل الوصول در خاک جنگلی نسبت به خاک زراعی عاملی بسیار مهم در تفاوت رفتار دو خاک بوده و این نتیجه به طور دقیق بیانگر نقش مواد آلی در افزایش کیفیت خاک و سلامت میکروبی آن است.

(تحریک میکروبی) اما با گذشت زمان خاک جنگلی در مقایسه با خاک کشاورزی که حاوی مقادیر قابل توجهی از مواد آلی قابل تجزیه و سهل الوصول است تنفس ناشی از بستره بیشتر می باشد (۲۹، ۱۳ و ۴). با این حال زمان و دما تا حدودی اثر هم افزایی بر تنفس ناشی از بستره داشته و از این جهت پاسخ دو خاک نسبت به این دو متغیر مشابهت دارد. نکته قابل توجه دیگر تأثیر توأم دما و گلوکز در خاک جنگلی می باشد که افزایش گلوکز در دماهای بیش از ۲۵ درجه سلسیوس سبب افزایش شدید تنفس ناشی از بستره میکروبی شد، به نظر می رسد که در این حالت دمای مطلوب به همراه افزایش مقدار سوبسترا، در محیطی که حاوی ماده آلی قابل توجهی باشد (خاک جنگلی) شرایط را برای افزایش تنفس ناشی از بستره فراهم می آورد. آزمایش های مزرعه ای نشان داده است که مدیریت اراضی موجب تغییر در وضعیت مواد آلی می شود و این تغییر در ذخایر سهل الوصول (ذخایر مواد آلی تعریف شده در بخش سهل الوصول عبارتند از: ذرات مواد آلی، کربن زیست توده میکروبی، کربن محلول، کربن قابل معدنی شدن و کربن قابل استخراج با عصاره گیرهای مختلف) گزارش شده است (۱۵ و ۷). وجود مواد آلی بیشتر، در خاک جنگلی به دلیل عدم خاکورزی و دوره طولانی تر رشد ریشه از جمله دلایل بالا بودن تنفس ناشی از بستره در خاک جنگلی نسبت به خاک کشاورزی است. ابراهیم زاد و همکاران (۱۳) گزارش کردند کاهش تنفس ناشی از بستره در کاربری های مختلف (مرتع، باغ سیب و زراعت) و نیز با افزایش عمق خاک در این کاربری ها، ناشی از کاهش مواد آلی خاک می باشد و همچنین بیان داشتند که در تنفس ناشی از بستره اکثراً ریزجانداران غیر بومی خاک دخیل بوده که این ریزجانداران در زیست توده میکروبی خاک نقش چندانی ندارند و پس از تمام شدن ماده غذایی سهل الوصول مانند گلوکز جمعیت آنها به شدت کاهش می یابد. کربوهیدرات های محلول در آب داغ ترکیبات غذایی سهل الوصول بوده و تحریک کننده تنفس هستند (۱۳).

با افزایش دما رشد ریزجانداران افزایش یافته و سوبسترا را با سرعت بیشتری دگرگون می سازد پس در هر دو خاک تنفس ناشی از بستره افزایش یافت (۳۰). با افزایش دما در محدوده خاص واکنش های آنزیمی و شیمیایی درون سلول با سرعت بیشتری انجام شده و رشد و فعالیت متابولیکی افزایش می یابد (۸). در هر حال، در دمای

منابع

- 1- Aghaeinejad-Meybodi A., Ebadi A., Shafiei S., Khataee A., and Rostampour M. 2015. Degradation of antidepressant drug fluoxetine in aqueous media by ozone/H₂O₂ system: process optimization using central composite design. *Environmental Technology*, 36(12): 1477-88.
- 2- Anderson T.H., and Domsch K.H. 1990. Application of eco-physiological quotients (qCO₂ and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology and Biochemistry*, 22(2): 251-255.
- 3- Beare M.H., Neely C.L., Coleman D.C., and Hargrove W.L. 1990. A substrate-induced respiration (SIR) method for measurement of fungal and bacterial biomass on plant residues. *Soil Biology and Biochemistry*, 22: 585-594.
- 4- Beheshti A., Raiesi F., and Golchin A. 2011. The Effects of Land Use Conversion from Pasturelands to Croplands

- on Soil Microbiological and Biochemical Indicators. *Journal of Water and Soil*, 25(3): 548-562. (In Persian with English abstract)
- 5- Bossio D.A., Scow K.M., Gunapala N., and Graham K.J. 1998. Determinants of soil microbial communities: effects of agricultural management, season, and soil type on phospholipids fatty acid profiles. *Microbial Ecology*, 36(1): 1-12.
- 6- Bradford M.A., Davies C.A., Frey S.D., Maddox T.R., Melillo J.M., Mohan J.E., Reynolds J.F., Treseder K.K., and Wallenstein M.D. 2008. Thermal adaptation of soil microbial respiration to elevated temperature. *Ecology Letters*, (12): 1316-1327.
- 7- Campbell C.A., Lafond G.P., Biederbeck V.O., Wen G., Schoenau J., and Hahn D. 1999. Seasonal trends in soil biochemical attributes: effects of crop management on a Black Chernozem. *Canadian Journal of Soil Science*, 79(1): 85-97.
- 8- Carter M.R., and Gregorich E.G. 2008. *Soil Sampling and Methods of Analysis* (2nd ed). CRC Press. Boca Raton, FL. P.1204.
- 9- Cooper V.S., Bennett A.F., and Lenski R.E. 2001. Evolution of thermal dependence of growth rate of *Escherichia coli* populations during 20,000 generations in a constant environment. *Evolution*, 55(5): 889-896.
- 10- Dick R.P. 1994. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, PP: 107-124.
- 11- Doran J.W., and Parkin T.B. 1994. Defining and assessing soil quality, In: *Defining soil quality for a sustainable Environment*, edited by Doran, J.W., DC. Coleman, D.F. Bezdicek, and B.A. Stewart, soil sci. soc. Am. Special publication, NO.35, Madison, Wisconsin, USA. Pp: 3-21.
- 12- Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicek, D.F., and Stewart B.A. 1994. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Special Publication No. 35, Soil Science Society of America, Inc. and the American Society of Agronomy, Inc. Madison, WI
- 13- Ebrahimzad S.A., Aliasgharzad N., and Najafi N. 2013. Impressionability of Some Soil Ecophysiological Indices by land Use Changes in Suldoz Plain (Naqadeh, West Azarbaijan). *Agricultural Science and Sustainable Production*, 23: 41-56. (In Persian with English abstract)
- 14- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods*. PP: 383-411.
- 15- Haynes R.J. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview. *Advances in Agronomy*, 85: 221-68.
- 16- Horwath W.R., and Paul E.A. 1994. Microbial Biomass. In: Weaver RW, Angle JS, Bottomley PS (eds) *Methods of soil analysis, part 2. Microbiological and biochemical properties*. SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI, pp 753–773.
- 17- Kirschbaum M.U. 2004. Soil respiration under prolonged soil warming: are rate reductions caused by acclimation or substrate loss?. *Global Change Biology*, 10(11): 1870-1877.
- 18- Lamoochi R., and Safahieh A. 2014. Effect of environmental factors of temperature, salinity and level of heavy metal lead on growth of lead resistant bacterium isolated from Persian Gulf sediments. *Journal of Aquatic Ecology*, 3(4): 60-51. (In Persian with English abstract)
- 19- McLean E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. In: *Methods of soil analysis*, edited by Page, A. L., Part 2. Chemical and microbiological properties, Madison, Wisconsin, USA. 199-224.
- 20- Melillo J.M., Steudler P.A., Aber J.D., Newkirk K., Lux H., Bowles F.P., Catricala C., Magill A., Ahrens T., and Morrisseau S. 2002. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science*, 298(5601): 2173-2176.
- 21- Mousavi S.M., Niaei A., Salari D., Panahi P.N., and Samandari M. 2013. Modelling and optimization of Mn/activate carbon nanocatalysts for NO reduction: comparison of RSM and ANN techniques. *Environmental Technology*, 34(11): 1377-1384.
- 22- Myers R.H., and Montgomery D.C. 2002. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments*, (2nd ed.), John Wiley and Sons, UK.
- 23- Nannipieri P., Ascher J., Ceccherini M., Landi L., Pietramellara G., and Renella G. 2003. Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, 54(4): 655-670.
- 24- Nelson D.W., and Sommers L. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*, Pp: 539-579.
- 25- Padmavathi T. 2015. Optimization of phosphate solubilization by *Aspergillus niger* using plackett-burman and response surface methodology. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(3): 781-93.
- 26- Pratt P.F., and Chapman H.D. 1961. *Methods of Analysis for Soils, Plants and Water*. Univerisity of California.
- 27- Raiesi F., and Asadi E. 2006. Soil microbial activity and litter turnover in native grazed and ungrazed rangelands in a semiarid ecosystem. *Biology and Fertility of Soils*, 43(1): 76-82.
- 28- Rajendran A., Meikandhan T., and Viruthagiri T. 2007. Statistical evaluation of medium components by Plackett-

- Burman experimental design and kinetic modeling of lipase production by *Pseudomonas fluorescens*. Indian Journal of Biotechnology, 6: 469- 478.
- 29- Rasouli-Sadaghiani M.H., Karimi S., Khodaverdiloo H., Barin M., and Banj-Shafiei A. 2016. Impact of forest ecosystem land use on soil physico-chemical and biological indices. Iranian Journal of Forest, 8(2): 167-178. (In Persian with English abstract)
- 30- Sharifi Z., and Safari Sinegani A.A. 2015. Interactions between Soil Organisms and Global Climate Change and Application of Meta-Analysis in its Interpretation: A Systematic Review. Journal of Human and Environment, 13(3): 43-66. (In Persian with English abstract)
- 31- Sheklabadi M., Khademi H., Karimian Eghbal M., and Nourbaksh F. 2007. Effects of Climate and Long-Term Grazing Exclusion on Selected Soil Biological Quality Indicators in Rangelands of Central Zagros. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 11(41): 103-116. (In Persian with English abstract)
- 32- Swetha S., Varma A., and Padmavathi T. 2014. Statistical evaluation of the medium components for the production of high biomass, α -amylase and protease enzymes by *Piriformospora indica* using Plackett–Burman experimental design. Biotechnology, 4: 439–445.



Mathematical Modeling and Comparison of the Substrate Induced on Forest and Agricultural Soils

M. Barin^{1*}- E. Ehsan-Malahat²- F. Asadzadeh³

Received: 18-12-2017

Accepted: 29-07-2018

Introduction: Soil is a complex and dynamic biological system, and it still is difficult to determine the composition of microbial communities in soil. Most soil microorganisms are dormant, so their rate of respiration is low. However, their respiration can be stimulated by adding an easily decomposable substrate. Also, by adding a simple organic matter, respiration may rapidly increase to a maximum and remains at a constant rate for more than 4 h. Glucose is commonly used as a substrate because most soil microorganisms can readily utilize it as a carbon source. The substrate-induced respiration (SIR) method was modified and adapted to measure fungal, bacterial and total microbial contributions to glucose-induced respiration and the potentially active microbial biomass on decaying plant residues of different composition. Decomposing residues from natural and agricultural ecosystems were chopped and sieved to include the >1 mm fraction for routine SIR analyses on a continuous flow-through respiration system. Substrate induced respiration is a main factor for the assessment of the soil microbial activity. This technique is already used widely in soil microbial studies. Different factors such as the source of carbon, temperature and incubation may play a significant role in the amount of SIR. Therefore, optimizing the test conditions is one of the important criteria for SIR determination. For this purpose, statistical methods such as central composite design (CCD) and response surface method can be used as a useful tool for determining optimal conditions. This study was carried out to model and compare the effect of carbon source (glucose), temperature and incubation time on the SIR of forest and agricultural soils.

Materials and Methods: In this research, 40 experiments were conducted for two soil types including agricultural soil (with relatively low organic matter content) and forest soil (with relatively high organic matter content). Soil samples were collected from the topsoil (0-20 cm) layer. In the laboratory, all visible roots were removed and the soil samples were divided into two parts. One part was kept in plastic bottles at 4°C for SIR analysis. And the rest was air dried in the shade at laboratory temperature for chemical and physical analysis. Electrical conductivity (EC) and pH were determined in saturated soil extract and organic carbon percent (%OC) was determined by di-chromate oxidation. Soil texture was determined using a Bouyoucos hydrometer in a soil suspension. Response surface methodology based on the central composite design was applied in modeling procedure. Different ranges of the independent variables including glucose (0.5-10 mg g⁻¹), incubation time (1-10 hr), and temperature (15-30°C) were used in central composite design experiments. Totally, 40 experiments based on the coded values of the independent variables were conducted for two soils.

Results and Discussion: Experimental results indicated that the SIR in forest soil is two times greater than the agricultural soil, which may be related to the higher organic matter content and more microbial activity in this soil. Results also revealed the efficiency of the central composite design in predicting the SIR of forest ($R^2=0.823$) and agricultural ($R^2=0.919$) soils. Among the three independent variables, the linear effect of temperature on the SIR were significant for both soils. However, the substrate (glucose) content has more significant effect in forest soil in comparison with agricultural soil which may be associated with the higher decomposable organic matter content of the forest soil. Glucose enhancement didn't have significant effect on SIR alteration rate which can be attributed to low organic matter content in agricultural soil. Totally, with increasing time and temperature, the amount of SIR was significantly increased, however with increasing glucose, SIR amount was not significantly increased especially in the agricultural soil. In the forest soil, the process of SIR changes is clearly distinct in response to independent variables compared to agricultural soil. Maximum levels of the SIR in forest soil is clearly associated to the highest time and glucose levels. This indicates that increasing glucose and sufficient time in the forest soil, which contains high amounts of digestible organic matter, can stimulate microorganisms to decompose more organic matter and its outcome is increasing SIR.

Conclusion: This study indicated the high efficiency of response surface methodology in SIR modeling for both forest and agricultural soils. However, the quantitative amounts of SIR were very different in two soils. The amounts of SIR in the forest soil were almost twice relative to agricultural soil. In the forest soil, the amounts of glucose and temperature were as the main variables in increasing SIR, while the temperature and time variables

1, 2 and 3- Assistant Professor, Former M.Sc. Student and Associate Professor of Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Respectively

(*)- Corresponding Author Email: m.barin@urmia.ac.ir

were more determinant in agricultural soil on it.

Keywords: Microbial community, Response surface, Soil quality, Soil respiration



اثر تلقیح بذر با *ازتوباکتر* و *آزوسپیریلام* بر عملکرد و برخی خصوصیات کمی و کیفی گلرنگ در تاریخ کاشت مختلف

سعید حکم علی پور^{۱*} - مهدی پناهیان کیوی^۲ - منوچهر شیرینی جاناورد^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۳

چکیده

به منظور بررسی عملکرد، اجزای عملکرد و برخی خصوصیات کمی و کیفی گلرنگ متأثر از کاربرد باکتری افزایشده رشد گیاهی در تاریخهای کاشت مختلف در منطقه اردبیل آزمایشی در بهار سال ۱۳۹۵ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه پیام نور کوثر به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوکهای کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. فاکتور اول شامل سه تاریخ کاشت (۵ فروردین، ۲۰ فروردین و ۵ اردیبهشت) و فاکتور دوم شامل تلقیح بذور با باکتری های افزایشده رشد در سه سطح (بدون تلقیح، تلقیح با *ازتوباکتر کروکوکوم* سویه ۵^۴ و تلقیح با *آزوسپیریلام لیپوفر*م سویه آف^۵) بود. نتایج نشان داد اثر تاریخ کاشت روی کلیه صفات به جز نسبت مغز به دانه و نسبت پوست به دانه معنی دار بود. اثر تلقیح بذر با باکتری های افزایشده رشد بر ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد شاخه اصلی و فرعی، درصد روغن و درصد پروتئین معنی دار شد. بیشترین تعداد غوزه در بوته، دانه در غوزه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، ارتفاع بوته و درصد پروتئین در تاریخ کاشت اول (۵ فروردین) و کمترین میزان این صفات در تاریخ کاشت سوم (۵ اردیبهشت) حاصل گردید. بیشترین درصد روغن، تعداد شاخه اصلی، تعداد شاخه فرعی و قطر ساقه در تاریخ کاشت اول و تلقیح با *ازتوباکتر* حاصل شد. کمترین میزان این صفات در تاریخ کاشت سوم و عدم تلقیح به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع بوته، باکتری های افزایشده رشد، تعداد شاخه، درصد پروتئین، درصد روغن

مقدمه

بخش‌های گیاهی از جمله علوفه و کنجاله دانه آن برای تغذیه حیوانات قابل استفاده هستند (۱۴). امروزه از روغن گلرنگ با سه هدف اصلی روغن، مصارف خوراکی و تغذیه طیور استفاده می‌شود (۸). بر اساس نوع پوست دانه، درصد روغن دانه این گیاه بین ۳۵ تا ۵۰ متغیر است (۱۸). روغن استاندارد گلرنگ دارای ۸-۶ درصد اسید پالمیتیک، ۳-۲ درصد اسید استئاریک، ۲۰-۱۶ درصد اسید اولئیک و ۷۵-۷۱ درصد اسید لینولئیک است (۲۲). با توجه به اهمیت بالای گلرنگ و لزوم افزایش عملکرد در واحد سطح، تأمین عناصر غذایی مورد نیاز این گیاه از اولویت‌های مهم و البته مؤثر می‌باشد. نظر به مشکلات متعدد زیست‌محیطی استفاده از کودهای شیمیایی در سال‌های اخیر و در راستای توسعه کشاورزی پایدار، کاربرد کودهای زیستی می‌تواند نقش بسیار مؤثری در تولید محصولات سالم داشته باشد.

کودهای زیستی در مقایسه با کودهای شیمیایی مزیت‌های بسیار زیادی دارند. عدم تولید مواد سمی و میکروبی، قابلیت تکثیر خود به خودی، اصلاح خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و داشتن صرفه اقتصادی بالا از جمله این مزیت‌ها می‌باشند. استفاده از کودهای زیستی می‌تواند مانع از مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی شود

بخش عمده‌ای از روغن مورد نیاز کشور از منابع خارجی تأمین می‌شود، از این رو توسعه کشت دانه‌های روغنی از اهمیت زیادی برخوردار است. از بین دانه‌های روغنی سازگار با شرایط آب و هوایی کشور، گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) به عنوان گیاه مقاوم به تنش شوری و خشکی، و با داشتن تیپ‌های پاییزه و بهاره، آینده نوید بخشی دارد (۱۷). گلرنگ در سالیان اخیر به دلیل سازگاری به اقلیم‌های گوناگون و مقاومت به خشکی و شرایط سخت، برای نواحی خشک و نیمه‌خشک دنیا از جمله ایران مورد توجه قرار گرفته است (۹). کاربرد گلرنگ به گل، دانه و روغن محدود نمی‌شود و سایر

۱ و ۲- استادیاران گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
(* - نویسنده مسئول: Email: hokmalipour@yahoo.com)

۳- استادیار، گروه علوم گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

DOI: 10.22067/jsw.v32i5.70005

4- *Azotobacter chroococcum* strain5

5- *Azospirillum lipoferum* strain of

مواد و روش‌ها

این آزمایش در بهار سال ۱۳۹۵، به منظور بررسی عملکرد، اجزای عملکرد و برخی خصوصیات کمی و کیفی گلرنگ متأثر از کاربرد باکتری افزایش‌دهنده رشد گیاه در تاریخ‌های کاشت مختلف در منطقه اردبیل به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه پیام نور کوثر اجرا گردید. فاکتور اول شامل سه تاریخ کاشت (۵ فروردین، ۲۰ فروردین و ۵ اردیبهشت) و فاکتور دوم شامل تلقیح بذور با باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد در سه سطح (بدون تلقیح، تلقیح با *ازتوباکتر کروکوکوم* استرین ۲۵ و تلقیح با *ازتوسپیریوم لیوفورم* استرین آف با جمعیت 10^8 عدد در هر میلی‌لیتر بود. هر دوی این باکتری‌ها بومی خاک‌های ایران بوده و مایه تلقیح آن از بخش تحقیقات بیولوژی مؤسسه تحقیقات خاک و آب تهیه شد. برای ایجاد چسبندگی مناسب باکتری‌ها با بذور از محلول صمغ عربی استفاده شد (۱۱). تلقیح بذر نیم ساعت پیش از عملیات کشت در مزرعه و در سایه انجام شد. هر کرت شامل شش ردیف کاشت به طول چهار متر بود. برای ایجاد تراکم کاشت ۴۰ بوته در متر مربع، فاصله بوته‌ها روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر و بین ردیف ۲۵ سانتی‌متر انتخاب شد. فاصله کرت‌ها از یکدیگر یک متر بود. زمین محل آزمایش در سال قبل در آیش قرار داشت. کاشت به صورت کپه‌ای و با دست به طریق خشکه‌کاری انجام گرفت و بلافاصله آبیاری نشتی به عمل آمد. عملیات تنک کردن در مرحله دو برگی انجام شد، به طوری که در هر ده سانتی‌متر یک بوته باقی ماند. علف‌های هرز در چندین نوبت با دست وجین شدند. سله شکنی در دو مرحله و همزمان با مصرف کود سرک نیتروژن انجام گردید. آبیاری بر اساس وضعیت آب و هوایی و رطوبت خاک انجام شد. پس پایان دوره رشد تعداد دانه در غوزه، تعداد غوزه در بوته، وزن هزار دانه، عملکرد دانه در بوته، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، درصد روغن، درصد پروتئین، تعداد شاخه اصلی، تعداد شاخه فرعی، ارتفاع بوته، قطر ساقه، نسبت مغز به دانه و نسبت پوست به دانه اندازه‌گیری شدند. میزان روغن دانه به روش سوکسله تعیین گردید (۹). با استفاده از روش کج‌لدال در آزمایشگاه درصد پروتئین دانه‌ها با نمونه‌های یک گرمی آسیاب شده محاسبه شد و در نهایت با استفاده از معادله ۱ میزان نیتروژن یا درصد پروتئین خام نمونه محاسبه شد. تجزیه واریانس داده‌ها توسط نرم‌افزار آماری SAS 9.2 و مقایسات میانگین به وسیله آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. یک تجزیه واریانس جداگانه نیز به منظور بررسی تغییرات سطح برگ و شاخص کلروفیل برگ در زمان انجام شد.

(۴). در این میان به کارگیری باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاه^۱ به همراه کودهای شیمیایی، مهم‌ترین راهبرد برای مدیریت پایدار بوم نظام‌های کشاورزی و افزایش تولید در سیستم کشاورزی پایدار می‌باشد (۲۰). *ازتوباکتر* و *ازتوسپیریوم* از جمله باکتری‌های مفید خاکزی می‌باشند. این باکتری‌ها علاوه بر تثبیت زیستی نیتروژن و محلول کردن فسفر خاک، با تولید مقادیر قابل توجهی از هورمون‌های تحریک کننده رشد به ویژه انواع اکسین، جیبرلین و سیتوکنین، رشد و نمو گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۲۴). این باکتری‌ها به طور طبیعی در خاک‌ها وجود دارند. ولی معمولاً جمعیت آن‌ها در خاک پایین است، بنابراین تلقیح بذورهای گیاهان با این باکتری‌ها می‌تواند جمعیت آن‌ها را به حد مطلوب رسانده و در نتیجه منجر به بروز اثرات مفید آن‌ها در خاک گردد (۴). اعتمادی و همکاران (۹) با بررسی تأثیر باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاه بر برخی شاخص‌های رشدی و عملکرد گلرنگ گزارش کردند که سویه‌های مورد مطالعه آن‌ها درصد روغن را بین ۱۲ تا ۵۲ درصد افزایش دادند. آن‌ها این افزایش را به اثر احتمالی این باکتری‌ها بر گسترش سطح برگ و افزایش جذب عناصری مانند فسفر، منگنز، منیزیم، کلسیم و روی نسبت دادند. هر چند در آزمایش آن‌ها کاربرد باکتری *سودوموناس فلورسنس* تأثیر معنی‌داری بر تعداد دانه در طبق، عملکرد دانه در بوته، وزن هزار دانه، عملکرد روغن و عملکرد بیولوژیک نداشتند. فلاحی و همکاران (۲۰۱۱) اثر کود زیستی نیتروکسین و باکتری‌های حل کننده فسفات و همچنین اثر توام این دو باکتری را روی عملکرد کمی و کیفی گیاه بابونه آلمانی مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که تیمارهای مورد بررسی اثر معنی‌داری بر تعداد شاخه اصلی، تعداد گل آذین در بوته، قطر گل، عملکرد گل تر، عملکرد گل خشک، عملکرد بذر، عملکرد اسانس و عملکرد کامازولن داشت. تاریخ کاشت اولین نکته اساسی در مدیریت گیاهان زراعی است. بسیاری از مؤلفه‌های مؤثر در عملکرد گیاهان مختلف تحت تأثیر تاریخ کاشت قرار می‌گیرند. مطالعات مختلف نشان داده است که جوانه‌زنی (۱۲)، عملکرد دانه (۱۳)، تعداد دانه در غوزه (۵)، تعداد غوزه در بوته (۳) ارتفاع بوته (۱۵)، تعداد شاخه‌ها (۶) در گیاه گلرنگ تحت تأثیر تاریخ کاشت قرار می‌گیرند. در این بین تلقیح بذر با باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاهی در تاریخ‌های کاشت مختلف و مطالعه اثر زمان تلقیح بر مؤلفه‌های مؤثر در عملکرد گیاه ممکن است مفید واقع گردد. با توجه به اهمیت موضوع و ضرورت به کارگیری راهکارهای بیولوژیک برای تولید بهینه گیاهان و همچنین پیدا کردن بهترین تاریخ کاشت برای گلرنگ در منطقه اردبیل این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تلقیح بذر با *ازتوباکتر* و *ازتوسپیریوم* بر عملکرد، اجزای عملکرد و برخی خصوصیات کمی و کیفی گلرنگ در تاریخ‌های مختلف اجرا گردید.

(معادله ۱) $100 \times ((\text{درصد رطوبت} - 100) / 100)$ درصد پروتئین
(خام) = درصد پروتئین خام در ماده خشک

نتایج و بحث

عملکرد و اجزای عملکرد

نتایج نشان داد اثر تاریخ کاشت روی تعداد غوزه در بوته، تعداد دانه در غوزه، وزن هزار دانه و عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. اثر تلقیح بذر با باکتری‌های افزایشده رشد بر عملکرد و اجزای عملکرد گلرنگ معنی دار نشد (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها نشان داد تأخیر در تاریخ کاشت موجب کاهش معنی داری عملکرد و اجزای عملکرد گلرنگ شد. به طوری که بیشترین تعداد غوزه در بوته (۱۰/۶۶)، دانه در غوزه (۱۶/۳۲)، وزن هزار دانه (۳۵/۴۴) گرم) و عملکرد دانه (۵/۴۴) گرم در بوته، در تاریخ کاشت اول (۵ فروردین) و کمترین میزان این صفات در تاریخ کاشت سوم (۵ اردیبهشت) حاصل گردید. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تاریخ کاشت اول در مقایسه با تاریخ کاشت سوم به ترتیب موجب افزایش ۱۴، ۱۳، ۱۱ و ۹ درصدی در تعداد غوزه در بوته، تعداد دانه در غوزه، وزن هزار دانه و عملکرد گلرنگ شده است.

با تغییر تاریخ کاشت متغیرهای محیطی نظیر درجه حرارت خاک، درجه حرارت محیط و طول روز تغییر کرده و موجب بروز واکنش‌های متفاوت گیاه در مراحل فنولوژیکی مختلف گیاه می‌شود. علاوه بر صفات مورفولوژیکی، عملکرد دانه و اجزای آن نیز تحت تأثیر تاریخ کاشت و تغییرات دمایی ناشی از آن در مراحل مختلف رشد قرار می‌گیرند. میزان تأثیرپذیری صفات مختلف بسته به شرایط آب و هوایی منطقه کاشت متفاوت است (۱). مطالعات مختلف نشان داده است که تعداد دانه در غوزه (۵)، تعداد غوزه در بوته (۳) و در نهایت عملکرد دانه (۱۳) در گیاه گلرنگ تحت تأثیر تاریخ کاشت قرار می‌گیرند. کاهش عملکرد گلرنگ به دنبال تأخیر در کاشت در مطالعات مختلف گزارش شده است (۲، ۱۶ و ۲۳). به نظر می‌رسد دلیل کاهش عملکرد دانه در اثر تأخیر در کاشت، افزایش دما و کوتاه شدن فصل رشد است. اعتمادی و همکاران (۹) در بررسی تأثیر باکتری‌های افزایشده رشد گیاه بر برخی شاخص‌های رشدی و عملکرد گلرنگ گزارش کردند که باکتری سودوموناس فلورسنس تأثیر معنی داری بر شاخص‌های عملکرد نداشت.

عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت

جدول تجزیه واریانس نشان داد اثر تاریخ کاشت بر عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت معنی دار می‌باشد. این در حالی است که تلقیح بذر با باکتری‌های افزایشده رشد گیاهی بر این دو صفت معنی دار نبود (جدول ۱). مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیشترین عملکرد

بیولوژیک (حدود ۱۶ گرم در بوته) و شاخص برداشت به طور مشترک در تاریخ کاشت اول و دوم حاصل گردید. این در حالی بود که تاریخ کاشت سوم با عملکرد بیولوژیک ۱۵/۶۶ گرم در بوته و شاخص برداشت ۳۱/۳۳ درصد در پایین‌ترین سطح قرار گرفت. مقایسه این اعداد بیانگر کاهش ۴ و ۵ درصدی عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت در تاریخ کاشت سوم در مقایسه با تاریخ کاشت اول می‌باشد (جدول ۲).

ارتفاع بوته و قطر ساقه

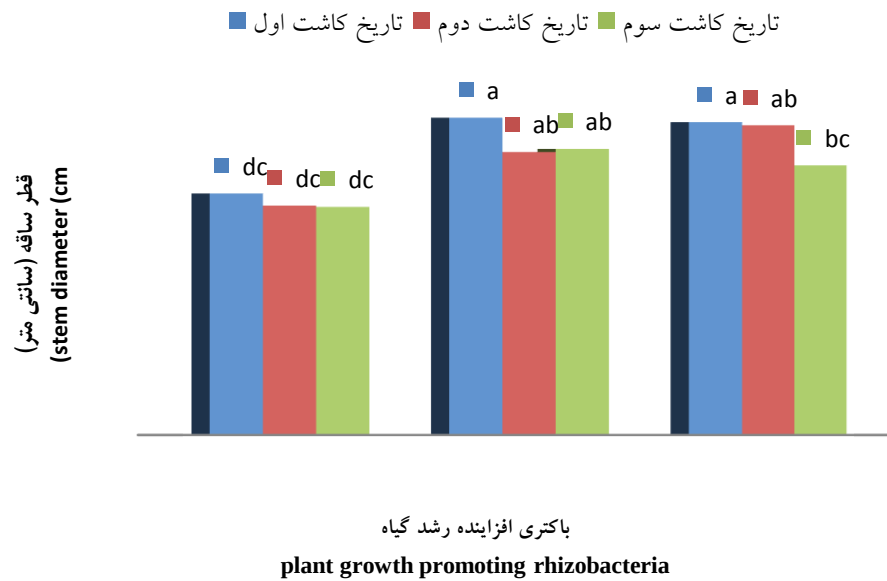
نتایج نشان داد اثر تاریخ کاشت و تلقیح بذر با باکتری‌های محرک رشد گیاهی بر ارتفاع بوته و قطر ساقه در سطح احتمال یک درصد معنی دار می‌باشد. همچنین اثر متقابل تاریخ کاشت در تلقیح بذر با باکتری محرک رشد گیاهی برای صفت قطر ساقه در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۱).

بیشترین ارتفاع بوته (۵۹/۷۷ سانتی‌متر) نیز در تاریخ کاشت اول به دست آمد که افزایش حدود ۱۰ درصدی در مقایسه با تاریخ کاشت سوم دارد (جدول ۲). بیشترین ارتفاع بوته (حدود ۵۸/۵ سانتی‌متر) متأثر از تلقیح بذر با باکتری‌های افزایشده رشد نیز به طور مشترک در تلقیح بذر با/ازتوباکتر و آزوسپیریلم مشاهده شده که افزایش حدود ۵/۵ درصدی نسبت به شاهد (۵۵/۴۴ سانتی‌متر) را نشان می‌دهد (جدول ۲). مطالعه اثر متقابل تاریخ کاشت در تلقیح بذر با باکتری بر قطر ساقه نشان داد که بیشترین میزان این صفت در تاریخ کاشت اول و تلقیح با/ازتوباکتر حاصل شد. کمترین میزان این صفت در تاریخ کاشت سوم و عدم تلقیح به دست آمد (شکل ۱).

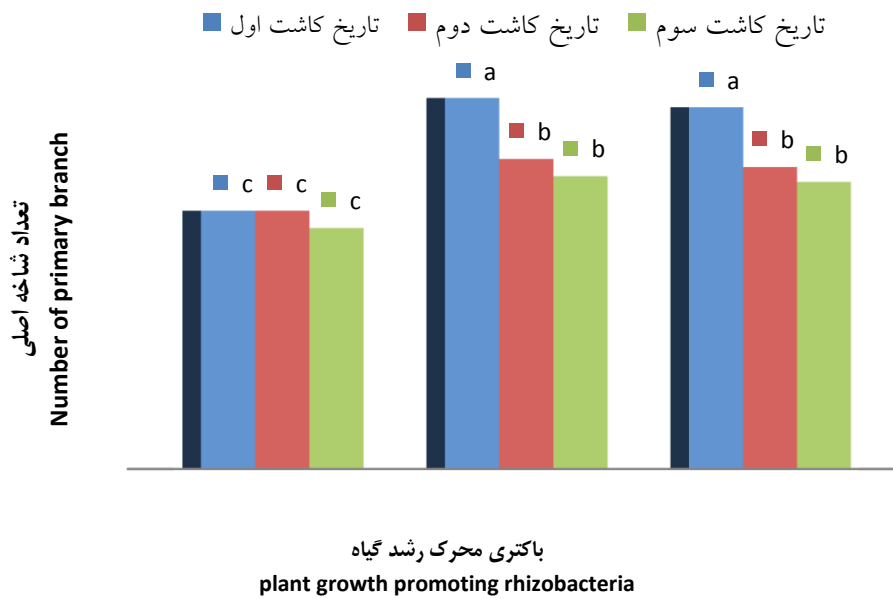
می‌توان افزایش ارتفاع بوته با کاربرد باکتری‌های افزایشده رشد را به اثر احتمالی این باکتری‌ها بر گسترش سطح برگ و افزایش جذب عناصری مانند فسفر، منگنز، منیزیم، کلسیم و روی نسبت داد. افزایش ارتفاع بوته به دنبال کاربرد باکتری افزایشده رشد توسط ولر و کوک (۲۳) و دولینگ و اوگارا (۷) گزارش شده است. این در حالی است که رحیمی و همکاران (۱۹) گزارش کردند کاربرد باکتری سودوموناس فلورسنس بر ارتفاع بوته گلرنگ تأثیر معنی داری ندارد.

تعداد شاخه اصلی و فرعی

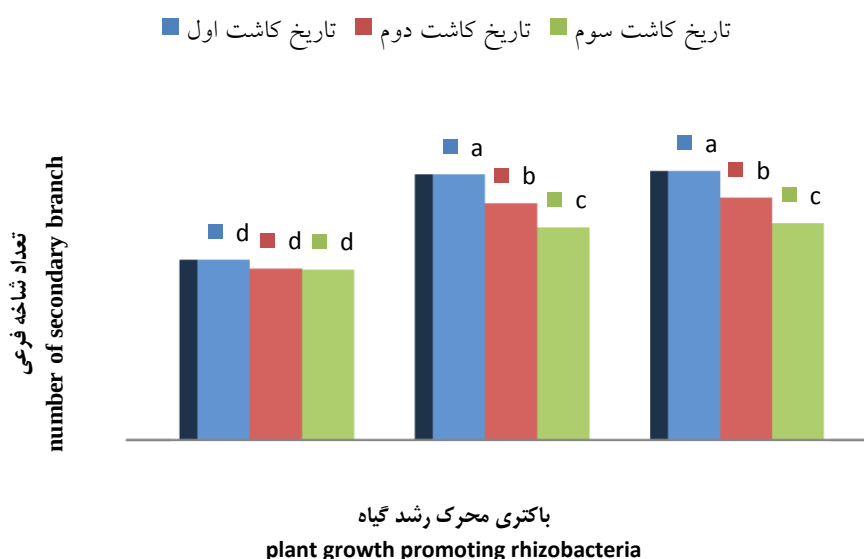
نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس نشان داد اثر ساده و متقابل فاکتورهای آزمایشی بر تعداد شاخه اصلی و فرعی در سطح احتمال یک درصد معنی دار است (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر متقابل تاریخ کاشت در تلقیح بذر با باکتری‌های محرک رشد گیاهی نشان داد که بیشترین تعداد شاخه اصلی (۶/۴۶) و فرعی (۴/۲۰) در تاریخ کاشت اول و تلقیح بذر با باکتری ازتوباکتر حاصل شد. کمترین تعداد شاخه اصلی (۸/۱۰) و فرعی (۵/۱۶) در تاریخ کاشت سوم و عدم تلقیح با باکتری به دست آمد (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل ۱- اثر تلقیح بذر با باکتری‌های افزایش دهنده رشد بر قطر ساقه گلرنگ
Figure 1- The effect of seed inoculation with plant growth promoting rhizobacteria on stem diameter of Safflower



شکل ۲- اثر تلقیح بذر با باکتری‌های افزایش دهنده رشد بر تعداد شاخه اصلی گلرنگ
Figure 2- The effect of seed inoculation with plant growth promoting rhizobacteria on primary branches of Safflower



شکل ۳- اثر تلقیح بذر با باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد بر تعداد شاخه فرعی گلرنگ

Figure 3- The effect of seed inoculation with plant growth promoting rhizobacteria on secondary branches of Safflower

درصد روغن

جدول تجزیه واریانس نشان داد اثر تاریخ کاشت در سطح احتمال یک درصد و اثر تلقیح با باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد در سطح پنج درصد معنی‌دار می‌باشد. همچنین اثر متقابل تاریخ کاشت در تلقیح با باکتری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیشترین درصد روغن (۳۷/۴۴ درصد) در تاریخ کاشت اول و کمترین میزان آن (۳۲/۷۷ درصد) در تاریخ کاشت سوم حاصل گردید، که افزایش ۱۴ درصدی را نشان می‌دهد.

در تلقیح بذر با باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد باکتری ازتوباکتر و آزوسپیریوم به طور مشترک بالاترین درصد روغن (حدود ۳۶ درصد) و عدم تلقیح کمترین درصد روغن (حدود ۳۴ درصد) را به خود اختصاص دادند، که بیانگر افزایش حدود ۵ درصدی درصد روغن در اثر کاربرد باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد مورد مطالعه در این تحقیق می‌باشد. اعتمادی و همکاران (۹) با بررسی تأثیر باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاه بر ویژگی‌های مختلف گلرنگ گزارش کردند که سویه‌های مورد مطالعه آن‌ها درصد روغن را بین ۱۲ تا ۵۲ درصد افزایش دادند. آن‌ها این افزایش را به اثر احتمالی این باکتری‌ها بر گسترش سطح برگ و افزایش جذب عناصری مانند فسفر، منگنز، منیزیم، کلسیم و روی نسبت دادند.

درصد پروتئین

جدول تجزیه واریانس نشان داد اثر تاریخ کاشت و تلقیح بذر با

باکتری ازتوباکتر و آزوسپیریوم بر درصد پروتئین معنی‌دار می‌باشد (جدول ۱). مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیشترین درصد پروتئین (۱۷/۲۱) در تاریخ کاشت اول و کمترین میزان این صفت (۱۵/۴۴) در تاریخ کاشت سوم حاصل گردید. بالاترین درصد پروتئین به طور مشترک در تلقیح بذر با باکتری‌های ازتوباکتر و آزوسپیریوم حاصل شد. کمترین میزان این صفت در عدم تلقیح با باکتری به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده در خصوص تعداد شاخه‌های اصلی و فرعی و افزایش این دو صفت در اثر کاربرد فاکتورهای آزمایشی می‌تواند چنین نتیجه‌گیری کرد که احتمالاً با افزایش شاخه‌ای اصلی و فرعی سطح برگ مناسبی برای گیاه به وجود آمده و در نتیجه موجب افزایش میزان فتوسنتز و جذب مواد و افزایش درصد پروتئین در گیاه شده است.

نتیجه‌گیری

تاریخ کاشت به عنوان یکی از مهمترین عامل‌های مدیریتی در دستیابی به عملکردهای بالا می‌باشد. نتایج نشان داد اثر تاریخ کاشت روی کلیه صفات به جز نسبت مغز به دانه و نسبت پوست به دانه معنی‌دار بود. اثر تلقیح بذر با باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد بر ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد شاخه اصلی و فرعی، درصد روغن و درصد پروتئین معنی‌دار شد. بیشترین تعداد غوزه در بوته، دانه در غوزه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، ارتفاع بوته و درصد پروتئین در تاریخ کاشت اول (۵ فروردین) و کمترین میزان این صفات در تاریخ کاشت سوم (۵ اردیبهشت) حاصل گردید.

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر فاکتورهای آزمایشی بر عملکرد و اجزای عملکرد و برخی صفات مورد مطالعه گلرنگ
Table 1- Analysis of variance of the effect of experimental factors on yield and yield components and some traits of safflower

درجه آزادی df.	غوزه در بوته Number of boll per plant	تعداد غوزه Number of grain per boll	وزن هزار دانه 1000-grain weight	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	شاخص برداشت Harvest index	درصد روغن Oil percentage	درصد پروتئین Protein percentage
تکرار Replication	2	0.14	0.59	0.25	0.25	2.81	1.37	0.23
تاریخ کاشت Planting Date	2	3.37**	7.14**	26.70**	0.59**	5.48*	55.25**	7.09**
تلقیح با باکتری Inoculation by bacteria	2	0.25	0.03	0.92	0.03	0.96	8.92**	13.65**
تاریخ کاشت × تلقیح با باکتری Bacteria × Planting date	4	0.09	0.81	0.48	0.03	1.25	5.7**	0.09
خطا Error	16	0.083	0.21	0.59	0.09	0.21	2.28	0.14
ضریب تغییرات C.V.	-	4.37	3.03	2.28	5.91	3.45	4.24	2.23

*** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد
* and ** Significant in 5 and 1 percentage level, respectively

ادامه جدول ۱. تجزیه واریانس اثر فاکتورهای آزمایشی بر عملکرد و اجزای عملکرد و برخی صفات مورد مطالعه گلرنگ
Continuing Table 1- Analysis of variance of the effect of experimental factors on yield and yield components and some traits of safflower

درجه آزادی df	تعداد شاخه اصلی Number of primary branch	تعداد شاخه فرعی Number of secondary branch	ارتفاع بوته Plant height	قطر ساقه Stem diameter	نسبت مغز به دانه Brain to grain ratio	نسبت پوسته به دانه Ratio of skin to grain
تکرار Replication	2	0.11	3.44	0.24	0.00	0.00
تاریخ کاشت Planting Date	2	2.32**	60.11**	0.97**	0.00	0.00
تلقیح با باکتری Inoculation by bacteria	2	4.28**	27.00**	60.7**	0.00	0.00
تاریخ کاشت × تلقیح با باکتری Bacteria × Planting date	4	0.36**	4.44	0.26**	0.00	0.00
خطا Error	16	0.011	3.36	0.08	0.00	0.00
ضرب تغییرات C.V.	-	2.08	3.19	4.6	1.28	1.09

*** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

* and ** Significant in 5 and 1 percentage level, respectively

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر فاکتورهای آزمایشی بر عملکرد، اجزای عملکرد و برخی صفات مورد مطالعه گلرنگ

Table 2- Mean Comparison of effect of experimental factors on yield, yield components and some traits of safflower								
تاریخ کاشت Date planting	غوزه در بوته Number of boll per plant	غوزه در غوزه Number of grain per boll	وزن هزار دانه (گرم) 1000-grain weight (gr)	عملکرد دانه (گرم در بوته) Grain yield (gr per plant)	عملکرد بیولوژیک (گرم در بوته) Biological yield (gr per plant)	شاخص برداشت (درصد) Harvest index	ارتفاع بوته (سانتی متر) Plant height	درصد پروتئین Protein percent
۵ فروردین 5 March	10.66 a	a _{۱۶/۳۲}	35.44 a	5.44a	16.44a	32.88a	59.77a	17.21a
۲۰ فروردین 20 April	10.00 b	b _{۱۵/۴۴}	33.77b	5.00b	16.00ab	32.00ab	57.88b	16.47b
۵ اردیبهشت 5 May	9.33 c	c _{۱۴/۴۴}	32.00c	5.02b	15.66b	31.33b	54.66c	15.44c
شاهد Control	-	-	-	-	-	-	55.44b	14.95b
تلقیح با باکتری <i>Azotobacter</i>	-	-	-	-	-	-	58.44a	17.06a
ازوسپیریلوم <i>Azospirillum</i>	-	-	-	-	-	-	58.40a	17.11a

اعداد با حروف مشترک در هر ستون دارای اختلاف معنی دار نمی باشند

Numbers followed by the same letter are not significantly different

دست آمد. همچنین بیشترین درصد روغن، تعداد شاخه اصلی، تعداد شاخه فرعی و قطر ساقه در تاریخ کاشت اول و تلقیح با ازتوباکتر حاصل شد. به نظر می رسد استفاده از ازتوباکتر در تاریخ کاشت ۵ فروردین در منطقه مورد آزمایش می تواند نتیجه مطلوب به دنبال داشته باشد.

بیشترین درصد روغن، تعداد شاخه اصلی، تعداد شاخه فرعی و قطر ساقه در تاریخ کاشت اول و تلقیح با ازتوباکتر حاصل شد. کمترین میزان این صفات در تاریخ کاشت سوم و عدم تلقیح به دست آمد. با توجه به این که بیشترین تعداد غوزه در بوته، دانه در غوزه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، ارتفاع بوته و درصد پروتئین در تاریخ کاشت اول (۵ فروردین) به

منابع

- 1- Able G. H. 1976. Relationship and uses of yield components in safflower breeding for high yield. *Agronomy Journal*, 68: 442-447.
- 2- Alinaghizadeh M., Movahhedi Dehnavi M., Faraji H., Dehdari A., and Gandomani A. 2007. Effect of sowing dates on yield and yield components of different spring safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars as a double crop in Yasouj, Iran. *International Safflower Conference*, Australia.
- 3- Bageri M. 1995. The effects of planting date on yield and its components of safflower. M.Sc. Thesis University of Isfahan. 61pp. (In Persian)
- 4- Cakmakci R., Donmez M.F., and Erdogan U. 2007. The effect of plant growth promoting rhizobacteria on barley seedling growth, nutrient uptake, some soil properties and bacterial counts. *Turk. Journal of Agriculture*, 31: 189-199.
- 5- Cazzato E., Ventricelli P., and Corleto A. 1997. Effect of date of seeding and supplemental irrigation on hybrid and open pollinated safflower production in southern Italy. pp. 119-124. 4th International Safflower Conference. Bari, Italy. June 2-7.
- 6- Coshge B., and Kaya D. 2008. Performance of some safflower varieties sown late autumn and late spring. *University of Suleyman Demirel, Technology Institute*, 43: 13-18.
- 7- Dowling D. N., and Ogara F. 1994. Metabolites of *pseudomonas* involved in the biocontrol of plant disease. *Trends. Biotechnology*, 12: 133- 141.
- 8- Esendal E. 2001. Safflower production and research in Turkey. Vth International Safflower Conference, Williston, North Dakota, Sidney, Montana, USA, July 23-27. pp. 203-206.
- 9- Etemadi F., Madah Hosseini S., Dashti H., and Akhgar A. 2014. Investigation of the Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria on Some Growth Indices and Yield Parameters of Safflower Under Different Soil Salinity Levels. *JCPP*. 4(11): 77-87
- 10- Fallahi J., Kochaki A., and Rezvanimogadam P. 2011. Effect of biological fertilizer on yield qualitative and quantitative medicinal herb German Chamomile. *Iranian Journal of Agricultural Research*. 7:127-135.
- 11- 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 World Academy of Science. Engineering and Technology*, 37: 2070-3740.
- 12- Hashim R.M., and Schinter A.A. 1988. Semi-dwarf and conventional height sunflower performance at five plant population. *Agronomy Journal*, 80: 821-829.
- 13- Jajarmi V., Azizi M., Shadlu A., and Omidy-Tabrizi A. H. 2005. The effect of density variety and planting date on yield and yield components of safflower. 7th International Safflower Conference. Australia Juan, 18-19.
- 14- Lyon C. K., Grusman M. R., Betschart A. A., Robins D. J., and Saunders R. M. 1979. Removal of deleterious glucosides from safflower meal. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 56: 560-564.
- 15- Omid A.H., and Sharifmogadas M.R. 2010. Evaluation of Iranian safflower cultivars reaction to different sowing dates and plant densities. *World Applied Sciences Journal*, 8: 953-958.
- 16- Pasary B., Noormohamadi G., Darvish F., Haydarishrifabad H., and Mohamad-Hanifi G. 2005. Study the effect of sowing date on morphological and agronomical characters of two safflower cultivars in double cropping in Sanandaj region. *International Safflower Conference Australia*. Juan, 18-19.
- 17- Pasban-Eslam B. 2011. Drought stress effects on productivity of fall safflower genotypes. *Iranian Journal Field Crop Science*, 42(2): 275-283. (In Persian with English Summary)
- 18- Rahmatalla A.B., Babiker E.E., Krishna A.G., and ElTinay A.H. 2001. Changes in fatty acids composition during seed growth and physicochemical characteristics of oil extracted from four safflower cultivars. *Plant Food for Human Nutrition*, 56: 385-395.
- 19- Rahimi A., Jamialahmadi M., Khavazi K., Sayyari-Zahan M., and Yazdani R. 2013. Effects of different *pseudomonas* fluorescence bacterium strains on yield, yield components and some traits of safflower. *Journal of Plant Eco Physiology*, 5(14): 1-16.

- 20- Sharma A. K. 2003. Biofertilizers for sustainable agriculture. Agrobios, India, 407 pp.
- 21- Tomar S. S. 1995. Effect of soil hydrothermal regimes on the performance of safflower planted on different dates. *Agronomy Journal*, 175: 141- 152.
- 22- Velasco L., and Fernandez-Martinez J. 2001. Breeding for oil quality in safflower. (ed. Bergman JW, Mundel HH), pp: 133-137. *Proceedings of the 5th International Safflower Conference*. Williston, North Dakota and Sidney, Montana, USA.
- 23- Weller D. M., and Cook R.J. 1986. Increased growth of wheat by seed treatments with fluorescent pseudomonad's and implications of pythum control. *Can. Journal Plant Pathology*, 8: 328-334.
- 24- Zahir A.Z., Arshad M., and Frankenberger W.F. 2004. Plant growth promoting rhizobacteria. Application and perspectives in agriculture. *Advance in Agronomy*, 81: 97-168.



The Effect of Seed Inoculation with *Azotobacter* and *Azospirillum* on Yield and some Qualitative and Quantitative Characteristics of Safflower at Different Planting Date

S. Hokmalipour^{1*} - M. Panahyan Kivi² - M. Shiri Janaghard³

Received: 17-01-2018

Accepted: 04-08-2018

Introduction: The excessive uses of chemical fertilizers have generated several environmental problems. Some of these problems can be tackled by use of Biofertilizer, which are natural, beneficial and ecologically friendly. The Biofertilizers provide nutrients to the plants and maintain soil structure. Biofertilizer is an alternative to mineral fertilizers for increasing soil productivity and plant growth in sustainable agriculture. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) are a group of bacteria that actively colonize plant roots and increase plant growth and yield. There is a widespread distribution of PGPR that flourishes in different geographical habitats. These rhizobacteria significantly affect plant growth not only by increasing nutrient cycling, also by suppressing pathogens by producing antibiotics and siderophores or by bacterial and fungal antagonistic substances and/or by other plant hormones. Inoculation of plants with *Azospirillum* could result in significant changes in various growth parameters, such as increase in plant biomass, nutrient uptake, tissue N content, plant height, leaf size and root length of cereals. Thus, it has been shown that *Azospirillum* and *Pseudomonas* have the potential for agricultural exploitation and can be used as natural fertilizers. The divers array of bacteria including *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Klebsilla*, *Entrobacter* and *Serratia* seem to promote plant growth. These bacteria are important components of the rhizosphere of many plants, and are known to colonize the rhizosphere of wheat, potato, maize, grasses, pea and cucumber. Strains of *Pseudomonas putida* and *Pseudomonas fluorescens* could increase root and shoot elongation in wheat. *Azospirillum*, *Pseudomonas* and *Azotobacter* strains could affect seed germination and seedling growth

Materials and Methods: To investigate yield, yield components and some qualitative and quantitative characteristics of safflower at different planting dates, a factorial experiment was conducted based on randomized completed block design with three replications in 2016 at the laboratory of Agricultural University of Payam Noor, Kosar (Kivi) branch. The first factor consists of three sowing dates (5 March, 20 April and 5 May) and the second factor involves the seeds inoculation with plant growth promoting rhizobacteria (no inoculation, seed inoculation with *Azotobacter chorchorum* strain 5 and *Azospirillum lipoferum* strain OF). The climate of studied region is semi-arid with 1350 meters altitude from sea level. Based on the soil test, pH was about 7.1, soil texture was loamy-sand and the depth of top soil was 70 cm. The experimental unit included six ridges of 25 cm in 6 m length. The plant density was 40 plants per m². Each 1 gram bacteria have 10⁷ no, we therefore used about 7 gr from each bacterium for seed inoculation. We also used Arabic gum to adhere the bacteria to the seed.

Results and Discussion: The results showed that the planting date had a significant effect on all characteristics, except brain to grain ratio and the ratio of skin to grain. The effect of seed inoculation with plant growth promoting rhizobacteria was statistically significant on plant height, stem diameter, number of main and sub main branches, seed oil and protein percentage. The maximum number of boll per plant, number of grain per boll, 1000-grain weight, grain yield, biological yield, harvest index, plant height and protein percent were achieved on the first planting date (5 April). The lowest amounts of these traits were obtained on the third planting date (5 May). The maximum oil percentage, number of primary and secondary branches and stem diameter were obtained on the first planting date and seed inoculation by *Azotobacter*. The lowest rates of these

1 and 2- Assistant Professors, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran

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

3- Assistant Professor, Department of Plant Sciences, Moghan College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil

traits were obtained on the third planting date and no inoculation. Thus, seed priming with Azotobacter and first date (5 March) planting are recommendable to increase number of grain per boll, 1000-grain weight, grain yield, biological yield, harvest index, plant height and protein percent and other traits.

Keywords: Number of branches, Oil percentage and harvest index, Plant height, Plant growth promoting rhizobacteria, Protein percentage

بررسی ارتباط فرآیندهای فرسایش بارانی با درصد شیب و محتوای رطوبتی پیشین در خاک‌های منطقه نیمه خشک

علی بلیانی^{۱*} - علیرضا واعظی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۱

چکیده

فرسایش بارانی نقشی مهم در تخریب خاک سطحی به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک ایفاء می کند. فرسایش ناشی از قطرات باران عامل عمده تخریب خاک مانند تراکم و مقاومت خاک و هدررفت خاک سطحی است. این پژوهش به منظور ارزیابی اثرات فرسایش بارانی بر هدررفت پاشمانی خاک، تراکم خاک و مقاومت سطح خاک تحت تأثیر درجه شیب و محتوای رطوبت پیشین در خاک‌های مختلف انجام شد. در این راستا شش نوع بافت خاک (رس، سیلت، لوم رسی، لوم سیلتی، لوم شنی و شن) در معرض بارانی با شدت ۴۰ میلی متر بر ساعت به مدت ۱۵ دقیقه در چهار درجه شیب (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) و چهار سطح محتوای رطوبت پیشین (هواخشک، یک چهارم اشباع، نیمه اشباع و اشباع) قرار گرفت. مجموعاً تعداد ۲۸۸ جعبه خاک به ابعاد ۳۵ سانتی متر × ۲۵ سانتی متر با آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تفاوت معنی داری ($p < 0.01$) بین خاک‌ها از نظر مقدار فرسایش پاشمان، تراکم خاک و مقاومت سطح وجود داشت. در میان شش بافت خاک مورد پژوهش، خاک با بافت سیلت بالاترین میانگین فرسایش پاشمان (۱۵۷۴/۹۳ گرم بر متر مربع بر ساعت)، تراکم خاک (۱۷/۴۳ درصد) و نسبت مقاومت خاک (۱۰/۵۳ بدون بعد) را داشت و خاک با بافت شن کمترین میانگین فرسایش پاشمان (۴۳۷/۳۷ گرم بر متر مربع بر ساعت)، تراکم خاک (۰/۲۵ درصد) و نسبت مقاومت خاک (۲/۶۶ بدون بعد) را نشان داد. همچنین همبستگی معنی داری بین فرسایش پاشمان، تراکم خاک و نسبت مقاومت خاک با برخی ویژگی‌های خاک شامل درصد شن، درصد سیلت، میانگین هندسی قطر ذرات، چگالی ظاهری، هدایت هیدرولیکی اشباع و کرنات کلسیم معادل مشاهده شد. نتایج این پژوهش می تواند در مدیریت منابع آب و خاک به ویژه در اراضی شیب دار با خاک‌های حساس به فرسایش ناشی از قطرات باران استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: تراکم خاک، درجه شیب، رطوبت خاک، فرسایش پاشمان، نسبت مقاومت سطح خاک

مقدمه

تراکم خاک به کار برده شده است. مقاومت سطح خاک با استفاده از فروسنج^۴ (وسیله‌ای جهت تعیین مقاومت خاک در برابر نفوذ بر حسب مگاپاسکال یا کیلوپاسکال) قابل تعیین است. این ویژگی خاک دارای تغییرات مکانی است و با تغییر مقدار رطوبت خاک تغییر می کند (۲). هدررفت خاک در اثر فرسایش بارانی، تراکم خاک^۵ و مقاومت خاک‌ها از طریق هدررفت عناصر غذایی و مقاومت سطح خاک در برابر ریشه دوانی گیاهان موجب افت کمی و کیفی حاصلخیزی و باروری خاک‌ها می شوند و در نتیجه امنیت غذایی^۶ جهان را به شدت به خطر می اندازند (۱۶). شدت و ضعف وقوع این عوامل تحت تأثیر برخورد قطرات باران به شیب اراضی، محتوای رطوبت پیشین خاک‌ها و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ذاتی خاک‌ها مرتبط می باشند و در

فرسایش بارانی یا فرسایش ناشی از قطرات باران^۳ شامل برخورد قطرات باران، پاشمان ذرات خاک و تشکیل چاله‌هایی در سطح خاک می باشد (۸). فرسایش بارانی شامل فرآیندهای مختلفی مانند تخریب خاک دانه‌ها، تراکم خاک و پاشمان ذرات است (۳۴) که به نوبه خود به ویژگی‌های خاک از جمله پایداری خاک دانه‌ها وابسته است (۳۵). تراکم خاک بیانگر تفاوت بین چگالی ظاهری اولیه و چگالی ظاهری ثانویه خاک در اثر تراکم است (۲۷). مقاومت سطح خاک در برابر فروسنج در بسیاری از پژوهش‌ها به عنوان ابزاری جهت توصیف

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

(*)- نویسنده مسئول:

(Email: alibalani63@gmail.com)

DOI: 10.22067/jsw.v32i5.70295

3- Raindrop-impact-induced erosion

4- Penetrometer

5- Soil compaction

6- Food security

خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک که سطح خاک‌ها به طور عمده بدون پوشش گیاهی هستند با شدت بالاتری رخ می‌دهند (۱۱، ۱۲ و ۱۸).

پژوهش‌های بسیاری بر روی اثرات شیب سطح و رطوبت پیشین خاک بر فرسایش ناشی از قطرات باران انجام گرفته است. در این زمینه ویو و همکاران (۳۹) اثرات شدت فرسایش (بدون فرسایش، فرسایش متوسط، فرسایش شدید و فرسایش خیلی شدید) و شدت باران را بر فرآیندهای فرسایش خاک شامل تولید رسوب و رواناب بررسی کردند و گزارش کردند مقدار رسوب تولید شده همبستگی مثبت معنی‌دار با مقدار سیلت و رس دارند و همچنین چگالی ظاهری همبستگی منفی معنی‌دار با مقدار رسوب و رواناب تولیدی دارند. و دیویرا و همکاران (۴۰) اثرات رس، ماده آلی و شدت خیس شدن و رطوبت پیشین خاک را بر روی جداسازی پاشمانی و تخریب خاکدانه بررسی کردند و بیان داشتند شکستن خاکدانه و جداسازی ذرات خاک به صورت پاشمان با ماده آلی و رس رابطه منفی دارد. رضایی‌پاشا و همکاران (۲۲) فرسایش پاشمانی را با استفاده از شبیه‌ساز باران و کاسه پاشمان و ارتباط آن با ویژگی‌های خاک در سه کاربری جنگل، کشاورزی و مرتع بررسی کردند و بیان داشتند که درصد سیلت در کاربری کشاورزی دارای همبستگی مثبت معنی‌دار و ماده آلی در کاربری مرتع دارای همبستگی منفی معنی‌دار با نرخ پاشمان بود. ویو و همکاران (۳۸) فرسایش پاشمان مخلوط شن و رس را بررسی کردند و نشان دادند فرسایش پاشمان به طور معنی‌داری تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات بود به علاوه بیان داشتند فرسایش پاشمان در حالت خشک بیش از حالت مرطوب بود و با چسبندگی خاک ارتباط منفی داشت. درویشان و همکاران (۳) تأثیرپذیری ضریب رواناب از شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک را در خاک با بافت شن لومی در شدت‌های باران ۳۰ تا ۶۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه بررسی کردند و بیان داشتند ضریب رواناب با شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک رابطه معنی‌دار دارد. واتانگ و همکاران (۳۷) تأثیر شش شدت باران مختلف و مقدار رطوبت پیشین را بر پاشمان خاک در خاک اکسی‌سول در منطقه هواپی با استفاده از معادله عمومی پاشمان بررسی و نشان دادند که رطوبت پیشین تأثیری بر مقدار پاشمان خاک در دو حالت مرطوب و خشک نداشت. سعیدی و همکاران (۲۴) اثرات مستقیم و غیرمستقیم ویژگی‌های خاک بر میزان فرسایش پاشمان در خاک‌های آهکی زاگرس مرکزی در ایران در دو سطح شیب ۵ و ۱۵ درصد و شدت ۵۰ و ۸۰ میلی‌متر بر ساعت را بررسی و بیان داشتند که افزایش درصد شیب و شدت بارش باعث تشدید فرسایش پاشمانی گردید. اکیو و هرلیل (۷) تأثیر سه نوع خاک لوم‌شنی، لوم‌رسی و رسی را با سه سطح ماده آلی و در چهار سطح شیب ۹ تا ۳۰ درصد بر روی رواناب و فرسایش بارانی در ترینیداد و توباگو مورد بررسی قرار داده و نشان

دادند که مقدار فرسایش بارانی با افزایش درصد شیب افزایش یافت و با افزایش ماده آلی نفوذپذیری افزایش و مقدار رواناب و هدررفت خاک در تمام انواع خاک‌ها و شیب‌های مختلف کاهش یافت.

