مجله
آب و خاک
(علوم و صنایع کشاورزی)

دانشگاه فردوسی مشهد
Ferdowsi University of Mashhad

جلد۳۵ شماره ۴
سال ۱۴۰۰

Vol. 35 No. 4
2021

Journal of
Water and Soil
(Agricultural Science and Technology)

شماره پیاپی ۷۸

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

ISSN:2008-4757

عنوان مقالات

اثر روش‌های خاک‌ورزی بر برخی خصوصیات خاک و بهره‌وری آب در دو رقم چغندرقند ۴۶۱
محمد خرمیان- محمدسعید حسنوندی- سیدرضا اشرفی زاده

تخمین بار معلق رسوبی با استفاده از روش‌های هوشمند تلفیقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل ۴۷۵
سید مهدی ثاقبیان

برآورد زمان تأخیر تغذیه در آبخوان مشهد-چناران با استفاده از روش همبستگی متقابل ۴۸۹
محمود ارجمند شریف- هادی جعفری

تأثیر فیتازهای سویه‌های *آسپرژیلوس* بر فراهمی فسفر از فیتات سدیم و جذب فسفر در گیاه ذرت ۵۰۵
تکتم ولیزاده حجار- امیر لکزیان- اکرم حلاج نیا- محبوبه مظهری

بررسی قابلیت انباشت زیستی جو برای سرب و کروم خاک در شرایط تنش خشکی ۵۱۹
محسن مداحی نسب- سیدمحسن موسوی نیک- سید احمد قنبری- علیرضا سیروس مهر- شاپور کوهستانی

پاسخ پایه‌های مختلف مرکبات به مصرف کمپوست گرانوله گوگردی و نیتروژن ۵۳۵
مجتبی محمودی- شهریار کاظمی

مدیریت زیستی فرسایش خاک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه) ۵۵۱
سیدحمیدرضا صادقی- عاطفه جعفرپور- مصیب فرج‌الهی- دنیا خطیبی‌رودبارسرا- مژگان مرادی‌سفیدچقائی- مصطفی ذبیحی‌سیلابی-
محمد خسروی- انشاءالله کولانی- بابک محمدی- محمدجواد ادیبی- هومن آذرنیا

برآورد مقدار کربن آلی خاک با استفاده از داده‌های طیفی در گستره VIS-NIR-SWIR-TIR ۵۶۷
حمیدرضا متین فر- محبوبه جلالی- زهرا دیبایی

تأثیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه و فیلترکیک بر رشد و غلظت عناصر غذایی در گیاه اسفناج در برهم‌کنش با علف‌کش ۵۸۳
کوثر اسدزاده- حبیب ا.. نادیان- عبدالرضا سیاهپوش- وحید کشاورز توحید

واکاوی تغییرپذیری طول فصل رشد و درجه-روزهای رشد محصولات کشاورزی در مناطق مرتفع و ساحلی ۵۹۹
سید فاضل ضیائی اصل- علی اکبر سبزی پرور

مجله آب و خاک جلد۳۵ شماره ۴ سال ۱۴۰۰
Journal of Water and Soil Vol.35 No.4 2021

Contents

The Effect of Tillage Methods on some Soil Properties and Water Productivity of Two Sugar Beet Cultivars 473
M. Khorramian – M.S. Hasanvandi - S.R. Ashrafeizadeh

Estimation of Suspended Sediment Load Using Integrated Intelligent Methods with Considering Model Uncertainty 488
S.M. Saghebian

Estimation of Groundwater Recharge Lag Time in Mashhad-Chenaran Aquifer Using Cross-Correlation Method 504
M. Arjmand Sharif - H. Jafari

Effects of Fungal Phytases (Aspergillus Strains) on Availability of Phosphorus from Sodium Phytate and Phosphorus Uptake in Corn Plant 517
T. Valizadeh - A. Lakzian- A. Halajnia- M. Mazhari

Investigation of Bioaccumulation Capacity of Barley for Soil Lead and Chromium under Drought Stress Conditions 534
M. Madahinasab - M. Mousavi Nik - A. Ghanbari- A.R. Sirousmehr- Sh. Kouhestani

Response of Different Citrus Rootstocks to Sulfur Granular Compost and Nitrogen 549
M. Mahmoudi - Sh. Kazemi

Biological Management of Soil Erosion (Case Study: Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran) 566
S.H. Sadeghi - A. Jafarpoor- M. Farajolahi- D. Khatibi Roodbarsara- M. Moradi Sefidcheghayi- M. Zabihi Silabi- M. Khosravi- E. Kolani- B. Mohammedi- M.J. Adibi and H. Azarniya

Estimation of the Amount of Soil Organic Carbon Using Spectral Data in the VIS-NIR-SWIR-TIR Spectral Range 581
H.R. Matinfar - M. Jalali- Z. Dibaei

Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria and Filter Cake on Growth and Nutrient Concentration in Spinach Plant in Interaction with Herbicide 597
K. Asadzadeh- H. Nadian- A. Siahpoosh- V. Keshavarz-Tohid

Investigating the Variability of Growing Season Length and Growing Degree-Days of Crops in Elevated and Coastal Areas 612
S.F. Ziaeiasl - A.A. Sabziparvar

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه 21/2015 مورخه1368/4/11 و درجه علمی- پژوهشی شماره 26524 تاریخ 1373/10/19 از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد35 شماره 4 مهر- آبان سال 1400

بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال 1398، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند.

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: رضا ولی‌زاده — استاد- تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

سردبیر: امیر فتوت — استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیئت تحریریه:

اوستان، شاهین	استاد- علوم خاک (دانشگاه تبریز)
تقوائیان، صالح	استادیار- آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، امریکا)
خراسانی، رضا	دانشیار- علوم خاک (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)
کمالی، غلامعلی	دانشیار- هواشناسی کشاورزی (دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران)
لکزیان، امیر	استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)
لیاقت، عبدالمجید	استاد- آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)
مساعدی، ابوالفضل	استاد- آبیاری ومهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)
موسوی بایگی، محمد	استاد- هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

ناشر: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

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

پست الکترونیکی: jswa3@um.ac.ir

مقاله‌های این شماره در سایت https://jsw.um.ac.ir/ به صورت کامل نمایه شده است.

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

بسم الله الرحمن الرحیم

مندرجات

اثر روش‌های خاک‌ورزی بر برخی خصوصیات خاک و بهره‌وری آب در دو رقم چغندرقند 461
محمد خرمیان - محمدسعید حسنوندی - سیدرضا اشرفی زاده

تخمین بار معلق رسوبی با استفاده از روش‌های هوشمند تلفیقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل 475
سید مهدی ثاقبیان

برآورد زمان تأخیر تغذیه در آبخوان مشهد-چناران با استفاده از روش همبستگی متقابل 489
محمود ارجمند شریف - هادی جعفری

تأثیر فیتازهای سویه‌های *آسپرژیلوس* بر فراهمی فسفر از فیتات سدیم و جذب فسفر در گیاه ذرت 505
تکتم ولیزاده حجار - امیر لکزیان - اکرم حلاج نیا - محبوبه مظهری

بررسی قابلیت انباشت زیستی جو برای سرب و کروم خاک در شرایط تنش خشکی 519
محسن مداحی نسب - سیدمحسن موسوی نیک - سید احمد قنبری - علیرضا سیروس مهر - شاپور کوهستانی

پاسخ پایه‌های مختلف مرکبات به مصرف کمپوست گرانوله گوگردی و نیتروژن 535
مجتبی محمودی - شهریار کاظمی

مدیریت زیستی فرسایش خاک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه) 551
سیدحمیدرضا صادقی - عاطفه جعفرپور - مصیب فرج‌الهی - دنیا خطیبی‌رودبارسرا - مژگان مرادی‌سفیدچقائی - مصطفی ذبیحی‌سیلابی - محمد خسروی - انشاءالله کولانی - بابک محمدی - محمدجواد ادیبی - هومن آذرنیا

برآورد مقدار کربن آلی خاک با استفاده از داده‌های طیفی در گستره VIS-NIR-SWIR-TIR 567
حمیدرضا متین فر - محبوبه جلالی - زهرا دیبایی

تأثیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه و فیلترکیک بر رشد و غلظت عناصر غذایی در گیاه اسفناج در برهم‌کنش با علف-کش 583
کوثر اسدزاده - حبیب ا.. نادیان - عبدالرضا سیاهپوش - وحید کشاورز توحید

واکاوی تغییرپذیری طول فصل رشد و درجه-روزهای رشد محصولات کشاورزی در مناطق مرتفع و ساحلی 599
سید فاضل ضیائی اصل - علی اکبر سبزی پرور

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 461-473

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۴۷۳-۴۶۱

مقاله پژوهشی

اثر روش‌های خاک‌ورزی بر برخی خصوصیات خاک و بهره‌وری آب در دو رقم چغندرقند

محمد خرمیان[1*]- محمدسعید حسنوندی[2]- سیدرضا اشرفی زاده[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

چکیده

مصرف بهینه آب، انرژی و بهبود خصوصیات فیزیکی خاک از ویژگی‌های خاک‌ورزی حفاظتی است که در این مطالعه تأثیر آن بر عملکرد و بهره‌وری آب چغندرقند پاییزه طی دو سال زراعی ۹۷-۹۶ و ۹۸-۹۷ بررسی شد. برای این منظور آزمایشی به‌صورت کرت‌های نواری خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در اراضی مرکز تحقیقات کشاورزی صفی‌آباد دزفول با بافت لومی رسی سیلتی اجرا شد. کرت اصلی شامل خاک‌ورزی مرسوم (CT)، چیزل (CH)، کم‌خاک‌ورزی (MT)، و بی خاک‌ورزی به صورت کاشت مستقیم در بقایای گندم (NT) و کرت فرعی شامل دو رقم پالما و شریف بود. آبیاری به‌صورت جویچه‌ای و با سیفون‌های هم قطر صورت گرفت. نتایج شاخص مخروطی (CI) و جرم مخصوص ظاهری خاک (BD) در لایه ۱۰-۰ برای کلیه روش‌های خاک‌ورزی مشابه و در یک سطح آماری قرار داشتند. مقادیر CI در عمق ۲۰-۱۰ سانتی‌متر با میانگین ۰/۷۹ مگاپاسکال در یک سطح اما BD در تیمار NT با مقدار ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب اختلاف معنی‌داری با سه روش دیگر خاک‌ورزی نشان داد. با این وجود هیچ یک از روش‌های خاک‌ورزی تأثیری در رشد و انشعاب ریشه چغندرقند نداشت. از طرفی درصد کربن آلی خاک، عملکرد و بهره‌وری آب چغندرقند، در تیمارهای خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری نداشتند. واکنش ارقام پالما و شریف به شیوه‌های خاک‌ورزی یکسان بود، حال آنکه بهره‌وری آب ریشه تر و شکر رقم پالما (به‌ترتیب ۹ تن در هکتار و ۱/۲ کیلوگرم در متر مکعب) بالاتر از رقم شریف (به‌ترتیب ۷/۳ تن در هکتار و ۱ کیلوگرم بر متر مکعب) بود. مجموع نتایج نشان داد که استفاده از کاشت مستقیم چغندرقند پاییزه در بقایای گندم امکان‌پذیر بوده و علاوه بر حذف آبیاری قبل از کاشت و کاهش تردد ماشین‌های خاک‌ورزی، با گزینش رقم مناسب می‌توان عملکرد کیفی را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری سطحی، بی خاک‌ورزی، چغندرقند پاییزه، جرم مخصوص ظاهری خاک، شاخص مخروطی

مقدمه

آب و انرژی از عوامل مهم تأثیرگذار در تولید محصولات کشاورزی محسوب می‌شود. ازاین‌رو مدیریت درست استفاده از این منابع در مقیاس مزرعه‌ای، منطقه‌ای، حوضه‌ای و ملی ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. رعایت اصول کشاورزی حفاظتی یعنی حفظ بقایا، حذف یا کاهش خاک‌ورزی و استفاده از تناوب‌های پرمنفعت از راهکارهای بهینه‌سازی مدیریت مصرف آب در مقیاس مزرعه‌ای است که با اجرای درست آن سلامتی خاک همانند افزایش تدریجی مواد آلی خاک و درنتیجه بهبود خصوصیات فیزیکی خاک (۱۲، ۱۵ و ۲۸)، کاهش فرسایش خاک (۳۳) و بهبود تولید محصولات مهمی همچون گندم، ذرت و چغندرقند (۹ و ۳۸) تضمین می‌شود. حذف مراحل تهیه زمین و در نتیجه کاهش مصرف سوخت بدون کاهش عملکرد محصول از ویژگی‌های دیگر خاک‌ورزی حفاظتی نسبت به روش خاک‌ورزی مرسوم (۳۵) است که معمولاً در اراضی با وسعت زیاد همچون کشت و صنعت‌های بزرگ اهمیت بالایی دارد.

چغندرقند یکی از گیاهان صنعتی است که در شرایط مرسوم از گاوآهن برای تهیه زمین استفاده می‌شود. برخی مطالعات حاکی از آن است که عملکرد روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی چغندرقند (استفاده از کولتیواتور، دیسک و کاشت مستقیم) در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم (استفاده از گاوآهن) کاهش یافته است (۸، ۱۴، ۲۰ و ۲۹). ازاین‌رو برخی محققان نشان داده‌اند که می‌توان کاهش احتمالی عملکرد در بی خاک‌ورزی را با افزایش تراکم بذر، اثرات مثبت آن بر ساختار خاک، امکان کاشت زودتر چغندرقند (۲۹) و سرعت بالای جوانه‌زنی (۳۰)

۱ و ۳- استادیاران پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی آباد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: khorramy.mohamad@yahoo.com)

۲- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات چغندرقند، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی آباد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران

DOI: 10.22067/JSW.2021.14888.0

پوشش داد. لافر و کوچ (۲۱) نشان دادند که در دو حالت خاک‌ورزی زیاد و کم خاک‌ورزی، عملکرد ماده خشک و عملکرد شکر سفید چغندرقند در مقایسه با خاک‌ورزی نواری (به هم زدن خاک در محل کاشت بذر) حدود ۷ درصد بیشتر است. نتایج برخی مطالعات حاکی از عملکرد یکسان چغندرقند در روش خاک‌ورزی مرسوم با روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی (۲، ۶، ۱۶ و ۲۶) و در مواردی برتری نسبی عملکرد ریشه چغندرقند در کم خاک‌ورزی نسبت به روش مرسوم (۳۶) و نداشتن اختلاف معنی‌داری در میزان قند تولیدی (۶ و ۳۰) است. این در حالی است که بی خاک‌ورزی یا کم خاک‌ورزی زراعت چغندرقند در بهبود خصوصیات فیزیکی خاک از جمله کاهش فشردگی خاک (۲۹)، کاهش جرم مخصوص ظاهری لایه سطحی خاک (۱۰-۰ سانتی‌متر)، افزایش ذخیره رطوبتی خاک (۳۳)، کاهش رواناب و فرسایش خاک (۲۲) مؤثر گزارش شده است. استیون و همکاران (۳۴) با مقایسه خاک‌ورزی نواری و مرسوم چغندرقند در تناوب با جو مالت در دو سامانه آبیاری بارانی خطی لپا و مزا[1] نشان دادند که در خاک‌ورزی نواری هزینه کاشت و مصرف کود در چغندرقند به تنهایی ۶۶ درصد و در دوره تناوب چغندرقند-جو مالت ۴۷ درصد کاهش یافت، اما اختلاف معنی‌داری بین دو شیوه آبیاری مشاهده نشد. تارکالسون و کینگ (۳۵) با بررسی اثر مدیریت آبیاری بارانی و خاک‌ورزی بر عملکرد چغندرقند نشان دادند که خاک‌ورزی نواری در تمام سطوح آبیاری، عملکردی مشابه خاک‌ورزی مرسوم داشته ضمن آنکه در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم مقدار رواناب کاهش و نفوذ آب افزایش یافت. همین نتایج توسط ایوانز و همکاران (۱۲) در منطقه سیدنی گرفته شد.

کاشت چغندرقند پاییزه در اراضی شمال استان خوزستان در ماه مهر و در سطحی بیش از ۱۰۰۰۰ هکتار صورت می‌گیرد (۱). غالب ارقام، خارجی (آنتک، پالما و سیلوتا) و رقم رایج داخلی رقم شریف است که با ماشین ردیف‌کار روی پشته کاشته و به‌صورت جویچه‌ای آبیاری می‌شود. میانگین عملکرد ریشه چغندرقند حدود ۵۵ تن در هکتار است (۱) که در صورت اعمال مدیریت درست در مراحل کاشت تا برداشت، عملکرد ریشه چغندرقند به بیش از ۹۰ تن در هکتار خواهد رسید (۱۹). سوزاندن بقایای گندم و پس از آن استفاده از گاوآهن برای آماده‌سازی بستر چغندرقند باعث شده تا بخش قابل‌توجهی از کربن آلی، که در چرخه تولید مواد آلی خاک مؤثر است و همچنین خاکدانه‌ها از بین رفته (۲۴) و خصوصیات فیزیکی خاک در جهت کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب تغییر یابد. از طرفی نتایج مطالعات فوق نشان داد که کاشت مستقیم چغندرقند در بقایای گندم و چاودار نقش مهمی در کاهش فشردگی خاک (۲۹) و کاهش رواناب (۱۵ و ۲۵) داشت. نتایج متناقض اثر بی خاک‌ورزی بر عملکرد چغندرقند در نقاط مختلف دنیا ضرورت بررسی بیشتر روش‌های خاک‌ورزی و از جمله بی‌خاک‌ورزی در شرایط اقلیمی ایران را نشان می‌دهد. ازاین‌رو مطالعه حاضر بر مبنای امکان کاشت مستقیم چغندرقند پاییزه در بقایای گندم و تأثیر آن بر عملکرد ریشه و بهره‌وری آب دو رقم شریف (نماینده ارقام ایرانی) و پالما (نماینده ارقام خارجی) و برخی خصوصیات فیزیکی خاک، در شرایط اقلیمی شمال خوزستان صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

موقعیت اجرای مطالعه

این مطالعه در اراضی مرکز تحقیقات کشاورزی صفی‌آباد دزفول با بافت خاک لومی رسی سیلتی (جدول ۱) در دو سال زراعی متوالی، ۱۳۹۷-۱۳۹۶ و ۱۳۹۸-۱۳۹۷ اجرا شد. این مرکز به‌ترتیب در عرض شمالی ´14.436 32º - ´15.933 32º و طول جغرافیایی 48º ´25.414 - 48º ´26.471 قرار دارد. متوسط بارش و تبخیر سالانه طبق اطلاعات ایستگاه هواشناسی سینوپتیک موجود در این مرکز به‌ترتیب ۳۱۷ و ۲۴۰۰ میلی‌متر و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۸ متر است. آب مورد نیاز مزرعه از شبکه آبیاری دز، با شوری ۰/۵۸ میلی‌موس بر سانتی‌متر تأمین شد. کل مقدار بارش سال اول و دوم به‌ترتیب ۲۶۸ و ۶۲۰ میلی‌متر (شکل ۱) و بارش مؤثر به روش SCS به ترتیب ۱۸۲/۴ و ۳۵۳/۳ میلی‌متر محاسبه شد.

متفاوت بودن مقدار و توزیع بارش‌ها در دو سال متوالی باعث شد تا تعداد آبیاری‌ها در سال اول ۹ و در سال دوم ۳ نوبت باشد (جدول ۳).

تیمارها

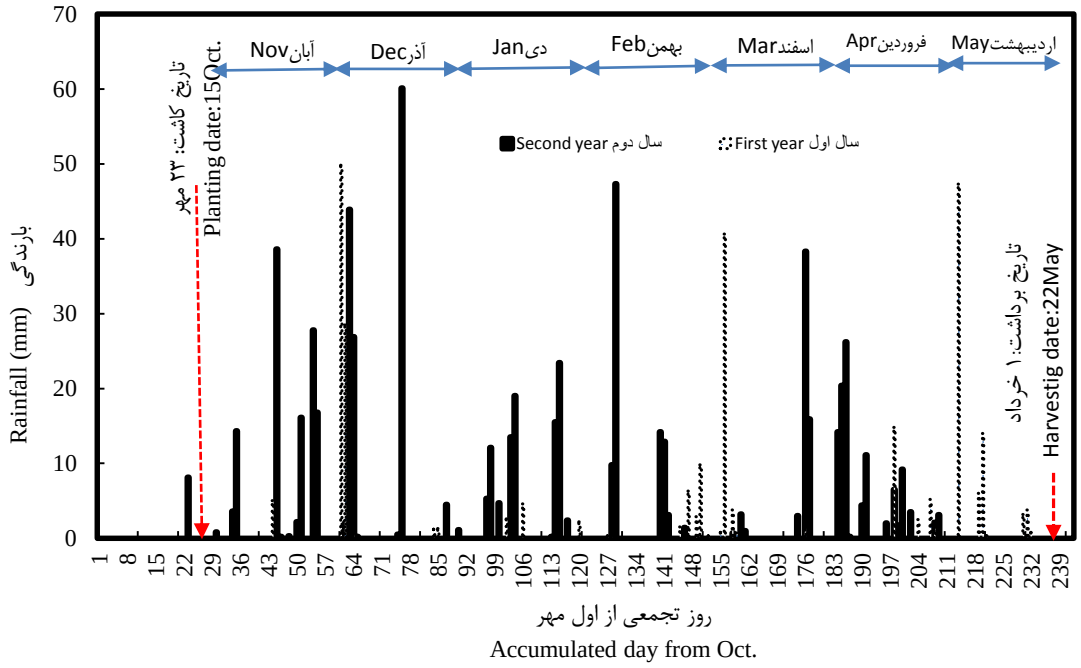
پس از برداشت گندم، چهار روش خاک‌ورزی در کرت اصلی و کاشت دو رقم شریف (رقم ایرانی) و پالما (رقم خارجی) در کرت فرعی به‌صورت کرت‌های یک‌بار خردشده در قالب آزمون بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. تیمارهای خاک‌ورزی شامل ۱- استفاده از گاوآهن برگردان‌دار (خاک‌ورزی مرسوم) (CT)، ۲- گاوآهن قلمی یا چیزل (CH) ۳- استفاده از دو دیسک عمود برهم (کم‌خاک‌ورزی) (MT) و ۴- کاشت در بقایا بدون انجام هیچ‌گونه عملیات خاک‌ورزی (بی خاک‌ورزی) (NT) اعمال شد (جدول ۲ و شکل ۲). آبیاری قبل از تهیه زمین در تمام تیمارها به غیر از تیمار بی‌خاک‌ورزی صورت گرفت و پس از آنکه رطوبت خاک به ۱۶ تا ۱۷ درصد وزنی رسید عملیات تهیه زمین مطابق جدول ۲ اعمال شد.

1 -LEPA, low-energy precision application; MESA, mid-elevation spray application

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه در زمان آماده‌سازی زمین

Table 1- Soil physical and chemical properties of field soil at the time of soil preparation

عمق خاک Soil depth (m)	pH	EC (dS m^{-1})	کربن آلی Organic carbon (%)	فسفر P (mg kg^{-1})	پتاسیم K (mg kg^{-1})	بافت خاک Soil texture
0-0.2	7.43	1.1	1.1	10.2	188	CL-SiCL
0.2-0.4	7.68	0.93	0.93	5.2	140	CL-SiCL
0.4-0.6	7.76	0.57	0.57	3.4	95	SiCL
0.6-0.8	7.62	0.36	0.36	2.2	77	SiCL
0.8-1.0	7.77	0.34	0.34	1.6	77	SiCL



شکل ۱- توزیع بارش در دو سال زراعی ۹۷-۹۶ و ۹۸-۹۷

Figure 1- Rainfall distribution in two years plnting 2017-2018 and 2018-2019

جدول ۲- مشخصات تیمارهای خاک‌ورزی در کرت اصلی

Table 2- Tillage treatments characteristics in main plot

روش خاک‌ورزی Tillage methods	مخفف Abbreviation	ماشین‌های خاک‌ورزی و کاشت Tillage and planting machines	تردد ماشین Machinery traffic
خاک‌ورزی مرسوم (Conventional tillage)	CT	شخم با گاوآهن + اجرای مراحل MT (Moldboard ploughing + MT steps)	7
چیزل (Chisel)	CH	چیزل + اجرای مراحل MT (Chisel ploughing + MT steps)	7
کم‌خاک‌ورزی (Minimum tillage)	MT	دو دیسک عمود برهم +کودپاشی با کودپاش سانتریفوژ + دیسک سبک + ایجاد جوی و پشته + کاشت با ردیف‌کار پنوماتیک Two perpendicular disks+ fertilizing centrifugal machine+ disking+ furrowing+ planting with pneumatic row planter	6
بی خاک‌ورزی (No-Till)	NT	سم‌پاشی، کاشت در بقایای گندم با ردیف‌کار پنوماتیک بی‌خاک‌ورز Spraying+ Planting in wheat residues with NT Pneumatic row planter	2

شکل ۲- تیمارهای مختلف خاک‌ورزی چغندرقند

Figure 2- Different tillage treatments of sugar beet

برای اجرای مکانیزه، طول هر کرت ۱۰۰ متر و عرض آن ۶ متر و فاصله پشته‌ها ۷۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. مصرف کودهای شیمیایی در هر دو سال آزمایش بر اساس توصیه کودی مبنی بر آزمون خاک (جدول ۱) بود. به این صورت که تمامی کود فسفر و پتاسیم از منبع سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم و یک‌دوم کود اوره به‌صورت پایه و بقیه آن در مرحله وجین، بلافاصله پس از تنک کردن بوته‌ها، به‌صورت یکسان به مزرعه داده شد. با این توصیف در سال اول، ۳۳۰، ۱۱۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار به ترتیب کود اوره، سوپر فسفات تریپل و پتاس و در سال دوم به ترتیب ۴۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار مصرف شد. بذر مصرفی بر مبنای یک واحد در هکتار برای تمام روش‌های خاک‌ورزی به‌صورت یکسان اعمال شد. کاشت چغندرقند در سال اول ۲۵ مهر ۱۳۹۶ و در سال دوم در ۲۳ مهر ۱۳۹۷ صورت گرفت. کلیه عملیات زراعی شامل تنک کردن بوته‌ها، وجین علف‌های هرز و کولتیواتور تیغه‌ای و مبارزه با آفات و بیماری‌های گیاهی برای تمام تیمارها به‌طور یکسان انجام شد.

اندازه‌گیری‌ها و تجزیه آماری

مقاومت نفوذ خاک برحسب مگا پاسکال تا عمق ۵۰ سانتی‌متر در لایه‌های ۲ سانتی‌متر با دستگاه نفوذسنج دیجیتالی دستی مدل SP1000 در پنج نقطه از هر کرت به‌صورت زیگزاگی و در همان زمان جرم مخصوص ظاهری خاک در لایه‌های ۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد (۲۵).

آبیاری جویچه‌ای با سیفون‌های هم قطر و اعمال روش کاهش دبی صورت گرفت. به این صورت که پس از رسیدن آب به انتها مقدار دبی خروجی با برداشتن یک سیفون از هر جویچه کاهش یافت. دور آبیاری بر مبنای تخلیه رطوبت سهل‌الوصول (۴) و عمق آب آبیاری بر مبنای تأمین میزان تخلیه رطوبتی در عمق توسعه ریشه صورت گرفت. عمق ناخالص آب مورد نیاز هر کرت بر حسب سانتی‌متر از رابطه (۱) محاسبه و با مشخص بودن سطح هر کرت بر حسب متر مربع، حجم مورد نیاز آبیاری هر تیمار محاسبه شد. با نصب فلوم WSC و کنترل دبی در کلیه تیمارها و تکرارها حجم آب مورد نیاز در اختیار گیاه قرار گرفت (۱۹).

$$I= [(\theta_{fc}-\theta_i)\times R_z]\times BD \div E_a \qquad (۱)$$

I عمق آب آبیاری بر حسب سانتی‌متر، θ_{fc} رطوبت حجمی خاک در ظرفیت مزرعه که با دستگاه صفحات فشار تعیین شد، θ_i رطوبت خاک قبل از آبیاری که بر اساس روش وزنی تا عمق ۱۰۰ و در لایه‌های ۲۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد (۲۳)، R_z عمق توسعه ریشه چغندرقند بر حسب سانتی‌متر که با حفاری خاک در چند نقطه از تیمارهای مختلف و اندازه‌گیری ریشه اصلی و استفاده از میانگین مقادیر در محاسبات صورت گرفت، BD جرم مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و E_a راندمان کاربرد بر حسب اعشار است. به این صورت که در هر نوبت آبیاری مقادیر آب ورودی از مقادیر آب خروجی از هر پلات کم شده و حاصل با فرض ناچیز بودن نفوذ عمقی بر مقدار آب ورودی تقسیم شد. میانگین تکرارهای هر روش خاک‌ورزی برای محاسبات آبیاری بعدی مورد استفاده قرار گرفت. حجم آب ورودی و خروجی کرت‌های اصلی با ۲۴ عدد فلوم WSC تیپ ۴ و ۵ اندازه‌گیری شد (شکل ۳). علاوه بر پارامترهای فوق،در طول دوره رشد تیمارهای چغندرقند به لحاظ بیماری‌ها و آفات نیز مورد بررسی قرار گرفت.

نمونه‌گیری چغندرقند در سال اول و دوم به‌ترتیب ۲۱۶، ۲۲۰ روز پس از کاشت به‌صورت برداشت یک پشته ۷۵ سانتی‌متر به طول ۱۰ متر (معادل ۷/۵ متر مربع) و محاسبه عملکرد ریشه، عملکرد شکر (حاصل‌ضرب عملکرد ریشه یا غده چغندرقند و درصد قند سفید) و همچنین شمارش تعداد انشعاب در ریشه چغندرقند که ممکن است در اثر فشردگی خاک ایجاد شود، اندازه‌گیری شد (۳۷). بهره‌وری آب (WP) بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب از نسبت عملکرد ریشه تر به مجموع حجم آب آبیاری و بارش مؤثر محاسبه شد (۳). برای محاسبه بهره‌وری آب شکر، مقدار شکر استحصالی به جای ریشه تر در نظر گرفته شد (۱۹). بارش مؤثر بخشی از مجموع بارندگی است که در محدوده پروفیل عمق توسعه ریشه گیاه قابل ذخیره است. در این مطالعه بارش مؤثر بر اساس تبخیر و تعرق و بارش ماهانه و کاربرد معادله SCS محاسبه شد (۳). تجزیه مرکب داده‌ها با نرم‌افزار آماری MSTATC، مقایسه میانگین با آزمون دانکن صورت گرفت.

شکل ۳- وضعیت ظاهری چغندرقند در تیمارهای مختلف خاک ورزی در مرحله رشد و توسعه
Figure 3- Appearance of sugar beet in different tillage treatments in the development stage

جدول ۳- نتایج مقادیر آب مصرفی چغندرقند در دو سال متوالی
Table 3- Results of sugar beet water consumption for two consecutive years

سال زراعی Crop year	تاریخ آبیاری Irrigation date	آب ورودی Inflow (mm)			
		NT	CH	MT	CT
1396-97 (2017-2018)	25.7.96 (17.10.2017)	86.8	134.9	117.3	118.9
	1.8.96 (23.10.2017)	63.1	70.6	72.4	64
	10.8.96 (1.11.2017)	55.4	61.9	62.5	62.4
	22.8.96 (13.11.2017)	55.5	49.3	52.6	53.1
	26.9.96 (17.12.2017)	55.6	64.5	51.8	51.7
	11.11.96 (31.1.2018)	55	55.7	44.6	49.4
	26.12.96 (17.3.2018)	68.8	75.5	72.8	73.4
	27.1.97 (16.4.2018)	63.4	70.1	66.8	73.9
	2.3.97 (23.5.2018)	94.7	93.8	94.2	94.3
Total مجموع		**598.4**	**676.3**	**635.3**	**641**
1397-98 (2018-2019)	23.7.97 (15.10.2018)	77.1	131.9	116.6	127.5
	29.7.97 (21.10.2018)	63.9	89.1	95.1	97.5
	16.2.98 (6.5.2019)	94.5	96.2	94.7	94.2
Total مجموع		**235.5**	**317.2**	**306.4**	**319.5**

نتایج و بحث

اثر روش‌های خاک‌ورزی بر حجم آب مصرفی

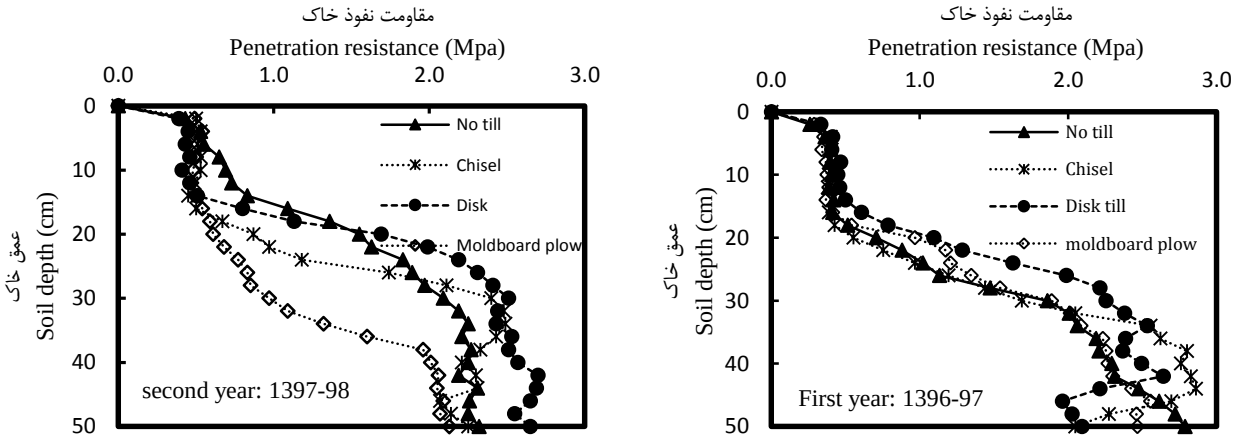
حجم آب مصـــرفی در هر یک از روش‌های خاک‌ورزی تقریباً مشـــابـه اما میانگین آب مصـــرفی در آبیاری اول (خاکاب) در روش بی‌خاک‌ورزی ۳۳ درصد و در مجموع کل نوبت‌های آبیاری ۱۶ درصد کمتر از روش خـاک‌ورزی مرســـوم بود (جـدول ۳). زیرا در روش بی‌خاک‌ورزی با وجود بقایا ســـرعت حرکت آب در جویچه‌ها کمتر از روش‌های دیگر خاک‌ورزی اسـت (۱۷)، اما به دلیل محیط خیس شده بیشـــتر جویچـه‌ها، محل قرارگیری بذر به ســـرعت مرطوب شـــده، به‌طوری‌که در آبیاری اول پس از رسـیدن آب به انتها (تکمیل شـدن زمان پیشـروی) محل قرارگیری بذر مرطوب و لزومی به تداوم آبیاری نبود. از طرفی اسـتفاده از چیزل و گاوآهن باعث افزایش سـرعت نفوذ آب در آبیاری اول و تداوم آبیاری پس از تکمیل زمان پیشـــروی برای مرطوب شـــدن محـل قرارگیری بـذر و در نتیجـه افزایش عمق آب مصـرفی (جدول ۳) شـد (۲۹). حسـین‌پور و همکاران (۱۷) با ۹ نوبت آبیاری و مجموع بارش ۳۷۶ میلی‌متر، کل مقدار آب مصـرفی در دوره رشـد چغندرقند پاییزه را ۵۵۹ میلی‌متر اندازه‌گیری کردند که با شرایط داده‌های سال اول این مطالعه تطابق دارد.

اثر خاک‌ورزی بر خصوصیات خاک

مقاومت نفوذ خاک شـاخصـی برای شناسایی اثرات خاک‌ورزی بر قابلیت نفوذ ریشـــه در خاک اســـت که به‌نوبه خود می‌تواند وضـــعیت توسـعه ریشـه چغندرقند را نشان دهد. مقاومت نفوذ خاک تا عمق ۵۰ سـانتی‌متر فارغ از روش خاک‌ورزی بین ۲/۷-۰ مگا پاسکال بود. این مقدار برای عمق ۱۰-۰ ســـانتی‌متر ۰/۴-۰ مگا پاســـکال و حاکی از نداشـتن اختلاف معنی‌دار بین چهار روش خاک‌ورزی است (شکل ۴ و

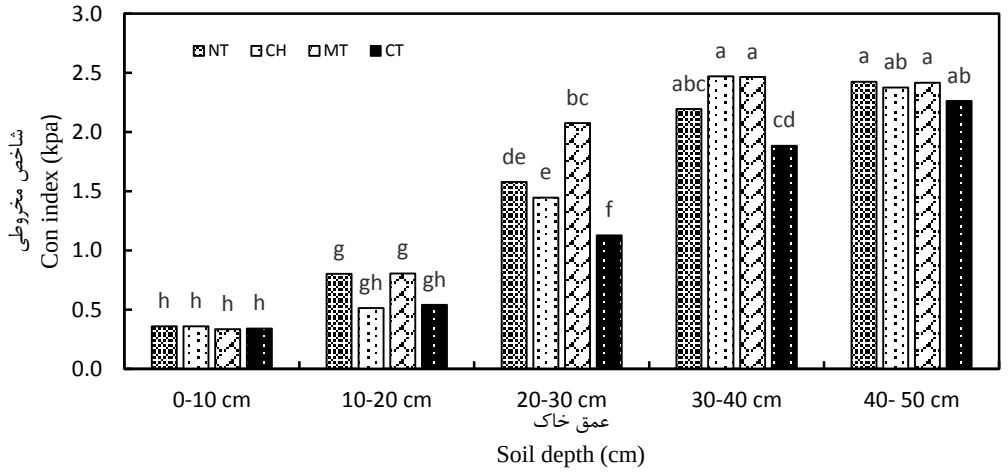
۵). ابراهیمی کولایی و همکاران (۱۱) میانگین فشـردگی خاک در ۴۰ مزرعه چغندرکاری در اســتان همدان را برای عمق ۲۰-۰ و ۴۰-۲۰ سـانتی‌متر به ترتیب ۱/۷ و ۳/۲۳ مگاپاسـکال بدسـت آورده و نشـان دادند که این مقادیر تاثیری در افت عملکرد چغندرقند ندارد. با افزایش عمق، فشـردگی خاک نیز به‌تدریج افزایش یافت (۵). با این توصـیف فشـردگی خاک در پروفیل ۵۰-۰ سـانتی‌متر در روش بی خاک‌ورزی، چیزل و کم‌خـاک‌ورزی بـه‌ترتیـب ۴۵ ، ۳۴ و ۵۹ درصـــد بیش از خاک‌ورزی مرسـوم بود. کوچ و همکاران (۲۰) حد آسـتانه فشـردگی خاک برای ممانعت از رشـد و نمو ریشـه بسـیاری از محصـولات و از جمله چغندرقند را ۴/۲، و شـروع کاهش رشـد ریشه چغندر قند را ۱/۹ مگاپاسکال گزارش نمود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت علی‌رغم اینکه فشردگی در بی خاک‌ورزی ۴۵ درصد بیش از خاک‌ورزی مرسوم است، محدودیتی در رشد و نمو ریشه ایجاد نخواهد شد.

بی خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسـوم انشـعاب ریشـه کمتری (به ترتیـب ۲/۶۷ و ۲/۸۳) نســبت به دو تیمار چیزل و کم‌خاک‌ورزی (به ترتیب ۴/۲ و ۵/۳ عدد) داشت (شکل ۶) که بیانگر نقش مثبت کاشت مسـتقیم چغندرقند در کاهش انشـعاب ریشـه است. براساس مطالعات اوهلر و همکاران (۳۷) میزان فشـردگی و منشـعب شدن ریشه که در کاهش عملکرد محصـول موثر اسـت، در دو حالت فشـردگی ناشی از تردد در مسـیر چرخ تراکتور با حالت بدون تردد مقایسه نموده و نشان دادند که اگرچه میزان تراکم در مسـیر چرخ تراکتور بیشتر بود، تفاوت معنی‌داری در عملکرد و منشعب شدن ریشه وجود نداشت.



شکل ۴- اثر روش‌های خاک‌ورزی بر مقاومت نفوذ خاک در مرحله میانی رشد چغندرقند

Figure 4- Effect of tillage methods on soil penetration resistance in mid stage of sugar beet growth

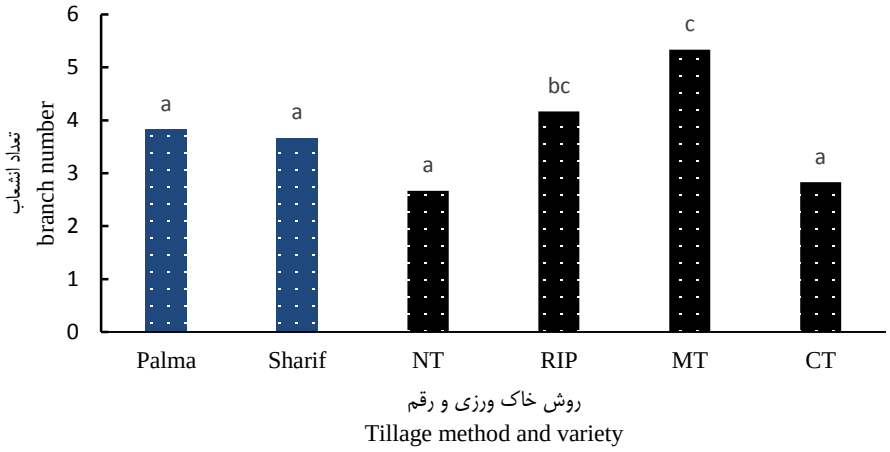


شکل ۵- مقایسه میانگین شاخص مقاومت نفوذ در مدیریت‌های مختلف خاک‌ورزی

(حروف مشابه به مفهوم قرارگیری در یک سطح آماری است)

Figure 5- Average comparison of penetration resistance index in different tillage management

(Similar letters indicate no statistical difference)



شکل ۶- میانگین تعداد انشعاب دو رقم چغندرقند در مدیریت های مختلف خاک‌ورزی

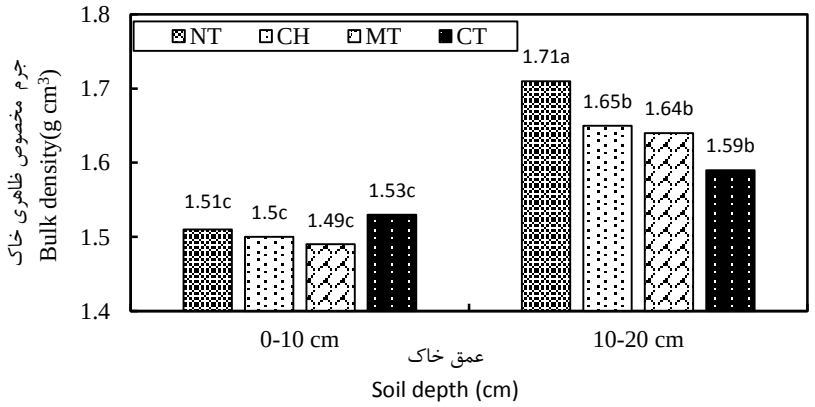
(حروف مشابه به مفهوم قرارگیری در یک سطح آماری است)

Figure 6- Average of branch number for two sugarbeet variety in different tillage managements

(Similar letters indicate no statistical difference)

نتایج اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری در لایه ۱۰-۰ سانتی‌متر منطبق بر نتایج شاخص مقاومت نفوذ، و نداشتن اثر معنی‌دار تیمارهای خاک‌ورزی بر جرم مخصوص ظاهری خاک بود (شکل ۷)، اما در عمق ۲۰-۱۰ سانتی‌متر، روش بی خاک‌ورزی با جرم مخصوص ظاهری ۱/۷۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب اختلاف معنی‌داری با سه روش دیگر خاک‌ورزی نشان داد. زیرا هیچ گونه عملیات خاک‌ورزی برای تهیه زمین صورت نگرفته است. ژائو و همکاران (۱۳) در چین با مقایسه بی خاک‌ورزی و خاک‌ورزی نواری در یک خاک لومی رسی و سینگ و همکاران (۳۳) در پاکستان با مقایسه مزرعه بی خاک‌ورزی و خاک‌ورزی رایج در حالت میان مدت و بلند مدت تناوب گندم-برنج در یک خاک لومی- رسی- سیلتی نشان دادند که جرم مخصوص ظاهری خاک در شرایط بی خاک‌ورزی افزایش یافت.

نتایج اندازه‌گیری درصد کربن آلی خاک در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر در انتهای دوره رشد حاکی از نبودن تفاوت معنی‌دار بین تیمارهای خاک‌ورزی بود (جدول ۴). باوجود این، برای یک دوره یک‌ساله درصد کربن آلی خاک در تیمار دیسک، چیزل و بی خاک‌ورزی به ترتیب ۸، ۱۲/۷ و ۱۴/۴ درصد نسبت به خاک‌ورزی مرسوم افزایش یافت (شکل ۸). مطالعات مارتین و همکاران (۲۴) افزایش کربن آلی و بهبود تدریجی خصوصیات فیزیکی خاک در شرایط خاک‌ورزی حفاظتی را تایید می‌کند.

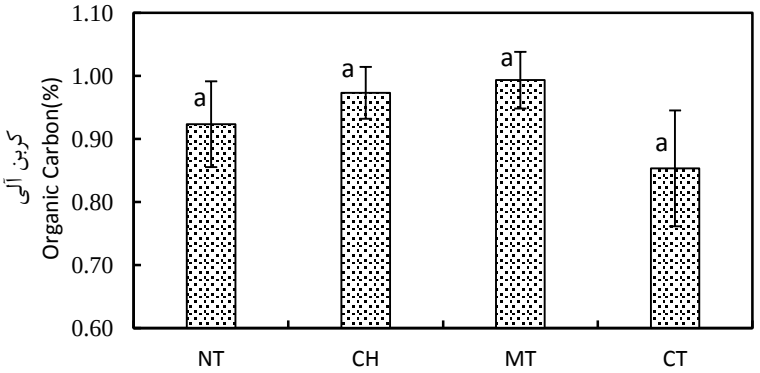


شکل ۷- اثر مدیریت‌های مختلف خاک‌ورزی بر جرم مخصوص ظاهری خاک

(حروف مشابه به مفهوم قرارگیری در یک سطح آماری است)

Figure 7- Effect of different tillage management on soil bulk density

(Similar letters indicate no statistical difference)



شکل ۸- مقایسه درصد کربن آلی خاک در زمان برداشت چغندرقند

(حروف مشابه به مفهوم قرارگیری در یک سطح آماری است)

Figure 8- Comparison of soil organic carbon percent at sugar beet harvest

(Similar letters indicate no statistical difference)

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب عملکرد و بهره‌وری آب چغندرقند

Table 4- Combined analysis of variance for yield and water productivity of sugarbeet

منبع Source	عملکرد ریشه Root yield	عملکرد شکر Sugar yield	بهره‌وری آب ریشه Root water productivity	بهره‌وری آب شکر Root water productivity
سال (Year)	8019^{**}	4.7^{ns}	20.2^{*}	0.36^{*}
تکرار سال R(Y)	45^{ns}	1.8^{ns}	0.86^{ns}	0.03^{ns}
خاک‌ورزی (Till)	96.2^{ns}	2.7^{ns}	2.46^{ns}	0.07^{ns}
سال×خاک‌ورزی (Y×Till)	80.4^{ns}	3.9^{ns}	1.25^{ns}	0.04^{ns}
خطا (Error)	205.3	2.6	3.8	0.05
رقم (Variety)	318.5^{*}	36.1^{**}	8.99^{*}	81^{**}
سال×رقم (Year×Variety)	1640^{**}	30.5^{**}	32.95^{**}	0.72^{**}
خاک‌ورزی×رقم (Till×Variety)	90.9^{ns}	3.1^{ns}	1.87^{ns}	0.05^{ns}
سال×خاک‌ورزی×رقم (Year×Till×Variety)	211^{*}	3.2^{ns}	4.09^{*}	0.06^{ns}
خطا (Error)	53.2	1.5	1.08	0.03
ضریب تغییرات (CV)	10.3	15	10.9	14.4

*و ** : به ترتیب در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪ معنی‌دار است.

*and **:Significant at the 5% and 1% levels of probability respectively.

اثر خاک‌ورزی بر عملکرد و بهره‌وری آب

اثر سال بر عملکرد ریشه در سطح ۱ درصد و بهره‌وری آب ریشه و شکر سفید در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). بارش‌های بی‌سابقه سال دوم (۶۲۰ میلی‌متر) بیش از دو برابر سال اول (۲۶۸ میلی‌متر) (شکل ۲) باعث شد تا بیماری‌های گیاهی به‌شدت افزایش یابد به‌طوری‌که میانگین عملکرد و بهره‌وری آب ریشه چغندرقند از ۸۳ تن در هکتار و ۱۰/۲ کیلوگرم بر متر مکعب در سال اول به ۵۷ تن در هکتار و ۸/۹ کیلوگرم بر متر مکعب در سال دوم کاهش یافت. این وضعیت در کلیه مزارع چغندرقند در شمال استان خوزستان نیز مشاهده شد. مجموع عوامل بارش و تأثیر سوء بیماری بر عملکرد باعث متفاوت شدن نتایج بهره‌وری آب در دو سال شد.

روش خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر عملکرد ریشه و شکر چغندرقند نداشت. با وجود این، عملکرد ریشه تیمار خاک‌ورزی مرسوم ۶ تا ۸/۵ درصد و عملکرد شکر سفید بین ۶ تا ۱۲ درصد بیش از سه روش خاک‌ورزی دیگر بود (جدول ۵). لافر و کوچ (۲۲) افزایش ۷ درصدی عملکرد چغندرقند در خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی و کاهش ۶ درصد در عملکرد ریشه و قند در بی خاک‌ورزی را نتیجه گرفتند. این محققان کاهش عملکرد در بی‌خاک ورزی را در اثر از بین رفتن پشته در برخی از نقاط در کشت قبلی (گندم) و یکنواخت نبودن توزیع بقایای کشت قبلی و در نتیجه اختلال در رشد و نمو بوته‌ها و کاهش عملکرد نهایی عنوان نموده‌اند. برخی مطالعات دو عامل غیر همسو، تراکم علف هرز(عامل منفی) و نگهداری رطوبت خاک و در نتیجه افزایش غده‌های چغندرقند (عامل مثبت) در روش بی‌خاک‌ورزی را اثرات خنثی‌کننده افزایش یا کاهش عملکرد دانسته به گونه‌ای که

موجب شده تا اختلاف معنی‌داری در عملکرد و اجزای عملکرد چغندرقند در مقایسه با روش‌های دیگر خاک‌ورزی حاصل نشود (۲ و ۶). با وجود نداشتن اختلاف معنی‌دار بهره‌وری آب ریشه و شکر در روش‌های خاک‌ورزی، مقدار این شاخص در بی خاک‌ورزی، ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب بود که مقدار آن نسبت به سه روش دیگر خاک‌ورزی ۸ درصد افزایش یافت. نتایج این مطالعه همسو با نتایج جابرو و همکاران (۱۸) است. این محققان نشان دادند که در یک دوره سه ساله علی‌رغم اینکه تفاوت معنی‌داری در بهره‌وری آب روش‌های خاک‌ورزی چغندرقند وجود نداشت، میانگین بهره‌وری آب ریشه در روش خاک‌ورزی نواری (۱۰/۶ کیلوگرم بر متر مکعب)، حدود ۱۰ درصد بیش از روش خاک‌ورزی مرسوم (۹/۶ کیلوگرم بر متر مکعب) بود.

جدول ۵- مقایسه میانگین عملکرد و بهره‌وری آب در دو رقم چغندرقند و روش‌های خاک‌ورزی

Table 5- Comparison of mean yield and water productivity in two sugar beet cultivars and tillage methods

رقم Variety	خاک‌ورزی Tillage	عملکرد ریشه Root yield (ton/ha)	عملکرد شکر Sugar yield (ton/ha)	بهره‌وری آب ریشه Root water productivity (kg/m^3)	بهره‌وری آب شکر Root water productivity (kg/m^3)
پالما Palma	NT	69.27^a	8.61^a	9.98^a	1.26^a
	CH	74.62^a	9.52^a	9.86^a	1.28^a
	MT	68.64^a	8.05^a	9.38^a	1.13^a
	CT	79.91^a	9.98^a	10.68^a	1.35^a
شریف Sharif	NT	69.20^a	7.84^a	9.98^a	1.14^a
	CH	65.35^a	6.79^a	8.38^a	0.89^a
	MT	67.89^a	7.10^a	8.99^a	0.96^a
	CT	69.39^a	7.49^a	9.10^a	1.00^a
میانگین Mean	Palma پالما	73.11^a	9.04^a	9.98^a	1.26^a
	Sharif شریف	67.96^b	7.30^b	9.11^b	1.00^b

حروف مشابه از نظر آماری دارای اختلاف معنی‌دار نیستند.

Similar letters indicate no statistical difference

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر سال و رقم بر عملکرد و بهره‌وری آب چغندرقند

Table 6- Comparison of mean effect of year and variety on sugar beet yield and water productivity

سال Year	رقم Variety	عملکرد ریشه Root yield	عملکرد شکر Sugar yield	بهره‌وری آب ریشه Root water productivity	بهره‌وری آب شکر Root water productivity
اول First	پالما Palma	80.2^a	8.6^a	9.8^a	1.04^b
	شریف Sharif	86.7^a	8.4^a	10.6^a	1.03^b
دوم Second	پالما Palma	66^b	9.5^a	10.2^a	1.46^a
	شریف Sharif	49.2^c	6.2^b	7.6^b	0.96^b

حروف مشابه از نظر آماری دارای اختلاف معنی‌دار نیستند.

Similar letters indicate no statistical difference

در مجموع می‌توان استدلال کرد اگرچه عملکرد و بهره‌وری آب در چهار شیوه خاک‌ورزی مورد مطالعه معنی‌دار نشد، کاشت مستقیم چغندرقند در بقایای گندم در کوتاه‌مدت به دلیل کاهش مصرف انرژی و سرعت عمل بیشتر (جدول ۲) بهتر از روش‌های دیگر خاک‌ورزی است. مطالعات جمتوس و کاوالاریس (۱۴) همسو با این نتایج بوده و نشان دادند که در روش‌های چیزل، روتیواتور، دیسک و بی خاک‌ورزی چغندرقند به‌ترتیب ۲۴/۲، ۴۴/۱، ۷۲ و ۵۳/۸ درصد مصرف انرژی کمتر از روش خاک‌ورزی مرسوم است.

رقم پالما با عملکرد و بهره‌وری آب ریشه و شکر سفید (به‌ترتیب ۷/۵، ۹/۹ و ۲۶ درصد) بالاتر از رقم شریف، بیانگر سازگاری بهتر آن با شیوه‌های مختلف خاک‌ورزی از جمله بی خاک‌ورزی بود، به‌طوری‌که میانگین عملکرد آن در روش‌های خاک‌ورزی (۷۳/۱ تن در هکتار) نسبت به رقم شریف (۶۸ تن در هکتار) بالاتر بود (جدول ۴ و ۵).