در خصوص تأثیر درصد شیب و محتوای رطوبت پیشین بر مقاومت سطح خاک و تراکم خاک ناشی از فرسایش بارانی پژوهش‌های اندکی گزارش شده است و گزارش‌های موجود نیز به طور عمده درخصوص تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها بر مقاومت سطح خاک و تراکم خاک می‌باشد (۵ و ۲۹). در این راستا آسولاین و همکاران (۱) تراکم‌پذیری دو خاک اکسی‌سول را بررسی کردند و بیان داشتند که بافت خاک، اسیدیته، ظرفیت تبادل کاتیونی و ماده آلی خاک باعث تفاوت در تراکم‌پذیری خاک می‌شود. یوتست و همکاران (۳۲) مقاومت خاک فروسول را قبل و ۲۴ ساعت بعد از آبیاری بررسی کردند و بیان داشتند مقاومت به فروروی ارتباط قوی با مقدار آب خاک دارد. به علاوه بیان داشتند مقاومت سطح خاک با چگالی ظاهری همبستگی معنی‌داری نداشت. اسمیت و همکاران (۲۶) اثر تراکم و ویژگی‌های فیزیکی خاک را بر روی مقاومت خاک به نفوذپذیری ۲۹ خاک جنگلی آفریقای جنوبی محدوده بافتی ۸ تا ۶۶ درصد رس و ۰/۲۶ تا ۵/۷۷ درصد مقدار کربن آلی خاک را بررسی کردند و بیان داشتند مقدار کربن آلی و رس بر روابط مقدار آب-تراکم-مقاومت به فروروی اثرگذار بود و اثر کربن آلی روی روابط مقدار آب-تراکم-مقاومت به فروروی در خاک‌های ریز بافت (< ۳۰ درصد رس + سیلت) ناچیز بود. دیاز-زوریت و گروسو (۶) اثر بافت خاک، کربن آلی و مقدار رطوبت را بر روی تراکم‌پذیری خاک‌های با بافت شن لومی، لوم و لوم سیلتی با متراکم نمودن نمونه‌ها توسط ضربات چکش بررسی کردند و بیان داشتند خاک‌های با مقدار رطوبت و ماده آلی بالاتر تراکم‌پذیری کم‌تری داشتند.

خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک اغلب با پوشش گیاهی ضعیف و یا بدون پوشش سطحی هستند و به سبب کمبود ماده آلی خاک، کربنات کلسیم معادل بالا و ناپایداری ساختمان خاک، مقاومت اندکی در برابر ضربه قطرات باران دارند. از این رو میزان فرسایش بارانی، مقاومت سطح خاک و درصد تراکم در خاک‌های این مناطق بیش‌تر است (۳۱). به طور کلی در پژوهش‌های پیشین، تغییرات فرسایش ناشی از قطرات باران، تراکم خاک و مقاومت سطح به طور همزمان در خاک‌های با بافت مختلف مورد بررسی قرار نگرفته است همچنین اطلاعات اندکی در مورد ارتباط این فرآیندها با درجه شیب و محتوای رطوبتی در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک وجود دارد. با توجه به نقش تخریبی باران در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر شیب سطح و رطوبت خاک بر مقدار فرسایش پاشمانی، درصد تراکم و مقاومت سطح خاک در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک انجام گرفت. همچنین ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با مقدار فرسایش پاشمانی، درصد تراکم و

مقاومت سطح خاک مورد مطالعه قرار گرفت.

نمونه برداری خاک

در این پژوهش نمونه‌های خاک از اراضی غیرکشاورزی استان‌های زنجان و فارس برداشت شد. از بین شش گروه بافت خاک، پنج بافت خاک (رس، لوم‌رسی، لوم‌سیلتی، لوم‌شنی و شن) از مناطق مختلف استان زنجان و خاک با بافت سیلت از حوزه آبخیز پرسپولیس واقع در ۴۰ کیلومتری غرب شهرستان مرودشت استان فارس شناسایی شد. به طور متوسط مقدار ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم از هر خاک از عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر برداشت شد. پس از انتقال خاک‌ها به آزمایشگاه، برای حذف تأثیر اجزای درشت سنگی (۲۷) بر فرآیندهای فرسایش بارانی، نمونه‌های خاک از الک ۱۰ میلی‌متر عبور داده شد (جدول ۱).

مواد و روش‌ها

طرح آزمایشی

این پژوهش در شش کلاس بافت خاک (رس، سیلت، لوم‌رسی، لوم‌سیلتی، لوم‌شنی و شن)، در چهار سطح شیب (از حالت بدون شیب، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد که شیب غالب مناطق نمونه‌برداری بود)، چهار سطح محتوای رطوبت پیشین (رطوبت هوا خشک، ۲۵ درصد اشباع، ۵۰ درصد اشباع و ۱۰۰ درصد اشباع)، تحت بارانی با شدت ثابت ۴۰ میلی‌متر بر ساعت و در سه تکرار در مجموع با ۲۸۸ واحد آزمایشی به صورت فاکتوریل با طرح کاملاً تصادفی انجام شد.

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی و نوع سازند خاک‌های مورد بررسی

Table 1- Geographic coordination and geologic formation of study soils

نوع سازند Geology type	موقعیت جغرافیایی Geographic coordination		رده خاک Soil order	بافت خاک Soil texture
	طول Longitude	عرض Latitude		
شیل‌های آهکی میکادار Calcareous shale	4094477	241187	اینسپتی‌سول Inceptisol	رس Clay
گل‌سنگ-ژپیس Gypsum-Lichen	4093351	242688	اینسپتی‌سول Inceptisol	لوم رسی Clay loam
ذخایر تراسی-مخروط افکنه‌های کوهپایه‌ای قدیمی Terrace reservoirs-Alluvial fan of ancient hills	4063707	268212	اینسپتی‌سول Inceptisol	لوم سیلتی Silt loam
سازند گچساران Gachsaran formation	4072213	268706	انتی‌سول Inceptisol	لوم شنی Sandy loam
گل‌سنگ-ژپیس و ماسه سنگ Gypsum-Lichenand sandstone	4093535	242719	انتی‌سول Inceptisol	شن Sand
سنگ آهک-شیل و مارن Limestone-shale and marl	3332263	650149	اینسپتی‌سول Inceptisol	سیلت Silt

۱). بعد از هر مرتبه اشباع از زیر و خشک نمودن، چگالی ظاهری تا نزدیک شدن به چگالی ظاهری خاک طبیعی مجدداً اندازه‌گیری شد.

تعیین ویژگی‌های خاک‌ها

در نمونه‌های خاک، درصد شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری اندازه‌گیری شد (۲۷) و میانگین هندسی قطر ذرات (Dg) بر اساس روش شیرازی و بورسما (۱۹۸۴) تعیین شد (۲۵). میانگین وزنی قطر^۱ (MWD_{wet}) خاک‌دانه‌های پایدار در آب (خاک‌دانه‌های

واحدهای آزمایشی

در این پژوهش از جعبه‌های خاک به ابعاد ۳۵ × ۲۵ سانتی‌متر با عمق پنج سانتی‌متر استفاده شد. جعبه‌های دارای قابلیت نفوذ بوده و در کف آن‌ها از یک لایه فیلتر شنی جدا از ذرات خاک اصلی به ضخامت ۱ سانتی‌متر استفاده شد (۳۴). چگالی ظاهری خاک در نقاط تحت نمونه‌برداری به وسیله سیلندر فلزی به قطر ۲۰ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر تعیین شد (۲۸). برای نزدیک شدن چگالی ظاهری خاک داخل جعبه‌های پاشمان به شرایط طبیعی، نمونه‌های خاک در چند مرحله از زیر جعبه اشباع و در شرایط هوای آزاد خشک شدند (شکل

1- Mean weight diameter

درشت بافت) و بار افتان (در خاک‌های ریز بافت) تعیین شد (۲۱).

شبیه‌سازی باران

به منظور شبیه‌سازی باران، از شدت بارش ۴۰ میلی‌متر بر ساعت با مدت بارش ۱۵ دقیقه (بر اساس تحلیل داده‌های شدت-مدت باران‌های منطقه در یک دوره زمانی ۱۰ ساله از سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۶) استفاده شد. برای تولید باران از یک دستگاه باران‌ساز با ابعاد ۱ در ۲ متر و ارتفاع ۳ متر استفاده شد. صفحه بارش دستگاه از ۵۰۰ قطعه نازل تشکیل شده بود. یکنواختی ریزش باران با قرار دادن ظروف در جهت طولی و عرضی و جمع‌آوری حجم باران در مدت معین (۱۵ دقیقه) با استفاده از ضریب یکنواختی به روش کریستیانسن معادله (۲) ۸۰ درصد بود (شکل ۱).

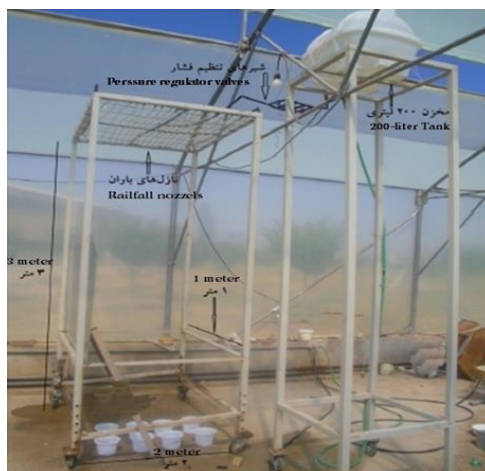
$$CUC(\%) = \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - \bar{x}|}{n \bar{x}} \right) \times 100 \quad (2)$$

که در آن: CUC ضریب یکنواختی کریستیانسن بر حسب درصد، x_i عمق آب در هر یک از ظروف جمع‌آوری آب، $\bar{x}$ میانگین عمق آب درون ظروف و n تعداد کل ظروف است (۱۹).

عبوری از الک شماره ۳/۸ اینچ با قطر ۹/۵ میلی‌متر و باقیمانده بر روی الک شماره ۱۰ با قطر ۲ میلی‌متر) که به طور عمده قطر کم‌تر از ۵ میلی‌متر داشتند را به مدت یک دقیقه با سرعت ۲۰ نوسان در دقیقه (۳۴) با استفاده از چهار الک غوطه‌ور در آب (۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱ و ۰/۰۵ میلی‌متر) با استفاده از معادله (۱) به دست آمد (۲۰ و ۴۱).

$$MWD_{wet} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{W_{i(a+s)} - W_{i(s)}}{\sum_{i=1}^n W_{i(a+s)} - \sum_{i=1}^n W_{i(s)}} \right) \bar{X}_i \quad (1)$$

که در آن‌ها: $\bar{X}_i$ میانگین قطر ذره (بر حسب میلی‌متر) و W_i نسبت جرمی خاک‌دانه‌های پایدار در آب به جرم کل خاک‌دانه‌ها است و n تعداد الک‌ها می‌باشد. به منظور حذف خطای اندازه‌گیری جرم شن به جای جرم خاک دانه، خاک‌دانه‌های باقیمانده روی الک‌ها ابتدا در آب پراکنده و دوباره روی الک مانند خود ریخته شدند و سپس جرم ذرات باقیمانده شن (W_s) روی هر الک پس از خشک شدن تعیین شد و از جرم اولیه خاک‌دانه‌های روی هر الک (W_{a+s}) کم شدند (۳۴). مقدار ماده آلی خاک به روش والکلی و بلاک (۲۱) و درصد کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با استفاده از اسید کلریدریک ۱ نرمال (۲۱) تعیین شد. درصد سدیم تبادلی (ESP) بر اساس نسبت سدیم تبادلی و ظرفیت تبادل کاتیونی تعیین شد (۲۸). هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (در خاک‌های



شکل ۱- نمایی از دستگاه باران‌ساز آزمایشگاه فرسایش خاک دانشگاه زنجان
Figure 1- Rainfall simulator from Soil Erosion Laboratory of the University of Zanjan

رسیدن به رطوبت‌های پایین‌تر قرار داده شدند (شکل ۲ الف و ب).

تعیین سطوح شیب

چهار سطح شیب شامل صفر (بدون شیب)، شیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد بر روی جعبه‌های خاک اعمال شد. این شیب‌ها بر مبنای شیب غالب خاک‌های موجود در مناطق مورد بررسی بود. نمونه‌های خاک تحت شیب‌های مذکور در زیر دستگاه باران‌ساز قرار گرفتند (شکل ۲).

اعمال سطوح رطوبتی به خاک‌ها

در این پژوهش چهار سطح رطوبتی شامل هواخشک (به طور میانگین ۵ درصد اشباع)، یک چهارم اشباع (۲۵ درصد اشباع)، نیمه‌اشباع (۵۰ درصد اشباع) و رطوبت اشباع (۱۰۰ درصد اشباع) بر روی نمونه‌ها اعمال شد. حالت اشباع با قرار دادن نمونه‌ها درون آب مقطر و اشباع خاک از زیر به روش مؤئینگی حاصل شد (۲۸)، سپس برای حصول سایر سطوح رطوبتی، نمونه‌های اشباع در شرایط سایه تا



(ب)



(الف)

شکل ۲- تعدادی از جعبه‌های خاک در حوضچه آب جهت اشباع‌سازی نمونه‌ها به روش موینیگی (الف)، و محفظه پاشمان دربرگیرنده جعبه خاک (ب)

Figure 2- Some soil samples placed in water box for capillary wetting (a) and splash box containing soil plot (b)

اندازه‌گیری فرسایش پاشمانی

برای اندازه‌گیری فرسایش پاشمانی، جعبه‌های محتوی خاک درون محفظه‌های گالوانیزه به ابعاد ۵۰×۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر به منظور به دام انداختن ذرات خاک پاشمان یافته قرار گرفتند (۳۴). جعبه‌ها زیر دستگاه شبیه‌ساز باران در شیب معین قرار گرفتند. ذرات خاک خارج شده در اثر پاشمان جمع‌آوری و پس از گذاشتن در آون (دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت)، جرم آن‌ها بر حسب گرم بر متر مربع بر ساعت تعیین شد (شکل ۲).

اندازه‌گیری نسبت مقاومت خاک

مقاومت سطح نمونه‌های خاک به وسیله دستگاه فروسنج^۱ مدل Koehler بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع پیش (مقاومت ثانویه) و پس (مقاومت اولیه) از اعمال باران تعیین و با حذف واحدهای یکسان صورت و مخرج به صورت نسبت مقاومت سطح خاک (بدون بعد) تعیین شد. در حالت هواخشک اندازه‌گیری شد (معادله ۳). برای حذف تأثیر رطوبت خاک بر مقاومت سطح، اندازه‌گیری مقاومت خاک پس از اعمال باران مانند پیش از باران، در حالت هواخشک انجام شد.

نسبت مقاومت سطح خاک

$$= \frac{\text{مقاومت سطح خاک اولیه} - \text{مقاومت سطح خاک ثانویه}}{\text{مقاومت سطح خاک اولیه}} \quad (۳)$$

اندازه‌گیری تراکم خاک

تراکم خاک بر اساس چگالی ظاهری آن قابل بیان است. در خاک طبیعی که در معرض عامل تخریب کننده یا متراکم کننده قرار ندارند، درصد تراکم خاک با کمک معادله (۴) صفر است. بارندگی یکی از عوامل تخریب ساختمان خاک سطحی است که منجر به افزایش چگالی ظاهری خاک می‌شود و در نتیجه تراکم خاک سطحی را به دنبال دارد. جهت تعیین درصد تراکم خاک‌ها چگالی ظاهری خاک‌ها پس از باران (چگالی ثانویه خاک) نسبت به پیش از باران (چگالی اولیه خاک) با استفاده از معادله (۴) تعیین شد:

درصد تراکم خاک

$$= \frac{\text{چگالی ظاهری اولیه} - \text{چگالی ظاهری ثانویه}}{\text{چگالی ظاهری اولیه}} \times 100 \quad (۴)$$

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پیش از تحلیل داده‌ها، ابتدا نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها با آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شدند (جدول ۳). تجزیه واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها تفاوت آماری بین تیمارها با استفاده از آزمون دانکن در محیط SAS 9.4 انجام گرفت. نمودارهای فرسایش بارانی با نرم‌افزار SigmaPlot 12.0 رسم شد. ماتریس همبستگی ویژگی‌های خاک با فرآیندهای فرسایش بارانی بر اساس بالاترین

ضریب همبستگی پیرسون (r) با استفاده از نرم افزار SAS 9.4 تعیین شدند.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک‌ها

در جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شش کلاس بافت خاک نشان داده شده است. پایداری خاک‌دانه‌ها در آب برای هر شش بافت خاک کم‌تر از 0.4 میلی‌متر بود که نشان از ناپایداری شدید خاک‌دانه‌ها در برابر عوامل فرساینده مانند باران می‌باشد. خاک با بافت شن و لوم شنی فاقد هر گونه خاک‌دانه‌ای بودند و از این رو پایداری خاک‌دانه در آن‌ها صفر بود. خاک‌دانه‌های خاک‌های میان

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد پژوهش

Table 2- Some of physical and chemical properties of the soils

بافت خاک Soil texture	شن (درصد) Sand (%)	سیلت (درصد) Silt (%)	رس (درصد) Clay (%)	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Bulk density (g cm ⁻³)	میانگین هندسی قطر ذرات (میلی‌متر) Geometric mean diameter (mm)	پایداری خاک‌دانه (میلی‌متر) Aggregate stability (mm)	هدایت هیدرولیکی (سانتی‌متر بر روز) Saturate hydraulic conductivity (cm day ⁻¹)	درصد سدیم قابل تبادل (درصد) Exchangeable sodium percentage (%)	ماده آلی (درصد) Organic matter (%)	کربنات کلسیم معادل (درصد) Calcium Carbonate Equivalent (%)
رس Clay	12.35	24.35	63.3	1.07	0.01	0.38	41.54	9.12	1.01	25.0
سیلت Silt										
لوم رسی Clay loam	4	84	12	1.25	0.02	0.10	44.09	3.34	0.61	48.7
لوم سیلتی Silt loam	35	27	38	1.21	0.03	0.08	31.3	6.4	1.55	22.98
لوم شنی Sandy loam	27	53	20	1.30	0.04	0	24.32	7.07	0.24	34.0
شن Sand	75	21	4	1.50	0.34	0	89.66	5.9	0.69	12.0
	95	3	2	1.68	0.8	0	518.15	2.3	0.47	2.50

پیامدهای فرسایش بارانی

تحلیل استنباطی داده‌های فرآیندهای فرسایش بارانی با آزمون شاپیرو-ویلک در سطح 0.05 درصد معنی‌دار نبود و فرض صفر مبنی بر نرمال بودن داده‌ها اثبات شد (جدول ۳). بنابراین از روش‌های پارامتریک جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد. در میان شش بافت خاک مورد پژوهش، خاک با بافت سیلت با میانگین $1113/01$ گرم بر مترمربع بر ساعت بیش‌ترین و خاک با بافت شن با میانگین

$364/84$ گرم بر متر مربع بر ساعت کم‌ترین تغییرات را به اعمال تیمارهای درصد شیب و رطوبت خاک از نظر مقدار فرسایش پاشمانی نشان دادند (جدول ۳). همچنین در خصوص نسبت مقاومت سطح در میان شش بافت مورد پژوهش خاک با بافت سیلت با میانگین $10/31$ بیش‌ترین و خاک با بافت شن با میانگین $2/48$ کم‌ترین تغییرات را به اعمال تیمارهای درصد شیب و رطوبت خاک نشان دادند. به علاوه تغییرات تراکم خاک در میان شش بافت خاک نشان داد که بافت

سیلت با میانگین ۱۵/۰۱ درصد بیشترین و بافت شن با میانگین ۰/۲۳ درصد کمترین تغییرات را به اعمال درصد شیب و رطوبت خاک نشان دادند (جدول ۳). به طور کلی بافت سیلت و بافت شن به ترتیب دارای بیشترین و کمترین حساسیت به اثر تخریبی قطرات باران بودند. دلیل این نتایج ممکن است به اندازه و ماهیت ذرات تشکیل دهنده بافت‌های خاک مرتبط باشد (جدول‌های ۱ و ۳).

جدول ۳- آماره‌های توصیفی و استنباطی داده‌های فرآیندهای فرسایش بارانی

Table 3- Descriptive statistics of rainfall erosion processes

بافت خاک Soil texture	فرسایش پاشمان (گرم بر متر مربع بر ساعت) Splash erosion ($\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)				تراکم خاک (درصد) Soil compaction (%)				نسبت مقاومت خاک Soil resistance ratio			
	کم‌ترین Min	بیش‌ترین Max	میانگین Mean	*آزمون شاپیرو ویلک Shapiro-Wilk test	کم‌ترین Min	بیش‌ترین Max	میانگین Mean	*آزمون شاپیرو ویلک Shapiro-Wilk test	کم‌ترین Min	بیش‌ترین Max	میانگین Mean	*آزمون شاپیرو ویلک Shapiro-Wilk test
رس Clay	603.86	1601.95	633.12	0.92	13.41	15.90	14.10	0.96	4.43	12.46	8.73	0.95
سیلت Silt												
لوم Clay loam	728.32	2456.54	1113.01	0.94	13.00	22.38	15.01	0.91	7.84	13.40	10.31	0.90
رسی Clay loam												
لوم Silt loam	574.85	885.34	602.61	0.91	12.82	15.32	13.51	0.93	2.80	5.64	3.31	0.92
سیلتی Silt loam												
لوم شنی Sandy loam	856.59	2296.21	775.48	0.90	14.30	20.47	13.54	0.92	6.63	11.86	8.97	0.94
شن Sand												
	410.11	1137.60	406.84	0.91	4.77	5.64	4.76	0.95	3.10	4.66	3.23	0.93
	177.88	691.80	364.84	0.97	0.16	0.34	0.23	0.93	1.91	3.23	2.48	0.98

*: Significat at the 5% level

*معنی‌دار در سطح ۵ درصد

حد میانه و در خاک با بافت شن با ۴۳۷/۳۷ گرم بر متر مربع بر ساعت کمترین مقدار را نشان داد. دلیل این حالت ممکن است به اندازه و چسبندگی ذرات خاک بستگی داشته باشد و هر چه اندازه ذرات کوچک‌تر و خاصیت چسبندگی ضعیف‌تر باشد مقدار فرسایش بالاتر خواهد بود (۱۰). بافت لوم‌رس با وجود توزیع اندازه ذرات کوچک‌تر از بافت سیلت به دلیل درصد رس و خاصیت چسبندگی بالاتر فرسایش کمتری از بافت سیلت را نشان داد. مقایسه میانگین اثر بافت خاک بر درصد تراکم به ترتیب به صورت سیلت < لوم سیلتی < رس < لوم رسی < لوم شنی < شن بود. همچنین مقاومت سطح خاک به فروروی به ترتیب به صورت سیلت < لوم سیلت < رس < لوم رس < لوم شنی < شن بود به عبارتی در خاک با بافت سیلت بالاترین (مقاومت ثانویه ۱۰/۵۳ برابر بزرگ‌تر از مقاومت اولیه بود) و در بافت شن کمترین مقدار (مقاومت ثانویه ۲/۶۶ برابر

همچنین اثرات مستقیم و متقابل بافت خاک، درصد شیب و محتوای رطوبت پیشین و اثرات متقابل این عوامل بر میانگین داده‌های فرآیندهای فرسایش بارانی در سطح یک درصد معنی‌دار بود. به عبارتی با احتمال ۹۹ درصد اثر معنی‌دار تیمارها بر میانگین داده‌های فرآیندهای فرسایش بارانی ناشی از تصادف نبوده است.

تأثیر بافت خاک بر فرآیندهای فرسایش بارانی

جدول ۴ مقایسه میانگین اثرات بافت خاک، درصد شیب و محتوای رطوبت پیشین بر فرآیندهای فرسایش بارانی را نشان می‌دهد. تفاوت معنی‌داری ($P < 0.01$) بین میانگین داده‌های فرآیندهای فرسایش بارانی در بافت‌های خاک مشاهده شد، فرسایش پاشمان در خاک با بافت سیلت با ۱۵۷۴/۹۳ گرم بر مترمربع بر ساعت بیش‌ترین، خاک با بافت رس با ۱۰۷۹/۳۲ گرم بر مترمربع بر ساعت

بزرگ تر از مقاومت اولیه بود) مشاهده شد. این نتایج با یافته‌های تو و کی (۲۹) و دکستر و چزی (۵) که بیان داشتند افزایش درصد رس به علاوه کاهش درصد شن خاک‌ها و بالعکس (کاهش درصد رس و افزایش درصد شن) موجب افزایش مقاومت خاک به فروروی می‌شود مطابقت داشت.

شیب مقدار فرسایش، مقاومت سطح به فروروی و درصد تراکم بافت-های خاک افزایش نشان دادند، به عبارتی با افزایش درصد شیب سطح، خاک‌ها حساسیت بالاتری را به اثرات تخریبی ضربه قطرات باران نشان دادند.

تأثیر شیب سطح بر فرآیندهای فرسایش بارانی

همچنین جدول ۴ تغییرات فرآیندهای فرسایش بارانی تحت تأثیر شیب سطح را نشان می‌دهد ($P < 0.01$)، به طور کلی با افزایش درصد

تأثیر محتوای رطوبتی خاک بر فرآیندهای فرسایش بارانی

جدول ۴ فرآیندهای فرسایش بارانی تحت تأثیر محتوای رطوبتی پیشین خاک را نشان می‌دهد.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات بافت خاک، شیب سطح و محتوای رطوبت پیشین بر فرسایش پاشمائی، تراکم خاک و نسبت مقاومت خاک
Table 4- Mean comparison for the effects of soil texture, slope, and antecedent moisture content on the splash erosion, soil compaction, and soil resistance ratio

تیمارها Treatments		فرآیندهای فرسایش بارانی Rainfall erosion processes		
تیمار Treatment	سطح Level	فرسایش پاشمان (گرم بر مترمربع بر ساعت) Splash erosion ($\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	نسبت مقاومت خاک (بدون بعد) Soil resistance ratio (no dimension)	تراکم خاک (درصد) Soil compaction (percent)
بافت خاک Soil texture	سیلت Silt	1574.93 ^a	10.53 ^a	17.43 ^a
	لوم سیلتی Silt loam	1335.14 ^b	9.17 ^b	16.76 ^b
	رس Clay	1079.32 ^c	9.28 ^b	14.53 ^c
	لوم رسی Clay loam	748.61 ^d	3.84 ^c	13.95 ^d
	لوم شنی Sandy loam	652.05 ^e	3.79 ^c	5.05 ^e
	شن Sand	437.37 ^f	2.66 ^d	0.25 ^f
شیب سطح (درصد) Slope (percent)	0	869.29 ^c	5.94 ^d	11.09 ^b
	10	863.89 ^c	6.45 ^c	10.85 ^c
	20	934.26 ^b	6.58 ^b	11.12 ^b
	30	1217.51 ^a	7.20 ^a	12.26 ^a
محتوای رطوبت پیشین (درصد) Antecedent moisture content (percent)	5	881.14 ^c	5.64 ^d	10.72 ^c
	25	879.35 ^c	6.22 ^c	11.38 ^b
	50	1134.06 ^a	7.29 ^a	11.80 ^a
	100	990.40 ^b	7.02 ^b	11.43 ^b

Values with the same English letter didn't have significant difference

مقادیر با حروف یکسان از لحاظ آماری اختلافی معنی دار را نشان ندادند

اثر محتوای رطوبتی پیشین بر فرسایش پاشمائی با ۱۱۳۴/۰۶ گرم بر مترمربع بر ساعت در رطوبت نیمه اشباع بالاترین مقدار بود و رطوبت اشباع در مرتبه دوم قرار داشت و بین حالت هوا خشک و یک چهارم اشباع تفاوت معنی داری بر هدررفت خاک در اثر پاشمان

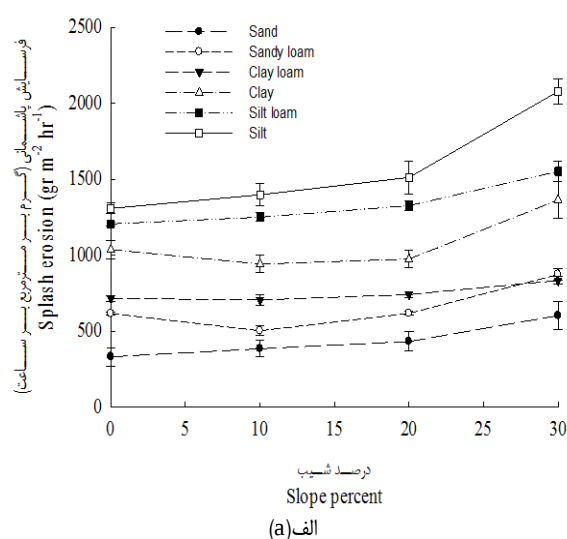
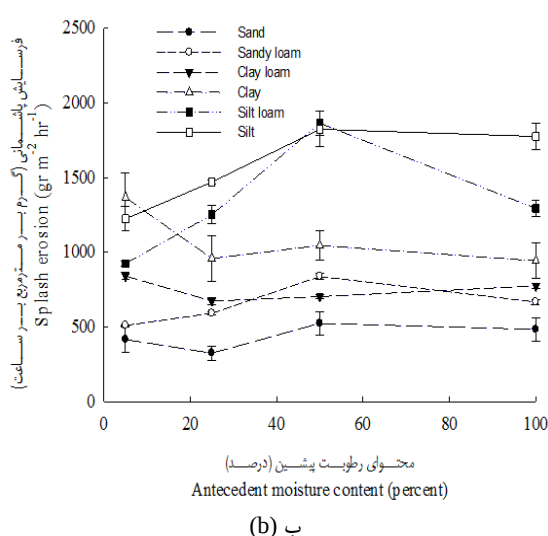
مشاهده شد، اثر محتوای رطوبت پیشین بر مقاومت خاک به فروروی نیز در حالت نیمه اشباع بالاترین مقدار (مقاومت ثانویه ۷/۲۹ برابر بزرگ تر از مقاومت اولیه بود) و سپس حالت اشباع، یک چهارم اشباع و هوا خشک قرار داشت. همچنین تأثیر رطوبت پیشین بر میانگین

الف) که این نتایج با یافته‌های سایر پژوهش‌گران در خصوص افزایش مقدار فرسایش پاشمان در اثر افزایش شیب مطابقت داشت (۱۸، ۲۲ و ۲۴). همچنین مقدار فرسایش خاک همواره در بافت‌های مانند سیلت و رس بیش از بافت شن بود که این نتایج با بخشی از یافته‌های واعظی و عبادی (۳۳) که بیان داشتند انتقال پذیری ذرات خاک (شن، سیلت و رس) در اثر فرسایش سطحی در شدت‌های مختلف باران و درجات شیب بیشتر به ماهیت ذرات بستگی دارد تا تغییرات درجه شیب، مطابقت داشت. دلیل این روند افزایشی ممکن است به کاهش زاویه سکون ذرات خاک بر سطح با افزایش درصد شیب مرتبط باشد و در نتیجه انتقال ذرات خاک در جهت شیب را آسان‌تر کند (۱۷).

تراکم خاک در حالت نیمه اشباع بالاترین بود (۱۱/۸۰ درصد) و بین حالت اشباع و یک‌چهارم تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد و در حالت هواخشک کم‌ترین میانگین تراکم خاک (۱۰/۷۲ درصد) را نشان داد (جدول ۴). به طور کلی رطوبت خاک در حالت نیمه‌اشباع بیش‌ترین اثر تخریبی را بر مقدار میانگین فرآیندهای فرسایش بارانی نشان داد.

تغییرات فرسایش پاشمان تحت تأثیر محتوای رطوبتی و درصد شیب

در شکل ۳ الف) تأثیر درصد شیب بر فرسایش پاشمان در بیش‌تر بافت‌های خاک یک حالت افزایشی غیرخطی را نشان دادند (شکل ۳



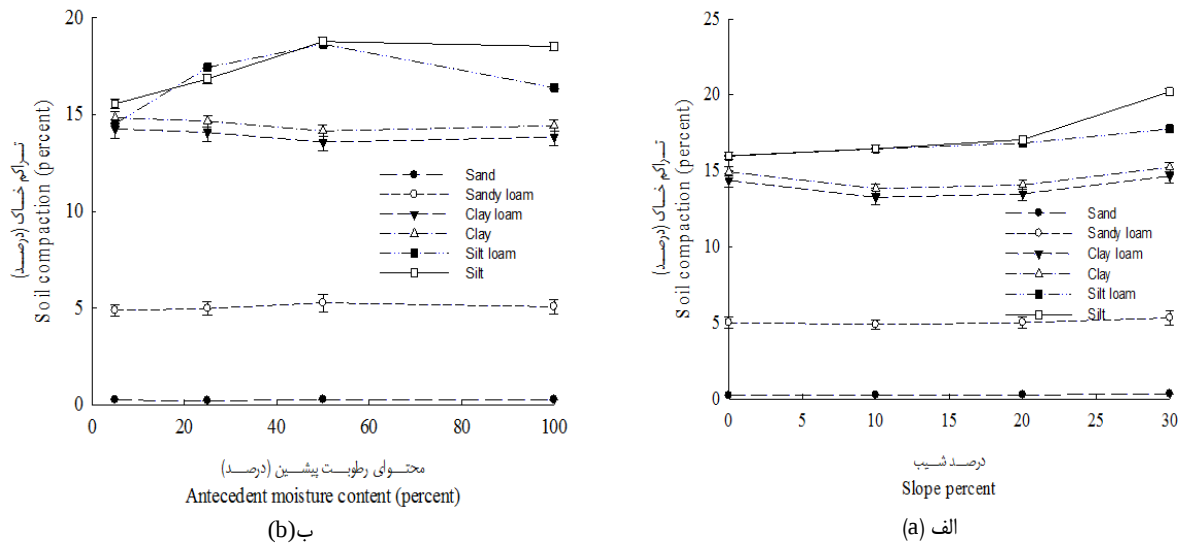
شکل ۳- اثرات شیب (الف) و محتوای رطوبت پیشین (ب) بر فرسایش پاشمانی
Figure 3- Effects of slope (a) and antecedent moisture content (b) on the splash erosion

نظر تأثیر رطوبت خاک بر فرسایش گزارش شده است. واتانگ و همکاران (۳۷) و ویدیویا و کمپس-روچ (۴۰) نشان دادند که مقدار رطوبت بر مقدار خاک فرسایش یافته تأثیر ندارد (خاک با بافت شن شکل ۳ ب).

تغییرات درصد تراکم خاک تحت تأثیر محتوای رطوبتی و درصد شیب

شکل ۴ الف) نشان داد اثر درجه شیب بر روند درصد تراکم تقریباً مشابه با تأثیر این تیمار بر فرسایش پاشمان و تا حدودی مقاومت سطح به فروروی بود، به علاوه اثر رطوبت بر تغییرات درصد تراکم در شکل ۴ ب) روندی متفاوت از اثر این تیمار بر فرسایش پاشمان و مقاومت سطح به فروروی داشت.

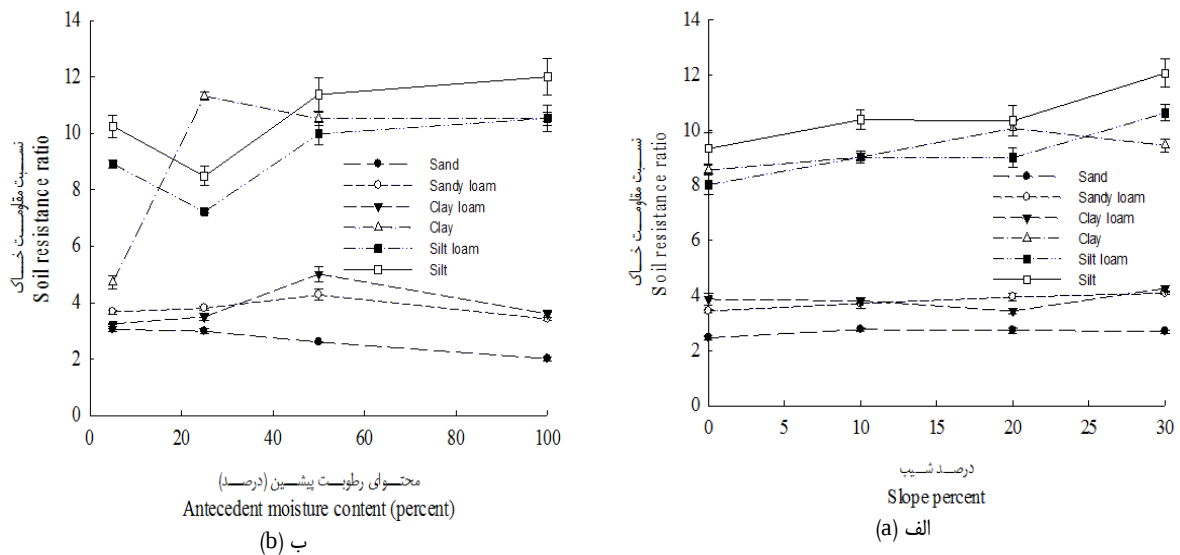
همچنین در شکل ۳ ب) افزایش محتوای رطوبت پیشین روند متفاوتی در بافت‌های خاک نشان داد. بافت سیلت همواره روند افزایش فرسایش پاشمانی را با افزایش رطوبت نشان داد. همچنین بافت لوم رسی و رسی در ابتدا کاهش فرسایش پاشمانی (رطوبت یک چهارم اشباع) و سپس افزایش اندکی را نشان داد. این روند متفاوت تأثیر رطوبت در خاک‌ها ممکن است به ماهیت متفاوت ذرات و اجزاء تشکیل دهنده خاک‌ها مرتبط باشد به گونه‌ای که افزایش رطوبت تا حدود نیمه‌اشباع در بافت‌های ریز (لوم رسی و رسی) موجب افزایش چسبندگی ذرات خاک شده است و در خاک‌های درشت بافت افزایش رطوبت تا حالت نیمه‌اشباع نه تنها چسبندگی را افزایش نداد بلکه با کاهش زاویه اصطکاک بین ذرات، جداسازی و انتقال پذیری این ذرات را آسان‌تر شده است این نتایج با بخشی از یافته‌های وی و همکاران (۳۸) که بیان داشتند افزایش رطوبت موجب افزایش مقدار فرسایش می‌شود مطابقت داشت. در برخی دیگر از پژوهش‌ها نتایج متفاوتی از



شکل ۴- اثرات شیب (الف) و محتوای رطوبت پیشین (ب) بر تراکم خاک
Figure 4- Effects of slope (a) and antecedent moisture content (b) on the soil compaction

درصد تراکم و با افزایش بیشتر رطوبت افزایش درصد تراکم را نشان داد، روند تغییرات درصد تراکم با درصد رطوبت با روند تغییرات ذرات فرسایش یافته با رطوبت مشابه بود و به نظر می‌رسد اثر عاملی مانند ماهیت ذرات هر خاک بر تغییرات مقدار فرسایش و تراکم مشابه باشند.

به غیر از خاک‌های با بافت سیلت و لوم سیلت تغییر درصد رطوبت تأثیر کمی بر تغییرات درصد تراکم بافت‌های خاک نشان دادند. به طور کلی در همه بافت‌ها افزایش شیب افزایش تراکم را نشان داد با این وجود افزایش محتوای رطوبت پیشین در بافت شنی تفاوت چندانی نشان نداد و در خاک‌های ریز بافت مانند لوم رسی و رس ابتدا کاهش



شکل ۵- اثرات شیب (الف) و محتوای رطوبت پیشین (ب) بر نسبت مقاومت خاک
Figure 5- Effects of slope (a) and antecedent moisture content (b) on the soil resistance ratio

تغییرات نسبت مقاومت سطح تحت تأثیر محتوای رطوبتی و درصد شیب

در اغلب بافت‌های خاک افزایش درصد شیب افزایش نسبت مقاومت خاک را نشان داد (شکل ۵ الف). دلیل آن ممکن است به کاهش فضای خالی بین ذرات خاک در نتیجه بازآرایی این ذرات در اثر فرسایش مرتبط باشد که این بازآرایی و کاهش فضای بین ذرات خاک منجر به افزایش مقاومت خاک در برابر فروسنگ شده است. همچنین برخورد قطرات باران در خاک‌های با بافت لوم‌سیلتی و سیلتی در حالت هواخشک تخریب کم‌تری را نشان داد (شکل ۵ ب). افزایش محتوای رطوبتی چنین خاک‌های ممکن است به دلیل هم‌آرایی مجدد ذرات خاک با کاهش تخلخل توده خاک و در نتیجه تشکیل لایه‌های با قابلیت نفوذ کم‌تر را تشدید کند، بنابراین مقاومت سطح خاک در برابر فروسنگ با افزایش محتوای رطوبتی افزایش یافته است. محتوای رطوبتی تأثیر کمی بر فروروی در بافت‌های شن و لوم‌شنی را نشان دادند. این حالت ممکن است به فقدان ساختمان در بافت‌های شن و لوم‌شنی مرتبط باشد (۱۴). همچنین افزایش محتوای رطوبتی در خاک با بافت رس در ابتدا افزایش مقاومت سطح خاک به فروسنگ و با افزایش مجدد رطوبت کاهش این نسبت مقاومت خاک را نشان داد. این تغییرات ممکن است ناشی از به هم‌ریختگی ابتدایی اولیه ذرات در واحدهای ساختمانی خاک با بافت رس مرتبط باشد (۱۰) و آسیب‌پذیری بافت رس را به ضربه قطرات باران بالا برده باشد. با افزایش مجدد مقدار رطوبت و به احتمال حضور لایه نازکی از آب بر سطح خاک (به دلیل هدایت هیدرولیکی کم‌تر بافت رس نسبت به سایر بافت‌های خاک) این لایه به عنوان یک سپر حفاظتی در برابر برخورد قطرات باران (۱۶) عمل کرده است. بنابراین خاک با بافت رس در وضعیت با رطوبت پیشین بالا تخریب کم‌تری از حالت با رطوبت پیشین کم در اثر برخورد قطرات باران داشته است و در نتیجه مقاومت کم‌تر سطح خاک به فروسنگ (پس از رسیدن به حالت هواخشک) را نشان داده است (شکل ۵ ب). این نتایج با بخشی از یافته‌های ترومن و همکاران (۳۱) که بر روی پنج خاک با بافت‌های لوم‌شن تا رس انجام گرفت و بیان داشتند افزایش میزان رطوبت اولیه مقاومت ذرات خاک به جدا شدن در برابر ضربات قطرات باران را افزایش می‌دهد مطابقت داشت.

همبستگی ویژگی‌های خاک با فرآیندهای فرسایش بارانی

برای بررسی نقش ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد پژوهش در تغییرات فرآیندهای فرسایش بارانی، همبستگی بین فرسایش پاشمانی، تراکم خاک و مقاومت خاک ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها به صورت ماتریس همبستگی تعیین شد (جدول ۵). همبستگی معنی‌دار بین فرسایش پاشمانی و درصد شن ($r=-$

$0.01 < p < 0.85$)، درصد سیلت ($0.001 < p < 0.96$)، چگالی ظاهری ($0.05 < p < -0.57$)، میانگین هندسی قطر ($0.01 < p < -0.68$)، هدایت هیدرولیکی اشباع ($0.05 < p < -0.58$) و کرنات کلسیم معادل خاک ($0.001 < p < 0.97$) وجود داشت (جدول ۶). همچنین همبستگی معنی‌دار بین نسبت مقاومت خاک و درصد شن ($r=-0.86$)، درصد سیلت ($0.01 < p < 0.81$)، چگالی ظاهری ($r=-0.65$)، میانگین هندسی قطر ($0.01 < p < -0.68$)، هدایت هیدرولیکی اشباع ($0.05 < p < -0.56$) و درصد کرنات کلسیم معادل ($0.01 < p < 0.88$) مشاهده شد. از میان ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دو ویژگی درصد سیلت و کرنات کلسیم معادل همبستگی معنی‌داری مثبت با فرسایش پاشمانی، درصد تراکم و مقاومت خاک داشتند. این نتایج با نتایج یوتست و همکاران (۳۲) که بیان داشتند مقاومت خاک با چگالی ظاهری رابطه معنی‌داری ندارد متفاوت بود به دلیل آن که افزایش تراکم خاک و در نتیجه کاهش تخلخل خاک موجب افزایش مقاومت سطح خاک به فروروی می‌شود. همچنین نتایج جدول (۵) نشان داد درصد تراکم خاک دارای همبستگی معنی‌داری با درصد شن ($0.001 < p < -0.97$)، درصد سیلت ($r = 0.01 < p < 0.71$)، درصد رس ($0.01 < p < 0.63$)، چگالی ظاهری ($0.001 < p < -0.93$)، میانگین هندسی قطر ($0.001 < p < -0.97$)، پایداری خاک‌دانه ($0.05 < p < 0.50$)، هدایت هیدرولیکی اشباع ($r=-0.01 < p < 0.85$) و کرنات کلسیم معادل خاک ($0.01 < p < 0.86$) بود. این نتایج با بخشی از یافته‌های اسمیت و همکاران (۲۶) که بیان داشتند درصد رس و درصد کرن آلی بر روابط تراکم-مقاومت به فروروی اثر می‌گذارند، مطابقت نداشت. نتایج جدول (۵) نشان داد ماده آلی با پاشمانی خاک، درصد تراکم و مقاومت خاک همبستگی معنی‌داری ندارد ممکن است دلیل آن به درصد ناچیز این ویژگی در خاک‌ها مورد پژوهش باشد. با این وجود درصد رس با درصد تراکم خاک دارای همبستگی معنی‌دار مثبت بود که این بخش از نتایج با بخشی از یافته‌های اسمیت و همکاران (۲۶) مطابقت داشت. دلیل این تفاوت‌ها ممکن است به تفاوت‌های درصد کرن آلی (۲ تا ۵ درصد) در پژوهش اسمیت و همکاران (۲۶) و پژوهش حاضر (معادل ۰/۱۴ تا ۰/۹۱ درصد کرن آلی) مرتبط باشد. نتایج ماتریس همبستگی (جدول ۵) بیان‌کننده تأثیر بالاتر ویژگی‌های فیزیکی خاک نسبت به ویژگی‌های شیمیایی آن‌ها بر فرآیندهای فرسایش بارانی بود. از میان ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد پژوهش، درصد شن چگالی ظاهری و میانگین هندسی قطر با فرسایش پاشمانی، تراکم خاک و مقاومت خاک همبستگی منفی معنی‌دار در سطح یک درصد و درصد سیلت و درصد کرنات کلسیم با فرسایش پاشمانی، تراکم خاک و مقاومت خاک دارای همبستگی مثبت معنی‌دار در سطح یک درصد بودند.

جدول ۵- ماتریس همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و داده‌های فرآیندهای فرسایش بارانی (تعداد داده‌ها: ۶)

	Sand	Silt	Clay	BD	D _g	MWD _{Wet}	K _s	ESP	OM	CCE	SC	SR	Sp
Sand	1												
Silt	-0.76**	1											
Clay	-0.61**	-0.06	1										
BD	0.92**	-0.45	-0.85**	1									
D _g	0.92**	-0.65**	-0.62**	0.93**	1								
AS	-0.58*	0.01	0.88**	-0.74**	-0.46	1							
K _s	0.78**	-0.58*	-0.49*	0.82**	0.95**	-0.33	1						
ESP	-0.47	-0.07	0.81**	-0.72**	-0.65**	0.61**	-0.68**	1					
OM	-0.21	-0.23	0.60**	-0.48*	-0.35	0.42	-0.32	0.35	1				
CCE	-0.91**	0.96**	0.21	-0.67**	-0.80**	0.22	-0.70**	0.14	-0.06	1			
SC	-0.97**	0.71**	0.63**	-0.93**	-0.97**	0.50*	-0.85**	0.48	0.31	0.86**	1		
SR	-0.86**	0.81**	0.34	-0.65**	-0.68**	0.45	-0.56*	0.29	-0.29	0.88**	0.76**	1	
Sp	-0.85**	0.96**	0.12	-0.57*	-0.68**	0.18	-0.55*	-0.03	-0.12	0.97**	0.78**	0.85**	1

#: همبستگی در سطح ۰/۰۵، معنی دار است. **: همبستگی در سطح ۰/۰۱، معنی دار است. ***: همبستگی در سطح ۰/۰۰۱، معنی دار است.

ماده آلی : OM : درصد سدیوم تبادل (درصد) : ESP : درصد سدیوم تبادل (درصد) در روز : روز : ESP : درصد سدیوم تبادل (درصد) : BD : چگالی ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)، D_g : توزیع اندازه ذرات (میلی متر)، AS : پایداری خاکدانه (میلی متر)، K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی متر در روز)، ESP : درصد سدیوم تبادل (درصد) : SR : مقاومت خاک (بدون بعد) و Sp : فرسایش پاشمان (گرم بر سانتی متر مربع بر ساعت) است.

*: Correlation is significant at the 0.05 level **: Correlation is significant at the 0.01 level ***: Correlation is significant at the 0.001 level
In table: BD: bulk density (g cm⁻³), D_g: particle-size distribution (mm), AS: aggregate stability (mm), ESP: saturated hydraulic conductivity (cm day⁻¹), ESP: exchangeable sodium percent (percent), OM: organic matter (percent), CCE: calcium carbonate equivalent (percent), SC: soil compaction (percent), SR: soil resistance (no dimension), Sp: splash erosion (g m⁻² hr⁻¹)

تراکم و مقاومت سطح خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت و ویژگی‌های شیمیایی مانند درصد ماده آلی و درصد سدیم قابل تبادل همبستگی معنی‌داری نشان ندادند. به عبارتی ماهیت فیزیکی ذرات تشکیل دهنده خاک مانند اندازه ذرات (درصد شن، درصد رس و درصد سیلت) نسبت به برخی از ویژگی‌های شیمیایی ذرات خاک مانند ماده آلی تأثیر بیش‌تری بر تغییرات مقدار فرسایش خاک، درصد تراکم و نسبت مقاومت فروروی خاک به فروسنگ داشتند. به طور کلی، افزایش درصد سیلت و آهک در خاک بر خلاف درصد شن، منجر به افزایش حساسیت خاک به فرآیند فرسایش پاشمانی می‌شود. افزایش فرسایش پاشمانی منجر به تراکم خاک و افزایش مقاومت سطح می‌شود. در خاک‌های حاوی سیلت و آهک زیاد، با تغییر شیب سطح و محتوای رطوبتی، فرآیندهای فرسایش پاشمانی، تراکم و نسبت مقاومت خاک به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرند. با افزایش شیب و محتوای رطوبتی، شدت وقوع این فرآیندها در چنین خاک‌هایی افزایش پیدا می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که خاک‌های حاوی سیلت و آهک زیاد که در شیب‌های تند قرار دارند به ویژه زمانی که رطوبت خاک زیاد است به شدت تحت فرسایش بارانی قرار گرفته و دچار تخریب فیزیکی می‌شوند. حفظ پوشش گیاهی در چنین خاک‌هایی برای کاهش اثرات منفی باران بر تخریب خاک حائز اهمیت است.

دلیل این همبستگی منفی و مثبت ممکن است به اندازه ذرات وابسته باشد و هر چه درصد ذرات درشت‌تر، انتقال ذرات از توده اصلی خاک در اثر ضربه قطرات باران کاهش یافته و فرآیندهای تخریبی با شدت کم‌تر رخ می‌دهد. به علاوه هر چه درصد سیلت و درصد کربنات کلسیم معادل (ممکن است درصد ذرات کربنات کلسیم به صورت ذراتی در اندازه ذرات سیلت در توده خاک موجود بوده باشد) بیش‌تر فرآیندهای تخریبی با شدت بیش‌تری رخ می‌دهد. این نتایج با بخشی از یافته‌های واعظی و عبادی (۳۳) که بیان داشتند انتقال‌پذیری ذرات خاک (شن، سیلت و رس) در اثر فرسایش سطحی به ماهیت ذرات بستگی دارد مطابقت داشت.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد درصد شیب و محتوای رطوبت پیشین اثری معنی‌داری بر فرسایش پاشمانی، درصد تراکم خاک و مقاومت سطح دارند. افزایش درصد شیب اثر افزایشی بر فرسایش پاشمانی، تراکم و مقاومت سطح خاک داشت. با این وجود محتوای رطوبت پیشین در بافت‌های متفاوت خاک اثر متفاوتی بر مقدار پیامدهای فرسایشی بارانی داشتند و ماهیت ذرات و ویژگی‌های بافت‌های خاک موجب اثر متفاوت رطوبت خاک بر این پیامدها شد. فرسایش پاشمانی همچنین تحت تأثیر درصد شن خاک قرار گرفت. از میان ویژگی‌های شیمیایی تنها درصد کربنات کلسیم معادل با فرسایش پاشمانی، درصد

منابع

- 1- Assouline S., Tessier D., and Tavares-Filho J. 1997. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. *Soil Science Society of America Journal*, 61(2): 390-398.
- 2- Becher H.H. 1998. Resistances to penetration of aggregates from loess-driven topsoils at different soil water tensions, *Soil and Tillage Research*, 47: 73-81.
- 3- Darvishan A.V., Dadeghi S., Homaee M., and Arabkhedri M. 2015. Affectability of runoff threshold and coefficient from rainfall intensity and antecedent soil moisture content in laboratorial erosion plots. *Iran Water Research Journal*, 8(15): 41-49. (In Persian)
- 4- Defersha M.B., and Melesse A.M. 2012. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio. *Catena*, 90: 47-52.
- 5- Dexter A.R., Czyz E.A., and Gate O.P. 2007. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil and Tillage Research*, 93(2): 412-419.
- 6- Diaz-Zorita M., and Grosso G.A. 2000. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research*, 54(1): 121-126.
- 7- Ekwue E.I., and Harrilal A. 2010. Effect of soil type, peat, slope, compaction effort and their interactions on infiltration, runoff and raindrop erosion of some Trinidadian soils. *Biosystem Engineering*, 105: 112-118.
- 8- Ghadiri H. 2004. Crater formation in soils by raindrop impact. *Earth Surf Processes Landforms*, 29: 77-89.
- 9- Humberto B., and Lal R. 2008. *Principles of Soil Conservation and Management*, Springer.
- 10- Kemper W. D., and Rosenau R. C. 1984. Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Science Society of America Journal*, 48(5): 1001-1006.

- 11- Khalili Moghadam B., Jabarifar M., Bagheri M., and Shahbazi E. 2015. Effects of land usechange on soil splash erosion in the semi-arid region of Iran. *Geoderma*, 241-242: 210-220
- 12- Kianiharchegani M., Sadeghi H.R., and Asadi H. 2015. Comparative analysis of the effects of rainfall intensity and experimental plot slope on raindrop impact induced erosion (RIIE). *Iran Soil and Water Research Journal*, 46(4): 631-640. (In Persian)
- 13- Kinnell P.I. A., and Risse L. M. 1998. USLE-M: empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. *Soil Science Society of America Journal*, 62(6): 1667-1672.
- 14- Kinnell P.I.A. 2005. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a Review. *Hydrological Processes*, 19: 2815-2844.
- 15- Kinnell P.I.A. 2009. The influence of raindrop induced saltation on particle size distributions in sediment discharged by rain-impacted flow on planar surfaces. *Catena*, 78: 2-11.
- 16- Lal R. 2010. Beyond Copenhagen: mitigating climate change and achieving food security through soil carbon sequestration. *Food Security*, 2(2): 169-177.
- 17- Lanza N. 2011. Studying signatures of water on Mars at the macro and micro scales: Orbital analyses of hillslope geomorphology and ChemCam calibration for surficial rock chemistry, PhD dissertation, The University of New Mexico.
- 18- Lu J., Zheng F., Li G., Bian F., and An J. 2016. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 161: 79-85.
- 19- Maroufpoor E., Faryabi A., Ghamarnia H., and Moshrefi Gh. 2010. Evaluation of uniformity coefficients for sprinkler Irrigation systems under different field conditions in Kurdistan Province. *Soil and Water Resources*, 5(4): 139-145.
- 20- Nord G., and Esteves M. 2005. PSEM_2D: A physically based model of erosion processes at the plot scale. *Water Resources Research*, 41(8):1-14
- 21- Page A.L., Miller R.H., and Jeeney D.R. 1992. Methods of soil analysis, part 2. Chemical and Mineralogical Properties, Soil Science Society American Publication. Madison (1159 pp.).
- 22- Rezaie Pasha M., Kaviani A., and Vahabzade GH. 2012. Experimental study of splash erosion and its relation with some soil properties in three adjacent land uses (a case study: Kasilian Watershed). *Journal of Water and Soil Science*, 15(58): 257-269. (In Persian)
- 23- Rowell D. I. 1994. *Soil Science: Methods and Application*. Longman Group. Harlow, PP: 345.
- 24- Saedi T., Shorafa M., Gorji M., and Moghadam B.K. 2016. Indirect and direct effects of soil properties on soil splash erosion rate in calcareous soils of the central Zagross, Iran: A laboratory study. *Geoderma*, 271: 1-9.
- 25- Shirazi M.A., and Boersma L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*, 48 (1): 142-147.
- 26- Smith C.W., Johnston M.A., and Lorentz S. 1997. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. *Geoderma*, 78(1): 93-111.
- 27- Soane B. D., and van Ouwerkerk C. (Eds.). 2013. *Soil compaction in crop production*, (Vol. 11). Elsevier.
- 28- Soil Survey Staff. 2014. *Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0. R. Burt and Soil Survey Staff (Ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- 29- To J., and Kay B.D. 2005. Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. *Geoderma*, 126(3): 261-276.
- 30- Truman C.C., and Bradford J.M. 1990. Effect of antecedent soil moisture on splash detachment under simulated rainfall. *Soil Science*, 150(5): 787-798.
- 31- Truman C.C., Bradford J.M., and Ferris J.E. 1990. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. *Soil Science Society of America Journal*, 154 (5): 1385-1392.
- 32- Utset A., and Cid G. 2001. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsol at several soil moisture conditions. *Soil and Tillage Research*, 61(3): 193-202.
- 33- Vaezi A.R., and Ebadi M. 2017. Particle size distribution of surface-eroded soil in different rainfall intensities and slope gradients. *Journal of Water and Soil*, 31: 216-229. (In Persian)
- 34- Vaezi A., Akbari S., and Mohamadi M. 2015. Study of rainfall processes in calcareous soils aggregates under laboratory conditions in NW Zanzan, Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(1): 87-94. (In Persian)
- 35- Vaezi A., Rostami S., and Mohamadi M. 2012. Temporal variations of aggregates breakdown and splash particles processes in a marl soil under simulated rainfall. *Iranian Journal of Soil Research*, 25(4): 362-371.
- 36- Van Dijk A.I.J.M., Bruijnzeel M., and Eisma E.H. 2003. A methodology to study rain splash and wash processes under natural rainfall. *Hydrology Process*, 17: 153-167.

- 37- Watung R.L., Sutherland R.A., and Swaify S.A. 1996. Influence of rainfall energy flux density and antecedent soil moisture content on splash transport and aggregate enrichment ratios for a Hawaiian Oxisol. *Soil Technology*, 9: 251–272.
- 38- Wei Y., Xinliang W., and Chongfa C. 2015. Splash erosion of clay–sand mixtures and its relationship with soil physical properties: The effects of particle size distribution on soil structure. *Catena*, 135: 254–262.
- 39- Wu X., Wei Y., Wang J., Xia J., Cai C., Wu L., Fu Z., and Wei Z. 2017. Effects of erosion degree and rainfall intensity on erosion processes for Ultisols derived from quaternary red clay, Agriculture. *Ecosystems and Environment*, 249: 226-236.
- 40- Wuddivira M.N., and Camps-Roach G. 2007. Effects of organic matter and calcium on soil structural stability. *European Journal of Soil Science*, 58: 722–727.
- 41- Yoder R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis and a study of a physical nature of erosion losses. *Journal of American Agronomy*, 28: 337-351.



Investigation of the Relationships between Rainfall Erosion Processes, Slope and Antecedent Water Content in Semi-Arid Soils

A. Baliani^{1*} - A.R. Vaezi²

Received: 31-01-2018

Accepted: 02-09-2018

Introduction: Rainfall erosion results from the expenditure of the energy of falling raindrops and flowing water when these two agents act either singly or together. Soil erosion by rainfall is a serious ongoing worldwide environmental issue that contributes to soil and water quality degradation. Understanding raindrop-impact-induced erosion processes are key to design and apply soil management techniques that minimize and control soil erosion risk. Water erosion and especially raindrop-impact-induced erosion is the primary agents that cause soil erosion-induced degradation and has been identified as one of the major processes contributing to the soil and water quality degradation. Soil degradation caused by rainfall raindrops impacts the soil surface disperses and splashes the soil, and displaces particles from their original position. Raindrops striking the soil surface develop a raindrop-soil particle momentum before releasing their energy in the form of the splash. Other causes of soil degradation are including compaction and penetration resistance.

Materials and Methods: This study was conducted to investigate the raindrop-impact-induced erosion in relation to slope gradient (0, 10, 20, and 30%) and antecedent moisture content or AMC (air dried, quarter saturation, semi saturation, and saturation). Toward this, six soil texture classes were exposed to simulated rainfalls with 40 mm h⁻¹ in intensity for 15-min in four slope gradients and four antecedent moisture contents. Rainfall was simulated using rainfall simulator from soil erosion laboratory of the University of Zanjan with 3-meter height and surface of 2 m². A total of 288 experimental soil boxes with 25 cm × 35 cm dimensions and 5-cm depth were investigated using the completely randomized block design with three replications. Data of soil erosion processes include splash erosion particles amount caused raindrop impact, soil resistance ratio after rainfall using penetrometer, and compaction percent using bulk density after and before rainfall was measured and then compared using Duncan's test among the slope steepness and antecedent moisture content

Results and Discussion: Significant relationships were found between the splash erosion rate, soil resistance ratio and soil compaction means ($P < 0.01$). The results showed that silt soil carried the highest mean value in splash erosion rate with 1574.93 gm⁻² h⁻¹, soil resistance ratio with 10.53 and soil compaction with 17.43 percent, while sand soil carried the lowest mean value in splash rate with 437.37 gm⁻² h⁻¹, soil resistance ratio with 2.66 and soil compaction with 0.25 percent. Soil erosion processes were significantly affected by slope gradient and AMC. Soil erosion processes showed a decreasing rate in 0 slope degree and increasing rate in 30 slope degree and also decreasing rate in air dried and increasing rate in semi saturation AMC. Significant correlations ($P < 0.01$ and 0.05) were found between soil erosion processes and sand, silt, geometric mean particle diameter, bulk density, saturated hydraulic conductivity, and calcium bicarbonate equivalent. among the physical properties of the studied soils, the sand percentage, bulk density, and Geometric mean diameter showed a negative significant correlation with splash erosion, soil compaction, and soil resistance, and the percentage of silt and calcium carbonate content with splash erosion, soil compaction, and soil resistance were positive significant correlated. The cause of this negative and positive correlation might be dependent on particles size and more percent of coarse particles, the transfer of particles from the soil mass is reduced due to raindrops and degradation processes occur with less intensity. In addition, destruction processes with more intensity occurred with increasing silt and lime percent.

Conclusion: Increasing the slope gradient has an incremental effect on the amount of rainfall erosion processes i.e. sediment load, penetration ratio, and soil compaction value. However, antecedent moisture content in various soil textures has the different effect on the amount of rainfall erosion processes. Among the soil chemical properties, only calcium carbonate equivalent with splash erosion, density, and soil surface resistance was positively correlated and chemical properties such as a percentage of organic matter and exchangeable

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Soil Science, University of Zanjan, Zanjan

(*- Corresponding Author Email: alibaliani63@gmail.com)

sodium percent no significant correlated with soil erosion processes. In other words, the physical nature of soil-forming particles such as particle size, as well as some of the chemical properties of soil particles such as organic matter, have a more effect on soil degradation, density, and soil resistance ratio. also the role of soil physical properties such as sand percent and calcium carbonate equivalent on the rainfall processes were more than soil chemical properties. In general, increasing the percent of silt and lime in the soil, unlike sand, was increased the sensitivity of the soil to the rainfall erosion and as a result increasing the splash erosion leads to increased soil compaction and soil resistance ratio.

Keywords: Rainfall simulation, Soil Compaction, Soil properties, Soil resistance, Splash erosion



اثر مکش آب خاک و پتاسیم بر عملکرد و شاخص‌های بیوشیمیایی پرتقال تامسون ناول (*Citrus sinensis* L. Osbeck.)

طاهره رئیسی^{۱*} - بیژن مرادی^۲ - بهروز گل‌عین^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۱

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر مکش آب خاک، همراه با پتاسیم بر عملکرد، برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی و رشد رویشی درختان پرتقال تامسون ناول روی پایه سیتروملو اجرا شد. بدین منظور، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح آماری بلوک کاملاً تصادفی به مدت دو سال در باغ پرتقال اجرا شد. فاکتورها شامل: انجام آبیاری در مکش‌های رطوبتی خاک ۲۰، ۴۰، ۶۰ کیلو پاسکال (بر اساس مکش تانسومتر) و یک تیمار بدون آبیاری؛ و کاربرد کود پتاسیم در دو سطح ۵۰ و ۱۰۰ گرم پتاسیم ضرب در سن درخت در نظر گرفته شد. سپس، در دو سال آخر آزمایش عملکرد، پتاسیم قابل استفاده و قطر تاج درختان و در سال آخر آزمایش، مقدار پرولین، نشت یونی و هدایت الکتریکی خاک اندازه‌گیری شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار قطر تاج درختان با انجام آبیاری افزایش ($P < 0.05$) یافت. همچنین، نتایج سال آخر پژوهش نشان داد که در سطح اول پتاسیم بین مقدار عملکرد در تیمارهای آبیاری ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال تفاوت معنی‌داری ($P < 0.05$) مشاهده نشد. علاوه بر این، اثر پتاسیم بر عملکرد به مکش آب خاک بستگی داشت. همچنین، با افزایش مکش رطوبتی خاک در زمان آبیاری مقدار پرولین، نشت یونی، پتاسیم قابل استفاده و قابلیت هدایت الکتریکی افزایش معنی‌داری داشتند. به طور کلی، باتوجه به نتایج عملکرد و نیز با در نظر گرفتن محدودیت منابع آبی می‌توان پیشنهاد کرد که در مناطق با اقلیم و خاک مشابه با منطقه مور مطالعه، بهترین زمان آبیاری درختان پرتقال تامسون ناول موقعی است که تانسومتر مکش ۶۰ کیلو پاسکال (ضریب تخلیه ۵۲ درصد) را نشان دهد. علاوه بر این، بهینه‌ترین مقدار پتاسیم جهت کوددهی این درختان در شرایط ذکر شده، معادل ۵۰ گرم پتاسیم ضرب در سن درخت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، تانسومتر، پرولین، سیتروملو، نشت یونی

مقدمه

استان مازندران از ۵۸۳ (نوشهر) تا ۹۱۸ (قائم‌شهر) میلی‌متر در سال متغیر می‌باشد. به هرحال، درختان مرکبات به دلیل همیشه سبز بودن در تمام طول سال تعرق داشته و به رطوبت نیاز دارند و به ویژه در مرحله رشد رویشی به کاربرد آب پاسخ نشان می‌دهند (۳۱).

چندین روش جهت تدوین برنامه آبیاری مرکبات بر اساس عوامل خاکی، فیزیولوژی و محیطی پیشنهاد شده است. تعیین زمان آبیاری بر اساس مکش رطوبتی خاک با استفاده از تانسومتر ساده‌ترین و کاربردی‌ترین روش است که توسط بسیاری از محققین در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین طبق تحقیقات گذشته در ایالت فلوریدا، برای اجتناب از کاهش عملکرد، آبیاری در مرکبات باید زمانی آغاز شود که تانسومتر مکش ۱۰ تا ۲۰ کیلو پاسکال را نشان می‌دهد (۹، ۳۷ و ۴۴). آبیاری در این وضعیت حاکی از آن است که رطوبت خاک در حد آب سهل الوصول تأمین می‌شود. به عبارت دیگر زمانی که تانسومتر مکش بزرگتر از ۲۰ کیلو پاسکال را نشان دهد، شروع تنش آبی برای مرکبات است. در آزمایشی طبق گزارش پاراماسیوم و همکاران (۳۷) در فلوریدا در فاصله زمانی ژانویه (اواسط دی) تا ژوئن

مرکبات دومین صنعت بزرگ میوه در تجارت جهانی می‌باشند و این صنعت می‌تواند در اقلیم‌های گرمسیری و نیمه‌گرمسیری با خاک مناسب، دمای هوای متوسط و رطوبت دائمی هوا، گسترش یابد (۴۳). در ایران نیز، مرکبات، یکی از محصولات باغی استراتژیک است که با تولید سالیانه ۴۳۴۵ هزار تن، مقام اول را در بین تولیدات باغی کشور به خود اختصاص داده است (۱). آبیاری یکی از مهم‌ترین عملیات مؤثر در تولید میوه‌های با کیفیت و کمیت بالا در باغ‌های مرکبات می‌باشد و نیاز آبیاری درختان به آب و هوا، نوع خاک، گونه و پایه بستگی دارد. طبق گزارش مؤسسه خاک و آب نیاز آبی مرکبات در

۱، ۲ و ۳- به ترتیب استادیار، مربی و دانشیار پژوهشکده مرکبات و میوه‌های نیمه‌گرمسیری، مؤسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رامسر

(Email: taraiesi@gmail.com)

DOI: 10.22067/jsw.v32i5.70820

(*)- نویسنده مسئول:

برگ، افزایش حساسیت درختان به تنش‌های زنده و غیرزنده، کاهش تولید کربوهیدرات‌ها، کاهش تشکیل میوه، تشدید ریزش میوه، افزایش چین‌خوردگی آلبو و افزایش پارگی پوست میوه مرکبات می‌شود (۲). بررسی منابع نشان می‌دهد وقتی مقدار پتاسیم گیاه کافی و مناسب باشد، به دلیل افزایش ترکیبات آلی مانند پرولین (۱۸) و افزایش فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (۱۲)، اثرات منفی تنش‌های خشکی کاهش می‌یابد. تاکنون در باغ‌های مرکبات پژوهشی جامع در زمینه‌ی اثر کاربرد خاکی کود پتاسیم بر کاهش اثرات منفی ناشی از تنش خشکی انجام نشده است.

کشت مرکبات یکی از مهمترین فعالیت‌های کشاورزی در شمال ایران بوده و رقم تامسون‌ناول از ارقام تجاری پرتقال در غرب مازندران است که پرورش آن روی پایه سیتروملو در حال گسترش می‌باشد. از سوی دیگر، کمبود منابع آبی به ویژه در فصل تابستان یکی از محدودیت‌ها اصلی در تولید مرکبات در این منطقه می‌باشد. در این مناطق مساحت کمی از باغ‌های مرکبات به سیستم‌های آبیاری مجهز بوده و توزیع بارندگی متناسب با نیاز آبی مرکبات نیست چرا که در ماه‌های گرم سال که تبخیر روزانه بالا است، بارندگی به میزانی نیست که جوابگوی نیاز تبخیر و تعرق مرکبات باشد و بیشتر درختان مرکبات دچار تنش ناشی از خشکی می‌شوند. از سوی دیگر، مطالعات کمی در ارتباط با نحوه‌ی مدیریت تغذیه پتاسیم در شرایط محدودیت منابع آبی وجود دارد. لذا این پژوهش به منظور بررسی اثر مقدار مکش آب در خاک به همراه کاربرد کود سولفات پتاسیم بر برخی شاخص‌های بیوشیمیایی و رشد رویشی مرکبات و در نهایت تعیین حد بهینه مکش آب در خاک در زمان آبیاری اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در ایستگاه تحقیقاتی کترا پژوهشکده مرکبات واقع در دامنه‌های شمالی رشته کوه البرز و در طول جغرافیایی ۵۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه شمالی که حدود ۶۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد، انجام شد. متوسط درازمدت بارندگی این منطقه ۱۲۰۰ میلی‌متر در سال بود که عمدتاً از شهریور تا اردیبهشت ماه می‌باشد و در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد مقدار بارندگی کمتر از نیاز آبی مرکبات است.

قبل از شروع آزمایش و کشت درختان، نمونه خاک از عمق ۳۰-۶۰ سانتی‌متری جمع‌آوری و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اولیه خاک محل آزمایش تعیین گردید. اسیدیته نمونه‌های خاک در عصاره ۲ به ۱ محلول به خاک (۴۶)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره‌های صاف شده با نسبت ۵ به ۱ محلول به خاک (۳۹)، کربنات کلسیم معادل خاک به روش تیتراسیون برگشتی با اسید کلریدریک یک نرمال (۲۷)، درصد کربن آلی خاک به روش

(اواسط تیر) وقتی تانسیموترهای مستقر شده در اعماق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری مکش ۱۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهند و در ژولای (اواسط) تیر تا دسامبر (اواسط دی) زمانی که تانسیموترها مکش ۱۵ کیلوپاسکال را نشان می‌دهند، آبیاری باید انجام شود تا رطوبت خاک در حد بهینه حفظ شود. از تانسیموتر برای تعیین زمان آبیاری می‌توان استفاده نمود، اما تانسیموتر اطلاعاتی در مورد مقدار آب لازم برای آبیاری در اختیار کشاورز قرار نمی‌دهد. معمولاً یک مرز بالایی از تخلیه آب خاک به عنوان نقطه‌ای که آبیاری باید انجام گردد، در نظر گرفته می‌شود و آب با هدف رساندن رطوبت خاک از حد مورد نظر به حد ظرفیت زراعی به کار برده می‌شود. طبق گزارش سرواستاوا و همکاران (۴۵) ضریب تخلیه مجاز رطوبتی برای مرکبات ۲۰ درصد می‌باشد. آبیاری در فواصل درازمدت، درختان مرکبات را در معرض تنش خشکی قرار داده و منجر به کاهش رشد، حجم تاج درخت، قطر ساقه و مقدار ریشه‌های موین می‌شود (۲۳ و ۴۱). سانچز و همکاران (۴۱) گزارش کردند که انجام آبیاری در ضریب تخلیه مجاز ۵۵ و ۷۰ درصد منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد و اندازه میوه لیمو لیسبون نسبت به انجام آبیاری در ضریب تخلیه مجاز ۲۵ درصد شده است.

گیاهان در پاسخ به تنش خشکی سازوکارهای مختلفی را به کار می‌گیرند. از جمله این سازوکارها می‌توان به افزایش نسبت ریشه به ساقه، برگ‌های کوچکتر و محدودتر، افزایش ترکیبات مؤثر بر پتانسیل اسمزی گیاه، افزایش متابولیت‌ها و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان اشاره کرد (۲۶). تجمع ترکیبات مؤثر بر پتانسیل اسمزی گیاه از جمله پرولین باعث کاهش پتانسیل اسمزی سلول و ساختارهای گیاهی شده که منجر به حفظ شیب پتانسیل آب از خاک به گیاه در شرایط تنش خشکی می‌شود (۱۰ و ۱۳). پتانسیل اسمزی پایین سلول و ساختارهای گیاهی باعث آماس بافت و اندام‌های آن شده که در شرایط ذکر شده در اندام‌های برگ گیاهان، امکان باز بودن روزنه و تبادل گازهای مؤثر بر فتوسنتز و رشد گیاه فراهم خواهد شد (۴ و ۱۸). علاوه بر این، راهکار دیگر برای افزایش تحمل نسبی گیاهان در برابر تنش خشکی، حفظ پایداری غشا است (۵). افزایش نشت یونی با افزایش نفوذپذیری غشا پلاسمایی همراه است. اندازه‌گیری نشت یونی روش مناسب در ارزیابی پایداری غشا در گیاهان تحت تنش می‌باشد (۲۵).

برای دستیابی به تولید بالا و نیز برای سلامت درخت، کاربرد کودهای شیمیایی در باغ‌های مرکبات امری لازم می‌باشد. اغلب کودهای شیمیایی نمک‌های معدنی بوده که به شکل جامد و یا همراه آب آبیاری در باغ‌ها و نیز به صورت محلول‌پاشی استفاده می‌شوند. در باغ‌های مرکبات شمال کشور اغلب پتاسیم از منابع کود سولفات پتاسیم و یا نیترات پتاسیم تأمین می‌گردد. پتاسیم برای تنظیم تعادل یونی در سلول، توسعه اندازه میوه و تنظیم ضخامت پوست میوه ضروری است (۶ و ۳۵). کمبود پتاسیم موجب کاهش میزان فتوسنتز

اکسیداسیون تر (۳۴) و بافت خاک به روش هیدرومتر (۱۷) تعیین شد. همچنین مقدار نیتروژن کل (۷)، فسفر قابل استفاده (۳۶) و پتاسیم قابل استفاده (۲۱) اندازه‌گیری شد. همچنین در نمونه خاک تهیه شده مقدار رطوبت در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی توسط دستگاه صفحه تحت فشار اندازه‌گیری شد. مقدار رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و حد پژمردگی در این خاک به ترتیب ۳۴ و ۱۱ درصد حجمی بود. بنابراین مقدار رطوبت قابل استفاده در این خاک ۲۳ درصد می‌باشد.

به منظور ارزیابی اثر آبیاری در چهار سطح مکش آب در خاک و کاربرد دو سطح کود پتاسیم بر عملکرد و حجم تاج درختان مرکبات و نیز بر برخی شاخص‌های بیوشیمیایی درختان پرتقال، یک آزمایش فاکتوریل باغی در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی در چهار تکرار با استفاده از درختان پرتقال تامسون ناول به مدت دو سال انجام شد (هر درخت به عنوان یک واحد آزمایشی در نظر گرفته شد).

جهت اجرای آزمایش، ۳۰۰ اصله پایه یکسان سیتروملو در اسفندماه سال اول آزمایش در خزانه انتظار کشت شد و مراقبت‌های لازم انجام گردید. شهریور سال بعد پیوندک‌های تامسون ناول از یک درخت مادری سالم و قوی تهیه و روی پایه‌های مورد نظر پیوند شد. در بهار سال سوم، پایه‌ها سربرداری شده و در پائیز تعداد ۳۲ اصله نهال سالم و یکسان از نظر قطر ساقه و ارتفاع انتخاب و در محل اصلی با فاصله ۷×۶ کشت شدند. خاک بستر کشت نهال‌ها با ترکیب کود دامی، ماسه و خاک سطحی باغ تهیه شد. از سال دوم پس از انتقال نهال‌ها به باغ، تیمارهای مورد نظر (کود پتاسیم و آبیاری) بر درختان اعمال شدند. فاکتور آبیاری بر اساس مکش رطوبتی خاک با استفاده از تانسیموتر در چهار سطح (بدون آبیاری (مطابق عرف محل) (I₀), ۶۰ (I₁), ۴۰ (I₂), ۲۰ (I₃) کیلوپاسکال) در نظر گرفته شد. تانسیموتر در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از تنه درخت و در عمق ۳۰ سانتی‌متری مستقر گردید. لازم به ذکر است که بر اساس منابع موجود حداکثر تراکم ریشه مرکبات در مناطق مرطوب مانند شمال کشور در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری از خاک وجود دارد (۱۱، ۱۴ و ۳۲). بنابراین، در هر تکرار برای هر تیمار آبیاری (آبیاری در ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلوپاسکال) یک تانسیموتر در عمق ۳۰ سانتی‌متری در نظر گرفته و در مجموع ۱۲ تانسیموتر در عمق ۳۰ سانتی‌متری به کار گرفته شد. علاوه بر این، برای اطمینان از حرکت جبهه رطوبتی، در هر تیمار یک تانسیموتر نیز در عمق ۶۰ سانتی‌متری مستقر گردید. در خاک مورد مطالعه مقادیر رطوبت در تیمارهای آبیاری I₃، I₂ و I₁ به ترتیب ۲۹، ۲۶ و ۲۲ درصد بود. در پژوهش حاضر آبیاری با استفاده از میکروجت با سرعت تخلیه آب ۱/۵ لیتر در دقیقه و در زمانی که مکش رطوبتی خاک برای هر تیمار به مقدار مورد نظر می‌رسید، انجام می‌گرفت. برای این منظور هفته‌ای سه مرتبه اعداد تانسیموترها بررسی شد و

آبیاری بر اساس متوسط اعداد تانسیموتر تکرارها انجام و همه تکرارهای یک تیمار به صورت همزمان آبیاری شدند. مقدار ضریب تخلیه مجاز در تیمارهای آبیاری I₃، I₂ و I₁ در تحقیق حاضر به ترتیب ۲۱، ۳۵ و ۵۲ درصد بود و عمق آب آبیاری هر نوبت آبیاری در تیمارهای آبی مورد بررسی به ترتیب ۶۱، ۹۸ و ۱۴۶ میلی‌متر بر متر خاک بود. حجم آب آبیاری در سال آخر آزمایش در هر نوبت آبیاری برای هر درخت در مکش‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۱۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ لیتر بود. فاکتور پتاسیم بر اساس سن درخت در دو سطح ۵۰ (K₁) و ۱۰۰ (K₂) گرم ضرب در سن درخت در نظر گرفته شد و هر سال در اسفندماه در ناحیه سایه‌انداز درخت پخش و با خاک مخلوط گردید. کلیه عملیات باغداری شامل کوددهی (به جز پتاسیم)، هرس، کنترل علف‌های هرز و مبارزه با آفات و بیماری‌ها، طی مدت اجرای آزمایش برای همه درختان بطور یکسان انجام گردید. لازم به ذکر است که در مرحله رشد رویشی (تا چهار سال) فقط کود نیتروژن به صورت کودآبیاری هر دو هفته یک‌بار به مقدار ۵۰ گرم کود اوره برای هر نهال درخاک استفاده شد. در مرحله رشد زایشی، کودهای اوره، دی‌آمونوم فسفات، سولفات منیزیم و سولفات روی بر اساس آزمون خاک و برگ به همه درختان به مقدار مساوی داده شد.

در چهار سال اول پس از انتقال نهال‌ها به باغ قطر تاج درختان تحت تیمارهای مورد بررسی اندازه‌گیری شد و پس از باردهی درختان در دی ماه سال پنجم، ششم و هفتم، پس از رسیدن نسبت میزان مواد جامد قابل حل (TSS) به اسیدیته قابل تیتراسیون میوه به ۷-۶ درصد، میوه‌ها برداشت و مقدار عملکرد هر درخت اندازه‌گیری شد. علاوه بر این در دو سال آخر پژوهش حاضر مقدار پتاسیم قابل جذب خاک (۲۱) نیز اندازه‌گیری شد. همچنین میزان پرولین برگ، نشت یونی برگ، کلروفیل برگ (با استفاده از کلروفیل سنج مینولتا) براساس اسپاد، و قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره ۵ به ۱ (۳۹) آب به خاک نیز در سال آخر پژوهش اندازه‌گیری شدند.

پرولین از برگ‌ها با سولفوسالسیلیک اسید (۳٪ حجمی/حجمی) استخراج و به روش باتز (۳) اندازه‌گیری شد. نشت یونی به روش یان و همکاران (۴۸) اندازه‌گیری شد. قطعات برگ در بشر حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر دوبار تقطیر شناور شده و به مدت ۳ ساعت در دمای ۳۰ درجه سلسیوس انکوبه شدند. قابلیت هدایت الکتریکی محلول در دمای ۲۵ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲ دقیقه در آب جوش قرا داده شدند و سپس تا دمای اتاق (۲۵ درجه سلسیوس) خنک شدند و قابلیت هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شد. نشت یونی با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد.

$$EL(\%) = (EC1/EC2) \times 100$$

که در آن: EL نشت یونی و EC1، EC2 به ترتیب قابلیت هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده قبل و بعد از جوشاندن نمونه‌ها می‌باشد.

یونی برگ، کلروفیل برگ و قابلیت هدایت الکتریکی خاک در سال آخر پژوهش تجزیه واریانس دوطرفه انجام شد. مقایسه میانگین به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن و با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹ انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج بررسی ویژگی‌های خاک مورد پژوهش قبل از شروع آزمایش نشان داد که خاک مورد بررسی خاکی اسیدی، غیرشور با مقدار کربنات کلسیم معادل $>1\%$ می‌باشد (جدول ۱).

وجود اختلاف در عملکرد، پتاسیم قابل استفاده؛ و قطر تاج درخت در میان تیمارهای آبیاری و کوددهی پتاسیم و سال‌های نمونه‌برداری توسط تجزیه واریانس چند طرفه بررسی شد. از آنجا که آزمایش از زمان کاشت نهال‌ها در باغ هفت سال به طول انجامید و در سال اول باردهی درختان (سال پنجم بعد از کاشت نهال‌ها در باغ) مقدار عملکرد ناچیز بود، بنابراین در تحقیق حاضر داده‌های مربوط به عملکرد، پتاسیم قابل استفاده و قطر تاج در دو سال آخر هر اندازه‌گیری گزارش شده و برای در نظر گرفتن اثر سال بر این شاخص‌ها، تجزیه واریانس مرکب انجام شد (۳۰). علاوه بر این، در مورد دیگر ویژگی‌های مورد بررسی شامل میزان پرولین برگ، نشت

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک باغ مورد پژوهش
Table 1- Soil physical and chemical properties of studied garden

عمق (سانتی‌متر)	بافت (-)	پتاسیم (میلی گرم بر کیلوگرم)	فسفر (میلی گرم بر کیلوگرم)	نیتروژن (درصد)	کربن آلی (درصد)	قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	اسیدیته (-)
Depth (cm)	Texture (-)	Potassium (mg/kg)	Phosphorus (mg/kg)	Nitrogen (%)	Organic carbon (%)	Electrical conductivity (dS/m)	Acidity (-)
0-30	لوم رسی loam	198	40	0.14	1.43	0.048	6.2
30-60	رسی Clay	150	18	0.04	0.43	0.022	5.8

بنابراین، عملکرد و پتاسیم قابل استفاده تابعی از پتاسیل آب خاک، پتاسیم و سال مورد مطالعه می‌باشند. بررسی اثرات متقابل سطح پتاسیم، مکش رطوبتی خاک و سال بر مقدار پتاسیم قابل استفاده خاک نشان داد که در هر دو سال مورد مطالعه بیشترین پتاسیم قابل استفاده در تیمار I_0K_2 و کمترین مقدار این شاخص در تیمار I_3K_1 مشاهده شد. در هر دو سال مورد مطالعه مقدار پتاسیم قابل استفاده در خاک در تمامی سطوح مکش آب خاک با افزایش سطح کاربرد کود پتاسیم افزایش و با انجام آبیاری تکمیلی مقدار این شاخص در همه تیمارهای مورد مطالعه نسبت به تیمار بدون آبیاری کاهش یافت. به‌طور کلی، تغییرات مقدار پتاسیم قابل استفاده در خاک به مکش رطوبتی خاک در زمان آبیاری، سطح کاربرد کود پتاسیم و سال مطالعه بستگی داشت (جدول ۳). با توجه به تحقیقات گذشته، افزایش رطوبت خاک از ۱۰ به ۲۸ درصد منجر به افزایش بیش از دو برابری انتقال پتاسیم در خاک می‌گردد (۴۲)، بنابراین در تحقیق حاضر می‌توان این چنین استنباط کرد که با افزایش مکش آب در زمان آبیاری از ۲۰ به ۶۰ کیلوپاسکال با توجه به کاهش رطوبت خاک از ۳۰ به ۲۲ درصد در زمان آبیاری، مقدار پخشیدگی پتاسیم به سمت ریشه پرتقال کاهش یافته و به دنبال آن کاهش جذب این عنصر توسط ریشه رخ داده و مقدار پتاسیم خاک افزایش نشان داده است.

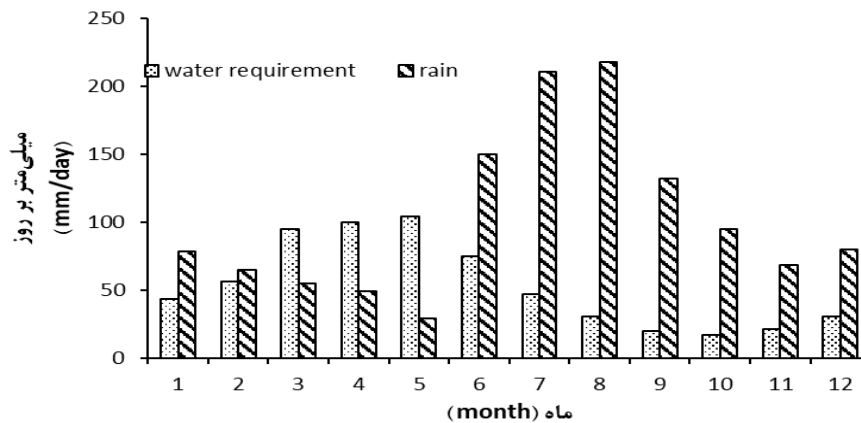
متوسط بارندگی طی دوره ده ساله‌ی مور مطالعه ۱۲۳۰ میلی‌متر در سال و متوسط نیاز آبی پرتقال طی این دوره ده ساله ۶۵۰ میلی‌متر بر سال بود. بررسی آمار هواشناسی ده ساله در منطقه مورد مطالعه نشان داد که تقریباً ۸۹ درصد بارندگی در منطقه مورد مطالعه از شهریور تا اردیبهشت ماه رخ داده است و متوسط مقدار بارندگی طی دوره ده ساله‌ی مورد بررسی در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد به‌ترتیب ۵۵، ۵۹ و ۲۹ میلی‌متر بر ماه بود. این درحالی بود که حداکثر مقدار نیاز آبی پرتقال در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد به‌ترتیب ۹۵، ۱۰۰ و ۱۰۴ میلی‌متر بر ماه (با کمک از نرم‌افزار CROPWAT) با استفاده از داده‌های هواشناسی محاسبه شد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، مقدار نیاز آبی مرکبات در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد بیشتر از مقدار بارندگی رخ داده طی این ماه‌ها می‌باشد. بنابراین، انجام آبیاری تکمیلی طی این ماه‌ها ضروری می‌باشد.

نتایج تجزیه واریانس مرکب اثر کاربرد دو سطح پتاسیم، اعمال چهار سطح مکش رطوبتی خاک در زمان آبیاری و دو سال نمونه‌برداری بر پتاسیم قابل استفاده، عملکرد و قطر تاج درخت در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود اثر سال بر عملکرد و قطر تاج؛ اثر مکش آب خاک بر عملکرد، قطر تاج و پتاسیم قابل استفاده و اثر سطح پتاسیم بر پتاسیم قابل استفاده معنی‌دار بود. هم‌چنین بررسی نتایج نشان داد اثر متقابل مکش آب خاک، پتاسیم و سال بر عملکرد و پتاسیم قابل استفاده معنی‌دار بود.

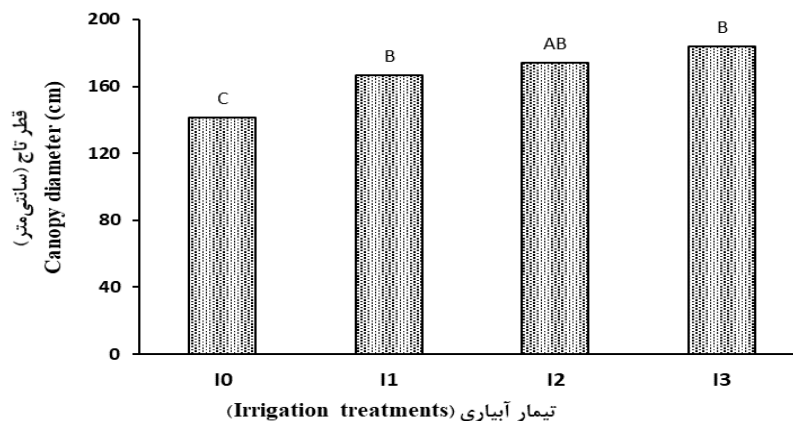
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس سه طرفه برای پتاسیم قابل استفاده، عملکرد و قطر تاج درختان پرتقال تامسون ناول طی دو سال نمونه برداری تحت اعمال تیمارهای مختلف آبیاری و کوددهی
Table 2- Three-factor analysis of variance (ANOVA) results (F) for available potassium, yield and canopy diameter per Thomson-Navel orange tree during two sampling years of different irrigation and fertilization treatments

ویژگی	سال	سال (بلوک)	مکش آب خاک	مکش آب خاک×سال	سطح پتاسیم	سطح پتاسیم×سال	پتاسیم	مکش آب خاک×پتاسیم	مکش آب خاک×پتاسیم×سال	مکش آب خاک×پتاسیم×سال×پتاسیم	ضریب تغییرات C.V. (%)
Attribute	Year	Year(Block)	Soil water tensions	Soil water tensions×year	Potassium level	Potassium level×year	Potassium level×year	Soil water tensions×potassium	Soil water tensions×potassium×year	Soil water tensions×potassium×year×potassium	
درجه آزادی (df)	1	6	3	3	1	1	1	3	3	3	-
پتاسیم (Potassium)	0.14 ^{n.s}	1.6 ^{n.s}	277*	7.6*	1529*	0.03 ^{n.s}	0.03 ^{n.s}	91*	11*	11*	9.6
عملکرد (Yield)	1711*	1.3 ^{n.s}	347*	17*	1.2 ^{n.s}	0.0 ^{n.s}	0.0 ^{n.s}	8.0*	11*	11*	6.8
قطر تاج (Diameter)	290*	4.3*	21*	1.1 ^{n.s}	1.4 ^{n.s}	0.04 ^{n.s}	0.04 ^{n.s}	1.2 ^{n.s}	0.2 ^{n.s}	0.2 ^{n.s}	9.6

*، n.s: F is significant at $P < 0.05$ or nonsignificant, respectively; The experiment lasted for 10 years, but mentioned attributes were measured in two years
* و n.s: F در سطح احتمال ۰.۰۵ معنی دار و یا غیرمعنی دار است؛ آزمایش ۱۰ سال طول کشید، اما شاخص های مورد نظر طی دو سال ارزیابی شدند



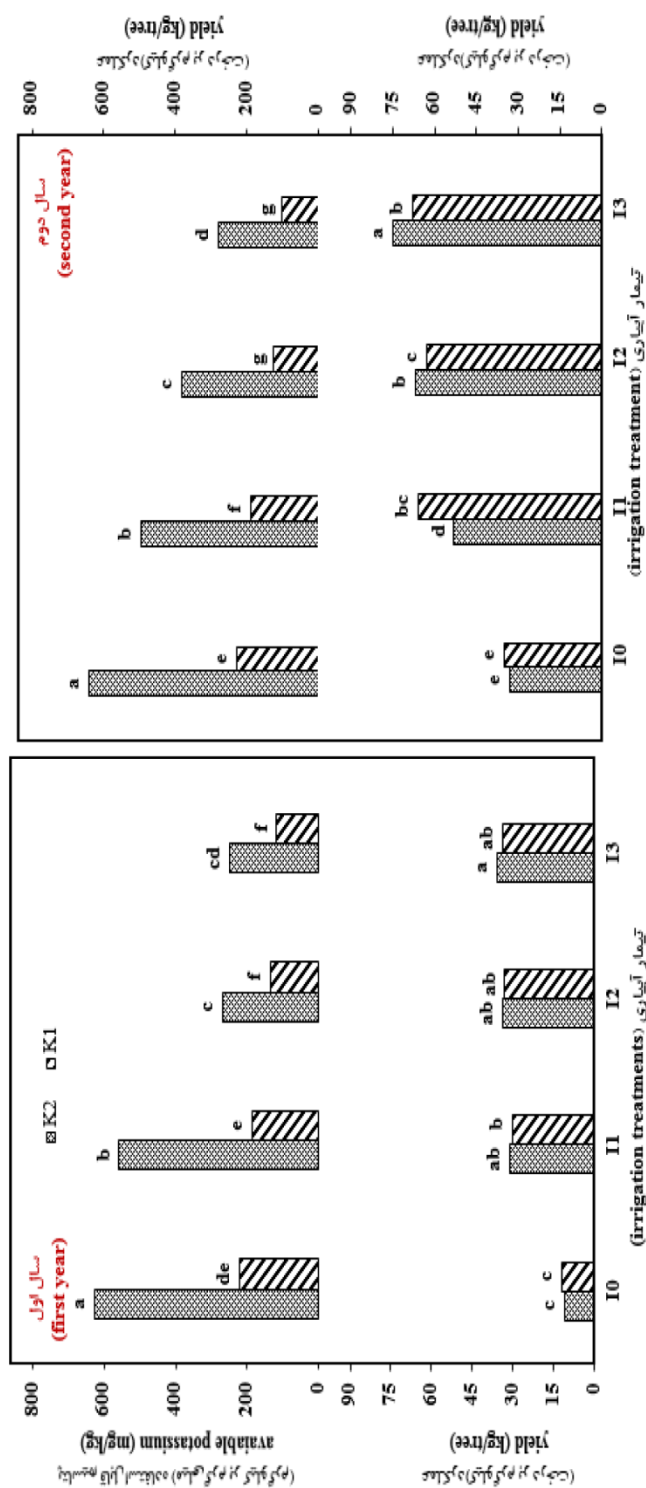
شکل ۱- متوسط ماهیانه مقدار بارندگی و نیاز آبی پرتقال طی دوره ده ساله مورد مطالعه
Figure 1- Average monthly rainfall and citrus water requirement during the ten-year monitoring period



شکل ۲- اثر تیمارهای آبیاری (I0، I1، I2، I3: به ترتیب آبیاری در مکش ۲۰، ۴۰، ۶۰ کیلوپاسکال و بدون آبیاری) بر قطر تاج درخت
میانگین‌های دارای حرف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند؛ I0، I1، I2، I3: به ترتیب آبیاری در مکش‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و تیمار بدون آبیاری
Figure 2- Effect of irrigation treatments (I3, I2, I1, I0: irrigation at 20, 40, 60 kPa and none-irrigation) over canopy diameter
Means with the same letter are not significantly different at $P < 0.05$. I3, I2, I1 and I0: Irrigation at 20, 40, 60 kPa and none-irrigation

آبیاری تأثیر معنی‌داری بر عملکرد داشت. علاوه بر این، در سطح اول کاربرد پتاسیم بین عملکرد مشاهده شده در تیمارهای آبیاری I₂، I₁ و I₃ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد ولی با دو برابر کردن پتاسیم عملکرد به طور معنی‌داری متأثر از سطح مکش رطوبتی در زمان آبیاری گردید. مورگان و همکاران (۳۱) گزارش کردند با وجود بارندگی در تابستان در خاک‌های شنی مناطق فلوریدا، آبیاری تکمیلی برای رشد و پرورش مرکبات ضروری است. در شمال ایران نیز علی‌رغم اینکه بارندگی سالیانه (۱۲۰۰ میلی‌متر) بیشتر از تبخیر-تعرق (میانگین ۷۵۰ تا ۸۵۰) است ولی آبیاری تکمیلی در ماه‌های خرداد، تیر، مرداد در همه سال‌ها و اردیبهشت و شهریور در اکثر سال‌ها ضروری می‌باشد، زیرا به علت توزیع نامناسب بارندگی، تبخیر و تعرق در این ماه‌ها که متقارن با مراحل آخر تقسیم سلولی میوه و نمو سلول‌های میوه می‌باشد (۲۹)، بیشتر از بارندگی است.

بررسی نتایج اثرات متقابل سطح پتاسیم، مکش رطوبتی و سال (جدول ۳) بر عملکرد درختان حاکی از آن است که در هر دو سال مورد مطالعه در تیمار I₀K₂ کمترین مقدار عملکرد و در درختان تحت تیمار I₃K₂ بیشترین عملکرد مشاهده شد. در سال اول مطالعه حاضر با افزایش سطح کاربرد کود پتاسیم در هیچ یک از سطوح مکش آب خاک در زمان آبیاری تفاوت معنی‌داری در عملکرد مشاهده نشد. این در حالی بود که در این سال در هر دو سطح کاربرد کود پتاسیم با انجام آبیاری تکمیلی، صرف نظر از مقدار مکش در زمان آبیاری، مقدار عملکرد افزایش یافت. در سال دوم مطالعه حاضر اثر پتاسیم بر عملکرد به مقدار مکش آب خاک در زمان آبیاری بستگی داشت. در این سال، بین تیمارهای آبیاری در مکش‌های رطوبتی مختلف در هر دو سطح کاربرد کود پتاسیم تفاوت معنی‌داری با درختان آبیاری نشده مشاهده گردید و مقدار مکش رطوبتی در زمان



شکل ۳- پتاسیم قابل استفاده و عملکرد درختان پرتقال تامسون ناول طی دو سال نمونه‌برداری تحت اعمال تیمارهای مختلف آبیاری و کوددهی.

میانگین‌های دارای حرف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند؛ I0، I1، I2، I3: به‌ترتیب آبیاری در مکش‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و بدون آبیاری و K2، K1: مقدار ۵۰ و ۱۰۰ گرم پتاسیم برای هر درخت.

Figure 3- Available potassium and yield per Thomson-Navel orange tree during two sampling years of different irrigation and fertilization treatments
Means with the same letter are not significantly different at $P < 0.05$. I3, I2, I1 and I0: Irrigation at 20, 40, 60 kPa and none-irrigation and K1, K2: 50 and 100 g potassium per tree

نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد تیمارهای پتاسیم و مکش رطوبتی خاک در زمان آبیاری در سال آخر پژوهش بر مقدار کلروفیل، نشت یونی، پرولین در برگ درختان پرتقال و نیز مقدار قابلیت هدایت الکتریکی خاک تحت تیمارهای ذکر شده، در جدول ۴ آورده شده است. لازم به ذکر است که اثر بلوک در پژوهش حاضر معنی دار نشد. همان طور که در جدول ۴ ملاحظه می شود اثر مکش آب خاک بر مقدار کلروفیل، نشت یونی، پرولین برگ پرتقال و نیز مقدار قابلیت هدایت الکتریکی خاک و اثر سطح پتاسیم بر نشت یونی، پرولین برگ پرتقال و مقدار قابلیت هدایت الکتریکی خاک در سطح ۵ درصد معنی دار بود. همچنین بررسی نتایج نشان داد اثر متقابل مکش آب خاک و پتاسیم بر نشت یونی، پرولین برگ پرتقال و نیز مقدار قابلیت هدایت الکتریکی خاک معنی دار بود. بنابراین، نشت یونی، پرولین برگ و نیز مقدار قابلیت هدایت الکتریکی خاک تابعی از پتاسیل آب خاک و پتاسیم می باشد. این درحالی است که مقدار کلروفیل برگ پرتقال تنها متأثر از پتاسیل آب خاک در زمان آبیاری است.

همان طور که در جدول ۲ ملاحظه می شود تنها اثر سال و مکش آب خاک بر قطر تاج درختان پرتقال معنی دار بود. بنابراین اثر مکش آب خاک بر این شاخص به سطح کاربرد پتاسیم بستگی نداشت و اثر مکش آب خاک بر قطر تاج درختان در شکل ۲ آورده شده است. بررسی نتایج نشان داد که کمترین مقدار قطر تاج در تیمار I_0 و بیشترین قطر تاج در درختان تحت تیمار I_3 مشاهده شد. قطر تاج این

درختان با انجام آبیاری تکمیلی افزایش نشان داد. طبق مطالعات گذشته تنش آبی اثری منفی بر عملکرد مرکبات داشته و رشد رویشی درخت را کاهش می دهد (۸، ۱۹ و ۴۰). با کاهش رشد رویشی درختان پرتقال تامسون ناول رقابت بر سرتولیدات فتوسنتزی بین بخش های رویشی و زایشی کاهش می یابد (۸). این کاهش رشد می تواند منجر به کاهش مهمی در هزینه های مربوط به مدیریت تولید شامل هرس، آب و انرژی گردد (۳۸). کاهش در رشد رویشی به عنوان یک سازوکار سازگاری درختان با شرایط تنش خشکی در نظر گرفته می شود. این سازگاری منجر به جذب تشعشع کمتر توسط درخت و به دنبال آن کاهش از دست رفت آب از طریق تبخیر و تعرق می گردد (۲۳).

طبق تحقیقات انجام شده در خاک های شنی ایالت فلوریدا، اگر درختان پرتقال هاملین پیوند شده بر کلوپاتراماندارین در مکش های رطوبتی بین ۱۰ تا ۱۵ کیلوپاسکال آبیاری شوند رشد بیشتری خواهند داشت (۳۷)، اما نتایج این پژوهش نشان داد که با انجام آبیاری تکمیلی صرف نظر از اینکه مکش آب خاک در زمان آبیاری ۲۰، ۴۰ و یا ۶۰ باشد، قطر تاج درختان تامسون ناول افزایش می یابد که این اختلاف می تواند به دلیل تفاوت در بافت خاک، پایه و رقم در این دو مطالعه باشد. لذا در باغ هایی که خاک دارای بافت رسی است، آبیاری در زمانی که مکش رطوبتی خاک به ۶۰ کیلوپاسکال می رسد، قابل توصیه است.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف آبیاری و کوددهی بر هدایت الکتریکی خاک، مقدار کلروفیل، نشت یونی و پرولین برگ درختان پرتقال تامسون ناول

Table 2. Results of analysis of variance (ANOVA) effects of different irrigation and fertilizer treatments over soil electrical conductivity, chlorophyll content, ion leakage and proline content of Thomson Novel orange leaves

ویژگی Attribute	مکش آب خاک Soil water tensions	سطح پتاسیم Potassium level	مکش آب خاک×پتاسیم Soil water tensions×potassium	ضریب تغییرات C.V. (%)
df درجه آزادی	3	1	3	-
هدایت الکتریکی Electrical conductivity	47*	116*	11*	17
کلروفیل Chlorophyll	14*	0.00 ^{n.s}	1.24 ^{n.s}	3.4
نشت یونی Ionic leakage	3.5*	38*	2.8*	13
پروline Proline	9.1*	14*	1.6*	16

* و n.s به ترتیب F در سطح احتمال $P < 0.05$ معنی دار و یا غیرمعنی دار است؛

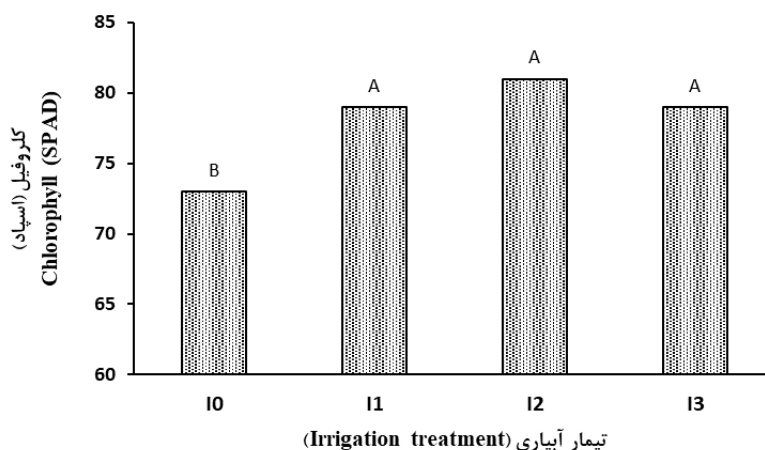
*, n.s: F is significant at $P < 0.05$ or nonsignificant, respectively

بنابراین، مقدار کلروفیل برگ به انجام آبیاری تکمیلی وابسته است. طبق گزارش ایکسی و همکاران (۴۷) تحت تنش های خشکی در مرکبات مقدار کلروفیل a در مقایسه با کلروفیل b راحت تر و سریع تر تخریب می شود. بنابراین به دنبال تنش رطوبتی در پرتقال نسبت کلروفیل a به b کاهش یافته و رنگ برگ سبز روشن تر شده و

همان طور که ذکر شد تنها اثر مکش آب خاک بر کلروفیل برگ درختان پرتقال معنی دار بود (جدول ۴). نتایج نشان داد، افزایش کاربرد پتاسیم اثر معنی داری بر مقدار کلروفیل برگ نداشت (جدول ۴)، این درحالی بود که صرف نظر از مقدار پتاسیم کاربردی، مقدار کلروفیل برگ با انجام آبیاری تکمیلی حتی در تیمار I_1 افزایش یافت (شکل ۴).

مرکبات (۱۳ و ۴۷)؛ درختان سیب (۵) در پاسخ به تنش خشکی گزارش شده است. بنابراین، با توجه به نتایج مقدار کلروفیل هیچ کدام از تیمارهای دارای آبیاری تکمیلی دچار تنش نشده‌اند.

کلروفیل متر عدد کوچکتري را نشان می‌دهد. کاهش مقدار کلروفیل به دنبال تنش رطوبتی احتمالاً به دلیل افزایش فعالیت آنزیم کلروفیل‌از (۱۵) و کاهش جذب کل عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن و منیزیم به دنبال تنش رطوبتی می‌باشد. کاهش کلروفیل در درختان



شکل ۴- اثر تیمارهای آبیاری (I₀, I₁, I₂, I₃: به ترتیب آبیاری در مکش ۲۰، ۴۰، ۶۰ کیلوپاسکال و تیمار بدون آبیاری) بر کلروفیل برگ میانگین‌های دارای حرف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند

Figure 4- Effect of irrigation treatments (I₃, I₂, I₁, I₀: irrigation at 20, 40, 60 kPa and none-irrigation) over chlorophyll content of leaves

Means with the same letter are not significantly different at $P < 0.05$.

تیمارهای دارای آبیاری تکمیلی دچار تنش نشده‌اند. بررسی نتایج نشان داد با دو برابر کردن مقدار کود پتاسیم نشت یونی کاهش معنی‌داری نشان داد. علاوه بر این با افزایش مکش رطوبتی خاک (تیمارهای I₁ و I₀)، مقدار نشت یونی افزایش یافت. بررسی اثرات متقابل سطح پتاسیم و مکش رطوبتی خاک نشان داد که بیشترین نشت یونی در تیمار I₀K₁ (۲۷ درصد) و کمترین مقدار نشت یونی در I₃K₂ (۱۷ درصد) و I₂K₂ (۱۶ درصد) مشاهده شد. همان‌طور که در پژوهش حاضر مشاهده می‌شود با افزایش سطح کاربرد پتاسیم به ویژه در مواقعی که مکش رطوبتی خاک در زمان آبیاری > ۴۰ کیلوپاسکال باشد، منجر به افزایش پایداری غشا و به دنبال آن کاهش نشت یونی می‌گردد. با توجه به نتایج شاخص‌های کلروفیل، مقدار پرولین و نشت یونی انجام آبیاری تکمیلی باعث کاهش تنش و بهبود شاخص‌های بررسی شده در درختان مورد مطالعه شده هر چند بین تیمارهای آبیاری تکمیلی در مکش‌های ۶۰، ۴۰ و ۲۰ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشده است. به عبارت دیگر، با در نظر گرفتن این شاخص‌ها هیچ کدام از تیمارهای دارای آبیاری تکمیلی دچار تنش نشده‌اند. علاوه بر این با توجه به نقش پتاسیم در تنظیم اسمزی و رفع آسیب اکسایشی، به نظر می‌رسد، افزایش مقدار کاربرد کود پتاسیم تنها در فواصل آبیاری کم و متوسط آبیاری تأثیر معنی‌داری بر مقدار پرولین و نشت یونی داشته است.

بررسی نتایج اثرات متقابل سطح پتاسیم و مکش رطوبتی (جدول ۵) بر مقدار پرولین برگ پرتقال نشان داد با دو برابر کردن مقدار کود پتاسیم و افزایش مکش آب در زمان آبیاری، مقدار پرولین افزایش معنی‌داری نشان داد. نتایج نشان داد که کمترین مقدار پرولین در تیمار I₃K₁ و بیشترین مقدار پرولین در تیمار I₀K₂ مشاهده شد. در واقع همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌گردد، با انجام آبیاری تکمیلی مقدار پرولین کاهش یافته ولی بین تیمارهای انجام آبیاری در مکش‌های رطوبتی مختلف از لحاظ مقدار پرولین تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. بررسی منابع نشان داد اسید آمینه پرولین با اعمال تنش خشکی شامل توقف آبیاری برای نه روز در نهال‌های شش ماهه (۱۶)؛ نگهداشت رطوبت خاک در حد ۲۰ درصد ظرفیت زراعی به مدت پنج روز برای نهال‌های دو ساله (۲۸) و توقف آبیاری به مدت ده روز برای نهال‌های یک‌ساله (۴۹) در گیاه تجمع می‌یابد و منجر به افزایش فشار اسمزی بافت گیاه می‌شود. علاوه بر این، همان‌طور که در پژوهش حاضر مشاهده می‌شود با افزایش سطح کاربرد پتاسیم به ویژه در تیمار آبیاری I₃، مقدار پرولین در برگ افزایش یافته است. بررسی منابع نشان می‌دهد وقتی مقدار پتاسیم گیاه کافی و مناسب باشد، به دلیل افزایش ترکیبات آلی مانند پرولین و افزایش فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، اثرات منفی تنش‌های خشکی کاهش می‌یابد (۲۴). بنابراین، با توجه به نتایج مقدار پرولین هیچ کدام از

جدول ۵- قابلیت هدایت الکتریکی خاک و نیز مقدار نشت یونی و پرولین در برگ پرتقال تامسون ناول تحت اعمال تیمارهای مختلف آبیاری و کوددهی

Table 5- electrical conductivity and also ionic leakage and proline content of Thomson Novel orange leaves of different irrigation and fertilization treatments

تیمارهای آبیاری Irrigation treatments	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) EC (dS/m)			نشت یونی (درصد) Ionic leakage (%)			پرولین (میکروگرم بر گرم) Proline (µg/g)		
	K2	K1	میانگین (Mean)	K2	K1	میانگین (Mean)	K2	K1	میانگین (Mean)
I ₀	0.58Aa	0.29Ab	0.44A	22Aa	27Aa	24A	102Aa	90Aa	96A
I ₁	0.49Ba	0.21Bb	0.35B	20Aa	25Aa	23AB	84Ba	66Ba	75B
I ₂	0.32Ca	0.16Bb	0.24C	16Bb	26Aa	21B	75Ba	64Ba	69B
I ₃	0.17Da	0.13Ba	0.15D	17Bb	23Aa	20B	80Ba	56Bb	68B
میانگین	0.39a	0.20b	-	19b	25a	-	85a	69b	-

در هر ستون میانگین‌های دارای حرف بزرگ مشترک و در هر ردیف میانگین‌های دارای حرف کوچک مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند؛

I₀, I₁, I₂, I₃: به ترتیب آبیاری در مکش‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و بدون آبیاری و K₂, K₁: مقدار ۵۰ و ۱۰۰ گرم پتاسیم برای هر درخت

Means within a column with the same large letter and means within a row with the same small letter are not significantly different at $P < 0.05$;

I₃, I₂, I₁ and I₀: Irrigation at 20, 40, 60 kPa and none-irrigation and K₁, K₂: 50 and 100 g potassium per tree

خاک تا اندازه‌ای منجر به افزایش فشار اسمزی ناحیه ریشه پرتقال گشته و در نتیجه مقدار قابلیت هدایت الکتریکی در این ناحیه را افزایش خواهد داد.

به‌طور کلی، همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد در سطح اول پتاسیم با افزایش مکش رطوبتی خاک از ۲۰ به ۶۰ کیلوپاسکال، بین مقدار کلروفیل، نشت یونی، مقدار پرولین در برگ درختان بررسی شده (جدول ۵) و مقدار هدایت الکتریکی در محیط ریشه‌ی این درختان (جدول ۵) تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد و این موضوع به همراه عدم مشاهده کاهش معنی‌دار عملکرد در تیمارهای ذکر شده، نشان‌دهنده‌ی عدم وقوع تنش با افزایش مکش رطوبتی خاک از ۲۰ به ۶۰ کیلوپاسکال در سطح اول کاربرد کود پتاسیم می‌باشد. در سطح دوم پتاسیم با افزایش مکش رطوبتی خاک از ۲۰ و ۴۰ به ۶۰ کیلوپاسکال، نشت یونی و مقدار هدایت الکتریکی در ناحیه ریشه به‌طور معنی‌داری افزایش یافته و مقدار عملکرد به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. نتیجه‌ی فوق حاکی از بروز تنش در درختان مورد بررسی با افزایش مکش از ۲۰ و ۴۰ به ۶۰ کیلوپاسکال در سطح دوم کاربرد کود پتاسیم می‌باشد. به‌هرحال، با دو برابر کردن مقدار کاربرد پتاسیم در درختان پرتقال آبیاری شده در مکش‌های ۲۰ و ۴۰ کیلوپاسکال می‌توان عملکرد و شاخص‌های نشت یونی و مقدار پرولین را بهبود بخشید. این درحالی بود که با دو برابر کردن پتاسیم در درختان آبیاری شده در مکش رطوبتی ۶۰ کیلوپاسکال و تیمار بدون آبیاری، مقدار عملکرد به‌طور معنی‌داری کاهش نشان داده است.

مقدار قابلیت هدایت الکتریکی در تیمار ۱۰۰ گرم پتاسیم برای هر درخت (۰/۳۹ دسی‌زیمنس بر متر) به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار ۵۰ گرم پتاسیم برای هر درخت (۰/۲۰ دسی‌زیمنس بر متر) بود. صرف‌نظر از سطح کاربرد کود پتاسیم، با افزایش مکش رطوبتی خاک در زمان آبیاری مقدار قابلیت هدایت الکتریکی خاک افزایش نشان داد. به هر حال، با انجام آبیاری تکمیلی، مقدار قابلیت هدایت الکتریکی کاهش یافته است. بررسی اثرات متقابل سطح پتاسیم و مکش آب در خاک نشان داد که بیشترین قابلیت هدایت الکتریکی خاک در تیمار I₀K₂ (۰/۵۸ دسی‌زیمنس بر متر) و کمترین مقدار این شاخص در تیمار I₃K₁ (۰/۱۳ دسی‌زیمنس بر متر) مشاهده شد. نتایج نشان داد، در سطح اول کاربرد پتاسیم بین قابلیت هدایت الکتریکی عصاره خاک مشاهده شده در تیمارهای آبیاری I₁، I₂ و I₃ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد ولی با دو برابر کردن پتاسیم، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره خاک به‌طور معنی‌داری با افزایش مکش رطوبتی خاک (تیمار I₃ به سمت I₁) در زمان آبیاری به دلیل نبود آب کافی برای شستشوی پتاسیم از ناحیه ریشه، افزایش نشان داد. علاوه براین، با دو برابر کردن مقدار پتاسیم در تیمارهای مختلف اعمالی آبیاری با استثنا تیمار آبیاری I₃، مقدار قابلیت هدایت الکتریکی خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت هرچند مقدار این افزایش متفاوت بود. به‌طور کلی، تغییرات قابلیت هدایت الکتریکی خاک به مکش آب در خاک در زمان آبیاری و سطح کاربرد کود پتاسیم بستگی دارد. کاربرد کود معدنی سولفات پتاسیم با توجه به ضریب شوری این کود (۳۳) در

ضروری است. با توجه به نقش پتاسیم در تنظیم اسمزی و رفع آسیب اکسایشی، این عنصر می‌تواند در بهبود عملکرد و رشد درختان در شرایط آبیاری در مکش ۲۰ و ۴۰ کیلوپاسکال نقش موثر داشته باشد، اما در مکش آب در خاک ۶۰ کیلوپاسکال، نه تنها با دو برابر کردن کاربرد کود پتاسیم افزایشی در عملکرد مشاهده نشد بلکه عملکرد کاهش نیز یافته است. بنابراین با توجه به اینکه بین مقدار عملکرد حاصله در سطوح تیمارهای مکش آبیاری ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلوپاسکال در سطح اول کاربرد کود پتاسیم تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد و نیز با در نظر گرفتن این موضوع که با دو برابر کردن کاربرد کود پتاسیم در سطوح آبیاری در ۲۰ و ۴۰ کیلوپاسکال افزایش عملکرد چندانی (به ترتیب ۱۰ و ۶ درصد در سال آخر پژوهش) مشاهده نگردیده، بنابراین با توجه به مشکلات ناشی از بحران آب، به نظر می‌رسد با آبیاری در مکش ۶۰ و مقدار کاربرد ۵۰ گرم پتاسیم ضربدر سن به ازای هر درخت پرتقال می‌توان هم به عملکرد مناسب دست یافت و هم در جهت حفظ منابع آبی تلاش نمود.

بنابراین، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که افزایش کاربرد کود پتاسیم در خاک طی دوره خشکی ناشی از فواصل آبیاری زیاد (آبیاری در مکش ۶۰ کیلوپاسکال) و یا تحت شرایط بدون آبیاری تکمیلی، می‌تواند اثرات منفی خشکی بر رشد پرتقال را تشدید کند. زیرا همان‌طور که قبلاً ذکر شد، افزایش دو برابری کاربرد کود معدنی پتاسیم منجر به افزایش فشار اسمزی و قابلیت هدایت الکتریکی ناحیه ریشه پرتقال و در نتیجه کاهش عملکرد خواهد شد. در واقع با دو برابر کردن مقدار کاربرد پتاسیم در مکش آب در خاک ۶۰ کیلوپاسکال، مقدار تنش خشکی به دلیل شوری ناشی از کاربرد کود پتاسیم و نبود آب کافی برای شستشوی املاح از ناحیه توسعه ریشه درخت، تشدید شده و مقدار عملکرد کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری

بارندگی، منبع اصلی تأمین آب برای درختان مرکبات در مناطق شمالی کشور می‌باشد. به دلیل توزیع نامنظم بارندگی طی فصل رشد، انجام آبیاری تکمیلی در این مناطق برای دستیابی به عملکرد بهینه

منابع

- 1- Anonymous. 2015. Agricultural Statistical. Ministry of Agricultural Jihad, Department of Planning and Economy, Center for Information and Communication Technology, Tehran, Iran. (In Persian)
- 2- Asadi Kangarshahi A., and Akhlaghi Amiri N. 2015. Advanced and applied citrus nutrition. Agricultural Education and Extension. (In Persian)
- 3- Bates L., Waldren R., and Teare I. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil*, 39: 205-207.
- 4- Blum A. 1996. Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. *Plant Growth Regulation*, 20: 33-45.
- 5- Bolat M., Dikilitas S., Ercisli A.I., kinci A., and Tonkaz T. 2014. The effect of water stress on some morphological, physiological, and biochemical characteristics and bud success on apple and quince rootstocks. *Scientific World Journal*, 4: 769-732
- 6- Boman B.J., Obreza T.A., and Morgan K.T. 2008. Citrus best management practices: fertilizer rate recommendation and precision application in Florida. *Proceedings of the International Society of Citriculture*, 1: 573-578.
- 7- Bremner J.M. 1996. Nitrogen-total. p. 1085-1121. In D.L. Sparks (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3, chemical methods. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- 8- Carlos B.L. 2013. Regulated deficit irrigation in citrus: agronomic response and water stress indicators. Ph.D. thesis, Polytechnic University of Valencia. Valencia, Spain.
- 9- Creighton J., Sleeper D.A., and Hubbard C. 1989. Tensiometers for irrigation scheduling in a florida citrus grove. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 102: 69-72.
- 10- Delauney A.J., and Verma D.P.S. 1993. Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *The Plant Journal*, 4: 215-223.
- 11- Ebadi H. 2011. Effect of water different levels of micro irrigation on quality and yield fruit of Thomson navel orange in the west of Mazandaran. Final report. Iran Citrus Research Institute. (In Persian with English abstract)
- 12- Fayez Kh.A., and Bazaid S.A. 2014. Improving drought and salinity tolerance in barley by application of salicylic acid and potassium nitrate. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13: 45-55.
- 13- Fifaei R., Fotouhi Ghazvini R., Golein B., and Hamidoghli Y. 2016. Effect of drought stress on proline, soluble sugars, malondialdehyde and pigments content in northern commercial Citrus rootstocks. *Journal of Crops Improvement*, 17: 939-952. (In Persian with English abstract)
- 14- Ford H. 1972. Eight years of root injury from water table fluctuations. *Proceedings of the Florida State*

- Horticultural Society, 85: 65-68.
- 15- Garcia A.L., Torrecillas A., Leon A., and Ruiz-Sunches M.C. 1987. biochemical Indicators of the Water Stress in Maize Seedlings. *Biologia Plantarum*, 29: 45-48.
- 16- Garcia-Sanchez F., Syvertsen J.P., Gimeno V., Botía P., and Perez-Perez J.G. 2007. Responses to flooding and drought stress by two citrus rootstock seedlings with different water-use efficiency. *Physiologia Plantarum*, 130: 532-42.
- 17- Gee G.H., and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. p. 383-409. In: A. Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2, physical properties. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- 18- Gimeno V., Díaz-Lopez L., Simon-Grao S., Martínez V., Martínez-Nicolas J.J., and García-Sanchez F. 2014. Foliar potassium nitrate application improves the tolerance of *Citrus macrophylla* L. seedlings to drought conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 83: 308-315.
- 19- Gonzalez-Altozano P., and Castel J.R. 1999. Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. I. Yield and fruit quality effects. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 74: 706-713.
- 20- Gonzalez-Altozano P., and Castel J.R. 2000. Regulated deficit irrigation in "Clementina de Nules" citrus trees. II. Vegetative growth *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 75: 388-392.
- 21- Helmke Ph.A., and Sparks D.L. 1996. Lithium, sodium, potassium, rubidium and cesium. p. In D.L. Sparks (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3, chemical methods. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- 22- Hilgeman R.H., and Sharp F.O. 1970. Response of Valencia orange trees to four soils water schedules during 20 years. *Journal of American Society of Horticulture Science*, 95: 739 -745.
- 23- Hsiao T.C. 1973. Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Biology*, 24: 519-570.
- 24- Khammari I., Galavi M., Ghanbari A., Solouki M., and Poorchaman M.R.A. 2012. The effect of drought stress and nitrogen levels on antioxidant enzymes, proline and yield of Indian Senna (*Cassia angustifolia* L.). *Journal of Medicinal Plants Research*, 11: 2125-2130.
- 25- Khoshbakht D., Akbar Ramin A., and Baninasab B. 2014. Citrus Rootstocks Response to Salinity: Physio-biochemical Parameters Changes. *Research Journal of Environmental Sciences*, 8: 29-38.
- 26- Lei Y.B., Yin C.Y., and Li C.Y. 2006. Differences in some morphological, physiological, and biochemical responses to drought stress in two contrasting populations of *Populus przewalskii*. *Physiologia Plantarum*, 127: 182-191.
- 27- Loeppert R.H., and Sparks D.L. 1996. Carbonate and gypsum. p. 437-474. In D.L. Sparks (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3, chemical methods. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- 28- Malik N.S.A., Perez J. L., Kunta M., Patt J.M., and Mangan R.L. 2014. Changes in free amino acids and polyamine levels in Satsuma leaves in response to Asian citrus psyllid infestation and water stress. *Insect Science*, 21: 707-716.
- 29- Mahdavi Reykande J., Akhlaghi Amiri N., and Shahabian M. 2013. Analyzing phenological stages of three citrus varieties at foothills, plain and shoreline areas of Sari in North of Iran. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 6: 452-457.
- 30- Mooreand K.J., and Dixon Ph.M. 2015. Analysis of Combined Experiments Revisited. *Agronomy Journal*, 107: 763-771.
- 31- Morgan K.T., Obreza T.A, and Wheaton T.A. 2006. Size, biomass and nitrogen relationships with sweet orange tree growth. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 131: 149-156.
- 32- Morgan K.T, Obreza T.A., and Scholberg J.M.S. 2007. Orange tree fibrous root length distribution in space and time. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 132: 262-269.
- 33- Murray T.P., and Clapp J.G. 2004. Current fertilizer salt index tables are misleading. *Communications in Soil Science and plant Analysis*, 35: 2867-2873.
- 34- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Total carbon organic carbon and organic matter. p. 961-1011. In D.L. Sparks (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3, chemical methods. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- 35- Obreza T., and Morgan K.T. 2011. Nutrition of Florida Citrus Trees. University of Florida, IFAS Extension.
- 36- Olsen, S.R., and Sommers L.E. 1984. Phosphorus. p. 403-430. In A. Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part1, chemical and biological properties. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- 37- Paramasivam, S., Alva A.K., and Fares A. 2000. An evaluation of soil water status using tensiometers in a sandy soil profile under citrus production. *Journal of Soil Science*, 165: 345-353.
- 38- Pérez-Pérez J.G., García J., Robles J.M., and Botía P. 2010. Economic analysis of navel orange cv. 'Lane Late' grown on two different drought-tolerant rootstocks under deficit irrigation in South-eastern Spain. *Agricultural Water Management*, 97:157-164.
- 39- Rhoades J.D. 1996. Salinity Electrical conductivity and total dissolved solids. p. 417-437. In D.L. Sparks (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3, chemical methods. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- 40- Romero P., Navarro J.M., Perez-Perez J., Garcia-Sanchez F., Gomez-Gomez A., Porras I., Martinez V., and Botia P. 2006. Deficit irrigation and rootstock: their effects on water relations, vegetative development, yield, fruit

- quality and mineral nutrition of *Clemenules mandarin*. Tree Physiology, 26: 1537–1548.
- 41- Sanchez C.A., Wilcox M., Wright G.C., and Brown P. 1996. Efficient Irrigation and N Management for Lemons: Results for 1993-1996. Citrus Research Report, 22-44.
- 42- Skogley E.O., and Haby V.A. 1981. Soil Science Society of American Journal, 45:533-536.
- 43- Spiegel-Roy P., and Goldschmidt E.E. 1996. Biology of Citrus. Cambridge University Press.
- 44- Smajstrala A.G., and Koo R.C.J. 1985. Effects of trickle irrigation methods and amounts of water applied on citrus yield. Proceedings of the Florida State Horticultural Society, 97: 3-7.
- 45- Srivastava A.K., Shurgure P.S., and Shyam S. 2003. Differential fertigation response of Nagpur mandarin (*Citrus reticulate Balanco*) on an alkaline Inceptisol under sub-humid tropical climate. Tropical Agriculture, 80: 97–104.
- 46- Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. p. 475-491. In D.L. Sparks (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 3 chemical methods. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- 47- Xie Sh., Liu Q., Xiong X., and Lovatt C.J. 2012. Effect of water stress on citrus photosynthetic characteristics. Acta Horticulturae, 928: 315-322
- 48- Yan B., Dai Q., Liu X., Huang S., and Wang Z. 1996. Flooding-induced membrane damage, lipid oxidation and activated oxygen generation in corn leaves. Plant Soil, 179:261-268.
- 49- Zandalinas S.I., Rivero R.M., Martinez V., Gomez-Cadenas A., and Arbona V. 2016. Tolerance of citrus plants to the combination of high temperatures and drought is associated to the increase in transpiration modulated by a reduction in abscisic acid levels. Plant Biology, 16:1-16.