اختلاف مقدار بارش در دو سال انجام آزمایش باعث شد تا اثر متقابل سال و رقم برای صفات عملکرد و بهره‌وری آب در سطح ۱

درصد معنی‌دار شده و در نتیجه روند تغییرات عملکرد و بهره‌وری آب در دو سال اجرا متفاوت باشد. به این صورت که رقم شریف در سال اول با عملکرد ۸۶/۷ تن در هکتار بالاتر از رقم پالما با عملکرد ۸۰/۲ تن در هکتار بود اما در سال دوم علی‌رغم کاهش عملکرد هر دو رقم (جدول ۶) به دلیل تغییر شرایط اقلیمی (شکل ۲) و مقاومت بالای رقم پالما به بیماری‌ها و از جمله سرکسپورا (۲۳) باعث شد تا نه تنها عملکرد شکر رقم پالما کاهش نیافت، نسبت به سال گذشته افزایش معنی‌داری را نشان داد. شاخص‌های بهره‌وری آب ریشه و شکر سفید نیز روند مشابهی داشتند (جدول ۶). با این توصیف استفاده از ارقام مقاوم به بیماری‌های گیاهی نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری آب در شرایط تغییر اقلیم خواهند داشت.

نتیجه‌گیری

نتایج دوساله حاصل از این تحقیق نشان داد که کاشت مستقیم چغندرقند پاییزه در بقایای گندم در شمال استان خوزستان با حذف کامل تردد ماشین‌های خاک‌ورزی امکان‌پذیر است. علی‌رغم اینکه در روش بی خاک‌ورزی آماده‌سازی زمین صورت نگرفت، فشردگی خاک در لایه سطحی خاک برای تمام تیمارهای خاک‌ورزی یکسان و بیشترین تفاوت در دو عمق ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متر بود که مقادیر آن‌ها به‌ویژه در روش بی خاک‌ورزی نقشی در کاهش رشد ریشه و تعداد ریشه‌های منشعب نداشت. ازاین‌رو کاشت مستقیم چغندرقند رقم پالما در بقایای گندم با مقدار آب مصرفی ۵۹۸ میلی‌متر و بارش سالیانه ۲۶۸ میلی‌متر در شمال استان خوزستان و سایر مناطق با بافت و شرایط اقلیمی مشابه پیشنهاد می‌شود.

منابع

1- Abadzadeh H.R., Ahmadi K., Mohammadnia Afrozi S., Taghani R.A., Abbasi M., and Yari S. 2017. Agricultural Statistics. Volume II. Information and Communication Technology Center of Ministry of Agriculture Jihad. (In Persian)
2- Afshar R.K., Nilahyane A., Chen C., He H., Stevens W.B., and Iversen W.M. 2019. Impact of conservation tillage and nitrogen on sugar beet yield and quality. Soil and Tillage Research 191: 216-223.
3- Alizadeh M. 2007. Irrigation system design. Volume 1. Ferdowsi University of Mashhad Publications. (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 and Drainage Paper No. 56.
5- Arvidsson J., Bolenius E., and Cavalieri K.M. V. 2012. Effects of compaction during drilling on yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). European Journal of Agronomy 39: 44–51.
6- Belmont K.M. 2015. Effect of Tillage, Irrigation Amounts, and Nitrogen Rates in Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.). University of Idaho. Thesis.
7- Bengough A.G., and Mullins C.E. 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. Journal of Soil Science 41(3): 341–358.
8- Cavalaris C.K., and Gemtos T.A. 2002. Evaluation of four conservation tillage methods in the sugar beet crop. Journal of Scientific Research and Development 4: 1-24.
9- Chandra A., Joshi B., and Guru S.K. 2018. A comparative study on tillage practices and their impact on soil properties and root attributes of plants. International Journal of Chemical Studies 6(2): 2257-2263.
10- Desrochers J., Brye K.R., Gbur E., Pollock E.D., and Savin M.C. 2019. Long-term residue and water management practice effects on particulate organic matter in a loessial soil in eastern Arkansas, USA. Geoderma 337: 792-804.
11- Ebrahimi Koulaee H., Norouzi N., Hasani M., Bakhtiari M.R., Pedram A., and Noshad H. 2011. Effect of soil compaction on some quantity and quality characters of sugar beet. Journal of Sugarbeet 26(2): 214-205. (In Persian with English abstract)
12- Evans R.G., Stevens W.B., and Iversen W.M. 2010. Development of strip tillage on sprinkler irrigated sugarbeet. Applied Engineering in Agriculture 26(1): 59–69.
13- Gao W., Whalley W.R., Tian Z., Liu J., and Ren T. 2016. A simple model to predict soil penetrometer resistance as a function of density, drying and depth in the field. Soil and Tillage Research 155: 190-198.
14- Gemtos B.T.A., and Cavalaris C.K. 2001. Soil tillage effect in the sugar beet crop. First World Congress on conservation agriculture. 1-5 Oct. 2001 Madrid, Spain.
15- Gura I., and Mnkeni P.N.S. 2019. Crop rotation and residue management effects under no till on the soil quality of a Haplic Cambisol in Alice, Eastern Cape, South Africa. Geoderma 337: 927-934.
16- Halvorson A.D., and Hartman G.P. 1984. Reduced Seedbed Tillage Effects on Irrigated Sugarbeet Yield and Quality. Agronomy Journal 76(4): 603.
17- Hosseinpour M., Hosseinian S.H., and Yousefabadi V. 2017. Effect of irrigation management on quantitative and qualitative parameters of autumn-sown sugar beet. Journal of Sugarbeet 33(2): 221-235. (In Persian with English abstract)
18- Jabro J.D., Stevens W.B., Iverson W.M., Evans R.G., and Allen B.L. 2014. Crop water productivity of sugarbeet as

affected by tillage. Agronomy Journal 106(6): 2280-2286.
19- Khorramian M., and Hasanvand M.S. 2020. Determination of irrigation water productivity of direct drilling of autumn sown sugar beet in North of Khouzestan. Agricultural Engineering Research Institute. Report no. 58553. (In Persian with English abstract)
20- Koch H.J., Dieckmann J., Buchse A., and Marlander B. 2009. Yield decrease in sugar beet caused by reduced tillage and direct drilling. European Journal of Agronomy 30(2): 101–109.
21- Laufer D., and Koch H.J. 2017. Growth and yield formation of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under strip tillage compared to full width tillage on silt loam soil in Central Europe. European Journal of Agronomy 82: 182–9.
22- Laufer D., Loibl B., Marlander B., and Koch H.J. 2016. Soil erosion and surface runoff under strip tillage for sugar beet in Central Europe. Soil Tillage Research 162: 1–7.
23- Mahmoodi S.B., Sharifi H., and Khodaddadi S. 2012. Evaluation of Commercial Sugar Beet Cultivars for Resistance to Cercospora Leaf Spot Under Field Condition. Plant Protection 34(2): 23-32.
24- Martín-Lammerding D., Tenorio J.L., Albarran M.M., Zambrana E., and Walter I. 2013. Influence of tillage practices on soil biologically active organic matter content over a growing season under semiarid Mediterranean climate. Spanish Journal of Agricultural Research 11(1): 232-243.
25- Merten G.H., Araújo A.G., Biscaia R.C. M., Barbosa G.M.C., and Conte O. 2015. No-till surface runoff and soil losses in southern Brazil. Soil and Tillage Research 152: 85-93.
26- Miyazawa K., Tsuji H., Yamagata M., Nakano H., and Nakamoto T. 2004. Response of Soybean, Sugar Beet and Spring Wheat to the Combination of Reduced Tillage and Fertilization Practices. Plant Production Science 7(1): 77–87.
27- Mu X., Zhao Y., Liu K., Ji B., Guo H., Xue Z., and Li C. 2016. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat–maize cropping system on the North China Plain. European Journal of Agronomy 78: 32-43.
28- Nouri A., Lee J., Yin X., Tyler D. D., and Saxton A.M. 2019. Thirty-four years of no-tillage and cover crops improve soil quality and increase cotton yield in Alfisols, Southeastern USA. Geoderma 337: 998-1008.
29- Richard G., Boiffin J., and Duval Y. 1995. Direct drilling of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) into a cover crop: effects on soil physical conditions and crop establishment. Soil Tillage Research 34(3): 169–85.
30- Romaneckas K., Romaneckien R., Sarauskis E., Pilipavius V., and Sakalauskas A. 2009. The effect of conservation primary and zero tillage on soil bulk density, water content, and sugarbeet growth and weed infestation. Agronomy Research 7(1): 73-86.
31- Romaneckas K., Sarauskis E., Masilionytė L., and Sakalauskas A. 2013. Impact of Different Tillage Methods on Silty Loam Water Content in Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) Crop. Journal of Environmental Protection 4: 219-225.
32- Scholz G., Quinton J.N., and Strauss P. 2008. Soil erosion from sugar beet in Central Europe in response to climate change induced seasonal precipitation variations. Catena 72(1): 91–105.
33- Singh K., Mishra A.K., Singh B., Singh R.P., and Patra D.D. 2016. Tillage effects on crop yield and physicochemical properties of sodic soils. Land Degradation and Development 27(2): 223-230.
34- Stevens W.B., Evans R.G., Iversen W.M., Jabro J.D., Sainju U.M., and Allen B.L. 2015. Strip tillage and high-efficiency irrigation applied to a sugarbeet–barley rotation. Agronomy Journal 107(4): 1250–1258.
35- Tarkalson D.D., and King B.A. 2017. Effects of tillage and irrigation management on sugarbeet production. Agronomy Journal 109(5): 2396–2406.
36- Tarkalson D.D., Bjorneberg D.L., and Moore A. 2012. Effects of tillage system and nitrogen supply on sugarbeet production. Tillage System & Nitrogen Supply 49(3&4): 79–102.
37- Uhlir V., Marecek J., and Cervinka J. 2018. Impact of soil compaction in sowing on development and crops of sugar beet. Research in Agricultural Engineering 52(1): 11–16.
38- Wang Y., Zhang Y., Zhou S., and Wang Z. 2018. Meta-analysis of no-tillage effect on wheat and maize water use efficiency in China. Science of The Total Environment 635: 1372-1382.

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 461-473

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۴۷۳-۴۶۱

The Effect of Tillage Methods on some Soil Properties and Water Productivity of Two Sugar Beet Cultivars

M. Khorramian[1*] – M.S. Hasanvandi[2]- S.R. Ashrafeizadeh[3]

Received: 30-09-2019
Accepted: 17-07-2021

Introduction: North of Khuzestan province is one of the major areas for autumn sugar beet planting. Conventional tillage (CT) is widely practiced by sugar beet growers in this region. CT in sugar beet consists of burning wheat residue, using deep plowing with a moldboard plow or ripper plowing followed by several passes of disking, leveling, and furrowing. These aggressive tillage practices have many negative consequences for soils. Losses of soil organic carbon decreases soil permeability and consequently increases soil erosion and surface runoff. Therefore, applying conservation agriculture principles in sugar beet planting, conservation of residues and elimination or reduction of tillage, can help to optimize water use management and improve soil health on a farm scale. The objectives of this study were (i) to determine the possibility of direct planting of autumn sugar beet in wheat residues, (ii) to estimate sugar beet yield and crop water productivity (WP) under CT, chisel (CH), minimum tillage (MT) and no-tillage (NT) systems, (iii) to evaluate the response of sugar beet cultivars (Sharif and Palma) to different soil tillage systems, and (iv) to determine the effect of soil tillage systems on some soil physical properties.

Materials and Methods: A field experiment was conducted for two years (2016—2017) at the Safiabad Dezful Agricultural Research Center (32° 14.44´-32°15.93´ and 48° 25.41´-48°47). The soil of the study site was deep, well-drained with a silty clay loam texture. The mean annual precipitation and evaporation are 317 and 2400 mm, respectively, with an elevation of 108 m above mean sea level. Irrigation water was supplied from the Dez irrigation network without any salinity restrictions. The experimental was conducted in a split-plot arrangement based on a randomized complete block design with three replicates. The main-plot treatment was tillage method and the subplot treatment was two sugar beet cultivars (Palma and Sharif). Tillage treatments included conventional tillage (CT) (moldboard ploughing + MT steps), chisel (CH) (chisel ploughing + MT steps), minimum tillage (MT) (two perpendicular disks, fertilizing centrifugal machine, disking, furrowing, planting with pneumatic row planter), and no-tillage (NT) (spraying, planting with NT pneumatic row planter). The length and width of each plot were 100 and 6 m, respectively, and row spacing was 75 cm.

Soil penetration resistance or cone index (CI) readings were recorded in 2 cm increments to a depth of 50 cm using SP1000 digital penetration tester to reflect the soil compaction. Soil bulk density was determined in 0-10 and 10-20 cm layers. In the first and second year, sugar beet samplings were done 216 and 220 days after planting, by harvesting a row of 75 cm with length of 10 m (7.5 m^2). WP was calculated by dividing the root and sugar yield to irrigation water and effective rainfall (effective rainfall was calculated every year with SCS method). Composite data analysis and mean comparison were performed with MSTATC statistical software.

Results and Discussion: Results of CI showed no significant difference between four tillage methods at 0-10 cm depth. With increasing depth up to 30 cm, slight differences in soil compaction were observed for different tillage treatments, especially in the second year. Overall, compaction in the 0-50 cm profile in the CT and CH method were about 45% and 33%, respectively, lower than NT method, whereas in MT method it was about 37% higher than NT method. Results of root branch number analysis showed that the NT and CT treatments had the lowest branching (2.67 and 2.83, respectively) and the two CH and MT treatments had the highest branching (4.2 and 5.3, respectively). Therefore, NT had no negative effect on root growth of sugar beet. The results of bulk density measurements in the 0-10 cm layer were consistent with the results of the CI, but at depth of 10-20 cm, NT method with the highest bulk density (1.71 g cm^{-3}) had significant difference with the other three tillage methods. Tillage method had no significant effect on root and sugar yield and root and sugar WP. However, in CT treatment, root yield increased by 6-8.5% and sugar yield by 6-12%, while root and sugar WP in NT treatment was about 8% higher than in the other three tillage treatments. On the other hand, changing climate conditions,

1 and 3- Assistant Professors Agricultural Engineering Research Department, Safiabad Agricultural Research and Education and Natural Resources Center, AREEO, Dezful, Iran
(*- Corresponding Author Email: khorramy.mohamad@yahoo.com)
2- Assistant Professor Sugar Beet Research Department, Safiabad Agricultural Research and Education and Natural Resources Center, AREEO, Dezful, Iran
DOI: 10.22067/JSW.2021.14888.0

especially rainfall during two years of the experiment, resulted in significant interaction between year and cultivar for yield and WP at 1% probability level. In the first year, the yield of Sharif cultivar (86.7 t ha^{-1}) was higher than Palma (80.2 t ha^{-1}), but in the second year, despite the decreasing yield of both cultivars, higher resistance of Palma cultivar to Cercospora disease resulted in a significant increase in sugar yield and WP over last year.

Conclusion: The two-year results of this study showed that the direct planting of autumn sugar beet in wheat residues (NT) is possible. Sugar beet yield and WP were not significantly different in tillage methods, but NT reduced tillage traffic from 7 times to 2 times and reduced energy consumption. The response of the two sugar beet cultivars to different tillage methods was the same and among them the Palma cultivar had the highest yield because of its higher resistance to Cercospora disease.

Keywords: Autumn sugar beet, Cone index, Soil bulk density, Surface irrigation, Tillage

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 475-488

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۴۸۸-۴۷۵

مقاله پژوهشی

تخمین بار معلق رسوبی با استفاده از روش‌های هوشمند تلفیقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل

سید مهدی ثاقبیان[1*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۸

چکیده

پیش‌بینی دبی رسوبی با دقت بالاتر، از مهم‌ترین مولفه‌های فرآیندهای هیدرولوژیکی در مدیریت منابع آب می‌باشد. به دلیل پیچیدگی پدیده انتقال رسوب و وجود چندین پارامتر موثر در تخمین آن، تعیین روابط حاکم مشکل می‌باشد. این تحقیق به منظور ارائه مدل بهینه برآورد بار رسوب معلق در دو ایستگاه هیدرومتری متوالی یک رودخانه طبیعی انجام گرفته است. در این راستا، جهت کاهش مقدار خطا در پیش‌بینی دبی رسوبی از روش‌های پیش‌پردازش سری زمانی به همراه روش‌های هوشمند مبتنی بر کرنل ماشین بردار پشتیبان (SVM) و رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR) استفاده شده است. دو سناریو بررسی دبی رسوب معلق برای حالت تک ایستگاهی و ارتباط بین ایستگاهی در نظر رفته شد و مدل‌های متفاوتی بر اساس مشخصات هیدرولیکی و ذرات رسوبی تعریف گردید و مورد ارزیابی قرار گرفت. در استفاده از روش‌های پیش‌پردازش، ابتدا روش تبدیل موجک (WT) به‌کار رفت، سپس زیر سری‌های با فرکانس بالای بدست آمده از روش WT با روش تجزیه مد تجربی (EMD) دوباره تجزیه گردیدند. در نهایت زیر سری‌های تاثیرگذار به‌عنوان ورودی مدل‌های مبتنی بر کرنل استفاده شدند. نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های تعریف‌شده، دقت بالای روش‌های تلفیقی به‌کار رفته در تحقیق را در تخمین رسوب معلق به خوبی نشان داد. نتایج نشان داد که در حالت اول، مقدار معیار خطا برای مدل برتر به ترتیب از ۰٫۰۳۵ و ۰٫۰۳۷ برای روش‌های GPR و SVM به ۰٫۲۸ و ۰٫۲۹ برای مدل‌های تلفیقی کاهش یافت. به طور کلی، مدل‌های ترکیبی دقت مدل‌سازی را بین ۲۰ تا ۲۵ درصد افزایش دادند. جهت ارزیابی قابلیت اطمینان مدل برتر، از تحلیل عدم قطعیت مونت کارلو استفاده شد و نتایج نشان داد که مدل GPR دارای درجه عدم اطمینان مطلوبی در مدل‌سازی است.

واژه‌های کلیدی: پیش پردازش، تجزیه مد تجربی، رگرسیون فرآیند گاوسی، رسوب معلق

مقدمه

با توجه به محدودیت منابع آبی در طبیعت، توزیع زمانی و مکانی غیریکنواخت منابع آبی، افزایش آلودگی‌ها، تخریب منابع طبیعی و همچنین افزایش جمعیت، رشد و توسعه جوامع شهری و فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، ضرورت برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح منابع آبی اجتناب‌ناپذیر است. در این میان آگاهی از میزان مواد رسوبی که توسط جریان حمل یا ترسیب می‌گردد، یکی از مسائل مهم و کاربردی در مدیریت منابع آب و از اطلاعات ضروری برای اجرای پروژه‌های آبی است (۸). تخمین صحیح رسوبات حمل شده به‌وسیله رودخانه در طیف وسیعی از مسائل از قبیل طراحی مخازن سدها، انتقال رسوب و آلودگی در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مصب‌ها، طراحی کانال‌های پایدار، ارزیابی زیست‌محیطی پروژه‌ها و مدیریت آبخیز به‌کار گرفته شده است و می‌تواند موجب کنترل بهتر عواقب زیان‌بار این پدیده و استفاده بهینه از تأسیسات آبی (مانند سد، کانال، ...) و جلوگیری از صرف هزینه‌های اضافی شود. مواد رسوبی در رودخانه‌ها به دو صورت کلی بار معلق و بار بستر می‌باشد که محاسبه مقدار هر یک به روش خاصی انجام می‌پذیرد. از جمله این روش‌ها مدل‌های تجربی و استفاده از تکنیک رگرسیون است که در این روش یک یا چند منحنی بر داده‌های رسوب برازش داده می‌شود (۱۱). ساده‌ترین شکل معادلات

۱- گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: smsaghebian@iau-ahar.ac.ir)
DOI: 10.22067/JSW.2021.68665.1021

رگرسیونی که مستلزم تغییر شکل لگاریتمی داده‌های دبی رسوبی و دبی جریان است به شکل $Qs=aQ^b$ بوده که در آن Qs دبی رسوب و Q دبی جریان آب و a و b پارامترهای رگرسیونی می‌باشند (۱۳). با وجود اینکه مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی رسوب معلق پیشنهاد شده است، اما با توجه به ماهیت غیرخطی و ویژگی‌های متغیر زمانی و مکانی در سیستم گردش آبی، هیچ‌یک از مدل‌های آماری و مفهومی پیشنهاد شده به‌منظور الگوسازی دقیق رسوب نتوانسته‌اند به‌عنوان یک مدل برتر و توانا شناخته شوند و عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها از اعتبار برآوردها از طریق مدل‌های مختلف می‌کاهد. از طرفی امروزه محققین، با پیشرفت روش‌های هوشمند، در جستجوی راه‌هایی برای پیش‌بینی پارامترهای مهم هیدرولیکی و هیدرولوژیکی هستند. در دهه‌های اخیر روش‌های نرم برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها اکثراً الهام گرفته از پدیده‌های موجود در طبیعت هستند و به‌عنوان ابزاری توانمند در حل مسائل پیچیده به شمار می‌آیند (۳). به‌عنوان نمونه سیواپراگسم و لیونگ (۱۵) از مدل ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی بارش- رواناب حوضه Tryggevaelde واقع در کشور هلند استفاده کردند. ذو و همکاران (۱۸) از مدل رگرسیون فرآیند گاوسی برای پیش‌بینی دبی رودخانه استفاده کردند. معروف‌پور و همکاران (۱۰) از روش‌های هوش مصنوعی برای شبیه‌سازی تبخیر-تعرق استفاده کردند. روشنگر و قاسم‌پور (۱۴) با استفاده از روش‌های هوشمند رگرسیون بردار پشتیبان و سیستم استنتاج عصبی- فازی انطباقی مقاومت جریان را در رودخانه‌های مارپیچی بررسی کردند. حیدری و همکاران (۷) از روش هوشمند مبتنی بر کرنل برای مدلسازی مشخصات پرش هیدرولیکی استفاده کردند. عاشقی و همکاران (۴) از روش‌های هوش مصنوعی برای شبیه‌سازی بار بستر استفاده کردند.

بررسی منابع صورت گرفته، نشان از کاربرد روش هوشمند شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی سری‌های زمانی از جمله رسوب می‌باشد. این در حالی است که مطالعات چندانی در زمینه کاربرد روش‌های مبتنی بر کرنل مانند رگرسیون فرآیند گاوسی در تخمین رسوب معلق انجام نشده است. از طرفی، در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های تجزیه سیگنال به‌عنوان روشی نوین و مؤثر در زمینه تحلیل سیگنال‌ها و سری‌زمانی مورد توجه قرار گرفته است (۱). در این روش سیگنال اصلی به چندین زیرسری تجزیه شده و داده‌های حاصل از تجزیه با معادلات مناسب برازش می‌یابد و مدل به‌دست‌آمده برای پیش‌بینی استفاده می‌شود. از جمله این روش‌ها تبدیل موجک و روش جدید تجزیه مد تجربی یکپارچه کامل است (۵). همچنین، ترکیب پیش‌بینی‌های چندین مدل رگرسیونی با استفاده از یک الگوریتم یادگیری معین می‌تواند باعث بهبود نتایج خروجی روش‌های رگرسیونی شود.

بدین ترتیب، با توجه به پیچیده بودن پدیده رسوب و تأثیر پارامترهای مختلف در پیش‌بینی آن، بهره‌گیری از روش‌های جدید که بتوانند قطعیت مدل را افزایش دهند ضروری به نظر می‌رسد. لذا، هدف از این تحقیق بررسی کارایی روش‌های تلفیقی پیش‌پردازش به‌عنوان روش جدید جهت بهبود دقت پیش‌بینی دبی رسوبی است که می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه منابع آبی مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از روش‌های تجزیه سیگنال حجم محدودی از نویز سفید وارد سیگنال اصلی شده و با استفاده از جنبه‌های مثبت آماری نویز سفید که توزیع متوازن در حوزه فرکانس دارد، اثر نویز متناوب از روند تجزیه حذف خواهد شد. در این تحقیق، از روش‌های تبدیل موجک گسسته (WT) و تجزیه مد تجربی (EMD) برای پیش‌پردازش مدل‌ها استفاده شده است. لذا، جهت بررسی کارایی روش‌های به‌کار رفته در تحقیق، مدل‌هایی بر اساس پارامترهای هیدرولیکی و دبی رسوبی برای دو ایستگاه هیدرومتری واقع در رودخانه هوستونیک تعریف شده و دو حالت تخمین بار رسوبی بر اساس داده‌های خود ایستگاه و ایستگاه قبلی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین میزان قابل اطمینان بودن نتایج مدل‌های به‌کار رفته با استفاده از روش عدم قطعیت مونت‌کارلو مورد بررسی قرار گرفت.

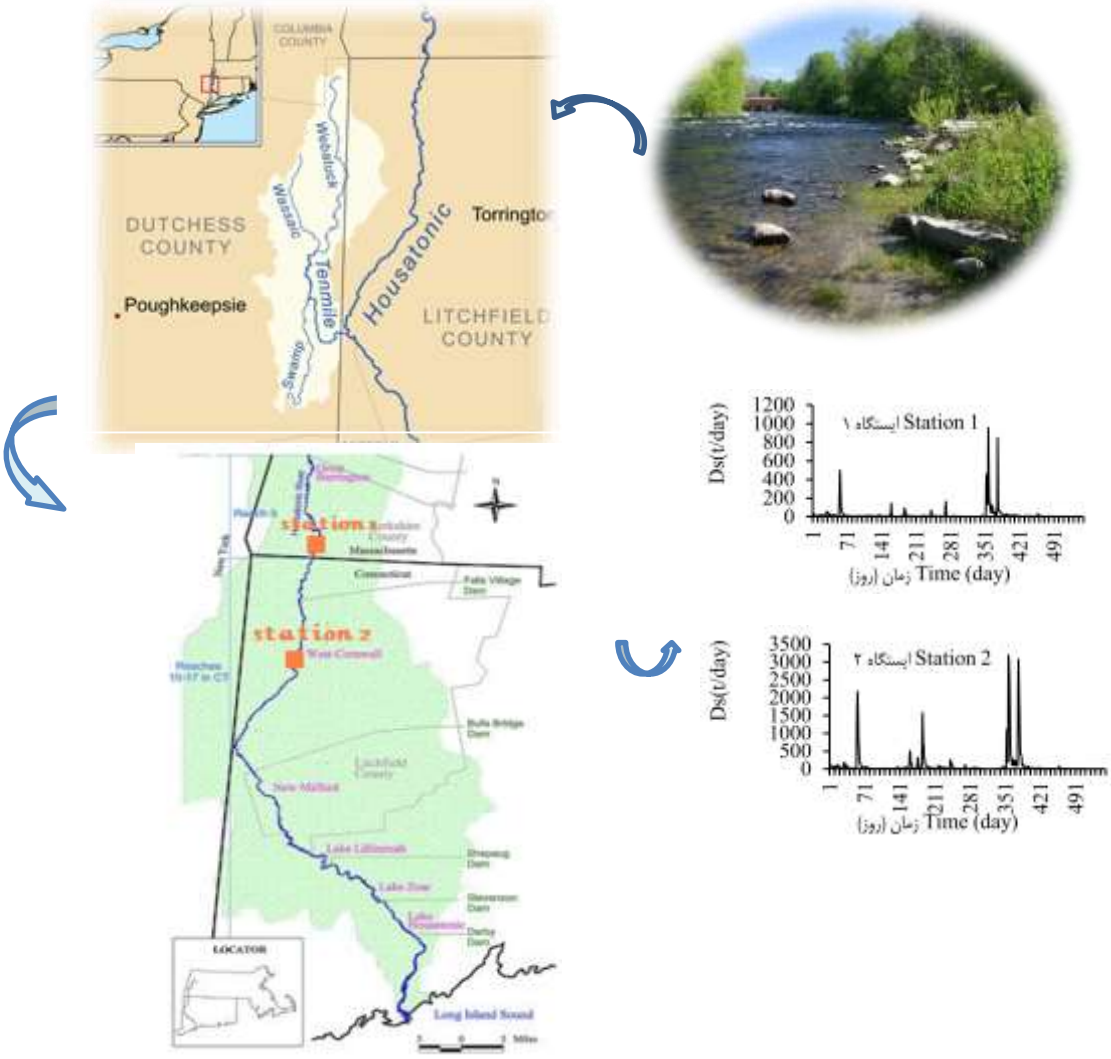
مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق دبی جریان و بار معلق روزانه‌ی دو ایستگاه هیدرومتری متوالی از رودخانه‌ی هوستونیک (Houstonic) واقع در ایالات متحده آمریکا در بازه زمانی تقریبا دو ساله می‌باشد. اولین ایستگاه نزدیک برینگتون بزرگ در ایالت ماساچوست و ایستگاه دوم در روستای فالز در ایالت کانکتیکات واقع شده و فاصله‌ی بین آن‌ها حدود ۵۰ کیلومتر است. مساحت حوضه به ترتیب برای ایستگاه‌ها ۲۸۲ مایل مربع و ۶۳۴ مایل مربع می‌باشد و مسیر جریان از ایستگاه اول به سمت ایستگاه دوم است. داده‌های مربوط به بار رسوب روزانه برای منطقه مطالعاتی در سایت USGS در دسترس است که اطلاعات کافی در مورد دبی رسوب و دبی جریان را به دست می‌دهد. داده‌های مشاهده شده‌ی دو ایستگاه در حدود تقریبا دو سال از ۱ آوریل ۲۰۰۰ تا ۳۰ سپتامبر ۲۰۰۱ می‌باشد. این داده‌ها به‌صورت روزانه و به طور پیوسته برداشته شده و حدود ۵۴۹ داده می‌باشند. موقعیت ایستگاه‌ها در شکل نشان شده است.

روش‌های هوشمند

ضعف عملکرد روش‌های استخراج ویژگی خطی برای داده‌های پیچیده که به‌صورت خطی تفکیک‌پذیر نمی‌باشند، سبب پیدایش روش‌های غیرخطی از جمله روش‌های مبتنی بر کرنل برای این منظور شده است.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های رودخانه هوستونیک

Figure 1- The location of the Houstonic river stations

در روش‌های مبتنی بر کرنل ابتدا داده‌ها به فضایی با ابعاد بیشتر نگاشت یافته که در این فضا به‌طور خطی تفکیک‌پذیر می‌شوند. این روش‌ها بر این ایده استوارند که ضرب داخلی داده‌های نگاشت یافته با یک تابع غیرخطی را می‌توان با تابع کرنل تخمین زد، که به آن حقه کرنل می‌گویند. از جمله روش‌های مبتنی بر کرنل می‌توان به ماشین بردار پشتیبان (SVM) و رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR) اشاره کرد. الگوریتم SVM، جزء الگوریتم‌های تشخیص الگو دسته‌بندی می‌شود که برای اولین بار توسط وپنیک در سال ۱۹۹۵ معرفی شد (۱۶) نحوه‌ی کارکرد الگوریتم SVM مانند اغلب روش‌های هوشمند به‌صورت آموزش (Train) و آزمون (Test) می‌باشد. مزیتی که SVM نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد این است که این الگوریتم مبنی بر احتمالات نمی‌باشد و همواره جواب یکه‌ای به همراه دارد و زمان کمتری را برای دستیابی به جواب بهینه به خود اختصاص می‌دهد. از الگوریتم SVM، در هرجایی که نیاز به تشخیص الگو یا دسته‌بندی اشیا در کلاس‌های خاص باشد می‌توان استفاده کرد. درواقع مبنای کاری SVM دسته‌بندی خطی داده‌ها است و در تقسیم خطی داده‌ها سعی می‌شود خطی انتخاب شود که حاشیه اطمینان بیشتری داشته باشد. هدف اصلی الگوریتم SVM این است که خطی را بیابد که از داده‌های موجود در دو کلاس دارای بیشترین فاصله باشد و یا به‌عبارت‌دیگر دارای کمترین ریسک عملیاتی باشد. فرایند گاوسی نیز روشی مفید به‌منظور تعریف توزیع‌های مقدم برای مدل‌های انعطاف‌پذیر رگرسیون و طبقه‌بندی است که در آن رگرسیون یا توابع

احتمال طبقه به اشکال ساده پارامتری محدود نشده باشند. فرایند گاوسی مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی است که تعداد دلخواه محدودی از آن‌ها با توزیع‌های گاوسی ادغام شده‌اند. فرایند گاوسی به‌طور کامل توسط تابع میانگین m(x) و تابع کوواریانس k(x, x') آن تعیین می‌شود. این فرایند، تعمیمی طبیعی از توزیع گاوسی است که میانگین و کوواریانس آن به ترتیب یک بردار و یک ماتریس است. مدل‌های رگرسیون فرایند گاوسی بر مبنای این فرض هستند که مشاهدات تنظیم باید حامل اطلاعاتی درباره همدیگر باشد. یکی از جذابیت‌های فرایند گاوسی تنوع بسیار توابع کوواریانس آن است که به ایجاد توابعی با درجات مختلف همواری یا انواع مختلف ساختارهای پیوستی منجر می‌شود و به محقق این امکان را می‌دهد که از میان آن‌ها گزینش مناسبی انجام دهد. این مدل‌ها می‌توانند توزیع‌هایی را بین توابعی با تعداد یک یا چندین متغیر ورودی مشخص کنند. هنگامی که چنین تابعی میانگین پاسخ را در یک مدل رگرسیونی با خطاهای گاوسی تعریف می‌کند، می‌توان از محاسبات ماتریس برای استنتاج بهره‌گیری کرد؛ این مسئله برای مجموعه داده‌هایی با بیش از هزار نمونه امکان‌پذیر است. طراحی روش‌های مبتنی بر کرنل شامل استفاده از مفهوم تابع کرنل است. در واقع، با یک تبدیل غیرخطی از فضای ورودی به فضای خصیصه با ابعاد بیشتر (حتی نامتناهی) می‌توان مسائل را به‌صورت خطی تفکیک‌پذیر ساخت. از مهم‌ترین توابع کرنل می‌توان به کرنل خطی، چندجمله‌ای ساده، چندجمله‌ای نرمال‌شده، تابع شعاع محور، تابع کرنل پیرسون و سیگموئید اشاره کرد.

تبدیل موجک

موجک (Wavelet) دسته‌ای از توابع ریاضی است که برای تجزیه سیگنال پیوسته به مؤلفه‌های فرکانسی آن بکار می‌رود که سطح تفکیک هر مؤلفه برابر با مقیاس آن است. تبدیل موجک تجزیه یک تابع بر مبنای توابع موجک است. موجک‌ها (که به‌عنوان موجک‌های مادر شناخته می‌شوند) نمونه‌های انتقال‌یافته و مقیاس شده یک تابع (موجک مادر) با طول متناهی و نوسانی شدیداً میرا هستند. تابع موجک، تابعی است که دو ویژگی مهم نوسانی بودن و کوتاه‌مدت بودن را دارد. $\psi(x)$ تابعی موجک است اگر و فقط اگر تبدیل فوریه آن $\Psi(\omega)$ شرط زیر را ارضا کند (۹).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|}{|\omega|^2} d\omega \prec +\infty \qquad (۱)$$

این شرط با عنوان شرط پذیرفتگی برای موجک $\psi(x)$ شناخته می‌شود $\psi(x)$ تابع موجک مادر است (رابطه ۲) که ضرایب b و a در آن نقش انتقال و مقیاس سیگنال مورد نظر را دارند.

$$\psi_{a,b}(x) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi(\frac{x-b}{a}) \qquad (۲)$$

توابع موجک دارای انواع بسیاری هستند که مهم‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها شامل تابع موجک Haar، Meyer، Mexican hat، Morle، Symlet، Daubechies، Coiflet است. تبدیل موجک پیوسته به‌عنوان روش جایگزین تبدیل فوریه زمان-کوتاه ارائه گردید و هدف آن، فائق آمدن بر مشکلات مربوط به تفکیک‌پذیری در تبدیل فوریه زمان-کوتاه است. در عمل اکثر سری‌های زمانی هیدرولوژیکی به‌صورت گسسته در زمان‌هایی مشخص اندازه‌گیری می‌شوند. بنابراین کاربرد موجک گسسته می‌تواند تناسب بهتری با این نوع سری زمانی داشته باشد. تبدیل موجک گسسته در عمل همان تبدیل موجک پیوسته است (نسخه گسسته شده آن) که در آن یک سری موجک از تبدیل موجک پیوسته نمونه گرفته است و سیستم‌های کامپیوتری قابلیت محاسبه آن را با هزینه زمانی کمتر دارا است. اصول تبدیل موجک گسسته به روشی تحت عنوان کدینگ زیرباند برمی‌گردد که در سال ۱۹۷۶ سنگ بنای اولیه آن گذارده شد و در آن نوعی توصیف زمان-مقیاس از سیگنال گسسته با استفاده از فیلترهای دیجیتال ارائه می‌گردد. تبدیل موجک، حاصل شباهت‌سنجی (کورولیشن) بین محتوای فرکانسی (مقیاسی) سیگنال و تابع موجک در مقیاس‌های مختلف است. تجزیه کردن سری‌های زمانی با استفاده از فیلترهای مشخص (موجک و توابع مقیاس‌گذاری شده) دو نوع زیرسری را به وجود می‌آورند؛ بردارهای تقریبی یا باقی‌مانده و بردارهای جزییات (۹) این ضرایب حاصل از در هم پیچیدن سری زمانی اصلی با فیلتر پایین-گذر و فیلتر بالا-گذر می‌باشد. فیلتر پایین- گذر همان تابع مقیاس‌گذاری است و فیلتر بالاگذر همان تابع موجک است. تابع تبدیل موجک قابلیت تجزیه سری زمانی به چندین زیرسری زمانی با مقیاس‌های مختلف را دارد و با بررسی زیرسری‌های زمانی منتجه از سری زمانی کلی، رفتار کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس یک فرآیند هیدرولوژیکی را آنالیز می‌کند. روابطی که بیشتر برای تخمین سطح تجزیه مورد استفاده قرار می‌گیرد به‌صورت زیر است که در آن L سطح تجزیه، N تعداد نقاط داده در سری زمانی و p برابر با زمان محو شونده برای موجک مادر انتخاب شده است.

$$L = \text{int}[\log(N)] \quad , \quad L = \frac{\log(\frac{N}{2p-1})}{\log 2} \qquad (۳)$$

روش تجزیه مد تجربی EMD [1]

روش تجزیه مد تجربی روشی برای تجزیه سیگنال‌های گوناگون است که این عمل در فرآیندی تحت عنوان غربال کردن صورت

1- Empirical Mode Decomposition

می‌گیرد. طی این فرایند سیگنال اصلی به تعدادی مولفه با محتوای بسامدی متفاوت تجزیه می‌شود. روش EMD طبق رابطه (۴) سیگنال اصلی x(n) را به تعدادی مد ذاتی (IMF[1]) تجزیه می‌کند (۶).

$$x(n) = \sum_{i=1}^{n} c_i(x) + r_n(x) \qquad (۴)$$

که $r_n(x)$ همان مولفه باقی‌مانده، بعد از n تعداد IMFs و $c_i(x)$ است. یک داده ممکن است در یک زمان دارای چندین مد ذاتی باشد. این مدهای نوسانی، تابع‌های مد ذاتی (IMF) نام دارند و دارای دو شرایط هستند: ۱) در کل داده‌ها، تعداد نقاط فرین (اکسترمم) و نقاط صفر با هم برابر و یا حداکثر دارای یک واحد اختلاف هستند، ۲) در هر نقطه میانگین پوش برازش داده شده بر نقاط بیشینه محلی و پوش برازش داده شده بر نقاط کمینه محلی باید صفر باشد. به علّت وجود تناوب و نویز در سیگنال‌ها، در برخی موارد به علّت اختلاط مدها؛ توزیع حوزه زمان- فرکانس دچار انقطاع می‌شود و عملکرد EMD دچار نقض می‌گردد (چون میانگین IMFها حالتی نامشخص به خود می‌گیرد). جهت رفع این ایراد، وو و هوانگ (۲) روشی متفاوت با عنوان روش تجزیه مد تجربی یکپارچه (EEMD[2]) را پیشنهاد کردند. در روند تجزیه‌سازی آن، حجم محدودی از نویز سفید وارد سیگنال اصلی می‌شود. با استفاده از جنبه‌های مثبت آماری نویز سفید که توزیع متوازن در حوزه فرکانس دارد، اثر نویز متناوب از روند تجزیه حذف می‌شود.

معیارهای ارزیابی مدل‌ها

به‌منظور ارزیابی کارایی روش‌های استفاده‌شده در تحقیق، از سه پارامتر آماری استفاده گردید که عبارت‌اند از ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی (R)، ضریب تبیین (DC) و ریشه میانگین مربعات خطاها (RMSE) هر چه مقدار DC برای یک مدل به یک نزدیک‌تر و مقدار RMSE کوچک‌تر باشد به معنی مطلوب بودن آن مدل است. روابط این پارامترهای آماری به‌صورت زیر می‌باشد:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(l_o - \overline{l_o}\right) \times \left(l_p - \overline{l_p}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(l_o - \overline{l_o}\right)^2 \times \left(l_p - \overline{l_p}\right)^2}} \qquad (۵)$$

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(l_o - l_p\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(l_o - \overline{l_p}\right)^2} \qquad (۶)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(l_o - l_p\right)^2}{N}} \qquad (۷)$$

در روابط بالا L_o: مقدار اندازه‌گیری‌شده، $\overline{L_o}$: متوسط مقدار اندازه‌گیری‌شده، L_p: مقدار پیش‌بینی‌شده، $\overline{L_p}$: متوسط مقدار پیش‌بینی‌شده و N تعداد داده‌هاست. واردکردن داده‌ها به‌صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود لذا نرمالیزه کردن داده‌ها کمک شایانی به آموزش بهتر و سریع‌تر مدل می‌کند. در تحقیق کنونی داده‌ها مطابق رابطه (۸) نرمالیزه شدند. که در آن x_{min} و x_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار داده‌های مشاهده‌شده و x_n داده نرمال شده می‌باشد. محدوده‌ی نرمالیزه کردن داده‌ها در این تحقیق بین ۰/۱ و ۱ انتخاب گردید.

$$x_n = 0.1 + 0.9 \times \left(\frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}\right) \qquad (۸)$$

عدم قطعیت مونت کارلو

به صورت کلی، شبیه سازی مونت کارلو به هر تکنیکی اتلاق می‌شود که از طریق نمونه‌سازی آماری، پاسخ‌های تقریبی برای مسائل کمی فراهم می‌کند. شبیه‌سازی مونت کارلو بیشتر برای توصیف روشی جهت انتشار عدم قطعیت‌های موجود در ورودی مدل به عدم قطعیت‌ها در خروجی مدل، به کار می‌رود. بنابراین مونت‌کارلو، نوعی شبیه‌سازی است که به طور صریح و کمی، عدم قطعیت را نمایش می‌دهد. شبیه‌سازی مونت کارلو متکی به فرآیند نمایش صریح عدم قطعیت با تعیین ورودی‌ها به عنوان توزیع‌های احتمال است. اگر ورودی‌های توصیف‌کننده یک سیستم، غیرقطعی باشند، آنگاه پیش‌بینی عملکرد پیش رو به طور قطع غیرقطعی است. این بدان معنی است که نتیجه هر گونه تحلیل مبتنی بر ورودی‌های نمایش داده شده با توزیع‌های احتمال، خود یک توزیع احتمال است. در محاسبه عدم قطعیت به روش شبیه‌سازی مونت کارلو بر خلاف روش‌های تحلیلی، اساس کار شبیه‌سازی پدیده مورد نظر به تعداد ۱۰۰۰ بار می‌باشد. بدین منظور هر یک از پارامترهای ورودی (داده‌های تصادفی) به تعداد ۱۰۰۰ بار توسط روش‌های موجود تولید داده، شبیه‌سازی شده و با قرار دادن آن‌ها در مدل مورد نظر ۱۰۰۰ تکرار خروجی حاصل می‌گردد. سپس ضریب تغییرات پارامتر خروجی محاسبه و به‌عنوان معیار عدم قطعیت خروجی در نظر گرفته می‌شود. برای تولید هر پارامتر ابتدا بهترین توزیع آماری به هر یک از پارامترهای ورودی برازش داده می‌شود. به هر بار شبیه‌سازی، تحقق سیستم گفته می‌شود. برای هر تحقق، تمام پارامترهای غیرقطعی نمونه‌برداری خواهند شد که یعنی یک مقدار تصادفی از توزیع اختصاصی مربوط به هر پارامتر، انتخاب می‌شود (۱۷). سپس، این سیستم با پارامترهای ورودی معین، در طول زمان، شبیه‌سازی خواهد شد. این شبیه‌سازی به گونه‌ای انجام می‌شود که در نهایت بتوانیم کارایی سیستم را محاسبه کنیم. این امر منتج به ایجاد تعداد زیادی

1- Intrinsic Mode Functions

2- Ensemble Empirical Mode Decomposition

نتیجه مستقل و جداگانه می‌شود، که هر کدام بیانگر یک «آینده» احتمالی برای سیستم هستند. به عبارت دیگر، یعنی یک مسیر احتمالی خواهیم داشت که سیستم، با گذشت زمان آن را دنبال خواهد کرد. نتایج تحقق‌های مستقل سیستم به شکل توزیع‌های احتمالی خروجی‌های ممکن خواهد بود. در نتیجه، خروجی‌ها به صورت مقادیر تک نیستند، بلکه توزیع احتمال هستند.

مدل‌سازی و نتایج و بحث

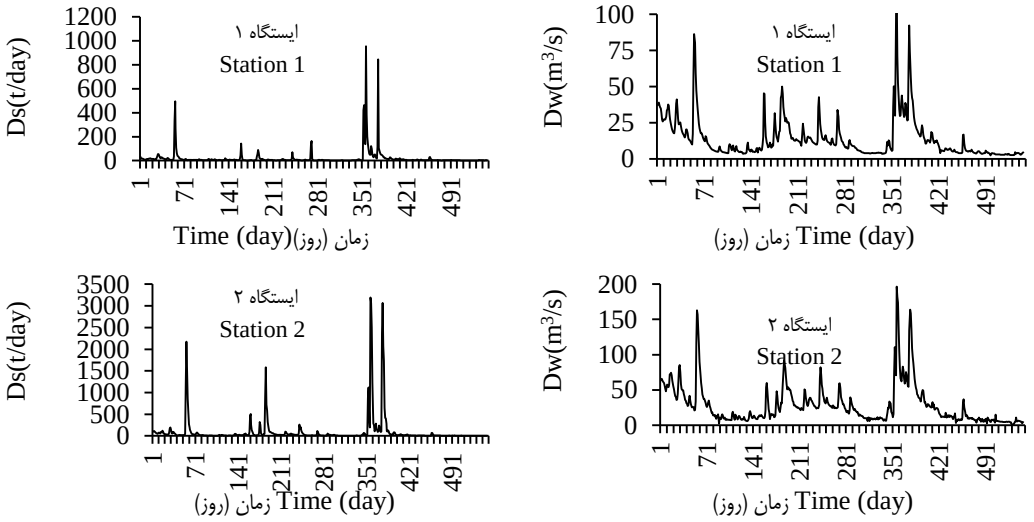
با توجه به اینکه انتخاب مدل‌های ورودی در سامانه‌های هوشمند می‌تواند بر روی دقت جواب‌های حاصل از تحلیل تأثیر گذارد، لذا سعی گردید پارامترهای مناسب و مؤثر در مدل‌سازی بار رسوب معلق انتخاب گردد. جهت تخمین بار معلق رسوبی در ایستگاه اول از داده‌های روزانه مربوط به همان ایستگاه و با در نظر گرفتن ترکیبی از داده‌های دبی جریان و دبی بار معلق رسوبی با تأخیرهای زمانی مختلف و در ایستگاه‌های دوم از داده‌های مربوط به آن ایستگاه و ایستگاه قبل استفاده شد. جدول ۱ مدل‌های تعریف‌شده در تحقیق را نشان می‌دهد. در این جدول Dw و Ds به ترتیب بیانگر دبی جریان و دبی بار معلق رسوبی می‌باشند و اندیس t تأخیر زمانی را بر حسب روز نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۲ نمودار مقادیر دبی جریان و رسوب معلق در دو ایستگاه انتخابی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ۷۵ درصد از ابتدای داده‌ها جهت آموزش مدل‌ها و ۲۵ درصد باقیمانده جهت آزمون مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

جهت انتخاب تابع کرنل مناسب رگرسیون فرایند گاوسی و روش ماشین بردار پشتیبان مدل M5 با کرنل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. از معیار ارزیابی RMSE جهت تعیین کارایی هر یک از کرنل‌ها استفاده گردید. نتایج به‌صورت شکل ۳ برای سری داده‌های آزمون ارائه گردیده است. مطابق با شکل ۳ مشاهده می‌گردد که در بین تمامی توابع کرنل‌ها، تابع کرنل شعاع مداری در پیش‌بینی دبی بار معلق نسبت به توابع کرنل دیگر دارای خطای کمتری بوده و نتایج دقیق‌تری را ارائه کرده است. بنابراین، در تجزیه و تحلیل تمامی مدل‌ها از کرنل شعاع مداری استفاده شد.

جدول ۱- مدل‌های تعریف شده در تحقیق

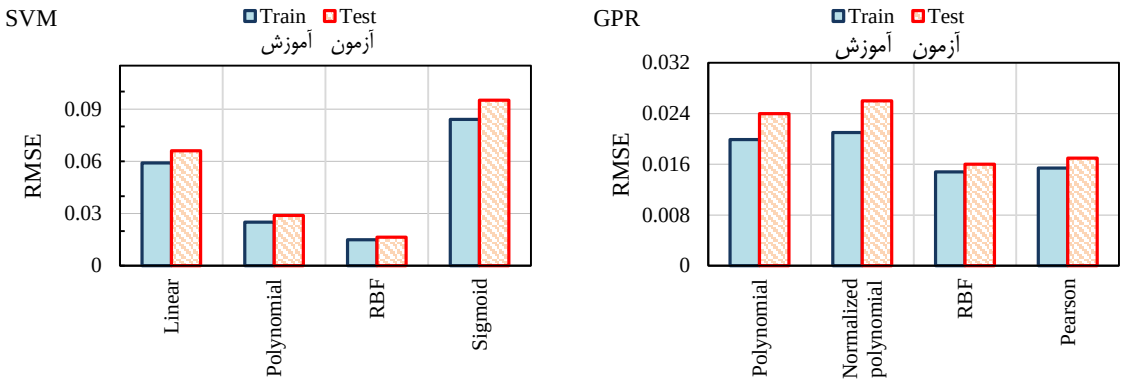
Table 1- Developed models in the study

مدل Model	ساختار مدل Model structur	مدل Model	ساختار مدل Model structur
M1	$Ds(t)=f\,[Dw_t]$	M6	$Ds_2(t)=f\,[(Dw_{t-1})1]$
M2	$Ds(t)=f\,[Dw_t, Dw_{t-1}]$	M7	$Ds_2(t)=f\,[(Dw_{t-1})1, (Ds_{t-1})1]$
M3	$Ds(t)=f\,[Ds_{t-1}]$	M8	$Ds_2(t)=f\,[(Dw_{t-1})1, (Ds_{t-1})1, (Ds_{t-2})1]$
M4	$Ds(t)=f\,[Dw_t, Ds_{t-1}]$		
M5	$Ds(t)=f\,[Dw_t, Dw_{t-1}, Ds_{t-1}]$		



شکل ۲- نمودار سری زمانی دبی جریان و دبی رسوب معلق ایستگاه‌های منتخب

Figure 2- The plots of the flow discharge and suspended sediment discharge for the selected stations



شکل ۳- پارامترهای آماری مدل GPR و SVM با توابع کرنل متفاوت

Figure 3- The statistical parameters of the GPR and SVM models with different kernel types

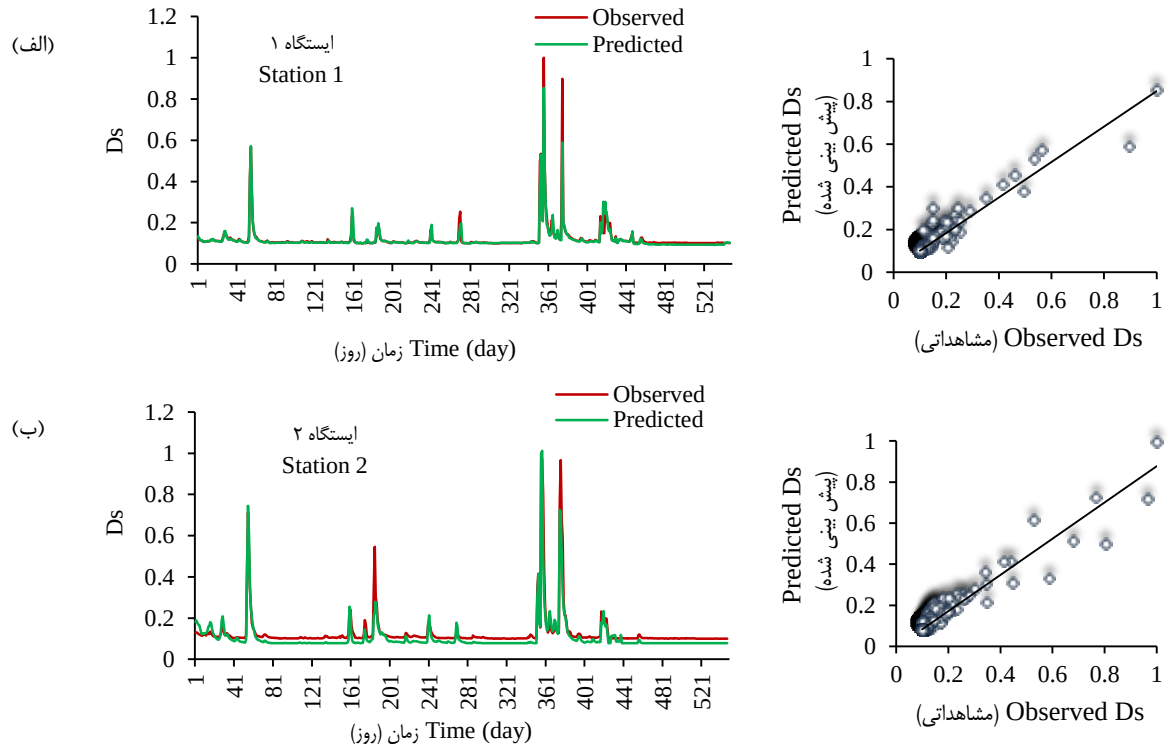
نتایج به‌دست‌آمده برای مدل‌های مبتنی بر کرنل

جهت پیش‌بینی رسوب معلق بر اساس دبی جریان و بار معلق رسوبی مربوط به روز قبل، چند مدل تعریف گردید و کارایی روش‌های مبتنی بر کرنل مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصله به‌صورت جدول ۲ و شکل ۴ ارائه شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از سه معیار ارزیابی مدل، برای هر دو ایستگاه منتخب مشاهده می‌شود که مدل M5 با پارامترهای ورودی Dw_t, Dw_{t-1}, Ds_{t-1} بیشترین کارایی را داراست. این مدل بیشترین ضریب همبستگی و تبیین و کمترین مقدار خطا را داشته و مدل برتر است. مشاهده می‌شود که در حالت استفاده از پارامترهای دبی جریان و دبی رسوبی به‌عنوان تنها پارامتر ورودی (مدل‌های M1 و M3) نتایج دقیقی ارائه نشده است و مدل‌های ترکیبی دو یا سه پارامتری دقیق‌تر می‌باشند. بین دو روش هوشمند به‌کار رفته روش رگرسیون فرایند گاوسی نتایج دقیق‌تری را ارائه داده است. اما در حالت کلی و با مقایسه نتایج مدل‌ها مشاهده می‌شود که روش‌های مبتنی بر کرنل از دقت مطلوبی جهت مدل‌سازی دبی بار معلق به‌ویژه در نقاط ماکزیمم و مینیمم برخوردار نمی‌باشد.

جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل‌های مبتنی بر کرنل برای دو ایستگاه

Table 2- Results of evaluating kernel-based models for two stations

Model روش	Method مدل	Performance criteria معیارهای ارزیابی										
		Train			Test			Train			Test	
		R	DC	RMSE	R	DC	RMSE	R	DC	RMSE	R	DC
		Station 1						Station 2				
M1	GPR	0.755	0.700	0.038	0.736	0.667	0.042	0.816	0.712	0.044	0.794	0.682
	SVM	0.738	0.686	0.041	0.719	0.653	0.045	0.797	0.709	0.045	0.776	0.668
M2	GPR	0.866	0.785	0.027	0.749	0.748	0.030	0.936	0.795	0.033	0.809	0.765
	SVM	0.847	0.768	0.029	0.732	0.733	0.032	0.914	0.786	0.036	0.790	0.750
M3	GPR	0.825	0.632	0.043	0.664	0.602	0.047	0.891	0.647	0.052	0.718	0.616
	SVM	0.806	0.619	0.045	0.649	0.589	0.051	0.870	0.633	0.054	0.701	0.610
M4	GPR	0.842	0.773	0.033	0.812	0.731	0.036	0.909	0.792	0.034	0.876	0.748
	SVM	0.822	0.757	0.034	0.793	0.720	0.038	0.888	0.785	0.036	0.857	0.736
M5	**GPR**	**0.932**	**0.811**	**0.021**	**0.852**	**0.771**	**0.028**	**1.007**	**0.814**	**0.031**	**0.919**	**0.789**
	SVM	**0.910**	**0.794**	**0.025**	**0.832**	**0.755**	**0.031**	**0.983**	**0.805**	**0.032**	**0.899**	**0.772**
		Station 2										
M6	GPR	0.762	0.716	0.034	0.731	0.708	0.041					
	SVM	0.745	0.701	0.038	0.741	0.694	0.043					
M7	GPR	0.841	0.744	0.035	0.800	0.738	0.039					
	SVM	0.844	0.743	0.036	0.802	0.733	0.040					
M8	**GPR**	**0.886**	**0.783**	**0.032**	**0.842**	**0.777**	**0.036**					
	SVM	**0.865**	**0.777**	**0.034**	**0.822**	**0.760**	**0.038**					



شکل ۴- نمودار مقادیر مشاهداتی و محاسباتی مدل GPR برای دو ایستگاه، (الف) مدلسازی با استفاده از داده‌های خود ایستگاه و (ب) بررسی ارتباط ایستگاه‌ها

Figure 4- The plots of the observed and predicted values of GPR model for two stations, (a): modeling based on the station's own data and (b): investigating the stations relationship

نمودار مدل برتر برای سری داده‌های آموزش و آزمون برای هر دو ایستگاه با استفاده از روش GPR در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین جهت بررسی ارتباط بین ایستگاه‌ها، مقدار دبی رسوبی ایستگاه دوم بر اساس داده‌های ایستگاه اول به‌دست آمد و نتایج در انتهای جدول ۲ ارائه شد. در واقع مقدار بار رسوبی ایستگاه دوم برای حالتی که هیچ اطلاعاتی در مورد داده‌هایش در دسترس نیست بررسی گردید و از داده‌های ایستگاه اول تحت عنوان مدل‌های M6، M7 و M8 به‌عنوان ورودی استفاده شد. نتایج پیش‌بینی نشان داد که درصورتی‌که از داده‌های دبی جریان و بار رسوبی به‌طور هم‌زمان به‌عنوان ورودی مدل استفاده شود نتیجه‌ی بهتری نسبت به حالتی که تنها از دبی رسوبی به‌عنوان ورودی استفاده شود، به‌دست می‌آید. در این حالت مدل با پارامترهای ورودی Ds_{t-1}, Dw_{t-1},Ds_{t-2} عمکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر دارد.

نتایج به‌دست‌آمده برای مدل تلفیقی DWT-EEMD-GPR-SVM

در این قسمت، جهت افزایش دقت پیش‌بینی مدل‌های SVM و GPR از روش‌های پیش‌پردازش سری زمانی شامل تجزیه‌ی یکپارچه مد تجربی کامل و تبدیل موجک گسسته استفاده شد. بدین منظور، ابتدا سری‌های زمانی توسط روش تبدیل موجک تجزیه گردید. سپس با استفاده از روش EEMD زیر سری جزئی حاصل از تجزیه DWT با فرکانس بالا دوباره تجزیه گردید. سپس انرژی تمامی زیر سری‌ها محاسبه شده و زیر سری‌های با انرژی بالا به‌عنوان ورودی در مدل‌های مبتنی بر کرنل استفاده شدند. اولین قدم برای تجزیه سیگنال با تبدیل موجک، انتخاب موجک مادر است. در این تحقیق از موجک مادر db4 با سه سطح تجزیه استفاده شد، لذا دو سه سری جزئی و یک زیر سری تقریب حاصل شد. اساس روش EEMD نیز تجزیه سیگنال به IMFهای مختلف و یک سیگنال باقیمانده است که در نهایت مجموعه‌ی این‌ها، همان سیگنال اصلی خواهد بود. روش تشکیل IMFها براساس تفریق تابع پایه از سیگنال اصلی است. این پروسه تا وقتی ادامه می‌یابد که تقریباً سیگنال باقیمانده ثابت شود. در شکل (۵- الف) زیر سری‌های حاصل از تجزیه بار رسوب معلق ایستگاه اول نشان داده شده است. مطابق با این شکل IMFهای دو و سه از زیرسری جزئی اول و IMFهای سه و چهار از زیرسری جزئی دوم، زیرسری‌های غالب حاصل از تجزیه با روش EEMD هستند. نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها در جدول ۳ و شکل (۵- ب و ج) ارائه شده است. با مقایسه نتایج جدول ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود که تجزیه سری‌های زمانی با روش DWT و تجزیه بیشتر آن‌ها با روش

EEMD تا حدود زیادی باعث بهبود نتایج شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از سه معیار ارزیابی مشاهده می‌شود که در این حالت نیز در ایستگاه اول مدل M5 با پارامترهای ورودی Dw_t, Dw_{t-1}, Ds_{t-1} بیشترین کارایی را دارا است. ملاحظه می‌شود که در حالت استفاده از پارامترهای دبی جریان و دبی رسوبی به‌عنوان تنها پارامتر ورودی نیز دقت نتایج تا حدودی افزایش یافته است. بااین‌حال، مدل‌های ترکیبی دو یا سه پارامتری دقیق‌تر می‌باشند. لازم به ذکر است که در استفاده از مدل‌های مختلف، عملکرد آن‌ها در تخمین مقادیر حداقل و حداکثر سری زمانی باید در نظر گرفته شود. مطابق با نتایج، روش‌های مبتنی بر کرنل تلفیقی از دقت مطلوبی در مدل‌سازی نقاط ماکزیمم و مینیمم بار رسوبی معلق برخوردارند. همچنین در حالت تخمین دبی رسوبی ایستگاه دوم بر اساس داده‌های ایستگاه اول، نتایج پیش‌بینی نشان می‌دهد که مدل بر اساس هر دو داده‌های دبی جریان و دبی رسوبی مدل برتر بوده و با تجزیه داده‌ها کارایی مدل تا حدود زیادی افزایش یافته است. در حالت کلی، در صورت استفاده از روش‌های تلفیقی پیش‌پردازش دقت مدل‌ها تقریبا به میزان ۲۰ تا ۲۵ درصد نسبت به روش‌های منفرد هوشمند افزایش می‌یابد.

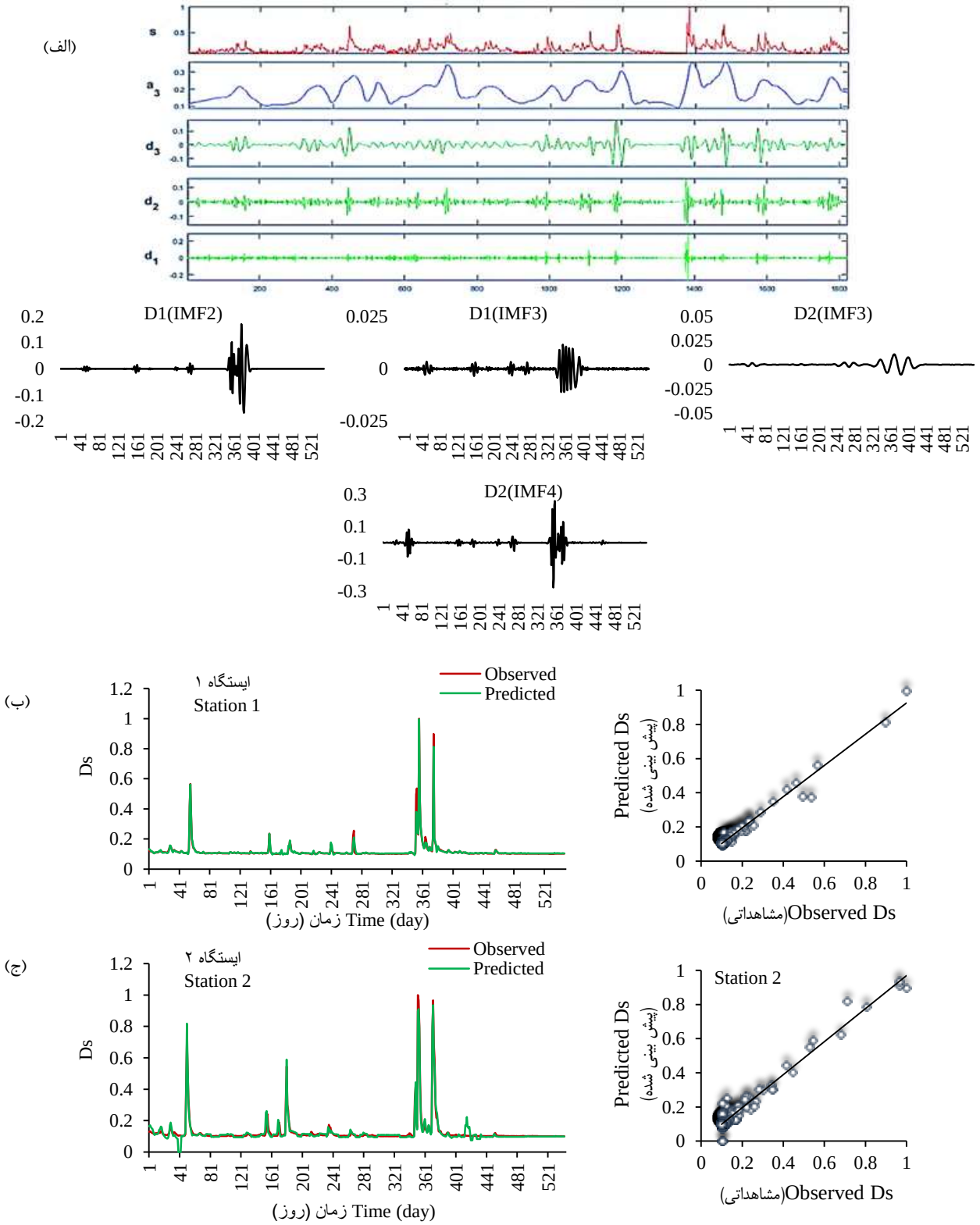
بررسی عدم قطعیت مدل

برای بررسی عدم قطعیت، از دو فاکتور استفاده می‌شود که اولی درصد خروجی‌های مورد مطالعه است که در محدوده 95%PPU قرار داشته باشد و مورد بعدی میانگین فاصله بین باندهای بالا (X_U) و پایین (X_L) عدم قطعیت است (۱۲). در این راستا، مدل در نظر گرفته شده باید بارها اجرا شود (۱۰۰۰ بار در این مطالعه)، و احتمال توزیع تجمعی مدل ها محاسبه شود. باندهای بالا و پایین به ترتیب ۲٫۵٪ و ۹۷٫۵٪ احتمال توزیع تجمعی در نظر گرفته می‌شوند. در سطح اطمینان مناسب باید دو نکته مهم در نظر گرفته شود. اولاً، باند 95%PPU شامل بیشترین داده‌های مشاهداتی باشد و دوماً میانگین فاصله بین باندهای بالا و پایین (d-Factor) از انحراف استاندارد داده‌های مشاهداتیکمتر باشد. می‌توان متوسط عرض باند فاصله اطمینان را به شرح زیر محاسبه کرد که در آن σx و $\overline{dx}$ به ترتیب انحراف معیار داده‌ها و عرض متوسط باند اطمینان و K تعداد داده‌های مشاهداتی است.

جدول ۳- نتایج ارزیابی مدل‌های مبتنی بر کرنل با پیش پردازش داده‌ها برای دو ایستگاه

Table 3- Results of evaluating kernel-based models with data preprocessing for two stations

Model مدل	DWT-EEMD-	Performance criteria معیارهای ارزیابی											
		Train			Test			Train			Test		
		R	DC	RMSE	R	DC	RMSE	R	DC	RMSE	R	DC	RMSE
		Station 1 ایستگاه ۱						Station 2 ایستگاه ۲					
M1	GPR	0.854	0.792	0.032	0.831	0.753	0.036	0.861	0.783	0.036	0.854	0.750	0.037
	SVM	0.834	0.775	0.035	0.812	0.738	0.038	0.842	0.781	0.037	0.834	0.735	0.040
M2	GPR	0.953	0.863	0.023	0.839	0.837	0.026	0.987	0.874	0.027	0.869	0.841	0.029
	SVM	0.932	0.845	0.025	0.820	0.821	0.027	0.965	0.864	0.030	0.850	0.825	0.031
M3	GPR	0.908	0.705	0.037	0.744	0.684	0.040	0.940	0.712	0.042	0.772	0.678	0.045
	SVM	0.887	0.698	0.038	0.727	0.681	0.043	0.918	0.696	0.043	0.753	0.671	0.048
M4	GPR	0.926	0.851	0.028	0.909	0.824	0.031	0.959	0.871	0.028	0.942	0.823	0.032
	SVM	0.904	0.833	0.029	0.889	0.806	0.032	0.937	0.863	0.030	0.921	0.810	0.033
M5	**GPR**	**0.988**	**0.870**	**0.018**	**0.937**	**0.854**	**0.024**	**0.995**	**0.892**	**0.025**	**0.988**	**0.868**	**0.028**
	SVM	**0.965**	**0.862**	**0.021**	**0.915**	**0.836**	**0.026**	**0.987**	**0.885**	**0.026**	**0.967**	**0.850**	**0.029**
		Station 2 ایستگاه ۲											
M6	GPR	0.860	0.823	0.029	0.856	0.786	0.033						
	SVM	0.842	0.804	0.031	0.837	0.770	0.036						
M7	GPR	0.919	0.856	0.024	0.904	0.839	0.028						
	SVM	0.920	0.855	0.026	0.905	0.822	0.031						
M8	**GPR**	**0.968**	**0.901**	**0.021**	**0.951**	**0.861**	**0.024**						
	SVM	**0.944**	**0.893**	**0.023**	**0.929**	**0.844**	**0.027**						



شکل ۵- (الف) زیرسری‌های حاصل از تجزیه بار رسوب معلق ایستگاه اول، (ب) نمودار مقادیر مشاهداتی و محاسباتی مدل تلفیقی GPR برای دو ایستگاه با استفاده از داده‌های خود ایستگاه و (ج) بررسی ارتباط ایستگاه‌ها

Figure 5- (a): The suspended sediment load decomposed subseries for the station 1, (b): plots of the observed and predicted values of integrated GPR model for two stations using the station's own data, and (c): investigating the stations relationship

جدول ۴- نتایج تحلیل عدم اطمینان مدل‌های GRP و WT-EEMD-GPR

Table 4- Uncertainty analysis results for the GPR and WT-EEMD-GPR methods.

روش Method		معیارهای ارزیابی Performance criteria							
		95PPU	d-Factor		95PPU	d-Factor		95PPU	d-Factor
GPR	Station 1	72.1%	0.341	Station 2	74.8%	0.242	Station 2-1	71.14%	0.258
WT-EEMD-GRP		83.2%	0.093		85.1%	0.108		83.4%	0.110

$$\text{d - factore} = \frac{\overline{dx}}{\sigma x} \quad (۹)$$

$$\text{Bracketed by 95PPU} = \frac{1}{k} Cont(j \mid X_L < X_{reg} < X_U \quad (۱۰)$$

نتایج بدست آمده برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت در جدول ۴ نشان داده شده است. براساس مقادیر بدست آمده برای شاخص‌های d-Factor و 95%PPU، مشاهده می‌شود که بیشتر مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده در محدوده باند 95%PPU قرار دارند. همچنین، مقدار شاخص d-Factor برای مجموعه داده‌های آموزش و آزمون کمتر از انحراف استاندارد داده‌های مشاهداتی است. بنابراین، براساس نتایج، می‌توان بیان نمود که مدل‌سازی بار رسوب معلق با استفاده از مدل تلفیقی GPR دارای درجه عدم قطعیت مجاز می‌باشد.

نتیجه‌گیری

پیش‌بینی بار معلق رسوبی به دلیل اثرات آن روی شاخص‌های کیفی آب، تقلیل گنجایش مخازن و تغییر در مورفولوژی رودخانه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا، در این تحقیق به پیش‌بینی بار رسوبی معلق با استفاده از روش‌های تلفیقی پیش‌پردازش به‌عنوان روش جدید جهت بهبود دقت پیش‌بینی بار رسوب معلق پرداخته شد. مدل‌های ورودی متفاوتی با استفاده از داده‌های مربوط به دبی جریان و دبی رسوب و با در نظر گرفتن دو نوع مدل‌سازی با استفاده از داده‌های مربوط به خود ایستگاه و داده‌های مربوط به ایستگاه قبل تعریف گردید و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که تجزیه سری‌های زمانی با هر روش WT و تجزیه بیشتر زیرسری‌های با فرکانس بالا با روش EEMD تا حدود زیادی باعث بهبود نتایج می‌شود. مطابق با نتایج حاصله، برای مدل‌های تعریف‌شده براساس داده‌های خود ایستگاه، مدل M5 با پارامترهای ورودی Dw_t, Dw_{t-1}, Ds_{t-1} و در حالت بررسی ارتباط بین ایستگاه‌ها مدل M8 با پارامترهای ورودی Ds_{t-2},Dw_{t-1}, Ds_{t-1} با داشتن بیشتر R و DC و کمترین مقادیر خطا مدل برتر به‌دست آمدند. مشاهده شد که در صورت استفاده از هر دو روش‌های تلفیقی نتایج دقیق‌تری در تخمین بار رسوب معلق حاصل شده و دقت مدل‌ها حدود ۲۰ تا ۲۵٪ افزایش می‌یابد. همچنین نتایج عدم قطعیت نشان داد که روش تلفیقی WT-EEMD-GPR دارای درجه اطمینان مناسبی در مدل‌سازی بار معلق رسوبی است.

منابع

1- Adamowski K., Prokoph A., and Adamowski J. 2009. Development of a new method of wavelet aided trend detection and estimation. Hydrology Process 23(18): 2686–2696.

2- Amirat Y., Benbouzidb M., Wang T., Bacha K., and Feld G. 2018. EEMD-based notch filter for induction machine bearing faults detection. Applied Acoustics 133: 202–209.

3- ASCE, Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology. 2000. Artificial Neural Networks in hydrology. I: Preliminary concepts. Hydrological Engineering, ASCE 5(2): 115-123.

4- Asheghi R., Hosseini S.A., and Sanei M. 2021. Intelligent hybridized modeling approach to predict the bedload sediments in gravel-bed rivers. Modeling Earth Systems and Environment 8: 1-10.

5- Bahmani R., and Ouarda T.B. 2021. Groundwater level modeling with hybrid artificial intelligence techniques. Journal of Hydrology 595: 125659.

6- Chou C. 2011. Complexity analysis of rainfall and runoff time series based on sample entropy in different temporal scales. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 6: 1401–1408.

7- Heydari M., Shabanlou S., and Sanahmadi B. 2020. Self-adaptive extreme learning machine-based prediction of roller length of hydraulic jump on rough bed. ISH Journal of Hydraulic Engineering 45: 1-11.

8- Kemp P., Sear D., Collins A., Naden P., and Jones I. 2011. The impacts of fine sediment on riverine fish. Hydrological Processes 25: 1800–1821.

9- Lau KM., and Weng HY. 1995. Climate signal detection using wavelet transform, How to make time series sing. Bulletin of the American Meteorological Society 76: 2391-2402.

10- Maroufpour S., Maroufpoor E., and Sanikhani H. 2018. Monthly Evapotranspiration Modeling in the Absence of

Climatic Data Using the Soft Computing Methods in West and Northwest of Iran. Water Resource Engineering 10(34): 37-50. (In Persian with English abstract)
11- Najah A., El-Shafie A., Karim OA., Jaafar O., and El-Shafie AH. 2011. An application of different artificial intelligences techniques for water quality prediction. International Journal of Physical Sciences 6: 5298–5308.
12- Noori R., Deng Z., Kiaghadi A., and Kachoosangi F.T. 2015 How reliable are ann, anfis, and svm techniques for predicting longitudinal dispersion coefficient in natural rivers?. Hydraulic Engineering 142(1): 04015039.
13- Nourani V., Alizadeh F., and Roushangar K. 2016. Evaluation of a two-stage SVM and spatial statistics methods for modeling monthly river suspended sediment load. Water Resources Management 30(1): 393-407.
14- Roushangar K., and Ghasempour R. 2019. Investigation of the Performance of Classical and Artificial Intelligence Approaches in Prediction of Roughness Coefficient in Meanders. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 12(4): 811-822. (In Persian with English abstract)
15- Siviapragasam C., and Liong S. 2001. Rainfall and runoff forcasting with SSA-SVM approach. Hydroinformation 3(5): 141-152.
16- Vapnik V. 1995. The Nature of Statistical Learning Theory. Data Mining and Knowledge Discovery, pp. 1–47.
17- Wu Z., and Huang N. 2004. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method, Proc RS Lond 460A: 1597–1611.
18- Zhou Y., Lu X., Huang Y., and Zhu Y. 2007. Suspended sediment flux modeling with artificial neural network: An example of the Longchuanjiang River in the upper Yangtze catchment. China Geomorphology 84: 111-125.

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 475-488

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۴۸۸-۴۷۵

Estimation of Suspended Sediment Load Using Integrated Intelligent Methods with Considering Model Uncertainty

S.M. Saghebian[1*]

Received: 23-02-2021
Accepted: 19-07-2021

Introduction: Sediment transportation and accurate estimation of its rate is a significant issue for river engineers and researchers. So far, various and complex relationships have been proposed to predict the amount of suspended sediment transport rate, such as velocity and critical shear stress based equations. However, the complex nature of sediment transport and lack of validated models make it difficult to model the suspended sediment concentration and suspended sediment discharge carried by rivers. Although the developed models led to promising results in sediment transport prediction, due to the importance of sediment transport and its impact on hydraulic structures it is necessary to use other methods with higher efficiency. On the other hand, in recent years, the Meta model approaches have been applied in investigating the hydraulic and hydrologic complex phenomena. Hybrid models involving signal decomposition have also been shown to be effective in improving the prediction accuracy of time series prediction methods, as indicated in. Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition analysis is one of the widely used signal decomposition methods for hydrological time series prediction. Decomposition of time series reduces the difficulty of forecasting, thereby improving forecasting accuracy.

In this study, due to the complexity of the sediment and erosion phenomenon and the effect of different parameters in estimating, time series pre-processing methods along with support vector machine (SVM) and Gaussian process regression (GPR) kernel based approaches were used to estimate suspended sediment load of a natural river at two consecutive hydrometric stations. For this purpose, different models were defined based on hydraulic and sediment particles characteristics. Moreover, the capability of integrated pre-processing and post-processing methods in two states of inter-station and between-stations was investigated. First, the Wavelet Transform (WT) method was used for data pre-processing then, the high-frequency sub-series were selected and re-decomposed using the Empirical Mode Decomposition (EMD). Finally, the most effective sub-series were imposed as inputs for kernel-based models. In addition, to assess the reliability of the superior model, Monte Carlo uncertainty analysis was used.The results showed that the GPR model had a desirable degree of uncertainty in modeling.

Materials and Methods: In this study, data of two stations of Housatonic River was used. The distance between stations was approximately 50 km. The first station is located near Great Brighton, Massachusetts, and the second station is in Connecticut. The basin area for the stations is 282 and 634 square miles, respectively. The flow path is from the first station to the second station. SVM and GPR models are based on the assumption that adjacent observations should convey information about each other. Gaussian processes are a way of specifying a prior directly over function space. This is a natural generalization of the Gaussian distribution whose mean and covariance are a vector and matrix, respectively. Due to prior knowledge about the data and functional dependencies, no validation process is required for generalization, and GP regression models are able to understand the predictive distribution corresponding to the test input. Wavelet Transform (WT) uses a flexible window function (mother wavelet) in signal processing. The flexible window function can be changed over time according to the signal shape and compactness. After using WT, the signal will decompose into two approximations (large-scale or low-frequency component) and detailed (small-scale component) components. EEMD was proposed to solve the mode mixing issue of empirical mode decomposition (EMD) which specifies the true IMF as the mean of an ensemble of trials. Each trial consists of the decomposition results of the signal plus a white noise of finite amplitude. EMD can be used to decompose any complex signal into finite intrinsic mode functions and a residue, resulting in subtasks with simpler frequency components and stronger correlations that are easier to analyze and forecast. Another important feature of empirical model of decomposition is that it can be used for noise reduction of noisy time series, which can be effective in improving the accuracy of model predictions. In the uncertainty analysis method, two elements are used to test the robustness and to analyze the models uncertainty. The first one is the percentage of the studied outputs which are in the range of 95PPU and the next one is the average distance between the upper (X_U) and lower (X_L) uncertainty bands. In this regard, the considered model should be run many

1- Department of Civil Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University Ahar, Iran
(*- Corresponding Author Email: smsaghebian@iau-ahar.ac.ir)
DOI: 10.22067/JSW.2021.68665.1021

times (1000 times in this study), and the empirical cumulative distribution probability of the models be calculated. The upper and lower bands are considered 2.5% and 97.5% probabilities of the cumulative distribution, respectively.

Results and Discussion: In order to evaluate and review the performance of the tested models and determine the accuracy of the selected models, three performance criteria named Correlation Coefficient (CC), Determination Coefficient (DC), and Root Mean Square Errors (RSME) were used. The obtained results indicated that the accuracy of the applied integrated models was higher than the single SVM and GPR models. The use of integrated methods decreased the error criteria between 20 to 25 %. The obtained results for the uncertainty analysis showed that in suspended sediment load modeling the observed and predicted values were within the 95 PPU band in most of the cases. Moreover, it was found that the amount of d-Factors for train and test datasets were smaller than the standard deviation of the observed data. Therefore, based on the results, it could be induced that the suspended sediment modeling via integrated WT-EEMD-GPR model led to an allowable degree of uncertainty.

Conclusion: Comparison of the developed models' accuracy revealed that integrated GPR and SVM models had higher performance compared with single GPR and SVM models in predicting the suspended sediment discharge. The use of these two methods approximately decreased the error criteria between 20 to 25 %. According to the results, for the models that were developed based on the station data, the model with the input parameters of Dw_t, Dw_{t-1}, and Ds_{t-1} and in the case of investigating the relationship between the stations, the model with the input parameters of Ds_{t-2}, Dw_{t-1}, and Ds_{t-1} were superior models. Also, based on the uncertainty analysis, the integrated GPR model had an allowable degree of uncertainty in suspended sediment modeling. However, it should be noted that the used methods are data sensitive models. Therefore, further studies using data ranges out of this study and field data should be carried out to determine the merits of the models to estimate suspended sediment load in the real conditions of flow.

Keywords: Experimental mode decomposition, Gaussian process regression, Pre-processing, Suspended sediment

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 489-504

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۵۰۴-۴۸۹

مقاله پژوهشی

برآورد زمان تأخیر تغذیه در آبخوان مشهد-چناران با استفاده از روش همبستگی متقابل

محمود ارجمند شریف[۱]- هادی جعفری[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵

چکیده

آبخوان مشهد ـ چناران با وسعت حدود ۲۵۲۷ کیلومتر مربع، مهم‌ترین آبخوان استان خراسان رضوی است. در این تحقیق، زمان واکنش آب زیرزمینی نسبت به بارش با استفاده از داده‌های ۳۱ حلقه چاه مشاهده‌ای به روش همبستگی متقابل در یک دوره ۱۵ ساله (سال آبی ۸۱ – ۱۳۸۰ تا ۹۵ – ۱۳۹۴) تعیین شده است. نتایج آزمون همبستگی نشان می‌دهد، پس از گذشت حدود ۲ تا ۳ ماه، تأثیر بارش به‌تدریج بر سطح آب زیرزمینی مشاهده شده و ضریب همبستگی در سطح خطای ۹۵ و ۹۰ درصد به ترتیب برای ۷۷ و ۹۷ درصد از چاه‌ها معنی‌دار می‌شود. حداقل زمان تأخیر، ۲ ماه و حداکثر آن نیز ۷ ماه برآورد شده است. به‌طور کلی، زمان تأخیر برآورد شده تطابق خوبی با عمق آب زیرزمینی که بیانگر ضخامت ناحیه غیراشباع است، دارد و به صورت کامل از الگوی نقشه هم‌عمق تبعیت می‌نماید. مقدار تغذیه در سراسر آبخوان مشهد- چناران بیشتر توسط شرایط ناحیه غیراشباع (ضخامت، جنس و ...) کنترل و تغییرات عمق آب زیرزمینی به‌نوعی عامل اصلی ایجاد تأخیر زمانی بین وقوع بارندگی و شروع تغذیه در آبخوان محسوب می‌شود. با شروع بارندگی از اواخر مهرماه، تغذیه آب زیرزمینی در اغلب چاه‌ها از اواسط فصل پاییز شروع شده و تا اواخر فصل بهار ادامه می‌یابد. بیشینه مقدار تغذیه در اواخر فصل زمستان صورت می‌گیرد. در فصل تابستان، بارندگی نقش بسیار کم‌رنگی در تغذیه دارد و استخراج بی‌رویه آب از آبخوان و به‌تبع آن افت شدید و ادامه‌دار سطح ایستابی، نقش اصلی در نوسانات آب را ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: رگرسیون خطی، ضریب همبستگی پیرسون و ضریب همبستگی متقابل، واکنش آب زیرزمینی نسبت به بارش، همبستگی‌نگار متقابل

مقدمه

به عقیده هیلی (۶) تغذیه یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌ها در مطالعات بیلان آب زیرزمینی است. پس از یک واقعه بارندگی، مقداری از بارش به درون زمین نفوذ می‌کند. این مقدار در ناحیه غیراشباع به نفوذ عمقی ادامه داده و درنهایت به سطح ایستابی رسیده و موجب خیز[۳] آن می‌شود. درک درست فرآیند تغذیه آب زیرزمینی و برآورد مقدار دقیق آن، مستلزم برآورد زمان واکنش آب زیرزمینی نسبت به وقایع بارندگی است. مدل‌سازی واکنش آب زیرزمینی به تنش‌های طبیعی از جمله بارندگی با استفاده از روش‌های آماری ، از قبیل همبستگی[۴]، همبستگی متقابل[۵] و رگرسیون در یک دهه گذشته رواج زیادی پیدا کرده است. هدف اصلی در تحلیل سری‌های زمانی، ایجاد یک مدل آماری برای داده های وابسته به زمان بر اساس اطلاعات گذشته آن است. تحلیل آماری رابطه بین دو متغیر، اولین گام در بررسی روابط علت و معلولی بین متغیرها در سری‌های زمانی است. درصورتی‌که بارندگی و سطح آب زیرزمینی را به‌عنوان دو سری زمانی در نظر بگیریم، می‌توان ویژگی‌های تغذیه آب زیرزمینی و زمان تأخیر را با استفاده از همبستگی زمانی بین دو سری ارزیابی نمود. به دلایل مختلفی، واکنش آب زیرزمینی نسبت به بارش به تأخیر می‌افتد. جدا از دلایل ایجاد این تأخیر، می‌توان اثر متقابل باران و آب زیرزمینی را با استفاده از روش آماری همبستگی متقابل بررسی و مورد مطالعه قرار

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی و دانشیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود
(*- نویسنده مسئول: Email: h_jafari@shahroodut.ac.ir)
DOI: 10.22067/JSW.2021.70672.1058

3- Water-table rise
4- Correlation
5- Cross-correlation

داد. روش همبستگی متقابل، به‌عنوان یک روش ساده و کاربردی، توسط محققین مختلفی مطالعه و مورد پذیرش قرار گرفته است. چیائودانی و همکاران (۳) با استفاده از روش‌های آماری و فرکتالی رابطه بین آب زیرزمینی و آب سطحی را در یک دشت آبرفتی واقع در مرکز ایتالیا ارزیابی نمودند. در این تحقیق، از روش‌های آماری تک متغیره و دو متغیره برای تحلیل بارندگی و برای ارزیابی رابطه بارندگی و آب زیرزمینی نیز از تحلیل همبستگی متقابل و خودهمبستگی استفاده شده است. چای و همکاران (۲) با تحلیل سری زمانی داده‌های سه ساله تراز آب زیرزمینی، تغذیه آبخوان منطقه شهری سئول، واقع در جنوب کره جنوبی را برآورد نمودند. زمان تأخیر با استفاده از روش همبستگی متقابل بین ۱ تا ۷ روز برای تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای و ۱۵ تا ۵۸ روز نیز برای گروه دیگری از چاه برآورد شده و عمق برخورد به آب زیرزمینی، تراز سطح زمین و ضخامت لایه خاک نیز از عوامل تعیین‌کننده زمان تأخیر ذکر شده‌اند. هاکینگ و کلی (۷) با استفاده از توابع پاسخ ناگهانی تغذیه آب زیرزمینی و زمان تأخیر را در ورتیسول‌های (خاک‌های حاوی رس زیاد) حوضه رودخانه کاندماین (جنوب کوینزلند، استرالیا) محاسبه نمودند. در این تحقیق، حداقل، حداکثر و میانگین زمان تأخیر در بازه زمانی بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۲ میلادی به ترتیب ۱۸۸ روز، ۴۸ سال و ۵/۳ سال تعیین شده است. کراسبی و همکاران (۴) رویکرد تحلیل سری‌های آماری را برای برآورد تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از روش نوسانات سطح ایستابی معرفی نموده‌اند. در این تحقیق، زمان تأخیر بین تغییرات تراز سطح آب و سیگنال‌های بارندگی، به‌عنوان یکی پارامترهای مورد استفاده مدل با استفاده از آزمون همبستگی متقابل جزئی[1] تعیین شده است. هیلی و کوک (۵) از تحلیل سری‌های زمانی تراز سطح آب زیرزمینی برای برآورد تغذیه استفاده نموده و این روش را رایج‌ترین روش مورد استفاده برای برآورد تغذیه ذکر نموده‌اند. شمس‌زاده و همکاران (۱۴) به بررسی زمان تأخیر واکنش آب زیرزمینی به حجم آب انتقالی خارج از حوضه پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که اثرات ورود آب خارج از حوضه، بعد از یک تأخیر ۴ ماهه بر روی سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای محدوده شهر مشهد نمایان می‌شود. مردانه و همکاران (۱۲) رابطه بین بارندگی و سطح آب زیرزمینی را در دشت شیراز با استفاده از روش همبستگی متقابل ارزیابی نموده‌اند. در این تحقیق، حدود ۸۶ درصد چاه‌ها همبستگی مثبت با بارندگی نشان داده و زمان تأخیر نیز حدود ۱ ماه محاسبه شده است. نادریان‌فر و همکاران (۱۳) روند تغییرات نوسانات سطح آب زیرزمینی را در حوضه آبریز نیشابور تحت شرایط اقلیمی مختلف بررسی نموده‌اند. نتایج همبستگی پیرسون بین بارش و سطح آب زیرزمینی نشان داده که بارندگی‌ها با یک تأخیر ۱۰ ماهه بیشترین تأثیر را بر سطح آب زیرزمینی دشت نیشابور دارند.

برآورد مقدار تغذیه آب زیرزمینی، مستلزم محاسبه زمان تأخیر ورود اولین‌ها پالس‌های بارش به آبخوان است. تاکنون در آبخوان مشهد ـ چناران، زمان تأخیر به دلیل وجود شرایط بسیار پیچیده زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی آبخوان محاسبه نشده است. در این پژوهش تلاش شده است، زمان تأخیر را که بیشتر متأثر از عمق سطح ایستابی است بر اساس سری زمانی داده‌های عمق آب زیرزمینی و بارش در محل چاه‌های مشاهده‌ای منتخب با استفاده از تحلیل همبستگی متقابل محاسبه و نقشه تغییرات آن در سطح آبخوان ارائه شود.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی

محدوده مطالعاتی مشهد-چناران به وسعت حدود ۹۹۵۷ کیلومترمربع در حوضه آبریز درجه دو قره‌قوم واقع شده است. این محدوده از نظر موقعیت جغرافیایی (شکل ۱) در حدفاصل ′۲۲ °۵۸ تا ′ ۷° ۶۰ طول شرقی و′ ۵۹ °۳۵ تا ′ ۲°۳۷ عرض شمالی قرار گرفته است. آبخوان آبرفتی مشهد-چناران، مهم‌ترین آبخوان به لحاظ وسعت و میزان بهره‌برداری در استان خراسان رضوی می‌باشد.

هیدروژئولوژی

آبخوان آبرفتی مشهد ـ چناران با وسعت حدود ۲۵۲۷ کیلومترمربع، حوضه فروافتاده‌ای با کشیدگی شمال غرب- جنوب شرق می‌باشد که در حدفاصل رشته‌کوه‌های بینالود در غرب و جنوب غرب و رشته‌کوه‌های هزار مسجد در شمال و شمال شرق قرار گرفته است (۱). بررسی خصوصیات آبخوان مشهد ـ چناران نشان می‌دهد که این آبخوان از نوع آزاد است. تنوع واحدهای زمین‌شناسی حاشیه شمالی و جنوبی آبخوان، عملکرد گسل‌های اصلی و فرعی و سیکل‌های فرسایش و رسوب‌گذاری حاصل از جریانات سطحی خروجی از بلندی‌های شمالی و جنوبی، باهم باعث تنوع و تغییرات قابل‌توجه در ضخامت و جنس آبرفت، مورفولوژی سنگ کف و خصوصیات هیدرولیکی آبخوان شده است. این ناهمگونی در خصوصیات، موجب شده در برخی نقاط سنگ کف در سطح زمین ظاهر شود و در برخی نقاط نیز ضخامت آبرفت به بیش از ۳۰۰ متر برسد. جنس سنگ کف در بخش شمال غرب تا محدوده شهر چناران از رسوب‌های نئوژن، در حاشیه جنوبی از فیلیت و سنگ‌های آذرین، در بخش شمالی بیشتر از سازندهای شوریجه و تیرگان و در بخش جنوب شرقی آبخوان نیز از رخساره‌های نئوژن تشکیل شده است. در

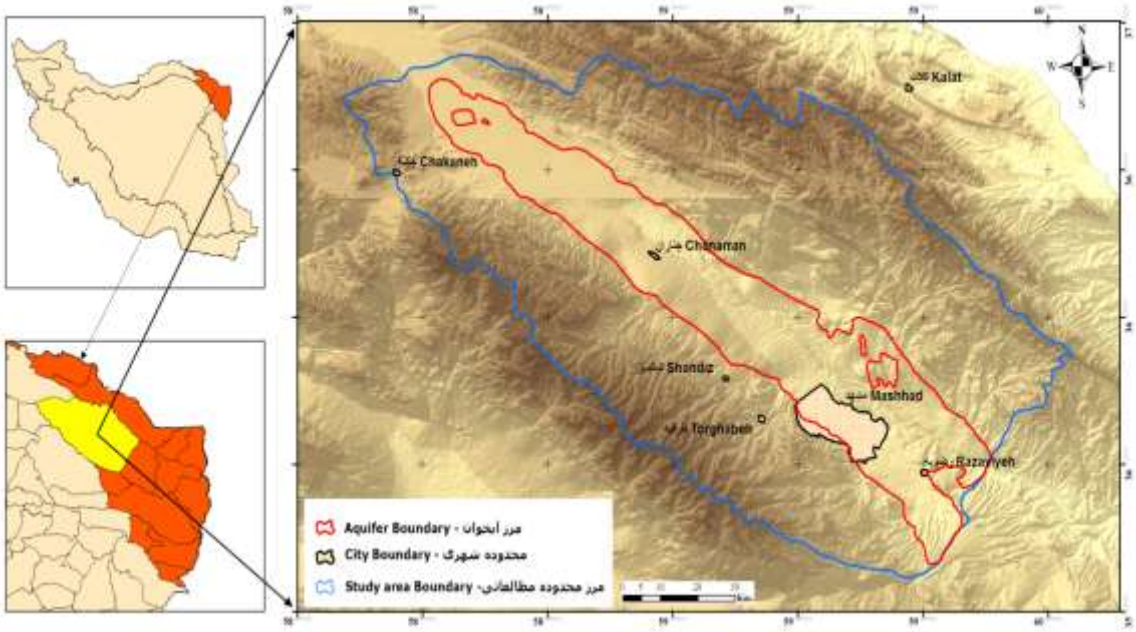
1- Partial Cross-correlation

بخش مرکزی و جنوب شرقی سنگ‌کف بسیار ناهموار بوده و از تنوع لیتولوژیکی بیشتری برخوردار است. ضخامت آبرفت در بخش شمال غربی نسبت به بخش مرکزی و جنوب‌شرقی کمتر است. در حاشیه بلندی‌های بینالود، رسوب‌های مخروطه افکنه‌ای درشت‌دانه شامل شن، ماسه و قلوه‌سنگ، با تناوبی از رسوب‌های ریزدانه، پیکره آبخوان را تشکیل می‌دهند. در نواحی شمالی دشت، آبرفت ریزدانه و بیشتر از جنس پهنه‌های سیلت و رس و در حاشیه جنوبی نیز، درشت‌دانه و نسبتاً هموژن است که با نزدیک شدن به کشف‌رود، ریزدانه‌تر شده و دارای لایه‌بندی متناوبی می‌شود. این روند در بخش شرقی آبخوان (خروجی دشت) نیز قابل مشاهده است (۱ و ۱۰).

متوسط ضریب ذخیره آبخوان ۶ درصد و مقدار قابلیت انتقال آبخوان نیز از حداقل حدود ۲۰۰ متر مربع بر روز در حاشیه بلندی‌های جنوب غرب تا حداکثر حدود ۳۰۰۰ متر مربع بر روز در مرکز دشت است. عمق آب زیرزمینی در آبخوان تابعی از شرایط زمین‌شناسی، توپوگرافی و الگوی رسوب‌گذاری است. مقادیر عمق آب زیرزمینی در شمال آبخوان نسبت به جنوب آن کم‌تر است. در جنوب آبخوان به دلیل ضخامت زیاد آبرفت و تأثیر توپوگرافی، عمق آب زیرزمینی به‌تدریج از حوالی کشف‌رود به‌طرف حاشیه جنوبی آبخوان افزایش می‌یابد (۱۰). بر اساس سوابق آخرین آماربرداری سراسری در محدوده آبخوان مشهد-چناران، ۳۷۷۳ حلقه چاه، ۴۰ رشته قنات و ۲ دهنه چشمه به ترتیب با تخلیه ۷۶۴، ۱۳ و ۰/۲۲ میلیون مترمکعب شناسایی شده‌اند (۹).

داده‌ها و اطلاعات

در این تحقیق، از داده‌های ماهانه عمق آب زیرزمینی و بارندگی در یک دوره آماری ۱۵ ساله (مهر ۱۳۸۰ تا شهریور ۱۳۹۵) استفاده شده است. در آبخوان مشهد ـ چناران، ۷۴ حلقه چاه مشاهده‌ای فعال وجود دارند که به‌صورت ماهانه عمق آب زیرزمینی در آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. رفتار هیدرولیکی این چاه‌ها را می‌توان در سه گروه تقسیم‌بندی نمود. گروه اول شامل چاه‌هایی است که در لایه آبدار آزاد فوقانی حفر شده و سطح آب در آن‌ها دارای نوسانات سینوسی و متأثر از نزولات جوی می‌باشد. در گروه دوم، چاه‌هایی که در آبخوان اصلی مشهد – چناران حفر شده‌اند، قرار دارند. سطح آب در این چاه‌ها به‌طور مستمر، ولی با شدت کمتری افت می‌نماید. گروه سوم، شامل چاه‌هایی هستند که بیشتر در محدوده‌های شهری، در مجاورت مسیل‌ها و رودخانه‌ها و یا در مکان‌هایی که آبخوان آبرفتی بر روی سنگ کف آهکی قرار گرفته، مشاهده می‌شوند. با توجه به این گروه‌بندی و با در نظر گرفتن پیوستگی داده‌ها در طول دوره آماری، ۳۱ حلقه چاه به‌عنوان معرف انتخاب و سپس محاسبات و تحلیل‌های لازم بر روی آن‌ها انجام شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی مشهد-چناران نسبت به حوضه‌های آبریز اصلی ایران

Figure 1- Geographical location of the Mashhad-Chenaran study area with respect to Iran's major basins

برای محاسبه بارندگی در محل چاه‌های مشاهده‌ای از داده‌های روزانه بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی موجود (۲۵ ایستگاه باران‌سنجی و ۹ ایستگاه تبخیرسنجی) استفاده شده است. نخست، مقادیر تجمعی باران روزانه در محل هر ایستگاه طی یک ماه، (از روز پانزدهم هر ماه تا روز پانزدهم ماه بعد) محاسبه شد، سپس در محیط ArcGIS، ابتدا فایل رستر بارندگی ماهانه تهیه و درنهایت مقادیر بارندگی در محل چاه‌های مشاهده‌ای از روی فایل رستر استخراج و استفاده گردید. لاگ حفاری تعدادی از چاه‌های منتخب در شکل ۲ و مشخصات چاه‌ها و خصوصیات آماری داده‌های ماهانه عمق سطح آب زیرزمینی و بارندگی نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

سری‌های زمانی و ضریب همبستگی

در مباحث هیدرولوژیک، سری‌های زمانی به دو صورت پیوسته و یا گسسته (ناپیوسته) مشاهده می‌شوند. با توجه به تغییرات مداوم و دوره‌ای تراز آب زیرزمینی در آبخوان مشهد - چناران و همچنین ماهیت بارندگی، می‌توان این متغیرها را به‌عنوان سری زمانی ناپیوسته در نظر گرفت. بر این اساس، زمان تأخیر شروع تغذیه آب زیرزمینی در آبخوان مشهد - چناران با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی به‌صورت کمی قابل‌محاسبه است. دو متغیر، زمانی مرتبط قلمداد می‌شوند که توزیع مقادیر یکی از آن‌ها برحسب مقادیر متغیر دیگر تغییر کند. اگرچه رابطه آماری بین دو متغیر لزوماً به معنای وجود رابطه علت و معلولی بین آن‌ها نیست، بااین‌وجود رابطه آماری می‌تواند یک مشاهده تجربی در تأیید فرضیه‌ای باشدکه بر اساس استدلال نظری قائل به وجود رابطه علّی بین دو متغیر است (۸).

معمول‌ترین روش اندازه‌گیری وابستگی بین دو متغیر کمی، محاسبه ضریب همبستگی پیرسون[1] (r) است. اگر فرض کنیم x و y دو متغیر تصادفی باشند، ضریب پیرسون از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. اگر ضریب پیرسون بیش از ۰/۸ باشد، رابطه بسیار قوی و اگر کمتر از ۰/۱۹ باشد بیانگر رابطه ناچیز و یا فقدان رابطه است. بین این مقادیر، شدت رابطه از رابطه ضعیف تا رابطه قوی در تغییر است.

$$Corr(x,y) = r = \frac{COV(xy)}{(VAR_x VAR_y)^{1/2}} \qquad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، x و y متغیر تصادفی، Corr(x,y) ضریب همبستگی، COV(xy) کوواریانس، VARx و VARy واریانس هستند.

پس از تعیین رابطه و بررسی ویژگی‌های آن، معنی‌دار بودن آماری رابطه نیز از طریق آماره تصمیم P-Vlaue و آزمون‌های فرض بررسی و مشخص می‌شود. در این پژوهش، فرض شده است بین بارندگی و تغییرات سطح آب رابطه خطی وجود دارد، بنابراین، فرض صفر (H_0) بیانگر عدم ارتباط بین دو بین متغیر ($r=0$) و فرض جانشین (H_1) نیز بیانگر وجود ارتباط بین دو بین متغیر ($r \neq 0$) است. در صورتی که وابستگی زمانی بین دو متغیر وجود داشته باشد، یک متغیر به لحاظ زمانی تحت تأثیر متغیر دیگر است. به فرآیند مقایسه دو سری زمانی در گام‌های زمانی مختلف، همبستگی متقابل گفته می‌شود (۲). با استفاده از آزمون همبستگی متقابل می‌توان رابطه زمانی تغییرات سطح ایستابی به عنوان متغیر وابسته و بارندگی به‌عنوان متغیر مستقل را برای تأخیرهای مختلف ارزیابی و تحلیل نمود. رابطه مورد استفاده برای محاسبه همبستگی متقابل، همان رابطه همبستگی پیرسون است. در عمل به دلیل اینکه واریانس در نمونه‌های کوچک با تغییر سری زمانی، تغییر می‌کند ضریب همبستگی متقابل با استفاده از نمونه آماری و از رابطه ۲ تخمین زده می‌شود (۱۱).

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} x_i \times y_{i+k} - \frac{1}{n-k}\left(\sum_{i=1}^{n-k} x_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n-k} y_{i+k}\right)}{\left[\sum_{i=1}^{n-k} x_i^2 - \frac{1}{n-k}\left(\sum_{i=1}^{n-k} x_i\right)^2\right]^{1/2} \times \left[\sum_{i=1}^{n-k} y_{i+k}^2 - \frac{1}{n-k}\left(\sum_{i=1}^{n-k} y_{i+k}\right)^2\right]^{1/2}} \qquad \text{رابطه ۲}$$

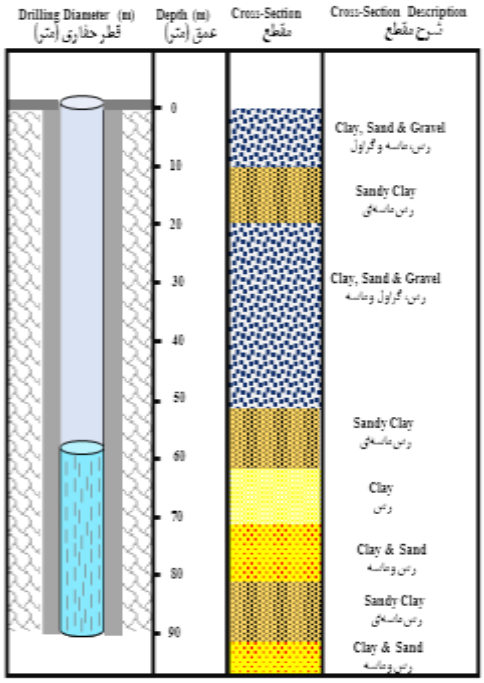
در این رابطه r_k ضریب همبستگی متقابل، k زمان تأخیر، n طول سری زمانی (تعداد داده‌ها) و x و y نیز متغیرها هستند.

زمان تأخیر برای نمونه‌های کوچک، حدود ۱۰ درصد تعداد کل داده‌ها و برای نمونه‌های بزرگ (مانند مقادیر اندازه‌گیری شده روزانه یک متغیر طی یک یا چند سال متوالی) تا حدود ۳۰ درصد تعداد کل داده‌ها قابل محاسبه است (۱۱). در این تحقیق، برای محاسبه ضریب همبستگی، از نرم‌افزار SPSS 21 و توابع موجود در بسته نرم‌افزاری اکسل ۲۰۱۹ استفاده شده است. پس از محاسبه ضرایب همبستگی، مقادیر آن برای تأخیرهای مختلف بر روی یک نمودار به نام همبستگی‌نگار متقابل[2] رسم و تحلیل می‌شوند. برای ارزیابی معنی‌داری ضریب همبستگی متقابل (رد کردن یا پذیرفتن فرض صفر)، از آزمون‌های آماری استفاده می‌شوند. به عقیده کرسیک (۱۱) برای آن‌که ضریب همبستگی در سطح خطای آزمون ۰/۰۵ (احتمال ۹۵ درصد)، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای متفاوت از صفر باشد، باید ضریب همبستگی بیشتر از مقدار به‌دست‌آمده از رابطه بارتلت[3] (رابطه ۳) شود.

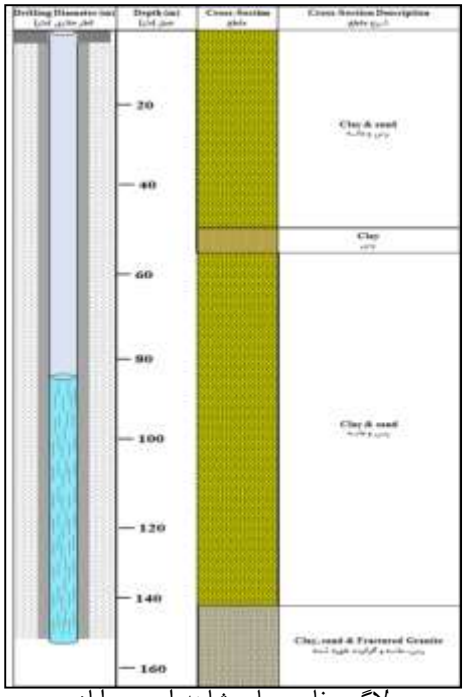
1- Pearson Correlation Coefficient

2- Cross-correlogram

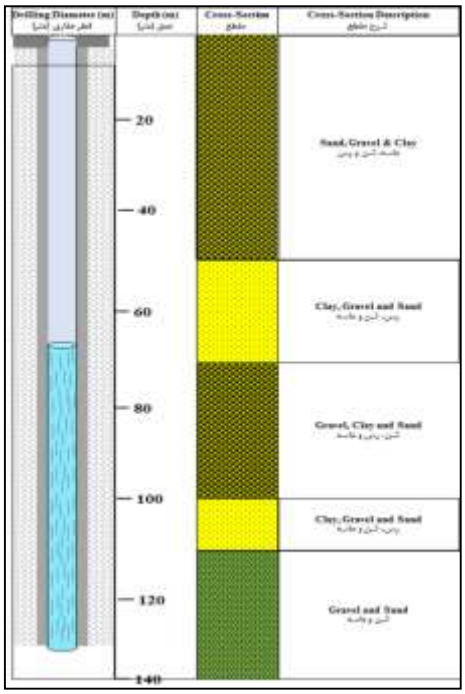
3- Bartlett



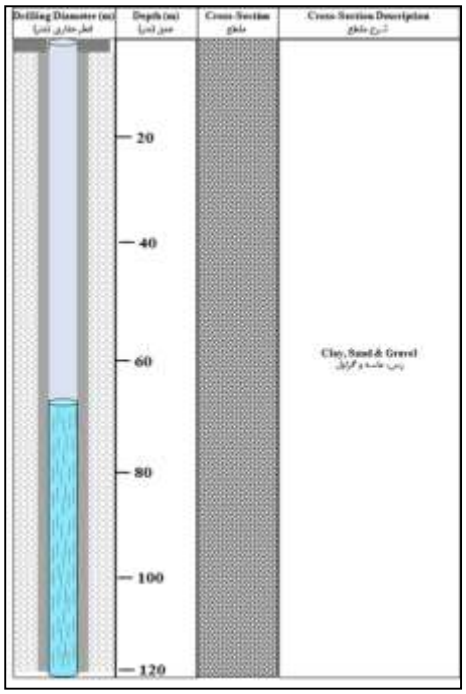
لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای اراضی کنه‌بیست
Kenebist observation well log



لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای جیم‌اباد
Jimabad observation well log



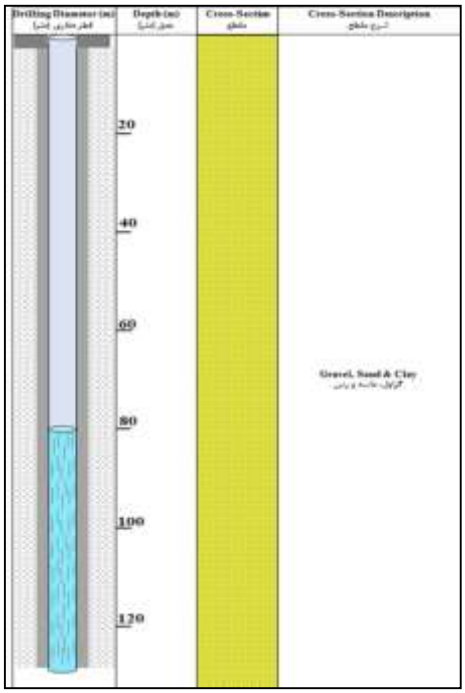
لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای چمگرد
Chamgard observation well log



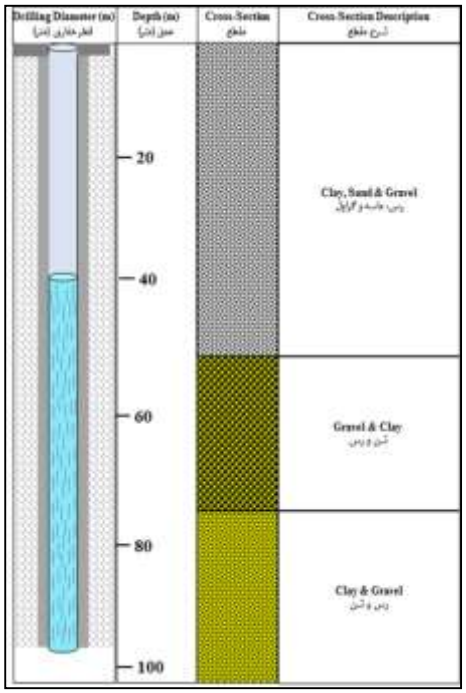
لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای قره‌تپه
Gharehtapeh observation well log

شکل ۲- لاگ حفاری تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای منتخب

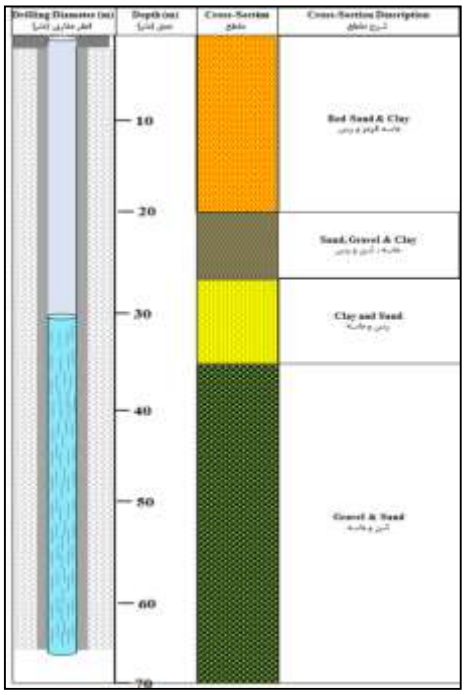
Figure 2- Well Logs for some of the representative observation wells



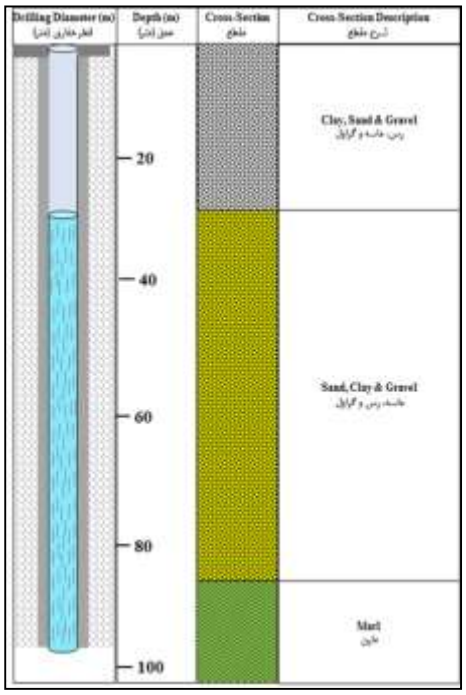
لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای موچنان
Mochenan observation well log



لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای مزرعه نمونه
Mazrae-nemoneh observation well log



لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای حاجی‌آباد
Hajiabad observation well log



لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای قره‌جنگل
Gharehjangal observation well log

شکل ۲ (ادامه)- لاگ حفاری تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای منتخب

Figure 2 (Cont.)- Well Logs for some of the representative observation wells

جدول ۱- چاه‌های مشاهده‌ای معرف آبخوان مشهد-چناران و مشخصات آماری بارندگی و عمق سطح آب زیرزمینی در دوره آماری ۱۵ ساله

Table 1- The representative observation wells of Mashhad-Chenaran aquifer and the statistical characteristics of rainfall and depth to water-table in a 15-year statistical period

نام چاه Well name	بارندگی ماهانه (میلی‌متر) Monthly precipitation (mm)			عمق برخورد به سطح ایستابی ماهانه (متر) Monthly depth to water-table (m)				
	کمینه Min.	بیشینه Max.		کمینه Min.		بیشینه Max.		میانگین Ave.
		مقدار Value	تاریخ (ماه/سال) Date (YY/MM)	مقدار Value	تاریخ Date	مقدار Value	تاریخ Date	
دوغایی (Dooghaei)	0	146.8	1386/01	53.62	1381/07/15	55.96	1394/11/15	54.49
قره چاه (Gharechah)	0	148.5	1386/01	39.31	1381/01/15	41.6	1395/05/15	40.44
شورچه (Shoorcheh)	0	120.8	1386/01	14.78	1391/04/15	17.83	1394/05/15	16.37
مؤمن‌آباد (Momen Abad)	0	127.9	1386/01	82.91	1381/11/15	93.57	1395/06/15	88.29
رضاآباد شرقی (RezaAbad Sharghi)	0	117.9	1386/01	60.03	1380/12/15	73.81	1395/05/15	68.07
موچنان (Moochenan)	0	113.4	1381/02	75.38	1380/12/15	91.95	1395/06/15	84.58
چنبرغربال (Chanbargharbal)	0	122.6	1386/01	79.62	1380/07/15	108.04	1395/06/15	91.42
قره‌تپه (Ghareh Tapeh)	0	116.7	1386/01	61.26	1380/07/15	81.06	1395/06/15	71.58
یکه لنگه (Yekeh Lengeh)	0	120.6	1386/01	86.48	1381/01/15	108.56	1395/06/15	98.41
چمگرد (Chamgard)	0	116.1	1381/02	67.82	1380/07/15	83.88	1395/06/15	75.82
حاجی‌آباد (HajiAbad)	0	124.7	1386/01	47.2	1380/07/15	58.24	1394/05/15	54.16
سیدآباد (SeyedAbad)	0	121	1386/01	56.39	1380/07/15	70.72	1395/05/15	64.30
افصل‌آباد(AfsalAbad)	0	151.3	1386/01	45.08	1380/12/15	62.91	1395/06/15	54.70
ساروجه (Saroojeh)	0	128.8	1386/01	24.11	1380/12/15	30.42	1395/05/15	27.84
قزل حصار(Ghezel Hesar)	0	129.1	1386/01	26.35	1381/02/15	47.34	1395/04/15	40.09
جمع‌آب(JamAb)	0	118.7	1386/01	79.1	1380/07/15	97.65	1395/06/15	91.20
کبیر (Kabir)	0	123.7	1386/01	8.11	1380/07/15	12.95	1395/04/15	11.17
کلاته شیخها (Kalateh Sheikhha)	0	131.5	1386/01	59.81	1380/12/15	83.79	1394/06/15	73.92
قره‌جنگل (GharehJangal)	0	142.7	1386/01	29.29	1380/07/15	59.61	1395/06/15	43.40
شیرحصار (Shir Hesar)	0	142.8	1386/01	46.74	1380/12/15	62.25	1395/06/15	55.94
عسکریه(Askariyeh)	0	139.3	1386/01	70.32	1380/12/15	94.16	1395/06/15	83.46
سهل‌الدین (Sahl-o-din)	0	137.6	1386/01	17.33	1381/01/15	26.06	1394/11/15	22.57
کلاته برفی (Kalateh Barfi)	0	130.3	1386/01	75.27	1380/12/15	96.27	1394/10/15	86.23
قهقهه (Ghah-gha-heh)	0	122.4	1386/01	28.07	1381/01/15	34.09	1395/06/15	30.52
مزرعه نمونه (Mazrae Nemoneh)	0	128.2	1388/02	82.74	1380/07/15	107.28	1395/06/15	94.14
مزرعه نمونه – شهرک رضویه (Mazrae Nemoneh -Shahrak Razaviyeh)	0	130.4	1388/02	82.96	1384/02/15	90.38	1395/06/15	85.91
جیم‌آباد (JimAbad)	0	122.5	1388/02	98.5	1380/07/15	121.79	1395/06/15	110.69
اراضی کنه‌بیست (Arazi Kenebist)	0	120.3	1393/01	58.82	1381/01/15	67.84	1394/06/15	63.84
اراضی جیم‌آباد (Arazi JimAbad)	0	123.9	1388/02	57.77	1380/07/15	78.29	1395/06/15	67.53
کنه‌بیست(Kenebist)	0	121.5	1393/01	58.48	1381/01/15	63.09	1394/06/15	61.55
تنگل شور – مرغ پردک (Tangalshor)	0	127.1	1388/02	27.84	1380/12/15	48.29	1394/08/15	38.42

رابطه بارتلت در مباحث هیدرولوژیکی، تنها برای اولین و یا دومین تأخیر خوب عمل می‌کند و استفاده از آن خیلی توصیه نمی‌شود، بنابراین استفاده از یک آزمون که کل همبستگی‌نگار را پوشش دهد و تأخیرهای احتمالی را که باید در سری زمانی به‌صورت مستقل (عدم معنی‌داری ضریب همبستگی) در نظر گرفته شوند، نمایان سازد بسیار مناسب‌تر است (۱۱). آزمون ارائه شده توسط آندرسون[1]، حدود اطمینان را برای تمام همبستگی‌نگار با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌کند (۱۱).

رابطه ۴

$$LC(r_k) = \frac{1 \pm Z_\alpha \times \sqrt{n-k-2}}{n-k-1}$$

در این رابطه، n تعداد نمونه‌ها، K تأخیر زمانی و Z مقدار متغیر استاندارد شده دارای توزیع نرمال با حدود اطمینان α است. مقادیر Z در جداول آماری گوناگون ارائه شده است.

1- Anderson

جدول ۲-زمان تأخیر تغذیه آب زیرزمینی در محل چاه‌های مشاهده‌ای بر اساس بیشترین ضریب همبستگی متقابل

Table 4- Groundwater recharge lage time at the location of observation wells based on the highest cross-correlation coefficient

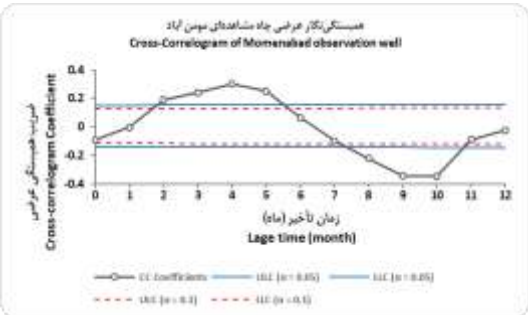
شماره چاه Well No.	نام چاه Well name	بیشترین ضریب همبستگی متقابل The highest Cross-Correlation Coefficient	P-Value	بیشینه زمان تأخیر (ماه) Max. Lag time (month)	
				α = 0.1	α = 0.05
6007-OW101	دوغایی (Dooghaei)	0.145	0.055	3	–
6007-OW102	قره چاه (Gharechah)	0.146	0.052	2	–
6007-OW104	شورچه (Shoorcheh)	–	–	–	–
6007-OW106	مؤمن‌آباد (Momen Abad)	0.301	0.000	4	4
6007-OW107	رضاآباد شرقی (RezaAbad Sharghi)	0.385	0.000	4	4
6007-OW109	موچنان (Moochenan)	0.176	0.020	7	7
6007-OW110	چنبرغربال (Chanbargharbal)	0.174	0.021	6	6
6007-OW111	قره‌تپه (Ghareh Tapeh)	0.280	0.000	5	5
6007-OW112	یکه لنگه (Yekeh Lengeh)	0.132	0.080	4	–
6007-OW113	چمگرد (Chamgard)	0.134	0.083	12	–
6007-OW114	حاجی‌آباد (HajiAbad)	0.205	0.006	2	2
6007-OW115	سیدآباد (SeyedAbad)	0.249	0.001	5	5
6007-OW118	افصل‌آباد (AfsalAbad)	0.274	0.000	4	4
6007-OW123	ساروجه (Saroojeh)	0.329	0.000	4	4
6007-OW126	قزل حصار (Ghezel Hesar)	0.332	0.000	5	5
6007-OW127	جمع‌آب (JamAb)	0.322	0.000	5	5
6007-OW128	کبیر (Kabir)	0.328	0.000	2	2
6007-OW130	کلاته شیخها (Kalateh Sheikhha)	0.495	0.000	4	4
6007-OW145	قره‌جنگل (GharehJangal)	0.156	0.039	3	3
6007-OW147	شیرحصار (Shir Hesar)	0.390	0.000	5	5
6007-OW149	عسکریه (Askariyeh)	0.466	0.000	4	4
6007-OW151	سهل‌الدین (Sahl-o-din)	0.457	0.000	3	3
6007-OW153	کلاته برفی (Kalateh Barfi)	0.427	0.000	5	5
6007-OW163	قهقهه (Ghah-gha-heh)	0.144	0.057	4	–
6007-OW184	مزرعه نمونه (Mazrae Nemoneh)	0.314	0.000	5	5
6007-OW185	مزرعه نمونه - شهرک رضویه (Mazrae Nemoneh - Shahrak Razaviyeh)	0.314	0.000	5	5
6007-OW187	جیم‌آباد (JimAbad)	0.289	0.000	5	5
6007-OW188	اراضی کنه‌بیست (Arazi Kenebist)	0.304	0.000	4	4
6007-OW190	اراضی جیم‌آباد (Arazi JimAbad)	0.219	0.003	4	4
6007-OW191	کنه‌بیست (Kenebist)	0.193	0.010	4	4
6007-OW192	تنگل شور - مرغ پردک (Tangalshor)	0.129	0.091	8	–

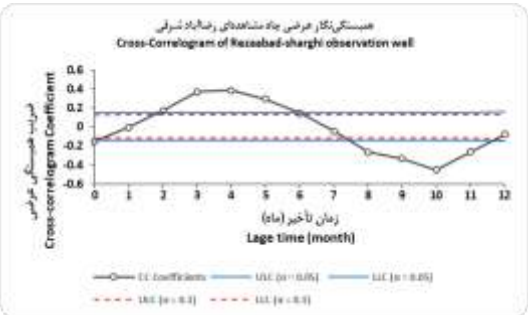
نتایج و بحث

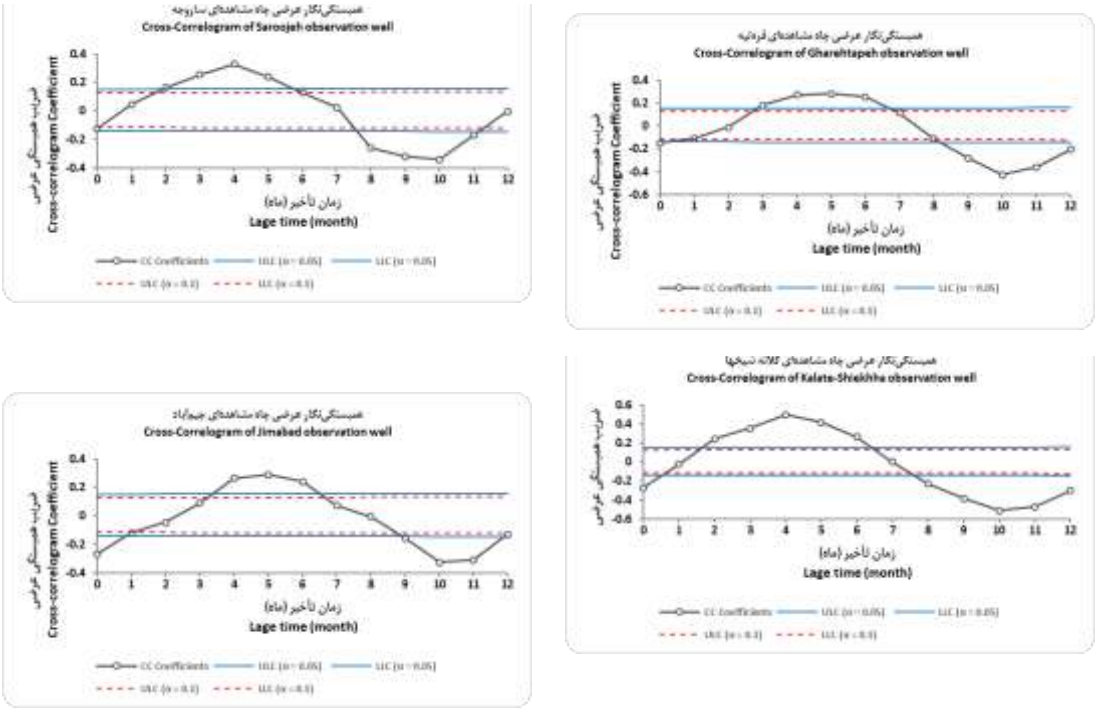
برآورد زمان تأخیر تغذیه آب زیرزمینی

تغییرات سطح، همواره متأثر از بارندگی است. با در نظر گرفتن دو اصل توأمی و هم‌تغییری، می‌توان رابطه آماری بین تغییرات سطح ایستابی و بارندگی را رابطه علت و معلولی فرض و از آزمون همبستگی متقابل برای ارزیابی رابطه استفاده نمود. ضریب همبستگی متقابل برای چاه‌های مشاهده‌ای معرف در دو سطح خطای آزمون ($\alpha = 0.05$ و $\alpha = 0.1$) محاسبه و معنی‌داری رابطه نیز از طریق آزمون آندرسون و آماره تصمیم P-Vlaue بررسی و ارزیابی شده است. سپس زمان تأخیر در محل چاه‌های مشاهده‌ای منتخب بر اساس بیشترین ضریب همبستگی متقابل، برای دو سطح خطای ۹۰ و ۹۵ درصد محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند، ضریب همبستگی متقابل از حداقل ۰/۱۲۹ در چاه مشاهده‌ای تنگل‌شور – مرغ پردک (رابطه خیلی ضعیف) تا ۰/۴۹۵ در چاه مشاهده‌ای کلاته شیخها (رابطه متوسط) در تغییر است. بررسی آماره تصمیم P- Vlaue نشان می‌دهد، رابطه تغییرات زمانی سطح آب و بارش در دو سطح خطای ۰/۰۵ و ۰/۱ به ترتیب برای ۷۷ و ۹۷ درصد چاه‌ها معنی‌دار است. این رابطه، در سطح خطای ۹۵ درصد، برای ۷ حلقه چاه مشاهده‌ای دوغایی، قره‌چاه، شورچه، یکه‌لنگه، چمگرد، قهقهه و تنگل‌شور – مرغ پردک و در سطح خطای ۹۰ نیز فقط برای چاه مشاهده‌ای شورچه معنی‌دار نمی‌باشد.

به‌منظور درک بهتر رابطه تغییرات سطح ایستابی و بارش، ضریب همبستگی متقابل با استفاده از رابطه ۱ و مقادیر حدود اطمینان نیز با استفاده از رابطه ۴ برای دوره آماری ۱۵ ساله محاسبه و نتایج برحسب زمان تأخیر بر روی یک نمودار به‌نام همبستگی‌نگار متقابل رسم و در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. در همبستگی‌نگار، در محور افقی که بیانگر زمان تأخیر است، ماه صفر (۰) معادل مهرماه و ماه ۱۱ نیز معادل شهریور سال بعد تعریف شده است. محور عمودی نیز مقادیر ضریب همبستگی را نشان می‌دهد. بررسی همبستگی‌نگار نشان می‌دهد، ضریب همبستگی در همه چاه‌ها در ماه صفر (مهر) به دلیل نقص داده در اولین ماه دوره آماری، منفی است. با حذف این ماه، مشاهده می‌شود روند تغییرات ضریب همبستگی از دو الگوی مشخص به شرح زیر پیروی می‌کند. در گروه اول (شکل ۳)، سطح ایستابی معمولاً پس از ماه دوم (آذر) و سوم (دی) نسبت به بارندگی واکنش نشان داده و ضریب همبستگی بین آن‌ها به‌تدریج افزایش می‌یابد. در این چاه‌ها پس از ماه سوم، ضریب همبستگی بیش از مقادیر حاصل از رابطه آندرسون شده و رابطه معنی‌دار است. ضریب همبستگی در ماه‌های چهار (بهمن) و پنج (اسفند) به بیشینه مقدار خود رسیده و سپس با یک شیب ملایم کاهش می‌یابد. از حدود ماه هفت (اردیبهشت) و هشت (خرداد)، ضریب همبستگی منفی شده و مقدار آن نیز کمتر از مقادیر حاصل از رابطه آندرسون شده و رابطه معنی‌دار نمی‌باشد. از ماه نه (تیر) تا ماه یازده (شهریور)، مقدار ضریب همبستگی، همواره منفی است. باوجوداینکه، در این ماه‌ها رابطه معنی‌دار است، اما رابطه علت و معلولی بین تغییرات سطح ایستابی و بارش برقرار نیست و عوامل دیگری از جمله برداشت از آبخوان باعث نوسانات سطح ایستابی می‌شوند. به‌طورکلی، با مقایسه سری زمانی بارندگی و تغییرات سطح ایستابی با زمان تأخیر، می‌توان گفت تغذیه آب زیرزمینی در این گروه از چاه‌ها، از اواسط فصل پاییز شروع شده و تا اواخر فصل بهار تداوم دارد. بیشینه مقدار تغذیه در اواخر فصل زمستان صورت می‌گیرد. در فصل تابستان، بارندگی نقش کم‌رنگی در تغذیه دارد و استخراج بی‌رویه آب از آبخوان و به‌تبع آن افت شدید و ادامه‌دار سطح ایستابی، نقش اصلی در نوسانات آب ایفا می‌کند.



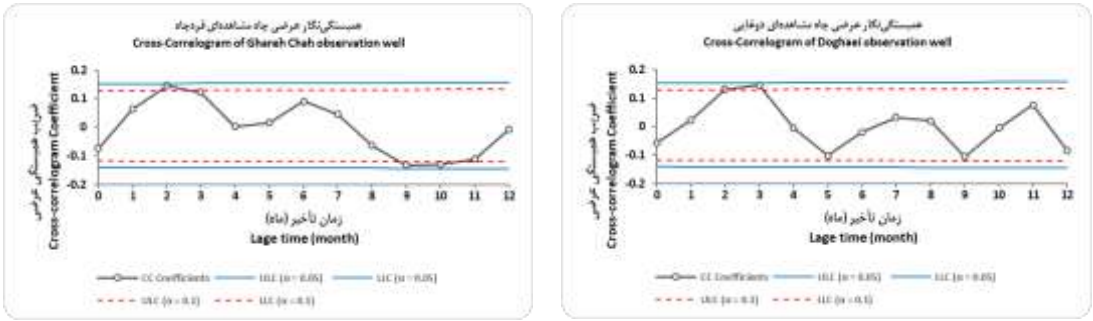


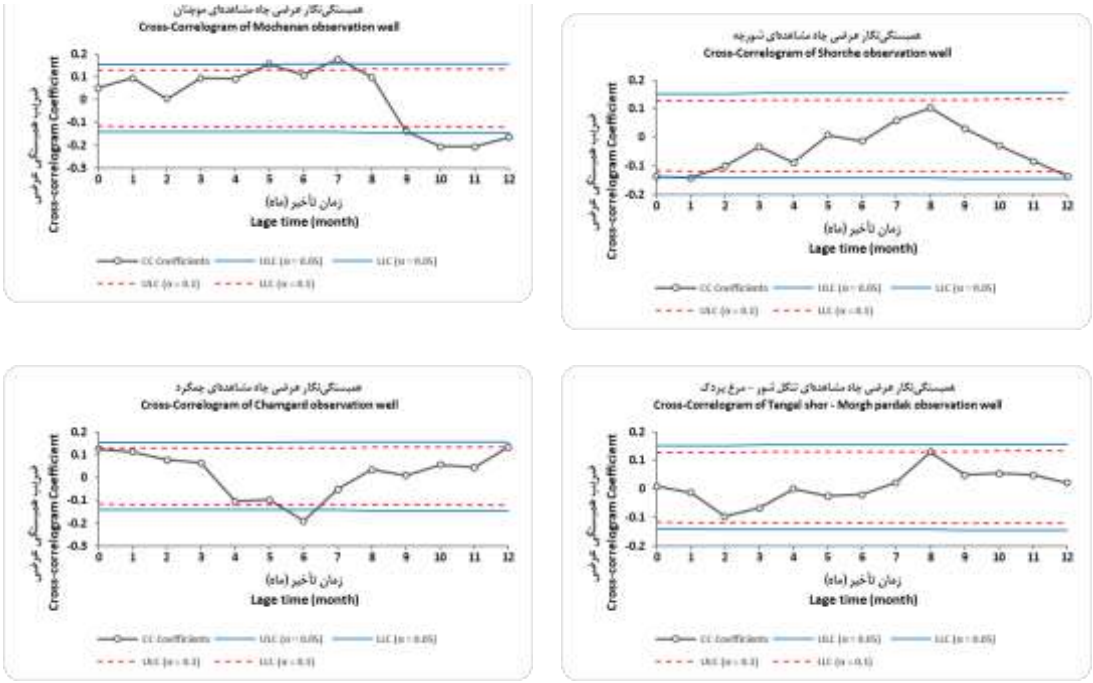


شکل ۳- همبستگی‌نگار متقابل برای تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای گروه ۱

Figure 3- Cross-Correlogram for some of the representative observation wells in Group 1

در گروه دوم (شکل ۴)، چاه‌هایی که رابطه تغییرات زمانی سطح ایستابی و بارندگی در آن‌ها در سطح خطای ۹۵ معنی‌دار نمی‌باشد، قرار می‌گیرند. این گروه شامل چاه‌های مشاهده‌ای دوغایی، قره‌چاه، شورچه، موچنان، یکه‌لنگه، چمگرد، قهقهه، تنگل‌شور - مرغ پردک و شورچه است. تغییرات ضریب همبستگی این چاه‌ها بسیار نامنظم و عموماً کم‌تر از مقادیر حاصل از رابطه آندرسون است و احتمالاً رابطه بین بارش و تغییرات سطح ایستابی متأثر از سایر عوامل است. بررسی موقعیت این چاه‌ها، نشان می‌دهد اغلب آن‌ها یا در ورودی‌های آبخوان و یا در خروجی آبخوان قرار گرفته و ستون زمین‌شناسی آن‌ها تا عمق برخورد به سطح آب، حاوی لایه‌های رسی و مارنی است که از نفوذ مستقیم آب باران به آبخوان جلوگیری می‌کنند. علاوه بر محدودیت‌های زمین‌شناسی، بهره‌برداری شدید از منابع آب زیرزمینی نیز یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر تغییرات سطح ایستابی در محل این چاه‌ها است. با توجه به معنی‌دار نبودن رابطه بین تغییرات سطح ایستابی و بارش، محاسبه زمان تأخیر تغذیه برای این گروه‌ها از چاه‌ها میسر نمی‌باشد.





شکل ۴- همبستگی‌نگار متقابل برای تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای گروه ۲

Figure 4- Cross-Correlogram for some of the representative observation wells in Group 2

ارزیابی تأثیر عوامل مختلف بر زمان تأخیر

طبق تعریف، زمان تأخیر به فاصله زمانی رسیدن اولین پالس باران به آب زیرزمینی گفته می‌شود. تغییرات سطح ایستابی در آبخوان‌های آزاد با درجات مختلفی (از کم تا زیاد) تحت تأثیر بارندگی است و با توجه به ضخامت پوشش لایه خاک فوقانی، خصوصیات ناحیه غیراشباع، عمق برخورد به سطح آب، مقدار و شدت بارندگی، تراز سطح زمین و ... تأخیرهای متفاوتی را تجربه می‌کند. در بین این عوامل، عمق برخورد به سطح آب بیشترین تأثیر را دارد. در آبخوان‌هایی که ناحیه غیراشباع از رسوب‌های یکنواختی تشکیل شده و عمق برخورد به سطح آب نیز کم است، سطح ایستابی پس از وقوع بارش با تأخیر اندکی نسبت به آن واکنش نشان می‌دهد و تغذیه سریع آب زیرزمینی اتفاق می‌افتد. با افزایش عمق سطح آب، زمان بیشتری برای رسیدن اولین پالس بارندگی لازم است و تغذیه آب زیرزمینی پس از مدتی شروع می‌شود.

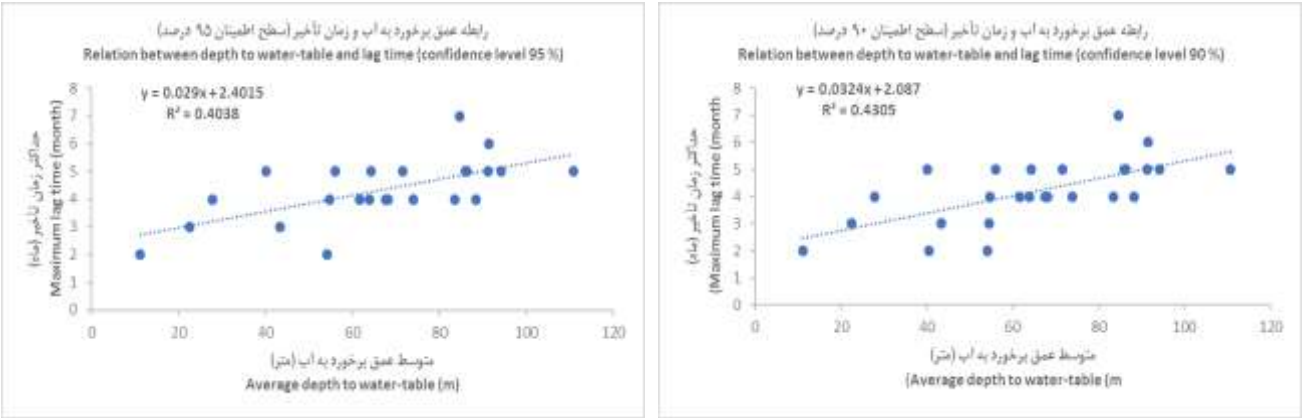
اثر عمق برخورد به آب زیرزمینی و تراز سطح زمین بر زمان تأخیر با استفاده از رابطه همبستگی بررسی و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، رابطه معنی‌داری بین زمان تأخیر و عمق آب زیرزمینی وجود دارد و ضریب همبستگی پیرسون (r) در سطح خطای آزمون ۹۰ درصد ($\alpha = 0.1$) مقدار ۰/۶۵۶ و در سطح خطای آزمون ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$) نیز مقدار ۰/۶۳۵ است. این مقادیر بیانگر وجود رابطه قوی و مثبت بین دو متغیر است. از طرف دیگر، اگرچه در خیلی از مناطق، توپوگرافی منطقه و شیب سطح زمین به‌طور غیرمستقیم بر تغذیه تأثیر دارند، اما در آبخوان مشهد – چناران رابطه معنی‌داری بین زمان تأخیر و تراز سطح زمین مشاهده نمی‌شود و مقدار P- Value بیش از مقدار سطح خطای آزمون برآورد شده است. در سطح خطای آزمون ۹۰ درصد، ضریب همبستگی پیرسون ۰/۱۳۱ – است. این مقدار بیانگر ارتباط معکوس بین تراز سطح زمین و زمان تأخیر است. اگرچه با افزایش سطح خطای آزمون، ضریب همبستگی مثبت می‌شود اما کماکان، رابطه معنی‌دار نمی‌باشد.

جدول ۳- ضریب همبستگی بین زمان تأخیر، عمق سطح ایستابی و تراز سطح زمین

Table 3- The correlation coefficient between the lag time, depth to water-table and ground surface level

		عمق آب زیرزمینی Depth to Water-table		تراز سطح زمین Ground Surface Elevation	
		$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.05$
زمان تأخیر Lag time	r	0.655	0.635	- 0.131	0.109
	P- Value	0.000	0.001	0.524	0.613

برای بررسی مقدار تأثیر عمق سطح ایستابی بر زمان تأخیر، از رگرسیون خطی استفاده و نتیجه نیز در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدل رگرسیون در سطح خطای ۰/۱، حدود ۴۳ درصد و در سطح خطای ۰/۰۵ نیز حدود ۴۰ درصد تغییرپذیری داده های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین می کند. به‌عبارت‌دیگر، بر اساس مقدار ضریب تعیین (R^2)، ۴۳ درصد متغیر وابسته (زمان تأخیر) تحت تاثیر متغیر مستقل (عمق سطح ایستابی) بوده و بقیه تغییرات متغیر وابسته نیز مربوط به سایر عوامل احتمالی ازجمله بهره‌برداری از آبخوان می‌باشد.



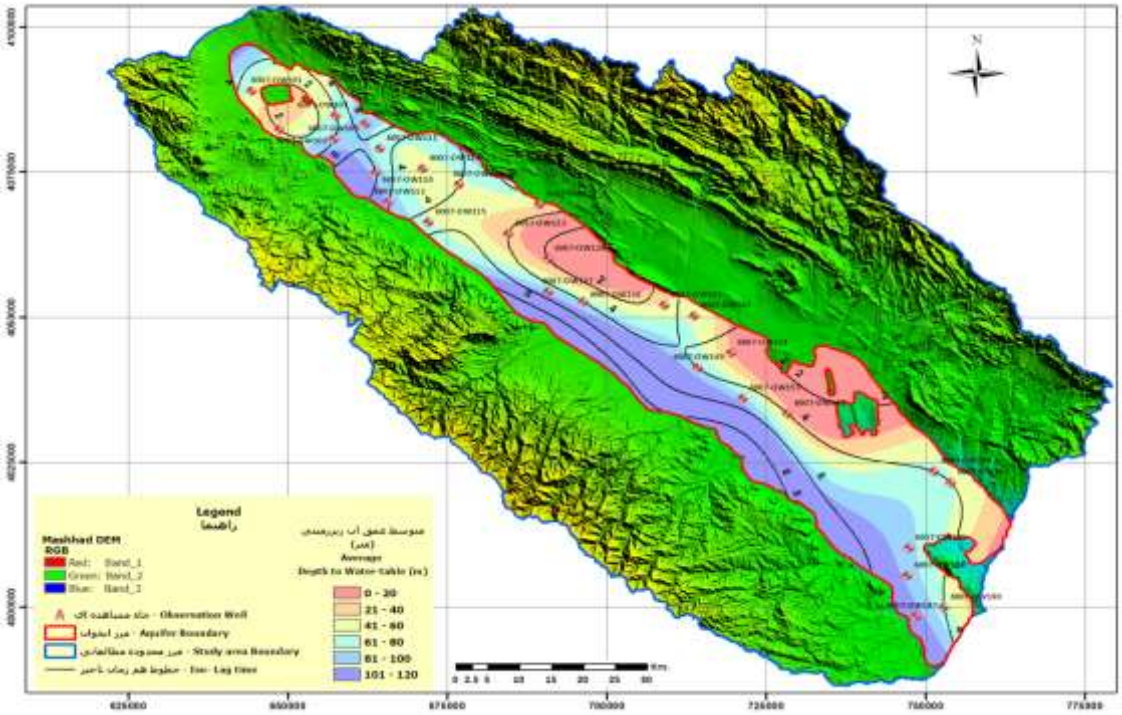
شکل ۵- رگرسیون خطی بین عمق برخورد به آب زیرزمینی و زمان تأخیر تغذیه

Figure 5- The linear regression between depth to water-table and groundwater recharge lag time

نقشه تغییرات مکانی زمان تأخیر در آبخوان مشهد-چناران

همان‌گونه که قبلاً نیز بیان شد، رابطه معنی‌داری بین زمان تأخیر و عمق سطح ایستابی در آبخوان مشهد - چناران وجود دارد. برای بررسی تغییرات مکانی زمان تأخیر، نقشه متوسط عمق سطح ایستابی برای دوره ۱۵ ساله (سال آبی ۸۱ - ۱۳۸۰ تا ۹۵ - ۱۳۹۴) در محیط ArcGIS به روش درون‌یابی IDW تهیه و نقشه هم‌ارزش زمان تأخیر نیز به همین ترتیب رسم و در شکل ۶ ارائه شده است. بررسی نقشه‌های متوسط عمق آب زیرزمینی در دوره ۱۵ ساله نشان می‌دهد، الگوی تغییرات عمق آب زیرزمینی در آبخوان تابعی از شرایط زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه است. بر اساس تغییرات عمق آب، آبخوان مشهد - چناران به سه واحد هیدروژئولوژیک شامل واحد ابتدای آبخوان، واحد شمالی و واحد جنوبی تقسیم می‌شود. واحد اول از ابتدای آبخوان در شمال غرب شروع و تا محدوده چاه‌های مشاهده‌ای چنبر غربال و قره‌تپه ادامه دارد. در این واحد حداقل و حداکثر متوسط عمق آب به ترتیب در محل چاه‌های مشاهده‌ای قره‌چاه و مومن‌آباد به مقدار ۴۰ و ۸۹ متر است. واحدهای هیدروژئولوژیک شمالی و جنوبی، منطبق بر الگوی رسوب‌گذاری دشت از شمال به‌طرف جنوب آبخوان گسترش می‌یابند. اگر رودخانه کشف‌رود را به‌عنوان خط جدا کننده دو حوضه رسوبی کپه‌داغ و بینالود در نظر بگیریم، مقادیر عمق آب زیرزمینی در واحد هیدروژئولوژیک شمال رودخانه نسبت به واحد جنوبی کم و تغییرات کم‌تری را نشان می‌دهد. در واحد جنوبی به دلیل ضخامت زیاد آبرفت و تأثیر توپوگرافی، عمق آب زیرزمینی به‌تدریج از حوالی کشف‌رود به‌طرف حاشیه جنوبی آبخوان افزایش می‌یابد.

تطبیق نقشه تغییرات مکانی زمان تأخیر با واحدهای هیدروژئولوژیک آبخوان نشان می‌دهد که تغییرات مکانی زمان تأخیر به‌صورت کامل از الگوی نقشه هم عمق تبعیت نموده و برازش خیلی خوبی با آن دارد. در آبخوان مشهد - چناران، به‌طورکلی زمان تأخیر تابعی از تغییرات عمق سطح آب زیرزمینی در آبخوان است و با افزایش عمق آب، زمان تأخیر نیز افزایش می‌یابد. بررسی دقیق‌تر نقشه نشان می‌دهد که در حاشیه شمالی و جنوبی واحد هیدروژئولوژیک اول، به دلیل شرایط زمین‌شناسی و گسترش لایه‌های رسی و مارنی در سطح، زمان تأخیر بیش از مرکز آن است. با کاهش رخنمون لایه‌های محدوده کننده و کاهش عمق آب زیرزمینی در مرکز دشت، به‌تدریج زمان تمرکز نیز کاهش می‌یابد. در دو واحد هیدروژئولوژیک شمالی و جنوبی، زمان تأخیر بیشترین تطابق را با نقشه هم‌عمق نشان می‌دهد. مقدار زمان تأخیر از حاشیه شمالی آبخوان به طرف جنوب به‌تدریج افزایش می‌یابد و درنهایت در دامنه مخروط افکنه‌های فریزی، اخلمد، طرقبه- شاندیز و ... به حداکثر مقدار خود می‌رسد.



شکل ۶- تغییرات مکانی زمان تأخیر تغذیه (ماه) و عمق آب زیرزمینی (متر) در آبخوان مشهد-چناران

Figure 6- The spatial distribution of groundwater recharge lag time (month) and depth to water-table (meter) in Mashhad-Chenaran aquifer.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از سری زمانی ۱۵ ساله عمق آب زیرزمینی و باران در محل چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان مشهد - چناران، زمان واکنش آب زیرزمینی نسبت به باران با استفاده از روش همبستگی متقابل بررسی و نقشه تغییرات مکانی آن ارائه شده است. به‌منظور درک بهتر رابطه تغییرات سطح ایستابی و بارش، از همبستگی‌نگار متقابل که تصویر گرافیکی بسیار مناسبی را از رابطه دو متغیر نمایان می‌سازد، استفاده شده است.

نتایج نشان می‌دهد، آزمون همبستگی متقابل، توانایی ارزیابی رابطه تغییرات سطح ایستابی و بارش را در اغلب چاه‌ها دارد. بر این اساس، در آبخوان مشهد - چناران پس از گذشت حدود ۲ تا ۳ ماه اولین تأثیر بارش بر سطح آب زیرزمینی مشاهده و ضرایب همبستگی متقابل معنی‌دار می‌شوند. درصورتی‌که شروع فصل بارندگی را در دشت مشهد از اواخر مهرماه در نظر بگیریم، تغذیه آب زیرزمینی در اغلب چاه‌ها از اواسط فصل پاییز شروع و تا اواخر فصل بهار ادامه می‌یابد. بیشینه مقدار تغذیه در اواخر فصل زمستان صورت می‌گیرد. در فصل تابستان، بارندگی نقش بسیار کم‌رنگی در تغذیه دارد و استخراج بی‌رویه آب از آبخوان و به‌تبع آن افت شدید و ادامه‌دار سطح ایستابی، نقش اصلی در نوسانات آب را ایفا می‌کند. به‌طورکلی زمان تأخیر برآورد شده تطابق خوبی با عمق آب زیرزمینی که بیانگر ضخامت ناحیه غیراشباع است، دارد. همچنین، رابطه معنی‌داری بین زمان تأخیر و تغییرات تراز سطح زمین (توپوگرافی) مشاهده نشد و توپوگرافی دشت، هیچ تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر تغذیه آبخوان نشان نمی‌دهد. بنابراین، به نظر می‌رسد که تغذیه آب زیرزمینی در سراسر آبخوان مشهد- چناران بیشتر توسط شرایط ناحیه غیراشباع (ضخامت، جنس و ...) کنترل و تغییرات عمق آب زیرزمینی به‌نوعی عامل اصلی ایجاد تأخیر زمانی بین وقوع بارندگی و شروع تغذیه در آبخوان محسوب می‌شود. با وجود بررسی نقش این دو عامل مهم در ایجاد زمان تأخیر، نقش عوامل مهم دیگری ازجمله کاربری اراضی، بهره‌برداری از آبخوان و ... در ایجاد زمان تأخیر همچنان نامشخص و ضروری است در تحقیقات آینده مدنظر قرار گیرد.

سپاسگزاری

از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی برای در اختیار قرار دادن داده‌ها، گزارش‌ها و اطلاعات موردنیاز این تحقیق سپاس‌گزاری و قدردانی می‌شود.

منابع

1- Aghanabati A. 2006. Geology of Iran. Ministry of Industry and Mine, Geological Survey of Iran. (In Persian)

2- Chae G.T., Yun S.T., Kim D.S., Kim. K.H., et al. 2016. Time-series analysis of three years of groundwater level data (Seoul , South Korea) to characterize urban groundwater recharge. Journal of Engineering Geology and Hydrogeology (Quarterly) 43: 117–127.

3- Chiaudani A., Di Curzio D., Palmucci W., et al. 2017. Statistical and Fractal Approaches on Long Relationship Assessment: A Central Italy Alluvial Plain Case Study, Water 9: 850-878.

4- Crosbie R.S., Binning P., and Kalma J.D. 2005. A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. Water Resources Research 41: 1–9.

5- Healy R.W., and Cook P.G. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeology Journal 10: 91–109.

6- Healy R.W., and Scanlon B.R. 2010. Estimating Groundwater Recharge. Cambridge University Press, Cambridge.

7- Hocking M., and Kelly B.F.J. 2016. Groundwater recharge and time lag measurement through Vertosols using impulse response functions. Journal of Hydrology 535: 22–35.

8- Karimi R., 2015. Easy statistical analysis guide with SPSS. Hengam, Tehran. (In Persian)

9- Water Resources Basic Studies Office. 2008. Water Resorces Status of Mashhad plain. Khorasan Razavi Regional Water Company. (In Persian)

10- Water Resources Basic Studies Office. 2012. Prohibition Extension Report of Mashhad-Chenaran study area water resources. Khorasan Razavi Regional Water Company. (In Persian)

11- Kresic N. 2010. Modeling. p. 165–230. In Kresic N., and Stevanovic Z. (ed) Groundwater Hydrology of Springs. Chapter 5. Butterworth-Heinemann, Boston.

12- Mardaneh M., Aflatooni M., and Boostani F. 2012. Evaluate the Correlation between Rainfall and Groundwater level in the Plain of Shiraz. Water Engineering 5: 89–98. (In Persian)

13- Naderianfar M., Ansari H., Ziaie, et al. 2011. Evaluating the Groundwater level fluctuations under different climatic conditions in the basin Neyshabour. Journal of Irrigation and Water Engineering (Quarterly) 1: 22–37. (In Persian with English abstract)

14- Shamszadeh S.H., Barati R., Gord Noshahri A., et al. 2018. Study of Groundwater Response to Water Transfer from Outside Basin (Case Study: Water Transfer from Doosti Dam to Holy City of Mashhad). Journal of Aqiufer and Qanat (semi-annual) 2: 41–52. (In Persian with English abstract)

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 489-504

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۵۰۴-۴۸۹

Estimation of Groundwater Recharge Lag Time in Mashhad-Chenaran Aquifer Using Cross-Correlation Method

M. Arjmand Sharif[1]- H. Jafari[2]*

Received: 03-07-2021
Accepted: 16-09-2021

Introduction: In hydrological studies, time series are observed as continuous or discrete. Groundwater level and rainfall can be considered as discrete time series. The most common way to measure the dependence between two variables in a discrete time series is to calculate the Pearson correlation coefficient (r). Pearson correlation test is a parametric test that quantitatively measures the linear relationship between variables. This coefficient is essentially a dimensionless index that describes the relationship between two variables numerically. The groundwater level is more or less influenced by rainfall, and this influence may be delayed for a variety of reasons. The process of comparing two time series in different time steps is called cross-correlation. In the cross-correlation analysis, the time-dependent relationship between the dependent and the independent variables is analyzed by computing the coefficients of cross-correlation for various time lags. Results are plotted on a graph called a cross-correlogram.

Mashhad-Chenaran aquifer with an area of about 2527 km^2 is the most important aquifer in Khorasan Razavi province. Unfortunately, so far in the Mashhad-Chenaran aquifer, the recharge lag time has not been calculated due to the very complex geological and hydrogeological conditions of the aquifer. In this study, an attempt has been made to calculate the groundwater recharge lag time.

Materials and Methods: In this study, 15 years (Sep. 2001 to Sep. 2016) data of monthly depth to water-table and rainfall have been used . There is 74 active observation well in Mashhad-Chenaran aquifer. Out of 74 wells, 31 well were selected based on geological and hydrogeological conditions. To calculate the rainfall at the observation wells, the daily rainfall data from rain gauge and evaporation stations (25 rain gauge stations and 9 evaporator stations) have been used. First, the cumulative daily rainfall at each station for one month (from 15 months to 15 months later) was calculated. Then, a monthly rainfall raster was prepared using ArcGIS.Finally, the rainfall at the observation well was extracted from the raster file.

Results and Discussion: The correlation coefficient between the groundwater level and rainfall was calculated for the 31 wells at two confidence levels ($\alpha = 0.05$ and $\alpha = 0.1$). The lag time was calculated based on the highest correlation coefficient for the two confidence levels. Results showed that the cross-correlation coefficient varied from at least 0.129 in the Tanglshour-Morgh Pardak observation well (very weak) to 0.495 in the Kalateh Sheikhha observation well (moderate). The coefficients of cross-correlation for various time lags were plotted on the cross-correlogram. In cross-correlogram, the month zero was equivalent to October and the month 11 was equivalent to September of the next year. It was observed that the trend of correlation coefficient followed the two specific patterns. In the first group, the water table usually reacts to rainfall after the second month. Then, the correlation coefficient gradually increased. The correlation coefficient reached its maximum in the fourth and fifth months and then decreased with a gentle slope. From the seventh month to the eleventh month the correlation coefficient has become negative. Although there was a significant relationship during these months, there was no cause-and-effect relationship between changes in the water table and rainfall. In the second group, the relationship between the groundwater level and rainfall was not significant at the 95% confidence level. This group includes Doghai observation wells, Qarachah, Shurcheh, Mochenan, Yekehlengeh, Chamgard, Ghahghahe, Tangleshour - Morgh Pardak, and Shorcheh. Changes in the correlation coefficient of these wells were very irregular and the relationship between rainfall and water table changes was probably influenced by other factors. The map of lag time showed that the spatial variations of the lag time completely followed the pattern of the Iso-depth map. In general, the lag time was a function of the depth to the water-table in the Mashhad-Chenaran aquifer. With increasing water depth, the lag time also increased. A closer look at the map showed that in the northern and southern margins of the first hydrogeological unit, the lag time was more than its

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor of Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: h_jafari@shahroodut.ac.ir)
DOI: 10.22067/JSW.2021.70672.1058

center. In the northern and southern hydrogeological units, the lag time showed the greatest compliance with the groundwater depth. The amount of lag time from the northern margin of the aquifer to the south gradually increased and finally reached its maximum value in the Akhlamad, Torqabeh-Shandiz.

Conclusion: As discussed previously, the groundwater level was influenced by rainfall, and this influence may be delayed for a variety of reasons. In this study, the groundwater response to rainfall has been estimated from 31 observation wells by cross-correlation method in a period of 15 years (Sep. 2001 to Sep. 2016). The correlation test results showed that after about 2 to 3 months, the effect of rainfall was gradually observed on the groundwater level and the correlation coefficient at the confidence level $\alpha = 0.05$ and $\alpha = 0.1$ for 77 % and 97% of wells became meaningful, respectively. The minimum lag time was 2 months and the maximum was 7 months. In general, the estimated lag time was well matched to the groundwater depth and fully followed the Iso-depth map pattern. The amount of groundwater recharge throughout the Mashhad-Chenaran aquifer was mainly controlled by the unsaturated area properties such as thickness, material, etc. Changes in groundwater depth were the major factor affecting the lag time. It seems that with the start of rainfall in late October, groundwater recharge in most wells begin in mid-autumn and continues until late spring. Most of the groundwater recharge takes place in late winter. In summer, rainfall has a very small role in groundwater recharge. In this period, the uncontrolled extraction of water from the aquifer and consequently a sharp and continuous drop in groundwater level plays a major role in water table fluctuations.

Keywords: Cross-correlogram, Groundwater response to rainfall, Linear regression, Pearson correlation coefficient and Cross-correlation coefficient

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 505-517

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۵۱۷-۵۰۵

مقاله پژوهشی

تأثیر فیتازهای سویه‌های *آسپرژیلوس* بر فراهمی فسفر از فیتات سدیم و جذب فسفر در گیاه ذرت

تکتم ولیزاده حجار[۱]- امیر لکزیان[۲*]- اکرم حلاج نیا[۳]- محبوبه مظهری[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۳

چکیده

کمبود فسفر به عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در خاک‌های آهکی مشکلی جدی بوده و به همین خاطر توجهات زیادی را به خود جلب کرده است. بخش آلی فسفر در خاک که غیر قابل جذب توسط گیاه می‌باشد در مواردی می‌تواند تا ۸۰ درصد کل فسفر را به خود اختصاص دهد. حل کردن فسفر از دو منبع آلی و معدنی توسط گونه‌های قارچی به عنوان یکی از راه‌حل‌های کارساز می‌تواند مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد. بدین منظور و برای بررسی میزان فعالیت آنزیم فیتاز قارچی سه سویه *آسپرژیلوس نایجر*، *آسپرژیلوس فلاووس* و *آسپرژیلوس فومیگاتوس* و فراهمی فسفر از منبع آلی فیتات سدیم و جذب آن توسط گیاه ذرت، دو آزمایش بصورت جداگانه به صورت آزمایشگاهی و گلخانه‌ای انجام شد. در بخش آزمایشگاهی میزان فعالیت آنزیم فیتاز هر یک از سه سویه قارچی در حضور فیتات سدیم بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین میزان فعالیت فیتاز (U) ۱۶/۴۸ مربوط به سویه *آسپرژیلوس نایجر* بود. در بخش دوم تاثیر هر یک از آنزیم‌های فیتاز تولیدی و استخراجی از هر جدایه بر فراهمی فسفر از منبع فیتات سدیم و جذب این عنصر توسط گیاه ذرت بررسی شد. نتایج بخش گلخانه نشان داد که بیشترین مقدار فسفر اندام هوایی (۰/۱۲۵ درصد) و ریشه (۰/۱۰۲ درصد) گیاه ذرت و همچنین بیشترین وزن خشک این گیاه (۴۶/۰۸ گرم در گلدان) در تیمار آنزیم فیتاز *آسپرژیلوس نایجر* و در حضور فیتات سدیم مشاهده شد. بطور کلی نتایج نشان از موثرتر بودن سویه *آسپرژیلوس نایجر* در دو بخش آزمایشگاهی و گلخانه‌ای داشت و همچنین آنزیم‌های فیتاز قارچی تاثیر مثبتی بر غلظت فسفر و بهبود رشدو نمو گیاه ذرت داشتند.