Soil Water Potential and Potassium Application Effects on Yield and Biochemical Characteristics of Thomson Navel Orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck.)

T. Raiesi^{1*}- B. Moradi²- B. Golein³

Received: 17-02-2018

Accepted: 23-07-2018

Introduction: Citrus is the main fruit group grown in tropical as well as sub-tropical climate of more than 150 countries in the world. In Iran, the total area under citrus crops is 0.284 M ha with a production of 4.345 M ton and a productivity of 17 ton per ha. Citrus is also one of the most important horticultural products in Mazandaran, with 112,000ha devoted to its cultivation. Drought stress is frequent in Iran and is common in the dry summer periods in Mazandaran. Therefore, irrigation is essential during mentioned periods in this province. Irrigation scheduling and water requirement of the citrus crops are one of the main concerns of the citrus fruit production. Irrigating based on soil water potential (tensiometer) is one of the irrigation scheduling methodologies. In addition, fertilization is used to promote quantity and quality of fruit production. Potassium has a key role in the osmotic adjustment of plants and alleviate the effects of drought stress. Until now, studies on citrus to evaluate the effects of potassium fertilization to mitigate the negative effects of drought stress have not been conducted. In the present study, we hypothesised that K applications via soil could contribute to osmotic adjustment of citrus and alleviate the effects of drought stress. Thus, the objective of the present study was to evaluate the effects of different soil water potential and rate of potassium (K) application on biochemical indices and growth responses of Thomson navel (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) orange seedlings on Citrumelo rootstock.

Materials and Methods: This study site was located at the Citrus and Subtropical Fruit Research Center of Horticultural Science Research Institute (36°54'11"N, 50°39'30"E), with a mean annual rainfall of 1200 mm. Thomson navel trees (*Citrus sinensis* (L.) were planted at 7 × 6m distances. Soil had a pH (soil-to-water suspension ratio of 1:2) of 6.2 and contained 14.3 g kg⁻¹ organic C and CaCO₃<1%. The texture of soil was clay loam. A two-year field study was conducted in a factorial experiment based on randomized complete block design with four selected ranges of soil water potential, two levels of K application, and four replicates. Irrigations were scheduled using soil moisture tensiometers. The irrigation treatments were scheduled when soil water tensions reached 20, 40, and 60 kilopascal (kPa) on the tensiometers per treatment and results were compared with control (none irrigation) treatment. Soil water tensions of 20, 40, and 60 kPa correspond to soil water depletions of 17, 35, and 52%, respectively, of the available soil water for the studied soil. Levels of K fertilizer were 50 (K₁) and 100 (K₂) g K × age of tree. Potassium fertilizer was broadcast below the tree canopy in March. At the end of each year, yield, available K and some growth indices were measured. In addition, in the last year, proline, ionic leakage and electrical conductivity were also measured. All data were represented as mean of four replicates. Differences in yield, canopy diameter and available K among fertilizer and irrigation treatments and sampling years were analyzed using general linear model two-way analysis of variance (ANOVA) in SAS 9.1. Since the mentioned attributes were measured during two years to take into account annual variation, we used ANOVA procedure for a combined analysis of data. The significance of differences between the mean of treatments were determined by using Duncan test. All the statistical analyzes were performed by SAS 9.2.

Results and Discussion: The results showed that irrigation increased the canopy diameter (P<0.05). Under K₁ application, the tree yield was not significantly different (P≥0.05) between irrigation at different water potentials (I₁, I₂ and I₃). However, the K effects on tree yield depended on soil water potential and the positive effects of K₂ application were evident only in the I₂ and I₃ treatments. However, K₂ application reduced the yield in irrigation treatments including I₀ and I₁ significantly (P<0.05) compared with K₁ application. In addition, the results of the last year showed that proline and ionic leakage were increased (P<0.05) by reduce of water potential in irrigation time. However, double application of K (K₂) increased (P<0.05) proline and decreased

1, 2 and 3- Assistant Professor, Instructor and Associate Professor of Citrus and Subtropical Fruit Research Center, Horticultural Science Research Institute, Agricultural Research and Education Organization (AREO), Ramsar, Respectively

(*- Corresponding Author Email: taraiesi@gmail.com)

ionic leakage as compared with normal application of K (K_1). Moreover, available K and electrical conductivity were increased ($P<0.05$) by excessive application of K and reduce of soil water potential.

Conclusion: In summary, regarding this experiment, irrigation at 60 kPa (depletion coefficient =52%) and potassium application rate of 50 g K $\times$ age of tree was the best treatment.

Keywords: Citromelo, Ionic leakage, Irrigation, Potassium fertilizer, Proline, Tensiometer, Yield

بررسی اثر اسید هیومیک و اسید فولویک بر روی عملکرد گندم و کارایی مصرف آب تحت تنش خشکی

مریم پورمراد^{۱*} - محمدجعفر ملکوتی^۲ - محمدمهدی طهرانی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

چکیده

با توجه به بحران کم‌آبی و ضرورت صرفه‌جویی در منابع آب و از سوی دیگر نقش بسزای اسیدهای آلی در کاهش اثرات منفی تنش خشکی، این مطالعه به منظور بررسی اثر اسید هیومیک و اسید فولویک بر روی عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) و کارایی مصرف آب در شرایط تنش خشکی در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه خاک و آب کرج در سال زراعی ۹۵-۹۴ اجرا گردید. این آزمایش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی به صورت کرت‌های خرد شده با سه تکرار به اجرا درآمد. عامل اصلی رژیم آبیاری در دو سطح آبیاری کامل و تنش (۳۵ درصد کمتر از نیاز آبی گیاه)، عامل فرعی شامل اسیدهای آلی محلول پاشی اسید فولویک در سه سطح با غلظت (صفر، ۵ و ۱۰ گرم در لیتر) و مصرف خاکی اسید هیومیک در دو سطح (صفر و ۲۰ کیلوگرم در هکتار) بود. نتایج نشان داد کاربرد توأم اسید فولویک (۵ گرم در لیتر) و اسید هیومیک بر روی عملکرد کل و دانه، وزن هزار دانه، ارتفاع اندام هوایی، طول خوشه، تعداد دانه در خوشه و کارایی مصرف آب افزایش معنی‌داری داشت. نتایج نشان داد مصرف خاکی اسید هیومیک در شرایط تنش با ۹/۰۹ درصد افزایش عملکرد دانه و محلول پاشی اسید فولویک با غلظت ۱۰ گرم در لیتر با ۲۴/۹ درصد افزایش عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد آبیاری کامل باعث جبران کاهش عملکرد حاصل از تنش شد. بیشترین کارایی مصرف آب (۳/۸۶ کیلوگرم بر متر مکعب) در محلول پاشی اسید فولویک با غلظت ۱۰ گرم در لیتر بود. در نتیجه در شرایط تنش خشکی کاربرد اسیدهای آلی می‌تواند سبب بهبود رشد و عملکرد گیاه شود.

واژه‌های کلیدی: اسیدهای آلی، رژیم آبیاری، رقم سیوند گندم

مقدمه

برهم زدن تعادل تغذیه‌ای در گیاهان می‌شوند و بیان کردند با تکمیل عناصر مورد نیاز از طریق خاک یا محلول پاشی می‌توان وضعیت رشد را تا حدی بهبود بخشید (۵). تحقیقات نشان داد قطع آبیاری در مراحل مختلف رشد سبب کاهش ارتفاع بوته، عملکرد دانه ذرت می‌شود (۱۶).

از آنجاکه استفاده‌ی بهینه از آب در بخش کشاورزی نقشی اساسی در توسعه و بقای جوامع بشری دارد، از این رو توجه به کاربرد برخی از مواد افزودنی اصلاح‌کننده مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که کاربرد کودهای آلی به‌جای کودهای شیمیایی از مهم‌ترین مسائل مؤثر بر سلامت محیط‌زیست و پایداری تولید غذا است (۱۱). اسید هیومیک به‌عنوان کود آلی دوستدار طبیعت با عناصر کم‌مصرف تشکیل کمپلکس پایدار و نامحلول و اسید فولویک نیز با عناصر میکرو تشکیل کمپلکس‌های محلول می‌دهد. گروه‌های عامل غالب این نوع ترکیبات، فنولیک و کربوکسیل بوده که منجر به بار سطحی و واکنش‌پذیری این مواد می‌گردد (۱۴). در آزمایشی بیشترین قطر دو نوع اسید فولویک و اسید هیومیک اندازه‌گیری شد نتایج نشان داد متوسط قطر اسید هیومیک ۷/۱۲ برابر اسید فولویک است. اسید

کشور ایران به‌عنوان یکی از کشورهای واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک کره زمین، با مشکل کم‌آبی مواجه است. رشد فزاینده جمعیت و نیاز بیشتر به محصولات کشاورزی و محدودیت منابع آب و خاک به‌عنوان بستر اصلی تولیدات کشاورزی، مسئله‌ی کم‌آبی را به‌گونه‌ای بسیار جدی فراروی کشور قرار داده است. مصرف بهینه آب در تولید محصولات کشاورزی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر رشد و نمو گیاهان به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، از اهمیت بسزایی برخوردار است (۶). در مطالعات صورت گرفته توسط محققین مشخص شد تنش‌ها باعث

۱ و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد و استاد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: m.pourmorad@modares.ac.ir)

۳- استادیار، بخش تحقیقات شیمی، حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کرج

فولویک دارای مولکول‌های بسیار کوچک‌تری نسبت به اسید هیومیک است (۹). به همین دلیل مصرف اسید فولویک به صورت محلول پاشی کارایی بیشتری نسبت به اسید هیومیک دارد. با کاربرد اسید هیومیک به صورت محلول پاشی و خاکی بر روی چغندر، بهترین نتایج از مصرف خاکی همراه با آب آبیاری بود همچنین مصرف اسید هیومیک سبب افزایش عملکرد ریشه، وزن خشک و شاخص برداشت شد (۱۲). اسید هیومیک سبب بهبود خصوصیات خاک می شود اثر یک و دو گرم بر لیتر اسید هیومیک عملکرد دانه ذرت را به ترتیب ۱۵/۸، ۲۷/۸ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. کاربرد اسید هیومیک در دو سطح یک و دو گرم بر لیتر عملکرد دانه ذرت را نسبت به عدم کاربرد اسید هیومیک در تنش افزایش معنی داری داد (۴). محلول پاشی اسید فولویک بر روی گوجه فرنگی منجر به افزایش وزن خشک و تر گیاه و عملکرد شد (۱۷).

امروزه نزدیک به ۷۰ درصد سطح زیر کشت یک میلیارد هکتاری جهان را غلات اشغال نموده اند. در بین غلات گندم (*Triticum aestivum* L.) اهمیت ویژه ای دارد چراکه این گیاه زراعی، یکی از محصولات غذایی عمده و قوت غالب مردم دنیا به شمار می رود و امروزه گندم به عنوان بزرگترین و مهم ترین منبع غذایی بشر تبدیل شده است، به طوری که ۳۰ درصد از کل غلات تولیدی جهان را تشکیل می دهد و تأمین کننده بیشترین نیاز غذایی انسان است (۱۰). تولید گندم در اراضی آبی با توجه به بحران کمبود آب در این اراضی انجام تحقیقات در زمینه آبیاری محدود را ضروری می کند. میزان تولید و عملکرد این گیاه زراعی همانند سایر گیاهان زراعی به شدت متأثر از عوامل تنش زای محیطی است (۷).

مطالعات بر روی کاهش آب مصرفی و راه حلی مناسب برای جبران آن بر روی گندم در کشور بسیار اندک مورد توجه قرار گرفته است. لذا تحقیق حاضر در راستای بررسی تأثیر اسید هیومیک و اسید فولویک بر روی عملکرد و اجزای آن در گندم در شرایط تنش خشکی انجام شد.

مواد و روش ها

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور واقع در ۱۵ کیلومتری شهر کرج با ارتفاع ۱۲۸۰ متری از سطح دریا در سال زراعی ۹۴-۹۵ اجرا شد. این آزمایش به صورت کرت خرد شده در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار با دو کرت اصلی (آبیاری کامل و تنش) و ۳۶ کرت فرعی با ابعاد دو در دو متر مربع با فاصله یک متر بین تکرارها با کشت رقم سیوند (*Sivand*) به اجرا درآمد. تیمارهای مورد آزمایش شامل، فاکتور اصلی رژیم آبیاری در دو سطح آبیاری کامل و تنش (۳۵ درصد کمتر از نیاز آبی به صورت کاهش ساعت آبیاری در هر دوره) و فاکتور فرعی شامل شش تیمار شاهد (F_0H_0)، عدم محلول پاشی اسید فولویک و کاربرد ۲۰ کیلوگرم

در هکتار اسید هیومیک (F_0H_{20})، محلول پاشی اسید فولویک با غلظت ۵ گرم در لیتر و عدم کاربرد اسید هیومیک (F_5H_0)، اسید فولویک با غلظت ۵ گرم در لیتر و اسید هیومیک ۲۰ کیلوگرم در هکتار (F_5H_{20})، کاربرد اسید فولویک با غلظت ۵ گرم در لیتر و عدم کاربرد اسید هیومیک ($F_{10}H_0$)، اسید فولویک با غلظت ۱۰ گرم در لیتر و اسید هیومیک ۲۰ کیلوگرم در هکتار ($F_{10}H_{20}$). محلول پاشی اسید فولویک (۷۰ درصد) سه مرتبه در مراحل پنجه دهی، ساقه روی و خوشه دهی و اسید هیومیک (۶۸/۸ درصد) دومرتبه در مراحل بیست روز پس از کاشت و ساقه روی اعمال شد. قبل از انجام آزمایش از عمق ۳۰-۰ سانتی متری خاک نمونه مرکبی تهیه و نمونه پس از خشک شدن در هوا و غربال توسط الک ۲ میلی متری برای تجزیه فیزیکی و شیمیایی آماده شد و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن اندازه گیری شد (جدول ۲). آب مورد استفاده برای آبیاری مزرعه با اسیدیت ۷/۵۱ و هدایت الکتریکی برابر با ۳۹۰ میکرو زیمنس بر سانتی متر کیفیت مطلوبی را برای استفاده داشت. زمین محل مورد آزمایش در طول سال قبل آیش بود. نیاز آبی گندم در منطقه مورد نظر توسط نرم افزار Netwat به صورت تخمینی متر مکعب برآورد شد و دوره های آبیاری بر اساس آمارهای پیش بینی هواشناسی و رطوبت خاک مشخص شد. آبیاری با سیستم آبیاری قطره ای با فشار و دبی مشخص نازل ها انجام شد. تنش از اواسط فروردین ماه به صورت اختلاف ساعت آبیاری نسبت به آبیاری کامل اعمال شد. پس از اتمام دوره رشد گیاه، میزان تبخیر و تعرق و نیاز آبی بر اساس معادله پنمن منتیث فائو (FAO Penman-Monteith equation) به صورت دقیق توسط نرم افزار Cropwat برآورد شد و با مقدار آب داده شده به مزرعه مقایسه شد و درصد اعمال تنش به صورت دقیق محاسبه شد (جدول ۱). بر اساس تجزیه ی خاک و تغذیه متعادل گندم ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره گرانول در سه تقسیط، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار مونوپتاسیم فسفات، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار مو نو آمونیوم فسفات با آب آبیاری و محلول پاشی مونوپتاسیم فسفات با غلظت (۶ گرم بر لیتر) در مرحله ساقه روی انجام شد. برداشت نهایی از سطح هر کرت به سطح ۴ متر مربع، با حذف ۳۰ سانتی متر از هر طول و عرض کرت از سطحی حدود ۲ متر مربع (۵ خط کشت) برداشت شد. صفات مورد اندازه گیری شامل عملکرد کل، عملکرد دانه وزن هزار دانه، تعداد دانه در خوشه، طول خوشه، ارتفاع اندام هوایی اندازه گیری شد. همچنین کارایی مصرف آب (WUE)^۱، تولید محصول به ازای واحد آب مصرفی از رابطه زیر محاسبه شد.

$$\text{عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم} = \frac{\text{کارایی مصرف آب}}{\text{آب مصرفی بر حسب مترمکعب}}$$

تجزیه های آماری شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین ها به

روش LSD در سطح پنج درصد با استفاده از نرم افزار SAS و رسم نمودارها با استفاده از نرم افزار کامپیوتری Excel انجام شد.

جدول ۱- میزان آب آبیاری و نیاز آبی گیاه

Table 1- Amount of irrigation water and crop water requirement

۱۳۹۴-۹۵ 2015-2016				
برآورد نیاز آبی توسط نرم افزار نت وات (m3) Crop water requirement by app Netwat	آبیاری Irrigation	میزان آب آبیاری (m3) Amount of irrigation water	نیاز آبی محل موردنظر توسط نرم افزار کراپ وات (m3) Crop water requirement by app Cropwat	درصد آبیاری نسبت به نیاز آبی Percent irrigation compared to water requirement
3800	معمولی Control	3315.7	2957	-
	تنش Stress	1901.9		64.3%

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مؤسسه خاک و آب کرج در عمق ۰-۳۰ سانتی متری

Table 2- Physical and chemical properties of soil (0-30 cm)

کلاس بافت Texture Class	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) EC(dS m ⁻¹)	رطوبت اشباع (درصد) SP(%)	ظرفیت زراعی (درصد) FC(%)	نقطه پژمردگی دائم (درصد) PWP (%)	کربن آلی (درصد) OC (%)	نیتروژن (درصد) N(%)	فسفر قابل دسترس (میلی گرم بر کیلوگرم) P(ava) (mg kg ⁻¹)	پتاسیم (میلی گرم بر کیلوگرم) K (mg kg ⁻¹)	آهن (میلی گرم بر کیلوگرم) Fe (mg kg ⁻¹)	منگنز (میلی گرم بر کیلوگرم) Mn (mg kg ⁻¹)	روی (میلی گرم بر کیلوگرم) Zn (mg kg ⁻¹)	مس (میلی گرم بر کیلوگرم) Cu (mg kg ⁻¹)
Loam	7.7	1.5	30.3	16.4	7.6	0.7	0.08	14.2	272	4.38	15.6	1.92	1.58

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر آبیاری و اسید هیومیک و فولیک بر روی عملکرد و اجزای عملکرد گندم

Table 3- Variance analysis of effect irrigation and humic and fulvic acid on the wheat yield and component yield

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	عملکرد کل Total yield	عملکرد دانه Grain yield	وزن هزار دانه 1000 grain weight	ارتفاع اندام هوایی Shoot height	طول سنبله Spik length	تعداد دانه در سنبله Grain number per spik	کارایی مصرف آب WUE
بلوک Block	2	2632447.3 ^{ns}	2442708.3 ^{ns}	3.20 ^{ns}	0.52 ^{ns}	0.03 ^{ns}	6.02*	0.44 ^{ns}
آبیاری (A) Irrigation	1	7593092.5*	2006944.4 ^{ns}	64.5 ^{ns}	104.3*	1.02 ^{ns}	2.25 ^{ns}	23.5**
بلوک × آبیاری Block × Irrigation	2	151882.3 ^{ns}	491319.4 ^{ns}	16.3 ^{ns}	2.21 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.13 ^{ns}
اسید هیومیک و فولیک (B) Humic and fulvic acid	5	31573418.7**	7170833.3**	15.8*	320.7**	0.92**	30.6**	1.27**
A×B	5	2874567.3 ^{ns}	286111.1 ^{ns}	11.4*	38.8**	0.19 ^{ns}	2.05 ^{ns}	0.18 ^{ns}
خطا Error	20	5114384.7	573263.8	4.26	7.98	0.12	2.78	0.10
ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation(%)	-	9.28	9.36	4.69	2.51	4.06	3.68	9.69

^{ns} غیر معنی داری، * معنی داری در سطح احتمال ۵٪، ** معنی داری در سطح احتمال ۱٪

^{ns} Not significant, * Significant at 5% probability level, ** Significant at 5% probability level

نتایج

عملکرد

با توجه به جدول ۳ اثر متقابل دو فاکتور آبیاری و اسید فولویک و هیومیک بر روی عملکرد در سطح پنج درصد معنی دار نشد. اثر اسید هیومیک و اسید فولویک (فاکتور B) بر روی عملکرد دانه در سطح یک درصد معنی دار شد. مقایسه‌ی میانگین‌ها با استفاده از روش LSD در سطح پنج درصد نشان داد بیشترین عملکرد مربوط به تیمار محلول‌پاشی اسید فولویک با غلظت ۱۰ گرم در لیتر ($F_{10}H_0$) با عملکرد دانه ۹۴۱۶/۷ کیلوگرم در هکتار است و تفاوت معنی داری با تیمار F_5H_{20} ۹۲۵۰ کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه ندارد. کاربرد توأم اسید هیومیک و اسید فولویک با غلظت ۱۰ گرم در لیتر ($F_{10}H_{20}$) باعث کاهش ۱۸/۱ درصدی عملکرد دانه نسبت به تیمار (F_5H_{20}) شد. تنش باعث کاهش عملکرد دانه در گندم شد اما این کاهش در سطح پنج درصد معنی دار نشد که علت آن است که در این آزمایش تنش به صورت یک باره نبوده است و به صورت اختلاف ساعت آبیاری در هر دوره اعمال شده است. در شرایط آبیاری کامل تیمارهای (F_5H_{20} ، $F_{10}H_0$) به ترتیب موجب افزایش ۳۱/۸ و ۲۸/۴ درصدی عملکرد دانه نسبت به شاهد شد. در شرایط کم آبیاری تیمارهای (F_5H_{20} ، $F_{10}H_0$) به ترتیب سبب افزایش ۴۶/۶ و ۴۵/۳ درصدی عملکرد دانه نسبت به شاهد شد. در پژوهشی محلول‌پاشی (۱/۵ میلی گرم بر لیتر) اسید فولویک سبب افزایش عملکرد دانه ذرت در شرایط آبیاری مناسب و تنش شد و علت آن است که اسید فولویک سبب حفظ محتوای کلروفیل و تبادلات گازی می‌شود که این تأثیر می‌تواند توسط افزایش آنتی اکسیدان و کاتالاز باشد (۲). در تحقیقی دیگر مشاهده شد اسید هیومیک عملکرد دانه ذرت را ۱۵/۸ - ۲۷/۸ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (۴). نتایج این آزمایش نشان داد مصرف اسید هیومیک در شرایط تنش سبب افزایش ۹ درصدی عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد آبیاری کامل شد. همچنین کاربرد توأم اسید هیومیک و فولویک (غلظت ۵ گرم در لیتر) و نیز محلول‌پاشی اسید فولویک به تنهایی با غلظت ۱۰ گرم در لیتر در شرایط تنش نسبت به تیمار شاهد آبیاری کامل به ترتیب ۲۳/۸ و ۲۵ درصد افزایش عملکرد دانه داشت. در آزمایشی با کاربرد اسید هیومیک در شرایط رژیم آبیاری بر روی ذرت مشاهده نمودند کاربرد اسید هیومیک در شرایط رژیم آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد به ترتیب عملکرد ذرت را ۴۶/۴ و ۸ درصد نسب به شاهد آبیاری ۱۰۰ درصد (بدون کاربرد اسید هیومیک) افزایش داد (۴).

وزن هزار دانه

با توجه به جدول تجزیه واریانس ۳ اثر فاکتور فرعی (کاربرد اسید

هیومیک و فولویک) بر روی وزن هزار دانه در سطح پنج درصد معنی دار شد. مقایسه میانگین (جدول ۴) نشان داد کاربرد اسید هیومیک و اسید فولویک هریک به تنهایی اثر معنی داری بر روی وزن هزار دانه ندارد که علت کارایی کم این دو اسید به صورت مصرف جداگانه بر روی وزن هزار دانه است در حالی که مصرف توأم اسید فولویک (غلظت ۵ گرم در لیتر) و اسید هیومیک (۲۰ کیلوگرم در هکتار) باعث افزایش معنی دار (۸/۵ درصد) وزن هزار دانه شده است. در شرایط تنش با کاربرد توأم اسید هیومیک و اسید فولویک (۱۰ گرم در لیتر) افزایش ۱۴/۷ درصدی وزن هزار دانه نسبت به شاهد در شرایط تنش مشاهده شد. همچنین در شرایط آبیاری کامل کاربرد توأم اسید هیومیک و اسید فولویک (۵ گرم در لیتر) باعث افزایش ۴/۳۲ درصدی وزن هزار دانه نسبت به شاهد آبیاری کامل شد.

ارتفاع اندام هوایی

اثر متقابل دو فاکتور آبیاری و اسیدهای آلی (اسید هیومیک و اسید فولویک) در سطح پنج درصد ارتفاع اندام هوایی معنی دار شد. بیشترین ارتفاع اندام هوایی ۱۲۶/۸ سانتی متر مربوط به کاربرد توأم محلول‌پاشی اسید فولویک با غلظت ۵ گرم در لیتر همراه با مصرف خاکی اسید هیومیک در شرایط آبیاری کامل که سبب افزایش ۲۲/۸ درصدی ارتفاع اندام هوایی نسبت به شاهد خود شد. خانگ^۱ (۸) در آزمایشی مشاهده نمود محلول‌پاشی اسید فولویک سبب افزایش ارتفاع (۵ درصدی) برنج شد. همچنین مصرف خاکی ۲۵ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک باعث افزایش ۱۱/۹ درصدی ارتفاع گیاه ذرت شد (۳). کمترین متوسط ارتفاع اندام هوایی با ۹۹/۶ سانتی متر مربوط به عدم کاربرد اسید فولویک و اسید هیومیک در شرایط تنش است. مصرف توأم محلول‌پاشی اسید فولویک با غلظت ۱۰ گرم در لیتر با اسید هیومیک سبب افزایش ۱۸/۱ درصدی ارتفاع اندام هوایی در شرایط تنش نسبت به شاهد خود شد.

طول خوشه

طول خوشه از اجزای مهم مؤثر در عملکرد دانه است زیرا هر چه طول سنبله‌ها بیشتر تعداد دانه‌ها بیشتر می‌شوند. با توجه به جدول ۳ اثر متقابل دو فاکتور آبیاری و اسید فولویک و اسید هیومیک در سطح پنج درصد معنی دار نشد. اثر اصلی اسید هیومیک و اسید فولویک بر روی طول خوشه در سطح یک درصد معنی دار شد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد اثر اصلی آبیاری تأثیر معنی داری بر متوسط طول خوشه در گیاه نداشت. کاربرد اسید فولویک با غلظت ۵ گرم در لیتر اثر

معنی داری بر روی طول خوشه ندارد ولی استفاده از اسید هیومیک (۲۰ کیلوگرم در هکتار) همراه با اسید فولویک (غلظت ۵ گرم در لیتر) سبب افزایش معنی دار متوسط طول خوشه شد. بیشترین طول خوشه ۹/۱۰، ۹/۱۸ سانتی متر مربوط به تیمارهای (F₁₀H₀، F₅H₂₀) و کمترین طول خوشه ۸/۲۵، ۸/۲۹ سانتی متر مربوط به تیمارهای (F₀H₀، F₅H₀) است. در پژوهشی مشاهده شد کاربرد اسید هیومیک باعث افزایش طول خوشه برنج شد (۱۳). کاربرد توأم اسید فولویک با غلظت ۵ گرم در لیتر و اسید هیومیک سبب افزایش معنی دار طول خوشه شد اما مصرف توأم اسید فولویک با غلظت ۱۰ گرم در لیتر همراه با اسید هیومیک (F₁₀H₂₀) نسبت به اسید فولویک با غلظت ۵ گرم در لیتر همراه با اسید هیومیک (F₅H₂₀) طول خوشه را ۶/۲۴ درصد کاهش داد. درواقع نشان دهنده این موضوع است که بیشترین کارایی طول خوشه در تیمار F₅H₂₀ است.

تعداد دانه در خوشه

با توجه به جدول تجزیه واریانس (۳) اثر اسیدهای آلی بر روی تعداد دانه در خوشه در سطح یک درصد معنی دار شد؛ اما اثر متقابل آبیاری و اسیدهای آلی در سطح پنج درصد معنی دار نشد. کاربرد توأم اسید هیومیک و اسید فولویک (F₅H₂₀) و کاربرد اسید فولویک (F₁₀H₀) به ترتیب سبب افزایش ۹/۳۷ و ۹/۹۳ درصدی تعداد دانه در خوشه نسبت به شاهد شد. مصرف اسید فولویک با غلظت ۵ گرم در لیتر و اثر اسید هیومیک هر یک به تنهایی اثر معنی داری بر روی تعداد دانه در خوشه نداشت. در گزارشی مشاهده شد کاربرد اسید هیومیک (۶ تن در هکتار) باعث افزایش تعداد دانه در خوشه برنج شد (۱۳)؛ که علت تفاوت آن با نتایج این آزمایش تفاوت در مقدار مصرفی است.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر آبیاری و اسید هیومیک و فولویک بر روی عملکرد و اجزای عملکرد گندم

Table 4- Means comparison of effect irrigation and humic and fulvic acid on the wheat yield and component yield

تیمار Treatmet	عملکرد کل (کیلوگرم بر هکتار) Total yield (kg/ha)	عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار) Grain yield (kg/ha)	وزن هزار دانه (گرم) 1000 grain weight (gr)	ارتفاع اندام هوایی (سانتی متر) Shoot height (Cm)	طول خوشه (سانتی متر) Spik length (Cm)	تعداد دانه در خوشه Grain numbe r per spik	کارایی آب (کیلوگرم بر متر مکعب) WUE (kg/m ³)
(A) آبیاری Irrigation							
تنش (W ₂) Stress	23887.0 ^a	7847.2 ^a	42.5 ^a	110.8 ^b	8.54 ^a	45.5 ^a	4.12 ^a
معمولی (W ₁) Control	24805.6 ^b	8319.4 ^a	45.4 ^a	114.2 ^a	8.87 ^a	45.0 ^b	2.50 ^b
(B) اسید هیومیک و فولویک Humic and fulvic acid							
F ₀ H ₀	21417 ^c	6791.7 ^d	42.4 ^b	101.5 ^d	8.29 ^c	43.5 ^b	2.47 ^d
F ₀ H ₂₀	24028 ^{bc}	8250.0 ^b	42.8 ^b	116.8 ^b	8.77 ^{ab}	44.6 ^b	3.38 ^b
F ₅ H ₀	22028 ^c	7083.3 ^{cd}	42.6 ^b	109.3 ^c	8.25 ^c	43.5 ^b	2.89 ^{cd}
F ₅ H ₂₀	25667 ^{ab}	9250.0 ^a	46.0 ^a	120.2 ^a	9.18 ^a	48.3 ^a	3.80 ^a
F ₁₀ H ₀	27333 ^a	9416.7 ^a	44.1 ^{ab}	108.4 ^c	9.10 ^a	48.0 ^a	3.86 ^a
F ₁₀ H ₂₀	25606 ^{ab}	7708.3 ^{bc}	45.7 ^a	118.9 ^{ab}	8.64 ^{bc}	43.8 ^b	3.20 ^{bc}
A×B							
تنش W ₂	F ₀ H ₀	19889 ^d	6250 ^f	40.2 ^c	99.6 ^g	7.96 ^{ed}	3.28 ^{cd}
	F ₀ H ₂₀	23222 ^{bcd}	8000 ^{bcde}	40.3 ^c	116.5 ^{bc}	8.50 ^{cd}	4.20 ^b
	F ₅ H ₀	21278 ^{cd}	6750 ^{ef}	40.1 ^c	110.1 ^{de}	7.88 ^e	3.54 ^c
	F ₅ H ₂₀	25944 ^{ab}	9083 ^{abc}	45.5 ^{ab}	113.7 ^{cd}	9.25 ^a	4.77 ^a
	F ₁₀ H ₀	27222 ^a	9166 ^{ab}	42.6 ^c	107.4 ^{ef}	9.09 ^{abc}	4.81 ^a
	F ₁₀ H ₂₀	25767 ^{ab}	7833 ^{cde}	46.1 ^{ab}	117.7 ^{bc}	8.54 ^{bcd}	4.11 ^b
معمولی W ₁	F ₀ H ₀	22944 ^{bcd}	7333 ^{def}	44.6 ^{ab}	103.4 ^{fg}	8.62 ^{bc}	2.21 ^f
	F ₀ H ₂₀	24833 ^{abc}	8500 ^{abcd}	45.3 ^{ab}	117.2 ^{bc}	9.03 ^{abc}	2.56 ^{ef}
	F ₅ H ₀	22778 ^{bcd}	7416 ^{def}	45.1 ^{ab}	108.6 ^e	8.63 ^{bc}	2.23 ^f
	F ₅ H ₂₀	25389 ^{ab}	9416 ^a	45.5 ^a	126.8 ^a	9.12 ^{ab}	2.84 ^{de}
	F ₁₀ H ₀	27444 ^a	9666 ^a	45.6 ^{ab}	109.3 ^{de}	9.11 ^{ab}	2.91 ^{de}
	F ₁₀ H ₂₀	25444 ^{ab}	7583 ^{de}	45.43 ^{ab}	120.10 ^b	8.75 ^{abc}	2.28 ^f

+: میانگین‌های که در یک حرف مشترک هستند از لحاظ آماری با آزمون ال اس دی در سطح ۵ درصد، با یکدیگر اختلاف معنی داری ندارند
+: means followed by similar letter in each columns are not significantly different at 5% level according to LSD Multiple Ranges Test.

کارایی مصرف آب

اثر اصلی آبیاری و کاربرد اسید هیومیک و فولویک بر روی کارایی آب در سطح یک درصد معنی دار شد اما اثر متقابل دو فاکتور آبیاری و کاربرد اسیدهای آلی (هیومیک و فولویک) بر روی کارایی مصرف آب معنی دار نشد (جدول ۳). مقایسه میانگین در سطح پنج درصد نشان داد تنش باعث افزایش ۶۸ درصدی کارایی مصرف آب شد. کاربرد اسید هیومیک و اسید فولویک باعث افزایش معنی دار کارایی مصرف آب شد. بیشترین کارایی مصرف آب (۳/۸۶ کیلوگرم بر متر مکعب) در محلول پاشی اسید فولویک با غلظت ۱۰ گرم در لیتر بود. در شرایط آبیاری کامل و تنش مصرف اسید فولویک با غلظت ۱۰ گرم در لیتر به ترتیب باعث افزایش ۴۳/۳۴، ۶۲/۲۵ درصدی کارایی مصرف آب شد.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد کاربرد توأم اسید فولویک با غلظت ۵ گرم در لیتر و اسید هیومیک (F_5H_{20}) بر روی همه صفات مورد بررسی افزایش معنی داری داشته است و کارایی بالاتری را نسبت به کاربرد توأم اسید هیومیک و اسید فولویک با غلظت ۱۰ گرم در لیتر ($F_{10}H_{20}$) بر روی صفات (عملکرد دانه، طول خوشه، تعداد دانه در خوشه، کارایی آب) داشت. در کل نتایج نشان داد مصرف اسید فولویک و اسید هیومیک در شرایط تنش خشکی می تواند سبب بهبود رشد گیاه و افزایش عملکرد دانه گندم و کارایی مصرف آب شود.

منابع

- 1-Agbemafle R., Owusu-Sekyere J. D., and Bart-Plange A. 2015. Effect of deficit irrigation and storage on the nutritional composition of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Pectomech). *Hrvatski casopis za prehranbeni tehnologiju, Biotehnologiju i Nutricionizam*, 10(1-2), 59-65.
- 2-Anjum S. A., Wang L., Farooq M., Xue L., and Ali S. 2011. Fulvic acid application improves the maize performance under well-watered and drought conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(6), 409-417.
- 3-Daur I., and Bakhshwain A. A. 2013. Effect of humic acid on growth and quality of maize fodder production, Pak. *Journal Bot.*, 45(S1): 21-25.
- 4-Eldardiry E.I., Pipars Sabreen Kh., and Abd El Hady M. 2012. Improving soil properties, Maize yield componets grown in sandy soil under irrigation treatments and Humic acid application. *Australian Journal of Basice and Applied Science*, 6(7): 587-593.
- 5-Heidari M., Miri H., and Minaei A. 2014. Activity of antioxidant enzymes and biochemical compounds of europen goatberry (*Borago officinalis* L.) in response to drought stress and humic acid treatments. *Journal of Environmental Stresses in Crop Sciences*, 6(2): 159-170. (In persian)
- 6-Jahan M., Nasiri Mahalati M., Ranjbar F., Ariyai M., and Komayestani N. 2015. Effect of super absorbent polymer in the soil and foliar application of humic acid on the some agrophysiological characteristice and suger beet (*Beta vulgaris* L.) yield in Mashhad. *Journal of Agroecology*, 6(4): 753-766. (In persian)
- 7-Kafi M., Jafarnejad A., and Jamolahmad M. 2005. Wheat, Ecology, Physiology and Yield estimation. Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
- 8-Khang.V.T. 2011. Fulvic follar fertilizer impact on growth of rice and radish at first stage. *Omonrice*, 18: 144-148.
- 9-Kawahigashi M., ujitake N.F., Yajima H., and Sumida H. 2011. Particle sizes of standard humic substances calculated as radii of gyration, maximum diameter and hydrodynamic radii. *Humic Substances Research*, Vol.8
- 10-Parvazi Shandi S., Pazoki A., Asgharzadeh A., and Azadi A. 2013. Effects of irrigation intervals, plant growth promoting Rhizobacteria and humid acid on yield and yield components of wheat (Kavir cultivar). *Journal of Modern Science in Sustainable Agriculture*, 9(3).(in Persian with English abstract)
- 11-Rozbahani A., Ghorbani S., Mirzaei M.M., and Ouroji niya S. 2013. Effect of humic acid and fulvic acid on yield and yield components of barley. *Journal of Agronomy and Plant Breeding*, 9(2): 25-33.(In persian)
- 12-Sadeghi-Shoae M., Paknejad F., Hasanpor Darvishi H., Mozafari H., Moharramzadeh M., and Tookallo M. R. 2013. Effect of intermittent furrow irrigation, humic acid and deficit irrigation on water use efficiency of suger beet. *Annals of Biological Research*, 4(3): 187-193.
- 13-Saha R., Saieed M.A.U., and Chowdhury M.A.K. 2013. Growth and yield of rice (*Oryza sativa*) as influenced by humic acid and poultry manure. *Universal Journal of Plant Science*, 1(3): 78-84.
- 14-Samavat S., and Malakouti M.J. 2005. Necessity of use organic acids (humic and fulvic acids) in quantitative and qualitative increase of africultural products. *Journal of Technical*, 463, Sana publications.(In persian)
- 15-Selim E.M., Shedeed Sh.I., Asaad F.F., and EL-Nellawy A.S. 2012. Interactive effect of Humic acid and Water Stress on chlorophyll and mineral nutrient contents of Potato plants. *Journal of Applied Science Research*, 8(1): 531.
- 16-Tohidi Moghadam H.R., Khalafi Khamene M., and Zahedi H. 2014. Effect of humic acid foliar application on

growth and quantity of corn in irrigation withholding at different growth stage. Maydica Electronic Publication, 59-124-128

17-Young suh H., Sun Yoo K., and Gon Suh S. 2014. Effect of foliar application of fulvic acid on plant growth and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). Horticulture, Enviroment, and Biotechnology, 55(6): 455-461.



Study on the Effect of Humic Acid and Fulvic Acid on the Wheat Yield and Water Use Efficiency under Drought Stress

M. Pourmorad^{1*}- M. Malakouti²- M.M. Tehrani³

Received: 26-02-2018

Accepted: 29-07-2018

Introduction: Optimum water consumption in agricultural production is of vital importance as one of the most important environmental factors affecting the growth and development of the plants, especially in arid and semi-arid regions such as Iran. On the other hand, drought stress, among other environmental stresses, is one of the most important factors that adversely affect the plant growth and yield. Due to the presence of hormonal compounds, organic acids (at low concentrations) can positively affect the production rate and the quality of agricultural products. Considering the water deficit and the necessity of saving water resources as well as the role of organic acids in reducing the negative effects of stress, in the present study attempts are made to investigate the effect of humic and fulvic acid on wheat yield (*Triticum aestivum* L.) under drought stress conditions.

Materials and Methods: The present study was carried out at the research farm of the national soil and water research institute located 15 km away from Karaj (with elevation of 1280 m) during the 1394-95 crop year. The experiment was a split-plot experiment based on randomized complete block design with three replications which included two main plots (full irrigation and stress) and 36 sub plots of Sivand cultivar. The treatments consisted of the main factor of irrigation regimes at full irrigation and stress levels (35% lower than water requirement) and a sub-factor including six control treatments (F_0H_0), no foliar application of fulvic acid, in-soil application of 20kg- ha of humic acid (F_0H_{20}), Foliar application of fulvic acid (F_5H_0), and no application of humic acid (F_5H_0), (F_5H_{20}), ($F_{10}H_0$) and treatment ($F_{10}H_{20}$). The wheat water requirement in the area was estimated by means of Netwat software and irrigation periods were determined based on weather forecast and soil moisture data. Irrigation was carried out using a system of drip irrigation with a specific pressure and discharge level. The stresses were applied from mid-April through consideration of different irrigation hours as compared to full irrigation time. After completion of the growth period, the plant water requirement was accurately estimated by Cropwat software and the percentage of applied stress was accurately calculated (approx. 35%). The Plant yield and some of its components were measured. Statistical analysis was performed through LSD method at 5% significance level using SAS software

Results: The mutual impact between irrigation and fulvic and humic acid applications on total and grain yield was not significant ($P < 0.05$). The highest yield was related to the foliar application of fulvic acid ($F_{10}H_0$) with a total yield of 27331 kg/ha, which had no significant difference with treatment F_5H_{20} (total yield of 25667 kg/ha). Under full irrigation conditions, treatments ($F_{10}H_0$, F_5H_{20}) led to 31.81% and 28.44% increase in grain yield (as compared to the treatment yield) respectively. Under low irrigation conditions, treatments ($F_{10}H_0$, F_5H_{20}) led to 46.66% and 34.33% increase in grain yield, respectively.

The Weight of 1000 Grains The application of humic acid and fulvic acid alone did not significantly increase the weight of 1000 grains. But the combined application of fulvic acid (F_5H_0) and humic acid (20 kg /ha) significantly increased the weight of 1000 grains (8.5%). Under low irrigation conditions, the combined application of humic acid and fulvic acid ($F_{10}H_0$) increased the weight of 1000 grains (as compared to the control group) by 14.75%.

Shoot Height The highest shoot height (126.86 cm) was obtained in foliar application of fulvic acid (F_5H_0) with the in-soil application of humic acid in full irrigation conditions, which increased the shoot height by 22.68% (as compared to the control group). The lowest average shoot height (99.66 cm) was obtained through no application of fulvic acid and humic acid in stress conditions.

Spike Length The application of fulvic acid (F_5H_0) had no significant effect on spike length. However, the

1 and 2- M.Sc. Student and Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: m.pourmorad@modares.ac.ir)

3- Assistant Professor Soil and Water Research Institute, Scientific Committee Member, Chemical Research Division, Soil Fertility and Plant Nutrition, Karaj, Iran

combined application of humic acid (20 kg/ ha-) and fulvic acid (F_5H_0) increased the mean spike length. Regardless of irrigation conditions, the highest mean spike length was 9.188, 9.105 cm for treatments (F_5H_{20} , $F_{10}H_0$) and the lowest mean spike length was 8.258, 8.293 cm, for treatments (F_5H_0 , F_0H_0).

A number of Grains per Spike The combined application of humic acid and fulvic acid (F_5H_0) and the application of fulvic acid ($F_{10}H_0$) led to 10% increase in the number of grains per spike as compared to the control group.

Water Use Efficiency The main effect of irrigation and the use of humic acid and fulvic acid on water efficiency was significant at 1% level. The mean comparison at 5% level showed that tension caused 68% increase in water use efficiency. The use of humic acid and fulvic acid increased water use efficiency significantly. The maximum water use efficiency (3.86 kg / m³) was in spraying the fulvic acid at a concentration of 10 per thousand. Under full irrigation and low water use, the use of fulvic acid at a concentration of 10 per thousand increased water use efficiency as 43.34% and 62.25%

Conclusion: The results of this study showed that the combined application of fulvic acid (F_5H_0) and humic acid (F_5H_{20}) significantly increased all the traits under study. The application of humic acid in drought stress conditions led to 9.09 percent increase in grain yield as compared to the control groups in the full irrigation condition, and the application of humic acid and fulvic acid (F_5H_0), as well as foliar application of fulvic acid alone ($F_{10}H_0$) under stress conditions led to 23.86% and 24.9% improvement in grain yield respectively (as compared to control treatments under full irrigation conditions) while foliar application of fulvic acid ($F_{10}H_0$) in drought stress conditions resulted in a 2.65% reduction in grain yield as compared to the same treatment under full irrigation conditions. The results showed that the application of fulvic and humic acid in low irrigation conditions can increase wheat yield and water use efficiency.

Keywords: Irrigation regime, Organic acids, Sivand wheat cultivar



کارایی صمغ عربی در بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک‌های شور- سدیمی و غیرشور- سدیمی اطراف دریاچه ارومیه

زهرا حبیبی^۱ - مهدی رحمتی^{۲*} - علی اصغر علیلو^۳ - اسماعیل کریمی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۸/۱

چکیده

استفاده از بهبود دهنده‌های خاک برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و ساختمانی خاک بسیار متداول می‌باشد. به همین جهت پژوهش حاضر به مطالعه اثرات صمغ عربی بر چندین ویژگی خاک‌های شور -سدیمی و غیرشور- سدیمی تهیه شده از حاشیه جنوب شرقی دریاچه ارومیه پرداخته است. سه سطح متفاوت از صمغ عربی (صفر، ۵ و ۱۰ گرم بر کیلوگرم) در خاک‌هایی با هدایت الکتریکی مختلف از ۱ تا ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر و SAR ۱ تا ۵۸ اضافه گردید. نتایج نشان داد که کاربرد صمغ عربی تأثیر معنی‌داری بر بسیاری از خصوصیات اندازه‌گیری شده در هر دو خاک شور- سدیمی و غیرشور- سدیمی داشت. صمغ عربی خصوصیات بیولوژیکی خاک را حتی در خاک‌های شور- سدیمی بهبود بخشید به طوری که تنفس خاک از ۶۷ تا ۲۷۵ mg CO₂ kg⁻¹ day⁻¹ در خاک‌های تیمار شده افزایش یافته بود در حالی که نرخ تنفس خاک در تیمار شاهد بین ۷ تا ۷۷ mg CO₂ kg⁻¹ day⁻¹ بود. همچنین نتایج مشابهی برای مقدار کربن آلی خاک به دست آمد به طوری که در اثر افزایش بالاترین مقدار صمغ عربی (۱۰ گرم بر کیلوگرم)، کربن آلی خاک از ۰/۲۱ به ۰/۳۳ درصد افزایش یافت. در حالی که اثرات صمغ عربی بر روی خصوصیات خاکدانه‌ها فقط در خاک‌های غیرشور- سدیمی معنی‌دار شد، تغییرات مثبت خاک تیمار شده با ۱۰ گرم بر کیلوگرم صمغ عربی در مقابل تیمار شاهد در پایداری خاکدانه‌ها (۲۱ درصد در مقابل ۵ درصد)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (۰/۳ در مقابل ۰/۰۶ میلی‌متر) و بعد فراکتال جرمی خاکدانه‌ها (۱/۶۷ در مقابل ۱/۳۷) مشاهده شد. صمغ عربی همچنین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های تیمار شده را افزایش و اسیدیته خاک‌های مورد آزمایش را کاهش داد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی به منظور بررسی اثرات صمغ عربی در خاک‌های شور- سدیمی از مقادیر بالاتر صمغ عربی (بیشتر از ۱۰ گرم بر کیلوگرم) استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: بهبود دهنده‌های خاک، بعد فراکتالی، بیوپلیمر، پایداری خاکدانه‌ها، تنفس خاک

مقدمه

شوری خاک به عنوان یکی از تهدیدات جهانی و مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک (۱۴) از فاکتورهای بسیار مهم و مؤثر بر کیفیت خاک می‌باشد در حالی که اثر لحظه‌ای و سریع ندارد (۲۶) و از نظر محققان به دلیل پیامد آن در زندگی بشر به عنوان خطر محیطی نابینجار مطرح شده است (۴۲).

دریاچه ارومیه، واقع در شمال غرب ایران یکی از بزرگترین دریاچه‌های شور جهان و بزرگترین دریاچه شور خاورمیانه می‌باشد (۱۹). طبق گزارشات موجود، کاهش در حجم آب دریاچه که به دلایل

مختلف رخ داده است منجر به تجمع نمک (عمدتاً سدیم کلراید) تا غلظت ۳۰۰ گرم بر لیتر یا بیشتر در بستر یا اطراف دریاچه و ایجاد بیابان‌های شور با مساحت ۴۰۰ کیلومتر مربع شده است (۱۶). اگرچه بهبود تراکم پوشش گیاهی یک راه حل اساسی و اصلی برای حفاظت از خاک‌های متأثر از شوری به نظر می‌رسد اما این راهکار عملی به دلیل کیفیت پایین خاک‌های شور محدود شده است. بنابراین به سایر راهکارهای بهبود کیفیت خاک برای برقراری بهتر پوشش گیاهی نیاز می‌باشد.

در کشاورزی کاربردی، مواد اصلاح‌کننده‌ای وجود دارند که با اضافه شدن در خاک، شرایط فیزیکی خاک را بهبود می‌بخشند که چنین موادی بهبود دهنده‌های خاک^۵ نامیده می‌شوند. این مواد می‌توانند به صورت سنتز شده یا طبیعی، آلی یا غیرآلی باشند. پلیمرهای طبیعی علاوه بر اینکه موجب بهبود شرایط فیزیکی خاک می‌شوند،

۱، ۲ و ۴- به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استادیاران گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه

(*)- نویسنده مسئول: Email: mehdirmti@gmail.com

۳- دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه

DOI: 10.22067/jsw.v32i5.71169

خاک‌های شور - سدیمی و غیرشور جمع‌آوری شده از حوضه آبخیز دریاچه ارومیه واقع در شمال غرب ایران انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه با استفاده از خاک‌های جمع‌آوری شده از روستای قره‌چق که در حاشیه جنوب شرقی دریاچه ارومیه، در دشت بناب در آذربایجان شرقی و در پایین‌دست دامنه‌ی کوه سه‌هند و در جلگه‌ی حاصلخیز، با مختصات جغرافیایی ۴۵ درجه و ۵۹ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است، انجام گرفت.

نمونه‌برداری خاک و طرح آزمایشی

به منظور ارزیابی اثر شوری خاک بر کارایی صمغ عربی، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) با دو فاکتور شامل سطوح مختلف شوری و سدیمی و مقادیر مختلف صمغ عربی و سه تکرار در خاک بافت لومی (دارای ۱۶ تا ۲۰ درصد رس، حدود ۳۶ درصد سیلت و ۴۴ تا ۵۲ درصد شن) انجام گرفت. فاکتور اول دربرگیرنده سه سطح شوری و سدیمی مختلف شامل ۱) خاکی با $EC \approx 1 \text{ dS m}^{-1}$ ، $pH \approx 7.4$ و $SAR \approx 1.3 \text{ (mmole L}^{-1})^{0.5}$ (خاک غیرشور)، ۲) $EC \approx 6 \text{ dS m}^{-1}$ ، $pH \approx 8.5$ و $SAR \approx 16.5$ (خاک شور و سدیمی) و ۳) $EC \approx 30 \text{ dS m}^{-1}$ ، $pH \approx 8.0$ و $SAR \approx 58 \text{ (mmole L}^{-1})^{0.5}$ (خاک شدیداً شور و سدیمی) در نظر گرفته شد. بعد از اینکه خاک‌ها از هر کلاس شوری - سدیمی نمونه‌برداری و به آزمایشگاه انتقال داده شدند، گلدان‌ها آماده شده و با سطوح مختلف صمغ عربی شامل ۰، ۵ و ۱۰ گرم بر کیلوگرم با سه تکرار تیمار شدند و به مدت یک ماه، با مقدار آب خاک متفاوت بین یک دوم ظرفیت مزرعه و ظرفیت مزرعه نگهداری شدند. سپس پارامترهای مختلفی از خاک‌های تیمار شده بررسی و آنالیز شدند. نتایج با استفاده از نرم‌افزار SAS و آنالیزهای روش‌های واریانس، تجزیه و تحلیل شدند. برای مقایسات میانگین نیز از آزمون چند دامنه دانکن استفاده شد. مقادیر ۵ و ۱۰ گرم بر کیلوگرم خاک به این دلیل انتخاب شده است که اکثراً در تحقیقات مربوط به ارزیابی اثرات بیوپلیمرهای مختلف حداکثر مقدار مصرف شده ۱ درصد بوده و به ندرت از مقادیر بالای ۱ درصد استفاده شده است. لذا در این تحقیق نیز مقدار ۱ درصد (۱۰ گرم بر کیلوگرم) به عنوان بالاترین مقدار مصرفی و ۰/۵ درصد (۵ گرم بر کیلوگرم) به عنوان مقدار متوسط مد نظر قرار گرفت.

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

برای ارزیابی تغییرات خاک تیمار شده در اثر کاربرد صمغ عربی،

ارزش غذایی زیادی نیز به خاک اضافه می‌کنند. این مواد چون محصولی طبیعی هستند می‌توانند در مقایسه با پلیمرهای سنتز شده ارزان‌تر بوده و قابل دسترس‌تر باشند (۱۲).

صمغ عربی یا صمغ افاقیاء، هیدروکلوئیدی که در حضور آب خاصیت ژله‌کنندگی ایجاد می‌کند یک زنجیر منشعب پلی‌ساکاریدی، با وزن مولکولی بالا به همراه نمک‌های کلسیم، منیزیم و پتاسیم است که ممکن است خنثی بوده یا کمی اسیدی با pH برابر ۵/۵ - ۴/۵ باشد (۲). به دلیل حضور گروه‌های هیدروکسیل در صمغ و خاصیت آب‌دوستی آن، می‌تواند ویسکوزیته را متراکم کرده یا حالت ژل‌کنندگی یا ژل مانند در محیطی که وجود دارد را ایجاد کند (۳۹). در چندین تحقیق از صمغ عربی به عنوان تهویه‌کننده خاک استفاده شده است. به طور مثال، کلمن و همکاران (۲۲) دریافتند که ظرفیت نگهداشت آب در خاک‌های تیمار شده با صمغ عربی به‌طور قابل توجهی بیشتر از خاک‌های آلی است. طبق گزارش الجک (۱۲) ظرفیت نگهداشت آب در خاک‌های تیمار شده با صمغ، به‌طور قابل توجه ولی غیرمعنی‌دار بیشتر از خاک‌های دیگر بود، که نشان‌دهنده پاسخ مثبت آن‌ها به کاربرد صمغ می‌باشد. این افزایش غیرمعنی‌دار نگهداشت آب ممکن است به دلیل اثر صمغ در بهبود و اصلاح ساختمان خاک باشد که منجر به جذب آب بیشتری می‌گردد. تحقیقت مختلف (۱۲ و ۲۷) همچنین نشان داد که کاربرد صمغ عربی به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) پایداری خاکدانه‌ها را نسبت به خاک‌های بدون صمغ افزایش داد. به نظر می‌رسد که پلی‌ساکاریدها در حضور آنیون‌های خاص به‌عنوان عوامل اتصال بین ذرات خاک عمل می‌کنند (۲۳ و ۳۴). نتایج تحقیق الجک (۱۲) نشان داده است که صمغ عربی به طور غیرمعنی‌داری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های تیمار شده را در مقایسه با خاک‌های تیمار نشده کاهش داده است. آنها دلیل کاهش هدایت هیدرولیکی در اثر افزایش صمغ را به کاهش در اندازه و حجم خلل و فرج و کاهش درصد تخلخل مرتبط دانسته‌اند. با این وجود به نظر می‌رسد که تغییر در هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در اثر افزایش صمغ عربی به دلیل مسدود شدن منافذ عبور آب باشد زیرا کاهش در حجم منافذ در حالی که در پایداری خاکدانه‌ها افزایش پیدا کرده باشد منطقی به نظر نمی‌رسد.

تا به حال گزارشی از کاربرد صمغ عربی در خاک‌های شور وجود ندارد. به نظر می‌رسد که اثرات صمغ عربی در خاک‌های شور و شور - سدیمی به دلیل برهمکنش بین صمغ عربی و شوری و یون سدیم با آنچه که در خاک‌های غیرشور و غیرشور - سدیمی اتفاق می‌افتد متفاوت باشد. بنابراین تحقیق حاضر با هدف بررسی اثرات صمغ عربی به عنوان جایگزینی از پلی‌ساکاریدهای برون سلولی بر جرم مخصوص ظاهری، رطوبت اشباع خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، پایداری و میانگین وزنی قطر و بعد فرکتالی خاکدانه‌ها، اسیدیته خاک، مقدار کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و تنفس میکروبی

اندازه بزرگ‌ترین خاکدانه در هر کلاس و x میانگین قطر خاکدانه‌ها در هر کلاس (میلی‌متر) می‌باشد. اسیدیته خاک (pH) با روش روآدز (۳۲) در گل اشباع خاک، مقدار کربن آلی خاک با روش نلسون و سامرس (۲۸)، ظرفیت تبادل کاتیونی با روش باور و همکاران (۴)، و تنفس میکروبی خاک، توسط اندازه‌گیری دی‌اکسید کربن نمونه خاک با روش آندرسون (۱) در پنج مرحله مختلف به ترتیب ۲، ۴، ۷، ۱۳ و ۲۷ روز پس از تیمار خاک‌ها با صمغ عربی اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

جدول‌های ۱ تا ۳ گزارش نتایج آنالیز واریانس، پارامترهای خاک آزمایش شده می‌باشد. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری (۰/۰۵ و $p < ۰/۰۱$) بین نسبت سطوح شوری-سدیمی برای همه پارامترهای خاک آزمایش شده به استثناء هدایت هیدرولیکی اشباع وجود داشت. علاوه بر آن صمغ عربی اثرات معنی‌داری بر تمامی پارامترهای خاک آزمایش شده به استثناء مقدار رطوبت جرمی و رطوبت حجمی و جرم مخصوص گلدان‌ها داشت. همچنین اثرات متقابل شوری-سدیمی خاک و صمغ عربی برای کربن آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه، بعد فراکتال جرمی خاکدانه، درصد پایداری خاکدانه و تنفس خاک در زمان‌های متفاوت بعد از تیمار کردن خاک، معنی‌دار بودند (جدول ۱، ۲ و ۳).