واژه‌های کلیدی: *آسپرژیلوس فلاووس*، *آسپرژیلوس فومیگاتوس*، *آسپرژیلوس نایجر* ، فراهمی فسفر

مقدمه

فسفر یکی از مهم‌ترین عناصر غذایی محدودکننده رشد گیاهان است (۹). زیاد بودن مقدار این عنصر در خاک به دلیل فراهمی کم آن نتوانسته پاسخگوی نیاز رشدی گیاهان و ریزجانداران باشد (۲۴). بخش آلی این عنصر در برخی از خاک‌ها می‌تواند ۸۰ درصد از مقدار کل فسفر را به خود اختصاص داده و در بخش آلی نیز بیشترین قسمت آن (حدود ۵۰ درصد) را اینوزیتول فسفات[۵] تشکیل می‌دهد. بالا بودن مقدار فسفر در بخش آلی از یک طرف و عدم فراهمی این بخش برای گیاه باعث شده که محققین به دنبال روش‌هایی برای افزایش فراهمی این عنصر مهم در خاک باشند. البته باید توجه داشت که عمده راهکار مورد استفاده برای برآورده کردن نیاز فسفری گیاه تاکنون از طریق مصرف کودهای شیمیایی بوده که به دلیل وجود مسائلی همچون آلودگی خاک و محدود بودن منابع کود شیمیایی استفاده از آن‌ها با محدودیت‌های زیادی روبرو است. با توجه به توانایی موثر ریزجانداران خاک در فراهم کردن بخش معدنی و آلی فسفر و افزایش فراهمی آن برای گیاه؛ اهمیت و ضرورت شناخت سازوکارهای درگیر در آن فرآیند را روشن می‌کند (۱۵). نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده که در خاک، ریزجانداران می‌توانند هر

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانش آموخته ارشد، استاد و استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: alakzian@yahoo.com)
۴- استادیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی

DOI: 10.22067/JSW.2021.14925.0

5- Inositol phosphate (IP)

دو بخش معدنی و آلی فسفر را با تولید ترشحات آلی مانند اسیدهای آلی، سیدرفور و آنزیم‌های فسفاتاز و فیتاز قابل استفاده نماید (۱۷). آزادسازی فسفر موجود در فیتات و جذب آن توسط گیاه بسیار مهم بوده و فراهمی بیولوژیکی اینوزیتول هگزا فسفات به هیدرولیز آن‌ها توسط فیتاز بستگی دارد (۷ و ۳۱). فیتازها[1] به گروهی از آنزیم‌ها اطلاق می‌شود که حداقل یک گروه فسفات از مولکول فیتات را جدا نمایند. فیتاز تنها آنزیم شناخته شده بوده که قادر است فسفر موجود در فیتات را آزاد کند (۷). فیتازها به‌طور متوالی اینوزیتول هگزا فسفات‌ها را به رده‌های پایینی مختلفی از استرها شامل منواسترهای اینوزیتول هیدرولیز می‌کنند (۱۰ و ۳۶). باکتری‌های جنس *سودوموناس*، *باسیلوس* و *انتروباکتر* به منظور افزایش فراهمی فسفر مورد نیاز گیاه از طریق آزادسازی فسفر آلی به عنوان مهمترین میکروارگانیسم‌های کارآمد معرفی شده‌اند (۳۰). تاثیر آنزیم فیتاز تولید شده توسط ریزجاندارانی خاک بر رشد گیاه در مطالعات مختلفی بررسی شده است. تاثیر فعالیت فیتاز تولید شده توسط ریزجاندارانی خاک از جمله *Sporotrichum thermophile* (۳۱)، *Discosia* sp. FIHB 571 (۲۳)، *Pseudomonas* sp. (۲۶) و *Bacillus amyloliquefaciens* (۱۲) بر رشد گیاهان گزارش شده است. سویه‌های *آسپرژیلوس* نیز توانایی تولید آنزیم فیتاز را دارا بوده به طوریکه چوانگ و همکاران (۲۰۰۷) با بهره‌گیری از توانایی فیتاز سنتز شده توسط *آسپرژیلوس نایجر*؛ بر تاثیر این آنزیم در فراهم کردن بخش فسفر آلی در خاک تاکید داشته است (۴). در این تحقیق در ابتدا فعالیت آنزیم فیتاز قارچی سه سویه *آسپرژیلوس نایجر*، *آسپرژیلوس فلاووس* و *آسپرژیلوس فومیگاتوس* در محیط کشت و در حضور فیتات سدیم اندازه‌گیری شد. سپس سه آنزیم تولید شده، خالص‌سازی شده و به گیاهچه ذرت اضافه شدند و تاثیر آن‌ها در حضور و عدم حضور فیتات سدیم بر مقدار فسفر اندام هوایی و ریشه و همچنین وزن خشک گیاه ذرت بررسی شد.

مواد و روش

بخش آزمایشگاهی

بمنظور مطالعه فعالیت فیتاز سه جدایه *آسپرژیلوس*، یک طرح آزمایشی کاملا تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل سه سویه *آسپرژیلوس نایجر* (A.ni) (تهیه شده از گروه گیاه‌پزشکی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد)، *آسپرژیلوس فلاووس* (A.fl) و *آسپرژیلوس فامیگاتوس* (A.fu) (هر دو تهیه شده از مرکز ملی ذخایر ژنتیکی و زیستی ایران) بودند. پس از تهیه، تمام سویه‌ها بر روی محیط کشت عمومی PDA (هر لیتر محیط کشت شامل: عصاره ۲۰۰ گرم سیب‌زمینی، ۲۰ گرم گلوکز، ۱ گرم عصاره مخمر و ۲۰ گرم آگار) کشت شدند و نمونه‌ها به مدت ۵ روز در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. برای سنجش فعالیت آنزیم فیتاز قارچی از روش اصلاح شده هیونن و لاهتی (۱۹۸۱) استفاده شد (۱۱). در این روش برای سنجش فعالیت آنزیم فیتاز، ابتدا جدایه های انتخابی در محیط کشت مایع کشت داده شدند و سپس ۱۰ میلی‌لیتر از محیط کشت به مدت ۳۰ دقیقه و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفوژ (۱۰۰۰۰ ×*g*) شده و سپس مایع رویی برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم فیتاز مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی اسپکتروفتومتری در حجم ۲ میلی‌لیتر و در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه و با استفاده از بافرهای TRIS-HCL (pH 7.4) و استات سدیم (pH 5) که شامل فیتات سدیم ۱۰ میلی‌مولار بود صورت گرفت. واکنش با افزودن ۱/۵ میلی‌لیتر از معرف استن، اسید سولفوریک ۵ نرمال و آمونیوم مولیبدات ۱۰ میلی مولار (۲:۱:۱ حجمی/ حجمی) متوقف شد. سپس ۱۰۰ میکرولیتر اسید سیتریک به آن اضافه گردید و فعالیت آنزیم فیتاز در طول موج ۷۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. واحد فعالیت آنزیم فیتاز (U) مقداری از آنزیم است که در مدت یک دقیقه در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد بتواند یک میکرومول ارتوفسفات آزاد نماید (۲۹).

تولید و استخراج فیتاز

برای تولید فیتاز از روش شیه و وار (۱۹۶۸) با اصلاحات استفاده شد (۲۸). در روش اصلاح شده، دکسترین جایگزین نشاسته محلول شده و پتاسیم دی هیدروژن فسفات بعنوان منبع فسفر استفاده می شود. بنابراین محیط کشت تخمیری اصلاح شده در هر ۱۰۰ میلی‌لیتر شامل موارد ذیل می‌باشد: ۵ گرم دکسترین، ۲/۵ گرم گلوکز، ۰/۸۶ گرم نیترات سدیم، ۰/۰۰۴ گرم پتاسیم دی هیدروژن فسفات، ۰/۰۵ گرم پتاسیم کلراید، ۰/۰۵گرم سولفات منیزیم ۷ آبه و ۰/۰۱ گرم سولفات آهن ۷ آبه. pH محیط کشت قبل از سترون کردن در ۵/۵ تنظیم شد. پس از تهیه محیط کشت، ۱۰۰ میلی‌لیتر از آن برداشته شد و به آن ۱۰ میلی‌لیتر سوسپانسیون اسپور قارچ (5×10^7 اسپور در هر لیتر) مایه‌زنی شد و سپس به مدت ۱۵ روز در دمای اتاق، نگه‌داری شد. پس از تخمیر و به منظور جداسازی میسیلیوم‌ها، محلول به مدت ۳۰ دقیقه سانتریفوژ (۱۰۰۰۰ g) شد و مایع رویی جمع آوری شد. به عصاره استخراج شده سولفات آمونیوم برای رسیدن به غلظت نهایی ۲۵ درصد اضافه شد و به مدت یک ساعت در حالت شیک گرماگذاری شد و سپس به مدت ۳۰ دقیقه سانتریفوژ (۹۰۰۰ g) شد. در نهایت محلول رویی خارج و آمونیوم سولفات به محلول رویی اضافه شد تا به غلظت ۷۵ درصد برسد. محلول به مدت ۱۲ ساعت روی شیکر (۱۰۰ دور در دقیقه) گرماگذاری شد و سپس عصاره سلولی به مدت ۳۰

1- Phytase

دقیقه سانتریفوژ (۹۰۰۰g) شد و محلول رویی خارج و رسوب در ۵ میلی‌لیتر بافر TRIS-HCl (۲۵ میلی مولار، اسیدیته برابر با ۷/۲) مجددا حل و در همین بافر به مدت یک شب دیالیز شد.

بخش گلخانه‌ای

در این بخش تاثیر فیتازهای استخراج شده از سه سویه *آسپرژیلوس* بر فراهمی فسفر از منبع آلی (فیتات سدیم) و تاثیر آن بر گیاه ذرت بررسی شد. طرح آزمایشی بصورت کاملا تصادفی با آرایش فاکتوریل با سه تکرار بود. تیمارهای آزمایشی شامل سه نوع آنزیم فیتاز قارچی (*آسپرژیلوس نایجر* (A.ni)، *آسپرژیلوس فومیگاتوس* (A. fu) و *آسپرژیلوس فلاووس* (A. fl)) و دو سطح صفر (P0) و ۵۰ (P50) میلی‌گرم در کیلوگرم فیتات سدیم تهیه شده از سیگما آلدریچ، بودند. خاک مورد مطالعه از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری واقع در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد (E ´´۳۴/۱۱ ´۳۱ °۵۹، N ´´۵۵/۷۵ ´۱۸ °۳۶) جمع‌آوری و پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن طبق روش‌های مرسوم آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدند. این پارامترها شامل pH خاک با استفاده از دستگاه pH متر در گل اشباع، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع توسط دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی، کربن آلی به روش هضم تر (۳۲)، نیتروژن کل به روش کجلدال (۱)، فسفر فراهم خاک به روش اولسن و سامرز (۲۱)، پتاسیم قابل دسترس به روش استات آمونیوم، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (۱۸)، رطوبت ظرفیت مزرعه به روش وزنی و بافت خاک به روش هیدرومتری (۶) بودند. خاک، گراول و شن مورد استفاده در آزمایش‌ها در دو نوبت و به فاصله زمانی ۴۸ ساعت توسط دستگاه اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ اتمسفر به مدت ۱۵ دقیقه سترون شد. گلدان‌های ۵ کیلویی نیز پس از شستشو با آب معمولی، به وسیله الکل ضدعفونی شدند. خاک و گلدان‌ها تا روز استفاده در پلاستیک نگهداری شدند. در ادامه تعداد ۵ عدد بذر ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ در هر گلدان کشت شد. با توجه فعالیت آنزیمی هر کدام از فیتازهای استخراج شده، حجم لازم برای هیدرولیز ۵۰ میلی‌گرم فیتات سدیم در هر گلدان به صورت بذرمال اضافه شدند. گیاهان پس از رشد و در مرحله دو برگی به تعداد دو عدد در هر گلدان تنک شدند. رطوبت گلدان‌ها به مدت دو ماه در شرایط ظرفیت زراعی نگهداری شد. در نهایت در مرحله برداشت، گیاه و ریشه به صورت جداگانه برداشت شده و پس از شست و شو، در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند. جهت هضم و تعیین مقدار فسفر در ریشه و اندام هوایی گیاه، یک گرم از نمونه‌های گیاهی توزین و در داخل کروزه‌های چینی ریخته شد و در داخل کوره الکتریکی به مدت ۲ ساعت تا دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد رسانده شده و پس از آن به مدت ۴ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. نمونه‌ها پس از سرد شدن از کوره خارج و مقدار ۱۰ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک ۲ نرمال به آن‌ها اضافه شد. سپس نمونه‌ها را روی هات پلیت به مدت نیم ساعت حرارت داده تا جایی که اولین بخارات سفید خارج شود. سپس نمونه محلول به بالن ژوژه ۲۵ میلی‌لیتر منتقل شد و به حجم رسید. فسفر موجود در عصاره‌های هضم شده نیز به روش چاپمن و پرات (۳) اندازه‌گیری شد. در نهایت نتایج حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار آماری JUMP 11 آنالیز و میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون توکی و در سطح احتمال ۱ درصد مقایسه گردیدند. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه خاک در جدول ۱ نشان داده شده است. خاک مورد مطالعه یک خاک آهکی با بافت لوم سیلتی و فقیر از نظر عناصر غذایی پر مصرف بود. جهت انجام توصیه کودی، نیتروژن به صورت کود اوره محلول در آب (در سه نوبت) و پتاسیم به صورت سولفات پتاسیم تامین شد.

نتایج تجزیه واریانس داده‌های بخش آزمایشگاهی نشان داد که فعالیت آنزیم فیتاز قارچی در سویه‌های *آسپرژیلوس* مورد مطالعه اختلاف معنی‌داری ($p<0.01$) با یکدیگر داشت.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

Table 1- Physicochemical properties of potting soil

بافت خاک Soil texture	رطوبت ظرفیت مزرعه Field capacity	کربن آلی Organic carbon	آهک $CaCO_3$	pH	نیتروژن Nitrogen	فسفر Phosphorus	پتاسیم Potassium	EC
	%				mg kg^{-1}			dS m^{-1}
لوم سیلتی Silty Loam	19	0.35	13	8.58	500	7	151	2.2

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس فعالیت آنزیم فیتاز قارچی

Table 2- Analysis of variance (ANOVA) for the fungal phytase activity

منابع تغییرات Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات فعالیت آنزیم فیتاز قارچی Mean of squares fungal phytase activity
سویه‌های آسپرژیلوس *Aspergillus* strains	2	103.8**
خطا Error	6	0.035
کل Total	8	
ضریب تغییرات CV		0.05

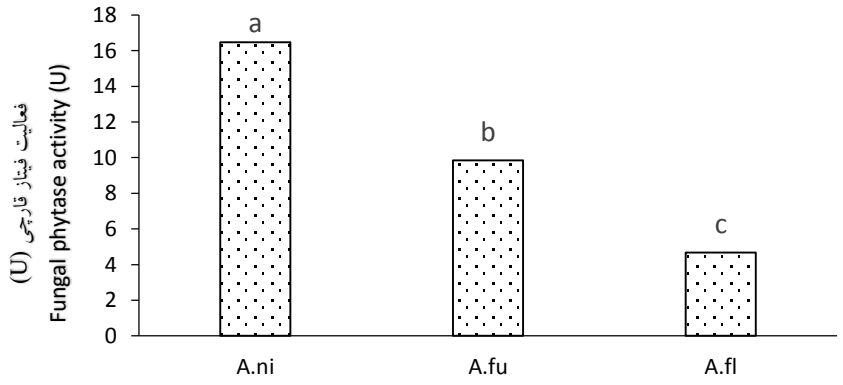
**: معنی‌داری در سطح یک درصد

نتایج مقایسه میانگین فعالیت آنزیمی سویه‌های *آسپرژیلوس نایجر*، *آسپرژیلوس فومیگاتوس* و *آسپرژیلوس فلاووس* نشان داد که نوع سویه مورد مطالعه تاثیر معنی‌داری ($p<0.01$) بر میزان فعالیت آنزیم فیتاز قارچی داشت. در بین سویه‌های مورد مطالعه سویه *آسپرژیلوس نایجر* با فعالیت آنزیمی معادل (U) ۱۶/۴۸ بیشترین میزان فعالیت و *آسپرژیلوس فلاووس* (U) ۴/۶۷ کمترین میزان فعالیت آنزیم فیتاز را دارا بودند (شکل ۱).

نتایج این آزمایش توانایی فعالیت آنزیمی متفاوت سه سویه مورد بررسی را نشان داد. دلیل این امر طبق گزارش چابوت و همکاران (۱۹۹۳) می‌تواند تفاوت در میزان رشد قارچ و اختلافات مورفولوژیکی و ژنتیکی باشد (۲). تفاوت بین سویه‌های مختلف در میزان تولید و فعالیت آنزیم فیتاز قارچی در مطالعات دیگری نیز گزارش شده است. در مطالعه انجام شده توسط جواهری و همکاران (۲۰۱۳)، گزارش شده است که بین جدایه‌های *آسپرژیلوس* تفاوت معنی‌داری در مورد فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی و فیتاز وجود داشت (۱۳). یاداو و همکاران (۲۰۰۳) توانایی سویه‌های مختلف *آسپرژیلوس*، *امریسلا* و *پنیسیلیوم* را جهت هیدرولیز گلیسرو فسفات سدیم و فعالیت آنزیم فیتاز را بررسی کرد و گزارش کردند که سویه *آسپرژیلوس نایجر* بیشترین تولید و فعالیت آنزیم فیتاز را دارا بود (۳۳).

بخش گلخانه

نتایج تجزیه واریانس داده‌های بخش گلخانه نشان داد که اثر ساده فیتات سدیم و آنزیم فیتاز قارچی و همچنین اثر متقابل این دو تاثیر معنی‌داری ($p<0.01$) بر مقدار غلظت فسفر اندام هوایی و ریشه و ارتفاع گیاه ذرت داشتند (جدول ۳).



شکل ۱- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم فیتاز قارچی سه سویه *آسپرژیلوس*

A.ni: آسپرژیلوس نایجر، A.fu: آسپرژیلوس فامیگاتوس و A.fl: آسپرژیلوس فلاووس

Figure 1- Comparison of means in activity of three *Aspergillus* fungal phytases

A.ni: *Aspergillus niger*, A.fu: *Aspergillus fumigatus* and A.fl: *Aspergillus flavus*

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس غلظت فسفر اندام هوایی و ریشه و وزن خشک اندام هوایی ذرت

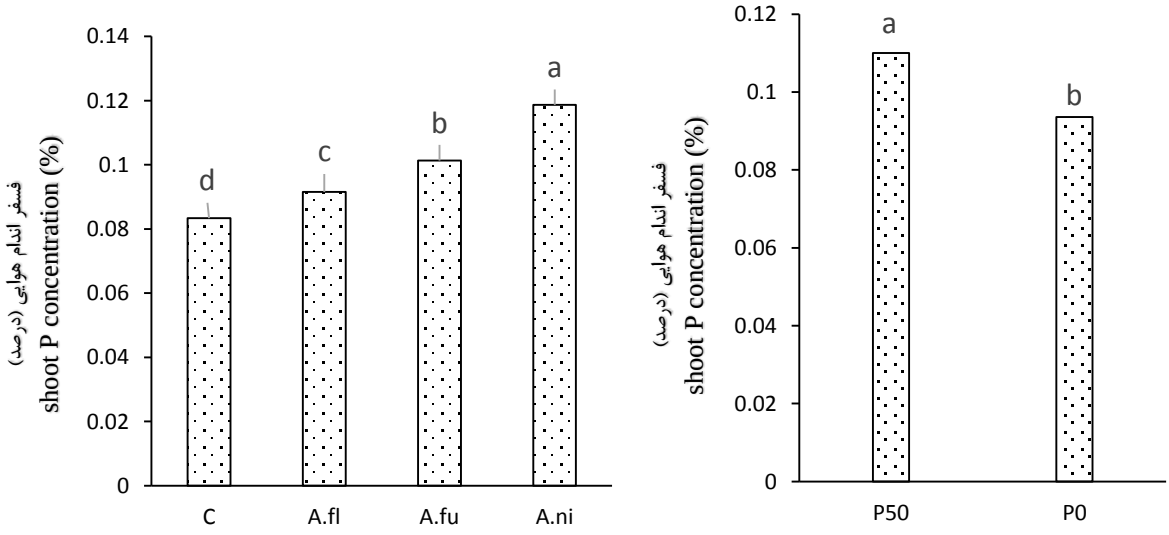
Table 3- Analysis of variance (ANOVA) P concentration in shoot and root and dry weight of maize

منابع تغییرات Sources of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات (Mean of squares)		
		وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	غلظت فسفر اندام هوایی Shoot p concentration	غلظت فسفر ریشه Root P concentration
فیتات سدیم Sodium phytate	1	426.7**	0.0003**	0.0016**
آنزیم فیتاز قارچی Fungal phytase enzyme	3	205.6**	0.0013**	0.0019**
فیتات سدیم×آنزیم فیتاز قارچی Sodium phytate× Fungal phytase enzyme	3	12.1**	0.000007**	0.00017**
خطا Error	16	0.953	0.00000004	0.0000013
کل Total	23			
ضریب تغییرات CV		0.13	0.1	0.11

**: معنی‌داری در سطح یک درصد

غلظت فسفر اندام هوایی

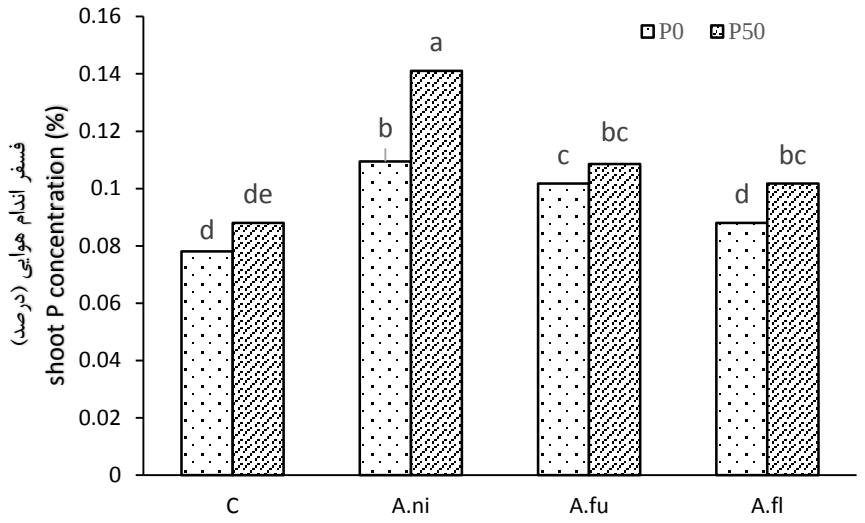
نتایج مقایسه میانگین اثر ساده فیتات سدیم بر غلظت فسفر اندام هوایی ذرت نشان داد که غلظت این عنصر در اندام هوایی گیاه ذرت در حضور فیتات سدیم افزایش ۱۸/۳ درصدی در مقایسه با شاهد (بدون فیتات سدیم) داشت. البته ذکر این نکته ضروری است که بخشی از این افزایش مربوط به فسفاتازهای گیاهی است. اما با عنایت به اینکه در تیمار شاهد (گیاهان بدون تلقیح با فیتاز) نیز در آزمایش در نظر گرفته شده بود، بنابر این در زمان مقایسه نتایج تیمارهای آزمایشی با شاهد بخش فسفاتاز گیاهی طبیعتا حذف خواهد شد (شکل ۲ الف). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده آنزیم فیتاز قارچی نیز نشان داد که سه نوع آنزیم فیتاز به کار برده شده باعث افزایش غلظت فسفر اندام هوایی گیاه ذرت در مقایسه با شاهد شدند. در مورد غلظت فسفر اندام هوایی در حضور آنزیم‌های مورد استفاده چنین می‌توان گفت که بیشترین تاثیر مربوط در تیمار فیتاز *آسپرژیلوس نایجر* (۵۰ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) و کمترین تاثیر مربوط به تیمار فیتاز *آسپرژیلوس فلاووس* (۸/۹ درصد افزایش) بود (شکل ۴ ب).



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر ساده فیتات سدیم (تصویر راست) و آنزیم فیتاز قارچی (تصویر چپ) بر غلظت فسفر اندام

A.ni: *آسپرژیلوس نایجر*، A.fu: *آسپرژیلوس فامیگاتوس*، A.fl: *آسپرژیلوس فلاووس* و C: بدون آنزیم- P0 و P50 به ترتیب صفر و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فیتات سدیم

Figure 2- Comparison of means of P concentration in maize shoot a) sodium phytate b) fungal phytase. A.ni: *Aspergillus niger*, A.fu: *Aspergillus fumigatus* and A.fl: *Aspergillus flavus* –P0 and P50: Two levels of zero and 50 mg/kg sodium phytate, respectively



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل آنزیم فیتاز قارچی*فیتات سدیم بر غلظت فسفر اندام هوایی ذرت

A.ni: *آسپرژیلوس نایجر*، A.fu: *آسپرژیلوس فامیگاتوس*، A.fl: *آسپرژیلوس فلاووس* و C: بدون آنزیم- P0 و P50 به ترتیب صفر و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فیتات سدیم

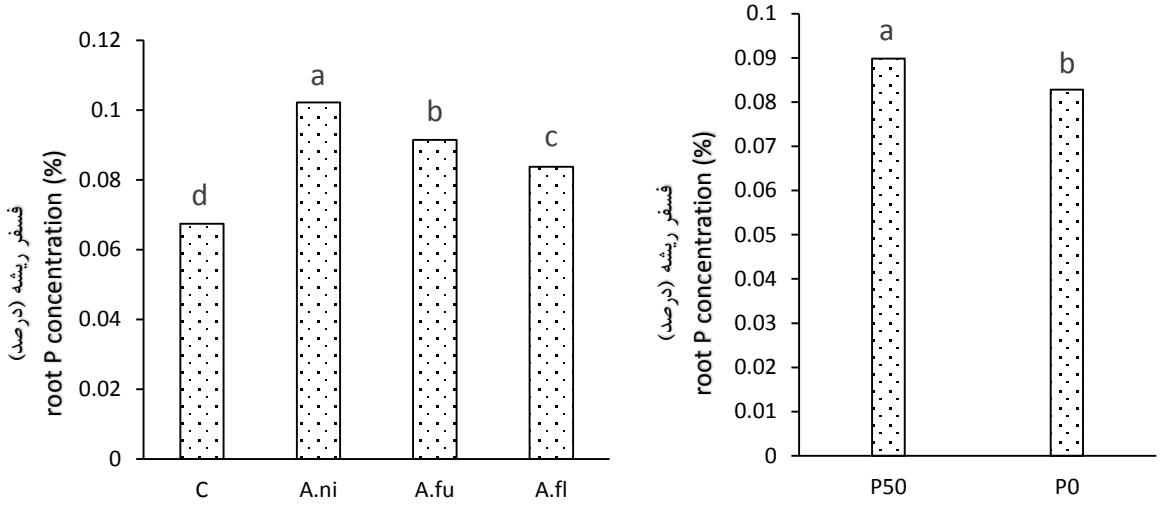
Figure 3- Interaction of fungal phytase enzyme and sodium phytate on P concentration in maize shoot. A.ni: *Aspergillus niger*, A.fu: *Aspergillus fumigatus* and A.fl: *Aspergillus flavus* –P0 and P50: f zero and 50 mg/kg sodium phytate respectively

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل آنزیم فیتاز و فیتات سدیم نیز نشان داد که آنزیم‌های به کار برده شده در دو سطح فیتات سدیم باعث افزایش غلظت این عنصر در اندام هوایی گیاه ذرت شدند که این افزایش در سطح ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فیتات سدیم شدت بیشتری داشت (شکل ۳). در هر دو تیمار P0 و P50 بیشترین غلظت فسفر اندام هوایی مربوط به فیتاز *آسپرژیلوس نایجر* بود. به طور کلی بیشترین غلظت فسفر اندام هوایی گیاه ذرت در تیمار A.niP50 (۰/۱۴ درصد) و کمترین غلظت این عنصر نیز در تیمار CP0 (۰/۰۷۸ درصد) اندازه‌گیری شد. حضور سه نوع آنزیم فیتاز *آسپرژیلوس نایجر*، *آسپرژیلوس فومیگاتوس* و *آسپرژیلوس فلاووس* در سطح صفر فیتات سدیم به ترتیب باعث افزایش ۳۹/۷، ۲۶/۹ و ۱۲/۸ درصدی غلظت فسفر اندام هوایی گیاه ذرت شد و این افزایش در سطح ۰/۰۵ گرم بر کیلوگرم فیتات سدیم به ترتیب ۶۰/۲، ۲۲/۷ و ۱۴/۷ درصد بود (شکل ۳).

با توجه به کم بودن غلظت فسفر فراهم در خاک و نیاز گیاه ذرت (۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) (۱۹)، پاسخ گیاه به افزودن منبع فسفر آلی دور از انتظار نبود. افزایش حلالیت فسفر بخش‌های آلی و معدنی و افزایش فراهمی این عنصر در خاک مهمترین عامل در افزایش غلظت این عنصر در ریشه و اندام هوایی گیاهان می‌باشد (۲۰). از طرفی علت افزایش مقدار فسفر در اندام هوایی در تیمارهای بدون فیتات سدیم احتمالا تاثیر آنزیم‌های فیتاز بر فراهمی بخش فسفر آلی خاک بوده و با افزایش بخش فسفر آلی (سطح ۰/۰۵ گرم فیتات سدیم)، تاثیر این آنزیم‌ها بیشتر شده است. تاثیر بیشتر آنزیم فیتاز *آسپرژیلوس نایجر* بر مقدار فسفر اندام هوایی در مقایسه با دو آنزیم دیگر مورد استفاده احتمالا به دلیل فعالیت بیشتر آن می‌باشد که در بخش قبل بحث شد. به طور کلی پژوهش‌های انجام شده در زمینه ریزجانداران فراهم کننده فسفر دو عامل تولید اسیدهای آلی و آنزیم (به ویژه فیتاز) را به عنوان عوامل مهم در افزایش فراهمی و جذب فسفر توسط گیاه دانستند (۲۲). در مورد تاثیر فیتاز بر فراهمی فسفر، فیندنج (۱۹۹۳) در مطالعه بر روی چند گونه تولید کننده فیتاز گزارش کرد که باکتری *سودوموناس* فعالیت فیتازی بالاتری داشته که این امر منجر به افزایش مقدار فسفر قابل دسترس، تحریک و انشعاب بیشتر ریشه برای جذب فسفر توسط ریشه و انتقال آن به اندام هوایی گردیده بود (۵).

فسفر ریشه ذرت

از جمله اندام‌های دیگر گیاه که برای بررسی میزان غلظت فسفر مورد مطالعه قرار گرفت ریشه گیاه ذرت بود. نتایج مقایسه میانگین اثر ساده فیتات سدیم بر غلظت فسفر ریشه گیاه ذرت نشان داد که سطح ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم این ماده باعث افزایش معنی‌دار ($p<0/01$) مقدار فسفر ریشه در مقایسه با شاهد (سطح صفر) شده که این مقدار افزایش ۸/۵ درصد بود (شکل ۴ الف). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده آنزیم فیتاز نیز نشان داد که کاربرد آنزیم فیتاز سه سویه قارچ مورد مطالعه باعث افزایش غلظت فسفر ریشه گیاه ذرت شد و این افزایش در تیمارهای حاوی فیتاز *آسپرژیلوس نایجر*، *آسپرژیلوس فومیگاتوس* و *آسپرژیلوس فلاووس* در مقایسه با شاهد به ترتیب ۵۲/۸، ۳۵/۵ و ۲۳/۳ درصد اندازه‌گیری شد. بیشترین مقدار فسفر ریشه گیاه ذرت در حضور آنزیم فیتاز *آسپرژیلوس نایجر* (۰/۱ درصد) و کمترین مقدار (۰/۰۶۷ درصد) نیز در تیمار شاهد (بدون آنزیم) بود (شکل ۴ ب).

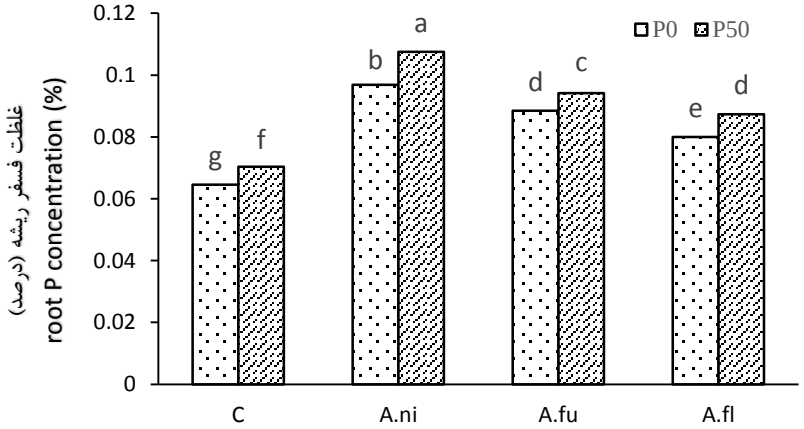


شکل ۴- مقایسه میانگین اثر ساده فیتات سدیم تصویر راست و آنزیم فیتاز قارچی (تصویر چپ) بر غلظت فسفر ریشه ذرت

A.ni: *آسپرژیلوس نایجر*، A.fu: *آسپرژیلوس فامیگاتوس* و A.fl: *آسپرژیلوس فلاووس*– P0 و P50: به ترتیب دو سطح صفر و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فیتات سدیم

Figure 4- Comparison of means of P concentration in maize root a) sodium phytate b) fungal phytase. A.ni: *Aspergillus niger*, A.fu: *Aspergillus fumigatus* and A.fl: *Aspergillus flavus* –P0 and P50: zero and 50 mg/kg sodium phytate respectively

روند مشاهده شده در مورد تاثیر تیمارهای آزمایشی بر غلظت فسفر ریشه مشابه با غلظت این عنصر در اندام هوایی گیاه ذرت بود. افزایش مقدار فسفر آلی با اضافه کردن مقدار ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فیتات سدیم و همچنین فعالیت آنزیم‌های فیتاز اضافه شده به بذر باعث افزایش غلظت فسفر در ریشه گیاه ذرت شده و در این بین بیشترین مقدار نیز در تیمار آنزیم فیتاز *آسپرژیلوس نایجر* مشاهده شد. نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل فیتات سدیم و آنزیم فیتاز تولید شده از سه سویه *آسپرژیلوس* بر غلظت فسفر ریشه گیاه ذرت، معنی‌دار بودن ($p<0.01$) تاثیر تیمارها را نشان داد. بیشترین مقدار فسفر ریشه گیاه در تیمار A.niP50 (۰/۱۱ درصد) و کمترین مقدار نیز در تیمار CP0 (۰/۰۶۴ درصد) اندازه‌گیری شد (شکل ۵). در هر دو سطح صفر و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فیتات سدیم، بین تیمارهای فیتاز قارچی مورد استفاده و شاهد اختلاف معنی‌داری ($p<0.01$) مشاهده شد.



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل آنزیم فیتاز ×فیتات سدیم بر غلظت فسفر ریشه ذرت

A.ni: آسپرژیلوس نایجر، A.fu: آسپرژیلوس فامیگاتوس، A.fl: آسپرژیلوس فلاووس و C: بدون آنزیم– P0 و P50: به ترتیب دو سطح صفر و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فیتات سدیم

Figure 5- Interaction of fungal phytase enzyme and sodium phytate on P concentration in maize root. A.ni: *Aspergillus niger*, A.fu: *Aspergillus fumigatus* and A.fl: *Aspergillus flavus* –P0 and P50: zero and 50 mg / kg sodium phytate, respectively

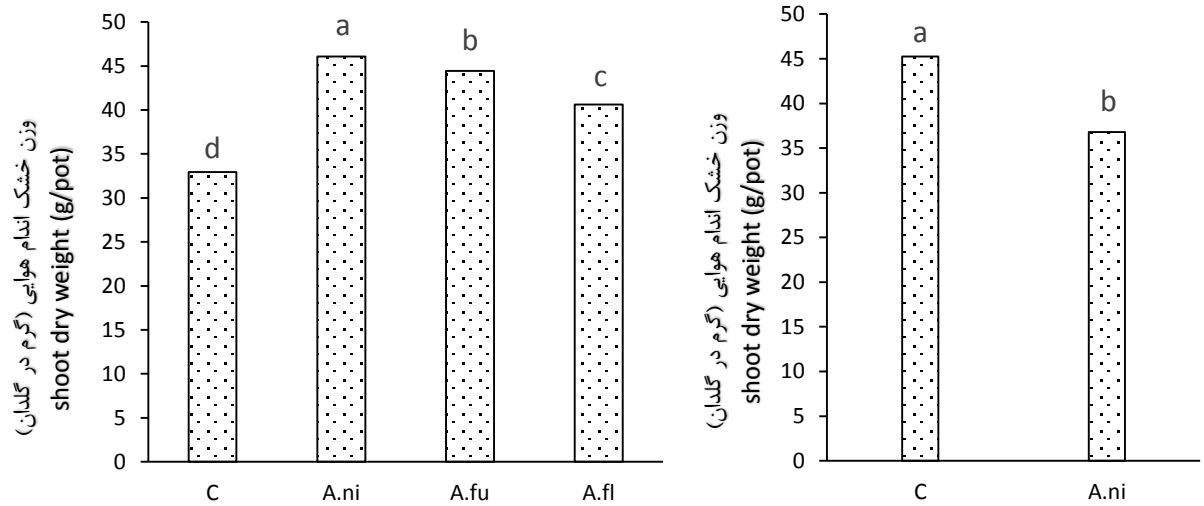
آنزیم فیتاز قارچی تولید شده توسط سه سویه *آسپرژیلوس نایجر*، *آسپرژیلوس فومیگاتوس* و *آسپرژیلوس فلاووس* در سطح صفر فیتات سدیم به ترتیب باعث افزایش ۵۰/۲، ۳۶/۹ و ۲۴/۳ درصدی غلظت فسفر ریشه گیاه ذرت شدند و این افزایش در سطح ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فیتات سدیم به ترتیب ۵۲/۸، ۳۳/۴ و ۲۳/۳ درصدی در مقایسه با شاهد اندازه‌گیری شد (شکل ۵).

به نظر می‌رسد که افزایش فراهمی عنصر فسفر در خاک در پی اضافه کردن منبع فسفر آلی و همچنین آنزیم فیتاز باعث افزایش غلظت این عنصر در ریشه گیاه ذرت شده است. تاثیر ریزجانداران حل‌کننده فسفر خاک و متابولیت‌های تولید شده از آن‌ها بر مقدار فسفر اندام‌های گیاه در مطالعات زیادی بررسی شده است (۱۶ و ۲۵). ریچاردسون و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که حضور ریزجانداران به دلیل تولید متابولیت‌های آن‌ها، فراهمی فسفر خاک را افزایش داده و باعث افزایش غلظت آن در اندام‌های گیاهان می‌شود (۲۵). تاثیر قارچ‌های مورد استفاده در این آزمایش در مطالعات دیگری نیز بررسی شده است. رودریگز و فراگا (۱۹۹۹) در تحقیق خود بر روی تاثیر فیتاز *آسپرژیلوس نایجر* بر فراهمی فسفر، تاثیر مثبت کاربرد این آنزیم را بر میزان فسفر ریشه گیاه گزارش کردند (۲۷).

وزن خشک اندام هوایی

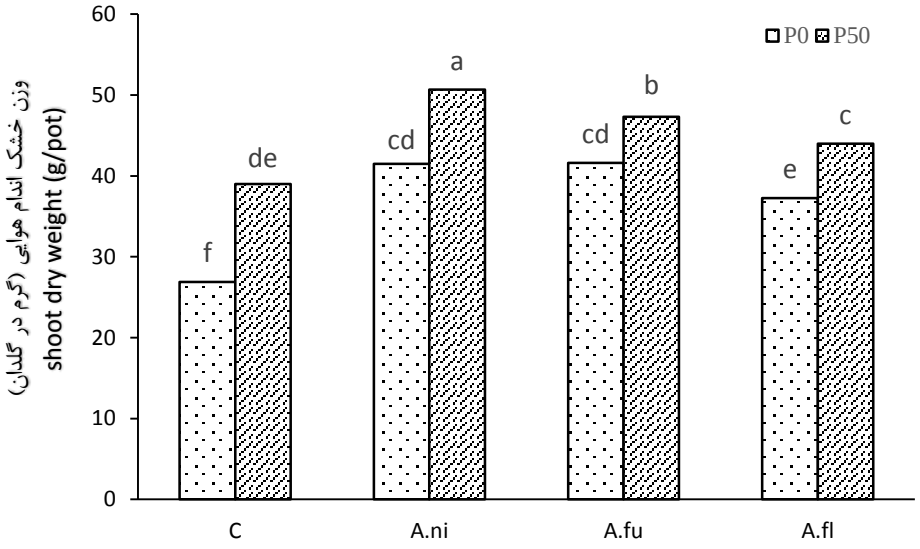
وزن خشک اندام هوایی گیاهان از جمله صفاتی است که تحت تاثیر فراهمی عناصر غذایی در خاک است و به همین خاطر این صفت نیز در این آزمایش اندازه‌گیری شد. نتایج مقایسه میانگین اثر ساده فیتات سدیم نشان داد که افزودن ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فیتات سدیم (P50) در مقایسه با شاهد (P0) باعث افزایش ۱۴/۷ درصدی وزن خشک اندام هوایی گیاه ذرت شد (شکل ۶ الف). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده آنزیم فیتاز قارچی نیز نشان داد که کاربرد آنزیم فیتاز قارچی باعث افزایش وزن خشک اندام هوایی گیاه ذرت شد و این افزایش در تیمارهای حاوی فیتاز *آسپرژیلوس نایجر*، *آسپرژیلوس فومیگاتوس* و *آسپرژیلوس فلاووس* در مقایسه با شاهد به ترتیب ۴۱/۱، ۳۶/۷ و ۲۴/۳ درصد اندازه‌گیری شد. بیشترین میزان وزن خشک اندام هوایی گیاه ذرت در حضور آنزیم فیتاز *آسپرژیلوس نایجر* (۴۶/۰۸ گرم در گلدان) و کمترین مقدار (۳۲/۹۵ گرم در گلدان) نیز در تیمار شاهد (بدون آنزیم) بود (شکل ۶ ب).

نتایج اثر متقابل آنزیم فیتاز قارچی و فیتات سدیم نیز نشان داد که بیشترین وزن خشک اندام هوایی گیاه در تیمار A.niP50 با مقدار ۵۰/۷ گرم در گلدان و کمترین مقدار نیز در تیمار CP0 با مقدار ۲۶/۹ گرم در گلدان بود (شکل ۷). آنزیم فیتاز قارچی *آسپرژیلوس نایجر* بیشترین تاثیر را بر وزن خشک اندام هوایی گیاه ذرت داشت به طوریکه در دو سطح صفر و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فیتات سدیم بیشترین مقدار وزن خشک اندم هوایی مربوط به این آنزیم بود.



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر ساده فیتات سدیم (تصویر راست) و آنزیم فیتاز قارچی (تصویر چپ) بر وزن خشک اندام هوایی ذرت A.ni: *آسپرژیلوس نایجر*، A.fu: *آسپرژیلوس فامیگاتوس* و A.fl: *آسپرژیلوس فلاووس*- P0 و P50: به ترتیب دو سطح صفر و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فیتات سدیم

Figure 6- Comparison of means of shoot dry weight of maize per pot a) sodium phytate b) fungal phytase. A.ni: *Aspergillus niger,* A.fu: *Aspergillus fumigatus* and A.fl: *Aspergillus flavus* –P0 and P50: zero and 50 mg/kg sodium phytate respectively



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل آنزیم فیتاز قارچی× فیتات سدیم بر وزن خشک اندام هوایی ذرت. A.ni:*آسپرژیلوس نایجر*، A.fu: *آسپرژیلوس فامیگاتوس* و A.fl:*آسپرژیلوس فلاووس*- P0 و P50: به ترتیب دو سطح صفر و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فیتات سدیم

Figure 7- Interaction of fungal phytase enzyme and sodium phytate on shoot dry weight in maize root. A.ni: *Aspergillus niger*, A.fu: *Aspergillus fumigatus* and A.fl: *Aspergillus flavus* –P0 and P50: zero and 50 mg/kg sodium phytate respectively

پس از آنزیم *آسپرژیلوس نایجر* بیشترین تاثیر مربوط به آنزیم فیتاز قارچی *آسپرژیلوس فومیگاتوس* بود و کمترین تاثیر بر وزن خشک اندام هوایی در مقایسه با شاهد در تیمار *آسپرژیلوس فلاووس* مشاهده شد. آنزیم فیتاز قارچی تولید شده از سه قارچ *آسپرژیلوس نایجر*، *آسپرژیلوس فومیگاتوس* و *آسپرژیلوس فلاووس* در عدم حضور فیتات سدیم به ترتیب باعث افزایش ۵۴/۳، ۵۴/۶ و ۳۸/۵ درصدی ارتفاع گیاه ذرت شدند و این افزایش در حضور فیتات سدیم برای تیمار حاوی فیتاز *آسپرژیلوس نایجر*، *آسپرژیلوس فومیگاتوس* و *آسپرژیلوس فلاووس* فومیگاتوس در مقایسه با شاهد به ترتیب ۳۰، ۲۱/۲ و ۱۲/۸ درصد بود (شکل ۷).

به نظر می‌رسد که تاثیر آنزیم فیتاز قارچی اضافه شده به خاک و افزایش مقدار فسفر در ریشه و اندام هوایی گیاه ذرت باعث بهبود رشد این گیاه و افزایش وزن خشک اندام هوایی شده است. تاثیر فسفر بر افزایش وزن خشک اندام هوایی در مطالعه قرشی و همکاران (۲۰۱۲) و کریمیان و قنبری (۱۹۹۰) نیز گزارش شد (۸، ۱۴). مطالعه در زمینه کاربرد جداگانه آنزیم فیتاز قارچی بر خصوصیات رشدی گیاه موجود نبود و در این بین تنها در مورد تاثیر ریزجانداران حل کننده فسفر بر حل کردن این عنصر غذایی و بهبود ویژگی‌های رشدی گیاه وجود دارد. سینگ و ساتیانارایانا (۲۰۱۱) گزارش کردند که حضور آنزیم فیتاز در منطقه ریزوسفر در شرایط مزرعه‌ای باعث افزایش رشد گیاه شد (۳۱). در مطالعه دیگری ونگ و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه خود که در شرایط گلخانه‌ای انجام شد گزارش دادند که تلقیح گیاهان با ریزجانداران حل‌کننده فسفر، باعث افزایش وزن خشک (۲۳/۳ درصد) و وزن تازه (۲۳/۸ درصد) گیاه گندم در مقایسه با نمونه شاهد شدند. این محققین دلیل این امر را تولید اسیدهای آلی، هورمون‌های رشدی و همچنین آنزیم‌های حل کننده عناصر غذایی مانند فیتاز اعلام کردند (۳۳).

نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج به دست آمده در دو بخش آزمایشگاهی نشان داد که فعالیت فیتاز تولید شده توسط سویه *آسپرژیلوس نایجر* بیشتر از دو سویه دیگر بوده و در بخش گلخانه‌ای نیز این تیمار تاثیر بیشتری بر مقدار فسفر در ریشه، اندام هوایی و وزن خشک گیاه ذرت داشت. در مجموع داده‌های این تحقیق تاثیر معنی‌دار و افزایشی آنزیم‌های فیتاز قارچی سویه‌های *آسپرژیلوس* بر مقدار فسفر در اندام هوایی و ریشه گیاه ذرت و همچنین وزن خشک اندام هوایی این گیاه را نشان دادند که این افزایش در حضور فیتات سدیم شدت بیشتری داشت. به نظر می‌رسد که ریزجانداران تولید کننده آنزیم فیتاز می‌توانند نقش مهمی در بهبود رشد گیاهان با افزایش فراهمی عنصر فسفر داشته باشند و بنابراین توجه هر چه بیشتر به بخش آلی فسفر در خاک و همچنین ریزجانداران تولید کننده فیتاز باعث کاهش مصرف کودهای شیمیایی فسفردار خواهد شد.

منابع

1- Bremner J.M., and Mulvaney C.S. 1982. Nitrogen-Urea. In: Miller RH and Keeney, DR (eds). Method of Soil Analysis. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy USA 699-708.
2- Chabot R., Cescas M.P., and Antoun H. 1993. Microbiological solubilization of inorganic P-fraction normally encountered in soils. Phosphorus, Sulfur, Silicon 77: 329-336.
3- Chapman H.I., and Pratt P.F. 1961. Methods of Analysis for Soils, Plants and Waters. The University of California's Division of Agricultural Science, Berkeley, California, USA.
4- Chuang C.C., Kuo Y.L., Chao C.C., and Chao W.L. 2007. Solubilization of inorganic phosphates and plant growth promotion by Aspergillus niger. Biology and Fertility of Soils 43: 575-584.
5- Findenegg G.R., and Neiemans J.A. 1993. The effect of phytase on the availability of from myo-inositol hexaphosphate (phytate) for maize roots. Plant and Soil 154: 189-196.
6- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis. Methods of soil analysis: Part 1—*Physical and mineralogical methods*. Klute A. Ed. Chap. 15. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America 383–411.
7- George T.S., Richardson A.E., Li S.S., Gregory P.J., and Daniell T.J. 2009. Extracellular Release of a Heterologous Phytase from Roots of Transgenic Plants: Does Manipulation of Rhizosphere Biochemistry Impact Microbial Community Structure? FEMS Microbiology Ecology 70: 433-445.
8- Ghorashi L., Haghnia Gh.H., Lakzian A., and Khorasani R. 2012. Effect of phosphorus and organic matter on availability and uptake of Fe (II) in maize (Zea mays. L). Journal of Agroecology 4(1): 12-19. (In Persian)
9- Grant C., Bittman S., Montreal M., Plenchette C., and Morel C. 2005. Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. Canadian Journal of Plant Science 85(1): 3-14.
10- Hariprasada, P., and Niranjana, S.R. 2009. Isolation and characterization of phosphate solubilizing rhizobacteria in improving plant health of tomato. Plant and Soil 316: 13–24.
11- Heinonen J.K., and Lahti R.J. 1981. A new and convenient colorimetric determination of inorganic orthophosphate and its application to the assay of inorganic pyrophosphatase. Anal Biochemistry 113: 313-317.
12- Idriss E.E., Makarewicz O., Farouk A. … and Borriss R. 2002. Extracellular Phytase Activity of Bacillus amyloliquefaciens FZB45 Contributes to Its Plant-Growth-Promoting Effect. Micro- Biology 148: 2097-2109.
13- Javaheri T., Lakzian A., Khorasani R., and Taheri P. 2013. The Effect of Aspergillus Isolates on Hydrolysis of Soil Organic Phosphorus (Phytic Acid and Sodium Glycerophosphate). Journal of Water and Soil 27(6): 24-32. (In Persian with English abstract)
14- Karimian N., and Ghanbari A. 1990. Evaluation of different extractants for prediction of Plant response to applied P fertilizer in highly calcareous soils. Abstract, p. 25, 10th Word fertilizer congress, CIEC, Nicosia, Cyprus.
15- Khan M.S., Ziadi A., Ahemad M., Oves M., and Wani P.A. 2010. Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi- current perspective. Archives of Agronomy and Soil Science 56: 73-98.
16- Khan M.S., Ziadi A., and Wani P.A. 2007. Role of phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture - A review. Agronomy for Sustainable Development 27: 29-43.
17- Li H., Smith S.E., Holloway R.E., Zhu Y., and Smith F.A. 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi contribute to P uptake by wheat grown in a phosphorus-fixing soil even in the absence of positive-growth responses. New Phytology 172: 536–543.
18- Loeppert R.H., and Suarez D.L. 1996. Carbonate and gypsum. p. 437-474. In: Sparks, D.L. (ed.) Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. SSSA Book Series No. 5. SSSA and ASA, Madison, WI.
19- Malakoti M.J., and Homaiy M. 2004. Fertility of arid and semi-arid soils (problems and solutions). Second edition with complete revision, Tarbiat Modares University publishers, Tehran.
20- Menezes-Blackburn D., Paredes C., Zhang H., Giles C.D., Darch T., Stutter M., George T.S., Shand C., Lumsdon D., Cooper P., Wendler R., Brown L., Blackwell M., Wearing C., and Haygarth P.M. 2016. Organic acids regulation of chemical–microbial phosphorus transformations in soils. Environmental Science and Technology 50: 11521-11531.
21- Olsen S.R., and Sommers L.E. 1982. Phosphorus, In: Page A.L. ed. Methods of soil analysis, part 2, Chemical and Microbiological properties, Soil Science Society of American Journal Madison 403–430.
22- Ponmurugan P., and Gopi C. 2006. In vitro production of growth regulators and phosphatase activity by phosphate solubilizing bacteria. African Journal of Biotechnology 5: 348-350.
23- Rahi P., Vyas P., Sharma S., Gulati A., and Gulati A. 2009. Plant growth promoting potential of the fungus Discosia sp. FIHB 571 from tea rhizosphere tested on chickpea, maize and pea. Indian Journal of Microbiology 49(2): 128–133.
24- Richardson A.E., Barea J., McNeill A.M., and Prigent-Combaret C. 2009. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. Plant Soil 339: 305–339.
25- Richardson A.E., and Simpson Richard J. 2011. Soil microorganisms mediating phosphorus availability. Plant Physiology 156: 989-996.

26- Richardson A.E., Hadobas P.A., and Hayes J.E. 2001. Extracellular Secretion of Aspergillus Phytase from Arabidopsis Roots Enables Plants to Obtain Phosphorus from Phytate. The Plant Journal 25: 641-649.
27- Rodríguez H., and Fraga R. 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. Biotechnology Advances 17: 319–339.
28- Shieh T.R., and Ware J.H. 1968. Survey of microorganisms for the production of extracellular phytase. Appl Microbiol 16: 1348-1351.
29- Sarikhani M.R., Malboobi M.A., Aliasgharzad N., and Greiner R. 2019. Identification of two novel bacterial phosphatase-encoding genes in Pseudomonas putida strain P13. Journal of Applied Microbiology 127(4): 1113-1124.
30- Sarikhani M.R., Malboubi M.A., and Ebrahimi A. 2014. Phosphate-solubilizing bacteria: Isolation of bacteria and genes encoding phosphate-solubilizing, mechanism and genetics of phosphate dissolution. Agricultural Biotechnology 6(1): 76-110. (In Persian)
31- Singh B., and Satyanarayana T. 2011. Microbial Phytases in Phosphorus Acquisition.
32- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of digestion method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration. Soil Scince 37: 29-38.
33- Wang X., Wang C., Sui J., Liu Z., Li Q., Ji C., Song X., Hu Y., Wang C., Sa R., and Zhang J. 2018. Isolation and characterization of phosphofungi, and screening of their plant growth-promoting activities. AMB Express 8: 63-70.
34- Wasaki J., Maruyama H., Tanaka M., Yamamura T., Dateki H., Shinano T., Ito S., and Osaki M. 2009. Overexpression of the LASAP2 gene for secretory acid phosphatase in white lupin improves the phosphorus uptake and growth of tobacco plants. Soil Science and Plant Nutrition 55: 107–113.
35- Yadav R.S., Tarafdar J.C. 2003. Phytase and phosphatase producing fungi in arid and semi-arid soils and their efficiency in hydrolyzing different organic P compounds. Soil Biol Biochem 35(6): 745–751.
36- Yadav B.K., and Tarafdar J.C. 2009. "Extracellular acid phosphatase and phytase activities of Buffel grass (*Cenchrus ciliaris* L.) genotypes." Journal of the Indian Society of Soil Science 57(3): 332-337.

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 505-517

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۵۱۷-۵۰۵

Effects of Fungal Phytases (Aspergillus Strains) on Availability of Phosphorus from Sodium Phytate and Phosphorus Uptake in Corn Plant

T. Valizadeh[1]- A. Lakzian[2*]- A. Halajnia[3]- M. Mazhari[4]

Received: 02-12-2019
Accepted: 14-07-2021

Introduction: The deficiency of phosphorus has attracted a lot of attention as one of the most important nutrients for agricultural plants especially in calcareous soils. However, in some soils, organic phosphorous containing 80 percent of total phosphorus in some soils but in most cases, that form of phosphorus is not available for plant uptake. The availability of phosphorus from both organic and inorganic sources by phosphate-solubilizing microorganisms (PSMs) as bio-inoculants are promising substitutes for chemical fertilizer and other agrochemicals amendments. Both arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and phosphate solubilizing bacteria (PSB) play a key role in providing phosphorus for agricultural plants. Among several phosphate-solubilizing fungal isolates, *Aspergillus* sp. is able to solubilize calcium phosphates by secreting various organic acids, e.g., oxalic and formic acids, and producing phytase enzyme. The present study aimed to evaluate the ability of different strains of Aspergillus for phytase production. The second aim of this study was the purification and application of purified phytase and its efficiency in the phosphorus availability from hexaphosphorylated inositols.

Materials and Methods: Two separate experiments were carried out in two different stages. In the first one phytase was isolated from three strains of Aspergillus (*Aspergillus niger* provided by the department of plant protection, Agricultural college, Ferdowsi University of Mashhad), *Aspergillus flavus*, and *Aspergillus fumigatus* strains were collected from the Iranian biological resources center, Tehran*)*. All Isolates were recultured on PDA (potato dextrose Agar) medium for 5 days at 30 ^{o}C in an incubator. Quality evaluation of phytase production by three strains of Aspergillus tested using hydrolysis of phytate sodium on PSM (phytase screen medium) medium. Solubility index was calculated for all three strains (Solubility index = (Colony diameter + Hallow diameter)/ Colony diameter). Phytase production was carried out on fermentation media (Shieh and Ware 1968) but starch was substituted by dextrin. Fermentation media inoculated by fungal strains for 14 days at 30 ^{o}C. Fermentation media was centrifuged (10,000 g) for 30 minutes and supernatant was collected. *Purification of phytases was done against Tris-HCl 25mM*, pH=7.2 for *12 hours*. Phytase activities were evaluated in a completely randomized design with three replications. Then purified phytase from three Aspergillus strains was applied in a pot experiment using a completely randomized design with the factorial arrangement and three replications. The experimental factors included two levels of hexaphosphorylated inositols (and 50 mg/kg) and four types of phytase (Control, phytase isolated from *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus*, and *Aspergillus fumigatus*. In the greenhouse experiment, the effects of different phytase types on phosphorus availability from sodium phytate (hexaphosphorylated inositols) and phosphorus uptake by maize plant was evaluated. Corn plants (*Zea maize* 704 single cross) were grown in 5 kg pots at 70 % of water holding capacity for 60 days. Plant height, root dry weight, shoot dry weight, phosphorus concentration in shoot and root were evaluated.

Results and Discussion: The results showed that *Aspergillus niger* and *Aspergillus flavus* had the highest (4.96) and the lowest (1.23) solubility index among the tested strains, respectively. The results from the laboratory experiment showed that phytase isolated from *Aspergillus niger* had the maximum amount of phytase activity (16.48 µmol/ min.ml) and phytase isolated from *Aspergillus flavus* had the minimum phytase activity (4.67 µmol/ min.ml). *Aspergillus niger* phytase was more effective compared to *Aspergillus flavus* and *Aspergillus fumigatus* phytases. The results of the greenhouse experiment represented that the highest amount of phosphorous in the shoot (0.125 percent), root (0.0102 percent), and shoot dry weight (46.08 g/pot) belonged to the maize plants treated by phytase isolated from *Aspergillus niger* in the presence of 50 mg/kg of sodium phytate. Generally, the results showed that *Aspergillus niger* strain was more effective than the other two strains

1, 2 and 3- Graduate Master, Professor and Assistant Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: alakzain@yahoo.com)
4- Assistant Professor, Department of Soil Science, Agriculture and Natural Resources Faculty, Karaj Branch, Islamic Azad University
DOI: 10.22067/JSW.2021.14925.0

in both laboratory and greenhouse experiments. Phytase enzymes isolated from strains had positive effects on phosphorous concentration in a different parts of maize plant and growth characteristics of maize. Phosphatase and phytase generally improve the availability of phosphorus from different phosphorus sources. It should be kept in mind that phytase also increases the bioavailability of other essential minerals such as Ca^{2+}, Mg^{2+}, P, Zn^{2+}, Fe^{3+}, which are bound to phytic acid. Since the phytase production by fungi has been attained by different cultivation methods (solid-state, semisolid, and submerged fermentation) it seems that different cultivation methods can affect the phytase efficiency. Therefore, we suggested that phytates from different cultivation methods can be tested for phosphorus bioavailability from different sources.

Keywords: *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus fumigatus*, Phosphorus availability

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 519-534

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۵۳۴-۵۱۹

مقاله پژوهشی

بررسی قابلیت انباشت زیستی جو برای سرب و کروم خاک در شرایط تنش خشکی

محسن مداحی نسب[1*]- سیدمحسن موسوی نیک[2]- سید احمد قنبری[3]- علیرضا سیروس مهر[4]- شاپور کوهستانی[5]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۳

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی تأثیر کم‌آبی بر قابلیت انباشت زیستی و زیست‌فراهمی دو فلز سمی سرب و کروم برای گیاه جو بود که در یک آزمایش مزرعه‌ای دوساله، با اعمال سه سطح کم‌آبی با (آبیاری در ۱۰۰ (شاهد)، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) انجام شد. نتایج نشان داد که در همه موارد غلظت سرب و کروم در ریشه‌های گیاه جو بیشتر از شاخساره بود و با افزایش تنش خشکی، افزایش غلظت سرب در ریشه‌ها معنی‌دار نبود اما در شاخساره افزایش معنی‌دار داشت درحالی‌که غلظت کروم در هر دو بخش گیاه کاهش معنی‌دار داشت. با افزایش تنش خشکی، فاکتور انباشت شاخساره برای سرب افزایش و برای کروم کاهش یافت. همچنین با افزایش سطح کم‌آبی، فاکتور انباشت ریشه برای کروم کاهش یافت در حالی‌که فاکتور انتقال برای هر دو عنصر افزایش یافت اما افزایش آن برای سرب برجسته‌تر بود. فاکتور انباشت شاخساره برای سرب با افزایش وزن خشک شاخساره بصورت خطی کاهش یافت (β=-۰٫۸۶) اما فاکتور انباشت شاخساره برای کروم افزایش یافت (β=۰٫۶۲). مدل رگرسیونی وزن خشک ریشه، فاکتور انباشت ریشه برای کروم را با (β= ۰٫۸۵) پیش‌بینی کرد. مدل رگرسیونی وزن خشک کل گیاه توانست فاکتور انتقال سرب را با (β= -۰٫۸۹) و فاکتور انتقال کروم را با (β= -۰٫۶۷) پیش‌بینی کند. در این آزمایش ضرایب انباشت و انتقال زیستی مورد مطالعه همگی کمتر از یک بدست آمد، بنابراین گیاه جو زراعی نسبت به سرب و کروم موجود در خاک، گیاهی اجتناب کننده است و در شرایط کم‌آبی فزاینده در شرایط مزرعه، این فلزات سمی را به زنجیره غذایی انتقال نمی‌دهد.

واژه‌های کلیدی: زنجیره غذایی، زیست‌فراهمی، فاکتور انتقال، فلز سمی، کم‌آبی

مقدمه

کاربردِ لجن فاضلاب که به صورت محلی با فضولات دام و طیور مخلوط می‌شود و با هزینه نسبتاً کمی در دسترس است، در زمین‌های کشاورزی باعث بهبود چرخش مواد مغذی و آلی در خاک، کاهش غلظت CO_2 در جَو و افزایش سطح کربن آلی خاک می‌شود، حاصلخیزی همراه این روش در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک که با فرسایش و کاهش مواد آلی مواجه هستند، از اهمیت خاصی برخوردار است (۲). با این حال نگرانی‌هایی در مورد وجود فلزات سنگین ضروری و غیرضروری از جمله Cd، Cr، Cu، Ni، Pb و Zn وجود دارد که از منابع روان‌آب خانگی، صنعتی سبک، تجاری و شهری وارد محیط شده و می توانند منجر به آلودگی خاک و آب گردند و نهایتا از طریق جذب، انتقال و تجمع در گیاهان زراعی و غیرزراعی وارد زنجیره غذایی شوند و خطراتی را برای سلامتی انسان و حیوانات ایجاد کنند (۴۳ و ۴۸). بنابراین میزان جذب فلزات سنگین بالقوه سمی منتقل شده به گیاهان از اهمیت حیاتی برای ارزیابی ریسک و تنظیم محیط زیست برخوردار است (۵۵). ریشه‌ها در تماس مستقیم با محلول خاک هستند و مقدار غلظت فلزات سنگین در ریشه‌ها معمولاً به عنوان شاخص فراهمی زیستی فلزات خاک استفاده می‌شود (۱۹). انتقال فلزات سنگین از خاک به ریشه یک فرآیند پیچیده است که تحت تأثیر عوامل بی‌شماری از جمله خصوصیات خاک، شرایط محیطی، فیزیولوژی گیاه و بیوشیمی ریزوسفر قرار دارد.

۱- دانشجوی دکتری زراعت، گروه زراعت، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران و مربی، گروه علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mohsenmadahinasab@gmail.com)
۲، ۳ و ۴- به‌ترتیب استادان و دانشیار، گروه زراعت، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۵- استادیار، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه جیرفت، کرمان، ایران
DOI: 10.22067/JSW.2021.69271.1039

از بین خصوصیات خاک، pH، مواد آلی، اکسیدهای بی‌شکل، منگنز، محتوای کربنات کلسیم، کانی‌شناسی و بافت برای کنترل جذب فلزات سنگین شناسایی شده‌اند (۳۵). اما انتقال فلزات سنگین از ریشه به شاخساره گیاه توسط فیزیولوژی گیاه کنترل می‌شود (۳۶) و تا حد زیادی تعیین می‌کند که کدام بخش ممکن است به طور بالقوه وارد زنجیره غذایی شود (۵۵) در عین حال عوامل محیطی خاک، مثل رطوبت ممکن است روی این فرایند تاثیر بگذارند. روش‌های جلوگیری از انتقال فلزات سمی به زنجیره غذایی متنوع است اما علاوه بر روش‌های فیزیکی و شیمیایی، یک روش اصلی و کم‌هزینه برای جلوگیری از آلودگی فلزات سنگین در خاک و آب، جستجوی گیاهان خاصی است که قادر به این کار باشند (۱۰ و ۱۲). بعضی گیاهان از جذب این فلزات و انتقال آنها از ریشه به شاخساره ممانعت می‌نمایند، آنها اغلب اجتناب‌کننده بوده و اندوخته‌گرِ فلزات سنگین نیستند (۸) و در شرایط عادی و غلظت‌های معمول فلزات سنگین، آنها را وارد زنجیره غذایی نمی‌کنند (۱۸، ۲۲، ۵۵ و ۵۶). فرایندهای تثبیت گیاهی[1] روش‌های امید بخشی برای جذب، محصور شدن و عدم تحرک آلاینده‌ها در خاک به وسیله گیاهان می‌باشند. بعضی از گیاهان فلزات سنگین را در ریشه‌های خود تجمع می‌دهند اما به شاخساره منتقل نمی‌کنند. تحرک ماده آلاینده در خاک، رسوبات و لجن‌ها می‌تواند توسط جذب و انباشت به وسیله ریشه‌های این گیاهان، کاهش یابد (۵۱)، این گیاهان بعنوان تثبیت‌کننده فلزات در خاک مطرح هستند و از این طریق مانع انتشار فلزات سمی به زنجیره غذایی می‌شوند. از سویی استقرار مجدد گیاهان در این مناطق ممکن است به دلیل ایجاد سمیت گیاهی ناشی از مواد آلاینده، شرایط فیزیکی خاک، pH نامساعد، اقلیم خشک و فقدان مواد آلی، مشکل یا دارای ملاحظاتی باشد (۳۹). سرب که عموماً برای گیاهان سمی است، در شرایط طبیعی احتمالاً به دلیل تشکیل سولفات سرب در ریشه گیاهان تجمع نمی‌یابد. در میان اندوخته‌گرها گروه عجیبی از گیاهان وجود دارند که غلظت‌های بسیار زیادی از فلزات را جذب و در شاخساره خود ذخیره می‌کنند (۹) به این گیاهان بیش‌اندوز[2] گفته می‌شود (۱۵) و از این گیاهان به عنوان استخراج‌کننده فلزات سمی از خاک استفاده می‌شود. این روش می‌تواند موجب افزایش انتقال مواد آلوده‌کننده به بوم‌نظام بزرگتری شود بنابراین استفاده از این فرایند در صورتی مقدور است که زیست‌توده حاوی فلزات پس از برداشت منهدم شود یا در یک روش غیرخوراکی مورد استفاده قرار گیرد (۳۹). تحقیقات انجام شده در مورد پالایش گیاهی رو به گسترش است و بیشتر تحقیقات گیاه‌پالایی و مدیریت آلودگی خاک روی گیاهان غیرزراعی با ایجاد سطوح مصنوعی غلظت بالای فلزات در شرایط کنترل شده (۱۰، ۳۱، ۳۴، ۴۷ و ۵۱) یا در مناطق مرطوب اثر pH یا وجود ریزموجودات در محیط ریشه را بررسی کرده‌اند (۳، ۲۰، ۲۴، ۳۴، ۳۸، ۴۲، ۴۵، ۵۶ و ۵۸) ولی تحقیقات در خاک‌های مناطق گرم و خشک و روی گیاهان زراعی به منظور تولید پایدار غذا کمتر مورد توجه بوده است. لذا برای پایداری تولید غذا در خاک‌های زراعی این مناطق که با لجن فاضلاب تقویت می‌شوند، انجام تحقیقاتی پیرامون گونه‌های زراعی مناسب برای تثبیت گیاهی فلزات سنگین با ارزیابی خطر ورود فلزات سنگین به زنجیره غذایی، لازم و ضروری است. نظر به این که ایران کشوری خشک و نیمه خشک بوده و برای خاک‌های زیادی در آن از منابع کود حیوانی، توأم با لجن فاضلاب استفاده می‌شود و با در نظر گرفتن این مطلب که تنش کم‌آبی منجر به افزایش غلظت بعضی کاتیون‌ها در گیاه برای تنظیم اسمزی می‌شود، در این پژوهش، گیاه جو (*Hordeum vulgare* L.) که به طور گسترده‌ای در این مناطق کشت می‌شود و در زنجیره غذایی انسان و دام نقش بسزایی دارد، با هدف ارزیابی نقش افزایش تنش خشکی روی میزان برداشت این گیاه از فلزات سمی سرب و کروم خاک در شرایط مزرعه مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مکان اجرای آزمایش با مختصات ۲۸ درجه و ۳۸ دقیقه شمالی و ۵۷ درجه و ۴۳ دقیقه شرقی در استان کرمان و شهرستان جیرفت واقع است و دارای اقلیم گرم و خشک (طبق اقلیم نمای آمبرژه) می‌باشد. استفاده زیاد از کودهای حیوانی آغشته به لجن فاضلاب و وجود اراضی آلوده به فلزات سنگین در سطح گلخانه‌های سنتی این منطقه گزارش شده است (۴۴). با تعدادی نمونه‌گیری از گلخانه‌های سنتی منطقه، یکی از گلخانه‌های واقع در روستای کلرود در ۳ کیلومتری شهر جیرفت که خاک آن در ده سال اخیر با ترکیب‌های متنوعی از کود آلی و لجن فاضلاب غنی شده بود، جهت اجرای آزمایش انتخاب شد. آزمایش در تابستانِ سال‌های ۹۷ و ۹۸ در فضای آزاد (بدون پوشش) با سه سطح خشکی با آبیاری در (۱۰۰ (شاهد)، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) با روش گراویمتریک (۲۷) با تخصیص تصادفی سه کرت ۲×۲ برای هر سطح خشکی، اجرا شد. بذرهای جو (رقم جنوب) از بازاری محلی در شهر جیرفت به دست آمد. ۶ ردیف کشت بر اساس تراکم مطلوب جو (۳۰۰ بوته در متر مربع) (۳۳) در نظر گرفته شد. نهال‌های ده روزه جو برای آزمایش در شرایط مزرعه، در کرت‌ها کاشته‌شد و برای مدت ۶۰ روز رشد کرد. رژیم آبیاری بر اساس کم‌آبی تعیین شده برای هرکرت اختصاصی داده شد. هر ۱۰ روز یکبار علف‌های هرز داخل کرت‌ها حذف شدند و در نهایت در ۲۹ شهریور سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸گیاهان جو جمع‌آوری شدند.

1- Phytostabilization
2- Hyperaccumulator

نمونه‌برداری خاک از عمق ۲۰ سانتی‌متری هر کرت از چهار نقطه متفاوت به صورت تصادفی، یکبار در زمان استقرار و یکبار زمان برداشت گیاهان انجام و نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای اتاق خشک و غربال (۲ میلی‌متر) شدند. نمونه‌برداری گیاهی برای تعیین مقدار عناصر آن در زمان برداشت با خارج کردن بوته‌های تکی با ریشه انجام شد و نمونه‌ها بلافاصله پس از برداشت با آب مقطر شست و شو و پس از خشک شدن، به شاخساره (ساقه و برگ و خوشه‌های نارس) و ریشه تفکیک شدند و وزن خشک اندام‌ها بر حسب (gm^{-2}) اندازه‌گیری و ثبت شد. سپس آنها را در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت توسط آوند خشک کرده و پس از آسیاب با تجهیزات پلاستیکیِ عاری از فلز، توزین و آماده آنالیز نمودیم. اندازه‌گیری مقدار کروم و سرب در نمونه‌های خاک و گیاهی با استفاده از طیف‌سنجی اتمی با حالت شعله بعد از استخراج از طریق هضم در اسید انجام شد (۴). برای این منظور نمونه‌های ۱±۰٫۰۰۰۱ گرمی خاک و گیاه، بعد از هضم در ۲۰ میلی‌لیتر مخلوط سه اسید HNO_3، H_2SO_4 و $HClO$ (با نسبت حجمی ۵: ۱: ۱) بوسیله مایکروویو دایجسشن (مدل Transform 600)، با رعایت سایر استانداردهای EPA 3052 و پس از رسیدن سپانسیون همگن به رنگ شفاف، فیلتراسیون شدند و حجم آنها با استفاده از آب دوبار یون‌زدایی شده، به ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد و محلول‌های بدست آمده با دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی Trace 1800 کمپانی آرورا با روش شعله آنالیز شدند (۴) و غلظت کل عناصر سرب و کروم برحسب (mg kg^{-1}) ثبت شد. درستی و دقت روش هضم و تمام تجزیه و تحلیل‌های بعدی نیز با گنجاندن نمونه‌های خالی کنترل شد و شرایط و تنظیمات ابزارهای مورد استفاده به روشی که کارخانه سازنده بیان کرده بود، انجام شد. همچنین از محلول‌های سرب و کروم با غلظت‌های شناخته شده و استاندارد، برای کالیبره کردن دستگاه و تضمین دقت نتایج، استفاده شد.

برای سنجش قابلیت زیست‌فراهمی فلزات سنگین برای گیاهان، ضرایب انباشت و انتقال زیستی شاملِ فاکتور انباشت ریشه[1] ($\frac{C_3}{C_2}$)، فاکتور انباشت شاخساره[2] ($\frac{C_1}{C_2}$) و فاکتور انتقال[3] ($\frac{C_1}{C_3}$) به کار می‌روند که C_1 میانگین غلظت فلز در شاخساره و C_2 میانگین غلظت فلز در خاک اطراف ریشه و C_3 میانگین غلظت فلز در بافت ریشه است. گیاهانی که فاکتور انباشت ریشه بالاتر از یک و فاکتور انتقال پایین‌تر از یک دارند مناسب برای تثبیت گیاهی عناصر هستند درحالی‌که گیاهانی که فاکتور انباشت شاخساره و فاکتور انتقال برای آنها بزرگتر از یک و فاکتور انباشت ریشه کوچکتر از یک بدست آید برای استخراج گیاهی عناصر از خاک مناسب هستند (۱۶، ۲۴، ۲۵ و ۴۹). در این آزمایش ضریب رگرسیون خطی ساده پیرسون بین وزن خشک شاخساره با فاکتور انباشت شاخساره و وزن خشک ریشه با فاکتور انباشت ریشه و بین وزن خشک کل گیاه با فاکتور انتقال زیستی برآورد شد.

تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده بصورت اسپیلت پلات در طول سال‌ها در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن استفاده شد. تمام تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار $SPSS_{24}$ و نمودارهای مقایسه‌های میانگین با $EXCEL_{2019}$ انجام شد.

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل اجرای آزمایش قبل از کاشت جو در جدول ۱ نشان می‌دهند که pH خاک با دامنه‌ای از ۷/۳ تا ۸/۸، دارای پایه ضعیف قلیایی و میانگین ۸/۱ است و میانگین مقدار غلظت کل کروم در خاک در این زمان با ۳۹/۹۳ ($mg\ kg^{-1}$) در حدود ٪۳۴ بیشتر از سرب با میانگین غلظت ۲۶/۳۱ ($mg\ kg^{-1}$) است و هردو فلز در این خاک در محدوده مجاز خاک‌های کشاورزی هستند (۳۵).

بعد از برداشت جو، میانگین غلظت کل سرب در خاک با ٪۲۳ کاهش نسبت به قبل از برداشت، به ۲۰٫۲۳ ($mg\ kg^{-1}$) و کروم با ٪۱۷ کاهش نسبت به قبل از برداشت، به ۳۳ ($mg\ kg^{-1}$) رسید (جداول ۲ و ۳).

نتایج تجزیه واریانس نشان دادند که تأثیر سال آزمایش بر روی غلظت کل کروم در خاک و در شاخساره جو و فاکتورهای انباشت ریشه و شاخساره همین عنصر در سطح احتمال پنج درصد ($P<0.05$) معنی‌دار بود (جداول ۳ و ۴).

همچنین نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تاثیر خشکی بر وزن خشک شاخساره و ریشه، غلظت کل کروم در شاخساره و ریشه، غلظت کل سرب در شاخساره، فاکتور انباشت شاخساره سرب و کروم، فاکتور انباشت ریشه برای کروم و فاکتور انتقال سرب در سطح احتمال یک درصد ($P<0.01$) و فاکتور انتقال کروم در سطح احتمال پنج درصد ($P<0.05$) معنی‌دار بود ولی اثر متقابل سال و خشکی روی هیچکدام از صفات معنی‌دار نبود (جداول ۳ و ۴).

وزن خشک شاخساره و ریشه

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، وزن خشک شاخساره و ریشه با افزایش خشکی در تمام سطوح کاهش معنی‌دار داشت و در تیمار آبیاری در۵۰ درصد ظرفیت زراعی، وزن خشک شاخساره ۸۲٫۴

1- Root bioaccumulation factor (RBAF)
2- Shoot bioaccumulation factor (SBAF)
3- Translocation factor (TF)

درصد و وزن خشک ریشه ۷۴٫۷ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش نشان دادند و کاهش وزن خشک شاخساره بین ۶ تا ۱۰ درصد بیش از ریشه‌ها بود (شکل ۱). کاهش وزن خشک شاخساره، واکنش معمول بسیاری از گیاهان تحت اثر تنش خشکی است و برای جو نیز توسط محققین مختلف گزارش شده است (۶، ۱۳، ۱۷، ۳۲ و ۴۷) در حالی‌که برای وزن خشک ریشه جو گزارش‌ها متفاوت بوده، بدین ترتیب که در بعضی آزمایشات تفاوت معنی‌دار مشاهده نشده (۱۳) به استثنای مراحل پایانی رشد که تفاوت معنی‌دار مشاهده شده است (۴۰). کاهش وزن خشک شاخساره جو، برای استخراج گیاهی فلزات سنگین و کاهش وزن خشک ریشه برای تثبیت گیاهی و استخراج گیاهی صفات مطلوبی به حساب نمی‌آیند. نتایج یک بررسی در مورد گیاه بیش‌اندوزِ خردل هندی نشان داد که انباشت سرب از خاک آلوده، به عمق ۱۵ سانتی‌متر محدود شده بود و استخراج از اعماق ۱۵ تا ۴۵ سانتی‌متر چشمگیر نبود (۷ و ۱۸).

غلظت سرب و کروم درخاک و گیاه جو بعد از برداشت

تغییرات معنی‌دارِ میانگین غلظت کروم در سال دوم نسبت به سال اول، شامل ۳٫۶ درصد کاهش در خاک و ۱۰ درصد افزایش در شاخساره بود ($P < ۰٫۰۵$، جدول ۳ و جدول مقادیر میانگین در مقاله درج نشده). با وجود محیط بسیار پویای خاک زراعی در اطراف ریشه‌ها، تغییرات غلظت فلزات در مدت زمان کوتاه مورد انتظار نیست (۵).

جدول ۱- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل اجرای آزمایش تا عمق ۳۰ سانتی‌متری

Table 1- Physicochemical properties of the soil at the experiment site to a depth of 30 cm

آماره‌ها Statistics	بافت خاک Textural Class	سولفور SP (٪)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC_e (dS m^{-1})	نیتروژن کل Total nitrogen (٪)	فسفر در دسترس available phosphorus (mg kg^{-1})	پتاسیم در دسترس available potassium (mg kg^{-1})	کروم کل Total Chrome (mg kg^{-1})	سرب کل Total lead (mg kg^{-1})
میانگین Average	لومی شنی Sandy Loam	29	8.1	3.5	0.06	9	310	39.93	26.31
حداقل Min	شنی لومی Loamy – Sand	25	7.3	3.1	0.04	8	210	17	14.93
حداکثر Max	لومی Loam	33	8.8	3.9	0.08	11	380	45.66	34.38
حد مجاز در خاک کشاورزی (۳۵) Limit in agricultural soil								50–200	20–300

جدول ۲- آماره های توصیفی برای غلظت فلزات مورد مطالعه در خاک، ریشه و شاخساره گیاه جو بعد از شصت روز (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

Table 2- Descriptive statistics for the concentration of studied metals in soil, roots and shoots of barley after sixty days (mg kg^{-1})

آماره‌ها Statistics	غلظت کل در شاخساره Total concentration in shoots		غلظت کل در ریشه Total concentration in roots		غلظت کل درخاک Total soil concentration	
	کروم Chrome	سرب Lead	کروم Chrome	سرب Lead	کروم Chrome	سرب Lead
میانگین Average	4.61	1.61	25.35	12.22	33	20.23
میانه Median	4.63	1.4	22.00	11.95	32.77	19.94
انحراف استاندارد Standard deviation	0.57	1.24	6.99	2.68	1.12	5.48
حداقل Min	3.89	0.12	17.00	8.92	32	9.93
حداکثر Max	6	4	36.66	17.01	35	29.38

جدول ۳- تحلیل واریانس سال‌های آزمایش و سطوح خشکی بر وزن خشک ریشه و شاخساره و غلظت سرب و کروم در خاک، شاخساره و ریشه جو بعد از شصت روز

Table 3- Analysis of variance of years and drought levels on root and shoot dry weight and lead and chromium concentrations in soil, shoot and root of barley after sixty days

منابع تغییرات Sources of variation (S.O.V)	درجه آزادی df	وزن خشک Dry wight		غلظت کل کروم Total Chrome concentration		غلظت کل سرب Total lead concentration		غلظت کل درخاک Total concentration in soil	
		شاخساره Shoot (gm^{-2})	ریشه Root (gm^{-2})	ریشه Root ($mgkg^{-1}$)	شاخساره Shoot ($mgkg^{-1}$)	ریشه Root ($mgkg^{-1}$)	شاخساره Shoot ($mgkg^{-1}$)	کروم Chrome ($mgkg^{-1}$)	سرب Lead ($mgkg^{-1}$)
سال Year	1	0.001^{ns}	0.018^{ns}	41.52^{ns}	0.736^{*}	4.3^{ns}	0.003^{ns}	6.9^{*}	29.7^{ns}
سال × تکرار Year × Rep	4	0.001^{ns}	0.005^{ns}	$^{ns}23.5$	0.39^{ns}	2.56^{ns}	0.37^{ns}	0.148^{ns}	42.38^{ns}
خشکی Drought	2	0.918^{**}	0.589^{**}	295.19^{**}	1.083^{**}	1.36^{ns}	1.14^{**}	1.35^{ns}	6.9^{ns}
سال × خشکی Year × Drought	2	$8.8\times10^{-5\,ns}$	0.002^{ns}	9.67^{ns}	0.085^{ns}	0.65^{ns}	0.04^{ns}	2.9^{ns}	0.4^{ns}
خطا Error	8	0.0003	0.004	10.66	0.102	12.9	0.02	0.66	37.2
ضریب تغییرات (٪) CV		12.7	12.9	27.57	12.26	21.9	24.6	3.4	27

**و *به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار و ns عدم اختلاف معنی‌دار است. **and*: Significance at P<0.01 and P<0.05 respectively and ^{ns}: no significant difference.

نتایج واریانس وزن خشک ریشه و شاخساره براساس لگاریتم طبیعی داده‌ها بدست آمده است. Root and shoot dry weight were obtained based on the log x.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس سال‌های آزمایش و سطوح خشکی و اثر متقابل آنها بر فاکتور انباشت شاخساره، فاکتور انباشت ریشه و فاکتور انتقال زیستی

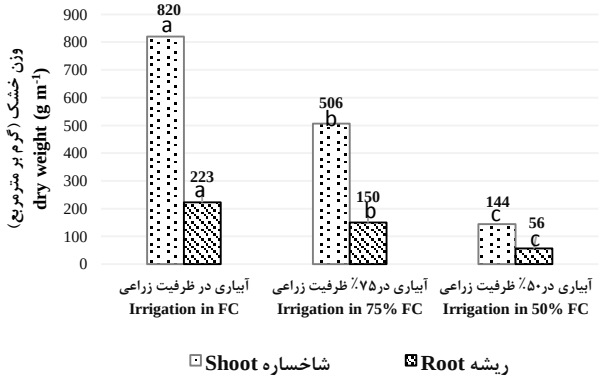
Table 4- Analysis of variance of years and drought on shoot bioaccumulation, root bioaccumulation and translocation factor

منابع تغییرات Sources of variation (S.O.V)	درجه آزادی df	فاکتور انتقال Translocation factor		فاکتور انباشت ریشه Root bioaccumulation factor		فاکتور انباشت شاخساره Shoot bioaccumulation factor	
		کروم Chrome	سرب Lead	کروم Chrome	سرب Lead	کروم Chrome	سرب Lead
سال Year	1	4.76^{ns}	0.002^{ns}	0.06^{*}	0.076^{ns}	0.001^{*}	0^{ns}
سال × تکرار Year × Rep	4	0.002^{ns}	0.006^{ns}	0.023^{ns}	0.043^{ns}	0.00^{ns}	0.002^{ns}
خشکی Drought	2	0.008^{*}	0.082^{**}	0.292^{**}	0.044^{ns}	0.001^{**}	0.023^{**}
سال × خشکی Year × Drought	2	0.001^{ns}	5.57^{ns}	0.005^{ns}	0.004^{ns}	0^{ns}	0.001^{ns}
خطا Error	8	0.001	0.003^{ns}	0.01	0.074	0.0001	0.001
ضریب تغییرات (٪) CV		21	26	28.57	35.38	13.75	25

**و *به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار و ns عدم اختلاف معنی‌دار است.

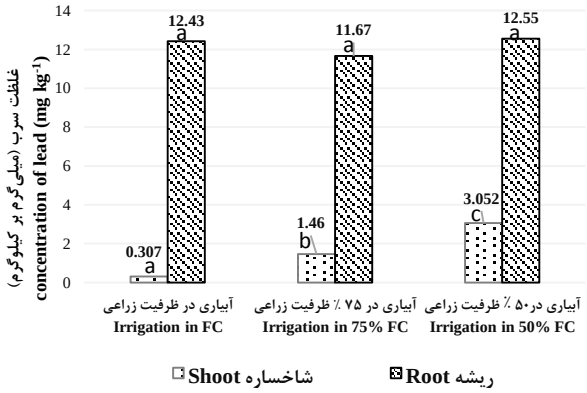
**and*: Significance at P<0.01 and P<0.05 respectively and ^{ns}: no significant difference.

حداقل غلظت فلزات سمی در بافت‌های فعال در حال رشد شاخساره جو که منجر به کاهش عملکرد می‌شود، در مرحله پنج برگی با استفاده از آزمایشات کشت شن و ماسه در گلخانه برای کروم ۱۰ ($mg\,kg^{-1}$) و برای سرب ۳۵ ($mg\,kg^{-1}$) مشخص شده است (۲۲). در آزمایش ما بالاترین غلظت کروم در شاخساره ۵٫۰۸ ($mg\,kg^{-1}$) در آبیاری در ظرفیت زراعی و بالاترین غلظت سرب ۳٫۰۵۲ ($mg\,kg^{-1}$) در آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی بدست آمد که هر دو کمتر از سطوح سمیت بحرانی بودند، این وضعیت را می‌توان به رطوبت و pH (۷٫۷) خاک مورد آزمایش نسبت داد (۲۵ و ۵۳).



شکل ۱- تأثیر خشکی بر وزن خشک شاخساره و ریشه جو

Figure 1- Effect of drought on dry weight of shoots and roots of barley



شکل ۲- تأثیر خشکی بر غلظت سرب در شاخساره و ریشه جو

Figure 2- Effect of drought levels on lead concentration in shoots and roots of barley

در این آزمایش غلظت کروم هم در شاخساره و هم در ریشه بیش از سرب بدست آمد که با گزارشات گذشته مانند (۲۴) و (۵۵) و (۴۷) مطابقت داشت و مقایسه میانگین‌های غلظت عناصر مورد مطالعه در ریشه‌ها و شاخساره برداشت شده جو نشان داد که در همه موارد غلظت این عناصر در ریشه‌ها بیشتر از شاخساره بود (شکل‌های ۲ و ۳). این برمی‌گردد به یک مکانیزم در ریشه گیاه که انتقال سرب و کروم را به زنجیره غذایی از طریق یک به اصطلاح سدِ ریشه‌ای، محدود می‌کند (۱ و ۱۱).

با افزایش تنش خشکی، در غلظت سرب در ریشه تفاوت معنی‌داری دیده نشد (شکل ۲). بنظر می‌رسد کاهش همزمان وزن خشک ریشه و مقدار سرب در ریشه باعث شده غلظت سرب در ریشه کاهش معنی‌داری نداشته باشد. این توجیه با توجه به گزارش رسوب سرب در دیواره سلولی ریشه‌ها به شکل نامحلول و غیرکریستالی در شرایط رشد بهینه که در مورد ذرت بصورت فسفات سرب تشخیص داده شده است (۵)، پذیرفتنی است. مدل رگرسیونی رابطه بین وزن خشک ریشه و فاکتور انباشت ریشه سرب نیز این نتیجه را تایید می‌کند (شکل ۹). از سویی مشاهده شد که با افزایش تنش خشکی، غلظت سرب در شاخساره گیاه افزایش یافت، بطوری‌که بین تمام سطوح تنش خشکی تفاوت معنی‌دار داشت و بالاترین مقدار آن در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی بدست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۹ برابر بیشتر بود (شکل ۲). روشن است که این افزایش مربوط به اثر تغلیظ است اما تغییرات غلظت سرب در ریشه و شاخساره گیاه جو تحت اثر کم‌آبی، قبل از اینکه به زیست فراهمی آن در خاک بستگی داشته باشد، به فیزیولوژی انتقال سرب در گیاه وابسته است بنابراین دور از انتظار نیست که با بالا رفتن غلظت فلز در شاخساره، گیاه برای ایجاد یک به اصطلاح سد ریشه‌ای (۱ و ۱۱)، در یک فرایند زوال فیزیولوژیک ناشی از کم‌آبی، ظرفیت‌های جدیدی را درگیر توقف و تجمیع سرب کرده باشد. گیاهان با استفاده از مکانیزم‌های اجتنابی مانند اتصال آلاینده‌ها به دیواره سلول‌هایشان یا ذخیره در محفظه واکوئلار، آنها را از مکان‌های مهمی که در سلول وجود دارد، دور می‌کنند تا تحمل خود به فلزات سنگین را افزایش دهند و تصور می‌شود در ریشه ظرفیت‌هایی برای اتصال فلزات سنگین وجود داشته

باشد (۱۶، ۲۴، ۴۶ و ۶۰). بررسی منابع علمی نیز نشان داده که میزان انتقال سرب، به وضعیت فیزیولوژیکی گیاه بستگی دارد (۳۷). پاسکوال و همکاران (۴۷) در یک آزمایش روی گیاه چچم[1] مشاهده کردند که غلظت سرب شاخساره، تحت اثر کم‌آبی افزایش یافت، آنها گزارش کردند که این شرایط برای سرب نمی‌تواند به تغییر زیست‌فراهمی این عنصر در شرایط کم‌آبی مرتبط باشد. همچنین در تحقیقات دیگری نیز مشاهده شده که هیچ کدام از شاخص‌های مقدار سرب کل، سرب محلول یا سرب آزاد در محلول برای پیش‌بینی مقدار جذب سرب توسط گیاه رضایت‌بخش نبودند (۵ و ۲۸).

با افزایش تنش خشکی، از غلظت کروم در شاخساره و ریشه گیاه جو کاسته شد اما این کاهش در ریشه محسوس تر بود، بطوری‌که از۳۲,۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد با ۴۳,۵ درصد کاهش به ۱۸,۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی رسید (شکل ۳). در شاخساره، بین تیمار شاهد و تیمار آبیاری در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، کاهش غلظت کروم معنی‌دار بود ولی تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی با سطح قبلی کم‌آبی تفاوت معنی‌دار نداشت (شکل ۳). با توجه به رفتار کروم در خاک، بنظر می‌رسد، این وضعیت به خصوصیات این فلز در خاک و زیست‌فراهمی آن برای گیاه وابسته است. می‌توان گفت بدلیل ویژگی‌های یونی کروم، این فلز بشدت توسط فاز جامد خاک نگهداری می‌شود و معمولا بصورت محلول و پویا نیست (۵۲) و با خشک‌تر شدن خاک، توانایی گیاه در جذب آن کاهش می‌یابد. خاک‌های سرپانتینی به داشتن مقادیر بالای نیکل و کروم معروف هستند، در این خاک‌ها تاکنون بیش از ۴۰۰ گونه بیش‌اندوز نیکل شناسایی شده (۱۴، ۲۶ و ۵۰) اما تا بحال گیاهان بیش‌اندوز کروم در آنها شناسایی نشده است (۲۱، ۲۶ و ۵۰) که این احتمالا بدلیل حلالیت کم کروم در این خاک‌هاست که سریع از دست دادن آب و خشکی، یکی دیگر از ویژگی‌های آنهاست (۵).

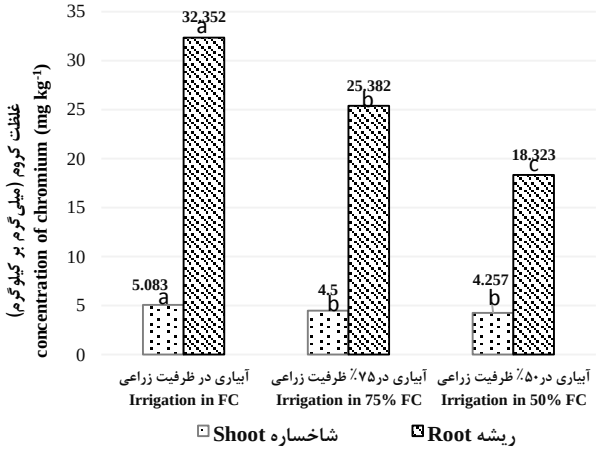
ضرایب انباشت و انتقال زیستی

بیشترین مقدار فاکتور انباشت شاخساره برای سرب در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (۰,۱۴۶) و کمترین آن در تیمار شاهد (۰,۰۲۳) به دست آمد و بین تمام سطوح خشکی تفاوت معنی‌دار مشاهده شد، بطوری‌که در تیمار آبیاری در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، نسبت به شاهد ۲,۳ برابر شد و در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، ۹۲ درصد نسبت به سطح قبل افزایش یافت (شکل ۴). فاکتور انباشت شاخساره جو برای کروم با کم‌آبی خاک کاهشی بود و فقط بین تیمار شاهد و تیمارهای خشکی تفاوت معنی‌دار داشت در حالی‌که بین دو تیمار خشکی تفاوت معنی‌داری نبود و بیشترین مقدار آن در تیمار شاهد (۰,۱۵۶) و کمترین آن در تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (۰,۱۲۷) به دست آمد. در این آزمایش میانگین فاکتور انباشت شاخساره برای هر دو عنصر مورد مطالعه در تمام تیمارها پایین تر از یک بدست آمد (شکل ۴).

میانگین‌های فاکتور انباشت ریشه کروم در بین تمام سطوح خشکی اختلاف معنی‌دار داشت، بنحوی‌که با بالارفتن سطح خشکی، از فاکتور انباشت ریشه کروم کاسته شد و بالاترین میانگین برای آن در تیمار شاهد (۰,۹۹) بدست آمد و کمترین آن با ۵۰ درصد کاهش در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (۰,۵۴۷) بدست آمد. در این آزمایش میانگین فاکتور انباشت ریشه برای هر دو عنصر مورد مطالعه در تمام تیمارها پایین تر از یک بدست آمد (شکل ۵).

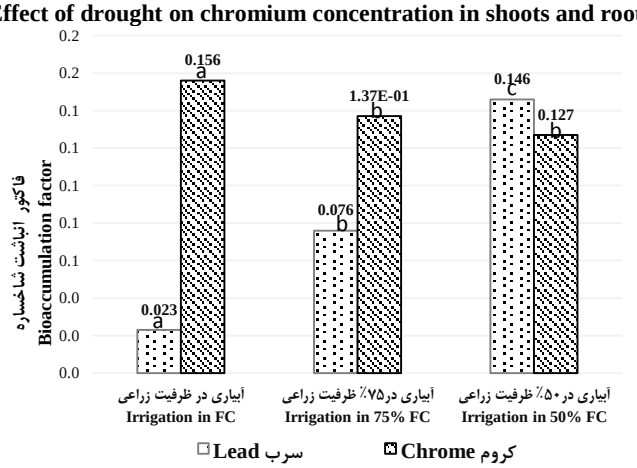
با بالا رفتن خشکی، بیشترین مقدار میانگین فاکتور انتقال سرب در آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (۰,۲۶) بدست آمد. این فاکتور برای کروم نیز افزایشی بود ولی بین فاکتور انتقال در تیمار شاهد و تیمار آبیاری در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد در حالی‌که فاکتور انتقال در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه، افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد و تیمار آبیاری در ۷۵٪ ظرفیت زراعی داشت. در این آزمایش میانگین فاکتور انتقال برای برای هر دو عنصر مورد مطالعه در تمام تیمارها پایین تر از یک بدست آمد (شکل ۶). پایینتر از یک بودن تمام ضرایب انباشت و انتقال زیستی در این مطالعه، جو را گیاهی اجتناب کننده نسبت به سرب و کروم نشان می‌دهد (۴۱) که برای تثبیت و استخراج گیاهی سرب و کروم مناسب نیست. ویژگی اصلی بیش‌انباشتگرهای فلز، انتقال موثر فلز از ریشه به شاخه‌ها است که با TF بزرگتر از یک مشخص می‌شود (۵۹). این وضعیت جو از نظر عدم انتقال این فلزات به زنجیره غذایی در شرایط کم‌آبی امید بخش است چرا که در شرایط کم‌آبی، ریشه بعضی از گیاهان برای تعادل اسمزی یون‌های فلزی را وارد می‌کنند در حالی‌که تولید کربوهیدرات‌ها و متابولیت‌ها نیز از راهبردهای دیگر برای ایجاد تعادل اسمزی در ریشه هستند (۲۳) و افزایش محتوای این قندها تحت آلودگی کادمیوم در گیاه جو گزارش شده است (۲۹). افزایش معنی‌دار فاکتور انباشت شاخساره برای سرب و کاهش فاکتور انباشت ریشه برای کروم و افزایش فاکتور انتقال برای هر دو عنصر سرب و کروم، تحت تاثیر کم‌آبی، نشان داد که با افزایش میزان خشکی، استراتژی گیاه جو، افزایش انتقال سرب به شاخساره است، این در حالی است که غلظت سرب در ریشه تحت تاثیر قرار نگرفته. این داده‌ها مطابق با نتایج سایر نویسندگان (۵ و ۴۷) تایید می‌کنند که در ورود و توزیع سرب در گیاه جو، سازوکارهای فیزیولوژیکی گیاه و در مورد کروم کاهش زیست‌فراهمی آن، دست بالاتر را داشته‌اند.

۱- گیاه چچم با نام علمی (*Lolium multiflorum Lam.*) که به نام گیج‌دانه نیز معروف است (محتملا به علت خاصیت سمی آن)، بومی آسیا و شمال آفریقا بوده و از خانواده‌ی گرامینه یا گندمیان می‌باشد.



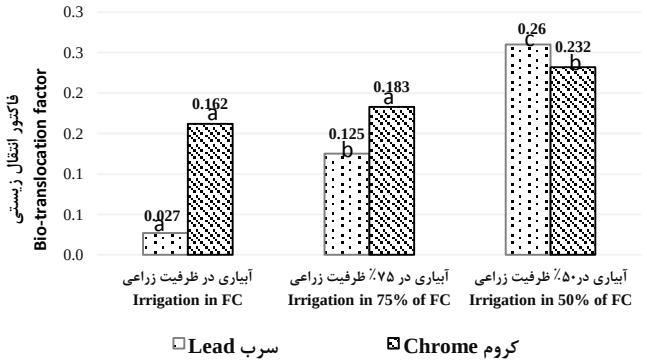
شکل ۳- تأثیر خشکی بر غلظت کروم در شاخساره و ریشه جو

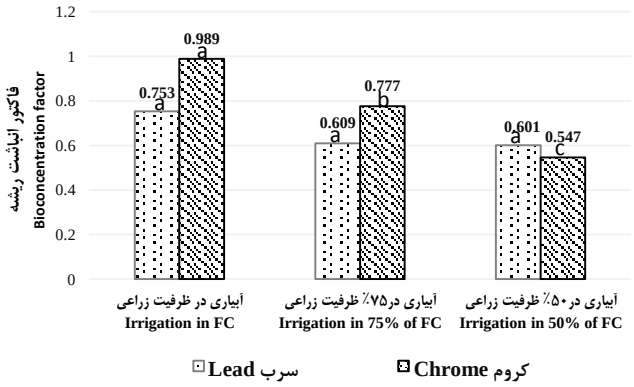
Figure 3- Effect of drought on chromium concentration in shoots and roots of barley



شکل ۴- تاثیر خشکی بر فاکتور انباشت شاخساره برای سرب و کروم در جو

Figure 4- Effect of drought on shoot bioaccumulation factor of lead and chromium in barley





شکل ۵- تأثیر خشکی بر فاکتور انباشت ریشه سرب و کروم در جو

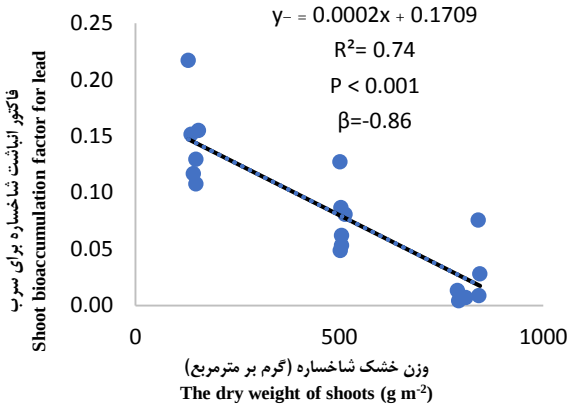
Figure 5- Effect of drought on root bioaccumulation factor of lead and chromium in barley

شکل ۶- تأثیر خشکی بر فاکتور انتقال زیستی سرب و کروم در جو

Figure 6- Effect of drought on the bio-translocation factor of lead and chromium in barley

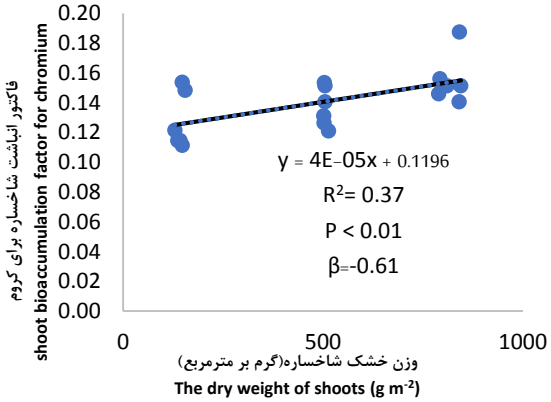
روابط بین وزن خشک و ضرایب انباشت و انتقال زیستی

روابط بین وزن خشک و ضرایب انباشت و انتقال زیستی سرب و کروم به درک تاثیر کم‌آبی روی غلظت آنها در ریشه و شاخساره گیاه کمک می‌کنند. فاکتور انباشت شاخساره برای سرب با افزایش وزن خشک شاخساره بصورت خطی کاهش یافت (β= −۰,۸۶)، (R^2=۰,۷۴)، (P<۰,۰۰۱)، (شکل ۷) اما فاکتور انباشت شاخساره برای کروم افزایش یافت (β= ۰,۶۲)، (R^2=۰,۳۷)، (P <۰,۰۱)، (شکل ۸). وزن خشک ریشه فاکتور انباشت ریشه برای سرب را پیش‌بینی نکرد (شکل ۹) اما فاکتور انباشت ریشه برای کروم را با ضریب رگرسیونی استاندارد شده (β) برابر با ۰,۸۵ و با جهت مثبت پیش‌بینی کرد (R^2=۰,۷۲)، (P <۰,۰۰۱)، (شکل ۱۰). مدل رگرسیونی وزن خشک کل گیاه توانست ۷۹ درصد از واریانس فاکتور انتقال سرب را تبیین کند و آنرا با ضریب رگرسیونی استاندارد شده ۰,۸۹− پیش‌بینی کند (P<۰,۰۰۱)، (شکل ۱۱). مدل رگرسیونی وزن خشک کل گیاه همچنین توانست ۴۵ درصد از واریانس فاکتور انتقال کروم را تبیین کند و با ضریب رگرسیونی استاندارد شده ۰,۶۷− پیش‌بینی کند (P<۰,۰۱)، (شکل ۱۲).



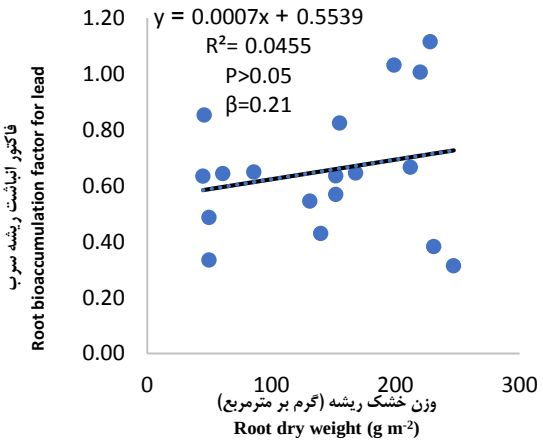
شکل ۷- رابطه بین وزن خشک شاخساره و فاکتور انباشت شاخساره سرب

Figure 7- Relationship between shoot dry weight and shoot bioaccumulation factor for lead



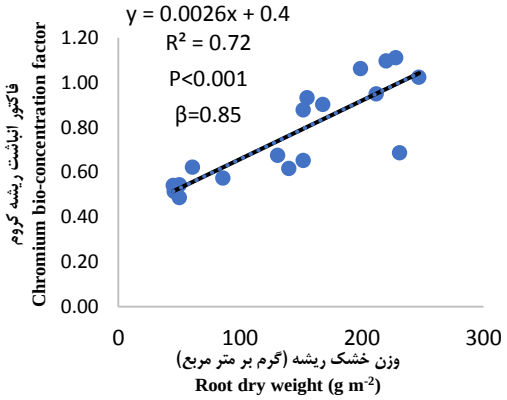
شکل ۸- رابطه بین وزن خشک شاخساره و فاکتور انباشت شاخساره کروم

Figure 8- Relationship between shoots dry weight and shoot bioaccumulation factor for chromium



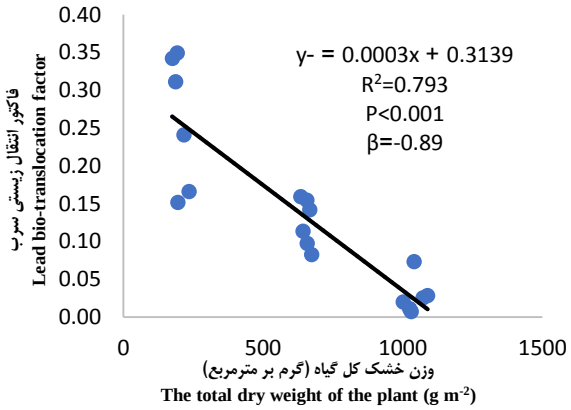
شکل ۹- رابطه بین وزن خشک ریشه و فاکتور انباشت ریشه سرب

Figure 9- Relationship between root dry weight and root bioaccumulation factor for lead



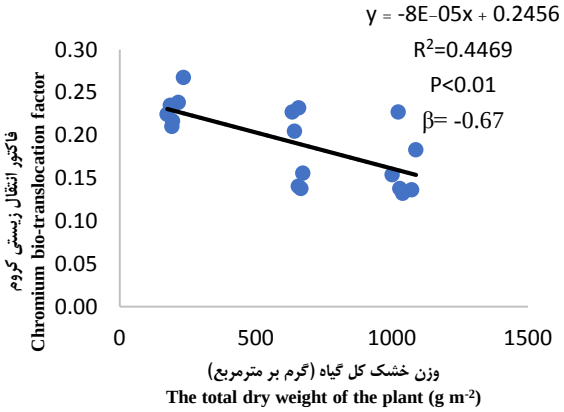
شکل ۱۰- رابطه بین وزن خشک ریشه و فاکتور انباشت ریشه کروم

Figure 10- Relationship between root dry weight and root bioaccumulation factor of chromium



شکل ۱۱- رابطه بین وزن خشک کل گیاه و فاکتور انتقال سرب

Figure 11- Relationship between total plant dry weight and lead bio-translocation factor



شکل ۱۲- رابطه بین وزن خشک کل گیاه و فاکتور انتقال کروم

Figure 12- Relationship between total plant dry weight and chromium translocation factor

رابطه بین وزن خشک شاخساره و فاکتور انباشت شاخساره سرب و رابطه بین وزن خشک کل گیاه با فاکتور انتقال سرب با استفاده از گزارش‌هایی قابل توجیه است که بر تداخل سرب با عاملی دلالت دارند که مستقیماً در افزایش طول سلول با درگیری آنزیم‌های خاص در دیواره و ATPase مرتبط با پلاسمالما نقش دارد (۵۴) و ممکن است در شرایط خشکی افزایش غلظت سرب در سلول در اختلال در فتوسنتز و متابولیسم نیتروژن شرکت داشته باشد و تولید زیست توده را کاهش دهد (۴۹ و ۵۷). مدل رگرسیونی برازش شده برای فاکتور انباشت ریشه کروم درصد بالاتری از واریانس آن را نسبت به فاکتور انباشت شاخساره برازش کرد، بنابراین افزایش وزن خشک ریشه برای برداشت کروم از خاک تعیین کننده‌تر از افزایش وزن خشک شاخساره است، این مطلب با توجه به فرمول محاسبه فاکتور انباشت ریشه و با توجه به کم‌تحرکی کروم در خاک قابل توجیه است و گیاه جو در صورت توسعه بیشتر ریشه می‌تواند مقادیر بالاتری از کروم را از خاک برداشت کند (۵ و ۵۲). با افزایش وزن خشک کل گیاه، فاکتور انتقال سرب و کروم بصورت خطی کاهش یافتند، به این معنی که تخصیص این دو فلز به شاخساره کمتر شد. به نظر می‌آید که با افزایش رشد گیاه جو، بدلیل تحرک کم این دو عنصر در گیاه، مقادیر بیشتری از این دو فلز در ریشه باقی ماند (۵ و ۵۲). این موضوع برای سرب که در گیاه تحرک کمتری دارد مشهودتر بود (۳۷). یافته‌هایی نیز مبنی بر افزایش میزان سرب همراه با سدیم و فلزات سمی در برگ‌ها در دوران پیری و کاهش رشد نیز وجود دارند (۳۰) که می‌توان آنرا به زوال فیزیولوژیک گیاه، تحت تاثیر کم‌آبی ربط داد (۳۶).