چندین پارامتر در خاک‌های تیمار شده آنالیز شدند. برای این منظور پس از اتمام مرحله انکوباسیون یک ماهه خاک‌های تیمار شده، نمونه‌های خاک دست‌خورده و دست‌نخورده از گلدان‌ها جمع‌آوری و برای آنالیزهای بعدی آماده شدند: با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده با ابعاد ۵/۵ در ۴ سانتی‌متر، جرم مخصوص ظاهری خاک (D_b) با روش گروسمن و رینش (۱۸) و رطوبت اشباع خاک به روش حجمی (Θ_v) و وزنی (Θ_m)، از روش دان و هوپمن (۱۱) اندازه‌گیری شد. به دلیل نرخ پایین خروج آب از نمونه‌های خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) نیز به روش بار افتان (۲۰) اندازه‌گیری شد. از طرف دیگر با استفاده از نمونه خاک‌های دست‌خورده، پایداری خاکدانه‌های ۱ تا ۲ میلی‌متر باقیمانده بر روی الک ۰/۲۵ میلی‌متر در حالت خیس (WAS) با استفاده از دستگاه الک مرطوب (۲۹)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) براساس روش یودر (۴۱) و بعد فرکتال جرمی خاکدانه‌ها (D_m) با روش تیلر و ویتکرافت (۳۵) اندازه‌گیری شد. در آزمایشات MWD و بعد فرکتالی از سری الک‌های ۰/۲، ۰/۴، ۰/۷۵، ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی‌متر با دامنه نوسان ۳۰ مرتبه در هر دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه استفاده شد. برای محاسبه بعد فرکتالی نیز از رابطه $M(x < X)/M_t = (x/X_t)^{3-D_m}$ استفاده شد که $M(x < X)$ جرم تجمعی خاکدانه‌ها بر روی غربال‌ها با اندازه‌های کوچک‌تر از X (گرم)، M_t جرم کل خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی تمام غربال‌ها (گرم)، X_L بالاترین اندازه روزنه غربال که برابر با ۸ میلی‌متر است، X

جدول ۱- تجزیه واریانس خصوصیات خاک مورد بررسی

Table 1- Analysis of variance of examined soil characteristics

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات Mean square				
		کربن آلی (%) OC (%)	ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بار بر کیلوگرم) CEC (Cmole+.kg ⁻¹)	اسیدیته pH	رطوبت اشباع Saturated water content	
					وزنی (%) Gravimetric (%)	حجمی (%) Volumetric (%)
شوری-سدیمی Salinity - Alkalinity	2	0.015**	376.3**	2.816**	463.09**	428.10**
صمغ عربی Gum Arabic	2	0.034**	0.212 ^{ns}	0.411**	15.899 ^{ns}	11.175 ^{ns}
اثرات متقابل Interaction	4	0.0028*	2.726 ^{ns}	0.075 ^{ns}	13.288 ^{ns}	14.660 ^{ns}
خطا Error	18	0.0145	0.979	0.0452	19.361	14.141

** معنی‌دار در سطح یک درصد، * معنی‌دار در سطح پنج درصد و ^{ns} غیر معنی‌دار

** and *: significant at probability levels of 1 and 5 %, respectively; ^{ns}: insignificant

OC: کربن آلی؛ CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی

OC: organic carbon; CEC: cation exchange capacity

جدول ۲- تجزیه واریانس خصوصیات خاک مورد بررسی (ادامه جدول ۱)

Table 2- Analysis of variance of examined soil characteristics (continued from Table 1)

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square				
		جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب) D _b (g.cm ⁻³)	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (میلی متر) MWD (mm)	بعد فرکتالی (میلی متر) D _m (mm)	پایداری خاکدانه‌ها (%) %WAS	هدایت هیدرولیکی (سانتی متر بر ساعت) K _s (cm.h ⁻¹)
شوری - سدیمی Salinity - Alkalinity	2	0.045*	5.055**	4.612**	3674.6**	0.0002 ^{ns}
صمغ عربی Gum Arabic	2	0.009 ^{ns}	1.263*	0.110*	601.95**	0.0014*
اثرات متقابل Interaction	4	0.004 ^{ns}	1.094*	0.194**	504.3**	0.0010 ^{ns}
خطا Error	18	0.0078	0.256	0.0291	79.05	0.0005

** معنی‌دار در سطح یک درصد، * معنی‌دار در سطح پنج درصد و ^{ns} غیر معنی‌دار

** and *: significant at probability levels of 1 and 5 %, respectively; ^{ns}: insignificant

D_b: جرم مخصوص ظاهری؛ MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها؛ D_m: بعد فرکتال جرمی؛ WAS: پایداری خاکدانه‌ها در حالت خیس؛ K_s: هدایت هیدرولیکی اشباع خاک
D_b: bulk density; MWD: mean weight diameter; D_m: mass fractal dimension; WAS: wet-aggregate stability; K_s: saturated hydraulic conductivity

جدول ۳- تجزیه واریانس تنفس خاک در خاک‌های مورد بررسی در زمان‌های مختلف بعد از اعمال تیمارها

Table 3- Analysis of variance of soil respiration at different times after treatment

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square				
		روز دوم Second day	روز چهارم Fourth day	روز هفتم Seventh day	روز سیزدهم 13 th day	روز بیست و هفتم 27 th day
شوری - سدیمی Salinity - Alkalinity	2	32946.7**	82338.3**	28539.2**	7905.5**	10506.0**
صمغ عربی Gum Arabic	2	55708.2**	91372.9**	34548.9**	10122.4**	8508.5**
اثرات متقابل Interaction	4	8985.4**	16299.2**	8375.89**	1988.9**	2286.7**
خطا Error	18	499.69	2101.8	339.5	20.121	14.09

** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

** : significant at probability levels of 1 %

آلی خاک برای تمامی سطوح شوری - سدیمی با افزایش مقدار صمغ عربی افزایش یافت. بیشترین مقدار کربن آلی خاک (۰/۳ تا ۰/۳۵ %) در بالاترین سطح صمغ عربی استفاده شده، مستقل از شوری - سدیمی خاک مشاهده شده است. کمترین مقدار کربن آلی خاک در خاک‌های شور - سدیمی (هدایت الکتریکی بیشتر از ۶ دسی‌زیمنس بر متر و SAR بیشتر از ۱۵) بدون کاربرد صمغ عربی مشاهده شد. به طور کلی افزودن ۵ و ۱۰ گرم صمغ عربی در یک کیلوگرم خاک به ترتیب منجر به افزایش کربن آلی از ۰/۲۶ درصد به ۰/۳ و ۰/۳۶

مقایسات میانگین فقط برای اثرات متقابل صمغ عربی و شوری - سدیمی برای پارامترهای خاک با اثرات متقابل معنی‌دار ذکر شده است؛ در حالی که برای سایر پارامترها با اثرات متقابل غیرمعنی‌دار، مقایسه میانگین برای هر دو فاکتور (شوری - سدیمی و صمغ عربی) آورده شده است. اثر متقابل شوری - سدیمی خاک و صمغ عربی بر روی کربن آلی خاک، پایداری خاکدانه‌ها در حالت خیس و میانگین وزنی قطر خاکدانه و بعد فراکتال جرمی خاکدانه‌های خاک در شکل ۱ و ۲ نمایش داده شده است. شکل A-۱ نشان می‌دهد که مقدار کربن

درصد در خاک غیرشور، از ۰/۱۴ درصد به ۰/۲۲ و ۰/۳۳ درصد در خاک شور- سدیمی و از ۰/۲۲ درصد به ۰/۲۹ و ۰/۳۱ درصد در خاک شدیداً شور- سدیمی شد (شکل A-۱). با توجه به اینکه صمغ عربی یک پلیمر آلی است، افزایش کربن آلی خاک در اثر کاربرد آن در این تحقیق قابل پیش‌بینی بود.

اثرات متقابل شوری- سدیمی خاک و صمغ عربی بر روی پایداری خاکدانه‌های مرطوب (B-۱) نشان داد که کاربرد صمغ عربی در خاک غیرشور- سدیمی (هدایت الکتریکی ۱ دسی‌زیمنس بر متر و SAR حدود ۱) به طور معنی‌داری پایداری خاکدانه را از ۱۵ درصد در خاک تیمار نشده به ۶۰ درصد در خاک تیمار شده با بالاترین سطح (۱۰ گرم بر کیلوگرم) صمغ عربی افزایش داد. همچنین شکل B-۱ نشان می‌دهد که اگرچه صمغ عربی به صورت جزئی پایداری خاکدانه را در خاک‌های شور- سدیمی (هدایت الکتریکی ۶ دسی‌زیمنس بر متر و SAR حدود ۱۶) افزایش داد (۳ درصد در مقابل صفر) ولی این افزایش قابل توجه و معنی‌دار نبود. کاربرد صمغ عربی هیچ تغییری (۰/۹ درصد در مقابل ۰/۹ درصد) در پایداری خاکدانه‌ها در خاک‌های شدیداً شور- سدیمی (هدایت الکتریکی ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر و SAR حدود ۵۸) ایجاد نکرد. به نظر می‌رسد اثر شوری و بخصوص سدیمی بر پایداری خاکدانه در خاک‌های شور- سدیمی نسبت به اثر صمغ عربی بسیار تعیین کننده باشد که می‌تواند به دلیل نسبت جذب سدیم بالا در خاک‌های شور باشد (۳ و ۳۱). افزایش پایداری خاکدانه در خاک‌های غیرشور با کاربرد صمغ عربی، توسط الجک (۱۲) و موحامد (۲۷) گزارش شده است. به نظر می‌رسد که افزایش پایداری خاکدانه‌ها با کاربرد صمغ عربی به دلیل خصوصیات سیمانی‌کنندگی پلی‌ساکاریدها در سیمانی کردن ذرات خاک است. زارنس و همکاران (۱۰) و چنو و استوتزکی (۸) گزارش کرده‌اند که به دام انداختن ذرات خاک توسط پلیمرهای زیستی (پلی‌ساکاریدهای برون سلولی)، نقش بسیار مهمی در تشکیل خاکدانه‌های ریز خاک (ریزدانه‌ها) داشته و در پایداری آن‌ها بسیار مهم هستند (شکل B-۱).

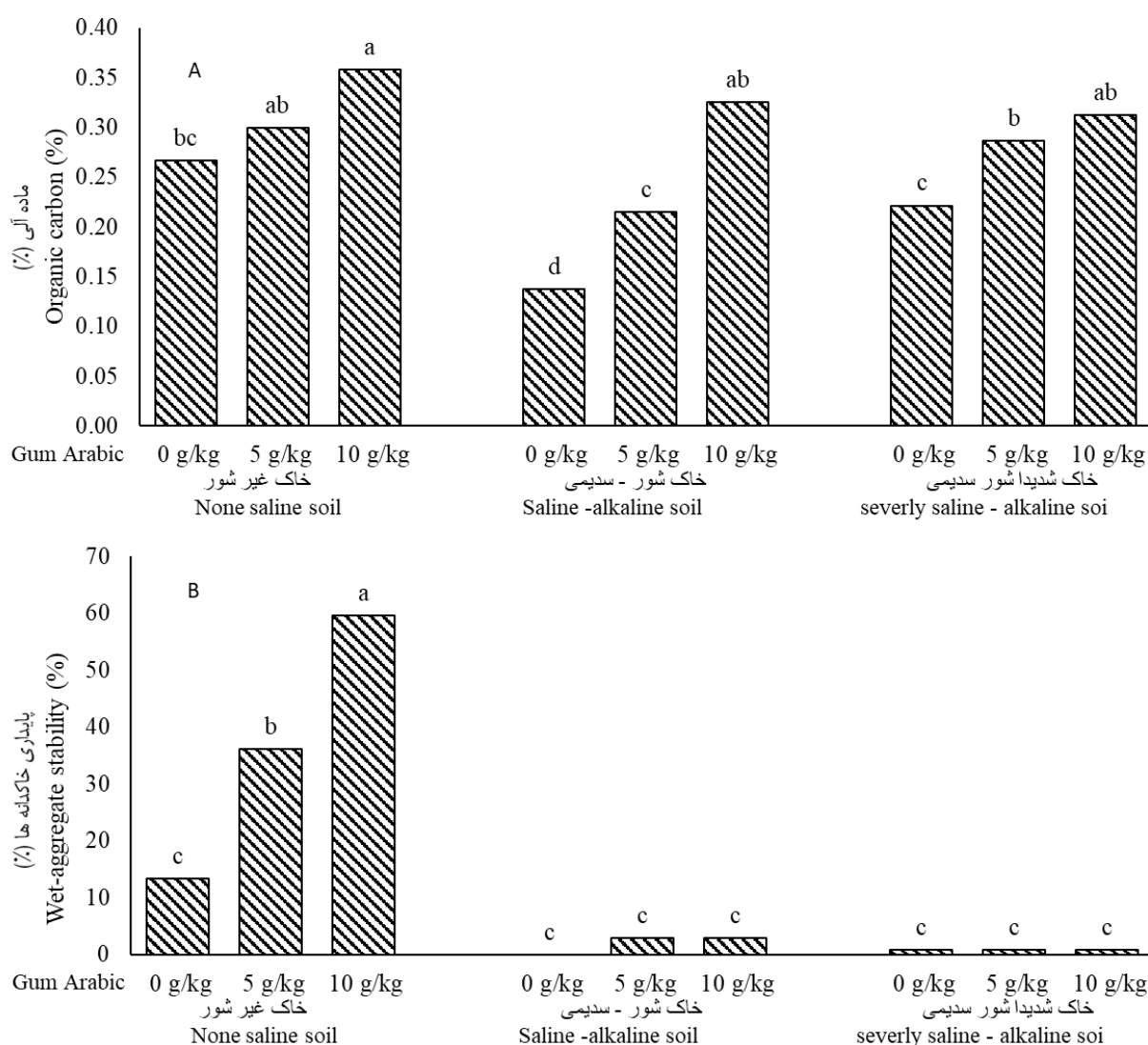
کاربرد ۱۰ گرم بر کیلوگرم صمغ عربی در خاک غیرشور- سدیمی (هدایت الکتریکی برابر ۱ دسی‌زیمنس بر متر و SAR حدود ۱) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خاک را در مقایسه با خاک تیمار نشده ۵ برابر (۲/۵ و ۱ میلی‌متر در مقابل ۰/۵ میلی‌متر) افزایش داد (شکل A-۲)، در حالی که اثری بر میانگین وزنی قطر خاک‌های شور- سدیمی با هدایت الکتریکی برابر ۶ دسی‌زیمنس بر متر و SAR برابر با ۱۶ (۰/۰۷ و ۰/۰۶ میلی‌متر در مقابل ۰/۰۲ میلی‌متر) و شدیداً شور- سدیمی با هدایت الکتریکی برابر با ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر و SAR برابر با ۵۸ (۰/۰۶ و ۰/۰۲ میلی‌متر در مقابل ۰/۰۱ میلی‌متر) نداشت. برخلاف میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، با افزایش مقدار صمغ عربی، کاهش جزئی (۲/۳۲ و ۲/۰۹ در مقابل ۲/۴۳) در بعد

فراکتال جرمی خاکدانه‌ها در خاک غیرشور- سدیمی مشاهده شد (شکل B-۲). در حالی که موجب افزایش معنی‌داری (۱/۸۵ و ۱/۸۶) در مقابل (۱/۲۳) در بعد فراکتال جرمی خاکدانه‌های خاک‌های شور- سدیمی (هدایت الکتریکی ۶ دسی‌زیمنس بر متر و SAR حدود ۱۶) شد. همچنین بعد فراکتال جرمی خاکدانه‌ها را در خاک‌هایی شدیداً شور- سدیمی (هدایت الکتریکی ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر و SAR حدود ۵۸) به طور غیر معنی‌دار افزایش داد (۰/۷۵) در مقابل ۰/۸۷ و ۰/۹۴) (شکل B-۲). کاهش اندازه و قطر خاکدانه‌ها در خاک‌های شور- سدیمی با هدایت الکتریکی ۶ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر که دارای مقادیر SAR بالای ۱۵ هستند می‌تواند به دلیل ویژگی‌های دیسپرس‌کنندگی سدیم خاک باشد که توسط اودیس و واترز (۳۰) و امداد و همکاران (۱۳) نیز تأیید شده است. گرینلند (۱۷) اشاره کرده است که حلقه‌ها و زنجیره‌های موجود در ساختمان پلیمرها می‌توانند چندین پل اتصال میان ذرات خاک ایجاد کنند. با توجه به اینکه صمغ عربی خاصیت چسبندگی و ژل‌کننده‌گی دارد بنابراین ذرات خاک را به هم چسبانده و خاکدانه‌سازی را تسهیل کرده و ساختمان خاک را بهبود می‌بخشد (۳۹). شانمگاندن و اودیس (۳۶) گزارش کرده‌اند که پلی‌ساکاریدها و پلیمرها نقش مهمی در پایداری خاکدانه‌های کوچک ایفا می‌کنند که این خاکدانه‌های کوچک به وسیله عوامل اتصال دهنده پلیمرها، خاکدانه‌های بزرگ را بوجود می‌آورند. اگرچه پژوهش تفصیلی دقیق برای تفسیر اثر شوری- سدیمی و صمغ عربی بر بعد فراکتال خاکدانه‌ها نیاز هست، به نظر می‌رسد که خاک‌های دارای خاکدانه‌های با قطر درشت‌تر و همچنین خاک‌های بدون ساختمان به دلیل پیچیدگی اندک سطح خارجی، مقادیر پایینی از بعد فراکتال جرمی را به خود اختصاص دهند. بنابراین در خاک‌های غیرشور- سدیمی که به طور طبیعی از خاکدانه‌های درشت‌تر و بعد فراکتال جرمی نسبتاً بالایی برخوردار می‌باشند، افزایش بیش از حد قطر خاکدانه‌ها ممکن است موجب کاهش اندک در بعد فراکتال جرمی خاکدانه‌ها در نتیجه کاهش پیچیدگی در سطوح خارجی آن‌ها شود. در حالی که در خاک‌های شور- سدیمی که به طور طبیعی بعد فراکتال جرمی پایین و خاکدانه‌های ریزتری و نتیجتاً پیچیدگی کمتری در سطوح خارجی خود دارند، کاربرد صمغ عربی می‌تواند بعد فراکتال جرمی خاکدانه‌ها را حتی با افزایش کمی در قطر خاکدانه‌ها، افزایش دهد (شکل B-۲).

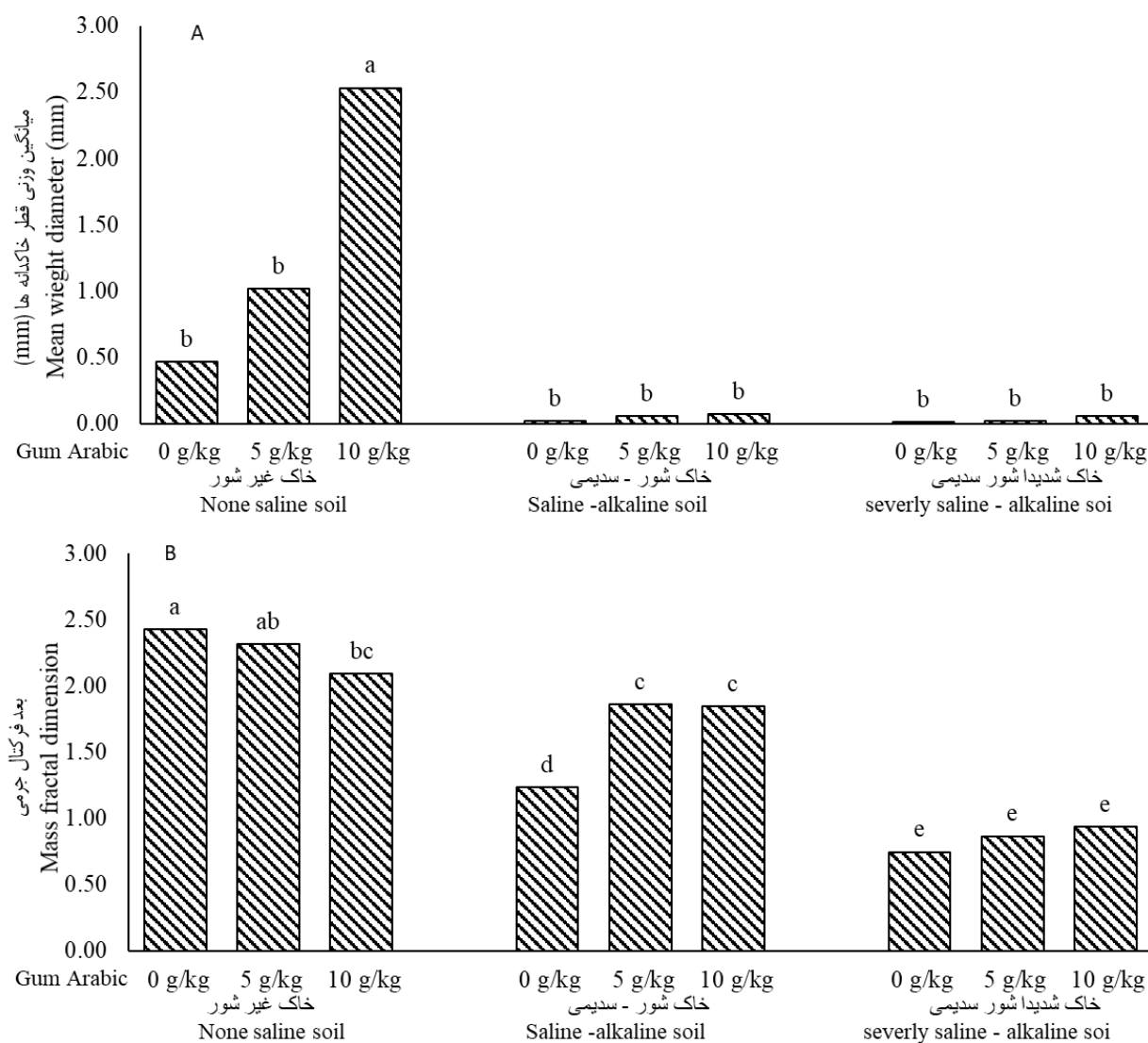
برهمکنش شوری- سدیمی و صمغ عربی بر روی تنفس خاک در زمان‌های مختلف بعد از تیمار خاک، در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که صمغ عربی به طور معنی‌داری تنفس خاک را در زمان‌های مختلف بعد از تیمار هم در خاک‌های شور- سدیمی و شدیداً شور- سدیمی (با هدایت الکتریکی ۶ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر و SAR برابر با ۱۶ و ۵۸) و هم در خاک غیر شور- سدیمی (۱ دسی‌زیمنس بر متر و SAR برابر با ۱) افزایش داد. با این حال

بر کیلوگرم خاک در روز در خاک شدیداً شور- سدیمی شد. همچنین نتایج نشان داد که تنفس خاک (به عنوان شاخصی از فعالیت میکروبی خاک) با افزایش شوری- سدیمی خاک کاهش یافت که مطابق با نتایج ماووی و همکاران (۲۵) و و چاوودهاری و همکاران (۹) است. این محققان گزارش کردند که تنفس خاک تحت تأثیر شوری قرار گرفته و با افزایش شوری خاک، تنفس خاک کاهش می‌یابد. کاهش تنفس با افزایش شوری می‌تواند به وسیله پتانسیل اسمزی پایین توجیه شود. به نظر می‌رسد پتانسیل اسمزی پایین ایجاد شده توسط سطوح بالای شوری خاک، فعالیت میکروبی خاک و نتیجتاً تنفس خاک را کاهش می‌دهد (۲۴ و ۴۰).

افزایش در خاک غیرشور- سدیمی نسبت به خاک شور- سدیمی بسیار قابل توجه بود (شکل ۳). با در نظر گرفتن همه اندازه‌گیری‌ها در زمان‌های متفاوت بعد از تیمار خاک، بیشترین سطح تنفس خاک در خاک غیرشور با کاربرد ۱۰ گرم بر کیلوگرم صمغ عربی به طور معنی داری از سایر تیمارها بیشتر بود. به طور کلی افزودن ۵ و ۱۰ گرم صمغ عربی در یک کیلوگرم خاک به ترتیب منجر به افزایش تنفس تجمعی خاک در ۵ دوره اندازه‌گیری شده از ۲۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در روز به ۹۰۲ و ۱۲۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در روز در خاک غیرشور- سدیمی، از ۱۳۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در روز به ۳۰۰ و ۲۸۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در روز در خاک شور- سدیمی و از ۱۹۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در روز به ۶۱۳ و ۸۰۲ میلی‌گرم



شکل ۱- اثر متقابل شوری خاک و صمغ عربی بر کربن آلی خاک (A) و پایداری خاکدانه‌ها (B)
Figure 1- The interaction effects of soil salinity and gum Arabic on soil OC (A) and WAS (B)

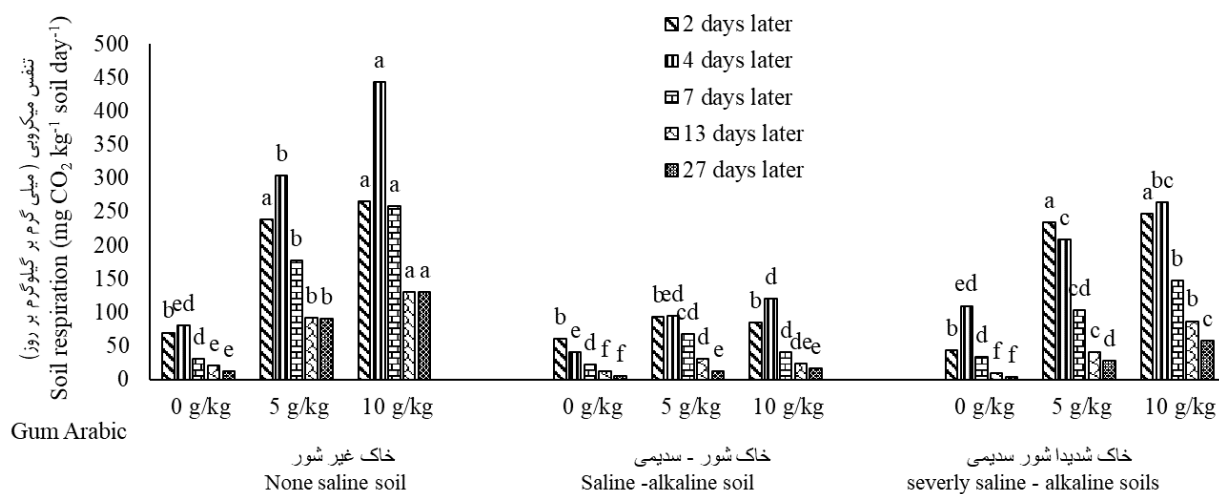


شکل ۲- اثر متقابل شوری خاک و صمغ عربی بر میانگین وزنی قطر خاکدانه (A) و بعد فراکتال جرمی خاکدانه (B)
Figure 2- The interaction effects of soil salinity and gum Arabic on soil MWD (A) and D_m (B)

فاضلاب، اثر مثبت آن را روی تنفس میکروبی گزارش کرده‌اند. همچنین کلیس و همکاران (۷) افزایش تنفس میکروبی در خاک‌های شورسدیمی را توسط کاربرد لجن فاضلاب، گچ معدنی و گچ سنتز شده گزارش کرده‌اند (شکل ۳).

شکل ۴ تغییرات تنفس میکروبی خاک در زمان‌های مختلف پس از تیمار با ۰، ۵ و ۱۰ گرم صمغ عربی بر کیلوگرم خاک را در هر سه خاک با سطوح مختلف شوری-سدیمی نشان می‌دهد. نتایج نشان دهنده این است که در هر سه سطح مختلف شوری-سدیمی افزایش صمغ عربی موجب افزایش تنفس میکروبی خاک شد. با این وجود گذشت زمان موجب کاهش تنفس میکروبی خاک شده است که می‌تواند در اثر مصرف مواد قابل تجزیه توسط میکروب‌ها باشد.

گارسیا و هرناندز (۱۵) گزارش کرده‌اند که تغییر تنفس میکروبی ناشی از فعالیت میکروبی در اثر افزایش شوری کاملاً مشهود است و شدت کاهش تنفس میکروبی با افزایش غلظت نمک، افزایش می‌یابد. آن‌ها بر این عقیده هستند که به‌طور کلی شوری به‌ویژه زمانی که عامل شوری سدیم کلراید باشد، میزان فعالیت میکروبی را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر به نظر می‌رسد که صمغ عربی می‌تواند مقدار ماده آلی حل شونده را افزایش داده و تنفس خاک را تحریک کند. با این حال گزارشی (پیش‌تر از مطالعه ما) از ارزیابی اثرات صمغ عربی بر تنفس خاک وجود ندارد. اگرچه اثر نهایی اصلاح‌کننده‌های آلی بر تنفس خاک توسط چندین محقق گزارش شده است. برای مثال کلیس و همکاران (۵ و ۶) با استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی مختلف، روی خاک‌های تخریب شده، با کاربرد ۱۵ تا ۱۵۰ تن بر هکتار لجن



شکل ۳- اثرات متقابل شوری و صمغ عربی بر تنفس خاک در زمان‌های متفاوت
Figure 3- The interaction effects of soil salinity and gum Arabic on soil respiration at different times

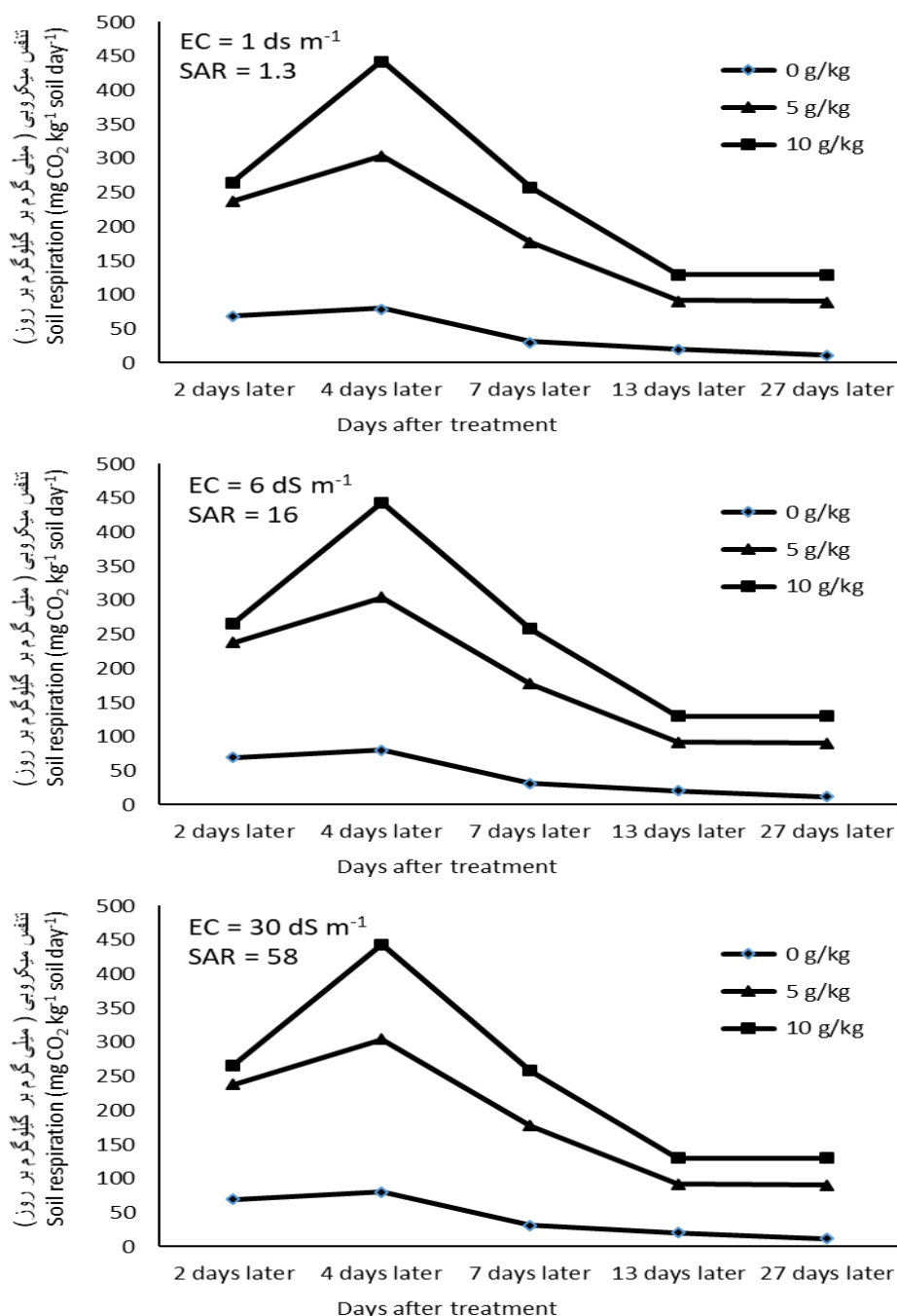
خاک با افزایش شوری، pH خاک افزایش یافته بود. بالاترین مقدار رطوبت اشباع جرمی (۴۳ درصد) و حجمی (۵۳ درصد)، در شوری ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر و پایین‌ترین مقدار رطوبت اشباع جرمی و حجمی به ترتیب ۳۰ درصد و ۴۱ درصد در شوری ۱ دسی‌زیمنس بر متر ثبت شده است. که تفاوت معنی‌داری با سطح احتمال ۱ درصد را نشان داد (شکل ۵-C). افزایش میزان رطوبت اشباع خاک با افزایش شوری می‌تواند به دلیل افزایش تخلخل خاک به دلیل کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک باشد که بخش قبلی اشاره شد. تدسچی و همکاران (۳۶) گزارش کرده‌اند که مقدار آب ذخیره و نگه‌داشته شده در تیمارهای خاک‌های شور نسبت به خاک‌های غیرشور بیشتر بود. آن‌ها مشاهده کردند که تیمار شوری ۱ درصد، مقدار آب بیشتری نسبت به تیمارهای ۰.۲۵ درصد و ۰.۵ درصد داشت، باین‌وجود آن‌ها گزارش کردند که مقدار آب قابل دسترس در تیمارهای شور کاهش یافته بود. نتایج مقایسه میانگین برای سطوح مختلف شوری - سدیمی (شکل ۵-D) نشان می‌دهد که بالاترین جرم مخصوص ظاهری (۱/۳۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) در خاک‌های غیرشور - سدیمی بود که به طور معنی‌داری از مقدار آن در خاک‌های شور - سدیمی و شدیداً شور - سدیمی (۱/۲۳ و ۱/۳۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بالاتر بود. این کاهش در مقدار جرم مخصوص ممکن است به دلیل اثر فلوکوله کنندگی (هم‌آوری کنندگی) عناصری چون کلسیم و منیزیم در شوری‌های بالا و افزایش میزان تخلخل در اثر فلوکوله شدن باشد. کلسیم و منیزیم به دلیل اینکه در اشغال فضاهای مشابه بین رس‌ها با سدیم رقابت می‌کنند عموماً خاک را هم‌آوری می‌کنند (۲۱ و ۳۸). این نتایج مطابق با یافته‌های تدسچی و همکاران (۳۶) بود، به‌طوری‌که این محققان گزارش کردند در شوری‌های متفاوت با

نتایج همچنین نشان داد که اگرچه برهمکنش صمغ عربی و شوری - سدیمی برای ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، اسیدیته خاک (pH)، مقدار رطوبت وزنی و رطوبت حجمی و جرم مخصوص گلدان ها، غیرمعنی‌دار بود، اثرات اصلی شوری - سدیمی خاک روی خصوصیات ذکر شده معنی‌دار بود. شکل ۵ مقایسه میانگین ظرفیت تبادل کاتیونی، اسیدیته خاک، مقدار رطوبت جرمی و رطوبت حجمی و جرم مخصوص گلدان‌های تحت تأثیر سطوح مختلف شوری - سدیمی را نشان می‌دهد. شکل A-5 نشان می‌دهد که ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، اسیدیته خاک، مقدار رطوبت جرمی و رطوبت حجمی به استثنای pH برای خاک شدیداً شور - سدیمی، با افزایش شوری خاک افزایش یافته است. برعکس، جرم مخصوص گلدان‌ها با افزایش شوری - سدیمی خاک کاهش یافته بود. بالاترین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک ۲۰ و ۲۱ سانتی‌مول بار مثبت بر کیلوگرم به ترتیب در خاک‌های شور - سدیمی و شدیداً شور - سدیمی با هدایت الکتریکی ۶ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر و SAR برابر با ۱۶ و ۵۸ ثبت شده است. در حالی که مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی از ۹ سانتی‌مول بار مثبت بر کیلوگرم برای خاک غیرشور - سدیمی به طور معنی‌داری از مقدار آنها در خاک شور - سدیمی و شدیداً شور - سدیمی کمتر است (شکل A-۵). بالاترین مقدار pH نیز در خاک‌های شور - سدیمی و شدیداً شور - سدیمی ثبت شده بود (بالاتر از ۸) که به طور معنی‌داری بالاتر از خاک‌های غیرشور (pH برابر ۷/۴) بود (شکل B-۵). افزایش pH ممکن است به دلیل مقدار زیاد کربنات‌های آزاد که در مقابل هر نوع کاهش pH مقاومت می‌کنند، باشد (۳۳). تحقیقات تدسچی و همکاران (۳۶) نیز حاکی از این مطلب است که شوری خاک، pH آن را تحت تأثیر قرار داده، به‌طوری‌که در عمق ۱۵ سانتی‌متری لایه‌های

شده با ۱۰ گرم بر کیلوگرم صمغ عربی ثبت شده است. برخلاف نتایج ما، الجک (۱۲) بیان کرده است که تیمار خاک با صمغ عربی به دلیل کاهش تخلخل خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع را به طور معنی‌داری در مقایسه با تیمار شاهد کاهش می‌دهد.

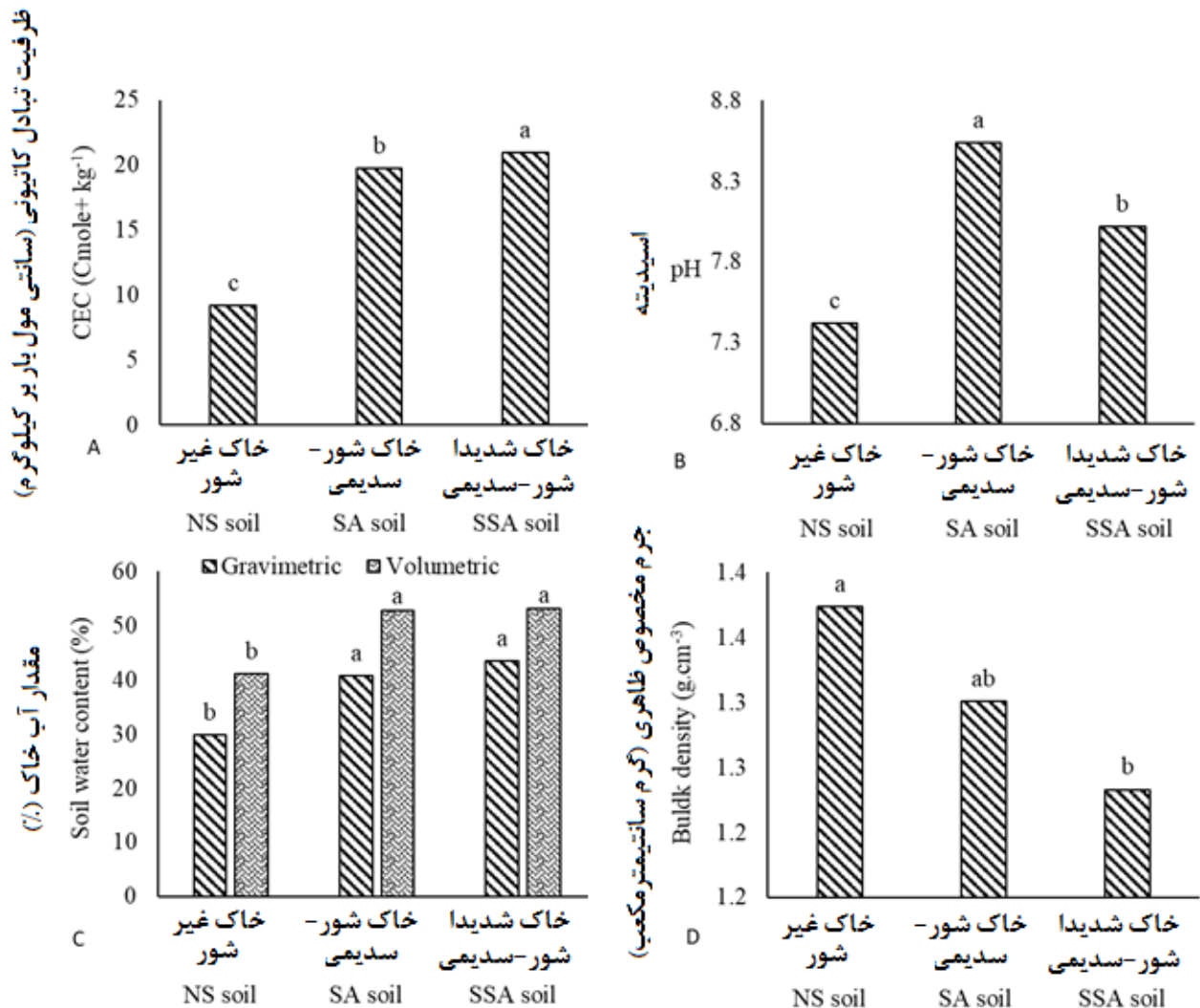
افزایش شوری جرم مخصوص ظاهری کاهش پیدا می‌کند (شکل D-۵).

شکل A-۶ نشان دهنده تفاوت‌های معنی‌دار صمغ عربی روی هدایت هیدرولیکی اشباع و اسیدیته خاک می‌باشد. بیشترین میزان هدایت هیدرولیکی اشباع (۰/۰۶ سانی متر بر دقیقه) در خاک تیمار



شکل ۴- تغییرات تنفس میکروبی خاک در زمان‌های مختلف بعد از تیمار خاک با صمغ عربی

Figure 4- Soil microbial respiration changes at different times after treatment with Arabic gum



شکل ۵- اثرات شوری بر ظرفیت تبادل کاتیونی (A)، اسیدیته خاک (B)، مقدار آب خاک (C) و جرم مخصوص ظاهری (D) (NS: خاک غیر شور، SA: خاک شور- سدیمی و SSA: خاک شدیداً شور- سدیمی)

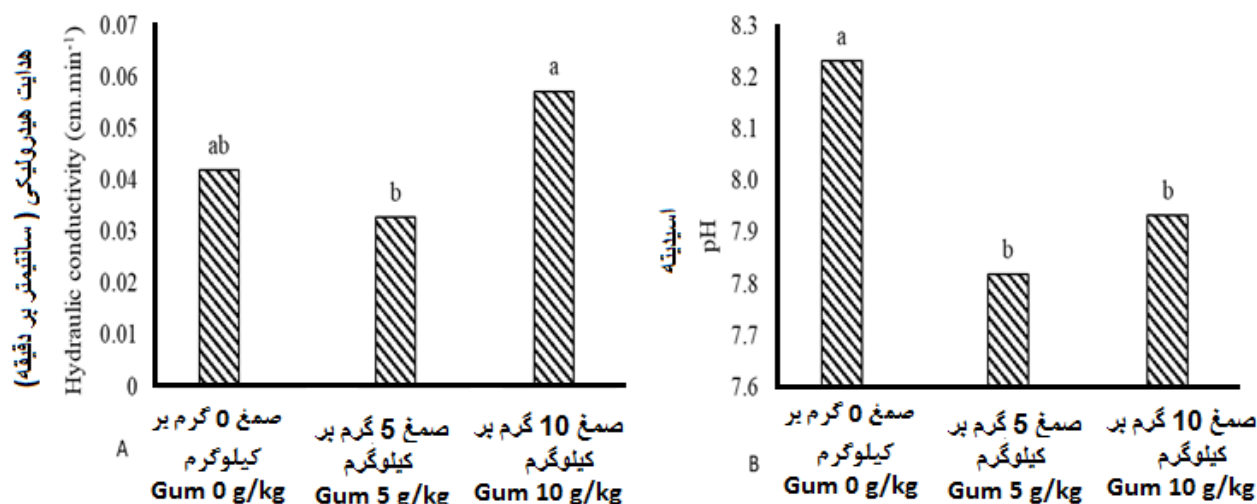
Figure 5- Salinity effects on soil CEC (A), pH (B), water content (C), and bulk density (D) (NS: none saline soil, SA: saline-alkaline soil, and SSA: severely saline - alkaline soil)

تخریب شده و هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. در نتیجه اگر آب در خاک جریان نیابد لایه‌های بالایی منبسط شده، رشد گیاهان و تجزیه مواد آلی در شرایط غیرهوازی یا خاک‌های با زهکشی ضعیف را محدود کرده و یا کاهش می‌دهد. تدسچی و همکاران (۳۶) گزارش کرده‌اند، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با افزایش شوری کاهش می‌یابد. این کاهش در هدایت هیدرولیکی در تیمارهای با بالاترین مقدار شوری (شوری ۱ درصد و ۰/۵ درصد) در همه لایه‌های خاک مشاهده شد. نتایج آن‌ها نشان داد زمانی که پایداری خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد، هدایت هیدرولیکی نیز کاهش می‌یابد، زیرا افزایش شوری و درصد سدیم تبادل (ESP) تأثیر منفی روی پایداری خاکدانه داشته، موجب تخریب ساختمان خاک می‌شود و مقدار آب قابل دسترس و هدایت هیدرولیکی را کاهش می‌دهد. برخلاف هدایت هیدرولیکی اشباع،

اگرچه در مطالعه ما به نظر می‌رسد اندازه و پایداری بالای خاکدانه‌های ایجاد شده در اثر کاربرد صمغ عربی، نسبت خلل و فرج درشت را افزایش داده که نتیجه آن هدایت هیدرولیکی اشباع بیشتر می‌باشد. همچنین می‌توان یادآور شد که افزایش شوری و سدیمی خاک به طور معنی‌داری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌ها را در مقایسه با تیمارهای دیگر (۰/۳۸ در مقابل ۰/۴۶ و ۰/۴۸ سانتی‌متر بر دقیقه) کاهش داده بود. این نتایج مطابق با گزارشات وارنس و همکاران (۳۸) می‌باشد که گزارش کرده‌اند دیسپرس شدن خاک علاوه بر این که مقدار آب نفوذی در خاک را کاهش می‌دهد، روی هدایت هیدرولیکی خاک نیز اثر می‌گذارد. به نظر می‌رسد کاهش هدایت هیدرولیکی خاک‌های با غلظت سدیم بالا قابل پیش‌بینی و قابل توضیح باشد. زیرا وقتی سدیم دیسپرس می‌شود، ساختمان خاک

خاک با کاربرد صمغ عربی به دلیل ساختار اسیدی آن قابل انتظار می‌باشد (۵) (شکل ۶-۵).

نتایج (شکل ۶-۵) نشان داد، کاربرد صمغ عربی (۵ و ۱۹ گرم بر کیلوگرم) به طور معنی‌داری اسیدیته خاک را در مقایسه با خاک‌های تیمار نشده (۷/۸ و ۷/۹ در مقابل ۸/۲) کاهش داد. کاهش اسیدیته



شکل ۶- اثرات صمغ عربی بر روی هدایت هیدرولیکی خاک (A) و اسیدیته خاک (B)
Figure 6- Gum Arabic effects on soil hydraulic conductivity (A) and pH (B)

گرفته بودند.

نتیجه‌گیری

اثر اصلی شوری- سدیمی خاک در ظرفیت تبادل کاتیونی، اسیدیته خاک، مقدار رطوبت حجمی و رطوبت جرمی خاک معنی‌دار بوده و جرم مخصوص بالای گلدان‌ها در ظرفیت تبادل کاتیونی (۲۱) در مقابل ۹ سانتی‌مول بار مثبت بر کیلوگرم، بالاترین pH خاک (۸/۵) در مقابل (۷/۴) و بالاترین مقدار رطوبت حجمی (۵۳) در مقابل ۴۱ درصد و رطوبت جرمی (۴۳) در مقابل ۳۰ درصد و جرم مخصوص پایین گلدان‌ها (۱/۳۷) در مقابل ۱/۲۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) در کاربرد بالاترین مقدار (۱۰ گرم بر کیلوگرم) صمغ عربی ثبت شد. اثر اصلی صمغ عربی بر هدایت هیدرولیکی اشباع معنی‌دار بوده و اسیدیته خاک نسبت بالایی از هدایت هیدرولیکی اشباع (۰/۰۶) در مقابل ۰/۰۴ سانتی‌متر بر دقیقه) بوده و اسیدیته پایین (۷/۹) در مقابل (۸/۲) در ۱۰ گرم بر کیلوگرم صمغ عربی ثبت گردید.

سپاسگزاری

نویسندگان از آقای دکتر بلیر مکنزی (Dr. Blair McKenzie) و خانم دکتر سارا ملا علی عباسیان به خاطر مشاوره‌های بی‌شائبه آنها در انجام آزمایشات آزمایشگاهی قدردانی می‌نمایند.

تحقیق حاضر به منظور ارزیابی برهمکنش صمغ عربی (به عنوان جایگزینی از پلی ساکاریدهای برون سلولی) و شوری- سدیمی خاک بر چندین ویژگی خاک‌های شور- سدیمی و غیرشور- سدیمی جمع آوری شده از اطراف دریاچه ارومیه، واقع در شمال غرب ایران انجام شد. نتایج حاصل در زیر آورده شده است:

برهمکنش صمغ عربی و شوری- سدیمی خاک بر کربن آلی، فعالیت میکروبی و خصوصیات ساختمانی (میانگین وزنی قطر خاکدانه، شاخص پایداری خاکدانه‌ها و بعد فراکتال جرمی خاکدانه‌ها) معنی‌دار بود. صمغ عربی خصوصیات بیولوژیکی را حتی در خاک‌های شور- سدیمی بهبود داد به طوری که بیشترین فعالیت میکروبی (۱۶ تا ۴۴۳ در مقابل ۳ تا ۱۰۹ میلی گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز) و مقدار کربن آلی (۰/۳۱ تا ۰/۳۶ در مقابل ۰/۱۴ تا ۰/۲۲ درصد) با بیشترین مقدار صمغ عربی در خاک‌های شور و غیرشور به دست آمد. در حالی که پایداری خاکدانه‌های خاک (۰/۸۸ تا ۶۰ در مقابل ۰/۹ تا ۱۳ درصد) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (۰/۰۶ تا ۲/۵۳ در مقابل ۰/۰۹ تا ۰/۴۶ میلی متر) و بعد فراکتال جرمی (۰/۹۴ تا ۲/۰۹ در مقابل ۰/۷۵ تا ۲/۴۵ میلی متر) خاکدانه‌ها نسبت به خاک‌های شور- سدیمی در خاک‌های غیرشور- سدیمی تحت تأثیر صمغ عربی قرار

- 1- Anderson D. C., Harper K. T., and Holmgren R. C. 1982. Factors influencing development of cryptogamic soil crusts in Utah deserts. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, 35: 180-185.
- 2- Badreldin A., Ziada A., and Blunden G. 2009. Biological effects of gum arabic: A review of some recent research. *Food and Chemical Toxicology*, 47: 1-8.
- 3- Barzegar A. R., Oades J. M., Rengasamy P., and Giles L. 1994. Effect of sodicity and salinity on disaggregation and tensile strength of an Alfisol under different cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 32: 329-345.
- 4- Bower C. A., Reitemeier R., and Fireman M. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, 73: 251-262.
- 5- Celis J., Sandoval M., and Bello N. 2011. No-linear respiration dynamics in a degraded Alfisol amended with different dose of salmon sludges. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 11: 58-67.
- 6- Celis J., Sandoval M., and Zagal E. 2009. Actividad respiratoria de microorganismos en un suelo patagónico enmendado con lodos salmonícolas. *Archivos de Medicina Veterinaria*, 41: 275-279.
- 7- Celis J.E., Sandoval M., Martínez B., and Quezada C. 2013. Effect of organic and mineral amendments upon soil respiration and microbial biomass in a saline-sodic soil. *Ciencia e Investigación Agraria*, 40: 571-580.
- 8- Chenu C., and Stotzky G. 2002. Interactions between microorganisms and soil particles: an overview. *Interactions between soil particles and microorganisms: Impact on the terrestrial ecosystem IUPAC John Wiley & Sons, Ltd, Manchester, UK*:1-40.
- 9- 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.
- 10- Czarnes S., Hallett P., Bengough A., and Young I. 2000. Root-and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. *European Journal of Soil Science*, 51: 435-443.
- 11- Dane J., and Hopmans J.W. 2002. Water Retention and Storage. *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*: 671-797.
- 12- El-Jack E.M.M. S. 2003. Effect of Gum Arabic on Some Soil Physical Properties And Growth Of Sorghum Grown On Three Soil Types. University of Khartoum.
- 13- Emdad M.R., Shahabifar M., and Fardad H. 2006. Effect of different water qualities on soil physical properties. Tenth International Water Technology Conference, Alexandria, Egypt, 647-652.
- 14- Farooq M., Hussain M., Wakeel A., and Siddique K. H. 2015. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 35: 461-481.
- 15- Garcia C., and Hernandez T. 1996. Influence of salinity on the biological and biochemical activity of a calciorthid soil. *Plant and Soil*, 178: 255-263.
- 16- Golabian H. 2010. Urmia Lake: hydro-ecological stabilization and permanence. In: *Macro-engineering seawater in unique environments*. Springer, pp 365-397.
- 17- Greenland D.J. 1972. Interactions between organic polymers and inorganic soil particles. *Proceedings of International symposium on fundamentals of soil conditioning*. Edited by M.F. DeBoodt. Ghent, Belgium, 37: 897-914.
- 18- Grossman R., and Reinsch T. 2002. 2.1 Bulk density and linear extensibility. *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*, 201-228.
- 19- Hassanzadeh E., Zarghami M., and Hassanzadeh Y. 2012. Determining the main factors in declining the Urmia Lake level by using system dynamics modeling. *Water Resources Management*, 26: 129-145.
- 20- Klute A., and Dirksen C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, 687-734.
- 21- Krista E., Nikos J., and James W. 2003. Basics of Salinity and Sodicity Effects on Soil Physical Properties. *Effects of Salinity on Plant Growth*, 10.
- 22- Kullman A., Lehfeltdt J., and Ben Kensten H. 1986. The effect of an organic gel on the physical and physiological properties of a sandy soil. *Agrokemia Estalajan*, 35: 39-47.
- 23- Mark H. F., Gaylord N. G., and Bikales N. M. 1969. Polysaccharides. In *Encyclopedia of polymer science and technology*. Wiley, New York, 11, 417.
- 24- Mavi M. S., and Marschner P. 2017. Impact of Salinity on Respiration and Organic Matter Dynamics in Soils is More Closely Related to Osmotic Potential than to Electrical Conductivity. *Pedosphere*, 27: 949-956.
- 25- Mavi M. S., Marschner P., Chittleborough D. J., Cox J. W., and Sanderman J. 2012. Salinity and sodicity affect soil respiration and dissolved organic matter dynamics differentially in soils varying in texture. *Soil Biology & Biochemistry*, 45: 8-13.
- 26- Metternicht G., and Zinck J. 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote sensing of Environment*, 85: 1-20.
- 27- Mohamed E.A. 1999. Effect of natural amendments on soil aggregate stability and water flow in different soils. M.

- Sc. (Agric) thesis, University of Khartoum, Sudan.
- 28- Nelson D., and Sommers L. E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis Part 2 Chemical and microbiological properties*, 539-579.
- 29- Nimmo J.R., and Perkins K.S. 2002. 2.6 Aggregate Stability and Size Distribution. *Methods of soil analysis: Part 4*:317-328.
- 30- Oades J. M., and Waters A. G. 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal Soil Research*, 29: 815-828.
- 31- Postiglione L., Barbieri G., and Tedeschi A. 1995. Long-term effects of irrigation with saline water on some characteristics of a clay loam soil. *Riv di Agron*, 29: 24-30
- 32- Rhoades J., Manteghi N., Shouse P., and Alves W. 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. *Soil Science Society of America Journal*, 53: 433-439.
- 33- Salih S. A. 2011. Effect of ground water quantities and some tillage practices on soil reclamation. PhD thesis, University of Al-Neelain, Sudan.
- 34- Sandford P. A., and Baird J. 1983. Industrial utilization of polysaccharides. In *The polysaccharides*, G.O. Aspinall (ed). Academic Press, New York, 2: 414-465.
- 35- Shanmuganathan R., and Oades J. 1982. Effect of dispersible clay on the physical properties of the B horizon of a red-brown earth. *Soil Research*, 20: 315-324.
- 36- Tedeschi A., Angelino G., and Ruggiero C. 2006. Physical and chemical properties of long-term salinized soils. *Italian Journal of Agronomy*, 1: 263-270.
- 37- Tyler S.W., and Wheatcraft S.W. 1992. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 362-369.
- 38- Warrence N. J., Bauder J. W., and Pearson K.E. 2002. Basics of salinity and sodicity effects on soil physical properties. *Departement of Land Resources and Environmental Sciences, Montana State University-Bozeman, MT*:1-29.
- 39- Whistler R., and Hymowitz T. 1979. Guar agronomy, production, industrial use and nutrition, 1-96.
- 40- 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.
- 41- Yoder R. E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Agronomy Journal*, 28: 337-351.
- 42- Yu R., Liu T., Xu Y., Zhu C., Zhang Q., Qu Z., Liu X., and Li C. 2010. Analysis of salinization dynamics by remote sensing in Hetao Irrigation District of North China. *Agricultural Water Management*, 97: 1952-1960



The Efficiency of Arabic Gum on Improvement of Physical and Chemical Properties of Saline-Sodic and Non-Saline-Sodic Soils near Lake Urmia

Z. Habibi¹- M. Rahmati^{2*}- A. Alilou³- E. Karimi⁴

Received: 03-03-2018

Accepted: 09-09-2018

Introduction: The use of soil amendments more specifically bio-polymers is increasing nowadays. Arabic Gum is also one of the hydrogels that are capable for soil modification. It seems that the main usage of amendments in soils is to improve the structure of intended soils. Saline-sodic soils are among the poorly structured soils. The use of soil amendments in these soils may be of the most concern. The different conditions of saline-sodic soils in terms of microbial activity and sodium concentration imply that there should be differences in effects of different soil amendments in saline-alkaline and non-saline-alkaline soils. There is no report (up to our knowledge) about the application of Arabic gum in saline soils. However, it seems that the effects of Arabic gum in saline-sodic soils may differ from what in non-saline-alkaline soils due to the interactions between Arabic gum, salinity, and sodium. Therefore, the current research was aimed to investigate the effects of Arabic gum as an analogue of exopolysaccharides on several soil characteristics of saline-sodic and non-saline-sodic soils collected from Lake Urmia catchment, northwest of Iran.

Materials and Methods: The current research was carried out using loam soil samples collected from Qareh Chopogh village located on the southeastern border of Lake Urmia, Bonab plain, Northwest of Iran. In order to evaluate the effects of Arabic gum on properties of saline-sodic and non-saline-sodic soils, a factorial experiment based on completely randomized design (CRD) with two factors (salinity - sodicity levels and Arabic gum) and three replications was carried out. Salinity - sodicity levels, as first factor, included $EC = 1 \text{ dSm}^{-1}$ and $SAR = 1.3$ (non-saline-sodic soil), $EC = 6 \text{ dSm}^{-1}$ and $SAR = 16$ (saline - sodic soil), and $EC = 30 \text{ dSm}^{-1}$ and $SAR = 58$ (severely saline-sodic soil). When soils were sampled from each salinity-sodicity classe and transformed to laboratory, pots were prepared and treated with different levels of Arabic gum including 0, 5, and 10 g kg^{-1} and incubated for one month with varying soil water content between around 0.5FC and FC. After incubation time, disturbed and undisturbed soil samples were collected from pots and were prepared for further analysis. Undisturbed soil samples were used to determine bulk density of pots (D_b), volumetric (θ_v) and gravimetric (θ_m) saturated soil water contents, and saturated hydraulic conductivity (K_s). Disturbed soil samples were also used to determine wet-aggregate stability (WAS), mean weight diameter (MWD), and mass fractal dimension (D_m) of soil aggregates, soil pH, soil organic carbon (OC), soil cation exchange capacity (CEC), and soil respiration. Finally, results were subjected to analysis of variance in SAS software based on applied design.

Results and Discussion: The interaction of Arabic gum and soil salinity-sodicity was significant for organic carbon, microbial activity and soil structural characteristics (MWD, WAS, and mass fractal dimension). Arabic Gum improved biological soil properties even in saline-sodic soils. The higher microbial activity (16 to $443 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ soil day}^{-1}$ in higher amount of Arabic gum vs. 3 to $109 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ soil day}^{-1}$ in blank soil) and organic carbon content (0.31 to 0.36% in higher amount of Arabic gum vs. 0.14 to 0.22% in blank soil) were obtained in higher amount of Arabic gum in saline-sodic and non-saline soils. While, the stability (0.88 to 60 vs. 0.9 to 13%), mean weight diameter (0.06 to 2.53 vs. 0.009 to 0.46 mm), and mass fractal dimensions (0.935 to 2.09 vs. 0.75 to 2.45) of soil aggregates were affected by Arabic gum in non-saline-sodic soils rather than saline-sodic soils. The main effect of soil salinity-sodicity was significant for soil cation exchange capacity, soil pH, gravimetric and volumetric soil water contents, and pots bulk density. The higher amounts of CEC (21 vs. $9 \text{ Cmole}^+.\text{kg}^{-1}$), pH (8.0 vs. 7.4), volumetric (53 vs. 41%) and gravimetric (43 vs. 30%) water contents, and the lower pots bulk density (1.23 vs. 1.37 g.cm^{-3}) were recorded in severely saline-sodic soil compared to non-saline-sodic soil. The main effect of Arabic gum was significant for soil saturated hydraulic conductivity and soil pH where the higher rate of saturated hydraulic conductivity (0.06 cm.min^{-1} in higher amount of Arabic gum vs. 0.04 cm.min^{-1} in blank soil) and the lower pH (7.9 in higher amount of Arabic gum vs. 8.2 in blank soil) were recorded in 10 g.kg^{-1} Arabic gum.

1, 2 and 4- Former M.Sc. Student and Assistant Professors in Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Maragheh University

(*- Corresponding Author Email: mehdirmti@gmail.com)

3- Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Maragheh University

Conclusion: Based on the results, we conclude that although the effectiveness of the Arabic gum is decreased in saline-sodic soils, it significantly affects different soil characteristics. However, it seems that we need to apply higher amount of Arabic gum (higher than 10 g.kg^{-1}) to gain the considerable effects of Arabic gum in saline – sodic soils. Since gradual drying of Urmia Lake, located in northwest of Iran, is leaving behind wide areas of saline and saline-sodic soils which is threatening habitant's health, modification of these salt-affected areas using Arabic gum can be a useful strategy. Although, improving vegetation density seems to be main key for this aim, application of soil amendments (more specifically Arabic gum) may support the establishment of vegetation in area. Our objective observation also points to this fact that Arabic gum (specifically in higher amount of 10 g.kg^{-1}) resulted in a crust like layer in soil surface specially in dry state that can prevent the removal of salt particles by the wind. However, the effectivity of Arabic gum in preventing the removal of salt particle by the wind (which is a common issue in area) needs to be evaluated through wind tunnel experiments.

Keywords: Amendment, Arabic gum, Saline–sodic soils, Urmia lake



تأثیر کاربرد گوگرد و کود دامی بر عملکرد و کیفیت میوه خرمای رقم برحی

حجت دیالمی^{۱*} - محمدرضا گرشاسبی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۰۴

چکیده

با هدف بررسی تأثیر کاربرد گوگرد و کود دامی بر عملکرد و کیفیت میوه خرما و امکان تولید محصول سالم، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۶ تیمار و ۴ تکرار (هر تکرار شامل یک اصله نخل) بر روی نخل خرمای بارور رقم برحی در پژوهشکده خرمای و میوه‌های گرمسیری (اهواز) به مدت ۲ سال اجرا گردید. تیمارهای آزمایشی عبارت از: T₁= تیمار شاهد (بدون مصرف کود)، T₂= مصرف کودهای معدنی برای هر اصله نخل خرما بر اساس آزمون خاک، T₃= مصرف ۳۰ کیلوگرم کود دامی برای هر اصله نخل خرما بر اساس عرف منطقه، T₄= تیمار سوم به علاوه گوگرد عنصری مخلوط شده با مایه تلقیح تیوباسیلوس به میزان ۵ درصد وزنی کود دامی مورد استفاده، T₅= تیمار سوم به علاوه گوگرد عنصری مخلوط شده با مایه تلقیح تیوباسیلوس به میزان ۱۰ درصد وزنی کود دامی مورد استفاده، T₆= تیمار سوم به علاوه گوگرد عنصری مخلوط شده با مایه تلقیح تیوباسیلوس به میزان ۱۵ درصد وزنی کود دامی مورد استفاده، می‌باشند. نتایج نشان داد که عملکرد نخل خرما در تمامی تیمارهای کودی در مقایسه با تیمار شاهد بالاتر می‌باشد. مصرف کودهای معدنی و گوگرد عنصری عملکرد نخل خرما را به ترتیب به میزان ۱۰ و ۷ درصد افزایش داد. بر اساس نتایج این تحقیق، به منظور افزایش عملکرد و بهبود خصوصیات کمی میوه خرما، کاهش مصرف کودهای شیمیایی در نخلستان و امکان تولید محصول سالم خرما، مصرف ۱۵۰۰ گرم گوگرد پودری مخلوط شده با مایه تلقیح تیوباسیلوس به همراه ۳۰ کیلوگرم کود دامی به ازای هر اصله نخل به عنوان بهترین تیمار معرفی و کاربرد آن در نخلستان توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تیوباسیلوس، کود دامی، گوگرد عنصری، نخل خرما

مقدمه

کشور ایران با سطح زیر کشت حدود ۲۳۰ هزار هکتار و تولید بیش از یک میلیون تن، رتبه دوم تولید خرما را در جهان دارد. همچنین خرما، ششمین محصول مهم باغی بوده و از نظر تولید، حدود ۵/۵ درصد کل تولیدات باغبانی کشور را به خود اختصاص داده و در مقایسه با دیگر محصولات کشاورزی از مزایای نسبی فراوانی برخوردار است (۳). از طرف دیگر، خاک‌های اغلب مناطق ایران به ویژه نخلستان‌ها، جزء خاک‌های آهکی محسوب شده و بالا بودن pH این نوع خاک‌ها، می‌تواند باعث تثبیت عناصر غذایی قابل جذب در خاک و در نتیجه کاهش جذب آنها توسط گیاه گردد. نتایج پژوهش‌هایی که تاکنون در این زمینه انجام شده است نشان می‌دهد که

مصرف گوگرد در خاک به عنوان یک ماده ارزان قیمت و فراوان به افزایش فرم محلول و قابل جذب عناصر غذایی در خاک کمک می‌کند.