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت ایمنی غذا، داشتن مقادیر فلزات سنگین در قسمت‌های قابل مصرف گیاه، به عنوان یک عامل محدود کننده برای استفاده از بسیاری از خاک‌های کشاورزی عمل می‌کند. یافته‌های این مطالعه نشان داد که هر دو فلز مورد بررسی در شاخساره‌های گیاهان جو که در خاک‌هایی با کم‌آبی رشد داده شده بودند، کمتر از حد در نظر گرفته شده از نظر سمیت گیاهی بودند هرچند این احتمال وجود دارد که قرار گرفتن خاک مورد مطالعه در محدوده مجاز خاک‌های کشاورزی از نظر غلظت این فلزات، در بوجود آمدن این شرایط موثر بوده است ولی با افزایش سطح خشکی، مقدار سرب در شاخساره افزایش یافت اما این افزایش تا حد ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مشکلی از بابت سطوح بالای سرب در شاخساره ایجاد نکرد و توسعه سطح خشکی به بیش از ۵۰ درصد هم در حال حاضر محصول اقتصادی به دنبال نخواهد داشت بنابراین بررسی سطوح بالاتر خشکی پیشنهاد نمی‌شود. همچنین مدل رگرسیونی روابط بین وزن خشک و ضرایب انباشت و انتقال زیستی سرب و کروم نشان داد که با افزایش وزن خشک کل گیاه در شرایط تامین آب کافی، بدلیل تحرک کم این دو عنصر در گیاه، مقادیر بیشتری از این دو فلز در ریشه باقی می‌ماند درحالیکه با کاهش وزن خشک، همراه با زوال فیزیولوژیک گیاه تحت تاثیر خشکی، غلظت این دو فلز در شاخساره افزایش می‌یابد. در این آزمایش ضرایب انباشت و انتقال زیستی مورد مطالعه همگی کمتر از یک بدست آمدند، بنابراین گیاه جو زراعی نسبت به سرب و کروم موجود در خاک، گیاهی اجتناب کننده است و در شرایط کم‌آبی فزاینده در مزرعه، این فلزات سمی را به زنجیره غذایی انتقال نمی‌دهد.

سپاسگزاری

ضمن تشکر و قدردانی از اساتید محترم راهنما و مشاور و گروه زراعت دانشگاه زابل، بخشی از هزینه اجرای این آزمایش از محل اعتبار UOZ-GR-9618-25 دانشگاه زابل تامین شده است.

منابع

1- Adriano DC. 2001. Arsenic. p. 219-261. Trace elements in terrestrial environments. 2 ed. Springer. Verlag New York.

2- Albaladejo J., Ortiz R., Garcia-Franco N., Navarro AR., Almagro M., Pintado JG, et al. 2013. Land use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain. Journal of Soils and Sediments 13(2): 265-277.

3- Ali S., Abbas Z., Rizwan M., Zaheer IE., Yavaş İ., Ünay A., et al. 2020. Application of Floating Aquatic Plants in Phytoremediation of Heavy Metals Polluted Water: A Review. Sustainability 12(5): 1927.

4- Allen SE. 1989.Chemical analysis of ecological materials. Boston : Blackwell Scientific Publications, USA.

5- Alloway BJ. 2013.Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. 3 ed. Springer, Netherlands. XVIII, 614 p.

6- Anjum SA., Xie X-y., Wang L-C., Saleem MF., and Man Cand Lei W. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. African Journal of Agricultural Research 6(9): 2026-2032.

7- Augustine Chioma Aand Ezerie Henry E, editors. 2020. Handbook of Research on Resource Management for Pollution and Waste Treatment IGI Global: Hershey, PA, USA.

8- Baker AJM. 1981. Accumulators and excluders -strategies in the response of plants to heavy metals. Journal of Plant Nutrition 3(1-4): 643-654.

9- Baker AJM., McGrath S., Reeves RD., and Smith JAC. 2000. Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. p. 85-107. In: Terry Nand Bañuelos G. Phytoremediation of contaminated soil and water. 1st Edition ed. CRC Press. Boca Raton, Florida.

10- Bańuelos GS., Cardon GE., Phene CJ., Wu L., Akohoue S., and Zambrzuski S. 1993. Soil boron and selenium removal by three plant species. Plant and Soil 148(2): 253-263.

11- Basta N., Ryan J., and Chaney R. 2005. Trace element chemistry in residual-treated soil: Key concepts and metal bioavailability. Journal of Environmental Quality 34(1): 49-63.

12- Ben-Asher J. 1994. Simplified Model of Integrated Water and Solute Uptake by Salts- and Selenium-Accumulating Plants. Soil Science Society of America Journal 58(4): 1012-1016.

13- Boudiar R., Casas AM., Gioia T., Fiorani F., Nagel KA., and Igartua E. 2020. Effects of Low Water Availability on Root Placement and Shoot Development in Landraces and Modern Barley Cultivars. Agronomy 10(1): 134.

14- Brooks RR. 1987.Serpentine and its vegetation: a multidisciplinary approach. Dioscorides Press.

15- Brooks RR., Lee J., Reeves RD., and Jaffre T. 1977. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. Journal of Geochemical Exploration 7: 49-57.

16- Brunetti G., Farrag K., Rovira PS., Nigro F., and Senesi N. 2011. Greenhouse and field studies on Cr, Cu, Pb and Zn phytoextraction by Brassica napus from contaminated soils in the Apulia region, Southern Italy. Geoderma 160(3): 517-523.

17- Cai K., Chen X., Han Z., Wu X., Zhang S., Li Q, et al. 2020. Screening of Worldwide Barley Collection for Drought Tolerance: The Assessment of Various Physiological Measures as the Selection Criteria. Frontiers in Plant Science 11(1159).

18- Cecchi L., Španiel S., Bianchi E., Coppi A., Gonnelli C., and Selvi F. 2020. *Odontarrhena stridii* (Brassicaceae), a new Nickel-hyperaccumulating species from mainland Greece. Plant Systematics and Evolution 306(4): 69.

19- Chaignon V., Sanchez-Neira I., Herrmann P., Jaillard B., and Hinsinger P. 2003. Copper bioavailability and extractability as related to chemical properties of contaminated soils from a vine-growing area. Environmental Pollution 123(2): 229-238.

20- Chetri BK. 2020. Phytoremediation: Role of Mycorrhiza in Plant Responses to Stress. p. 125-143. Restoration of Wetland Ecosystem: A Trajectory Towards a Sustainable Environment. Springer.

21- Chiarucci A. 2003. Vegetation ecology and conservation on *Tuscan ultramafic* soils. The Botanical Review 69(3): 252-268.

22- Davis RD., Beckett PHT., and Wollan E. 1978. Critical levels of twenty potentially toxic elements in young spring barley. Plant and Soil 49(2): 395-408.

23- Dubey RS. 1996. Photosynthesis in plants under stressful conditions. Handbook of Photosynthesis 859-875.

24- Eid EM., Khedher KM., Ayed H., Arshad M., Mouldi A., Shaltout KH, et al. 2020. Prediction models based on soil properties for evaluating the heavy metal uptake into *Hordeum vulgare* L. grown in agricultural soils amended with different rates of sewage sludge. International Journal of Environmental Health Research 1-15.

25- Eid EM., and Shaltout KH. 2016. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by nine native plant species grown at a sewage sludge dump site. International Journal of Phytoremediation 18(11): 1075-1085.

26- Gambi OV. 1992. The distribution and ecology of the vegetation of ultramafic soils in Italy. p. 217-247. In: Roberts BA., and Proctor J. The Ecology of Areas with Serpentinized Rocks: A World View. Springer Netherlands. Dordrecht.
27- Gardner WH. 1986. Water content. Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods 5: 493-544.
28- Ge Y., Murray P., and Hendershot WH. 2000. Trace metal speciation and bioavailability in urban soils. Environmental Pollution 107(1): 137-144.
29- Gubrelay U., Agnihotri RK., Singh G., Kaur R., and Sharma R. 2013. Effect of heavy metal Cd on some physiological and biochemical parameters of Barley (*Hordeum vulgare* L.). International Journal of Agriculture and Crop Sciences 5(22): 2743.
30- Guha MM., and Mitchell RL. 1966. The trace and major element composition of the leaves of some deciduous trees. Plant and Soil 24(1): 90-112.
31- Guo T-R., Zhang G-P., Zhou M-X., Wu F-B., and Chen J-X. 2007. Influence of Aluminum and Cadmium Stresses on Mineral Nutrition and Root Exudates in Two Barley Cultivars Pedosphere 17(4): 505-512.
32- H. Samarah N. 2005. Effects of drought stress on growth and yield of barley. Agronomy for Sustainable Development 25(1): 145-149.
33- Hauggaard-Nielsen H., Andersen MK., Jornsgaard B., and Jensen ES. 2006. Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea–barley intercrops. Field Crops Research 95(2): 256-267.
34- Hou D., O'Connor D., Igalavithana AD., Alessi DS., Luo J., Tsang DCW, et al. 2020. Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. Nature Reviews Earth & Environment 1(7): 366-381.
35- Kabata-Pendias A. 2010.Trace Elements in Soils and Plants. Fourth ed. CRC Press.
36- Kalis EJ., Temminghoff EJ., Town RM., Unsworth ER., and van Riemsdijk WH. 2008. Relationship between metal speciation in soil solution and metal adsorption at the root surface of ryegrass. Journal of Environmental Quality 37(6): 2221-2231.
37- Koeppe DE. 1977. The uptake, distribution, and effect of cadmium and lead in plants. Science of The Total Environment 7(3): 197-206.
38- Kuiper I., Lagendijk EL., Bloemberg GV., and Lugtenberg BJJ. 2004. Rhizoremediation: A Beneficial Plant-Microbe Interaction. Molecular Plant-Microbe Interactions 17(1): 6-15.
39- Lambers H., and Oliveira RS. 2019.Plant Physiological Ecology. Springer International Publishing.
40- Lawlor DW., Day W., Johnston AE., Legg BJ., and Parkinson KJ. 1981. Growth of spring barley under drought: crop development, photosynthesis, dry-matter accumulation and nutrient content. The Journal of Agricultural Science 96(1): 167-186.
41- Ma LQ., Komar KM., Tu C., Zhang W., Cai Y., and Kennelley ED. 2001. A fern that hyperaccumulates arsenic. Nature 409(6820): 579-579.
42- Ma Y., Rajkumar M., Zhang C., and Freitas H. 2016. Inoculation of *Brassica oxyrrhina* with plant growth promoting bacteria for the improvement of heavy metal phytoremediation under drought conditions. Journal of Hazardous Materials 320: 36-44.
43- McBride MB. 2003. Toxic metals in sewage sludge-amended soils: has promotion of beneficial use discounted the risks? Advances in Environmental Research 8(1): 5-19.
44- Mohammadi Sand Taii J. 2015. Exploring the possibility of soil contamination in the production of greenhouse cucumber to the health risks of heavy metals and its products in Jirof. Jiroft: Jiroft University.
45- Ordonez LR. 2016. Phytoremediation Potential of California Native Wetland Plants: Linking Microbial Activity and Native Plants to Remediation of Heavy Metals. ProQuest: San Diego State University.
46- Pal R., and Kundu R. 2016. Risk Assessment of Some Selected Vegetables Grown in Metal Contaminated Soil Supplements. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences 86(3): 585-593.
47- Pascual I., Antolín MC., García C., Polo A., and Sánchez-Díaz M. 2004. Plant availability of heavy metals in a soil amended with a high dose of sewage sludge under drought conditions. Biology and Fertility of Soils 40(5): 291-299.
48- Peralta-Videa JR., Lopez ML., Narayan M., Saupe G., and Gardea-Torresdey J. 2009. The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: implications for the food chain. The International Journal of Biochemistry & Cell Biology 41(8-9): 1665-1677.
49- Rezvani Mand Zaefarian F. 2011. Bioaccumulation and translocation factors of cadmium and lead in' *Aeluropus littoralis*'. Australian Journal of Agricultural Engineering 2(4): 114.
50- Robinson BH., Brooks RR., Kirkman JH., Gregg PEH., and Varela Alvarez H. 1997. Edaphic influences on a New *Zealand ultramafic* ("serpentine") flora: a statistical approach. Plant and Soil 188(1): 11-20.

51- Saravanan A., Jeevanantham S., Narayanan VA., Kumar PS., Yaashikaa PR., and Muthu CMM. 2020. Rhizoremediation – A promising tool for the removal of soil contaminants: A review. Journal of Environmental Chemical Engineering 8(2): 103543.
52- Seigneur C., and Constantinou E. 1995. Chemical Kinetic Mechanism for Atmospheric Chromium. Environmental Science & Technology 29(1): 222-231.
53- Singh RP., and Agrawal M. 2007. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of *Beta vulgaris* plants. Chemosphere 67(11): 2229-2240.
54- Sinha P., Dube BK., Srivastava P., and Chatterjee C. 2006. Alteration in uptake and translocation of essential nutrients in cabbage by excess lead. Chemosphere 65(4): 651-656.
55- Soriano-Disla JM., Gómez I., Navarro-Pedreño J., and Jordán MM. 2014. The transfer of heavy metals to barley plants from soils amended with sewage sludge with different heavy metal burdens. Journal of Soils and Sediments 14(4): 687-696.
56- Tiwari S., Singh. SN., and Garg. SK. 2013. Induced phytoremediation of metals from fly ash mediated by plant growth promoting rhizobacteria. Journal of Environmental Biology 34(4): 10.
57- Uveges JL., Corbett AL., and Mal TK. 2002. Effects of lead contamination on the growth of *Lythrum salicaria* (purple loosestrife). Environmental Pollution 120(2): 319-323.
58- Weis JS., and Weis P. 2004. Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration. Environment International 30(5): 685-700.
59- Zhao FJ., Jiang RF., Dunham SJ., and McGrath SP. 2006. Cadmium uptake, translocation and tolerance in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. New Phytologist 172(4): 646-654.
60- Zhou L., Zhao Yand Wang S. 2015. Cadmium transfer and detoxification mechanisms in a soil–mulberry–silkworm system: phytoremediation potential. Environmental Science and Pollution Research 22(22): 18031-18039.

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 519-534

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۵۳۴-۵۱۹

Investigation of Bioaccumulation Capacity of Barley for Soil Lead and Chromium under Drought Stress Conditions

M. Madahinasab[1]*- M. Mousavi Nik[2]- A. Ghanbari[3]- A.R. Sirousmehr[4]- Sh. Kouhestani[5]

Received: 11-04-2021
Accepted: 13-06-2021

Introduction: The use of sewage sludge, which is mixed locally with poultry waste and is available at a relatively low cost, improves the circulation of nutrients and organic matter in the soil, reduces the concentration of CO_2 in the atmosphere, and increases the level of soil organic carbon. Fertilization with this method is of particular importance in soils of arid and semi-arid regions that face erosion and organic matter reduction. However, there are concerns about the presence of essential and unnecessary heavy metals such as Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn that enter the environment from domestic, light industrial, commercial and municipal wastewater sources and can lead to soil contamination and eventually enters the food chain through absorption, transport, and accumulation in agricultural and non-agricultural products and has threatened human and animal health. Phytoremediation is the cleaning up of polluted terrestrial areas and aquatic sites from heavy metal and organic contaminants by green plants. An appropriate plant for phytoremediation should ideally have a high ability to translocate contaminants into the plant shoot. However, the toxicity of the remains of these plants has become a severe problem for human health. Iran is an arid and semi-arid country and many soils face the problem of using animal manure sources with sewage sludge and the possibility of contamination with heavy metals. Farmers cultivate the barley plant (*Hordeum vulgare* L.) in these areas widely, and it has a significant role in the food chain of livestock and humans. Therefore, in this study, we evaluated the barley plant in terms of lead and chromium accumulation by increasing drought levels in the field.

Materials and Methods: It was a two-year field experiment with three irrigation levels (irrigation per 100 (control), 75 and 50% of field capacity). The amount of chromium and lead in soil and plant samples was measured using atomic spectroscopy with flame mode after extraction by digestion in acid. We used bio-concentration coefficients including root bioaccumulation factor ($\frac{\text{metal concentration of root}}{\text{metal concentration of soil}}$), shoot bioaccumulation factor ($\frac{\text{metal concentration of aerial parts}}{\text{metal concentration of soil}}$) and translocation factor ($\frac{\text{metal concentration of aerial parts}}{\text{metal concentration of root}}$) to measure the plants bio-accumulation capacity. A plant with a root bioaccumulation factor bigger than one and a bio-translocation factor of less than one is suitable for plant stabilization of elements. In contrast, a plant with a shoot bioaccumulation factor and bio-translocation factor of more than one and root bioaccumulation factor of less than one is suitable for plant extraction of elements from the soil.

Results and Discussion: After barley harvest, the average concentration of lead and chromium in soil decreased by 23% and 17% compared to before harvest. The results of the analysis of variance showed that the effect of experimental years was significant on the concentration of chromium in the soil and the aerial part of barley and shoot bioaccumulation and root bioaccumulation factor of the same elements in the barley ($p<0.05$). The effect of drought was significant on the shoot and root dry weight, chromium concentration in both shoots and roots, lead concentration in shoots, lead and chromium shoot bioaccumulation factor, chromium root bioaccumulation factor, and lead bio-translocation factor ($p<0.01$) and chromium bio-translocation factor ($p<0.05$) but the interaction effect of year and drought was not significant on any of these traits. In all cases, the concentration of elements in the roots was higher than the aerial part, and with increasing drought stress, the concentration of lead in the roots remained constant but increased in the aerial parts while the concentration of chromium decreased. As the amount of drought increased, the shoot bioaccumulation factor increased for the lead but decreased for the chromium. The root bioaccumulation factor of chromium also decreased while the

1- Ph.D. Student, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran & Department of Agricultural Science, Payame Noor University, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: mohsenmadahinasab@gmail.com)
2, 3 and 4- Professors and Associate Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran, respectively.
5- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Kerman, Iran
DOI: 10.22067/JSW.2021.69271.1039

translocation factor increased for both elements, but the increase was more pronounced for the lead. Lead shoot bioaccumulation factor decreased linearly with an increasing dry weight of aerial parts (β = -0.86), but chromium shoot bioaccumulation factor increased (β = 0.62). Root dry weight predicted chromium root bioaccumulation factor (β = 0.85). The total plant dry weight regression model could predict the lead translocation factor (β = -0.89) and chromium transfer factor (β = -0.67).

Conclusion: In this experiment, the studied bioconcentration coefficients were all less than one. So, barley is an avoidant plant when encountered with lead and chromium in the soil, and in increasing drought conditions in the field, it does not translocate these toxic metals to the food chain.

Keywords: Bioavailability, Food chain, Toxic metal, Translocation factor, Water deficiency

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 535-549

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۵۴۹-۵۳۵

مقاله پژوهشی

پاسخ پایه‌های مختلف مرکبات به مصرف کمپوست گرانوله گوگردی و نیتروژن

مجتبی محمودی[1*]- شهریار کاظمی[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

چکیده

به‌منظور بررسی اثر کود کمپوست و نیتروژن بر پایه‌های رایج مرکبات شامل سیترومِلو، سیترنج و نارنج، آزمایشی گلدانی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ایستگاه تحقیقات باغبانی قائم‌شهر اجرا شد. تیمارها شامل ماده آلی (صفر، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد وزنی کود کمپوست گرانوله گوگردی) و نیتروژن خالص (صفر، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از منبع سولفات آمونیوم بود. شاخص‌های رشد رویشی در نهال‌های یک‌ساله با شرایط مشابه اندازه‌گیری شد. هم‌چنین به‌منظور بررسی تغییرات عناصر غذایی در تیرماه نمونه‌های برگ جمع‌آوری و غلظت عناصر غذایی در بافت برگ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که پس از گذشت یک فصل رشد کامل بعد از اعمال تیمارها، بیش‌ترین غلظت نیتروژن در نهال سیترنج و سیترومِلو برابر ۲/۹۲ و ۲/۹۷ درصد به ترتیب در نتیجه مصرف ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن و ۲/۵ درصد کمپوست به دست آمد. غلظت آهن و روی برگ سیترومِلو با افزایش سطح مصرف کمپوست افزایش یافت. در پایه سیترنج روند متفاوت بود و مصرف ۲/۵ درصد کمپوست و ۴۰ میلی‌گرم نیتروژن بیش‌ترین غلظت آهن برگ (۱۵۱ میکروگرم در گرم) را نشان داد. در حالی‌که مصرف ۵ درصد کمپوست و عدم مصرف نیتروژن باعث کاهش غلظت آهن تا سطح ۶۲/۲ میکروگرم در گرم شد. تغییرات غلظت روی در پایه سیترنج مشابه سیترومِلو بود. در پایه نارنج، تغییرات غلظت آهن در تیمارهای مختلف کمتر بود. به‌طور کلی، نهال سیترنج در جذب عناصر غذایی عملکرد بهتری نسبت به نهال سیترومِلو و نارنج داشت که علت آن می‌تواند تفاوت‌های ژنتیکی، از جمله تفاوت در توزیع سیستم ریشه در خاک و توانایی جذب عناصر توسط ریشه در خاک باشد. مصرف سطوح ۵ و ۷/۵ درصد کمپوست در پایه نارنج باعث کاهش ارتفاع گیاه و قطر طوقه و سبب ایجاد رزت و افزایش تعداد برگ گردید. مؤثرترین سطح نیتروژن در نارنج مصرف ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن بود. بیش‌ترین رشد رویشی در پایه سیترومِلو از تیمار مصرف ۲/۵ درصد کمپوست و ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن و در پایه‌های سیترنج و نارنج از ۲/۵ درصد کمپوست و ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: رشد رویشی، سیترنج، سیترومِلو، عناصر غذایی برگ، نارنج

مقدمه

محصول مرکبات در ۱۳۴ کشور تولید می‌شود اما به‌طور اقتصادی در ۵۳ کشور تحت کشت و تجارت است. سطح زیر کشت جهانی آن ۱۱/۱۴ میلیون هکتار بوده به‌طوری‌که تولید آن در سال ۲۰۱۹، به ۱۵۷/۹۸ میلیون تن رسیده است. کشورهای چین (۴۴/۰۶ میلیون تن)، برزیل (۱۹/۶۵ میلیون تن)، هند (۱۴/۰۱ میلیون تن) و مکزیک (۸/۷۶ میلیون تن) به ترتیب در رده‌های اول تا چهارم تولید جهانی قرار گرفته‌اند (۱۲). بر اساس آمار سازمان جهانی غذا و کشاورزی، تولید پرتقال، نارنگی، گریپ‌فروت و لیمو در سال ۲۰۱۹ به ترتیب ۵۰/۶، ۳۱/۵، ۶/۷ و ۷/۵ میلیون تن بوده است. ایران با تولید ۴/۰۷ میلیون تن مرکبات در سال، ۲/۵۸ درصد تولید جهانی را به خود اختصاص داده است و دهمین کشور تولیدکننده این محصول در جهان محسوب می‌شود (۱۲). در بین استان‌های کشور، مازندران در رتبه نخست تولید این محصول قرار دارد (۸).

برای دست‌یابی به محصول حداکثری و کیفیت مطلوب، فراهم بودن شرایط تغذیه‌ای مناسب امری ضروری است. کودهای شیمیایی نقش عمده‌ای در افزایش محصول دارند اما استفاده طولانی‌مدت از

۱- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: m.mahmoudip@areeo.ac.ir)
۲- استادیار، گروه علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، ایران
DOI: 10.22067/JSW.2021.70354.1053

آن‌ها منجر به تخریب خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک، کاهش نفوذپذیری، جرم مخصوص ظاهری و اختلال در نفوذپذیری ریشه و درنهایت کاهش عملکرد محصول می‌گردد (۱۴). استفاده غیراصولی و نامتعادل از کودهای شیمیایی از یکسو و عدم استفاده از برخی عناصر غذایی کم‌مصرف در ترکیبات کودی از سوی دیگر موجب تشدید برخی از کمبودها و کاهش حاصلخیزی و آلودگی آب و خاک گردیده که به‌موجب آن استفاده از کودهای آلی و کمپوست‌ها توسعه زیادی پیدا کرده است (۱۷ و ۴۰). استفاده از کمپوست پسماندهای شهری و کارخانه‌های چوب، بخشی از منابع تأمین‌کننده مواد آلی خاک و در راستای کشاورزی پایدار است که با فرآوری صحیح آن می‌توان این مواد با ارزش را مجدداً وارد چرخه طبیعت نمود. بنابراین، استفاده از کود کمپوست در اراضی کشاورزی به‌طور عمومی مورد توجه بوده و از آن به بهترین تدبیر زیست‌محیطی یادشده است (۲).

از میان کلیه عناصر غذایی موردنیاز مرکبات، نیتروژن دارای جایگاه ویژه‌ای است که هرساله مقدار زیادی از آن به خاک اضافه می‌گردد. سرعت آزادسازی عناصر غذایی از مواد آلی، به‌ویژه نیتروژن،کم‌تر از سرعت رهاسازی آن‌ها از کودهای شیمیایی است (۳۲).

پایه‌ها نقش کلیدی در رشد و نمو درختان مرکبات دارند. پایه‌ها بر ظرفیت فتوسنتزی رقم پیوند شده مؤثرند که این ظرفیت با چرخه سالانه توزیع کربوهیدرات مرتبط است و عامل تعیین‌کننده‌ای برای رشد رویشی و توسعه زایشی محسوب می‌شود؛ بنابراین پایه رشد، عملکرد و کیفیت میوه ارقام را شدیداً تحت تنظیم خود دارد (۱۹). مطالعات نشان داده‌اند که پایه‌ها بر رشد درخت، گلدهی، عملکرد و کیفیت میوه ارقام نارنگی تأثیر می‌گذارند. همچنین پایه‌ها بر غلظت عناصر غذایی برگ مانگو و پرتقال مؤثر بودند (۷). در آزمایشی در استرالیا برای مقایسه اثر ۱۲ پایه مختلف روی ویژگی های کمی و کیفی پرتقال های نافدار، گزارش شد که پایه سیتروملو و ترویر سیترنج بیش‌ترین عملکرد را داشتند (۱۱). اثر ارقام مختلف مرکبات روی سه پایه نارنج سه برگ، سیترنج و سیتروملو بررسی و نتایج نشان داد که ارقام روی این پایه‌ها میوه‌هایی با عملکرد و کیفیت خوب تا عالی تولید می‌کنند (۱۵ و ۳۹). اثر ۱۴ پایه روی رشد رویشی شامل ارتفاع، قطر و حجم تاج درخت نارنگی تانگور مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس پایه اثر معنی‌داری روی ارتفاع درخت نداشت اما قطر درخت به‌طور معنی‌داری تغییر یافت (۱۳).

ازآنجاکه باغ‌های مرکبات شرق مازندران از نظر جذب عناصر غذایی منگنز و روی محدودیت‌هایی دارند (۱) و از طرفی، مصرف مواد آلی در جهت کاهش مصرف کودهای شیمیایی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ضروری می‌باشد، بنابراین، از بررسی منابع چنین استنباط می‌شود که اثر پایه‌ها بر خواص کیفی میوه و تا حدی بر جذب عناصر غذایی بررسی شده است اما برهم‌کنش پایه‌ها رایج مرکبات و کودهای آلی مورد تحقیق قرار نگرفته است. به نظر می‌رسد مصرف کود آلی می‌تواند در جهت افزایش غلظت و قابلیت جذب این مواد مفید بوده و همراه با کاهش مصرف کودهای شیمیایی گامی مؤثر در کاهش نارسایی‌های تغذیه‌ای به‌حساب آید. هدف از این پژوهش بررسی اثر کود آلی کمپوست گرانوله گوگردی و کود شیمیایی سولفات آمونیوم (نیتروژن) بر رشد رویشی و غلظت عناصر برگ در سه پایه مرکبات سیتروملو، سیترنج و نارنج بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت گلدانی روی پایه‌های رایج مرکبات (نارنج، سیترنج و سیتروملو)، در ایستگاه تحقیقات باغبانی قائم شهر در سال ۱۳۹۶ به‌مدت یک سال به اجرا درآمد. این ایستگاه در موقعیت ۲۸'N ۳۶° و ۵۳'E ۵۲° واقع شده و ارتفاع آن از سطح دریا ۵۱ متر است. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در چهار تکرار انجام شد. فاکتورهای مورد آزمایش شامل فاکتور اول: کود آلی (کمپوست گوگردی) در چهار سطح (صفر، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد وزنی خاک مرطوب (با رطوبت ۱۸/۵ درصد) که به ترتیب با نمادهای C1، C2، C3 و C4 نشان داده می‌شود). این کود تولیدی شرکت صنایع چوب و کاغذ مازندران بوده و سالانه بیش از ۴۰ هزار تن از آن تولید می‌شود. مشخصات فیزیکوشیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است). فاکتور دوم: کود نیتروژنی در چهار سطح (صفر، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیتروژن خالص از منبع سولفات آمونیوم که به ترتیب با نمادهای N1، N2، N3 وN4) نشان داده می‌شود.

نهال‌های یک‌ساله و هم‌اندازه از پایه‌های سیتروملو، سیترنج و نارنج در داخل گلدان‌های حاوی هفت کیلوگرم خاک زراعی، پس از اعمال تیمارهای مذکور کشت شدند. برای اعمال تیمارها، ابتدا مقادیر کمپوست و کود سولفات آمونیوم تیمارهای مختلف بر اساس وزن خاک گلدان محاسبه و توزین شد و سپس با خاک گلدان به‌طور یکنواخت مخلوط گردیدند. در ادامه نهال‌های یک‌ساله هم اندازه، سالم و عاری از بیماری که از سال قبل تکثیر و تولید شده بودند در اسفند ماه در گلدان‌ها کاشت شدند. مصرف سایر کودها بر مبنای آزمون خاک و برای همه تیمارها به‌طور یکسان انجام شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است. آبیاری تمام گلدان‌ها با آب چاه تا رسیدن به ظرفیت زراعی (به‌روش وزنی) و عملیات وجین هم برای تمامی تیمارها به‌طور یکنواخت انجام شد.

ارتفاع نهال، قطر طوقه و تعداد برگ در پایان دوره رشد رویشی (بهمن‌ماه) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی از برگ‌های کامل بهاره استفاده گردید. برای این منظور در مردادماه که

غلظت عناصر غذایی در برگ مرکبات به حالت پایداری می‌رسد از تیمارها نمونه‌برداری و تجزیه برگ در آزمایشگاه خاک و آب مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی مازندران انجام شد. پس از برداشت نمونه‌های برگ نارنج، سیترنج و سیتروملو و انتقال آن‌ها به آزمایشگاه، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در آون، خشک شده، سپس اندازه‌گیری نیتروژن به روش هضم در بالن ژوژه با اسید سولفوریک- اسید سالیسیلیک- آب اکسیژنه (۳۸) فسفر به روش کالری‌متری (۹) پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر (۳۳) و کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز، روی و مس به روش جذب اتمی شعله‌ای صورت گرفت (۹). تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS و مقایسه میانگین‌ها با روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد و رسم نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel انجام شد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکوشیمیایی کمپوست صنایع چوب و کاغذ مازندران

Table 1- Physicochemical properties of compost produced by Mazandaran Wood and Paper Industries

pH اسیدیته	$EC*10^3$ هدایت الکتریکی	CCE کربنات کلسیم معادل	Organic Carbon کربن آلی	Total N نیتروژن کل	C/N	Total P فسفر کل	Total K پتاسیم کل	Cd کادمیم	Pb سرب	Total Fe آهن کل	Total Mn منگنز کل	Total Zn روی کل	Total Cu مس کل
	(dSm^{-1})	(%)				($mg\ kg^{-1}$)							
7.61	3.18	36	31	1.55	20	0.18	0.3	1.4	19	4431	496	109	29.5

جدول ۲- مشخصات فیزیکوشیمیایی خاک مورداستفاده

Table 2- Physiochemical properties of the used soil

pH اسیدیته خاک	$EC*10^3$ هدایت الکتریکی	CCE کربنات کلسیم معادل	OC کربن آلی	Total N نیتروژن کل	Sand ماسه	Silt سیلت	Clay رس	Soil Texture بافت خاک	Available P فسفر قابل جذب	Available K پتاسیم قابل جذب	Available Fe آهن قابل جذب	Available Mn منگنز قابل جذب	Available Zn روی قابل جذب	Available Cu مس قابل جذب
	(dSm^{-1})	(%)							($mg\ kg^{-1}$)					
7.6	0.53	17	1.3	0.1	48	34	18	Loam	38	133	4. 9	15.6	3.0	0.9

همانطور که داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهند خاک بافت مناسبی برای پرورش نهال مرکبات داشت. مقدار کربن آلی و نیتروژن هم در دامنه مناسبی قرار داشتند. خاک از نظر فسفر غنی ولی سطح پتاسیم خاک پایین بود. بنابراین قبل از اعمال تیمارها ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار (۰/۰۲ گرم در کیلوگرم خاک) به خاک همه تیمارها سولفات پتاسیم اضافه گردید.

نتایج و بحث

صفات مورفولوژیکی پایه‌ها

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که ویژگی‌های مورفولوژیکی بررسی شده در پایه‌های سیتروملو، سیترنج و نارنج تحت تأثیر مصرف هم‌زمان کود کمپوست و کود نیتروژن قرار گرفتند. اثر متقابل برای ویژگی‌های ارتفاع نهال پایه سیتروملو و ارتفاع نهال و قطر طوقه پایه نارنج در سطح پنج درصد و باقی ویژگی‌ها در سطح یک درصد معنی‌دار بودند (جدول ۳).

ارتفاع گیاه

در پایه سیتروملو، حداکثر ارتفاع گیاه (۱۰۹ سانتی‌متر) با مصرف ۲/۵ درصد کمپوست و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن (N2C2) با افزایش ۳۵ درصدی نسبت به شاهد به دست آمد. با افزایش سطح مصرف کمپوست (سطوح C3 و C4) کاهش رشد طولی در گیاه مشاهده شد و ارتفاع گیاه در این سطوح با شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت. مصرف نیتروژن در تمام سطوح کمپوست موجب افزایش ارتفاع گیاه شد (شکل ۱- A).

جدول ۳- میانگین مربعات ویژگی‌های مورفولوژیکی پایه‌های سیتروملو، سیترنج و نارنج

Table 3- Mean squares for morphological characteristics of citrumelo, citrange and sour orange rootstocks

منبع تغییرات Sources	درجه آزادی Df	تعداد برگ در نهال No. of Leaves per Plant	قطر طوقه Crown Diameter	ارتفاع نهال Plant Height	تعداد برگ در نهال No. of Leaves per Plant	قطر طوقه Crown Diameter	ارتفاع نهال Plant Height	تعداد برگ در نهال No. of Leaves per Plant	قطر طوقه Crown Diameter	ارتفاع نهال Plant Height
		سیترنج Citrange			سیترومو Citrumelo			نارنج Sour orange		
کمپوست Compost	3	185.12 ns	1.25**	130 ns	585.8**	2.55**	415*	175.3ns	1.378**	801ns
نیتروژن Nitrogen	3	1545.3**	0.33*	1175 ns	613.1**	0.269 ns	537**	1020.5**	2.025**	190 ns
اثر متقابل کمپوست در نیتروژن *Compost Nitrogen	9	1582.6**	1.35**	409**	3175.1**	2.69**	262*	1093.7**	1.622*	144*
خطا Error	30	3400.5	4.05	170	2847	3.69	113	2397	7.95	295
ضریب تغییرات (درصد) CV		20.6	10.4	11.3	11.6	9.64	11.6	14.2	14.1	18.5

در پایه سیترنج بهترین رشد طولی گیاه در تیمار (N4C4)، با ۴۰ درصد افزایش نسبت به شاهد، معادل ۱۳۱ سانتی‌متر بدست آمد. این تیمار با تیمارهای دیگر مانند تیمار عدم مصرف کمپوست و ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن، تیمار عدم مصرف کمپوست و ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن و تیمار مصرف ۷/۵ درصد کمپوست و ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن تفاوت آماری معنی‌داری نشان نداد (شکل ۱- B). این بدان معنی است که نیاز پایه سیترنج به نیتروژن در سطوح بالای کمپوست برطرف نشده است و سطوح بالای کمپوست (C3 و C4) در صورتی‌که با مصرف نیتروژن همراه نباشد نیاز گیاه را مرتفع نخواهد کرد. در مقایسه با دو پایه دیگر، سیترنج از رشد طولی بیش‌تری برخوردار و در تمام تیمارها ارتفاع آن از دو پایه دیگر بیش‌تر بود. این تفاوت‌ها آنگونه که در منابع نیز به آن‌ها اشاره شده است، ممکن است ناشی از ژنتیک گیاه (نوع پایه) باشد. صادقی و همکاران (۱۳۹۷) گزارش کردند که میزان جذب نیتروژن در پایه‌های پر رشد مثل پایه نارنج نسبت به پایه‌های دیگر بیشتر است (۲۹). نتایج پژوهش‌های ژو و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که پایه‌های مرکبات تنوع ژنوتیپی قابل توجهی در پارامترهای رشد گیاه شامل زیست توده، ارتفاع نهال، نسبت ریشه به اندام هوایی و صفات‌ریخت شناسی شامل سطح و طول کل جذب ریشه و زیست‌توده ریشه جانبی دوم از خود نشان دادند (۴۲). پایه‌ها بر سیستم جذب آهن در برگ تأثیر می‌گذارند. به نظر می‌رسد پایه تأثیر کلیدی در فعالیت آنزیم ردکتاز کلات آهن و مقدار فعال آهن در برگ‌ها دارد (۲۰). پژوهش رئیسی و همکاران (۱۳۹۷) نشان داد که سه پایه سیتروملو، سیترنج و نارنج تفاوت‌های فاحشی از نظر رفتار تغذیه‌ای و انتقال و تجمع عناصر غذایی در بخش‌های مختلف گیاه از خود نشان می‌دهند. پایه نارنج به لحاظ جذب عناصر غذایی کلیدی بر پایه‌های سیتروملو و سیترنج برتری دارد (۲۶). همچنین نتایج پژوهشی در ترکیه نشان داد کاریزو سیترنج در جذب نیتروژن، پتاسیم، منیزیوم، منگنز و مس؛ تریور سیترنج در جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم و آهن؛ و نارنج در جذب کلسیم، روی و سدیم نسبت به دیگر پایه‌ها ارجحیت داشتند (۳۵).

شاخص رشد رویشی ارتفاع در پایه نارنج در تیمار N4C2 نسبت به تیمار N1C1 (شاهد) با حدود ۴۰ درصد افزایش بیش‌ترین مقدار را نشان داد. در این پایه افزایش سطح مصرف کمپوست از ۲/۵ به ۵ و ۷/۵ درصد موجب کاهش رشد طولی شد. به‌طور کلی، بهترین رشد ارتفاعی در هر سه پایه در سطح مصرف ۲/۵ درصد کمپوست و مصرف ۴۰ یا ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن بدست آمد و بین تیمارهای ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن تفاوت معنی‌دار نبود.

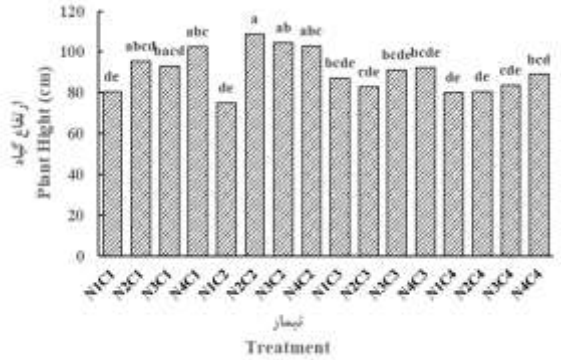
قطر طوقه

بیش‌ترین قطر طوقه در پایه سیتروملو در تیمار مصرف ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن و عدم مصرف کمپوست (N4C1) بدست آمد و حداقل این ویژگی در تیمار عدم مصرف نیتروژن و

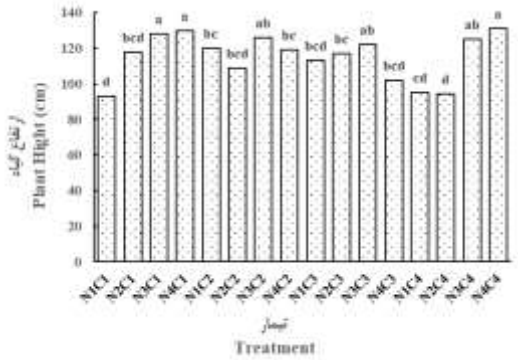
مصرف ۵ و ۷/۵ درصد کمپوست (N1C4 و N1C3) مشاهده شد. مطابق داده‌های شکل ۲-A افزایش سطح مصرف نیتروژن به ازای مقادیر ثابت کمپوست (به‌استثنای سطح ۲/۵ درصد کمپوست) موجب افزایش قطر پایه سیترومِلو گردید.

در پایه سیترنج روند تغییرات قطر طوقه متفاوت بود. مصرف سطوح مختلف نیتروژن (در سطوح ثابت کمپوست) ابتدا موجب افزایش و سپس کاهش قطر طوقه شد (شکل ۲ -B). در این پایه، بیشترین قطر طوقه در تیمار مصرف ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن و ۷/۵ درصد کمپوست (N3C4) با مقدار ۲/۶ سانتی‌متر مشاهده شد. مطابق شکل ۲-C، مصرف نیتروژن در سطوح پایین کمپوست موجب افزایش قطر طوقه نارنج شد اما در سطح C3 و C4 نیتروژن ابتدا افزایش و سپس کاهش قطر طوقه را سبب شد.

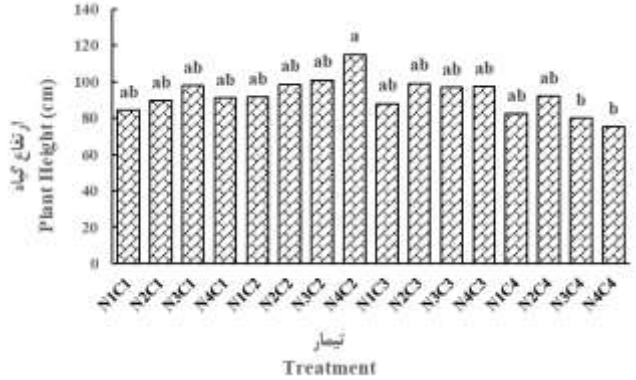
در بین پایه‌ها، بیشترین قطر طوقه در پایه سیترومِلو (۲/۷ سانتی‌متر) مشاهده شد. روند داده‌ها (شکل ۲) نشان می‌دهد که در سطوح پایین کمپوست (C1 و C2) قطر طوقه سیترومِلو بیشتر از قطر طوقه سیترنج اما در سطوح C3 و C4 قطر طوقه سیترنج بیشتر از قطر طوقه سیترومِلو بود. قطر طوقه نارنج با مصرف توأم نیتروژن و کمپوست نوسانات زیادی نشان داد اما در تیمارهای مصرف ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن و ۷/۵ درصد کمپوست کاهش محرزی نشان داد. بیشترین قطر طوقه در تیمار مصرف ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن و عدم مصرف کمپوست گرانوله گوگردی معادل ۲/۶۱ سانتی‌متر مشاهده شد. همانگونه که ذکر شد با افزایش سطح کمپوست قطر طوقه نارنج کاهش یافت و این تیمار با تمام تیمارهای سطح ۷/۵ درصد کمپوست تفاوت آماری معنی‌داری نشان داد.



A



B



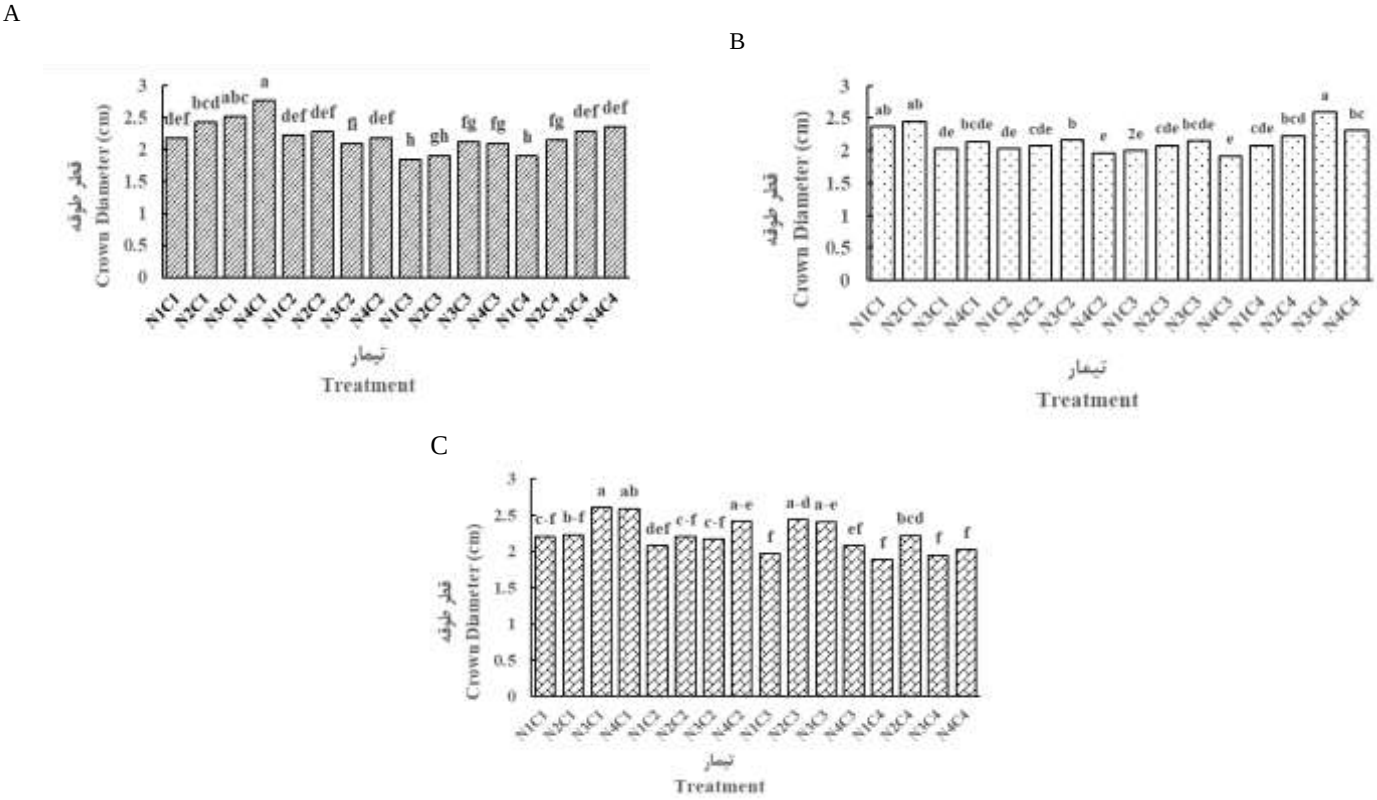
C

شکل ۱- اثر متقابل نیتروژن و کمپوست بر ارتفاع گیاه در سه پایه سیترومِلو (A)، سیترنج (B) و نارنج T(C)

(N1، N2، N3 وN4 به ترتیب عبارتند از ۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن خالص و C1، C2،C3 و C4 به ترتیب ۰، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد کمپوست)

Figure 1- The interaction effect of nitrogen and compost on plant height in citrumelo (A), citrange (B) and sour orange (C) rootstocks

(N1, N2, N2, and N4 are equal to 0, 20, 40, and 80 mg kg^{-1} net nitrogen and C1, C2, C3, C4 equal to 0, 2.5, 5, and 7.5% compost levels, respectively.



شکل ۲- اثر متقابل نیتروژن و کمپوست بر قطر طوقه در سه پایه سیتروملو(A)، سیترنج (B) و نارنج (C)،

(N1، N2، N3 وN4 به ترتیب عبارتند از ۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن خالص و C1، C2،C3 و C4 به ترتیب ۰، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد کمپوست)

Figure 2- The interaction effect of nitrogen and compost on crown diameter in citrumelo (A), citrange (B) and sour orange (C) rootstocks

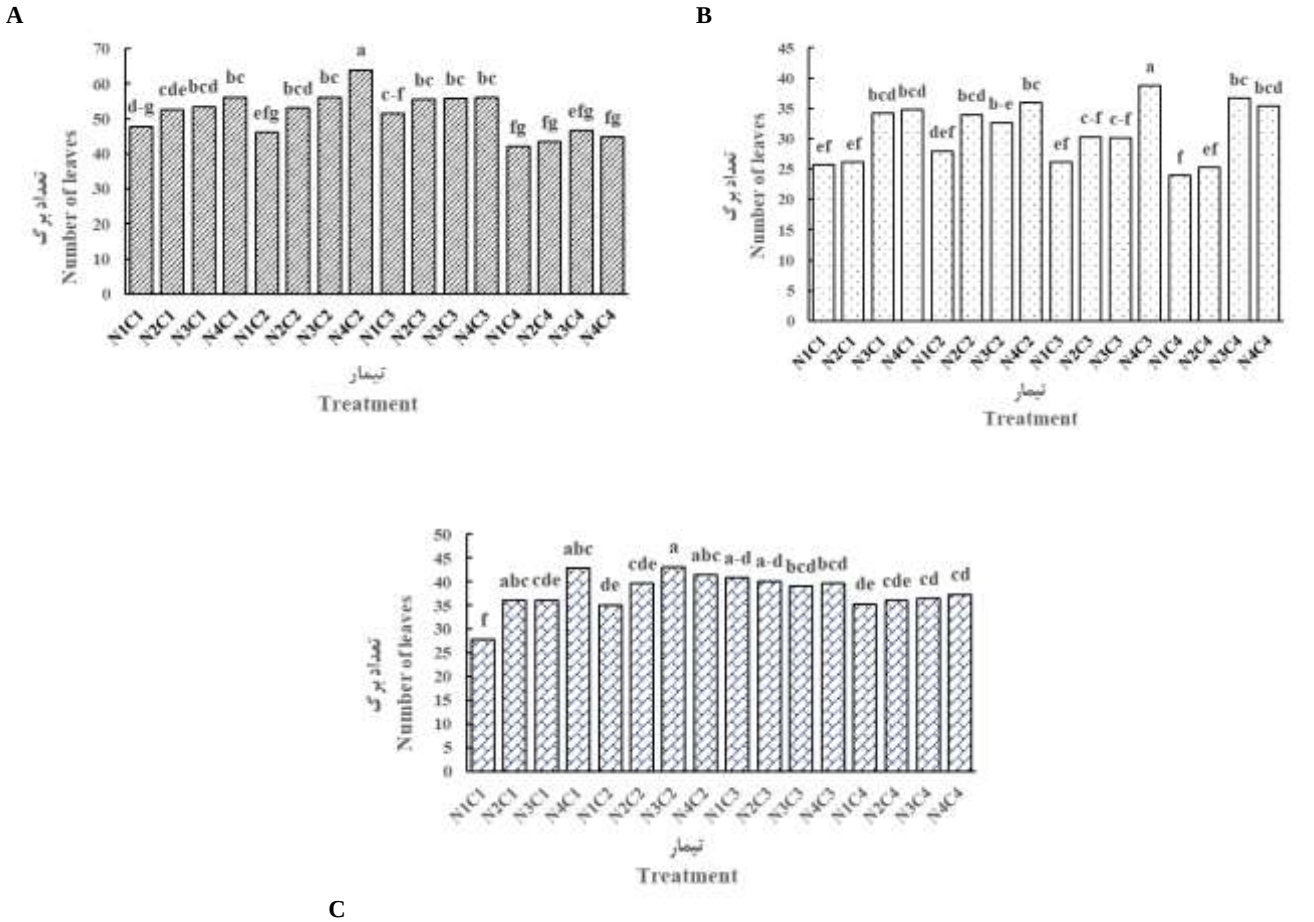
(N1, N2, N2, and N4 are equal to 0, 20, 40, and 80 mg kg^{-1} net nitrogen and C1, C2, C3, C4 equal to 0, 2.5, 5, and 7.5% compost levels respectively.

تعداد برگ

در پایه سیتروملو، در هرکدام از سطوح کمپوست، افزایش سطح نیتروژن باعث افزایش تعداد برگ شد (شکل ۳-A). مصرف ۷/۵ درصد کمپوست (C4) به‌طور معنی‌داری باعث کاهش تعداد برگ گردید به‌طوری‌که در این سطح، تعداد برگ‌ها با تعداد برگ‌های شاهد (N1C1) تفاوت آماری معنی‌داری نداشت. بیشترین تعداد برگ در تیمار (N4C2) مشاهده شد. همانند پایه سیتروملو، در پایه سیترنج نیز روند افزایش تعداد برگ‌ها درنتیجه افزایش سطح نیتروژن مشاهده شد. در این پایه بیشترین تعداد برگ در تیمار (N4C3) مشاهده شد.

در پایه نارنج بیشترین تعداد برگ در تیمار مصرف ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن و ۲/۵ درصد کمپوست (N3C2) به‌دست آمد که نسبت به شاهد ۵۵ درصد افزایش نشان می‌دهد. مصرف ۷/۵ درصد کمپوست (C4) کاهش محسوس و معنی‌داری ازنظر تعداد برگ نسبت به سایر تیمارهای بکار رفته نشان داد.

در گزارشی، کاربرد ورمی‌کمپوست افزایش فاکتورهای رشدی (ارتفاع ساقه، تعداد و سطح برگ، قطر ساقه و طوقه) را در گیاه نارنج نسبت به شاهد در پی داشت و غلظت ۲۵ درصد حجم خاک گلدان بهترین غلظت کود برای افزایش رشد مرکبات معرفی گردید (۲۱). درمجموع چنین به نظر می‌رسد که مصرف سطوح بالاتر از ۵ درصد کمپوست (به‌استثنای قطر طوقه و ارتفاع گیاه در پایه سیترنج) یا تأثیری روی شاخص‌های رشد رویشی نداشت و یا منجر به کاهش مقدار این شاخص‌ها گردید. دلیل این امر احتمالاً به نسبت C/N این کود مربوط می‌شود. با توجه به داده‌های جدول ۱، نسبت مذکور در کمپوست تولیدی شرکت چوب و کاغذ مازندران معادل ۲۰ می‌باشد و بنابراین می‌توان چنین استنتاج کرد که با افزایش حجم مصرف این کود بین باکتری‌های تجزیه‌کننده مواد آلی و ریشه گیاه برای دسترسی به نیتروژن رقابت ایجادشده و نیتروژن کافی به گیاه نمی‌رسد. غلظت عناصر غذایی در محیط ریشه تحت تأثیر فرآیندهایی نظیر اسیدی شدن و تغییرات نسبت C/N، در طول دوره رشد به‌عنوان تابعی از دما و فعالیت میکروارگانیسم‌های دخیل در آمونیوم‌سازی و نیترات‌سازی، می‌باشد که به‌واسطه وجود غلظت‌های مختلف مواد آلی در محیط رشد ریشه تغییر می‌نماید (۴ و ۳۴).