مارشنر^۳ (۱۷) گزارش نمود، مصرف گوگرد در خاک با ایجاد شرایط اسیدی، باعث افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی از قبیل کلسیم، فسفر، منیزیم و سولفات در خاک گردیده و در نتیجه افزایش رشد رویشی و زایشی گیاه در پی داشته است. عبدو و همکاران^۴ (۲۳) گزارش کردند کاربرد گوگرد باعث افزایش حلالیت فسفر و عناصر غذایی کم مصرف در خاک‌های آهکی گردیده است. خفاجی و همکاران^۵ (۱۰) گزارش کردند کاربرد گوگرد در خاک‌های آهکی، باعث کاهش pH خاک و افزایش میزان فسفر قابل جذب در خاک می‌گردد. نرولا و همکاران^۶ (۲۲) با بررسی تأثیر کاربرد تیمارهای گوگرد و گوگرد همراه با باکتری تیوباسیلوس بر میزان pH خاک‌های آهکی گزارش کردند

۱ و ۲- استادیار پژوهشی و مربی پژوهشی، پژوهشکده خرما و میوه‌های گرمسیری، مؤسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران

(*)- نویسنده مسئول:

(Email: dialamy_s @ yahoo.com)

DOI: 10.22067/jsw.v32i5.72413

3- Marschner

4- Abdou et al.

5- Khafaji et al.

6- Narula et al.

دامی همراه با ۱۰۰۰ گرم گوگرد آلی به ازای هر اصله نخل، باعث افزایش عملکرد و طول میوه خرماي رقم سايّر (استعمران) گرديد. بنابر این با توجه به این که نتایج مطالعه خاک اغلب نخلستان‌های کشور نشان می‌دهد، این نوع خاک‌ها از لحاظ میزان ماده آلی، فسفر و پتاسیم قابل جذب فقیر بوده و میزان این عناصر به میزان قابل توجهی کمتر از حد بهینه برای نخل خرما است. از طرفی، تأثیر گوگرد به عنوان یک ماده ارزان قیمت و فراوان بر افزایش فرم محلول و قابل جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در خاک با انجام تحقیقات بر روی سایر گیاهان به اثبات رسیده است. لذا این تحقیق، با هدف بررسی تأثیر کاربرد گوگرد عنصری همراه با باکتری تیوباسیلوس و کود دامی بر روی عملکرد و کیفیت میوه خرماي رقم برچی و همچنین امکان کاهش مصرف کودهای شیمیایی در نخلستان و تولید محصول سالم خرما اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش تأثیر کاربرد گوگرد عنصری مخلوط با مایه تلقیح تیوباسیلوس به همراه کود دامی بر خصوصیات کمی و کیفی خرما در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۶ تیمار و ۴ تکرار بر روی ۲۴ اصله نخل خرماي بارور رقم برچی به مدت ۲ سال در اهواز با موقعیت جغرافیایی ۳۱°، ۲۰' عرض شمالی و ۴۸°، ۴۰' طول شرقی اجرا گردید. مطابق سیستم جامع رده‌بندی، رده‌بندی خاک منطقه عبارت از: Fine, Carbonatic, Hyperthermic, Typic torrifluent است. تیمارهای آزمایشی عبارت از: T₁ = تیمار شاهد (بدون مصرف کود)، T₂ = مصرف کودهای معدنی برای هر اصله نخل خرما بر اساس آزمون خاک، T₃ = مصرف ۳۰ کیلوگرم کود دامی برای هر اصله نخل خرما بر اساس عرف منطقه، T₄ = تیمار سوم به علاوه گوگرد عنصری مخلوط شده با مایه تلقیح تیوباسیلوس به میزان ۵ درصد وزنی کود دامی مورد استفاده، T₅ = تیمار سوم به علاوه گوگرد عنصری مخلوط شده با مایه تلقیح تیوباسیلوس به میزان ۱۰ درصد وزنی کود دامی مورد استفاده، T₆ = تیمار سوم به علاوه گوگرد عنصری مخلوط شده با مایه تلقیح تیوباسیلوس به میزان ۱۵ درصد وزنی کود دامی مورد استفاده، می‌باشند. در تیمار دوم، قبل از اعمال تیمار کودی از اعماق مختلف ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰، ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متری خاک محل آزمایش، نمونه‌های خاک به صورت نمونه مرکب تهیه و پس از تجزیه آنها، مصرف کودهای معدنی بر اساس آزمون خاک انجام گرفت. عناصر غذایی پر مصرف شامل نیتروژن از منبع کود اوره به میزان ۱۵۰۰ گرم، فسفر از منبع کود سوپرفسفات تریپل به میزان ۱۰۰۰ گرم، پتاسیم از منبع کود سولفات پتاسیم به میزان ۱۸۰۰ گرم

که تیمار گوگرد همراه با باکتری تیوباسیلوس پس از ۱۸ هفته، pH خاک را از ۸/۹ به ۷/۶ کاهش داد. در حالی که مصرف گوگرد به تنهایی، در این مدت زمان، pH را از ۸/۹ به ۷/۹ کاهش داد. مدیش و همکاران^(۱۸) بیان کردند که باکتری‌های تیوباسیلوس به عنوان مهمترین اکسیدکنندگان گوگرد در خاک به شمار می‌روند و تلقیح خاک با این باکتری‌ها باعث افزایش سرعت اکسایش گوگرد می‌گردد. از طرفی در صورتی که جمعیت آنها در خاک کم باشد، به خصوص در خاک‌های آهکی و قلیایی، مصرف آنها همراه با گوگرد، اثرات مفیدی به دنبال خواهد داشت. ملکوتی و ریاضی همدانی^(۱۳) گزارش کردند که مصرف گوگرد نه تنها به عنوان عنصر غذایی مورد نیاز گیاه، بلکه بیشتر به لحاظ اثرات مفید این عنصر در اسیدی کردن موضعی خاک و افزایش قابلیت استفاده عناصر غذایی از جمله فسفر، آهن و روی اهمیت دارد. ملکوتی^(۱۴) اظهار داشت که در خاک‌های آهکی به علت کمبود مواد آلی، فعالیت ریز جانداران مؤثر در اکسایش گوگرد کاهش یافته و زمانی مصرف گوگرد در این نوع خاک‌ها مؤثر است که توام با کودهای آلی و یا همراه تیوباسیلوس مصرف شود. ملکوتی و رضایی^(۱۵) گزارش کردند که اثر کاربرد گوگرد در اصلاح pH خاک های آهکی بسیار مفید بوده و با مصرف سالیانه یک کیلوگرم گوگرد در پای درختان میوه به خصوص مرکبات در چهارم به همراه کود دامی و تأمین رطوبت کافی به مدت پنج سال، pH خاک پای درختان از ۸/۲ به ۷/۸ کاهش داده و در نتیجه باعث افزایش حاصلیت فسفر و عناصر ریزمغذی شده است. مطالعات صلحی و درخشنده^(۲۸) در خصوص بررسی اثرات گوگرد در قابلیت جذب عناصر غذایی کم مصرف به وسیله درختان سیب در منطقه سمیرم اصفهان نشان داد که مصرف گوگرد به میزان ۱۵ درصد کود حیوانی باعث گردید تا آهن، روی، منگنز و مس برگ را به ترتیب ۲۰، ۱۰، ۸۰ و ۸ میلی‌گرم در کیلوگرم نسبت به شاهد (بدون مصرف گوگرد و کود حیوانی) افزایش یابد ولی بر pH خاک به دلیل خاصیت تامپونی این نوع خاک‌ها تأثیر معنی‌داری نداشت. بر اساس نتایج حاصل از تحقیق انجام شده توسط دیالمی و همکاران^(۸) بر روی نهال نخل خرماي رقم برچی در طی فاز رویشی، کاربرد گوگرد به میزان ۴ کیلوگرم (۱۰ درصد کود دامی مصرفی) به همراه مایه تلقیح تیوباسیلوس در زمان کاشت، باعث بهبود وضعیت تغذیه و افزایش رشد رویشی نهال‌ها گردید. نتایج پژوهش انجام شده توسط عواد و همکاران^(۵) بر روی ۴۰ اصله نخل خرماي بارور در ایستگاه تحقیقات الکویتة شهر العین امارات متحده عربی، نشان داد که کاربرد گوگرد همراه با کودهای آلی و شیمیایی باعث افزایش غلظت پتاسیم، گوگرد و روی و کاهش غلظت آهن در برگ خرما گردید. بر اساس نتایج مطالعات محبی^(۲۰) مصرف کود

1- Modaihsh et al.

2- Awad et al.

و صفات کمی شامل وزن، طول، قطر و حجم میوه، وزن هسته، وزن گوشت میوه و نسبت وزن گوشت میوه به هسته تعیین گردید. برای تعیین حجم میوه، ابتدا یک بشر مدرج به میزان مشخصی از آب پر نموده و تعداد ۲۰ عدد میوه به طور کامل "غوطه‌ور در آب به داخل بشر ریخته شد. سپس افزایش حجم بشر را یادداشت نموده و به عنوان حجم این تعداد میوه در نظر گرفته شد و سپس با میانگین گیری، حجم یک عدد میوه تعیین گردید.

صفات کیفی میوه شامل pH، اسیدیته، بریکس، قندهای کل و احیا کننده میوه در آزمایشگاه پژوهشگاه خرما و میوه‌های گرمسیری اندازه‌گیری گردید. میزان درصد قندهای کل و احیا کننده میوه به روش فهلینگ و اسیدیته به روش تیتراسیون مطابق با دستورالعمل آزمایشگاه تعیین گردید (۴). برای تعیین pH میوه از دستگاه pH متر مدل HM-506 و برای تعیین میزان بریکس از دستگاه رفرکتومتری جیبی Atago مدل PAL-3 استفاده شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTATC و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج مربوط به تجزیه آب، خاک و برگ درختان قبل از اجرای آزمایش در جداول ۱ تا ۳ ارائه گردیده است. نتایج تجزیه نمونه آب در جدول ۱ نشان دهنده بالابودن نسبی pH آب آبیاری می‌باشد. همچنین نتایج تجزیه خاک از جدول ۲ نشان می‌دهد که میزان pH، شوری و آهک خاک بالا بوده و از طرفی میزان کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل جذب خاک کمتر از حد بهینه می‌باشد.

برخی خواص شیمیایی کود دامی مورد استفاده در جدول ۴ ارائه شده است.

اثر تیمار بر عملکرد و خصوصیات کمی میوه

نتایج نشان داد که عملکرد نخل خرما در تمامی تیمارهای کودی در مقایسه با تیمار شاهد بالاتر بود.

مصرف گردید. نصف کود اوره در فصل زمستان به روش چالکود به همراه مصرف کودهای ریزمغذی شامل (سولفات آهن، روی و مس هر کدام به میزان ۱۵۰ گرم به ازای هر اصله نخل) بر اساس توصیه عمومی به همراه ۳۰ کیلوگرم کود دامی صورت گرفت و نصف دیگر کود اوره در اردیبهشت ماه مصرف گردید (۹). در روش چالکود، تعداد ۴ چاله به عمق ۶۰ سانتی‌متر در چهار گوشه نخل، در بخش سایه‌انداز درخت احداث گردید و سپس کودهای پر مصرف، ریزمغذی و دامی به داخل این چاله‌ها اضافه کرده و سطح آن با کمی خاک پوشانده و بلافاصله آبیاری گردید. به منظور تهیه مخلوط گوگرد عنصری و مایه تلقیح تیوباسیلوس مطابق دستورالعمل شرکت سازنده این محصول، ۵۰۰ گرم مایه تلقیح با ۲۵ کیلوگرم گوگرد عنصری مخلوط گردید و در فصل زمستان به همراه کود دامی مصرف گردید. اوایل اردیبهشت ماه، نمونه‌های برگ با گرفتن ۲۵-۲۰ برگچه از وسط برگ‌های ردیف دوم نخل از بالا تهیه گردید (۱۵). تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی مورد نظر، مطابق دستورالعمل‌های استاندارد آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های خاک و برگ انجام گردید. واکنش خاک (pH) در گل اشباع با pH متر (۲۶)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع توسط EC متر (۲۹)، کربن آلی به روش اکسایش تر (واکلی)، فسفر قابل قابل جذب به روش اولسن و همکاران (۲۳) و پتاسیم قابل جذب به روش استات آمونیم ۱ مولار با pH=۷ (۱۱) اندازه‌گیری شدند. برای تعیین نیتروژن، فسفر و پتاسیم نمونه‌های برگ، ابتدا نمونه‌های گیاهی را شستشو داده و بلافاصله با هوا خشک گردید. سپس نمونه‌ها را به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد آون خشک نموده و بعد آسیاب شد. در مرحله بعد به روش اکسیداسیون خشک عصاره گیری شدند و فسفر و پتاسیم به ترتیب با استفاده از اسپکتروفتومتر و فلیم‌فتومتر اندازه‌گیری شدند. برای تعیین نیتروژن، ابتدا نمونه‌ها به روش اکسیداسیون تر عصاره‌گیری شد و با دستگاه کج‌لدال اندازه‌گیری گردید (۱۲).

در این پژوهش، عملیات کرده‌افشانی به صورت دستی و آبیاری به روش تشتکی و بر اساس توصیه عمومی منطقه با دور ۷ روز، انجام گرفت. در زمان برداشت محصول، ضمن تعیین عملکرد، تعداد ۱۰۰ عدد میوه به وزن تقریبی یک کیلوگرم نیز تهیه و به آزمایشگاه منتقل

جدول ۱- نتایج تجزیه نمونه آب

Table 1- Result of water analysis

په‌اش	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	کربنات	بی‌کربنات	کلر	سولفات	سدیم	کلسیم	منیزیم	قلیائیت
pH	EC (dS.m ⁻¹)	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na	Ca	Mg	*SAR
(میلی‌اکی‌والان بر لیتر meq.L ⁻¹)									
7.9	1.8	-	3.3	7.6	4	7.5	4.8	2.8	3.8

*SAR= Sodium Absorption Ratio

جدول ۲- نتایج تجزیه خاک محل آزمایش

Table 2- Result of soil analysis in experiment site

عمق (سانتی متر) Depth (cm)	پهش pH	بافت Texture	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) EC (dS.m ⁻¹)	کربنات کلسیم (درصد) CaCO ₃ (%)	کربن آلی (درصد) OC (%)	فسفر قابل جذب P _{avail} (میلی گرم بر کیلوگرم mg.kg ⁻¹)	پتاسیم قابل جذب K _{avail} (میلی گرم بر کیلوگرم mg.kg ⁻¹)
0-30	8.2	رسی سیلتی Silty Clay	4.9	59.7	0.33	7	136.9
30-60	8.1	رسی سیلتی Silty Clay	5.2	59.1	0.32	6	152.5
60-90	8	رسی سیلتی Silty Clay	7.6	59.4	0.27	6	189.3

جدول ۳- نتایج تجزیه برگ نخل خرما، قبل از اجرای پژوهش

Table 3- Result of Date palm leaf analysis before of research

نیتروژن (درصد) Nitrogen (%)	فسفر (درصد) Phosphorus (%)	پتاسیم (درصد) Potassium (%)
1.02	0.05	0.9

جدول ۴- برخی خواص شیمیایی کود دامی مورد استفاده

Table 4- Chemical properties of used manure

پهش pH	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) EC (dS.m ⁻¹)	فسفر (درصد) Phosphorus (%)	پتاسیم (درصد) Potassium (%)	نیتروژن (درصد) Nitrogen (%)
8.1	1.85	0.45	1.6	2.1

که با کودهای معدنی و آلی کوددهی شده بودند در مقایسه با آنهایی که کود آلی به تنهایی دریافت کرده بودند اختلاف معنی داری نشان نداد. مرزوک و کزام^۳ (۱۶) گزارش کردند اختلاف معنی داری بین کاربرد کود آلی به تنهایی و کاربرد کود آلی به صورت ترکیب با کودهای شیمیایی حاوی نیتروژن، فسفر و پتاسیم از نظر اثر بر عملکرد و کیفیت میوه خرماي رقم زاقلول مشاهده نشد.

شاهین و همکاران^۴ (۲۷) گزارش کردند که کوددهی نخل خرما با کودهای حاوی نیتروژن از منبع آلی به تنهایی و یا ترکیب با کودهای معدنی باعث افزایش متوسط عملکرد، وزن تر و وزن گوشت میوه نسبت به شاهد گردیده است. عواد و همکاران (۶) در بررسی اثر کاربرد گوگرد، کودهای معدنی و آلی بر عملکرد و کیفیت میوه نخل خرماي رقم نقال^۵ گزارش کردند که کاربرد تیمارهای کوددهی باعث افزایش عملکرد و کیفیت میوه خرما در مقایسه با شاهد (بدون مصرف کود) گردیده است و همچنین گزارش کردند که بیشترین عملکرد در تیمار کود آلی به دست آمد.

در بین تیمارهای آزمایشی، بیشترین عملکرد (۱۳۱/۱ کیلوگرم به ازای هر نخل) مربوط به تیمار ۲ بود که بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن با تیمار شاهد در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی داری نشان داد. بررسی جدول مربوط به نتایج تجزیه خاک محل اجرای آزمایش (جدول ۲) نشان داد خاک مزبور از لحاظ میزان ماده آلی، فسفر و پتاسیم قابل جذب فقیر بوده و میزان این عناصر به میزان قابل توجهی کمتر از حد بهینه برای نخل خرما بوده است (غلظت بهینه فسفر و پتاسیم برای نخل خرما به ترتیب ۱۵ و ۲۵۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک می باشد و میزان ماده آلی بایستی بیش از یک درصد در خاک باشد (۲۵)). بنابراین افزایش عملکرد در تیمار ۲ می تواند ناشی از تامین مواد غذایی قابل استفاده نخل خرما از منبع کودهای معدنی مصرفی باشد. از طرفی بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن تفاوت معنی داری بین تیمار ۲ و تیمارهای ۴، ۵ و ۶ وجود نداشت. نتایج پژوهش‌های انجام شده در خصوص اثر مواد آلی و گوگرد نیز نشان می‌دهد که مصرف مواد آلی و گوگرد در خاک به افزایش فرم محلول و قابل جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه کمک کرده و افزایش عملکرد در پی خواهد داشت.

باکا و ابوحسن^۱ (۷) در بررسی اثر کودهای آلی و معدنی بر عملکرد نخل خرماي رقم خضری^۲ گزارش نمودند عملکرد نخل‌هایی

3- Mazrouk and Kassam

4- Shahien et al.

5- Neghal

1- Bacha and Abohassan

2- Khudari

جدول ۵- تجزیه واریانس مرکب اثر تیمارهای آزمایشی بر عملکرد و خصوصیات کمی میوه

Table 5- The variance complex analysis of the treatments effect on yield and quantitative characteristics of fruit

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Means of squares							
		عملکرد (کیلوگرم به ازای هر درخت) Yield (kg tree ⁻¹)	وزن میوه (گرم) Fruit weight (g)	طول میوه (سانتی متر) Fruit length (cm)	قطر میوه (سانتی متر) Fruit diameter (cm)	حجم میوه (سانتی متر مکعب) Fruit volume (cm ³)	وزن گوشت میوه (گرم) Fruit pulp weight (g)	وزن هسته میوه (گرم) Stone weight (g)	نسبت گوشت میوه به هسته Ratio of fruit pulp to its stone
سال Year	1	59074	2.741	0.072	0.067	4.38	3.374	0.009	0.299
خطا Error	6	86.645	0.274	0.01	0.003	0.269	0.322	0.007	0.582
تیمار Treatment	5	522.76*	3.134*	0.072*	0.016*	3.38*	3.434*	0.004 ^{ns}	0.736 ^{ns}
تیمار×سال Treatment×Year	5	17.09	0.552	0.023	0.008	0.78	0.469	0.001	0.22
خطا Error	30	140.95	0.733	0.014	0.002	0.411	0.583	0.004	6.28
کل Total	47	–	–	–	–	–	–	–	–
ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)	–	9.77	7.85	3.58	1.86	6.04	7.82	6.6	7.63

ns – معنی دار نیست، * – معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد

^{ns} not significant, * Significant at the 0.05 probability level

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر تیمارهای آزمایشی بر عملکرد و خصوصیات کمی میوه

Table 6- Comparison mean of the treatments effect on yield and quantitative characteristics of fruit

تیمارهای آزمایشی Experimental treatments	عملکرد (کیلوگرم به ازای هر درخت) Yield (kg tree ⁻¹)	وزن میوه (گرم) Fruit weight (g)	طول میوه (سانتی متر) Fruit length (cm)	قطر میوه (سانتی متر) Fruit diameter (cm)	حجم میوه (سانتی متر مکعب) Fruit volume (cm ³)	وزن گوشت میوه (گرم) Fruit pulp weight (g)	وزن هسته میوه (گرم) Stone weight (g)	نسبت گوشت میوه به هسته Ratio of fruit pulp to its stone
T ₁	110.5b	10b	2.9b	2.3b	9.6b	8.8c	0.91a	10a
T ₂	131.1a	11.6a	3.8a	2.6a	11.2a	10.3ab	0.97a	10.4a
T ₃	113.5b	10.3ab	3b	2.5ab	10b	9.3bc	0.92a	10.3a
T ₄	123.6ab	10.8ab	3.3ab	2.5ab	10.8ab	9.6abc	0.97a	10.2a
T ₅	121.1ab	10.9ab	3.3ab	2.5ab	10.5ab	9.9abc	0.94a	10.7a
T ₆	125.3ab	11.3a	4.4a	2.6ab	11.4a	10.5a	0.92a	10.7a

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

Means followed by the same letter in each column are not significantly different (P<0.05).

تیمارهای ۳، ۴ و ۵ در یک گروه آماری قرار گرفتند و اختلاف آنها با تیمار شاهد معنی‌دار گردید. تیمار ۶ با بیشترین وزن گوشت میوه (۱۰/۵ گرم) با تیمارهای ۲، ۳، ۴ و ۵ در یک گروه آماری قرار گرفت و اختلاف آنها با تیمار شاهد معنی‌دار گردید (جدول ۶). نتایج این تحقیق در برخی موارد با نتایج به‌دست آمده توسط سایر محققین بر روی نخل خرما هم‌خوانی دارد. دیالمی و گرشاسبی (۹) گزارش کردند مصرف کودهای معدنی حاوی عناصر غذایی پرمصرف همراه با کود

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر تیمارهای آزمایشی بر خصوصیات کمی میوه شامل وزن تر، طول، قطر، حجم و وزن گوشت میوه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای آزمایشی نیز نشان داد تیمار ۶ با بیشترین وزن تر میوه (۱۱/۶ گرم) با تیمارهای ۲، ۳، ۴ و ۵ در یک گروه آماری قرار گرفت و اختلاف آنها با تیمار شاهد معنی‌دار گردید. همچنین تیمارهای ۲ و ۶ با بیشترین طول، قطر و حجم میوه با

و افزایش رشد رویشی نهال‌های نخل خرما گردید. عواد و همکاران (۵) گزارش نمودند که کاربرد گوگرد در خاک در زمان کاشت نهال، از طریق بهبود وضعیت تغذیه گیاه، باعث افزایش سیستم دفاعی نهال کشت بافتی نخل خرماي رقم خلاص^۵ در برابر شرایط استرس محیطی در مراحل اولیه رشد و افزایش رشد رویشی گردید.

نتیجه‌گیری

از نظر آماری، تیمارهای گوگرد تأثیر معنی‌داری بر غلظت فسفر برگ در سطح احتمال ۱ درصد و بر میزان عملکرد، طول، قطر، حجم و وزن گوشت میوه و غلظت نیتروژن برگ در سطح احتمال ۵ درصد داشت اما فاقد تأثیر معنی‌دار بر غلظت پتاسیم برگ، وزن هسته، نسبت گوشت میوه به هسته، pH، اسیدیته، بریکس، قندهای کل و احیاکننده میوه بوده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، کاربرد تیمارهای کودی باعث افزایش عملکرد و خصوصیات کمی میوه خرما در مقایسه با شاهد (بدون مصرف کود) گردید. همچنین نتایج نشان داد که کاربرد کودهای معدنی نسبت به سایر تیمارها بیشترین تأثیر بر عملکرد و خصوصیات کمی میوه داشت و مصرف گوگرد عنصری تلقیح شده با باکتری تیوباسیلوس و کود دامی از نظر تأثیر بر عملکرد و خصوصیات کمی میوه در مرتبه دوم قرار گرفت. اما با توجه به تأثیر مثبت تیمارهای حاوی گوگرد بر روی این صفات و با در نظر گرفتن مزایای تولید محصول سالم و با هدف کاهش خطرات زیست محیطی از طریق مصرف کمتر کودهای شیمیایی، مصرف مخلوط گوگرد پودری و مایه تلقیح تیوباسیلوس در نخلستان‌ها مفید بوده و می‌تواند ضمن افزایش عملکرد نخل خرما در کاهش مصرف کودهای شیمیایی مؤثر باشد. از طرفی نتایج نشان داد که مصرف مخلوط گوگرد عنصری و مایه تلقیح تیوباسیلوس به همراه کود دامی نسبت به مصرف کود دامی به تنهایی باعث افزایش عملکرد و خصوصیات کمی میوه گردید. گرچه از نظر آماری این اختلاف معنی‌دار نبود و علت آن ممکن است به دلیل عدم اکسیداسیون کامل گوگرد در خاک و یا خنثی شدن اسید سولفوریک تولید شده در اثر اکسیداسیون گوگرد به وسیله کربنات کلسیم موجود در خاک باشد ولی با توجه به اثرات مثبت گوگرد بر کاهش واکنش خاک‌های آهکی، افزایش حلالیت عناصر غذایی کم مصرف و پرمصرف و در نتیجه بهبود وضعیت تغذیه گیاه، مصرف آن در نخلستان توصیه می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش سطوح گوگرد در تیمارهای ۵ و ۶ نسبت به تیمار ۴ تأثیر کمی بر عملکرد و خصوصیات کمی میوه دارد. بر اساس نتایج این تحقیق، به منظور افزایش عملکرد و بهبود خصوصیات کمی میوه خرما، کاهش مصرف کودهای شیمیایی در نخلستان و امکان تولید محصول سالم خرما،

دامی مورد نیاز نخل خرما به روش چالکود بر برخی خصوصیات کمی و کیفی در درختان مورد مطالعه تأثیر معنی‌داری دارد.

عثمان^۱ (۲۴) در بررسی پاسخ نخل خرماي کشت بافتی رقم ساکوتی^۲ به منابع مختلف کودهای آلی و معدنی گزارش نمود، کوددهی نخل خرما باعث بهبود خصوصیات کمی و کیفی نخل خرما گردیده است. نتایج تجزیه واریانس صفات کمی میوه نشان داد که تیمارهای آزمایشی بر وزن هسته و نسبت گوشت میوه به هسته تأثیر معنی‌دار نداشتند (جدول ۵). مقایسه میانگین‌های این صفات با آزمون چند دامنه‌ای دانکن نیز نشان داد که میانگین صفات ذکر شده در تمامی تیمارها در یک گروه آماری قرار دارند (جدول ۶).

اثر تیمار بر خصوصیات کیفی میوه

نتایج تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که کاربرد تیمارهای کودی باعث بهبود تدریجی خصوصیات کیفی میوه شامل pH، اسیدیته، بریکس، قندهای کل و احیاکننده میوه نسبت به تیمار شاهد شده است. هرچند از نظر آماری، بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۷).

اثر تیمار بر میزان عناصر غذایی برگ

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، تیمارهای مختلف کودی، اثر معنی‌داری بر غلظت نیتروژن و فسفر برگ به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد دارند (جدول ۸). از نظر مقایسه میانگین‌های این تیمارهای آزمایشی، تیمار ۲ با بیشترین میزان نیتروژن برگ و تیمارهای ۲ و ۶ با بیشترین میزان فسفر برگ در یک گروه آماری و سایر تیمارها در گروه آماری دیگر قرار گرفتند (جدول ۹). همچنین از نظر آماری اعمال تیمارهای کودی بر میزان پتاسیم برگ، اثر معنی‌داری نداشت (جدول ۸). نتایج مشابه‌ای نیز در برخی موارد توسط سایر محققین گزارش شده است. از جمله، مصطفی و عبدالقادر^۳ (۲۱) در بررسی اثر مقادیر مختلف گوگرد بر روی عملکرد و کیفیت میوه موز رقم گرنه گزارش کردند که کاربرد گوگرد با کاهش pH خاک باعث افزایش میزان نیتروژن، پتاسیم و گوگرد برگ در مقایسه با شاهد گردید. همچنین کاربرد گوگرد افزایش عملکرد و بهبود کیفیت میوه را به دنبال داشت. ابورادی و همکاران^۴ (۱) گزارش کردند مصرف گوگرد به همراه کودهای دامی در زمان کاشت نهال نخل خرما، به میزان ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، باعث افزایش حلالیت عناصر غذایی از قبیل فسفر، آهن، منگنز و روی در خاک و جذب مناسب آنها گردید و این شرایط باعث بهبود وضعیت تغذیه گیاه

1- Osman

2- Sakoty

3- Mostafa and Abdelkader

4- Aborady et al.

5- Khalas

مصرف ۱۵۰۰ گرم گوگرد پودری مخلوط شده با مایه تلقیح تیوباسیلوس به همراه ۳۰ کیلوگرم کود دامی به ازای هر اصله نخل، به عنوان بهترین تیمار معرفی و کاربرد آن در نخلستان توصیه می گردد.

جدول ۷- تجزیه واریانس مرکب اثر تیمارهای آزمایشی خصوصیات کیفی میوه

Table 7- The variance complex analysis of the treatments effect on qualitative characteristics of fruit

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Means of squares				
		پهانی pH	اسیدیته (درصد) Acidity (%)	بریکس (درصد) Brix (%)	قندهای احیاکننده (درصد) Reducing sugar (%)	قند کل (درصد) Total sugar (%)
سال Year	1	0.763	0.065	637.292	256.826	203.446
خطا Error	6	0.241	0.005	6.91	65.591	4.947
تیمار Treatment	5	0.021 ^{ns}	0.009 ^{ns}	7.148 ^{ns}	77.448 ^{ns}	29.689 ^{ns}
تیمار×سال Treatment×Year	5	0.072	0.011	18.904	83.439	13.517
خطا Error	30	0.043	0.009	16.821	84.12	11.9
کل Total	47	-	-	-	-	-
ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)	-	7.8	6.8	12.5	4.5	4.2

ns - معنی دار نیست. ns not significant

جدول ۸- تجزیه واریانس مرکب اثر تیمارهای آزمایشی بر میزان عناصر غذایی برگ

Table 8- The variance complex analysis of the treatments effect on leaf nutrient elements content

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Means of squares		
		نیتروژن (درصد) Nitrogen (%)	فسفر (درصد) Phosphorus (%)	پتاسیم (درصد) Potassium (%)
سال Year	1	0.013	0.0001	0.016
خطا Error	6	0.005	0.0001	0.005
تیمار Treatment	5	0.019*	0.001**	0.012 ^{ns}
تیمار×سال Treatment×Year	5	0.002	0.0001	0.005
خطا Error	30	0.005	0.0001	0.006
کل Total	47	-	-	-
ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)	-	6.99	8.94	7.88

ns - معنی دار نیست، * - معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد و ** - معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد

ns not significant, * Significant at the 0.05 probability level and ** Significant at the 0.01 probability level

جدول ۹- مقایسه میانگین اثر تیمارهای آزمایشی بر میزان عناصر غذایی برگ

Table 9- Comparison mean of the treatments effect on leaf nutrient elements content

تیمارهای آزمایشی	نیتروژن (درصد)	فسفر (درصد)	پتاسیم (درصد)
Experimental treatments	Nitrogen (%)	Phosphorus (%)	Potassium (%)
T ₁	0.99c	0.04d	0.9a
T ₂	1.14a	0.07a	1a
T ₃	1bc	0.05c	0.93a
T ₄	1.06ab	0.067b	0.95a
T ₅	1.08ab	0.067b	0.93a
T ₆	1.06ab	0.07a	0.98a

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

Means followed by the same letter in each column are not significantly different ($P < 0.05$).

منابع

- 1- Abo-Rady M. D. K., Duheash O., Khalil M., and Turjoman A. M. 1988. Effect of elemental sulphuron some properties of calcareous soils and growth of date palm seedlings. *Arid Land Research and Managemen*, 2(2): 121-130.
- 2- Abdou A.S., Al Darwish F.H., Saleh M. E., El-Tarabily K., ASofian-Azirun M., and Rahman M. M. 2011. Effects of elemental sulfur, phosphorus, micronutrients and *Paracoccus versutus* on nutrient availability of calcareous soils. *Australian Journal of Crop Science*, 5(5): 556-561.
- 3- Amarnamneh. 2015. The Office of statistics and information technology, Ministry of Agriculture- Jihad. (In Persian)
- 4- A.O.A.C. 1990. Official methods of analysis. (Ed. K. Herlich). 15th ed. Association of Official Analytical Chemists, Incorporated. Virginia.
- 5- Awad M.A., Soaud A.A., Badawi M.A., and Eshkandi O.H. 2003. Effect of elemental sulfur, chemical and organic fertilizers on nutrient uptake, yield and fruit quality of Date Palm trees (*Phoenix dactylifera* L.) cv. 'Neghal'. The 7th Annual U.A.E. University Research Conference, p. 34-39.
- 6- Awad M.A., Soaud A.A., and El-Konaissi S.M. 2006. Effect of exogenous application of anti-stress substances and elemental sulphur on growth and stress tolerance of tissue culture derived plantlets of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cv. 'Khalas' during acclimatization. *Journal of Applied Horticulture*, 8(2): 129-134.
- 7- Bacha M.A., and Abo Hassan A.A. 1983. Effect of soil fertilization on yield, fruit quality and mineral content of khudari date palm variety. In *Proceedings of 1st Symposium on the Date Palm in Saudi Arabia*, Al-Hassa, Saudi Arabia, p. 174-179.
- 8- Dialami H., Tourahe A., and Mohebbe A.H. 2007. The effect of elemental sulfur application on nutrient elements contents of Date palm leaf. Final report of research design. Agricultural Research, Education and Extension organization (AREO). Iran. 25 p. (In Persian)
- 9- Dialami H., and Garshasbi M.R. 2008. Study on the effect of different amounts application of NPK on quantitative and qualitative characteristics of Date palm cv. Sayer in Khuzestan Province. Final report of research design. Agricultural Research, Education and Extension organization (AREO). Iran. 26 p. (In Persian)
- 10- Khafaji M.S., Al- Bassiouny S., and Abdelhadi Y. 1986. Use of sulphur for increasing the availability of some nutrients in soils under Date Palm cultivation in Al- Hassa Oasis. *Proceedings of the Second Symposium on the Date Palm in Saudi Arabia*. March 3-6.
- 11- Knudsen D., Peterson, G.A., and Pratt P.F. 1982. Lithium, sodium, and potassium. p. 225-246. In: Page A. L. Miller R.H., and Keeney D. R. (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy. Soil Science Society of American. Madison, WI, USA.
- 12- Lester J.N., and Birkett J.W. 1999. *Microbiology and chemistry for environmental scientific and engineers*, 2nd ed. London and New York, 386 p.
- 13- Malekote M.J., and Reyaze hamedani A.H. 1991. *Soil Fertility and Fertilizers* (translated). Tehran University. Iran. 808 p. (In Persian)
- 14- Malekote M.J. 1996. Abstracts of yield report in pilot farms and gardens of country. Soil and Water Research Institute (SWRI). Iran. 100 p. (In Persian)
- 15- Malekote M.J., and Rezaei H. 2001. The role of sulfur, calcium and magnesium in yield increasing and quality improvement of the agricultural products. Agricultural Research, Education and Extension organization (AREO). Iran. 182 p. (In Persian)
- 16- Marzouk H.A., and Kassem H.A. 2011. Improving fruit quality, nutritional value and yield of Zaghloul dates by the application of organic and/or mineral fertilizers. *Scientia Horticulturae*, 127: 249-254.
- 17- Marschner H. 2011. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd Edition. Academic Press, London. 672 p.

- 18-Modaihsh S., Almustafa W.A., and Metwally A.E. 1989. Effect of elemental sulfur on chemical changes and nutrient availability in calcareous soils. *Plant and Soil*, 116: 95-110.
- 19-Mohebbe A. H. 2003. Determination of Date palm leaf number in order to sampling and Measurement of nutrient elements. Final report of research design. Agricultural Research, Education and Extension organization (AREO). Iran. 34 p. (In Persian)
- 20-Mohebbe A.H. 2014. The effect of organic sulfur on the yield and fruit quality of Date palm cv Sayer. Final report of research design. Agricultural Research, Education and Extension organization (AREO). Iran. 19 p. (In Persian)
- 21-Mostafa E.A.M., and Abd El-Kader A.A. 2006. Sulfur fertilization effects on growth, yield and fruit quality of Grand Nain Banana cultivar. *Journal of Applied Sciences Research*, 2(8): 470-476.
- 22-Narula N., Mishra M.M., and Vyas S.R. 1972. The effect of Thiobacillus inoculation on alkali soils. *Indian Journal of Agricultural Chemistry*, 7(1): 85-87.
- 23-Olson S.R., and Sommers L. E. 1990. Phosphorous. In: page, A.L. *Method of soil analysis. Part 2. 2nd Agron Monoger.* ASA, Madison, WI. P. 403-431.
- 24-Osman S.M. 2009. Response of Sakkoty Date Palm cultivar propagated by tissue culture- derived to different source of fertilization. *World Journal of Agricultural Sciences*, 5(5): 631-638.
- 25-Panahi Kordlaghary M. 2002. Date palm. Jihad Daneshgahi of Isfahan University. 106 p. (In Persian)
- 26-Peech M. 1965. Hydrogen ion activity. In: Black, C.A. (ed.), *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties.* American Society of Agronomy. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. p. 914-926.
- 27-Shahein A.H., Attalla A.M., Kassem H.A., and Aly Hoda S.H. 2003. Effect of applying different organic and inorganic nitrogen sources to Zaghloul and Samany Date Palm cultivars on: II. Yield, fruit quality and fruit content of some pollutants. *Proceedings of the international conference on date palm in Saudi Arabia*. 185 p.
- 28-Solhe M., and Drakhshandeh A. 1999. The effect of sulfur on availability of micronutrient elements on Apple trees in Isfahan. *Abstracts of 6th Iranian Soil Sciences Congress.* Mashhad Ferdowsi University. (In Persian)
- 29-Roades J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks D.L. (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 3, chemical methods.* Soil Science Society of America Journal. Madison, WI. p. 417-437.
- 30-Wakley A., and Black I.A. 1934. An examination of degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of chromic acid method in soil analysis.1. *Experimental. Soil Science*, 79: 459-465.

Effect of Sulfur and Manure on Yield and Quality of Date Fruit c.v Barhee

H. Dialami^{1*}- M. R. Garshasbi²

Received: 22-05-2018

Accepted: 26-08-2018

Introduction: Date palm is considered as one of the important fruit trees in Iran. According to agriculture statistic book of Iran (2015-2016), mature date plantation area and production of Iran are 230000 hectares and more than 1000000 tons, respectively. This crop usually is planted in south of Iran where the soils are calcareous with high pH. The high soil pH causes reduction of nutrient elements absorption and yield. Thus, finding a solution for this problem is necessary. The investigations indicate that application of elemental sulfur along with Thiobacillus inoculant in soil reduces local pH in rhizosphere area due to sulfur oxidation. The reduced pH of calcareous soil can increase the availability of other essential nutrients resulting in an increase in the nutrient uptake by plants. In addition, uncontrolled use of chemical fertilizers destroys soil structure and decreases organic matter resulting in a more dense soil. This research was conducted to assess the effects of sulfur along with manure on yield improvement and fruit quality as well as the consumption amount of chemical fertilizers.

Materials and Methods: In order to evaluate the effect of elemental sulfur along with Thiobacilli bacteria and manure on quantitative and qualitative characteristics of date fruit, an experiment was carried out in randomized completed block design (RCBD) with six treatments and four replications on 24 fruitful, 25 years old date palm (cv. Barhee), in Ahwaz (Khuzestan Province). The treatments were: T1= Control (without any fertilizer), T2= (application of chemical fertilizer based on soil test for each date palm), T3= (application of 30 kg manure based on general recommendation for each date palm), T4= T3 + (application of elemental sulfur mixed with Thiobacillus inoculant) as 5% of manure, T5= T3 + (application of elemental sulfur mixed with Thiobacillus inoculant) as 10% of manure and T6= T3 (application of elemental sulfur mixed with Thiobacillus inoculant) as 15% of manure. Before the treatments application, soil and water were sampled and analyzed. In second treatment, macronutrient chemical fertilizers were also applied. Source of nitrogen, phosphorus and potassium were urea, triple super phosphate and potassium sulfate, respectively. The nitrogen fertilizer was split and applied in February and May (the next year). Furthermore, all phosphorus and potassium fertilizers were used in February. These treatments were carried out along with manure (30 kg) and chemical micronutrient fertilizers applied based on general recommendation (i.e. 150 g of zinc sulfate, iron sulfate, copper sulfate and manganese sulfate). In third treatment, manure (30 kg) was applied based on general recommendation for each date palm. In T4, T5 and T6 treatments, 500g of Thiobacillus inoculant was mixed with 25 kg of elemental sulfur and then consumed based on 5, 10 and 15% of manure, respectively. All treatments were undertaken during winter by local placement method (Chalkood). Agro-technical practices such as pollination, thinning and irrigation were done according to local practice. Each year, in May, 20-25 leaflets from middle of leaf in second row were picked up, and their mineral nutrients were analyzed. At harvesting time, yield, average of weight, length, diameter and volume of fresh fruit, weight of stone and weight ratio of fruit pulp to its stone, pH, acidity, brix, total and reducing sugars in fruits were determined. The obtained data were analyzed with MSTATC statistical program and mean comparison was conducted using the Duncan's Multiple range test.

Results and Discussion: The results showed that using sulfur along with Thiobacillus bacteria and manure had significant effect on leaf phosphorus concentration at the 1% level and on yield and some quantitative characteristics such as weight, length, diameter, volume and pulp weight of fruit fresh and concentration of nitrogen at the 5% level. Sulfur application did not, however, significantly affect the leaf potassium concentration, stone weight, weight ratio of fruit pulp to its stone, pH, acidity, brix, reducing sugar and total sugar of fruit. As a result, application of 1500 g elemental sulfur (mixed with Thiobacillus inoculant) along with 30 kg manure for each date palm is recommended to improve yield and fruit quality and to reduce chemical fertilizer application.

Keywords: Date palm, Elemental sulfur, Manure, Thiobacillus

1 and 2- Assistant Professor and Research Instructor, Date Palm and Tropical Fruits Research Center, Horticultural Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Ahwaz, Iran

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



ارزیابی شبیه‌سازی دما و بارش مدل‌های اقلیمی CMIP5 در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم (مطالعه موردی: مناطق عمده تولید گندم در ایران)

مجتبی شکوهی^۱ - سید حسین ثنائی نژاد^{۲*} - محمد بنایان اول^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۸

چکیده

ارائه راهکارهای مناسب سازگاری و کاهش اثرات تغییر اقلیم در هر منطقه ملزم به پیش‌بینی‌های صحیح تغییرات اقلیمی در آن منطقه است. که خود این پیش‌بینی‌ها به شدت متکی به خروجی مدل‌های GCM است. اما وجود تعداد زیادی از این مدل‌ها و خروجی‌های متفاوت آنها در هر منطقه، باعث سردرگمی محققان در انتخاب آنها می‌شود. در این راستا عملکرد ۲۱ مدل به‌روز GCM از CMIP5 بر اساس نمره مهارت ارزیابی شد و در ادامه پیش‌نگری از تغییرات دما و بارش طی سال‌های ۲۰۴۵-۲۰۶۵ و ۲۰۸۰-۲۱۰۰ تحت سناریوهای انتشار جدید RCP2.6 و RCP8.5 ارائه شد. از روش نگاشت هم‌فاصله‌ی تابع توزیع تجمعی، برای تصحیح خطای شبیه‌سازی مدل‌ها استفاده شد. ارزیابی منطقه‌ای شبیه‌سازی دما و بارش مدل‌های اقلیمی CMIP5 نشان داد، شبیه‌سازی‌ها با خطا همراه است و می‌بایستی قبل از استفاده تصحیح شوند. اگرچه تصحیح خطای سبب کاهش خطای غیرسیستماتیک شد اما خطای سیستماتیک در شبیه‌سازی مدل‌ها همچنان قابل توجه است. به دو طریق می‌توان نتایج شبیه‌سازی مدل‌ها را بهبود بخشید، اولاً، لحاظ کردن تمام گروه‌های یک مدل در تحلیل‌ها و دوماً یافتن ترکیبی بهینه از مدل‌ها متناسب با منطقه. از این‌رو ترکیبی بهینه از مدل‌ها متناسب با منطقه انتخاب شد (مدل‌های انتخابی). بالاترین متوسط مقدار نمره مهارت برای شبیه‌سازی متوسط سالانه بارش و دما به ترتیب ۰/۴ و ۰/۳۸. مربوط به مدل‌های انتخابی، در بین ایستگاه‌ها بود. عدم قطعیت در پیش‌نگری‌های تغییرات دما و بارش در قرن حاضر، تحت تأثیر انتخاب سناریوی انتشار، دوره زمانی و مدل‌ها است.

واژه‌های کلیدی: تصحیح خطا، خطای سیستماتیک، سناریوی انتشار RCP، نمره مهارت

مقدمه

مدل‌های گردش عمومی GCM^۴ است. همکنون در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم در ابتدا نیاز به، بکارگیری یک یا چند مدل GCM، و سپس ریزمقیاس نمایی (یا تصحیح خطا) نتایج به منطقه مورد نظر است (۱۵). اما سؤالی که در این‌گونه مطالعات مطرح می‌شود این است که، با وجود تعدد زیاد مدل‌های GCM و همچنین عدم قطعیت در خروجی آنها و نتایج متفاوت آنها برای هر منطقه، در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم، این مدل‌ها چگونه باید انتخاب شود (۵). یک روش رایج در این‌گونه مطالعات در نظر گرفتن متوسط داده‌های تمام مدل‌های GCM است (۱۸). اما رویکردی دیگر که به طور فزاینده‌ای در حال مقبول شدن می‌باشد، تعریف معیارهای برای مهارت مدل بوده، و سپس تعیین کیفیت مدل‌ها بر اساس توانایی آنها در شبیه‌سازی معیارهای مورد نظر در منطقه است (۴ و ۱۵). از این رویکرد در این مطالعه استفاده شد و با تعریف معیارهای، عملکرد مدل‌های GCM بررسی شد. در راستای پیش‌بینی‌های اقلیمی پروژه هم سنج

تغییرات اقلیم، یکی از مسائلی است که امروزه توجه بسیاری از دانشمندان و دولت‌ها را به خود جلب نموده است. تغییرات اقلیمی در حال حاضر اکوسیستم‌های جهانی، تنوع زیستی، و اقتصاد اجتماعی را تحت تأثیر قرار داده است (۱۰). بنابراین برای سیاست‌گذاران و دانشمندان، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در هر منطقه و در پی آن ارائه راهکارهای مناسب سازگاری و کاهش اثرات تغییر اقلیم به عنوان یک موضوع مهم دارای اهمیت ویژه‌ای است (۸). برای نیل به این هدف نیاز به پیش‌بینی‌های صحیح تغییرات اقلیمی در هر منطقه است تا با آگاهی مناسبی مبادرت به توسعه استراتژی‌های مناسب و مؤثر در هر منطقه گردد (۲۲). اما پیش‌بینی‌های صحیح تغییرات اقلیمی متکی به

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(Email: sanaei@um.ac.ir)

*- نویسنده مسئول

DOI: 10.22067/jsw.v32i5.69064

4- General circulation model

مدل جفت شده (CMIP^۱) طی ۲۰ سال گذشته در بیش از ۷۰ درصد مطالعات پیش‌بینی‌های اقلیمی سهیم بوده و کارایی خوبی نشان داده است (۷ و ۱۶). بنابراین انتظار می‌رود مجموعه مدل‌های به روز و جدید این پروژه یعنی CMIP5 (۲۱) که در گزارش پنجم ارزیابی (AR5) هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC^۲) نیز مورد استفاده قرار گرفته، مبنای بسیاری از مطالعات ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم قرار بگیرد. به طور کلی مدل‌های CMIP5 در مقایسه با CMIP های قبلی دارای تفکیک‌پذیری افقی بالاتر بوده و همچنین در برگرداندن رفتار بسیار جامع‌تری نسبت به فرایندهای فیزیکی مثل، بازخوردهای پوشش گیاهی، ذرات معلق در هوا و نوع پوشش زمین است (۳). علاوه بر این مجموعه مدل‌های CMIP5 جهت پیش‌نگری‌های اقلیمی از مجموعه جدیدی از سناریوهای انتشار به نام مسیرهای نماینگر غلظت RCP^۳ بهره می‌برند (۱۳). بر خلاف سناریوهای انتشار SRES در سناریوهای جدید RCP مسیر تابش واداشتی بر مبنای روایتی از پیش تعریف شده نمی‌باشد و RCP ها قادر هستند ترکیب‌های مختلفی از وضعیت‌های اقتصادی، فن‌آوری جمعیت شناختی و توسعه سیاسی را نشان دهند (۱۳). از این‌رو انتظار می‌رود خطاهای مدل‌های CMIP5 نسبت به مدل‌های پیشین کاهش یابد و همچنین شبیه‌سازی‌های واقع بینانه‌تری از آینده ارائه دهد (۲۱). آقاخانی افشار و همکاران (۱) جهت بررسی تغییرات فصلی بارش و درجه حرارت حوضه آبخیز کشف رود در دوره‌های آتی عملکرد چهارده مدل از مدل‌های CMIP5 (از ۹ مؤسسه تحقیقاتی تدوین کننده مدل‌ها) را بررسی کردند. رنگزن و همکاران (۱۷) سه مدل از مدل‌های CMIP5 جهت شبیه‌سازی بارش در سراسر استان خوزستان بررسی نمودند. متأسفانه در برخی مطالعات بررسی اثرات تغییر اقلیم در کشور هیچ اشاره‌ای به معیار انتخاب مدل یا مدل‌های GCM در هر منطقه نشده است و مدل‌ها به صورت توصیه‌ای انتخاب شده است یا اینکه تعداد مدل‌ها در ارزیابی آنها اندک بوده است. در این مطالعه عملکرد ۲۱ مدل از مدل‌های CMIP5 از ۱۸ مؤسسه تحقیقاتی تدوین کننده مدل، بر اساس نمره مهارت (SS^۴) بررسی شد.

یکی از مهمترین حوزه‌های بررسی اثرات تغییر اقلیم در هر منطقه، ارزیابی اثرات آن در بخش کشاورزی و تولید محصولات است. یکی از راهبردی‌ترین محصولات که بر امنیت غذایی تأثیرگذار است گندم می‌باشد. از آنجا که کشت گندم بیشتر تحت تأثیر متغیرهای اقلیمی بارش و دما است انتظار می‌رود این نوع کشت بیشتر تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار گیرد. پیش‌بینی‌های پیشین انجام شده در

مناطق مختلف ایران حاکی از افزایش دمای هوا و کاهش بارش طی قرن آتی در اکثر مناطق ایران است (۹). بنابراین انتظار می‌رود تغییر اقلیم در کشور بر تولید گندم و در پی آن بر امنیت غذایی تأثیرگذار باشد. طبق آخرین آمار وزارت جهاد کشاورزی (۲) مناطق عمده تولید گندم دیم در ایران استان‌های کردستان، کرمانشاه، گلستان، زنجان، همدان و اردبیل می‌باشد. برای بررسی اثرات تغییر اقلیم، مثل ارزیابی تغییرات خصوصیات بارش (شدت، فراوانی، توزیع و مدت)، بارش مؤثر، نیاز آبی محصول، نیاز حرارتی و رخدادهای نامطلوب طی دوره رشد گندم در این مناطق نیاز به پیش‌بینی‌های مناسب منطقه‌ای تغییر اقلیم است. تاکنون پیش‌بینی‌های منطقه‌ای تغییر اقلیم با استفاده از مجموعه مدل‌های به روز CMIP5 تحت سناریوهای جدید انتشار RCP در این مناطق صورت پذیرفته است. بنابراین به نظر می‌رسد مطالعات تغییر اقلیم تحت مدل‌های به روز CMIP5 ضروری باشد، تا درک واقع‌بینانه‌تری از اثرات تغییر اقلیم در این مناطق داشته باشیم. با شناخت توانایی شبیه‌سازی اقلیمی مدل‌های متفاوت، می‌توان نگرش دقیق‌تری به اثرات تغییرات منطقه‌ای اقلیم در این مناطق داشته باشیم. نتایج این مطالعه می‌تواند در مطالعات محققان در حوزه‌های گوناگون بررسی اثرات تغییر اقلیم استفاده شده و به سیاست‌گذاران جهت اتخاذ برنامه‌های مناسب جهت کاهش اثرات و سازگاری با تغییر اقلیم کمک کند. از این‌رو هدف این مطالعه ارزیابی توانایی مجموعه مدل‌های CMIP5 در شبیه‌سازی دما و بارش (به عنوان دو متغیر اقلیمی تأثیرگذار در کشت گندم دیم و منابع آبی و اکوسیستم‌های طبیعی) در مناطق عمده تولید گندم دیم در ایران است.

مواد و روش‌ها

تمرکز این مطالعه، بر روی استان‌های عمده تولید گندم دیم در ایران است که طبق آخرین آمار و اطلاعات وزارت جهاد کشاورزی بیش از ۶۰ درصد تولید گندم دیم متعلق به این مناطق است (شکل ۱). داده‌های متوسط دما و بارش ماهانه برای ایستگاه‌های سینوپتیک (شکل ۱) از سازمان هواشناسی کشور فراهم گردید. شبیه‌سازی ۲۱ مدل گردش عمومی جو (GCM) از مدل‌های اقلیمی CMIP5، برای مقادیر ماهانه، بارش، دمای حداکثر و حداقل هوا از وب سایت مرکز توزیع داده (DDC^۵) هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC^۶) فراهم گردید (جدول ۱). متوسط دمای حداکثر و حداقل ماهانه به عنوان متوسط دمای ماهانه لحاظ شد. جزئیات شیوه طراحی و اجرای مدل های CMIP5 توسط تیلور و همکاران (۲۱) تشریح شده است. شایان

5- Data distribution centre (DDC) http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_monthly/AR5/Reference-Archive.html

6- Intergovernmental panel on climate change (IPCC)

1- Coupled model intercomparison project

2 Intergovernmental panel on climate change (IPCC)

3 Representative concentration pathway

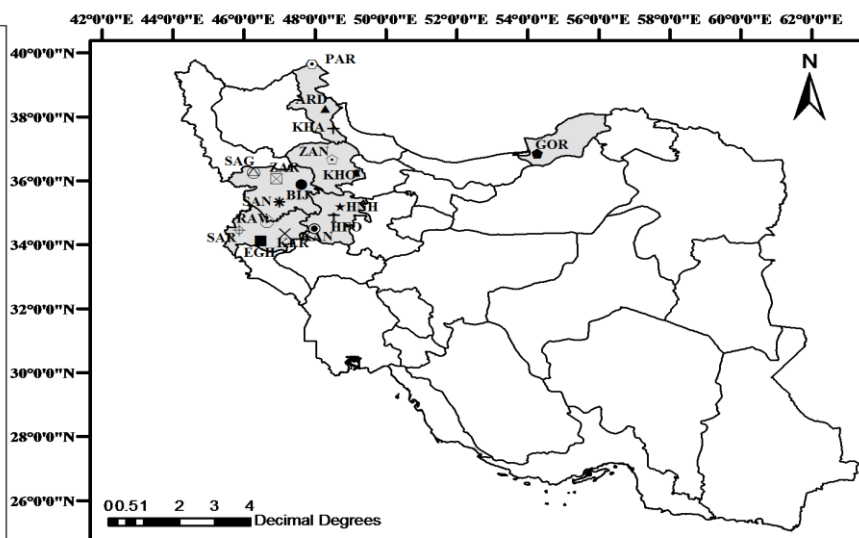
4 Skill score

شده است. لذا دوره آماری ۱۹۷۵-۲۰۰۵ به عنوان دوره تاریخی (دوره پایه) به منظور مقایسه مشاهدات ایستگاه‌های سینوپتیک با شبیه‌سازی‌های مدل‌های CMIP5 لحاظ شد.

ذکر است که داده‌های اقلیمی در اجرای مدل‌های CMIP5 تا پایان سال ۲۰۰۵ میلادی به عنوان دوره تاریخی و از اول ژانویه ۲۰۰۶ تا ۳۱ دسامبر ۲۱۰۰ میلادی برای سناریوهای انتشار آینده در نظر گرفته

Stations

- ▲ ARDEBIL (ARD)
- BIJAR (BIJ)
- ISLAMABADGHARB (EGH)
- GORGAN (GOR)
- † HAMEDAN FOROUDGAH (HFO)
- ★ HAMEDAN NOZHEH (HNH)
- ◎ KANGAVAR (KAN)
- × KERMANSHAH (KER)
- + KHALKHAL (KHA)
- † KHORRAMDAREH (KHO)
- ◎ PARSABAD MOGHAN (PAR)
- ◎ RAVANSAR (RAV)
- ◎ SAGHEZ (SAG)
- * SANANDAJ (SAN)
- ⊕ SAR POLZOHAB (SAR)
- ◎ ZANJAN (ZAN)
- ⊠ ZARINEH OBATO (ZAR)



شکل ۱- ناحیه خاکستری مناطق مورد مطالعه. ایستگاه‌های (سینوپتیک هواشناسی) مورد مطالعه با نمادهای مختلفی نشان داده شده است
Figure 1- Gray area represents regions studied. Synoptic meteorological stations are shown with different symbols

مطالعه در آن شبکه قرار گرفته باشد. به منظور تصحیح خطای (یا ریز مقیاس نمایی) داده‌های شبیه‌سازی شده ماهانه بارش و دما در دوره تاریخی و سپس دوره آینده در هر یک از ایستگاه‌ها، و برای تمام گروه‌های هر مدل، از روش نگاشت هم فاصله تابع توزیع تجمعی (EDCDFm) ^(۲) استفاده شد. این روش در سال ۲۰۱۰ جهت تصحیح خطای مقادیر شبیه‌سازی شده دما و بارش مدل‌های GCM توسعه داده شد (۱۲). روش EDCDFm در مقایسه با سایر روش‌های آماری تصحیح خطا دارای دو ویژگی مثبت است، اولاً، این روش تغییراتی که در شکل توزیع متغیرهای اقلیمی (از جمله دنباله توزیع) رخ خواهد داد را در نظر می‌گیرد. دوماً، کاربرد این روش به دور از پیچیدگی است (۱۲). طبق این روش رابطه تصحیح خطا برای یک متغیر اقلیمی (x) را به صورت زیر می‌باشد.

$$\tilde{x}_{m-p} = x_{m-p} + F_{o-c}^{-1} \left(F_{m-p}(x_{m-p}) \right) - F_{m-c}^{-1} \left(F_{m-p}(x_{m-p}) \right) \quad (1)$$

بر اساس بیان تیلور (۲۰)، هر یک از اعضاء گروه‌های مدل GCM به صورت $r < N > i < M > p < L >$ نمایش داده می‌شود که در آن p و i به ترتیب نشان دهنده روش ارزش‌دهی آغازین، روش باز تحلیل و شرایط فیزیکی گروه است و N ، M و L اعداد صحیحی برای شناسایی گروه‌های مختلف هر مدل هستند (جدول ۱). گروه‌های مختلف از یک مدل GCM برای یک روش باز تحلیل (i=1) اما روش‌های ارزش‌دهی آغازین متفاوت (r) متفاوت لحاظ شد (جدول ۱). بر حسب تعداد گروه‌های موجود برای هر مدل GCM یک تاده گروه مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۱). برای شبیه‌سازی (پیش‌نگری) تغییرات دما و بارش در دوره‌های ۲۰۴۵-۲۰۶۵ (آینده نزدیک) و ۲۰۸۰-۲۱۰۰ (آینده دور) از سناریوی انتشار RCP8.5 (بدینانه‌ترین حالت ممکن) و RCP2.6 (خوشبینانه‌ترین حالت ممکن) استفاده شد. در این مطالعه مدل‌های GCM را که اندازه تفکیک پذیری طول و عرض جغرافیایی آنها کمتر از ۲ درجه باشد در گروه مدل‌های با تفکیک‌پذیری افقی بالا (۱۱ مدل، ز) و مابقی مدل‌ها (اندازه تفکیک‌پذیری طول و عرض جغرافیایی آنها بیشتر از ۲ درجه باشد) در گروه مدل‌های با تفکیک‌پذیری افقی پایین (۱۰ مدل، low-re) قرار گرفت (جدول ۱). داده‌های اقلیمی برای نقاطی از شبکه مدل‌های GCM مورد استفاده قرار گرفت، که ایستگاه‌های مورد

جدول ۱- خصوصیات مدل‌های اقلیمی (GCM) و گروه‌های انتخاب شده از آنها

Table 1- Characteristics of climate models (GCMs) and selected ensemble members of them

شماره مدل Model number	نام مدل Model name	اندازه تفکیک (عرض×طول جغرافیایی، درجه) Horizontal resolution (latitude × longitude)	گروه‌ها و اعضای آن برای هر مدل Experiments and ensemble members
M1	ACCESS 1.3	1.25 × 1.875	hist. r[1-3]i1p1, RCP8.5 r1i1p1
M2	BCC-CSM1.1	2.791×2.813	hist. r[1-3]i1p1, RCP2.6 & RCP8.5 r1i1p1
M3	BNU-ESM	2.791×2.813	r1i1p1
M4	CanESM2	2.791×2.813	r[1-5]i1p1
M5	CESM1-CAM5	0.942×1.25	r[1-3]i1p1
M6	CMCC-CM	0.748×0.75	hist. & RCP8.5 r1i1p1
M7	CNRM-CM5	1.401×1.406	hist. r[1-10]i1p1, RCP2.6 r1i1p1, RCP8.5 r[1,2,4,6,10]i1p1
M8	CSIRO-Mk3-6-0	1.865×1.875	r[1-10]i1p1
M9	EC-EARTH	1.121×1.125	hist. r[1,2,6,7,8,9,12,13,14]i1p1, RCP2.6 r[8,12]i1p1 , RCP8.5 r[1,2,6,8,9,11,12,13]i1p1
M10	FIO-ESM	2.791×2.813	r[1-3]i1p1
M11	GFDL-CM3	2.0 × 2.5	hist. r[1-5]i1p1, RCP2.6 & RCP8.5 r1i1p1
M12	GISS-E2-H	2.0 × 2.5	hist. r[1-6]i1p1 , RCP2.6 & RCP8.5 r1i1p1
M13	GISS-E2-R	2.0 × 2.5	hist. r[1-6]i1p1, RCP2.6 & RCP8.5 r1i1p1
M14	HadGEM2-ES	1.25×1.875	r[1-4]i1p1
M15	IPSL-CM5A-MR	1.268×2.5	hist. r[1-3]i1p1, RCP2.6 & RCP8.5 r1i1p1
M16	MIROC5	1.401×1.406	hist. r[1-5]i1p1, RCP2.6 & RCP8.5 r[1-3]i1p1
M17	MIROC-ESM	2.791×2.813	hist. r[1-3]i1p1, RCP2.6 & RCP8.5 r1i1p1
M18	MPI-ESM-LR	1.865×1.875	r[1-3]i1p1
M19	MRI-CGCM3	1.121×1.125	hist. r[1-3]i1p1, RCP2.6 & RCP8.5 r1i1p1
M20	CCSM4	0.942×1.25	r[1-6]i1p1
M21	NorESM1-M	1.895×2.5	hist. r[1-3]i1p1, RCP2.6 & RCP8.5 r1i1p1

توزیع، پارامترهای شکل توزیع (p, q) برای متغیر دما در هر ایستگاه با استفاده از برآوردگر بیشینه درست نمایی (MLE)، برآورد گردید. از آنجا که برخی از ماه‌ها در مناطق مورد مطالعه بدون بارش است، تابع توزیع تجمعی دو پارامتری آمیخته گاما^۱ بر متغیر ماهانه بارش برازش یافت (۲۶). تابع توزیع تجمعی برای توزیع آمیخته به شکل زیر است.

$$G(x) = (1 - p)H(x) + pF(x) \quad (۳)$$

که در آن p درصد ماه‌های همراه با بارش است و $H(x)$ تابع پله ای با مقدار صفر و یک به ترتیب برای وقتی که یک ماه دارای عدم بارش و بارش باشد. همچنین $F(x)$ تابع توزیع تجمعی متناظر با تابع توزیع دو پارامتری گاما برای ماه‌های همراه با بارش است که به صورت زیر تعریف شد.

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx = \int_0^x \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) dx \quad x, \alpha, \beta > 0 \quad (۴)$$

که در آن $f(x)$ تابع توزیع دو پارامتری گاما، $\Gamma(\beta)$ تابع گاما، α

که در آن $\tilde{x}$ متغیر اقلیمی تصحیح شده، F و F^{-1} به ترتیب تابع توزیع تجمعی (CDF) و معکوس آن برای مقادیر مشاهده شده (0) و مدل (m)، در دوره تاریخی (c) یا دوره آینده (p) است. از آنجا که $F^{-1}(F(x)) = x$ می‌توان رابطه (۱) را برای تصحیح خطا در دوره تاریخی (c) به صورت $\tilde{x}_{m-c} = F_{o-c}^{-1}(F_{m-c}(x_{m-c}))$ بازنویسی کرد.

به منظور تعیین مناسبترین تابع توزیع تجمعی برای منطقه، توزیع‌های متعددی آزمون شد و تابع توزیع چهار پارامتری بتا و دو پارامتری آمیخته گاما به ترتیب برای دما و بارش لحاظ شد. تابع توزیع تجمعی (CDF) متناظر با توزیع چهار پارامتری بتا $F(x)$ ، برای متغیر ماهانه دما در هر ایستگاه به صورت زیر لحاظ شد (۱۲).

$$F(x) = \int_a^x f(x; a, b, p, q) = \int_a^x \frac{1}{B(p, q)(b-a)^{p+q+1}} (x-a)^{p-1} (b-x)^{q-1} dx \quad a \leq x \leq b; p, q > 0 \quad (۲)$$

که در آن $f(x; a, b, p, q)$ تابع توزیع چهار پارامتری بتا، B تابع بتا، p و q پارامترهای شکل توزیع و a و b پارامترهای محدوده توزیع است. به منظور پوشش مقادیر حدی ممکن در شبیه‌سازی‌های آینده، گسترش پارامترهای محدوده توزیع تا نصف انحراف استاندارد داده‌ها، مناسب توصیه شده است (۱۲). پس از تعیین پارامترهای محدوده

روی نمودار نیز نشان دهنده ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. بر این اساس هر چه مقادیر شبیه‌سازی برای یک متغیر به مشاهدات شبیه‌تر باشد، آن مدل بر روی نمودار به نقطه مرجع نزدیکتر بوده، و در نتیجه طبق رابطه (۵) می‌توان گفت نمره مهارت برای آن مدل به یک نزدیکتر می‌شود.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد چنانچه میانگین مقادیر شبیه‌سازی تمام گروه‌های یک مدل، برای یک متغیر اقلیمی لحاظ شود، نسبت به تک تک گروه‌های آن مدل، به مشاهدات اقلیمی شبیه‌تر است. به عنوان مثال برای متغیر ماهانه بارش، میزان توافق مشاهدات با شبیه‌سازی هر یک از گروه‌های مدل CSIRO-Mk3-6-0 (۱۰ گروه) کمتر از میانگین تمام گروه‌های آن (AME)^۲ است. کاهش خطا در پی در نظر گرفتن تمام گروه‌های مدل به این خاطر است که اثر خطاها در بین گروه‌های مدل در متوسط گیری آنها جبران می‌شود و همچنین سبب کاهش اثرات طبیعی تغییرپذیری اقلیم در شبیه‌سازی می‌شود (۱۵ و ۱۱). از طرف دیگر چنانچه در ابتدا تصحیح خطا برای هر یک از گروه‌های مدل اعمال شود و سپس میانگین تمام گروه‌ها لحاظ شود، این عمل منجر به نزدیکتر شدن شبیه‌سازی‌ها به مشاهدات می‌شود در مقایسه با اینکه ابتدا میانگین تمام گروه‌های یک مدل لحاظ شود و سپس تصحیح شود. بنابراین روش تصحیح خطا در دوره تاریخی و آینده برای هر یک از گروه‌های مدل‌ها برای هر متغیر اقلیمی در هر ایستگاه اعمال شد و سپس میانگین تمام گروه‌های هر مدل برای هر متغیر اقلیمی به عنوان شبیه‌سازی مدل برای آن متغیر لحاظ شد.

به منظور ارزیابی اولیه توافق بین شبیه‌سازی مدل‌های GCM و مشاهدات اقلیمی در سراسر منطقه مورد مطالعه از نمودار تیلور استفاده شد (۱۹) (شکل ۲). میزان شباهت شبیه‌سازی مدل‌ها و ترکیب چندگانه آنها (MME) با مشاهدات، برای متغیر ماهانه بارش و دمای متوسط قبل و بعد از تصحیح خطا در نمودار تیلور نشان داده شده است (شکل ۲). به عنوان مثال در شکل ۲-d مدل‌های M7، M8، M15 و M18 دارای همبستگی در حدود ۰/۶ و RMSE در حدود ۳۰ میلی‌متر هستند. قبل از تصحیح خطا همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی مدل‌ها و مقادیر مشاهده شده بارش مابین ۰/۲ تا ۰/۵ بوده (شکل ۲-c) و بعد از تصحیح خطا به حدود ۰/۴ تا ۰/۶۵ رسیده است (شکل ۲-d). تصحیح خطا برای دمای متوسط و بارش برای سراسر منطقه در دوره تاریخی سبب افزایش همبستگی تا ۰/۹۸ برای دمای متوسط و ۰/۶۵ برای بارش شده (شکل ۲، b و d)، که اندازه قابل

و β به ترتیب پارامترهای مقیاس و شکل توزیع هستند. پارامترهای α و β برای متغیر بارش در هر ایستگاه با استفاده از برآوردگر بیشینه درست نمایی (MLE)، برآورد گردید.

در ارزیابی عملکرد مدل‌ها حالت متفاوتی پیش می‌آید از جمله، ممکن است میانگین مقادیر مشاهده شده $\bar{O}$ و مدل $\bar{m}$ برابر و ضریب همبستگی $R_{m,O}$ نیز ۱ باشد اما واریانس (تغییرپذیری) مقادیر مشاهده شده σ_O^2 و مدل σ_m^2 برابر نباشد یا میانگین مقادیر مشاهده شده و مدل برابر و واریانس (تغییرپذیری) آنها نیز برابر اما ضریب همبستگی صفر باشد یا واریانس آنها (تغییرپذیری) برابر و ضریب همبستگی نیز ۱ باشد اما میانگین مقادیر مشاهده شده و مدل برابر نباشد، در تمام این حالات شبیه‌سازی مدل کاملاً بر مشاهدات منطبق نیست. بنابراین برای ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی نیاز به شاخصی است که همزمان این سه پارامتر (میانگین، واریانس و همبستگی) را لحاظ کند. بنابراین از نمره مهارت (SS) بین شبیه‌سازی مدل‌ها (m) و مشاهدات (O) به صورت زیر استفاده شد (۱۴ و ۲۵).

$$SS = [R_{m,O}^2] - \left[R_{m,O} - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_O} \right) \right]^2 - \left[\frac{(\bar{m} - \bar{O})}{\sigma_O} \right]^2 \quad (5)$$

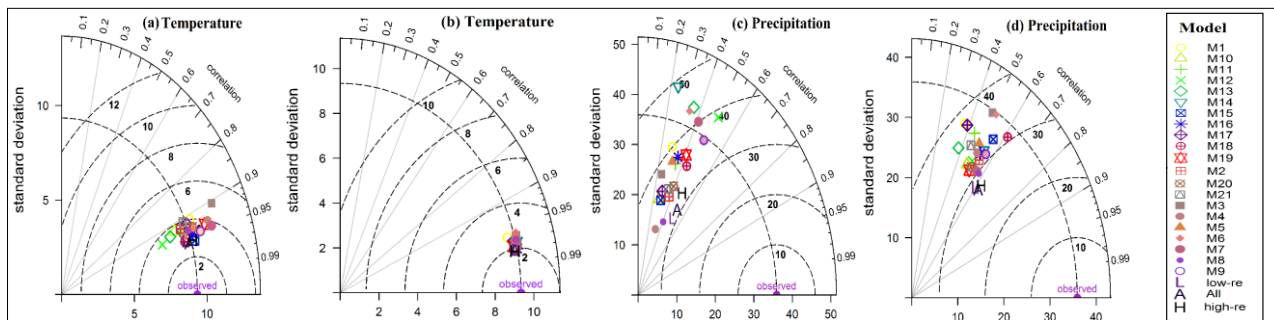
سه جمله سمت راست رابطه SS (رابطه ۵) به ترتیب همبستگی، خطای سیستماتیک (غیرشرطی) و خطای غیرسیستماتیک (شرطی) را برای شبیه‌سازی مدل‌ها نسبت به مشاهدات به صورت کمی نشان می‌دهد (۱۴ و ۲۵). مدلی که دقیقاً کلیه خصوصیات مشاهدات را بازتولید کند، نمره مهارت آن ۱ است. چنانچه میانگین و واریانس مقادیر مشاهده شده و مدل برابر و ضریب همبستگی صفر باشد نمره مهارت مدل -۱ است. حدود تغییرات نمره مهارت (SS) از منفی بی نهایت تا ۱ می‌باشد.

در این مطالعه ۲۶ معیار برای مهارت مدل، که شامل ۲۴ معیار برای متغیر ماهانه دما و بارش (۱۲ ماه) و ۲ معیار برای متغیر سالانه دما و بارش تعریف شد. عملکرد مدل‌ها در دوره تاریخی بر اساس معیارهای تعریفی برای هر مدل و ترکیب مدل‌ها (MME) (متوسط مقادیر تمام مدل‌ها: All، متوسط مقادیر ۱۱ مدل با تفکیک‌پذیری افقی بالا: high-re، متوسط مقادیر ۱۰ مدل با تفکیک‌پذیری افقی پایین: low-re) در هر ایستگاه و سراسر منطقه ارزیابی شد.

به منظور ارزیابی اولیه توافق بین شبیه‌سازی مدل‌های GCM و مشاهدات اقلیمی در سراسر منطقه مورد مطالعه از نمودار تیلور استفاده شد (۱۹) (شکل ۲). در این نمودار قطبی ارزش داده مشاهده شده، به عنوان یک نقطه مرجع (observed) بر روی محور افقی مشخص می‌شود (شکل ۲). بعد شعاعی نشان دهنده انحراف استاندارد متغیر اقلیمی شبیه‌سازی شده مورد نظر و بعد زاویه‌ای نشان دهنده همبستگی مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی است. خطوط منقطع بر

تمام مدل‌ها شبیه‌سازی‌های تقریباً یکسان و نزدیک به مشاهدات دارند (شکل ۲-b و d). همه مدل‌ها شبیه‌سازی بهتری از الگوی مکانی و زمانی دما نسبت به بارش دارند. به طور کلی نتایج شبیه‌سازی دما و بارش برای ترکیب مدل‌ها (All، low-re و high-re)، به مشاهدات نزدیکتر است و سبب بهبود نمره مهارت در شبیه‌سازی‌ها می‌شود (شکل ۲، b و d). از اینرو در مطالعات ارزیابی منطقه‌ای تغییر اقلیم، می‌توان از ترکیب مدل‌ها جهت بهبود نتایج شبیه‌سازی استفاده نمود.

قبولی از توافق شبیه‌سازی مدل‌ها و مشاهدات است. به طور کلی می‌توان گفت تصحیح خطا سبب کاهش RMSE، افزایش همبستگی و نزدیک شدن واریانس مقادیر شبیه‌سازی مدل‌ها به مشاهدات شده است، که این خود سبب افزایش نمره مهارت مدل خواهد شد (شکل ۲ a تا d). در مقایسه با دما (شکل ۲-b)، در شبیه‌سازی بارش، اکثر مدل‌ها دارای تغییرپذیری بسیار زیادی نسبت به مشاهدات هستند، و انحراف استاندارد مقادیر شبیه‌سازی بارش در اکثر مدل‌ها کمتر از مشاهدات است (شکل ۲-d). بر خلاف بارش، شبیه‌سازی دمای متوسط در سراسر منطقه، اختلاف چشمگیری در بین مدل‌ها ندارد و



شکل ۲- نمودار تیلور برای متغیر ماهانه (a) - دمای متوسط قبل از تصحیح خطا، (b) - دمای متوسط بعد از تصحیح خطا، (c) - بارش قبل از تصحیح خطا، (d) - بارش بعد از تصحیح خطا، برای سراسر منطقه مورد مطالعه در دوره تاریخی. مدل‌های GCM و همچنین ترکیب مدل‌ها (All: متوسط مقادیر تمام مدل‌های GCM، high-re: متوسط مقادیر مدل‌های با تفکیک‌پذیری افقی بالا و low-re: متوسط مقادیر مدل‌های با تفکیک‌پذیری افقی پایین) بر روی نمودار با نمادهای مشخص شده است

Figure 2- Taylor diagram for monthly variable (a) - Average temperature before bias correction (b) - Average temperature after bias correction, (c) - Precipitation before bias correction, (d) - Precipitation after bias correction, over the region based on the historical period. GCM models and multimodel ensembles (All: Average of all GCM models, high-re: mean models with high resolution, low-re: mean models with low resolution) are shown with different symbols

(جدول ۲). مقدار Δ برای ترکیب مدل‌ها با اندازه تفکیک بالا (high-re) نسبت به ترکیب مدل‌ها با اندازه تفکیک پایین (low-re) بیشتر است و در کل نمره مهارت آنها نیز در شبیه‌سازی بارش و دما در اکثر موارد از ترکیب مدل‌ها با اندازه تفکیک پایین (low-re) بهتر است (جدول ۲). اما با اطمینان نمی‌توان گفت که هر چه اندازه تفکیک یک مدل بهتر باشد، مهارت آن مدل در شبیه‌سازی بارش و دما نیز بهتر است به عنوان مثال مدل M8 بارش و دما را نسبت به M6 بهتر شبیه‌سازی می‌کند. این در حالی است که مدل M6 (CMCC-CM۱, ۰.۷۴۸×۰.۷۵) بالاترین اندازه تفکیک را دارا است اما در رده‌بندی مدل‌ها در جایگاه ۱۷ام قرار می‌گیرد (جدول ۲). باز هم برای ترکیب مدل‌ها (All، low-re، high-re و Selected) مقدار Δ نسبت به تک مدل‌ها کمتر است و حاکی از مطلوب‌ترین شبیه‌سازی‌ها است (جدول ۲).

عملکرد مدل‌ها و ترکیب‌های آنها در شبیه‌سازی معیارهای تعریف شده، بر اساس نمره مهارت SS در جدول ۲ آورده شده است. در اکثر موارد ترکیب مدل‌ها منتج به بهبود نمره مهارت می‌شود (جدول ۲). در این مطالعه بر اساس نمره مهارت (SS) هر مدل در شبیه‌سازی متغیر بارش و دمای متوسط (سالانه و ماهانه، ۲۶ تا SS)، کیفیت شبیه‌سازی مدل‌ها برحسب مقدار Δ از کم به زیاد مرتب‌سازی شد (جدول ۲). Δ برای هر مدل، فاصله اقلیدسی نمره مهارت آن (۲۶ تا SS) از نقطه‌ای با نمره مهارت کامل (۱، ۱، ۱) است (۱۵). مقادیر کمتر Δ نشان دهنده توافق بهتر شبیه‌سازی‌ها با مشاهدات است (جدول ۲). ترکیب مدل‌ها با نمره‌های مهارت متفاوت سبب می‌شود خطاهای موجود در مدل‌ها بی‌اثر شود و منجر به بهبود نمره مهارت برای ترکیب مدل‌ها شود (۱۵ و ۳). از اینرو ترکیب‌های بسیار متفاوتی از ۲۱ مدل مورد بررسی قرار گرفت (از جمله، ترکیب‌های متفاوت ۲ تایی، ۳ تایی، ... تا ۲۱ تایی)، که در نهایت ترکیب ۷ مدل M15، M7، M8، M9، M16، M18 و M14، به عنوان مدل‌های انتخابی (Selected)، به کمترین مقدار Δ (۳/۲۶) برای سراسر منطقه مورد مطالعه منتج شد

جدول ۲- نمره مهارت (SS) هر مدل و ترکیب مدل‌ها برای بارش (Pr) و دمای متوسط (T) ماهانه و سالانه در دوره تاریخی برای سراسر منطقه مورد مطالعه

Table 2- Skill Score (SS) of each model and multi-model ensemble for annual and monthly precipitation (Pr) and temperature (T) over the region based on the historical period

مدل و ترکیب مدل‌ها Model and multimodel ensembles	Δ	نمره مهارت برای دما (T) و بارش (Pr) در هر ماه و سالانه Skill Score for annual and monthly precipitation(Pr) and temperature (T)																									
		Jan		Feb		Mar		Apr		May		Jun		Jul		Aug		Sep		Oct		Nov		Dec		Annual	
		T	Pr	T	Pr	T	Pr	T	Pr	T	Pr	T	Pr	T	Pr	T	Pr	T	Pr	T	Pr	T	Pr	T	Pr	T	Pr
Selected ^a	3.26	0.65	0.34	0.57	0.26	0.66	0.18	0.60	-0.09	0.83	-0.17	0.87	0.17	0.89	0.11	0.90	0.25	0.87	0.21	0.82	-0.01	0.76	0.08	0.57	0.16	0.95	0.50
high-re	3.52	0.67	0.29	0.57	0.29	0.66	0.20	0.64	-0.14	0.83	-0.49	0.86	-0.12	0.89	0.13	0.89	0.20	0.88	0.17	0.81	-0.09	0.74	0.07	0.56	0.18	0.94	0.49
All	3.58	0.66	0.34	0.56	0.29	0.65	0.17	0.66	-0.11	0.84	-0.57	0.87	-0.25	0.89	0.16	0.90	0.22	0.87	0.21	0.81	-0.07	0.72	0.05	0.55	0.19	0.94	0.45
low-re	3.82	0.64	0.32	0.55	0.25	0.64	0.09	0.66	-0.15	0.84	-0.72	0.87	-0.50	0.89	0.17	0.90	0.21	0.86	0.19	0.79	-0.08	0.69	0.00	0.54	0.18	0.94	0.38
M8	4.11	0.63	0.26	0.38	0.15	0.45	-0.09	0.67	-0.23	0.72	-0.33	0.62	-0.04	0.85	-0.04	0.85	0.11	0.76	-0.15	0.53	-0.45	0.27	-0.02	0.24	0.13	0.93	0.41
M7	4.14	0.62	0.04	0.59	0.03	0.64	-0.01	0.23	-0.27	0.71	-0.71	0.84	-0.32	0.89	-0.02	0.88	0.09	0.75	0.27	0.67	-0.33	0.62	0.02	0.61	0.00	0.94	0.47
M15	4.36	0.53	-0.13	0.55	-0.77	0.51	-0.14	0.47	-0.24	0.75	-0.13	0.84	0.04	0.87	-0.15	0.87	0.14	0.78	0.11	0.73	-0.23	0.65	-0.18	0.53	-0.36	0.94	0.35
M9	4.37	0.62	-0.07	0.53	0.16	0.57	0.03	0.60	-0.88	0.67	-0.31	0.88	0.08	0.88	-0.09	0.89	0.06	0.86	-0.73	0.82	-0.11	0.77	-0.04	0.55	-0.19	0.94	0.49
M18	4.50	0.58	-0.22	0.54	-0.15	0.59	0.01	0.58	-0.60	0.75	-0.42	0.83	-0.37	0.82	-0.01	0.86	0.15	0.71	-0.09	0.61	-0.09	0.64	-0.12	0.42	-0.18	0.94	-0.29
M16	4.50	0.64	-0.26	0.52	0.10	0.60	-0.04	0.41	-0.94	0.82	-1.10	0.84	0.12	0.87	0.04	0.89	0.16	0.83	0.13	0.82	-0.23	0.76	0.07	0.57	-0.23	0.94	0.38
M14	4.60	0.62	0.01	0.50	-0.08	0.51	0.09	0.10	-0.47	0.47	-1.12	0.70	-0.27	0.83	-0.06	0.83	0.25	0.82	0.26	0.62	-0.51	0.51	-0.05	0.46	-0.20	0.94	0.42
M12	4.65	0.60	0.03	0.49	-0.07	0.47	-0.31	0.56	-0.42	0.73	-1.09	0.85	-0.09	0.84	-0.06	0.79	0.04	0.69	0.09	0.70	-0.76	0.66	0.03	0.43	-0.03	0.93	0.22
M2	4.76	0.65	0.10	0.53	-0.10	0.59	-0.06	0.52	-0.21	0.70	-0.45	0.82	-0.50	0.84	-0.07	0.83	0.12	0.81	-0.53	0.69	-1.17	0.59	-0.16	0.41	0.13	0.93	-0.02
M4	4.90	0.68	0.03	0.44	0.00	0.59	-0.22	0.68	-0.75	0.80	-1.65	0.73	-0.52	0.86	0.14	0.88	0.22	0.75	0.17	0.42	-0.24	0.53	0.07	0.61	-0.18	0.94	0.11
M20	5.07	0.65	0.07	0.53	-0.03	0.61	0.02	0.54	-0.27	0.80	-1.14	0.83	-0.13	0.89	-0.50	0.87	-0.69	0.85	-1.00	0.75	-0.61	0.69	-0.06	0.67	0.08	0.94	0.23
M21	5.84	0.56	-0.07	0.38	-0.01	0.60	0.01	0.55	-1.12	0.73	-2.23	0.73	-1.38	0.87	-0.11	0.86	0.08	0.78	0.04	0.58	-0.36	0.33	-0.11	0.49	-0.26	0.93	0.22
M19	5.86	0.59	0.14	0.58	0.11	0.58	-0.20	0.64	-0.28	0.77	-1.24	0.79	-3.11	0.86	0.02	0.87	0.14	0.84	0.05	0.67	-0.28	0.63	0.04	0.42	0.14	0.94	0.27
M10	5.97	0.59	0.05	0.50	-0.09	0.59	-0.11	0.44	-0.12	0.75	-1.13	0.75	-2.95	0.82	-0.29	0.75	-0.10	0.84	-0.10	0.69	-0.41	0.59	-0.18	0.48	-0.05	0.92	0.23
M5	6.03	0.59	-0.20	0.52	-0.05	0.54	-0.25	0.48	-0.68	0.72	-1.03	0.79	-0.48	0.86	-0.33	0.84	-2.42	0.82	-0.68	0.73	-0.45	0.68	-0.12	0.44	-0.06	0.92	0.11
M13	6.12	0.64	-0.32	0.57	-0.41	0.53	-0.43	0.59	-0.42	0.71	-1.55	0.84	-1.57	0.83	0.08	0.84	0.07	0.54	-0.08	0.64	-2.01	0.62	-0.01	0.46	-0.20	0.94	0.28
M6	6.47	0.46	-0.29	0.35	-0.62	0.24	-0.03	0.25	-1.05	0.48	-1.07	0.68	-1.47	0.71	-0.19	0.78	0.10	0.46	-0.30	0.37	-1.82	0.40	-0.47	0.24	0.06	0.86	-0.76
M17	6.91	0.59	-0.21	0.38	-0.13	0.36	-0.08	0.55	-2.05	0.75	-2.15	0.84	-0.07	0.82	-0.26	0.85	-1.01	0.81	-1.92	0.56	-0.25	0.58	-0.55	0.27	-0.54	0.92	0.10
M11	7.16	0.54	0.08	0.57	-0.14	0.59	0.21	0.34	-1.86	0.81	-2.09	0.84	-3.69	0.86	-0.16	0.86	0.22	0.75	0.17	0.77	-0.14	0.69	-0.32	0.59	-0.17	0.94	0.48
M3	7.77	0.42	-0.93	0.31	-0.76	0.33	-0.23	0.16	-0.88	0.49	-1.80	0.73	-3.11	0.78	-0.49	0.84	-0.32	0.70	-0.98	0.61	-0.71	0.54	-0.34	0.25	-0.36	0.90	-1.42
M1	9.63	0.48	-0.46	0.33	-0.28	0.46	0.01	0.53	-1.05	0.41	-3.55	0.49	-5.77	0.85	-1.64	0.82	0.17	0.55	0.16	0.23	-0.25	0.41	-0.22	0.54	-0.49	0.93	0.36

a- Selected -a ترکیب مدل‌های M8, M7, M15, M9, M18, M16 و M14 است.

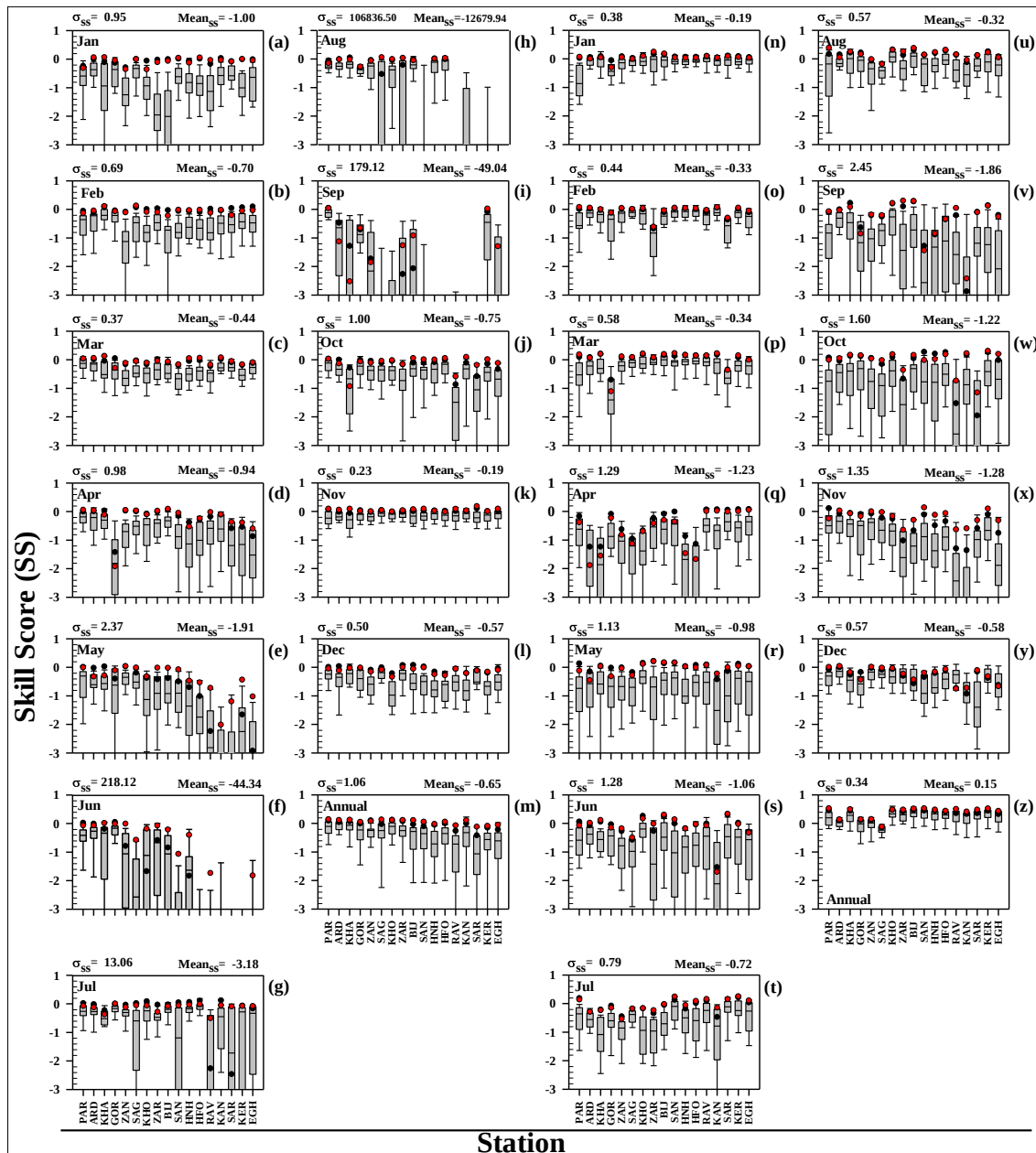
a- Selected is multimodel ensembles of M8, M7, M15, M9, M18, M16 و M14

متوسط بارش سالانه در کل منطقه ۳۹۷ میلی‌متر است. ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، اکتبر، نوامبر و دسامبر جز ماه‌های پربارش و سایر ماه‌ها کم‌بارش است. البته می‌توان برای مناطق شمالی (عرض ۳۹/۶۵-۳۵/۲ درجه شمالی) ماه می را جز ماه‌های پربارش و در مناطق جنوبی (عرض ۳۵/۲-۳۴/۱۱ درجه شمالی) جز ماه‌های کم‌بارش لحاظ کرد. برای نشان دادن عدم قطعیت در شبیه‌سازی دما و بارش در هر ماه و در هر ایستگاه از نمودار جعبه‌ای نمره مهارت (SS) استفاده شد (شکل ۳). نمره مهارت (SS) برای شبیه‌سازی بارش ماهانه در بین مدل‌ها، ایستگاه‌ها و ماه‌ها دارای تغییرپذیری قابل توجهی است (شکل ۳ - (a) تا (l)). به طور کلی متوسط مقادیر نمره مهارت ($Mean_{SS}$) برای ۲۱ مدل GCMs برای تمام ایستگاه‌ها در ماه‌های پربارش بیشتر مساوی از ۱- و در ماه‌های کم‌بارش کمتر از ۱- بوده است (شکل ۳ - (a) تا (l)). بیشترین مقدار

مقادیر Δ و یا نمره مهارت (SS) تقریباً بعد از ترکیب ۵ مدل به صورت مجانبی به مقدار معینی میل می‌کند (۱۵ و ۳). به عبارتی بعد از ترکیب ۵ مدل، افزودن مقادیر مدل دیگری به آنها تأثیر چشمگیری در کاهش Δ (یا افزایش SS) ندارد، اما با این تعداد مدل (۵ مدل)، عدم قطعیت در شبیه‌سازی هم‌چنان بالا است، که می‌توان با افزایش ترکیب مدل‌ها به هفت تا ده مدل، عدم قطعیت در شبیه‌سازی را به طور قابل توجهی کاهش داد (۱۵ و ۳). بنابراین در این مطالعه می‌توان با در نظر گرفتن ترکیب ۷ مدل Selected (که به مراتب کمتر از ۲۱ مدل GCM معرفی شده) علاوه بر حصول به بهترین شبیه‌سازی (کمترین Δ)، تا اندازه قابل قبولی عدم قطعیت را نیز کاهش داد و نتایج قابل قبولی گرفت. این امر علاوه بر صرفه‌جویی در وقت و هزینه محاسبات می‌تواند پیش‌نگری (شبیه‌سازی) واقع‌بینانه‌تری از تغییرات بارش و دما در دهه‌های آتی فراهم آورد.

-(k) و (h). مقدار SS برای متغیر بارش در تمام ایستگاه‌ها طی ماه‌های پربارش برای ۷۵ درصد مدل‌ها بیش از ۳- است (شکل ۳).

Mean_{ss} و کمترین مقدار σ_{ss} برای ماه نوامبر ($\text{Mean}_{ss} = -0.19$ ، $\sigma_{ss} = 0.38$) و کمترین مقدار Mean_{ss} و بیشترین مقدار σ_{ss} برای ماه آگوست ($\text{Mean}_{ss} = -1.2679/94$ ، $\sigma_{ss} = 1.06836/5$) است (شکل ۳)



شکل ۳- نمودار جعبه‌ای بر اساس نمره مهارت (SS) برای متغیر ماهانه و سالانه، (a) - (m) بارش، (n) - (z) دمای متوسط، با استفاده از خروجی مدل ۲۱ GCM در هر ایستگاه. خطوط خطا در پایین و بالای هر جعبه به ترتیب صدک ۱۰ام و ۹۰ام است. دایره سیاه و قرمز به ترتیب مربوط به ترکیب همه مدل‌ها (All) و انتخابی (Selected) است. σ_{ss} و Mean_{ss} به ترتیب، متوسط و انحراف استاندارد مقادیر SS برای مدل ۲۱ GCMs برای تمام ایستگاه‌ها است. ایستگاه‌ها بر روی محور افقی از عرض جغرافیای شمالی به جنوبی مرتب شده است

Figure 3- Box plot based on skill score (SS) for monthly and annual variable, (a) - (m) Precipitation, (n) - (z) Average temperature, based on the output of 21 GCM models at each station. Whiskers at the bottom and top of each box show 10th and 90th percentiles. The black and red circles represent the combination of all models (All) and Selected, respectively. Mean_{ss} and σ_{ss} represent the mean and standard deviation of SS values for 21 GCMs over the stations, respectively. The stations are arranged on a horizontal axis from the north to the south

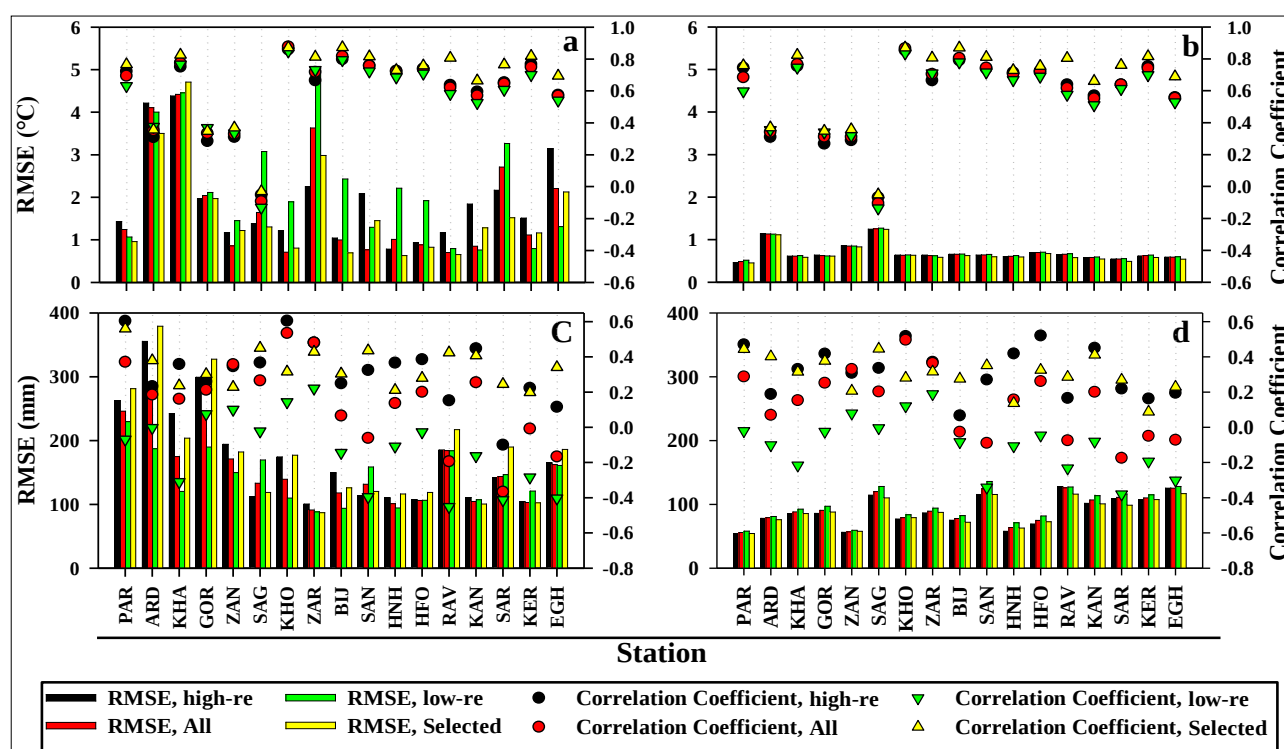
دارای خطای چشمگیری است که استفاده مستقیم از آنها را در مطالعات منطقه‌ای بررسی اثر تغییر اقلیم دچار محدودیت می‌کند و می‌بایستی حتماً تصحیح خطا بر روی آنها صورت پذیرد. بر خلاف کاهش قابل توجه مقدار RMSE بعد از تصحیح خطا، مقدار ضریب همبستگی قبل و بعد از تصحیح خطا، کم و بیش تفاوت چندانی نمی‌کند (شکل ۴). این در حالی است که بعد از تصحیح خطا، متوسط مقدار نمره مهارت ترکیب مدل‌ها (low-re, high-re, All) (Selected) برای متوسط سالانه بارش و دما به ترتیب ۰/۰۷- (قبل از تصحیح خطا، ۰/۳۳- و ۳/۲۵-) (قبل از تصحیح خطا، ۰/۳۳- و ۳/۲۵-) می‌شود. بنابراین می‌توان گفت افزایش نمره مهارت بعد از تصحیح خطا بیشتر به دلیل کاهش قابل توجه خطای غیرسیستماتیک (شرطی) است و خطای سیستماتیک (غیرشرطی) کم و بیش همچنان در همان سطح باقی می‌ماند (رجوع شود به رابطه ۵). این ناتوانی می‌تواند به دلیل مهارت محدود مدل‌ها در شبیه‌سازی خصوصیات الگوی دما و بارش و دامنه تغییرپذیری خروجی آنها در منطقه باشد. هر چند استفاده از روش آماری سبب کاهش چشمگیر خطای غیرسیستماتیک شد، اما خطای سیستماتیک تغییر چندانی نداشت. از اینرو روشهای آماری تصحیح خطا نمی‌توانند فرایندهای فیزیکی مدل‌ها یا مکانیسم‌های بازخوردی در ارتباط با دیگر متغیرهای اقلیمی را در نظر بگیرند (۶). خطای سیستماتیک جز محدودیتهای ذاتی مدل‌ها، در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در منطقه مورد مطالعه است. از اینرو پیشنهاد می‌شود در آینده توانایی خود مدل‌ها افزایش یافته یا روش‌های تصحیح خطایی توسعه یابد که بتواند این محدودیت را رفع نماید. با این وجود هم در حال حاضر نمی‌توان از خروجی مدل‌ها به طور مستقیم در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم استفاده نمود و می‌بایستی آنها را با استفاده روش‌های موجود تصحیح خطا، تصحیح نمود. روش‌های از تصحیح خطا مشابه آنچه استفاده شد در مطالعات دیگر نیز بکارگیری شده است (۲۳ و ۲۴).

همانطور که بیان شد نتایج ترکیب مدل‌ها (low-re, high-re, All) (Selected) به مشاهدات نزدیکتر بود. بنابراین برای پیش‌نگری تغییرات بارش و دما در دهه‌های آتی از نتایج آنها می‌توان استفاده نمود. حتی می‌توان از ترکیب مدل‌های Selected به عنوان یک پیش‌نگری محتمل‌تر بهره برد و آن را مرجع قرار داد. در مناطق مورد مطالعه در آینده نزدیک (۲۰۴۵-۲۰۶۵) برای سناریوی انتشار RCP2.6 و RCP8.5، تغییرات بارش نسبت به دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۵)، به ترتیب مابین ۹- تا ۱۳ و ۵- تا ۸ درصد، و در آینده دور (۲۰۸۰-۲۱۰۰) به ترتیب مابین ۱۰- تا ۱۴ و ۱۳- تا ۱۷ درصد، در بین ترکیب مدل‌ها (low-re, high-re, All) (Selected) متغیر است (شکل ۵ تا ۸).

در تمام ایستگاه‌ها عدم قطعیت در شبیه‌سازی بارش طی ماه‌های نوامبر، دسامبر و مارس نسبت به سایر ماه‌ها کمتر است و میانگین نمره مهارت نیز بالاتر است. عدم قطعیت در شبیه‌سازی بارش طی ماه‌های کم بارش نسبت به ماه‌های پر بارش در تمام ایستگاه‌ها بیشتر بوده و در مناطق جنوبی‌تر این عدم قطعیت (به ویژه در ماه آگوست و سپتامبر) بسیار بیشتر هم می‌شود (شکل ۳- a) تا (l). به طور کلی می‌توان گفت، عدم قطعیت در شبیه‌سازی بارش در مناطق جنوبی‌تر بیشتر بوده و طی ماه‌های کم بارش بسیار بارزتر می‌شود (شکل ۳- a) تا (m). مقادیر شبیه‌سازی شده متوسط سالانه بارش تفاوت چمگیری با مقادیر مشاهده شده در بین ایستگاه‌ها نشان نمی‌دهد، اما اندکی برای مناطق جنوبی این تفاوت بیشتر بوده است، که این سبب شده مقدار SS برای مناطق جنوبی‌تر کمتر و عدم قطعیت نیز بیشتر باشد (شکل ۳- m).

به طور کلی $Mean_{ss}$ در شبیه‌سازی دمای متوسط برای ۲۱ مدل GCMs برای تمام ایستگاه‌ها در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، جولای، آگوست، دسامبر بیشتر از ۰/۷۳- است (شکل ۳- n) تا (y). علاوه بر این طی این ماه‌ها در تمام ایستگاه‌ها مقدار SS برای ۹۰ درصد مدل‌ها بیش از ۳- است (شکل ۳). بیشترین مقدار $Mean_{ss}$ و کمترین مقدار σ_{ss} برای ماه ژانویه ($\sigma_{ss}=0/38$, $Mean_{ss}=-0/19$) و کمترین مقدار $Mean_{ss}$ و بیشترین مقدار σ_{ss} برای ماه سپتامبر ($\sigma_{ss}=2/45$, $Mean_{ss}=-1/86$) است (شکل ۳- v) و (y). می‌توان گفت عدم‌قطعیت در شبیه‌سازی دمای متوسط طی ماه‌های سرد (دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس) نسبت به سایر ماه‌ها بسیار کمتر است. این عدم قطعیت در ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر بسیار بیشتر است و در مناطق جنوبی‌تر بیشتر بارز است (شکل ۳- n) تا (y). شبیه‌سازی دمای متوسط سالانه در بین مدل‌ها در هر ایستگاه دارای تغییرپذیری کمی است و عدم قطعیت در شبیه‌سازی دمای متوسط سالانه نسبت به دمای متوسط ماهانه بسیار بسیار کمتر بوده و همچنین دارای نمره مهارت بالاتری ($Mean_{ss}=0/15$) نیز است (شکل ۳- z).

به منظور درک اثر تصحیح خطا بر روی خطاهای غیرسیستماتیک و سیستماتیک، به عنوان نمونه از نمودار RMSE و ضریب همبستگی بارش و دمای متوسط سالانه استفاده شد (شکل ۴). متوسط مقدار RMSE برای ترکیب مدل‌ها (low-re, high-re, All) (Selected)، برای شبیه‌سازی متوسط سالانه بارش و دما به ترتیب ۹۳ میلی‌متر (قبل از تصحیح خطا، ۱۶۲ میلی‌متر) و ۰/۶ درجه سانتی‌گراد (قبل از تصحیح خطا، ۱/۹ درجه سانتی‌گراد) است. بنابراین تصحیح خطا برای مقادیر شبیه‌سازی متوسط سالانه بارش و دما طی دوره تاریخی به مقدار قابل توجهی RMSE را کاهش داده است (شکل ۴). این نشان می‌دهد که دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌ها

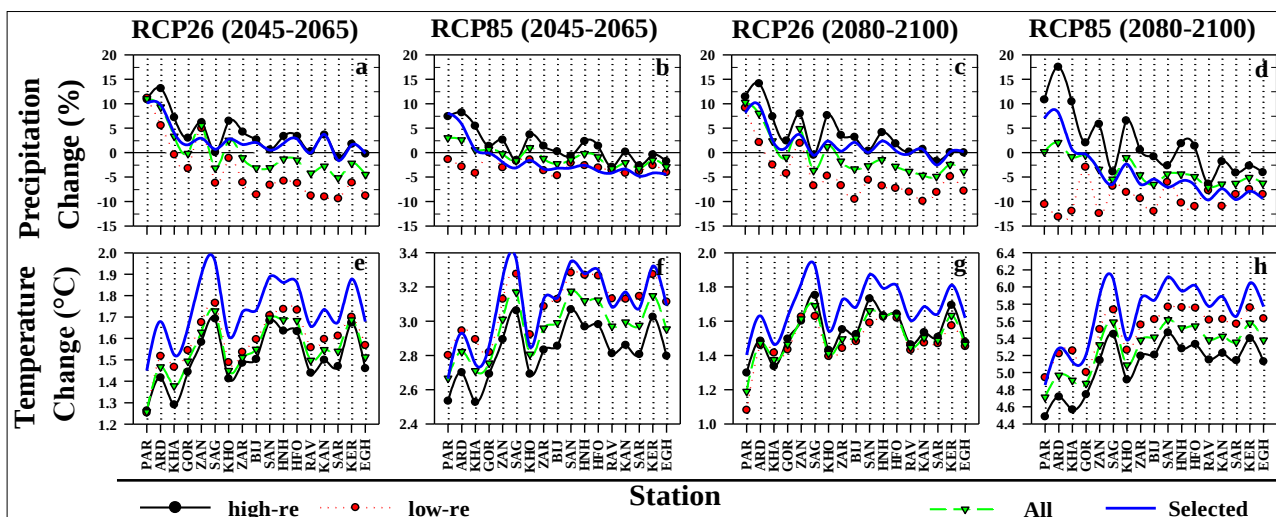


شکل ۴ - RMSE و ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده شده و ترکیب چندگانه مدل‌ها (Selected low-re, high-re, All) برای متوسط سالانه بارش و دمای متوسط برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره تاریخی، (a) و (c) - دما و بارش قبل از تصحیح خطا، (b) و (d) - دما و بارش بعد از تصحیح خطا. ایستگاه‌ها بر روی محور افقی از عرض جغرافیای شمالی به جنوبی مرتب شده است

Figure 4- RMSE and the correlation coefficient between observed and multiple models values (All, high-re, low-re, Selected) for the average annual precipitation and temperature for the stations over the historical period, (a) and (c) - temperature and precipitation before bias correction, (b) and (d) - temperature and precipitation after bias correction. The stations are arranged on a horizontal axis from the north to the south

می‌دهد مقدار بارش، در عرض‌های شمالی (بیشتر از ۳۸ درجه)، میانه (۳۶-۳۸ درجه) و جنوبی (۳۴-۳۶ درجه) به ترتیب به طور متوسط با افزایش ۱۰، ۲ و ۱ درصدی نسبت به دوره پایه روبه رو است و تحت سناریوی انتشار RCP8.5 در عرض‌های شمالی به طور متوسط ۷ درصد افزایش و در عرض‌های میانه و جنوبی به ترتیب به طور متوسط ۱- و ۴- درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد (شکل ۵ - a و d). علاوه بر این در آینده دور، نتایج تحت سناریوی انتشار RCP2.6 حاکی از افزایش مقدار بارش به طور متوسط ۹، ۲ و ۳۵/۰ درصد به ترتیب در عرض‌های شمالی، میانه و جنوبی است و تحت سناریوی انتشار RCP8.5 مقدار بارش در عرض‌های شمالی به طور متوسط ۸ درصد افزایش و در عرض‌های میانه و جنوبی به ترتیب به طور متوسط ۲- و ۸- درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. پس بطور کلی می‌توان گفت در بدینانه ترین حالت در پایان قرن مناطق شمالی شاهد افزایش بارش بوده و در حرکت به سوی مناطق جنوبی تر، مقدار کاهش بارش بیشتر می‌شود و تا ۱۰- درصد می‌رسد.

در پیش‌نگری تغییرات بارش در بین ایستگاه‌ها با عدم قطعیت روبه‌رو هستیم بطوریکه در اکثر مناطق، نتایج ترکیب مدل‌های high-re نشان از افزایش مقدار بارش دارد در حالیکه ترکیب مدل‌های low-re حاکی از کاهش مقدار بارش است (شکل ۵ - a تا d). این وضعیت برای سناریوی انتشار RCP8.5 و در پایان قرن بارزتر است (شکل ۵ - d). به طوری که نتایج سایر ترکیبات مدل‌ها با نتایج ترکیب مدل‌های Selected دارای اختلاف است (شکل ۵ - a تا d)، به ویژه در آینده دور و برای سناریوی انتشار RCP8.5 پیش‌نگری مقادیر تغییرات بارش برای ترکیب مدل‌های high-re و low-r از ترکیب مدل‌های Selected فاصله دارد (شکل ۵ - d). می‌توان گفت عدم قطعیت در پیش‌نگری تغییرات بارش به دوره زمانی پیش‌نگری، سناریوی انتشار و انتخاب مدل بستگی دارد. به طوری که این عدم قطعیت در دوره‌های زمانی آینده دورتر و برای سناریوی انتشار RCP8.5 بیشتر می‌شود. با این وجود در آینده نزدیک ترکیب مدل‌های انتخابی (Selected) تحت سناریوی انتشار RCP2.6 نشان



شکل ۵- تغییرات بارش و دما برای ترکیب چندگانه مدل‌ها (Selected, low-re, high-re, All) در هر ایستگاه نسبت به دوره ۱۹۷۵-۲۰۰۵. (a)-(d) تغییرات بارش بر حسب درصد، (e)-(h) تغییرات دما (°C)، برای دو سناریوی انتشار RCP2.6 و RCP8.5 و در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۴۵-۲۰۶۵) و آینده دور (۲۰۸۰-۲۱۰۰)، ایستگاه‌ها بر روی محور افقی از عرض جغرافیای شمالی به جنوبی مرتب شده است

Figure 5- Multimodel mean (All, high-re, low-re, Selected) change in precipitation and temperature at each station in relation to the historical period, (a) - (d) Precipitation changes (%), (e) - (h) Temperature changes (°C), for both RCP8.5 and RCP2.6 scenarios and the near term (2045-2065) and the long term (2080-2100). The stations are arranged on a horizontal axis from the north to the south

شمالی، میانه و جنوبی به طور متوسط ۲/۸، ۳/۰ و ۳/۲ درجه سانتی گراد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. علاوه بر این در آینده دور، تحت سناریوی انتشار RCP2.6 مقدار دما به طور متوسط ۱/۵، ۱/۷ و ۱/۷ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در عرض‌های شمالی، میانه و جنوبی افزایش می‌یابد و تحت سناریوی انتشار RCP8.5 دما به طور متوسط ۵/۱، ۵/۵ و ۵/۹ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در عرض‌های شمالی، میانه و جنوبی افزایش می‌یابد. پس بطور کلی می‌توان گفت در حرکت به سوی مناطق جنوبی‌تر، مقدار افزایش دما بیشتر خواهد بود.

نتیجه‌گیری

در مناطق عمده تولید گندم دیم در ایران، عملکرد ۲۱ مدل CMIP5 (از ۱۸ مرکز توسعه و تدوین مدل‌های اقلیمی) در شبیه‌سازی دما و بارش ماهانه مورد ارزیابی قرار گرفت. تغییر اقلیم می‌تواند بر تولید محصول و به تبع آن بر وضعیت اجتماعی مردمان این مناطق تاثیر گذار باشد. ارزیابی‌ها نشان داد شبیه‌سازی مدل‌ها با خطا همراه است و می‌بایستی حتماً قبل از استفاده آنها در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم تصحیح شوند. اگرچه تصحیح خطا سبب بهبود قابل توجه شبیه‌سازی‌های مدل‌ها می‌شود اما همچنان خطای سیستماتیک مدل‌ها قابل توجه است. انتخاب یک مدل تنها از بین مدل‌ها در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم نمی‌تواند مناسب باشد. بلکه برای پاسخ به نیازهای مطالعاتی باید ترکیبی بهینه از مدل‌ها را با توجه به منطقه

در مناطق مورد مطالعه در آینده نزدیک، افزایش دما نسبت به دوره پایه برای سناریوی انتشار RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب مابین ۱/۳ تا ۲ و ۲/۵ تا ۳/۴ درجه‌سانتی‌گراد، و در آینده دور به ترتیب ۱/۱ تا ۱/۹ و ۴/۵ تا ۶/۱ درجه‌سانتی‌گراد در بین ترکیب چندگانه مدل‌ها (Selected, low-re, high-re, All) متغیر است (شکل ۵). این اختلاف چشمگیر بین سناریوهایی انتشار در پیش‌نگری e تا h. افزایش دما به ویژه در آینده دور به علت تفاوت در مسیر تعریف شده انتشار گازهای گلخانه‌ای در سناریوها است. بطوریکه که تا پایان قرن، RCP8.5 افزایش دائمی انتشار گازهای گلخانه‌ای را نشان می‌دهد در حالیکه RCP2.6 در پایان قرن با کاهش و تثبیت انتشار گازهای گلخانه‌ای همراه است. از آنجا که در پیش‌نگری تغییرات دما برای سناریوی انتشار RCP8.5 نسبت به RCP2.6 اختلاف مقادیر بین ترکیب چندگانه مدل‌ها بیشتر است می‌توان گفت، عدم قطعیت در پیش‌نگری دما برای RCP8.5 نسبت به RCP2.6 بیشتر است (شکل ۵ e تا h). ترکیب مدل‌های انتخابی (Selected) در اکثر مناطق در آینده نزدیک و دور افزایش دمای بیشتری را نسبت به دیگر ترکیب مدل‌ها برای مناطق شبیه‌سازی کرده است (شکل ۵ e تا h). در آینده نزدیک ترکیب مدل‌های انتخابی (Selected) تحت سناریوی انتشار RCP2.6 نشان می‌دهد مقدار دما، در عرض‌های شمالی (بیشتر از ۳۸ درجه)، میانه (۳۶-۳۸ درجه) و جنوبی (۳۴-۳۶ درجه) به ترتیب به طور متوسط ۱/۶، ۱/۷ و ۱/۸ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد و تحت سناریوی انتشار RCP8.5 در عرض‌های

مناطق جنوبی‌تر، این عدم قطعیت بسیار بیشتر هم می‌شود. عدم-قطعیت در شبیه‌سازی دمای متوسط طی ماه‌های سردتر نسبت به سایر ماه‌ها بسیار کمتر است. بر اساس نتایج مدل‌های انتخابی می‌توان گفت در بدینانه‌ترین حالت در پایان قرن حاضر مناطق شمالی‌تر شاهد افزایش بارش بوده و در حرکت به سوی مناطق جنوبی‌تر، مقدار کاهش بارش بیشتر می‌شود و تا ۱۰- درصد می‌رسد، و دما به طور متوسط در تمام مناطق ۵/۵ درجه افزایش می‌یابد.

مورد مطالعه در نظر گرفت. تا علاوه بر کاهش عدم‌قطعیت در شبیه‌سازی مدل‌ها، پیش‌نگری‌های دقیق‌تری از تغییرات اقلیمی ارائه داد. از اینرو زیر مجموعه‌ای از ۲۱ مدل (۷ مدل) را تعیین شد که ترکیب آنها می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی در وقت و هزینه محاسبات، به بهترین نتیجه منجر شد. البته با اطمینان نمی‌توان گفت که هرچه اندازه تفکیک یک مدل بهتر باشد، مهارت آن مدل در شبیه‌سازی بارش و دما نیز بهتر است. عدم قطعیت در شبیه‌سازی بارش طی ماه‌های کم بارش نسبت به ماه‌های پر بارش در تمام ایستگاه‌ها بیشتر بوده و در

منابع

- 1- Aghakhani Afshar A., Hassanzadeh Y., Besalatpour A.A., and Pourreza Bilondi M. 2016. Seasonal Changes in Precipitation and Temperature of Mountainous Watersheds in Future Periods with Approach of Fifth Report of Intergovernmental Panel on Climate Change (Case study: Kashafrood Watershed Basin). *Journal of Water and Soil*, 30(5): 1718-1732. (In Persian with English abstract)
- 2- Agricultural Statistics First Volume of Crop Production 2015-16. 2016. Center for Information Technology and Communications Jihad Agriculture. Available at <http://amar.maj.ir/Portal/Home>.
- 3- Aloysius N.R., Sheffield J., Saiers J.E., Li H., and Wood E.F. 2016. Evaluation of historical and future simulations of precipitation and temperature in central Africa from CMIP5 climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(1): 130-152.
- 4- Barnett T.P., Pierce D.W., Hidalgo H.G., Bonfils C., Santer B.D., Das T., and Mirin A.A. 2008. Human-induced changes in the hydrology of the western United States. *Science*, 319(5866): 1080-1083.
- 5- Brekke L.D., Dettinger M.D., Maurer E.P., and Anderson M. 2008. Significance of model credibility in estimating climate projection distributions for regional hydroclimatological risk assessments. *Climatic Change*, 89(3-4): 371-394.
- 6- Ehret U., Zehe E., Wulfmeyer V., Warrach-Sagi K., and Liebert J. 2012. HESS Opinions“ Should we apply bias correction to global and regional climate model data?” *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9): 3391-3404.
- 7- Frame D.J., and Stone D.A. 2013. Assessment of the first consensus prediction on climate change. *Nature Clim. Change*, 3(4): 357-359.
- 8- Fuhrer J. 2003. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 97(1-3): 1-20.
- 9- Koocheki A., Nasiri M., Kamali G.A., and Shahandeh H. 2006. Potential Impacts of Climate Change on Agroclimatic Indicators in Iran. *Arid Land Research and Management*, 20(3): 245-259.
- 10- Kotir J. 2011. Climate change and variability in Sub-Saharan Africa: a review of current and future trends and impacts on agriculture and food security. *Environment, Development and Sustainability*, 13(3), 587-605.
- 11- Lambert S.J., and Boer G.J. 2001. CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models. *Climate Dynamics*, 17(2-3): 83-106.
- 12- Li H., Sheffield J., and Wood E.F. 2010. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D10).
- 13- Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., Manning M.R., Rose S.K., Van Vuuren D.P., and Wilbanks T.J. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282): 747-756.
- 14- Murphy A.H. 1988. Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient. *Monthly Weather Review*, 116(12), 2417-2424.
- 15- Pierce D.W., Barnett T.P., Santer B.D., and Gleckler P.J. 2009. Selecting global climate models for regional climate change studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(21): 8441-8446.
- 16- Ramirez-Villegas J., and Challinor A. 2012. Assessing relevant climate data for agricultural applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 161(0): 26-45.
- 17- Rangzan K., Shahbazi A., Jaride Z., and Kabolizadeh M. 2016. Evaluation CMIP5 Models In Order to Simulate Rainfall by using a Combination of Precipitation data Network Aphrodite and Satellite Precipitation Persian-cdr In Khuzestan Province. *Journal of Water Science & Engineering*, 6(14): 7-19. (In Persian with English abstract)
- 18- Seager R., Ting M., Held I., Kushnir Y., Lu J., Vecchi G., and Lau N.C. 2007. Model projections of an imminent transition to a more arid climate in southwestern North America. *Science*, 316(5828): 1181-1184.
- 19- Taylor K. E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7): 7183-7192.

- 20- Taylor K.E., Stouffer R.J., and Meehl G.A. 2009. A summary of the CMIP5 experiment design. PCDMI Rep, 33.
- 21- Taylor K.E., Stouffer R.J., and Meehl G.A. 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(4): 485–498.
- 22- Terando A., Keller K., and Easterling W. E. 2012. Probabilistic projections of agro-climate indices in North America. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 117(D8): D08115.
- 23- Teutschbein C., and Seibert J. 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. Journal of Hydrology, 456, 12–29.
- 24- Watanabe S., Kanae S., Seto S., Yeh P.J., Hirabayashi Y., and Oki T. 2012. Intercomparison of bias correction methods for monthly temperature and precipitation simulated by multiple climate models. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 117(D23).
- 25- Wilks D.S. 2011. Statistical methods in the atmospheric sciences (Vol. 100). Academic Press.
- 26- Yoo C., Jung K., and Kim T. 2005. Rainfall frequency analysis using a mixed Gamma distribution: evaluation of the global warming effect on daily rainfall. Hydrological Processes, 19(19): 3851–3861.



Evaluation of Simulated Precipitation and Temperature from CMIP5 Climate Models in Regional Climate Change Studies (Case Study: Major Rainfed Wheat-Production Areas in Iran)

M. Shokouhi¹– S.H. Sanaei Nejad^{2*}– M. Bannayan Aval³

Received: 18-12-2017

Accepted: 30-07-2018

Introduction: Achieving sustainable practices of mitigation and adaptation to climate change requires accurate projections of climate change in each region. In this regard, Coupled Model Inter-comparison Project (CMIP) over the past 20 years has shown a good performance. Therefore, new CMIP5 climate models are expected to be bases for many climate change studies. These models use a new set of emission scenarios called Representative Concentration Pathway (RCP) to project climate change. Climate change is expected to impact wheat production and food security in Iran. So far, no study has not been conducted to regionally project climate change based on new CMIP5 models and RCP scenarios over the major wheat-producing areas in Iran. Our objective was to evaluate the performance of CMIP5 climate models in simulating temperature and precipitation in these areas. In addition, different combinations of climate models were evaluated to select appropriate models in these areas.

Materials and Methods: According to the latest data, nearly 60% of rainfed wheat is produced within our study area. The mean monthly temperature and precipitation data were provided by Meteorological Organization of Iran for synoptic stations. Period of 1975-2005 was considered as a historical period (baseline period). We evaluated outputs from 21 GCMs from CMIP5 climate models for monthly values of total precipitation and mean surface air temperature. One in ten ensembles of each GCM model was evaluated as available. We used model outputs for two emission scenarios i.e. RCP-2.6 and RCP-8.5, for the future periods of 2045–2065 and 2080-2100 to project temperature and precipitation changes. We assigned the models into two groups, high resolution (models less than 2° latitude/longitude, high-re; 11 models) and low resolution (models greater than 2° latitude/longitude, low-re, 10 models). Output GCM models were used for a grid in which recorded data are available. We applied the equidistant quintile-based mapping method (EDCDF) to correct bias of monthly precipitation and temperature simulated by models in the historical period (1975-2005) and, then in the future periods. We also used the root mean square error (RMSE), the coefficient of correlation and the skill scores (SS) to evaluate the model performance.

Result and Discussion: Average of all ensembles of an individual model outperformed the other ensembles in simulating the historical climate. This superiority is largely caused by the cancellation of offsetting errors in individual ensembles of a model, and also reduces the effects of natural internal climate variability in simulations. Taylor diagram showed, contrary to a simulation of temperature, simulations of precipitation have great variability than observations and the standard deviation of simulated precipitation values was less than that of observations for most used models. The models simulated temperature much better than precipitation across the region. Contrary to precipitation, the simulated temperature did not show a significant difference among the models. Several combinations of models resulted in an improvement in precipitation and temperature simulations. Therefore, a combination of models can be used in regional climate change assessment studies. The models performance for simulating the historical climate was evaluated based on skill score (SS) and Δ (the Euclidian distance from perfect skill, point (1, 1, . . . , 1)). Many different combinations of 21 GCM models were evaluated, which combination of 7 models as selected models yielded a lower Δ and higher skill scores. For multimodal ensemble (MME) mean (All, high-re, low-re and Selected, models) Δ value was less than that for individual models. SS values in the simulation of precipitation were more than -3 for 75% of models during the high precipitation months. Uncertainty in the simulation of precipitation during the low precipitation months was

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

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

3- Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

more than that of high precipitation months and it was even much more in southern areas (especially in August and September). Uncertainties in temperature and precipitation changes projections were affected by the scenario, the time period and models selected. All models showed biases indicating the fact that direct use of such models in climate change studies (without bias correction) is not recommendable. Although the use of statistical methods for bias correction resulted in a significant reduction of nonsystematic biases, systematic biases were not considerably influenced. Precipitation will increase in northern areas toward the end of the century and a higher reduction in precipitation is anticipated in the southern areas. The average, long-term (2080–2100) temperature increase was 5.5°C under RCP-8.5. Further, temperature increase will be greater in the southern regions.

Conclusion: Performance of 21 GCMs from CMIP5 climate models were evaluated in major rainfed wheat-production areas in Iran and temperature and precipitation changes were projected under RCP-2.6 and RCP-8.5. Taking into account all GCM's initial conditions (if they are available) leads to a better performance. Simulations of models exhibited biases, so models output must be corrected before they can be used in regional climate change assessment studies. Although bias correction resulted in a significant reduction of nonsystematic biases, systematic biases were not significantly affected. The MME (All, high-re, low-re and Selected, models) consistently outperformed individual models for both precipitation and temperature suggesting that a smaller group of models can be used in regional climate change assessment. We recognized a subset of 21 models (7 selected models) based on performance that combination of them can provide the best performance and plausible future projections.

Keywords: Biases correction, Emission scenarios RCP, Skill Score (SS), Systematic biases

بررسی مقدار تریتیوم (^3H) در نزولات جوی و تعیین سن نسبی منابع آب‌های زیرزمینی در غرب کرمانشاه

حسین محمدزاده^{۱*} - طوبی سلیمانی ولیکندی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۸

چکیده

تریتیوم تنها ایزوتوپ رادیواکتیو هیدروژن، با نیمه‌عمر حدود ۱۲/۳ سال، موجود در ملکول آب است که می‌توان از آن برای تعیین سن آب در چرخه هیدرولوژیکی استفاده نمود. هرچند که آزمایش بمب‌های هیدروژنی به مقدار زیادی تریتیوم وارد اتمسفر و سپس وارد چرخه هیدرولوژیکی نموده است، اما در حال حاضر متوسط غلظت تریتیوم موجود در بارندگی‌های دنیا به حدود ۵ TU رسیده است. غلظت تریتیوم موجود در بارندگی به طول و عرض جغرافیایی، دما، ارتفاع و میزان رطوبت نسبی نیز بستگی دارد. هرچه میزان رطوبت نسبی بیشتر و دما کمتر و یا ارتفاع بیشتر باشد از غلظت تریتیوم کاسته می‌شود. در مقیاس جهانی مقدار غلظت تریتیوم در بارندگی در نیمکره شمالی بیشتر از نیمکره جنوبی بوده و در منطقه قطبی تقریباً ۴ برابر منطقه استوایی می‌باشد. اما در بارندگی‌های کشورهای همسایه ایران، کشورهای نزدیک به دریا (در کراچی، بحرین، آنکارا و آدنا) به دلیل افزایش بخار آب در جو، مقدار تریتیوم کمتری دارند. در این مقاله، غلظت تریتیوم در بارندگی‌ها و منابع آب زیرزمینی غرب استان کرمانشاه در آزمایشگاه ایزوتوپی دانشگاه واترلو کانادا اندازه‌گیری شده و سپس با استفاده از رادیوایزوتوپ تریتیوم، سن نسبی منابع آب زیرزمینی تعیین شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقدار غلظت تریتیوم در بارندگی‌های غرب استان کرمانشاه حدود ۶ TU و در آب‌های زیرزمینی بسیار کمتر از این مقدار می‌باشد. با توجه به تقسیم‌بندی آب‌ها بر اساس غلظت تریتیوم، آب نزولات جوی غرب استان کرمانشاه جدید (مدرن) و آب منابع آب زیرزمینی در محدوده آب‌های اخیراً تغذیه شده و آب‌های نسبتاً قدیمی یا ساب مدرن (آب‌های تغذیه شده قبل از سال ۱۹۵۰) به دست آمد. نمودار ترکیبی مقدار هدایت الکتریکی (EC) و مقدار غلظت تریتیوم در آب‌های منطقه، نشان می‌دهد که با افزایش EC در جهت جریان، مقدار تریتیوم کاهش و سن آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. سن منابع آب زیرزمینی در منطقه پاره به دلیل توسعه کارست و انتقال سریع آب‌های زیرزمینی، کمتر از مناطق سرپل ذهاب و روانسر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: باران، تریتیوم، سن نسبی، منابع آب زیرزمینی، کرمانشاه، ایران

مقدمه

محاسبه می‌گردد و زمان حرکت آب در منطقه غیراشباع را هم شامل می‌شود، به همین دلیل در مناطقی که سطح ایستابی در عمق زیاد قرار گرفته باشد باعث ایجاد خطا در محاسبات می‌گردد. سن آب زیرزمینی نشان می‌دهد منابع آب زیرزمینی از بارندگی‌های جدید تغذیه شده‌اند یا اینکه آب آبخوان در زمان‌های گذشته طی فرآیندهای آهسته نفوذ جمع شده است (۱۳).

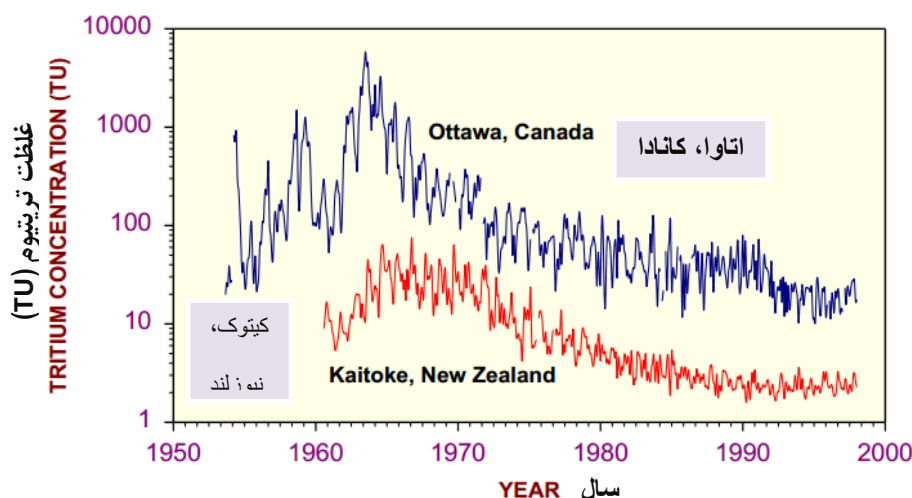
تریتیوم می‌تواند به صورت طبیعی در اثر واکنش نوترون‌های (n) اشعه کیهانی در لایه بالایی جو با ایزوتوپ ناپایدار نیتروژن (^{14}N) تولید شود (رابطه ۱). اتم‌های تریتیوم حاصل در جو اکسید شده و به آب تریتیوم دار (HTO)^۲ تبدیل می‌گردند و سپس به صورت باران به سطح زمین نزول و وارد منابع آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی می‌شود.

تنها رادیوایزوتوپی که در طبیعت جزئی از ملکول آب است، تریتیوم (^3H) می‌باشد که غلظت آن تحت تأثیر عوامل محیطی قرار نمی‌گیرد و در حرکت نسبت به آب دچار تأخیر نمی‌شود (۱۸). رادیو ایزوتوپ طبیعی تریتیوم (^3H) کاربرد زیادی در مطالعات منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی جهت تعیین درصد اختلاط آب‌های زیرزمینی، زمان اقامت و سرعت جریان آب داشته و روش بالارزشی برای مطالعات آبشناسی و مدیریت منابع آب محسوب می‌شود (۲۰). سن‌یابی آب‌های زیرزمینی توسط تریتیوم از لحظه نزول آب باران

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار مرکز تحقیقات آب‌های زیرزمینی و ژئوترمال (متاب)، و دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

(*)- نویسنده مسئول: (Email: mohammadzadeh@um.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v32i5.71136



شکل ۱- نقطه اوج تریتیوم مصنوعی در بارش اتاوا (۶)
Figure 1- The tritium peak in Ottawa precipitations (6)

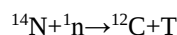
موقعیت منطقه

مقدار تریتیوم بارش در نقاط مختلف جهان توسط سازمان انرژی اتمی^۲ (IAEA) تحت عنوان شبکه جهانی ایزوتوپ بارش^۳ (GNIP) اندازه گیری می شود. شکل ۲ ایستگاه های مختلف در سطح جهان را نشان می دهد که برداشت ایزوتوپی در آن ها صورت می گیرد و در برخی از ایستگاه ها تریتیوم به صورت اختصاصی برداشت می شود، در ایران فقط ایستگاه تهران در شبکه جهانی ایزوتوپ بارش قرار دارد و مقدار تریتیوم آن اندازه گیری شده است. در این مقاله، مقدار تریتیوم در بارش ها در ۳ ایستگاه و همچنین در منابع آبی مناطق پاوه، جوانرود، روانسر و سرپل ذهاب (در ۱۲ نقطه) در پاییز سال ۲۰۱۵ اندازه گیری شده است که موقعیت ایستگاه های نمونه برداری در شکل ۲ - ب و ج نشان داده شده است.

مواد و روش ها

برای نمونه برداری تریتیوم بطری های پلاستیکی از جنس پلی اتیلن استفاده شد و در هنگام نمونه برداری قبل از پر نمودن ظرف، ظروف کاملاً با آب چشمه شستشو داده شد. هر چند که حجم نمونه برداری به غلظت تریتیوم آب بستگی دارد (جدول ۱)، اما در این تحقیق ۶۰۰ میلی لیتر آب از هر منبع آبی نمونه برداری شد. پس از درج تمامی اطلاعات مورد نیاز همچون زمان نمونه برداری، شماره نمونه و مختصات جغرافیایی محل نمونه برداری و...، کلیه نمونه ها به منظور اندازه گیری مقادیر تریتیوم به آزمایشگاه ایزوتوپ های

مقدار تریتیوم اتمسفری بعد از معاهده صلح در سطح بارش جهانی کاهش یافته و در حال حاضر مقدار آن در آب های جوی حدود ثابت تقریباً ۵ TU^۱ و یک برابر با یک اتم تریتیوم در ۱۰^{۱۸} اتم هیدروژن می باشد (۵).



رابطه (۱)

تریتیوم همچنین می تواند در اثر فعالیت های هسته ای ایجاد شود نتایج تحقیقات گذشته نشان می دهد که در طول دو دهه ای که آزمایش بمب هیدروژنی انجام می گرفت یک افزایش ناگهانی در مقدار تریتیوم اتمسفری بخصوص در سال ۱۹۶۳ دیده می شود (شکل ۱) که تنها با فروپاشی کاهش پیدا می کند و از این داده ها می تواند برای تعیین محل تغذیه و سرعت جریان استفاده نمود (۳). به طور کلی در مطالعات سن سنجی رادیوایزوتوپی با استفاده از تریتیوم می توان با استناد به سال انفجارات هسته ای و اوج غلظت تریتیوم به طور کیفی و بدون بیان عدد دقیق سن یابی انجام داد. هر دو تریتیوم طبیعی و مصنوعی همراه با بارش وارد چرخه آب شده و حضور آن در آب های زیرزمینی گواهی بر تغذیه ی فعال می باشد (۵). مطالعات کاربرد رادیو ایزوتوپ تریتیوم در ایران بسیار محدود انجام شده است، تعیین غلظت تریتیوم و تعیین سن آب در منابع آب زیرزمینی (۲، ۳، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۶ و ۱۹) تعیین غلظت تریتیوم در آب، (۱ و ۲۱) و برای تشخیص محل تغذیه و تخلیه آب (۳) هدف از این مقاله بررسی مقدار رادیوایزوتوپ تریتیوم (³H) در نزولات جوی و تعیین سن نسبی منابع آب زیرزمینی غرب استان کرمانشاه می باشد.

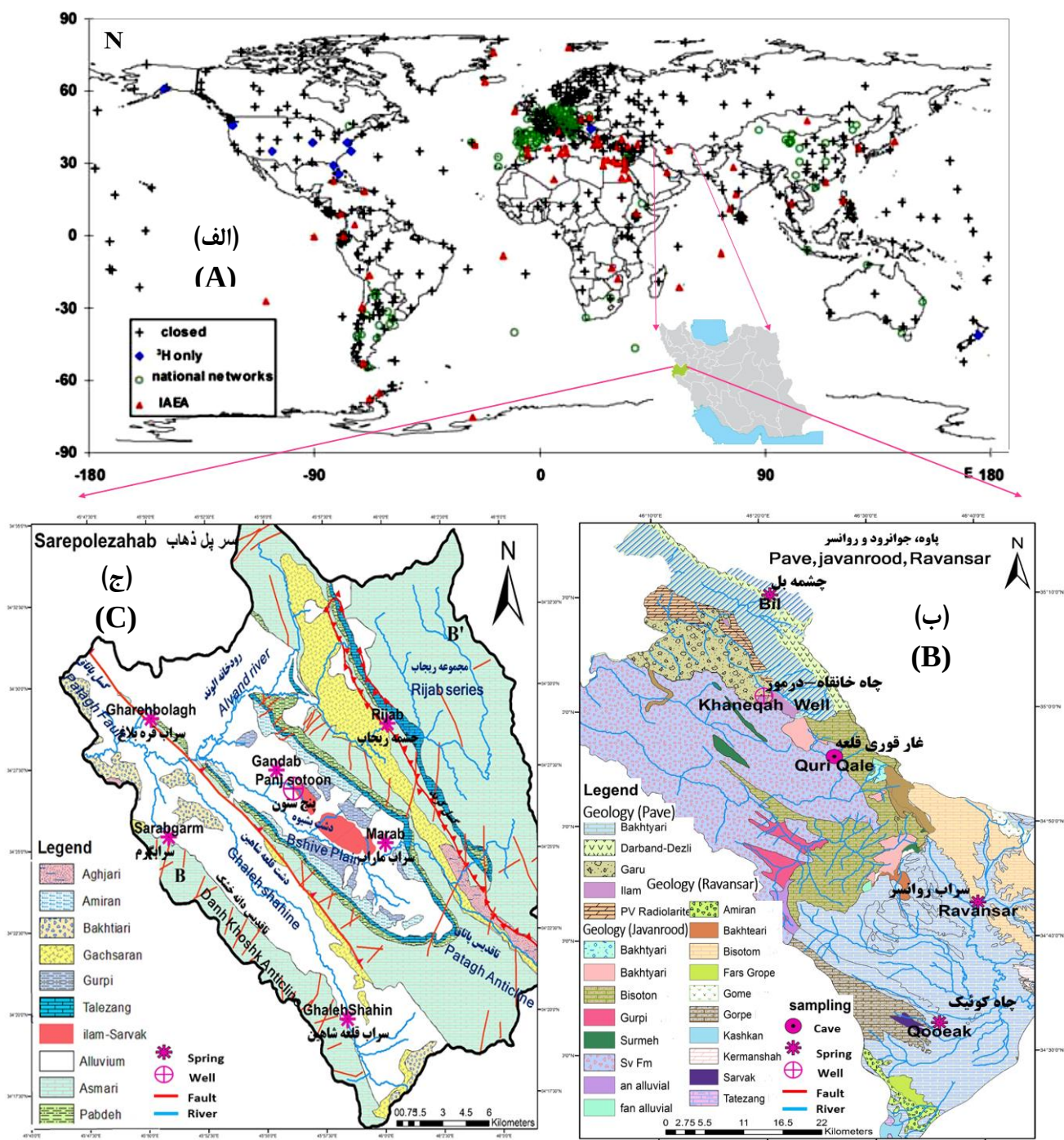
2- International atomic energy agency

3- Global network of isotopes in precipitation

1- Tritium unit

تقطیر صورت می‌گیرد و سپس تریتیوم آب تغلیظ یا غنی‌سازی می‌شود (آزمایشگاه ایزوتوپ‌های محیطی دانشگاه واترلو).

محیطی دانشگاه واترلو ارسال شد (۱۷). برای آب‌هایی با غلظت پایین تر تریتیوم، ابتدا برای حذف ناخالصی‌ها و مواد آلی عملیات



شکل ۲- ایستگاه‌های نمونه‌برداری، الف) در شبکه جهانی ایزوتوپ در بارش (برگرفته از GNIP)، ب) در مناطق پاوه، جوانرود و روانسر، ج) در منطقه سرپل ذهاب

Figure 2- Sampling stations, A) in the global isotope network in precipitation (retrieved from GNIP site) B) Pave, Javanrood Sarpolezahab area and Ravansar areas, C)

جدول ۱- خلاصه‌ای از نحوه نمونه‌برداری تریتیوم برای غلظت‌های متفاوت (برگرفته از آزمایشگاه ایزوتوپ های محیطی دانشگاه واترلو)
Table 1- Summary of tritium sampling for different concentrations (retrieved from the University of Waterloo Environmental Isotope Laboratory)

حجم	تری‌تیوم معمولی	Direct tritium DT +/- 6.0 TU)	50 ml
نمونه‌برداری	تری‌تیوم غنی‌شده	Enriched tritium (ET +/- 0.8 TU)	1000 ml
Volume	غلظت بسیار پایین تری‌تیوم	Ultra-Low Level tritium (ULL +/- 0.05 TU)	2500 ml
تجهیزات	پمپ یا گل کش. شلنگ کاملاً مقاوم از نظر هوا دهی از منبع تا بطری استفاده شود.		
Equipment	Thief sampler (bailer) or pump. Airtight hose from source to bottle is optimum set up.		
محافظت	محکم بستن درب ظرف برای جلوگیری از تبخیر و نگهداری ظروف دور از منابع رادیواکتیو.		
Preservation	Tightly sealed to prevent evaporation. Keep away from radioactive sources		
تکنیک و اصول	قرار دادن شلنگ در ته بطری و شستشوی آن با آب نمونه تا سه برابر حجم بطری و کامل پر کردن آن.		
Technique	برای حفاظت در برابر منابع رادیواکتیو، ظروف با گاز آرگون شستشو داده شوند.		
	Place hose at bottom of bottle and allow three volumes to flush, fill bottle completely.		
	Protect from all sources of radiation, flushed with Argon.		

دارای غلظت تری‌تیوم بیشتری است که دلیل آن بالا بودن پرتوهای کیهانی تولید شده توسط جریان نوترون (در منطقه قطبی جریان نوترون ۴ برابر بیشتر از منطقه استوایی است) بوده و در نتیجه میزان تولید بالا و غلظت آن در اتمسفر منطقه قطبی بیشتر است. همچنین مقدار تری‌تیوم با ارتفاع رابطه مستقیم و با دمای هوا رابطه عکس دارد به عبارتی هرچه دما بیشتر و یا ارتفاع کمتر باشد مقدار تری‌تیوم کمتر می‌شود و برعکس. غلظت تری‌تیوم در بارش‌های نزدیک ساحل به نسبت کمتر از مناطق دور از ساحل است که دلیل آن رقت بخار آب اقیانوسی است، بالا بودن مقدار تری‌تیوم در نزولات جوی نیمکره شمالی نسبت به نیمکره جنوبی، به دلیل تست سلاح‌های هسته‌ای می‌باشد (۶).

با توجه به داده‌های متوسط سالیانه تری‌تیوم، که از سایت GNIP در دسترس قرار گرفت، نمودار تغییرات مقادیر سالیانه تری‌تیوم در بارش‌های هر یک از ایستگاه‌های تهران و کشورهای همسایه ایران رسم شد (شکل ۴). تمامی ایستگاه‌ها افزایش ناگهانی غلظت تری‌تیوم در بارش سال ۱۹۶۲ را نشان می‌دهند، در ایستگاه‌های بحرین و آدنا، آنکارا و کراچی عامل اصلی کاهش مقدار غلظت تری‌تیوم در زمان اوج آن نسبت به تهران و کابل، نزدیکی به دریا و افزایش بخار آب در جو می‌باشند.

تغییرات غلظت تری‌تیوم در بارش‌ها و منابع آبی کرمانشاه

نتایج مقادیر تری‌تیوم اندازه‌گیری شده در نمونه‌های برداشت شده از باران و منابع آب‌های زیرزمینی غرب استان کرمانشاه در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به داده‌های ایزوتوپی آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (۱۷)، با استفاده از غلظت تری‌تیوم اندازه‌گیری شده در آب باران به عنوان غلظت اولیه تری‌تیوم (T_0) و در نمونه آب‌های زیرزمینی به عنوان غلظت تری‌تیوم در زمان t (T_t) و به کارگیری رابطه ۴، سن نسبی هر یک از منابع آبی محاسبه گردیده است (جدول ۲).

اتم رادیواکتیو تری‌تیوم دارای نیمه‌عمر تری‌تیوم برابر با ۱۲/۳۲ سال می‌باشد این به این معنی است که به مرور زمان اتم‌های آن دچار واپاشی شده و به هلیوم (^3He) تبدیل می‌شود بنابراین با اندازه‌گیری هلیوم می‌تواند با استفاده از رابطه ۳ سن دقیق نمونه‌های آب را محاسبه نمود. اصولاً در موقع نمونه‌برداری برای اهداف ^3H برای هلیوم نیز نمونه برداشت می‌گردد، اما در این پژوهش به دلیل اینکه اندازه‌گیری هلیوم غیرممکن و پرهزینه بود، داده‌های هلیوم اندازه‌گیری نشده است و سن آب‌های منطقه بر اساس تری‌تیوم اندازه‌گیری شده در نمونه‌های آب و با استفاده از رابطه ۴ محاسبه گردیده است (۶، ۹، ۱۱، ۱۴، ۱۶، ۱۹ و ۲۱).

$$^3\text{He}_t = T_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$T_t = T_0 e^{-\lambda t} \rightarrow t = -17.77 \ln \frac{T_t}{T_0} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن: T_t : غلظت تری‌تیوم اندازه‌گیری شده بعد از زمان t ؛ T_0 : غلظت اولیه تری‌تیوم در آب باران منطقه؛ λ : ثابت واپاشی برابر است با ۰/۰۵۶ برسال است. برای اندازه‌گیری تری‌تیوم نیازی به استاندارد مرجع نداریم چون غلظت تری‌تیوم به عنوان غلظت مطلق شناخته شده است و از واحد تری‌تیوم TU استفاده می‌شود (۵). داده‌های تری‌تیوم در سطح جهانی و منطقه‌ای از سایت سازمان بین‌المللی انرژی اتمی، بخش شبکه جهانی ایزوتوپ‌های بارندگی (GNIP) به دست آمده است.

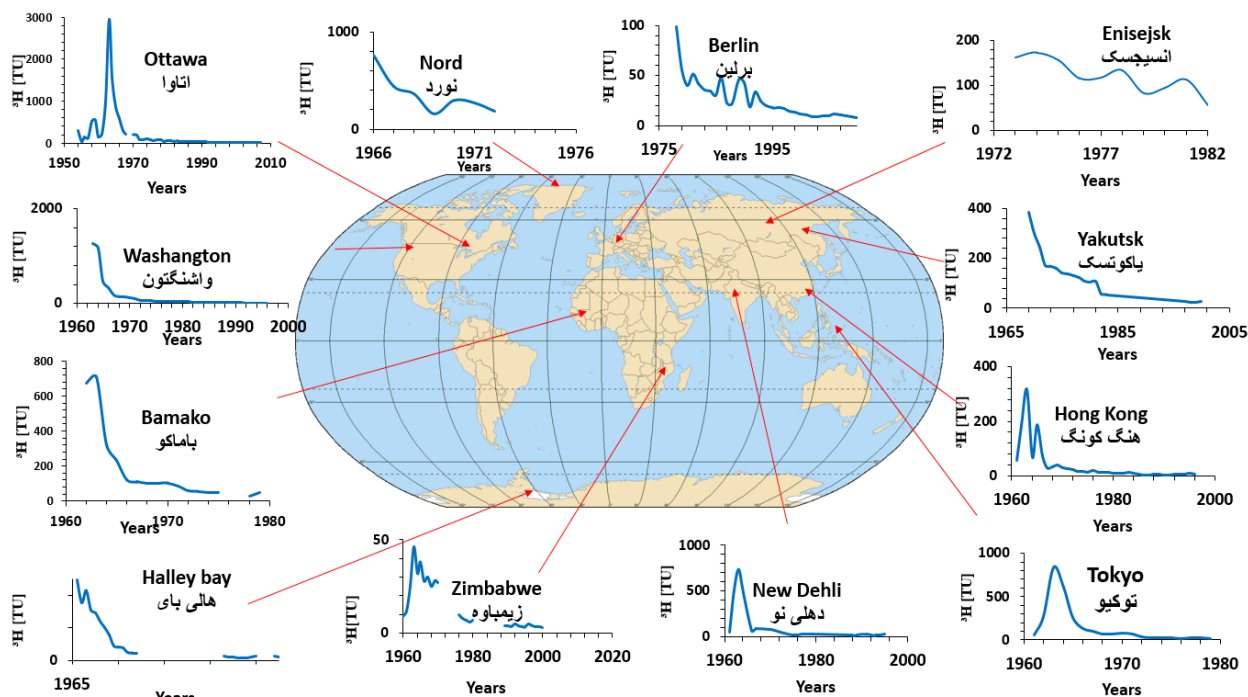
نتایج و بحث

تغییرات غلظت تری‌تیوم در مقیاس جهانی و منطقه خاورمیانه

با توجه به غلظت تری‌تیوم در نقاط مختلف جهان، قابل دسترس در سایت GNIP و نحوه تغییرات غلظت تری‌تیوم در جهان (شکل ۳)، می‌توان نتیجه گرفت که بارش‌ها در عرض‌های جغرافیایی بالاتر

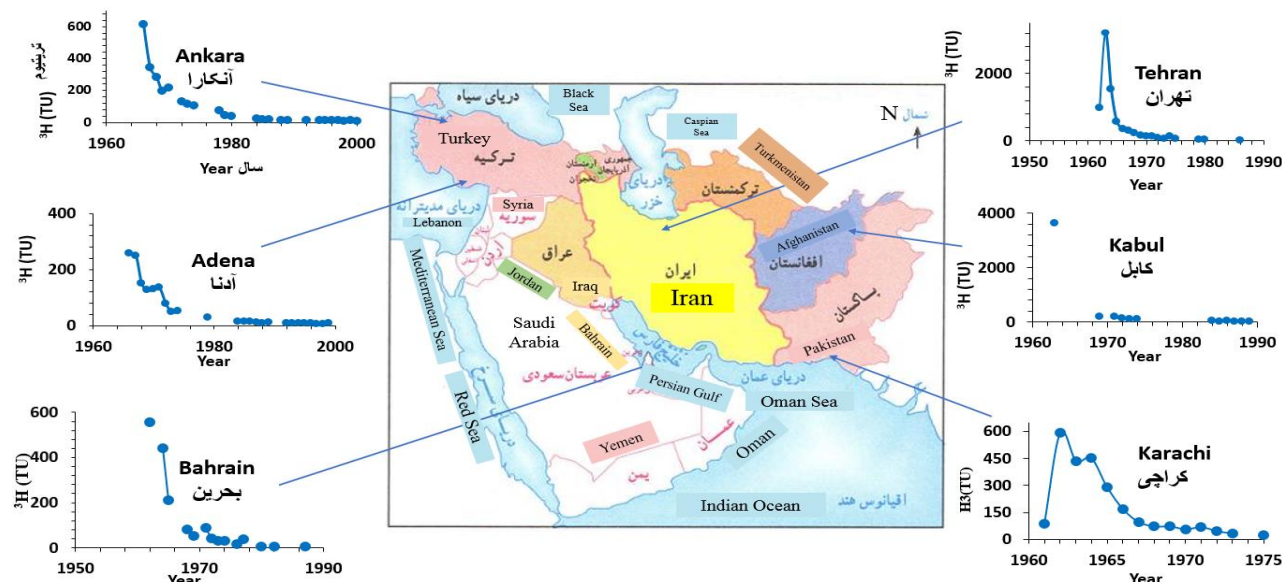
آب‌های زیرزمینی در سرپل ذهاب از غلظت تریتیوم آب باران همان منطقه به‌عنوان غلظت اولیه تریتیوم استفاده و محاسبات انجام گرفته است.

به‌منظور کاهش خطای محاسبات سن نسبی نمونه‌های آب زیرزمینی در منطقه، از غلظت تریتیوم نمونه آب باران همان منطقه در محاسبات استفاده شده است. به‌عبارت دیگر برای تعیین سن نسبی



شکل ۳- روند نوسانات تریتیوم در بارش‌های دنیا (برگرفته از GNIP)

Figure 3- The trend of tritium fluctuations in global rainfalls (retrieved from GNIP site)



شکل ۴- نوسانات سالانه تغییرات تریتیوم در مهم‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی کشورهای همسایه ایران (برگرفته از GNIP)

Figure 4- Annual variation of Tritium changes in the most important meteorological stations in neighboring countries of Iran (retrieved from GNIP site)

جدول ۲- مقادیر تریتیوم (^3H) اندازه‌گیری شده و سن نسبی محاسبه شده برای منابع مختلف در منطقه مورد مطالعه
Table 2- Measured tritium values and calculated relative age for different sources in the study area

منطقه Region	محل نمونه Sampling point	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Tritium %	تری‌تیوم (TU)	سن Age	سن نسبی Relative age
باران Rain	پاوه			5.8		آب جدید (۵ تا ۱۰) سال Modern (5 to 10 Yr)
	روانسر			5.3		
	پل ذهاب			5.7		
پاوه Paveh	چشمه بل (Bil Sp)	161.8	53	3.1	11	مخلوطی از آب نسبتاً قدیمی و آب جدیداً تغذیه‌شده (Mixture between submodern and recent recharge)
	چاه خانقاه- درمور (Khaneqah deep well)	377	63	3.7	7.8	
	غار قوری قلعه (Quri Qale cave)	281.5	62	3.6	7.8	
روانسر Ravansar	سراب روانسر (Ravansar Sp)	283.1	37.7	2.0	17.2	مخلوطی از آب نسبتاً قدیمی و آب جدیداً تغذیه‌شده (Mixture between submodern and recent recharge)
	چاه کوئیک (Qooeak well)	401	15	<0.8	33.4	
سر پل ذهاب Sarpolezahab	چاه پنج ستون (PanjSotoon well)	711	14	<0.8	34.7	آب نسبتاً قدیمی - تغذیه‌شده قبل از ۱۹۵۲ (Submodern - recharged prior to 1952)
	سراب گرم (Sarabgarm Sp)	449	14	<0.8	22.5	
	چشمه گنداب (Gandab Sp)	1546	14.0	<0.8	34.8	
	سراب قلعه شاهین (Ghaleh Shahin Sp)	358	17.5	1.0	30.9	مخلوطی از آب قدیمی و جدیداً تغذیه‌شده (Mixture between submodern and recent recharge)
	سراب قره‌بلاغ (Gharehbolagh Sp)	528	38.5	2.0	16.8	
	چشمه ریجاب (Rijab Sp)	316	28.0	1.6	22.5	
	سراب ماراب (Marab Sp)	333	19.0	1.1	29.1	

قدیمی و آب‌های جدید را نشان می‌دهند.

از روی منحنی واپاشی و با استفاده از رابطه ۴، نیز می‌توان سن نمونه‌های آب را محاسبه کرد. به‌عنوان مثال در منطقه پل ذهاب با استفاده از مقدار تریتیوم اندازه‌گیری شده در آب باران (T_0) که برابر ۵/۷ TU و مقدار تریتیوم اندازه‌گیری شده در آب سراب قلعه شاهین (T_t) که برابر ۱ TU است، درصد تریتیوم باقیمانده حدود ۱۷/۵٪ به دست می‌آید که با پلات کردن روی شکل ۶ سن آب سراب قلعه شاهین حدوداً ۳۱ سال به دست می‌آید که با سن محاسبه شده از طریق رابطه ۴ همخوانی دارد. سن نسبی محاسبه شده از هر دو طریق برای تمامی نمونه‌های آب در جدول ۳ ارائه شده است.

$$\text{رابطه (۴): } \%T = \frac{T_t \times 100}{T_0} \text{ باقیمانده}$$

نمودار مقایسه‌ای بین غلظت تریتیوم و سن آب (شکل ۸)، نشان می‌دهد که هر چه میزان غلظت تریتیوم در نمونه‌های آب بالا باشد، آب نمونه دارای سن کمتری است. بیشترین سن آب مربوط به

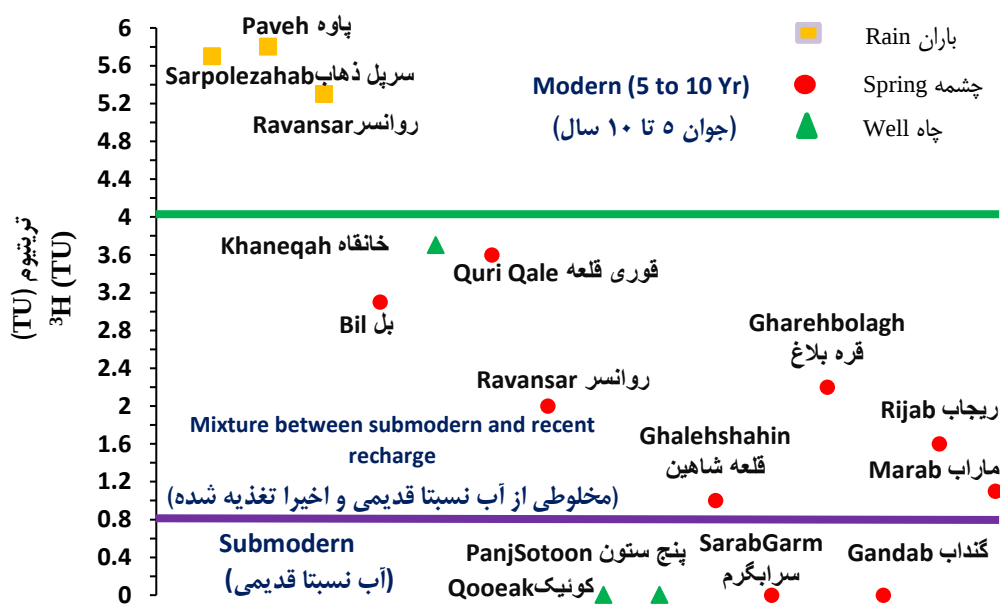
با توجه به تقسیم‌بندی سن آب‌ها بر اساس غلظت تریتیوم (جدول ۳) و همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، سن آب باران در هر سه منطقه مطالعاتی حدود ۵ - ۱۰ سال (آب جدید) به دست آمده است. همچنین سن نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در دو رنج آب‌های نسبتاً قدیمی یا ساب مدرن^۱ (تغذیه قبل از ۱۹۵۲) و مخلوطی از آب‌های نسبتاً قدیمی و آب‌های جدید^۲ (ترکیبی از آب نسبتاً قدیم و آبی که اخیراً تغذیه شده) تقسیم‌بندی شده‌اند. آب‌های زیرزمینی در ایستگاه‌های چاه کوئیک منطقه روانسر، چاه پنج ستون، سراب گرم و چشمه گنداب منطقه پل ذهاب آب‌های نسبتاً قدیمی و ایستگاه‌های نمونه‌برداری در چشمه بل، چاه خانقاه، غار قوری قلعه منطقه پاوه و سراب روانسر و سراب قلعه شاهین، سراب قره‌بلاغ، چاه ریجاب، سراب ماراب منطقه پل ذهاب مخلوطی از آب‌های نسبتاً

- 1- Sub modern water
2- Modern water

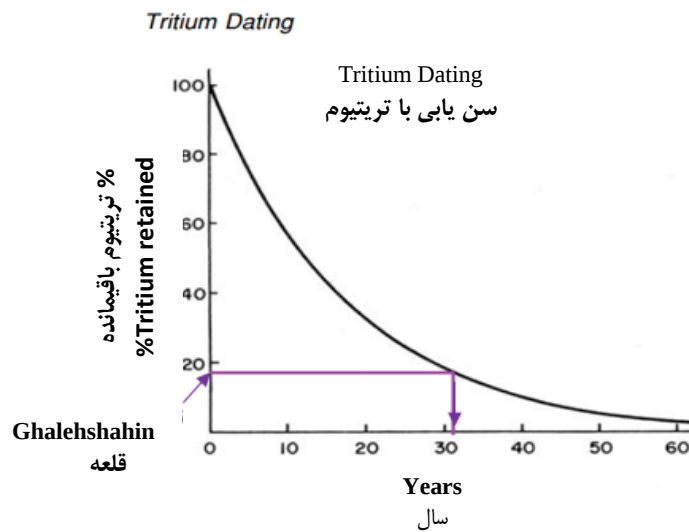
ایستگاه‌های چشمه گنداب، سراب گرم و چاه پنج ستون در منطقه پل زهاب و جوان‌ترین آب مربوط به غار قوری قلعه و چاه خانقاه- درمور در منطقه پاوه است. آب‌های زیرزمینی در منطقه پاوه به دلیل عبور از مناطق کارستی جوان‌تر از مناطق دیگر است. گسل پاتاق انتقال‌دهنده آب به سراب قره‌بلاغ است که دلیل اصلی سن کم سراب قره‌بلاغ در منطقه سرپل زهاب می‌باشد.

جدول ۳- تقسیم‌بندی سن آب‌ها بر اساس غلظت تریتیوم برای مناطق قاره‌ای (۷)
Table 3- Dividing the age of water based on tritium concentration for continental regions (7)

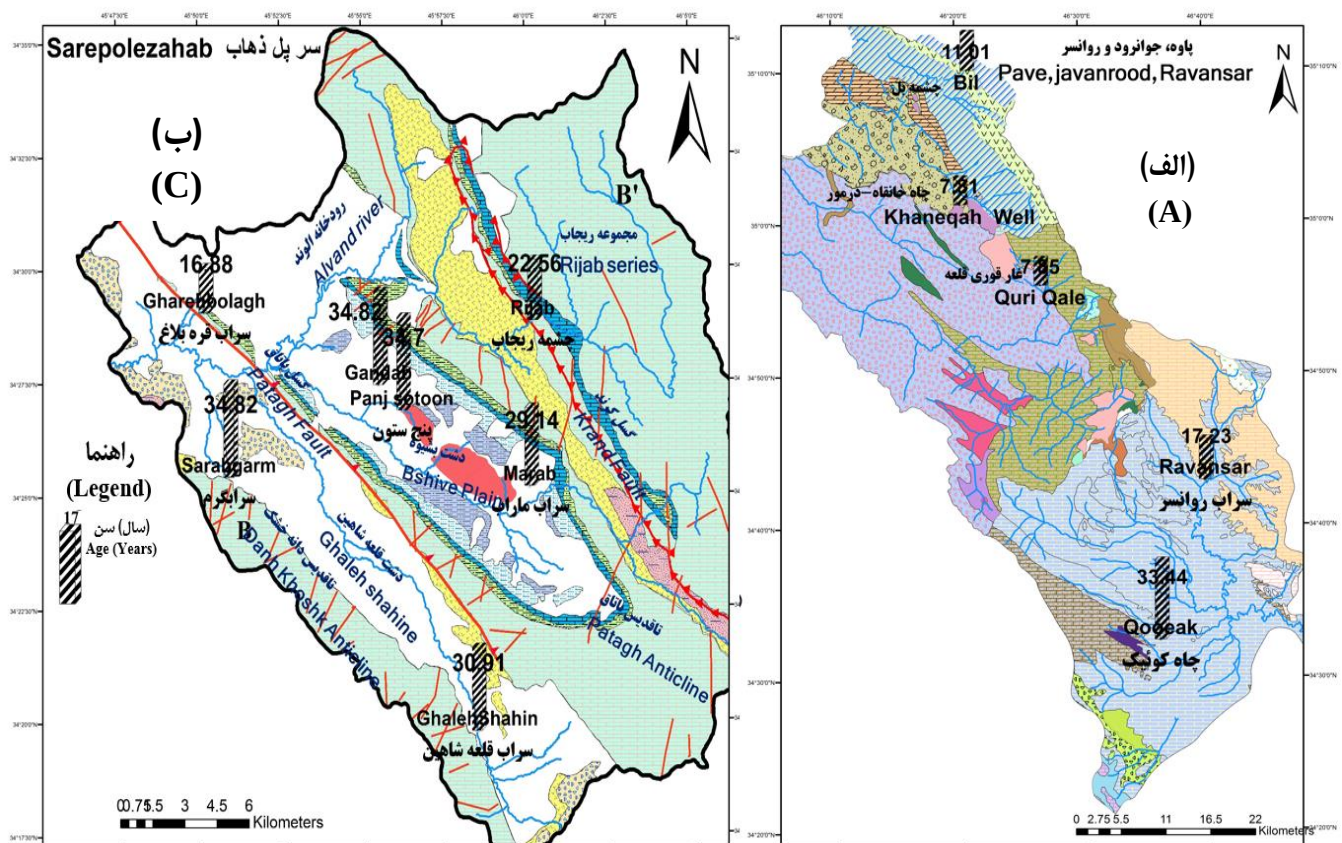
غلظت تریتیوم (TU) Concentration of tritium	توصیف سن Age description
<0.8	آب نسبتاً قدیمی - تغذیه‌شده قبل از سال ۱۹۵۲ (Submodern – recharged prior to 1952)
0.8 to 4	مخلوطی از آب نسبتاً قدیمی و آب جدیداً تغذیه‌شده (Mixture between submodern and recent recharge)
5 to 15	آب جدید > ۵ تا ۱۰ سال (Modern)
15 to 30	اندکی تریتیوم مربوط به بمب هسته‌ای وجود دارد ≈ ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۳ (Some “bomb” ^3H present)
>30	بخش قابل توجهی از آب در دهه‌های ۱۹۶۰s یا ۱۹۷۰s تغذیه‌شده است (Considerable component of recharge from 1960s or 1970s)
>50	آبی که عمدتاً در دهه ۱۹۶۰s تغذیه‌شده است (Dominantly the 1960s recharge)



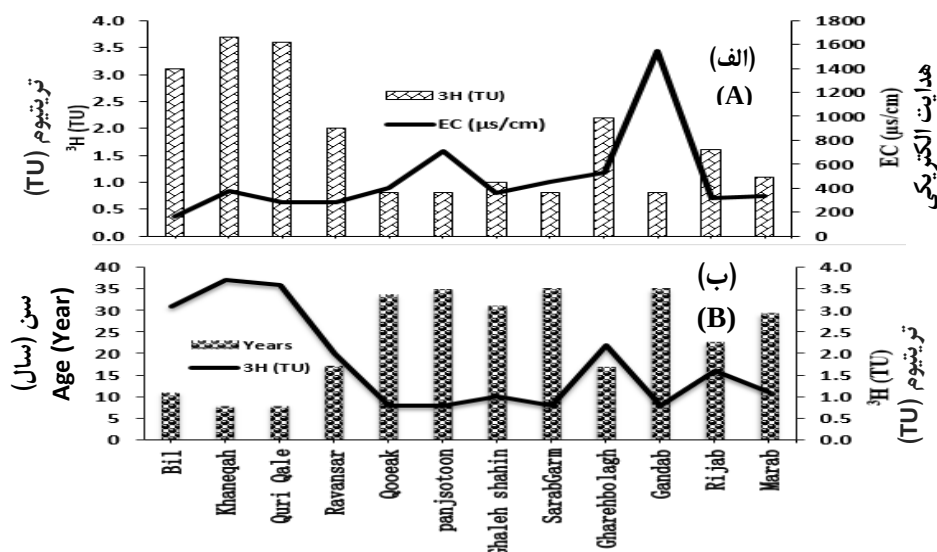
شکل ۵- طبقه‌بندی سن آب‌های باران و آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه
Figure 5- Age classification of rainwater and groundwater in the studied area



شکل ۶- منحنی واپاشی تریتیوم برای تعیین سن نمونه آب (۱۵)
Figure 6- Tritium decay curve to determine the water sample age (15)



شکل ۷- سن نمونه‌های آب در هر یک از منابع آبی منطقه مورد مطالعه (الف) در مناطق پاوه، جوانرود و روانسر، (ب) در منطقه سرپل ذهاب
Figure 7- Age of water samples in each of the water resources of the study area, A) in Pavah, Javanrood and Ravansar areas, B) In the SarpuleZahab area



شکل ۸- الف) تغییرات هدایت الکتریکی و غلظت تریتیوم و ب) رابطه بین سن آب و غلظت تریتیوم در منابع آبی مختلف
Figure 8- A) Variations of electrical conductivity and tritium concentrations and B) The relationship between age of water and the amount of tritium in different water sources

۱۵۴۶ $\mu\text{s/cm}$ می‌باشد. با توجه به سن محاسبه شده برای این سه ایستگاه به ترتیب ۲۹/۱۴ و ۳۴/۷۵ و ۳۴/۸۴ برای چشمه گنداب (منطقه تغذیه) به سمت چشمه گنداب (منطقه تخلیه) حرکت می‌کند. چشمه سولفور گنداب مقدار EC بالاتری را نسبت به ایستگاه‌های دیگر نشان می‌دهد که EC بالای این چشمه به دلیل رسوب گوگرد و ترکیبات آلی است که آب چشمه با آن در تماس است.

نتیجه‌گیری

به طور کلی با در نظر گرفتن عوامل مختلف می‌توان نتیجه گرفت که عرض جغرافیایی بالا، افزایش ارتفاع و کاهش دما، فاصله از آب‌های ساحلی به افزایش تولید تریتیوم طبیعی کمک می‌کند. ایستگاه‌های اطراف ایران همچون بحرین و آدنا و آنکارا و کراچی به دلیل نزدیکی به ساحل دارای غلظت تریتیوم کمتری در بارش می‌باشند. سن نمونه‌های نزولات جوی منطقه کرمانشاه حدود ۵-۱۰ سال و سن آب‌های زیرزمینی منطقه کرمانشاه در دو محدوده ساب مدرن (تغذیه قبل از سال ۱۹۵۰) و ساب مدرن و مدرن (مخلوطی از تغذیه جدید و تغذیه قبل از سال ۱۹۵۰) می‌باشد. آب‌های زیرزمینی در ایستگاه‌های چاه کوئیک منطقه روانسر، چاه پنج ستون، سراب گرم و چشمه گنداب منطقه پل ذهاب ساب مدرن و ایستگاه‌های نمونه‌برداری در چشمه بل، چاه خانقاه، غار قوری قلعه منطقه پاوه و سراب روانسر و سراب قلعه شاهین، سراب قره‌بلاغ، چاه ریجاب، سراب مارب منطقه پل ذهاب مخلوطی از آب ساب مدرن و آب مدرن را نشان می‌دهند. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که آب‌های

یکی از راه‌های مؤثر برای پی بردن به سن نسبی آب‌های زیرزمینی، بررسی رابطه بین غلظت تریتیوم و مقدار هدایت الکتریکی (EC) می‌باشد. تریتیوم و EC دارای رابطه معکوس با یکدیگر می‌باشند به عبارت دیگر در جهت جریان و با افزایش EC در منطقه مقدار تریتیوم کاهش و سن آب افزایش می‌یابد (شکل ۸- الف). به عبارت دیگر، اگر تریتیوم کم و EC بالا باشد نشان دهنده تعادل قوی بین آب و سنگ بوده و در نتیجه زمان ماندگاری آب طولانی است. به عنوان مثال در منطقه دشت قلعه شاهین، سرپل ذهاب که آب‌های زیرزمینی از سراب قلعه شاهین به طرف سرابگرم جریان دارد (۱۷). تریتیوم اندازه‌گیری شده در سراب قلعه شاهین ۱ TU و در سراب گرم کمتر از ۰/۸ TU می‌باشد و مقدار هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده در سراب قلعه شاهین ۳۵۸ $\mu\text{s/cm}$ و در سراب گرم ۴۴۹ $\mu\text{s/cm}$ می‌باشد، که بیانگر بالاتر بودن سن آب سرابگرم (به ترتیب ۳۰/۹۱ و ۳۴/۸۲ سال برای چشمه‌های سراب قلعه شاهین و سراب گرم است) و ارتباط آب این دو چشمه باهم می‌باشد.

به دلیل وجود سازندهای نفوذ ناپذیر در اطراف دشت بشیوه ارتباط هیدرولیکی مهمی بین آبخوان آبرفتی دشت بشیوه و دشت قلعه شاهین وجود ندارد (۱۷). در دشت بشیوه چاه پنج ستون بین چشمه ماراب و چشمه گنداب قرار دارد، نتایج به دست آمده (جدول ۳) نشان می‌دهد که تریتیوم اندازه‌گیری شده در چشمه ماراب ۱/۱ TU و در چاه پنج ستون و چشمه گنداب کمتر از ۰/۸ TU می‌باشد و مقدار هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده در چشمه‌های ماراب، چاه پنج ستون، چشمه گنداب به ترتیب ۳۳۳ $\mu\text{s/cm}$ و ۷۱۱ $\mu\text{s/cm}$

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد، آزمایشگاه ایزوتوپ های محیطی دانشگاه واترلو- کانادا و شرکت آب منطقه ای کرمانشاه (کد CN:KSHW-92123 و کد ملی ۷۵۹۷-۱۳۱۸۴۳) انجام شده است، لذا بر خود لازم می دانیم از پرسنل این ارگان ها کمال تشکر و قدردانی را داشته باشیم. همچنین از زحمات بی شائبه جناب آقای مهندس اسکندری و جناب آقای مهندس الطافی پور در طی انجام عملیات صحرایی کمال سپاسگزاری را داریم.

زیرزمینی منطقه پاه جوان تر و آب های زیرزمینی منطقه پل ذهاب قدیمی تر بوده است. باتوجه به نوآور بودن مطالعات تریتیوم در منابع آب زیرزمینی در کشور بسیار محدود می باشد. تنها تحقیقی که در استان گلستان انجام شده است، نشان می دهد که سن آبخوان آبرفتی حوضه آبریز قره سو (کمتر از ۱۰ سال) بسیار جوانتر از آب های زیرزمینی مناطق مورد مطالعه در استان کرمانشاه می باشد. بررسی توامان مقادیر EC و سن نسبی آب ها نیز نشان می دهد که در دشت قلعه شاهین منطقه سر پل ذهاب، آب از سمت سراب قلعه شاهین (محل تغذیه) بطرف سراب گرم (محل تخلیه) جریان می یابد و در دشت بشیوه آب از سمت چشمه ماراب (منطقه تغذیه) به سمت چشمه گنداب (منطقه تخلیه) حرکت می کند.

منابع

- 1- Aghamohammadi M. 2011. Determination of the concentration of tritium in heavy water, master's thesis. Arak University. (In Persian)
- 2- Al Charideh A.R., and Abou Zakhem B. 2010. Distribution of tritium and stable isotopes in precipitation in Syria. Hydrological Sciences Journal.
- 3- Bayan M. 2010. Application of environmental isotopes technique in ground water recharge within mullusa carbonate aquifer-west Iraq. Iraqi Journal of Desert Studies Special Issue of 1st Scientific Conference, ISSN: 1994-7801.
- 4- Blavoux B., and Dazy J., and Sarrot Reynauld J. 1982. Informmation about the origin of thermomineral waters and gas by means of environmental isotopes in Azerbaijan, Iran, and Southeast France. Journal of Hydrology, 56:23-38.
- 5- Clark I.D., and Fritz P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- 6- Clark I. 2015. Groundwater Geochemistry and Isotopes. CRC Press. Taylor & Francis Group, New York.
- 7- Craig H., and Lal D. 1960. The Production rate of natural tritium. Scripps Institution of Oceanography, University of California, La Jolla.
- 8- Geyh M. 2000. Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and Applications: International Hydrological Programme. Technical Documents in Hydrology, 39, Vol. IV.
- 9- Harms P., Visser A., and Moran J. 2016. Distribution of tritium in precipitation and surface water in California. Journal of Hydrology, 534: 63-72.
- 10- IAEA/WMO 2006. Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. <http://www.iaea.org/water>.
- 11- Kazemi G.A., Lehr J.H. and Perrochet P. 2006. Ground water Age. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- 12- Karimirad I., Hesam M., Bahrami Samani A., and Ezadpanah A. 2013. Dating of groundwater inaquifer of Golestan Province using tritium meagermant. Water and Soil Conservation, 20(6): 199-183. (In Persian with English abstract)
- 13- Karimirad I., Hesam M., Bahrami Samani A., and Ezadpanah, A., and Moghadasi N. 2016. Radioisotope technique of groundwater dating using tritium enrichment. Journal of Water and Sustainable Development, 4(1): 99-106. (In Persian with English abstract)
- 14- Kralik M., Benischke R., Wyhlidal S., and Philippitsch R. 2017. First water-isotope-map ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ^3H) of Austria: Applications, Extremes and Trends: Procedia Earth and Planetary Science, 17: 924- 927.
- 15- Mazar E. 2004. Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology Third Edition. Marcel Dekker, New York.
- 16- Michelsen N., Reshid M., Siebert C., Schulz S., Knoller K., Weise S.M., and Schuth C. 2015. Isotopic and chemical composition of precipitation in Riyadh, Saudi Arabia. Chemical Geology, 413: 51-62.
- 17- Mohammadzade H. 2016. Providing isotopic (^{18}O and ^2H) maps and the meteoric water line (^{18}O vs. ^2H) for Kermanshah Province (W of Iran) and determining the origin and residence time of Alluvial/Karstic groundwater using Geochemical/Isotopic tracers (project # KSHW-92123).
- 18- Morgenstern U., Daughney C. J., Leonard G., Gordon D., Donath F. M., and Reeves R. 2014. Using groundwater age to understand sources and dynamics of nutrient contamination through the catchment into Lake Rotorua, New Zealand. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 11(8): 9907-9960.
- 19- Sogut A., and Hawash G.H. 2011. Groundwater evaluation by using environmental isotopes in the northeast

- missan governorate, South of Iraq. Latest Trends in Energy, Environment and Development.
- 20- Sood D.D., Manohar S.B., and Reddy A.V.R. 1994. Experimentals in Radiochemistry. Eds, Iancas Publication, Mumbai.
- 21- Tadoros C.V., Hughes C., Carwford J., Hollins S., and Chisari R. 2014. Tritium in Australian precipitation: A 50 years record. Journal of Hydrology, 513: 262–273.



Investigating the amount of Tritium (^3H) in Precipitations and Determining the Relative Age of Groundwater Resources in West of Kermanshah

H. Mohammadzadeh ^{1*} - T. Soleymani Vlikandi ²

Received: 23-04-2018

Accepted: 09-09-2018

Introduction: Tritium is the only radioactive isotope of hydrogen, with a half-life of about 12.3 years, in water molecule which can be used to determine the age of water in a hydrological cycle. Although hydrogen bomb tests entered a lot of tritium into the atmosphere and then into the hydrological cycle, but at the moment the average amount of tritium concentration in global precipitations is reaching to about 5 TU. The purpose of this paper is to investigate the tritium concentrations in precipitations of the Middle East countries and to determine the tritium concentration in Iran precipitation (especially in precipitations of the west of Kermanshah province) and to determine the relative age of groundwater resources in Paveh, Javanrood, Ravansar and Sarpule Zahab areas using tritium radioisotope.

Materials and Methods: The required tritium data for the Iran and neighbors and for the global precipitations were retrieved from the Global Networks of Isotopes in Precipitation (GNIP) site of the International Atomic Energy Agency (IAEA). To measure the amount of tritium in Kermanshah precipitations, samples were collected from three rain stations, three wells and from nine springs in Paveh, Javanrood, Ravansar and Sarpule zahab areas during fall 2015 and 600 ml in 600 ml water polyethylene containers, all water samples were analysed at Waterloo University Isotope Laboratory.

Results and Discussion: The amount of tritium concentration in precipitations depends on latitude, longitude, temperature, altitude and the vapor mass. The higher amount of vapor and the lower temperature or the higher altitude, decreases the concentration of tritium. In areas such as Karachi, Bahrain and Adena, due to its proximity to the sea and the higher amount of vapor in the atmosphere, the tritium concentration in precipitation is low. In this paper, the tritium concentration in precipitation and groundwater resources of the west of Kermanshah province was measured at the University of Waterloo-Environmental Isotope Laboratory (UW-EIL). Then the average relative age of groundwater was determined. Results indicate that the tritium concentration in precipitation of the west of Kermanshah is about 6.0 TU and it is much lower in groundwater resources. Based on water age division using tritium concentration, the water of precipitations in the west of Kermanshah is modern and the water of groundwater resources are mixture of modern (recently recharge water) and sub modern water (the waters fed before 1950). By determining the amount of electrical conductivity (EC) and the concentration of tritium in the waters of the region, it is concluded that in the direction of flow, with increasing EC and decreasing the amount of tritium, the water age increases. By examining the EC and the relative age of the waters, it can be concluded that in the Sarpule Zahab area, in Ghaleh Shahin plain, groundwater recharge to the alluvial aquifer in Qaleh Shaheen spring area and then it flow in the direction toward Sarabgarm spring. However, in Boshive plain, the groundwater flow from Marab spring towards the Gandab spring. Tritium has a correlation with the air temperature. The higher the temperature, the more the concentration of tritium in the abundant water resources, and the older age for the water sample. In the study area, the average annual air temperature in the Paveh, Javanrood and Ravansar areas are about 15.1, 15.0 and 14.9 degrees Celsius, respectively, and it is about 19.9 degrees Celsius for Sarpule Zahab area. The average concentration of tritium in Pave and Javrrood is about 3.4 TU, however, in Ravansar and Sarpule Zahab areas are about 1.4 TU and 1.1 TU, respectively Therefore, it is evident that the relative age of groundwater is younger in the Paveh region and it is the oldest in Sarpule Zahab region.

Conclusions: The concentration of tritium is associated with the age of water. The lower the amount of tritium is the oldness of the water. The geology and rocks are affected by the movement of water, which is why the age of groundwater resources in the Paveh region due to the development of karst and the rapid transfer of groundwater is less than the Sarpule Zahab and Ravansar areas. On a global scale, the concentration of tritium in

1 and 2- Associate Professor, Groundwater and Geothermal Research Center (GRC) and M.Sc. Student Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad
(*- Corresponding Atuhor Email: mohammadzadeh@um.ac.ir)

the northern hemisphere's precipitations is much higher than that of in the southern hemisphere, and in the polar regions' precipitations it is approximately 4 times of the tropical region's precipitations. By investigating the concentration of tritium in the rain of neighboring countries of Iran it is concluded that the proximity to the sea and the increase of water vapor in the atmosphere have reduced the amount of tritium concentration.

Keywords: Age measurement, Iran, Groundwater resources, Kermanshah province, Rain, Tritium

Contents

Assessment of SWAT Hydrological Model in Catchments' Water Balance Simulation Located in Semi-Arid Regions (Case Study: Zayandeh-Rud River Basin) M.A. Amini- Gh. Torkan- S. Eslamian- M.J. Zareian- A.A. Besalatpour	863
Effect of Water Salinity and Soil Nitrogen Deficiency on Ks-Coefficient and Readily Available Water of Maize R. Saeidi- A. Sotoodehnia- H. Ramezani Etedali- B. Nazari- A. Kaviani	878
Effect Leaching Management on the Salinity Changes in the Drip Irrigation System (A Case Study: Semnan) H. Dehghanisanij - H. Haji Agha Bozorgi - A.A. Ghaemi- M. Noshadi	890
Design and Optimization of Heavy Metal Chromium (VI) from Aqueous Solutions by Tamarind Fruit Shell Activated with Sulfuric Acid M. Shahmoradi- A. Taebi- H. Hasheminejad	904
Investigation of the Soil-Landform Relationship in South of Herat, Western Afghanistan F. Mahmoudian- A. Karimi- A. Lakzian	918
Mathematical Modeling and Comparison of the Substrate Induced on Forest and Agricultural Soils M. Barin- E. Ehsan-Malahat- F. Asadzadeh	930
The Effect of Seed Inoculation with <i>Azotobacter</i> and <i>Azospirillum</i> on Yield and some Qualitative and Quantitative Characteristics of Safflower at Different Planting Date S. Hokmalipour- M. Panahyan Kivi- M. Shiri Janagard	942
Investigation of the Relationships between Rainfall Erosion Processes, Slope and Antecedent Water Content in Semi-Arid Soils A. Baliani- A.R. Vaezi	959
Soil Water Potential and Potassium Application Effects on Yield and Biochemical Characteristics of Thomson Navel Orange (<i>Citrus sinensis</i> L. Osbeck.) T. Raiesi- B. Moradi- B. Golein	975
Study on the Effect of Humic Acid and Fulvic Acid on the Wheat Yield and Water Use Efficiency under Drought Stress M. Pourmorad- M. Malakouti- M.M. Tehrani	985
The Efficiency of Arabic Gum on Improvement of Physical and Chemical Properties of Saline- Sodic and non-Saline- Sodic Soils Near Lake Urmia Z. Habibi- M. Rahmati- A. Alilou- E. Karimi	1001
Effect of Sulfur and Manure on Yield and Quality of Date Fruit c.v Barhee H. Dialami- M. R.Garshasbi	1012
Evaluation of Simulated Precipitation and Temperature from CMIP Climate Models in Regional Climate Change Studies (Case Study: Major Rainfed Wheat-Production Areas in Iran) M. Shokouhi– S.H. Sanaei Nejad– M. Bannayan Aval	1027
Investigating the amount of Tritium (H) in Precipitations and Determining the Relative Age of Groundwater Resources in West of Kermanshah H. Mohammadzadeh- T. Soleymani Vlikandi	1041

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 32

No. 5

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
Ghadiri, H.	Soil Science	Prof. Griffith 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., Tabriz University
Sanaei-Nejad, S.H.	Agricultural Meteorology	Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Taghvaeian, S.	Irrigation	Assis. Prof., Oklahoma University

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).