شکل ۳- اثر متقابل نیتروژن و کمپوست بر تعداد برگ در سه پایه سیتروملو(A)، سیترنج (B) و نارنج (C)

(N1، N2، N3 وN4 به ترتیب عبارتند از ۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن خالص و C1، C2،C3 و C4 به ترتیب ۰، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد کمپوست)

Figure 3- The interaction effect of nitrogen and compost on number of leaves per plant in citrumelo (A), citrange (B) and sour orange (C) rootstocks

(N1, N2, N2, and N4 are equal to 0, 20, 40, and 80 mg kg^{-1} net nitrogen and C1, C2, C3, C4 equal to 0, 2.5, 5, and 7.5% compost levels respectively.

غلظت عناصر غذایی در برگ

عناصر پرمصرف

نتایج تجزیه واریانس داده‌های غلظت عناصر غذایی برگ در پایه سیتروملو نشان داد که هیچ‌کدام از منابع تغییرات بر غلظت عناصر کلسیم و منیزیم اثر معنی‌داری نداشتند؛ اما اثر متقابل کمپوست و نیتروژن بر غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، مس ($P\leq$۰/۰۵) و آهن و روی ($P\leq$۰/۰۱) معنی‌دار بود (جداول ۴ و ۵). اثر ساده کود کمپوست بر غلظت نیتروژن معنی‌دار ($P\leq$۰/۰۵) و باعث افزایش غلظت نیتروژن برگ گردید. همچنین اثر ساده کود نیتروژن بر غلظت پتاسیم برگ معنی‌دار ($P\leq$۰/۰۱) و با افزایش سطح مصرف نیتروژن روند کاهشی نشان داد.

بیشترین غلظت نیتروژن برگ سیتروملو با مصرف ۲/۵ درصد کمپوست و ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن (N3C2) برابر با ۲/۹۲ درصد و کمترین میزان غلظت آن در تیمار شاهد (N1C1) برابر ۱/۹ درصد ثبت گردید. این تیمار با تیمارهای مصرف ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد کمپوست و عدم مصرف نیتروژن، تفاوت آماری نداشت (جدول ۴). مصرف توأم سطوح مختلف کمپوست و نیتروژن موجب افزایش غلظت فسفر در تمام تیمارها نسبت به شاهد شد اما این افزایش تنها در تیمارهای N2C2 و N1C3 معنی‌دار بود. با توجه به داده‌ها، بیشترین غلظت پتاسیم برگ (۱/۷۱ درصد) با اختلاف معنی‌دار در تیمار N1C4 مشاهده شد (جدول ۴). این تیمار با تیمار مصرف ۲/۵ درصد کمپوست و عدم مصرف نیتروژن (N1C2)، تفاوت آماری نداشت. همچنین داده‌ها نشان دادند که با فزایش سطح نیتروژن (در هر چهار سطح کمپوست) غلظت پتاسیم برگ کاهش پیدا کرده است.

گرچه این کاهش در برخی موارد معنی‌دار نبود. با توجه به روند داده‌ها، در پایه سیتروملو، تیمار مصرف ۷/۵ درصد کمپوست و عدم مصرف نیتروژن (N1C4) سبب ایجاد بیشترین غلظت پتاسیم برگ گردید که این امر دلالت بر تأثیر سطح مصرف کمپوست در افزایش غلظت این عنصر در برگ داشته و از طرفی احتمالاً برهم‌کنش عنصر نیتروژن با پتاسیم را نیز نشان می‌دهد. به عبارتی با افزایش سطح مصرف نیتروژن، از غلظت عناصر پتاسیم برگ کاسته شده است. کاربرد کودهای نیتروژنی باعث افزایش غلظت نیتروژن در برگ گیاهان می‌شود، مخصوصاً استفاده از آمونیوم غلظت نیتروژن برگ را نسبت به نیترات بیشتر افزایش می‌دهد (۲۴). کودهای آلی حاوی بار منفی در سطح خود هستند که باعث آزاد شدن پتاسیم تثبیت‌شده در خاک شده و درنتیجه باعث افزایش جذب پتاسیم توسط ریشه‌های گیاه می‌شوند (۳). افزایش سطح مصرف کمپوست به ۲/۵ و ۵ درصد افزایش معنی‌دار غلظت فسفر برگ (نسبت به شاهد) را سبب شده است. این امر می‌تواند به دلیل افزایش قابلیت جذب فسفر به واسطه اثر اسیدی شدن موضعی خاک و افزایش جمعیت میکربی خاک توسط کمپوست باشد (۵ و ۱۰).

بر اساس داده‌های جدول ۴، مصرف توأم کمپوست و نیتروژن در بسیاری از تیمارها موجب افزایش معنی‌دار غلظت نیتروژن برگ پایه سیترنج شد. بیشترین غلظت نیتروژن برگ سیترنج (۲/۹۷ درصد) در تیمار مصرف ۲/۵ درصد کمپوست و ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن (N4C2) مشاهده شد. همچنین حداقل غلظت نیتروژن برگ در سیترنج مشابه سیتروملو در تیمار شاهد (N1C1) ایجاد شد. مصرف توأم کمپوست و نیتروژن در بیشتر تیمارها موجب افزایش معنی‌دار غلظت فسفر برگ شده است. در این پایه بیشترین غلظت فسفر با اختلاف معنی‌دار ($P\leq$۰/۰۵) در تیمار N1C3 مشاهده شد. غلظت پتاسیم نیز روند مشابه پایه سیتروملو نشان داد. در تیمار N1C4 غلظت پتاسیم به بیشترین حد خود (۱/۸۳ درصد) رسید.

در پایه نارنج، غلظت عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم به ترتیب در تیمارهای N4C2، N1C4 و N1C4 بیشترین مقدار را نشان داد. بررسی دقیق‌تر داده‌ها نشان داد که کاهش شاخص‌های رشد (ارتفاع گیاه، قطر طوقه و تعداد برگ) در سطح مصرف ۷/۵ درصد کمپوست و سطوح ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن با غلظت عناصر غذایی پرمصرف در برگ نارنج همخوانی دارد (جدول ۴). در مجموع بر اساس نتایج، در هر سه پایه بیشترین غلظت فسفر و پتاسیم در سطوح بالای کمپوست و عدم مصرف نیتروژن وجود داشت.

جدول ۴- اثر متقابل نیتروژن و کمپوست بر غلظت عناصر غذایی پرمصرف در پایه‌های سیتروملو، سیترنج و نارنج

Table 4- The interaction effect of nitrogen and compost on macronutrients concentration in citrumelo, citrange and sour orange rootstocks

نیتروژن Nitrogen (mg/kg)	کمپوست Compost (%)	سیترنج Citrange			سیتروملو Citrumelo			نارنج Sour Orange		
		نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K	نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K	نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K
						(%)				
0	0	1.91 ^{d}	0.15 ^{b}	1.30^{bcd}	2.62^{c}	0.17^{c}	1.30 ^{cd}	1.81 ^{hi}	0.22 ^{b}	1.10 ^{e}
20	0	2.25 ^{bcd}	0.17 ^{ab}	1.25^{d-e}	2.81^{ab}	0.18^{ab}	1.39 ^{c}	2.02 ^{efg}	0.19 ^{bc}	1.17 ^{cd}
40	0	2.62 ^{abc}	0.19 ^{ab}	1.04^{cde}	2.74^{bc}	0.19^{bc}	1.04 ^{fg}	2.42 ^{ab}	0.20 ^{bc}	0.87 ^{ij}
80	0	2.35 $^{a-d}$	0.17 ^{ab}	0.83^{e}	2.69^{bc}	0.17^{bc}	0.84 ^{i}	2.21 ^{cd}	0.19 ^{bcd}	0.66 ^{k}
0	2.5	2.10 ^{cd}	0.20 ^{ab}	1.40^{abc}	2.78^{bc}	0.20^{abc}	1.40 ^{bc}	1.93 ^{gh}	0.216 ^{b}	1.14 ^{de}
20	2.5	2.37 $^{a-d}$	0.22 ^{a}	1.07^{cde}	2.81^{bc}	0.22^{ab}	0.98 ^{gh}	2.31 ^{bc}	0.20 ^{bc}	0.96 ^{gh}
40	2.5	2.92 ^{a}	0.20 ^{ab}	0.98^{cde}	2.80^{bc}	0.21^{abc}	0.89 ^{hi}	2.32 ^{bc}	0.17 ^{cde}	1.18 ^{cd}
80	2.5	2.53 ^{abc}	0.19 ^{ab}	1.12^{b-e}	2.97^{a}	0.20^{abc}	1.21 ^{de}	2.54 ^{a}	0.16 ^{de}	0.96 ^{gh}
0	5	2.15 ^{bcd}	0.22 ^{a}	1.50^{ab}	2.76^{bc}	0.25^{a}	1.51 ^{b}	1.97 ^{fg}	0.17 ^{cde}	1.30 ^{b}
20	5	2.39 $^{a-d}$	0.17 ^{ab}	0.91^{de}	2.89^{ab}	0.19^{bc}	0.91 ^{hi}	2.14 ^{de}	0.15 ^{de}	0.83 ^{j}
40	5	2.49 $^{a-d}$	0.18 ^{ab}	1.06^{cde}	2.80^{bc}	0.18^{bc}	1.12 ^{ef}	2.13 ^{de}	0.17 ^{cde}	0.92 ^{hi}
80	5	2.72 ^{ab}	0.18 ^{ab}	1.12^{b-e}	2.88^{ab}	0.20^{abc}	0.98 ^{gh}	2.12 ^{def}	0.16 ^{ced}	1.03 ^{f}
0	7.5	2.15 ^{cd}	0.20 ^{ab}	1.71^{a}	2.70^{bc}	0.20^{abc}	1.83 ^{a}	1.70 ^{i}	0.26 ^{a}	1.62 ^{a}
20	7.5	2.55 ^{abc}	0.20 ^{ab}	0.93^{de}	2.88^{ab}	0.22^{ab}	1.12 ^{de}	2.45 ^{ab}	0.15 ^{de}	0.91 ^{hi}
40	7.5	2.54 ^{abc}	0.18 ^{ab}	1.25^{b-e}	2.88^{ab}	0.18^{bc}	1.15 ^{df}	1.98 ^{fg}	0.14^{e}	0.99 ^{fg}
80	7.5	2.69 ^{abc}	0.17 ^{ab}	1.09^{b-e}	2.90^{ab}	0.18^{bc}	0.09 ^{fg}	2.07 ^{defg}	0.16 ^{de}	1.22 ^{c}

بر اساس مطالعات، آمونیوم ممکن است از سیستم انتقال پتاسیم استفاده کند، آمونیوم به انتقال‌دهنده پتاسیم وصل شده و باعث تغییر شکل آن می‌شود، هرچند گزارش‌هایی نیز وجود دارند که بیان کردند هیچ رقابتی در جذب بین آمونیوم و پتاسیم وجود ندارد (۲۸). افزایش معنی‌دار غلظت فسفر برگ (۰/۲۶ میکروگرم در گرم) در سطح ۷/۵ درصد کمپوست و عدم مصرف نیتروژن درخور توجه است زیرا اثر شیمیایی و زیستی کمپوست در افزایش انحلال و افزایش سطح فسفر قابل جذب را نشان می‌دهد (۵ و ۳۶). از طرف دیگر مصرف توام کمپوست (در سطح ۷/۵ درصد) و نیتروژن (۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) موجب کاهش سطح فسفر برگ شده است (جدول ۴). این نتیجه احتمالاً به دلیل افزایش غلظت یون آمونیوم در محلول خاک و تبدیل آن به یون نیترات به‌واسطه فعالیت باکتری‌های تولید کننده نیترات می‌باشد. ریشه مرکبات جذب یون نیترات را به یون آمونیوم ترجیح می‌دهد (۶ و ۲۵)، در این تیمارها غلظت نیتروژن برگ نسبت به تیمار ۷/۵ درصد کمپوست و عدم مصرف نیتروژن افزایش یافته است. افزایش غلظت نیترات در محیط ریشه باعث ایجاد رقابت با یون منفی فسفات شده و در نتیجه از جذب فسفات جلوگیری می‌شود (۲۵). در میان عوامل فیزیکی که بر نیترات‌سازی تأثیر می گذارد، در دسترس بودن ماده اولیه (آمونیوم) برای باکتری‌های تولید کننده نیترات بسیار حیاتی است (۳۰). ژاهو و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که افزودن سولفات آمونیوم، اوره و بی‌کربنات آمونیوم باعث تحریک نیترات‌سازی شد (۴۱).

عناصر کم‌مصرف

در پایه سیترومولو بیشترین غلظت آهن در تیمار N1C4 برابر با ۱۲۵/۳ میکروگرم در گرم و کمترین میزان غلظت آن در N4C2 (مصرف ۲/۵ درصد کمپوست و ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کود نیتروژن) معادل ۶۲ میکروگرم در گرم، مشاهده شد (جدول ۵). از سویی غلظت روی در تیمارهای N3C4 و N4C4 به بیشترین حد خود رسید. به نظر می‌رسد مصرف سطوح بالای کمپوست و نیتروژن غلظت روی برگ سیترومولو را افزایش داده است. بیشترین غلظت مس در تیمار N1C3 معادل ۱۶/۴ میکروگرم در گرم با اختلاف معنی‌دار نسبت به شاهد (۱۰/۵ میکروگرم در گرم) مشاهده شد ($P\leq$۰/۰۵). با افزایش سطح کمپوست و نیتروژن این مقدار کاهش یافت به‌طوری که در تیمار مصرف ۷/۵ درصد کمپوست و ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن به کمترین مقدار خود رسید و اختلاف معنی‌داری نسبت به تیمار مذکور پیدا کرد و با شاهد در یک گروه قرار گرفت.

در پایه سیترنج بیشترین غلظت آهن برگ با مصرف ۲/۵ درصد کمپوست و ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کود نیتروژن (N3C2) برابر با ۱۵۱ میکروگرم در گرم و کمترین غلظت آن با مصرف ۵ درصد کمپوست و عدم مصرف کود نیتروژن (N1C3) برابر ۶۲/۲ میکروگرم در گرم به‌دست آمد. روند تغییرات غلظت روی در پایه سیترنج شبیه سیترومولو بود. در این پایه نیز در تیمارهای N3C4 و N4C4 غلظت روی برگ به بیشترین مقدار رسید با این تفاوت که این تیمارها با تیمار N3C2 تفاوت معنی داری نداشتند. مشابه سیترومولو، بیشترین غلظت مس برگ با مصرف پنج درصد کمپوست و بدون مصرف نیتروژن برابر با ۱۵/۲۴ میکروگرم در گرم بود و کمترین میزان غلظت آن با مصرف ۷/۵ درصد کمپوست و ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کود نیتروژن، ۸/۸۴ میکروگرم در گرم اندازه‌گیری شد (جدول ۵).

در پایه نارنج تغییرات غلظت آهن برگ در تیمارهای مختلف کمتر بود. بیشترین غلظت آهن برگ در تیمار مصرف ۲/۵ درصد کمپوست و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کود نیتروژن (N2C2) معادل ۸۳/۸۲ میکروگرم در گرم و کمترین غلظت آن در تیمار عدم مصرف دو کود (N1C1) برابر با ۶۱/۰۲ میکروگرم در گرم مشاهده شد. بیشترین غلظت روی در برگ بدون مصرف کمپوست و ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کود نیتروژن (۲۸/۱۴ میکروگرم در گرم) و کمترین غلظت بدون اعمال دو کود برابر با ۱۹/۹۱ میکروگرم در گرم بود. بیشترین غلظت مس برگ با مصرف ۲/۵ درصد کمپوست و بدون تأثیر کود نیتروژن برابر ۱۱/۰۶ میکروگرم در گرم بود و کمترین غلظت آن از اعمال ۷/۵ درصد کمپوست و ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کود نیتروژن (۷/۸۶ میکروگرم در گرم) به دست آمد.

مطالعه برهمکنش کود آلی به همراه آمونیوم بر غلظت فسفر برگ پسته نشان داد که آمونیوم بدون وجود کود آلی باعث افزایش غلظت فسفر برگ گردید که با آزمایش‌های سرنا و همکاران (۳۱) روی پاسخ به تیمار آمونیوم در مرکبات مطابقت دارد. مطالعات نشان می‌دهد که افزایش جزیی در جذب پتاسیم توسط گیاه می‌تواند ناشی از تغییر شکل پتاسیم از اشکال غیرقابل جذب به اشکال قابل جذب باشد (۲۵).

در پژوهشی، قابلیت جذب منیزیم و منگنز در سیترومولو کمتر از پایه‌های نارنج، کاریزو سیترنج ثبت گردید (۲۹). در رابطه با عناصر کم‌مصرف نیز مقدار آهن، روی و بور در برگ پیوندک روی پایه‌های موردبررسی در حد مطلوب، منگنز روی پایه لیمو کم‌تر از حد مطلوب و مس در تمام پایه‌ها بیشتر از حد مطلوب گزارش شد (۲۳). روی عنصری ضروری و کم‌مصرف است که در ساختار آنزیم‌هایی مانند اکسیدو-ردوکتازها، ترانس فرازها، لیازها، ایزومرازها، هیدرولازها و لیگازها شرکت داشته و در سنتز پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها، متابولیسم سلول، محافظت غشا از رادیکال‌های آزاد اکسیژن و سایر فرآیندهای مرتبط با امر سازگاری گیاهان به تنش‌ها، نقش ایفا می‌کند (۱۶).

جدول ۵- اثر متقابل نیتروژن و کمپوست بر غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف در پایه‌های سیترومِلو، سیترنج و نارنج

Table 5- The interaction effect of nitrogen and compost on micronutrients concentration in citrumelo, citrange and sour orange rootstocks

نیتروژن Nitrogen (mg/kg)	کمپوست Compost (%)	سیترنج Citrange			سیترومِلو Citrumelo			نارنج Sour Orange		
		آهن Fe	روی Zn	مس Cu	آهن Fe	روی Zn	مس Cu	آهن Fe	روی Zn	مس Cu
						(μg.g^{-1})				
0	0	116.8 ^{ab}	10.76 ^{b}	10.50 ^{b}	123 ^{bc}	8.07 ^{f}	11.54 ^{e}	61.02 ^{j}	19.91 ^{g}	9.92 $^{a-d}$
20	0	80.60 ^{cde}	10.79 ^{b}	14.63 ^{ab}	94.5 ^{e}	10.79 ^{bcd}	14.63 ^{ab}	68.88 ^{fg}	24.13 ^{ef}	10.27 ^{abc}
40	0	64.58 ^{de}	8.07 ^{b}	12.23 ^{ab}	71.0 ^{fg}	8.07 ^{f}	12.23 ^{cde}	64.29 ^{hi}	28.14 ^{a}	9.34 $^{c-f}$
80	0	65.04 ^{de}	9.72 ^{b}	14.61 ^{ab}	65.0 ^{gh}	7.87 ^{f}	14.61 ^{ab}	69.39 ^{kg}	23.63 ^{ef}	9.66 $^{b-e}$
0	2.5	84.43 ^{cde}	11.08 ^{b}	12.67 ^{ab}	89.1 ^{e}	11.08 ^{bcd}	12.67 $^{b-e}$	72.65 ^{de}	26.52 ^{abc}	11.06 ^{a}
20	2.5	93.56 ^{bcd}	9.78 ^{b}	12.65 ^{ab}	131 ^{b}	12.58 ^{b}	12.56 $^{b-e}$	83.82 ^{a}	27.41 ^{ab}	8.88 $^{d-g}$
40	2.5	114.2 ^{ab}	16.32 ^{a}	14.23 ^{ab}	138 ^{a}	16.12 ^{a}	14.23 ^{abc}	62.66 ^{ij}	21.10 ^{g}	7.99 ^{g}
80	2.5	62.08 ^{e}	11.45 ^{b}	11.34 ^{b}	66.6 ^{gh}	9.60 ^{def}	11.34 ^{e}	70.15 ^{ef}	24.85 ^{cde}	9.88 $^{a-d}$
0	5	62.20 ^{e}	9.51 ^{b}	16.39 ^{a}	62.2 ^{gh}	8.17 ^{f}	15.24 ^{a}	74.28 ^{d}	22.97 ^{f}	9.83 $^{a-d}$
20	5	64.13 ^{de}	10.48 ^{b}	11.74 ^{ab}	64.1 ^{gh}	10.48 ^{cde}	11.74 ^{e}	78.19 ^{c}	26.00 ^{bcd}	8.44 ^{efg}
40	5	68.20 ^{de}	8.90 ^{b}	11.76 ^{ab}	68.3 ^{gh}	8.93 ^{ef}	11.76 ^{e}	81.85 ^{ab}	24.80 $^{c-f}$	9.08 $^{c-g}$
80	5	66.64 ^{de}	7.97 ^{b}	14.19 ^{ab}	62.1 ^{h}	7.973 ^{f}	14.19 ^{abc}	71.30 ^{ef}	24.27 ^{def}	9.39 $^{c-f}$
0	7.5	125.3 ^{a}	11.59 ^{b}	13.40 ^{ab}	118 ^{c}	11.59 ^{bc}	13.40 $^{a-de}$	70.70 ^{ef}	24.05 ^{ef}	10.94 ^{ab}
20	7.5	77.84 ^{cde}	10.06 ^{b}	14.05 ^{ab}	77.8 ^{c}	12.49 ^{b}	14.05 $^{a-d}$	64.62 ^{hi}	27.09 ^{ab}	8.19 ^{hg}
40	7.5	97.54 ^{bc}	15.32 ^{a}	10.72 ^{b}	107 ^{d}	14.65 ^{a}	8.840 ^{f}	79.68 ^{bc}	20.01 ^{g}	7.87 ^{g}
80	7.5	88.58 $^{b-e}$	14.93 ^{a}	12.02 ^{ab}	105 ^{d}	14.93 ^{a}	12.02 ^{de}	66.84 ^{gh}	23.77 ^{ef}	8.94 $^{d-g}$

افزایش بیوسنتز اکسین در حضور عنصر روی، افزایش غلظت کلروفیل، افزایش فعالیت فسفواینول پیروات کربوکسیلاز و ریبولوز بی‌فسفات کربوکسیلاز در بافت‌های گیاهی و افزایش کارایی جذب نیتروژن و فسفر در حضور عنصر روی را سبب می‌شود (۲۷ و ۳۷). در بررسی اثر تلفیقی دو کود آلی (گوسفندی) و شیمیایی (نیتروژن) در برگ پرتقال تامسون روند افزایشی برای عنصر آهن گزارش شد (۱۴). لی‌یانگ و همکاران (۱۸) گزارش کردند که افزایش قابلیت دسترسی روی و آهن در خاک، باعث افزایش فراهمی این عناصر توسط گیاه می‌شود. در پژوهش دیگری، اثر تیمارهای کودی (آزولا، آزوکمپوست، کود گاوی و ورمی‌کمپوست و نیز کود شیمیایی کامل) بر مقدار نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در برگ و میوه کیوی معنی‌دار بود و در تمام تیمارهای کودی نسبت به شاهد (تیمار بدون کود) افزایش نشان داد. غلظت اکثر عناصر غذایی در برگ کیوی تیمار شده برای کودهای آلی (با استثناء کاربرد آزولا) بیشتر از تیمار کود شیمیایی بود (۲۲).

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی استفاده هم‌زمان از کود نیتروژن (سولفات آمونیوم) و کود کمپوست صنایع چوب و کاغذ مازندران باعث بهبود شاخص‌های رشد رویشی در دو پایه سیترنج و سیترمِلو شد. در پایه سیترومِلو، رشد ارتفاعی با افزایش سطح مصرف نیتروژن در سطوح مختلف کمپوست افزایش یافت. از روند کلی داده‌ها می‌توان دریافت که مصرف ۲/۵ درصد کمپوست بهترین رشد ارتفاعی را در این پایه ایجاد کرد.

در پایه‌های سیترومِلو و سیترنج، همراه با افزایش سطح نیتروژن روند افزایشی در تعداد برگ‌ها مشاهده شد. در پایه سیترومِلو و سیترنج بیشترین تعداد برگ، در نتیجه ترکیبی از تیمارهای کود کمپوست گرانوله گوگردی و نیتروژن به دست آمد. این نتایج مشابه گزارش‌های چاپ شده سایر محققین می‌باشد. در حالی‌که در پایه نارنج مصرف سطوح بالای کمپوست (۵ و ۷/۵ درصد) موجب کاهش شاخص‌های رشد رویشی شد. حساسیت پایه نارنج به غلظت‌های بالای کمپوست گرانوله گوگردی ممکن است به دلیل وجود ترکیبات مضری از قبیل فلزات سنگین در این کود باشد که ضرورت بررسی و تحقیق در این مورد را نشان می‌دهد.

غلظت نیتروژن برگ سیترومِلو با غلظت نیتروژن برگ در پایه‌های سیترنج و نارنج متفاوت بود و بیشترین غلظت آن در ترکیب تیماری کمپوست و نیتروژن متمایزی به‌دست آمد. داده‌های این تحقیق نشان دادند که پایه‌ها بر غلظت عناصر غذایی برگ موثر هستند. این نتیجه با نتایج سایر پژوهش‌های انجام شده روی مرکبات در تطابق است. این امر به‌وضوح تفاوت‌های ژنتیکی پایه‌ها بویژه تفاوت در توسعه سیستم ریشه‌ای و توان جذب عناصر غذایی را نشان

می‌دهد.

با توجه به شاخص‌های رشد رویشی و غلظت عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن در برگ، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برای رسیدن به رشد رویشی حداکثر در پایه سیتروملو می‌توان ۲/۵ درصد وزنی کود کمپوست تولیدی شرکت صنایع چوب و کاغذ مازندران و ۴۰ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم خاک نیتروژن مصرف کرد. همچنین در پایه‌های سیترنج و نارنج مصرف ۲/۵ درصد کود کمپوست و ۸۰ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم خاک نیتروژن بیشترین رشد رویشی در شرایطی مشابه با شرایط این پژوهش را به همراه خواهد داشت.

مصرف ۸۰ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم خاک نیتروژن، معادل ۱/۸ گرم سولفات آمونیوم، برای هر گلدان ۴/۵ کیلوگرمی (وزن تر) می‌باشد. با فرض ۱۴ هزار گلدان در هر هکتار، برای هر مرحله مصرف کود، به ۲۵/۲ کیلوگرم کود سولفات آمونیوم نیاز می‌باشد.

بنابراین بکارگیری این نتایج و پرهیز از روش مصرف سنتی و بدون محاسبه کود، می‌تواند مصرف بهینه کود نیتروژنی را در نهالستان‌های مرکبات تضمین کرده، از آبشویی و ایجاد آلودگی‌های نیتراتی آب‌های زیر زمینی ممانعت نماید. ضمن اینکه نهال‌های شاداب و عاری از کمبودهای عناصر غذایی تولید خواهد شد که به‌عنوان پایه نقش بسیار مفید و موثری در رشد رویشی و عملکرد پیوندک (ارقام مختلف مرکبات که روی این پایه‌ها پیوند زده می‌شوند) ایفا خواهد نمود.

سپاسگزاری

از کارکنان محترم ایستگاه تحقیقات باغبانی قائم‌شهر که در فراهم نمودن امکانات جهت اجرای این پژوهش همکاری لازم را مبذول داشتند تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1- Asadi Kangarshahi A., Malakouti M.J., and Emdad M.R. 2004. Effect of Irrigation Methods and Balanced Fertilization on The Yield and Water Use Efficiency of Citrus in Mazandaran. Iranian Journal of Soil and Waters Sciences 18(2): 193-197. (In Persian with English abstract)

2- Bhogal A., Nicholson F.A., Chambers B.J., and Shepherd M.A. 2003. Effects of past sewage sludge additions on heavy metal availability in light textured soils: implications for crop yields and metal uptakes. Environmental Pollution 121(3): 413-423.

3- Blake L., Mercik S., Koerschens M., Goulding K.W.T., Stempen S., Weigel A., Poulton P.R., and Powlson D.S. 1999. Potassium content in soil, uptake in plants and the potassium balance in three European long-term field experiments. Plant and Soil 2: 1-14.

4- Cáceres R., Malińska K., and Marfà O. 2018. Nitrification within composting: a review. Waste Management 72: 119-137.

5- Ch'ng H.Y., Haruna A.O., Majid N.M.N.A., and Jalloh M.B. 2019. Improving soil phosphorus availability and yield of *Zea mays* L. using biochar and compost derived from agro-industrial wastes. Italian Journal of Agronomy 141: 34-42.

6- Chen H., Jia Y., Xu H., Wang Y., Zhou Y., Huang Z., Yang L., Li Y., Chen L.-S., and Guo J. 2020. Ammonium nutrition inhibits plant growth and nitrogen uptake in citrus seedlings. Scientia Horticulturae 272: 1-10.

7- Dubey A.K., and Sharma R.M. 2016. Effect of rootstocks on tree growth, yield, quality and leaf mineral composition of lemon *(Citrus limon* (L.) Burm). Scientia Horticulturae 200: 131-136.

8- Ebadzadeh H., Ahmadi K., Mohammadinia Afrozi S., Abbastaghani R., Abbasi M., and Yari S. 2018. Agricultural Statistics of 2014-2015 Crop Year. Retrieved Aguset 29, 2020. Ministry of Agriculture Jihad. Tehran. Iran, from: https://maj.ir/Dorsapax/userfiles/Sub65/amarnamehj2-96-site.pdf (In Persian with English abstract)

9- Emami A. 1996. Methods of Plant Analysis (Vol. 2). Soil and Water Research Institute, 282p. (In Persian)

10- Estrada-Bonilla G.A., Durrer A., and Cardoso E.J. 2021. Use of compost and phosphate-solubilizing bacteria affect sugarcane mineral nutrition, phosphorus availability, and the soil bacterial community. Applied Soil Ecology 157: 103760. 1-9.

11- Florissen P. 1999. New Valencia Clones, Common Orange Varieties and Rootstocks for Improved Fresh Juice Production. Gordon, N.S.W: Horticultural Research and Development Corporation, 124p.

12- Food and Agriculture Organization. 2020. FAOSTAT. Crops country data. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available from: http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx.

13- França N.d.O., Girardi E.A., Amorim M.D.S., Gesteira A.D.S., Passos O.S., and Soares Filho W.D.S. 2018. Plant growth, yield and fruit quality of *Piemonte tangor* grafted onto 14 rootstocks on the northern coast of the state of Bahia, Brazil. Revista Brasileira de Fruticultura 40(4): 1-8.

14- Gran Malik S., Shahsavani S., and Gharanjik S. 2017. Study on the effect of chemical fertilizer and manure on the chemical properties of orange leaf (Thompson Novel). Soil Management and Sustainable Production 7(3): 91-106. (In Persianwith English abstract)

15- Hartmann H.T., and Kester D. E. 2010. Plant Propagation: Principles and Practices. 8th Ed. Pearson Prentice-Hall, 880p.

16- Hemantaranjan A. 2009. Physiology and biochemical significance of zinc in plants. In: Hemantaranjan A. (Ed.), Advancement in Micronutrient Research, Scientific Publishers 151-178.
17- Hemmat A., Aghilinategh N., Rezainejad Y., and Sadeghi M. 2010. Long-term impacts of municipal solid waste compost, sewage sludge and farmyard manure application on organic carbon, bulk density and consistency limits of a calcareous soil in central Iran. Soil and Tillage Research 108(1): 43-50.
18- Liang Yongchao Jin Si, Miroslav Nikolic Yu Peng, Wei Chen and Yun Jiang. 2005. Organic manure stimulates biological activity and barley growth in soil subject to secondary salinization. Soil Biology and Biochemistry 37(6): 1185-1195.
19- Martínez-Cuenca M.-R., Primo Capella A., and Forner-Giner M. 2016. Influence of Rootstock on Citrus Tree Growth: Effects on Photosynthesis and Carbohydrate Distribution, Plant Size, Yield, Fruit Quality, and Dwarfing Genotypes. In: E. Rigoblo (Ed.), Plant Growth, IntechOpen 107-129.
20- Martinez-Cuenca M.R., Primo-Capella A., Quinones A., Bermejo A., and Forner-Giner M.A. 2017. Rootstock influence on iron uptake responses in Citrus leaves and their regulation under the Fe paradox effect. PeerJ, 5:1-25.
21- Mousavi Dehmoradi S.Z., Gholami M., and Boninasab B. 2015. Investigating the effect of vermicompost fertilizer on the growth of sour orange (*Citrus aurantium*) rootstock. In: Proceedings of the 9th Horticulture Congress, 25-28 January., Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, pp. 212-214.
22- Naranjboni F.H., Ebrahimi R., Moradi B., and Raiesi T. 2018. Effect of fertilizer type and its source on nutrients distribution in kiwifruit leaves and fruit. Journal of Water and Soil 32(1): 59-72. (In Persian with English abstract)
23- Obreza T.T., and Morgan K.T. 2008. Nutrition of Florida Citrus Trees. 2nd Ed. EDIS, Florida, 100p.
24- Padmavathiamma P., Li, L., and Kumari U. 2008. An experimental study of vermi-biowaste composting for agricultural soil improvement. Bioresource Technology 99: 1672-1681.
25- Quaggio J.A., Souza T.R., Bachiega Zambrosi F.C., Marcelli Boaretto R., and Mattos Jr D. 2014. Nitrogen-fertilizer forms affect the nitrogen-use efficiency in fertigated citrus groves. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 1773: 404-411.
26- Raiesi T., Asadi Kangarshahi A., and Golmohammadi M. 2018. Evaluation of nutrient accumulation and translocation indices in three citrus rootstocks. Journal of Land Management 5(2): 137-150. (In Persian)
27- Ravi S., Channal H., Hebsur N., and Dharmatti P. 2010. Effect of sulphur, zinc and iron nutrition on growth, yield, nutrient uptake and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Karnataka Journal of Agricultural Sciences 21(3): 382–385.
28- Roosta H.R., Sajjadinia A., Rahimi A., and Schjoerring J.K. 2009. Responses of cucumber plant to NH_4+ and NO_3−nutrition: the relative addition rate technique vs. cultivation at constant nitrogen concentration. Scientia Horticulturae 121(4): 397-403.
29- Sadeghi H., Ali M., and Firouzjaei H. 2018. Effect of citrange, citromello and sour orange rootstocks on some morphological and physiological characteristics and minerals absorbance of limequat. Journal of Crops Improvement 20(1): 101-112. (In Persian with English abstract)
30- Sahrawat K. 2008. Factors affecting nitrification in soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis 399(10): 1436-1446.
31- Serna M., Borras R., Legaz F., and Primo-Millo E. 1992. The influence of nitrogen concentration and ammonium/nitrate ratio on N-uptake, mineral composition and yield of citrus. Plant and Soil 147(1): 13-23.
32- Sikora L.J., and Szmidt R.A. 2001. Nitrogen sources, mineralization rates, and nitrogen nutrition benefits to plants from composts. In: P. J. Stoffella and A. K. Brian (Eds.), Compost utilization in horticultural cropping systems, CRC Press, pp.287-305.
33- Soil survey laboratory staff. 1996. Soil Survey laboratory methods manual. Version 3. Soil Survey investigation. Rep. No. 42. USDA. NRCS. Lincoln, NE. p. 643.
34- Song Y., Song C., Hou A., Ren J., Wang X., Cui Q., and Wang M. 2018. Effects of temperature and root additions on soil carbon and nitrogen mineralization in a predominantly permafrost peatland. Catena 165: 381-389.
35- Toplu C., Uygur V., Kaplankıran M., Demirkeser T.H., and Yıldız E. 2012. Effect of citrus rootstocks on leaf mineral composition of ‘okitsu’, ‘clausellina’, and ‘silverhill‘.mandarin cultivars. Journal of Plant Nutrition 35: 1329–1340.
36- Turrión M.B., Bueis T., Lafuente F., López O., San José E., Eleftheriadis A., and R. Mulas 2018. Effects on soil phosphorus dynamics of municipal solid waste compost addition to a burnt and unburnt forest soil. Science of The Total Environment 642: 374-382.
37- Vojodi Mehrabani L., Valizadeh Kamran R., and Hassanpouraghdam M.B. 2017. The Effects of Relative Substitution of Organic Fertilizers on Elementes Content, Some Physiological Traits and Yield of *Lepidium sativum* L., Journal of Agricultural Science and Sustainable Production 27(3): 63-72. (In Persian with English abstract)
38- Waling I., Van Vark W., Houba V.J.G., and Van der Lee J.J. 1989. Soil and plant analysis, a series of syllabi: Part 7. Plant Analysis Procedures Wageningen Agriculture University.
39- Wutscher H., and Bowman K. 1999. Performance of Valencia'Orange on 21 Rootstocks in Central Florida.

HortScience 34(4): 622-624.
40- Xiao R., Awasthi M.K., Li R., Park J., Pensky S.M., Wang Q., and Zhang Z. 2017. Recent developments in biochar utilization as an additive in organic solid waste composting: a review. Bioresource Technology 246: 203-213.
41- Zhao W., Cai Z., and Xu Z. 2007. Does ammonium-based N addition influence nitrification and acidification in humid subtropical soils of China? Plant and Soil 297(1): 213-221.
42- Zhou X., Jia Z., and Wang D. 2018. Effects of limited phosphorus supply on growth, root morphology and phosphorus uptake in citrus rootstocks seedlings. International Journal of Agriculture and Biology 202: 431-436.

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 535-549

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۵۴۹-۵۳۵

Response of Different Citrus Rootstocks to Sulfur Granular Compost and Nitrogen

M. Mahmoudi[1*]- Sh. Kazemi[2]
Received: 08-06-2021
Accepted: 05-09-2021

Introduction: The consumption of inorganic fertilizers in agricultural ecosystems led to the destruction of soil physical, chemical, and biological characteristics and severely affected the quality of the products. Therefore, the application of compost fertilizers in agricultural lands has been widely considered, and it has been mentioned as the best environmental measure. Rootstock plays a crucial role in the growth of citrus trees. Among all the nutrients needed by citrus, nitrogen has a vital role, and a large amount of this macronutrient is supplied in the soil every year. The release of nutrients from organic matter, especially nitrogen, is slower than the nitrogen release from chemical fertilizers. Rootstock affects the photosynthetic capacity of the transplanted cultivar, which is related to the annual carbohydrate redistribution and is a determining factor for vegetative growth and reproductive development. The growth, yield and fruit quality of cultivars are, therefore, strongly regulated by rootstock. In the recent study, the effects of compost and nitrogen fertilizers on common rootstocks in Mazandaran province, including citrange, citrumelo, and sour orange, were investigated.

Materials and Methods: An experiment was conducted as a completely randomized design at Qaemshahr Horticultural Research Station. The treatments included sulfur granular compost (0, 2.5, 5, and 7.5%), produced by Mazandaran Wood and Paper Industries Company, and pure nitrogen (0, 20, 40, and 80 mg kg^{-1}) in the form of ammonium sulfate. Vegetative growth, including plant height, crown diameter, and the number of leaves, were measured. Also, to study the changes in leaf nutrient concentration, leaf samples were collected, in July and the concentration of nutrients in leaf tissue was measured. A randomized complete block design was conducted at Qaemshahr Horticultural Research Station in 2017. The treatments included sulfur granular compost (0, 2.5, 5, and 7.5%), produced by Mazandaran Wood and Paper Industries Company, and pure nitrogen (0, 20, 40, and 80 mg kg^{-1}) in the form of ammonium sulfate. One-year-old seedlings of the same size from citrange, citrumelo, and sour orange were planted in 7- kg pots containing arable soil and the treatments. The applied soil was analyzed, and its physical and chemical properties were determined. Irrigation of all pots until reaching the field capacity (weight method) was performed uniformly for all treatments. At the end of the growth period, vegetative growth parameters, including plant height, crown diameter, and the number of leaves, were measured. Also, to study the changes in leaf nutrient concentration, fully developed leaves samples were collected, in July and the concentration of nutrients was analyzed. Nitrogen was determined by the Kjeldahl method with a sulfuric acid-hydrogen peroxide mixture. Phosphorus by calorimetric, potassium using a flame photometer, and calcium, magnesium, iron, manganese, zinc, and copper were measured using the flame atomic absorption method.

Results and Discussion: Results showed that the highest nitrogen concentrations in citrange and citrumelo seedlings were 2.92 and 2.97% due to 40 and 80 mg kg^{-1} N and 2.5% compost, respectively. In citrumelo rootstock, plant height increased with enhancing nitrogen application levels at different compost levels. Compost levels did not show a significant increase in citrange height, but the highest height growth was observed at 40 and 80 mg kg^{-1} nitrogen. In the sour orange rootstock, consumption of high levels of compost and nitrogen significantly reduced plant height. In all three rootstocks, the highest concentrations of potassium were observed in high levels of compost and no nitrogen application. The concentration of iron and zinc in citrumelo leaves increased with increasing compost levels. The trend was different in citrumelo so that consumption of 2.5% compost and 40 mg nitrogen fertilizer showed the highest concentration of leaf iron (151 µg g^{-1}), while the application of 5% compost without nitrogen reduced the concentration of iron to 62.2 µg g^{-1}. Changes in citrange zinc concentration were similar to citrumelo. In sour orange, iron concentration changed limitedly and ranged from 83.8 µg g^{-1} in 2.5% compost and 20 mg kg^{-1} nitrogen fertilizer to 61 µg g^{-1} in control. In this rootstock, the

۱- Research Assistant Professor, Soil and Water Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Sari, Iran
(*- Corresponding Author Email: m.mahmoudip@areeo.ac.ir)
۲- Assistant Professor, Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Iran
DOI: 10.22067/JSW.2021.70354.1053

highest concentration of zinc was obtained from no compost application and 40 mg kg^{-1} nitrogen (28.14 µg g^{-1}), whereas the lowest concentration of iron was observed in control. Citrange seedlings performed better in nutrient uptake than citrumelo and sour orange seedlings. Consumption of 5 and 7.5% levels of compost in sour orange rootstock reduced plant height and crown diameter and caused rosette, led to an increase in the number of leaves. The most effective level of nitrogen in sour oranges was 80 mg kg^{-1} nitrogen. Application of 80 mg kg^{-1} nitrogen and 2.5% compost, and 80 mg kg^{-1} nitrogen and 5% compost led to the highest number of leaves in citrumelo and citrange rootstocks, respectively.

Conclusion: According to vegetative growth and concentration of nutrients data, especially from the nitrogen concentration point of view, maximum vegetative growth was obtained in citrumelo rootstock from 2.5% compost and 40 mg kg^{-1} nitrogen treatment and in citrange and sour orange rootstocks from 2.5% compost and 80 mg kg^{-1} nitrogen treatment.

Keywords: Citrange, Citrumelo, Leaf nutrient composition, Sour orange, Vegetative growth

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 551-566

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۵۶۶-۵۵۱

مقاله پژوهشی

مدیریت زیستی فرسایش خاک
(مطالعه موردی: حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه)

سیدحمیدرضا صادقی[۱*]- عاطفه جعفرپور[۲]- مصیب فرج‌الهی[۳]- دنیا خطیبی‌رودبارسرا[۳]- مژگان مرادی‌سفیدچقائی[۳]- مصطفی ذبیحی‌سیلابی[۴]- محمد خسروی[۵]- انشاءالله کولانی[۶]- بابک محمدی[۷]- محمدجواد ادیبی[۸]- هومن آذرنیا[۹]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹

چکیده

حفظ منابع آب‌وخاک با استفاده از روش‌های سازه‌ای و زیستی امکان‌پذیر است. حال با توجه به اینکه روش‌های زیستی مبتنی بر شرایط حاکم بر بوم‌سازگان است، اهمیت ویژه‌ای در مهار فرسایش خاک در مراحل ابتدایی دارد. باوجوداین، استقبال لازم از مدیریت زیستی فرسایش خاک به سبب عدم الگوی اجرایی مناسب توسط کارشناسان اجرایی صورت نگرفته است. ازاین‌رو، پژوهش حاضر باهدف مدیریت زیستی فرسایش در حوزه آبخیز گاوشان واقع در غرب استان کرمانشاه و با مساحت ۷۷۳۶ هکتار به سبب وجود فرسایش سطحی و قابل مدیریت و هم‌چنین اطلاعات در دسترس انجام شد. در این راستا پس از تعیین وضعیت فرسایشی، ویژگی‌های اقلیمی و شرایط رشد گیاهی، رویه اجرایی مدیریت زیستی منطقه پیشنهاد شد. نتایج ضمن گزارش غالبیت فرسایش سطحی، بر قرارگیری وضعیت فرسایشی در طبقه کم و متوسط و طبعاً قابلیت انجام رویکردهای زیستی در آبخیز مزبور مبتنی بر نقشه اقلیمی-کشاورزی تأکید داشت. در همین راستا، مراتع متوسط و ضعیف با مساحت حدود ۴۲۱۹ هکتار و گستره بیش از ۵۴ درصد از آبخیز برای انجام اقدامات زیستی در نظر گرفته شد. هم‌چنین نتایج تقسیم‌بندی رده‌های اقلیمی-کشاورزی آبخیز مطالعاتی را به پنج رده همگون تقسیم کرد. درنهایت برنامه اجرایی مدیریت زیستی فرسایش آبخیز گاوشان بر اساس جامعه‌شناسی گیاهی و توقعات بوم‌شناسی مربوطه در رده‌های اقلیمی-کشاورزی ارائه شد. استفاده از گونه‌های بومی در آبخیز مطالعاتی با افزایش سطح پوشش زمینه‌ساز ایجاد تعادل بوم‌شناختی و درعین‌حال حفاظت از منابع پایه آب، خاک و پوشش گیاهی خواهد شد. نتایج پژوهش حاضر به‌عنوان پژوهشی پیشگام می‌تواند در مدیریت زیستی منابع خاک‌وآب نواحی غرب کشور با شرایط بوم‌سازگانی مشابه مورداستفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: حفاظت سازگار خاک، پهنه‌بندی زیست‌اقلیمی، مدیریت پوشش گیاهی، مهندسی زیستی فرسایش

۱، ۲، ۳ و ۴- به‌ترتیب استاد، دانش‌آموخته دکتری، دانشجویان کارشناسی ارشد و دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Sadeghi@modares.ac.ir)
۵- استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران
۶- کارشناس مرتع‌داری، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کرمانشاه
۷- کارشناس ارشد مدیریت مناطق بیابانی، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کرمانشاه
۸- کارشناس ارشد آبخیزداری، اداره منابع طبیعی شهرستان سنقر
۹- دانش‌آموخته کارشناسی خاک‌شناسی، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

DOI: 10.22067/JSW.2021.70989.1060

مقدمه

یکی از مهم‌ترین علل تخریب زمین[1] و کاهش حاصلخیزی فرسایش خاک است که خطری جدی برای رفاه انسان و تهدید امنیت غذایی است (۴۱). با تشدید فرسایش و حمل رسوب در سطح حوزه آبخیز از کیفیت آب کاسته شده، تولید رسوب و خطرات ناشی از سیل افزایش پیدا می‌کند (۲۶). در همین راستا توجه به حفاظت منابع خاک‌وآب از ضروری‌ترین اقدامات مهار فرسایش است (۳۱). به‌طوری‌که با حفاظت خاک و جلوگیری از رخداد و تشدید فرسایش عملکرد بوم‌سازگان‌های[2] طبیعی افزایش می‌یابد (۱۳). بنابراین آگاهی از مراحل مختلف فرسایش و ارزیابی عوامل حاکم بر آن در مدیریت صحیح منابع خاک‌وآب در یک حوزه آبخیز ضروری است (۶).

طی سالیان اخیر روش‌های گسترده‌ای برای حفاظت از منابع آب‌وخاک در عرصه عمل معرفی و استفاده‌شده‌اند. در این خصوص اگرچه استفاده از افزودنی‌ها و اصلاح‌کننده‌های زیستی همچون کاه و کلش (۳۳)، لجن فاضلاب (۳۴)، خزه خشک‌شده (۸) اهداف موردنظر در زمینه کاهش هدررفت خاک و رواناب را تا حدودی تأمین کرده اما محدودیت‌هایی در رابطه با آلودگی، تخریب زیستگاه‌ها و بوم‌سازگان‌های طبیعی، مصرف زیاد انرژی و تهدید سلامت بشر داشته‌اند (۱۰). بر همین مبنا در برنامه‌ریزی حفاظت و احیای حوزه آبخیز طرح‌های خاصی موردنیاز است که نیازهای واقعی شرایط حوزه را در نظر گرفته و به شکلی انجام شود که تطابق کامل با شرایط منطقه را داشته باشد. ازاین‌رو، یکی از مهم‌ترین روش‌های حفاظت منابع خاک‌وآب استفاده از روش‌های زیستی[3] به لحاظ استفاده کم از عملیات خاک‌ورزی[4]، دخالت و دست‌کاری محدود در طبیعت، مقرون‌به‌صرفه بودن (۳۲) و هم‌چنین کارایی بهتر نسبت به اقدامات سازه‌ای است (۱۶ و ۲۰). در این راستا، اساس مدیریت زیستی فرسایش با استفاده از افزایش پوشش گیاهی (۲۲)، کاشت گونه گیاهی بومی (۲۸)، تقویت پوسته‌های زیستی[5] مانند خزه (۱ و ۱۴)، گل‌سنگ (۴۵)، سیانوباکتری و باکتری (۳۵، ۳۸)، ایجاد خاک‌پوش[6] زیستی (۲۱)، طرح‌های مدیریتی چرا و قرق (۱۸) است که باعث مدیریت مناسب حوزه‌های آبخیز از طریق کاهش میزان فرسایش و هدررفت خاک (۳۵ و ۳۶)، کاهش رواناب و افزایش نفوذ (۴۴)، ترسیب کربن و تثبیت نیتروژن (۷ و ۲۵) و نهایتاً حفظ و ارتقای سلامت بوم‌سازگان (۵) می‌شود. درهرحال باید توجه داشت که برای استفاده از روش‌های زیستی توجه به مراحل مختلف فرآیند فرسایشی شامل فرسایش‌های پاشمانی، سطحی، بین‌شیاری و فرسایش‌های توسعه‌یافته ضروری است و هر چه اقدامات موردنیاز در مراحل ابتدایی انجام شود نتیجه و اثربخشی مطلوب‌تری خواهد داشت. طبیعی است با تشدید فرسایش و افزایش تمرکز آن، استفاده از روش‌های مهندسی آبخیزداری به همراه روش‌های زیستی ضرورت بیش‌تری خواهد داشت (۳۷). در این خصوص، ارائه الگوهای اجرایی و ترویج مدیریت زیستی فرسایش خاک در مقیاس آبخیز برای ترسیم برنامه‌های جامع اجرایی حفاظت خاک‌وآب ضروری است. بر همین اساس در پژوهش حاضر، ارائه چارچوب اجرایی مدیریت زیستی فرسایش خاک برای حوزه آبخیز گاوشان واقع در استان کرمانشاه به سبب وجود داده‌های قابل‌دسترس همچون داده‌های اقلیمی، ویژگی‌های پوشش گیاهی، نقشه‌های پایه و به‌عنوان نماینده بخش عمده‌ای از مناطق غرب کشور برنامه‌ریزی و انجام شد. انتظار می‌رود نتایج پژوهش حاضر نیازهای مورد توقع در حفاظت منابع خاک‌وآب در آبخیز مطالعاتی و آبخیزهای مشابه در غرب کشور را برآورده سازد.

مواد و روش‌ها

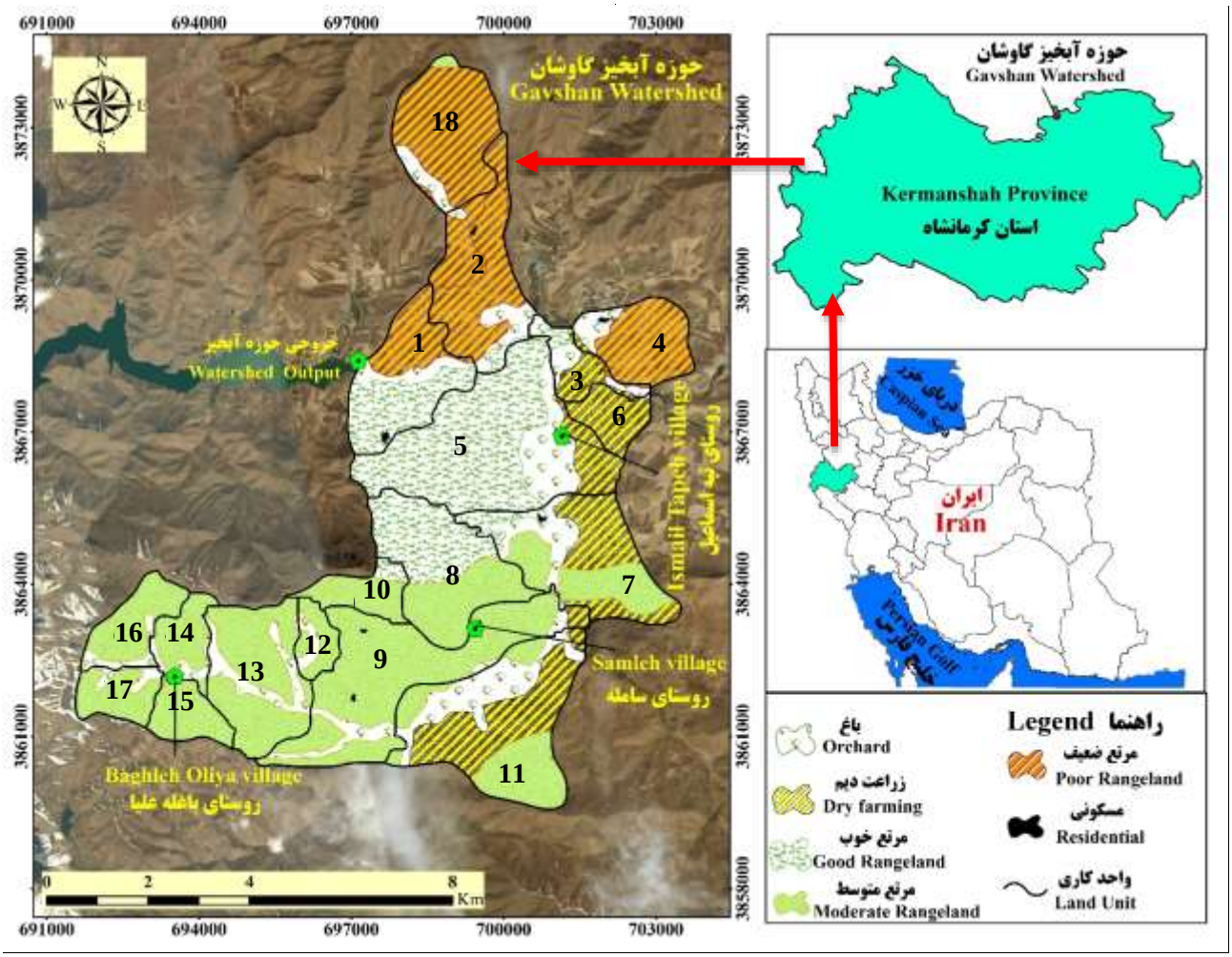
منطقه موردمطالعه

حوزه آبخیز گاوشان (۴۷°۵'۴۳" تا ۴۷°۱۳'۵۵" طول و ۳۴°۵۱'۲۸" تا ۳۴°۵۹'۴۴" عرض جغرافیایی) با مساحت حدود ۷۷۳۶ هکتار، متوسط بارندگی سالانه منطقه حدود ۳۳۹ میلی‌متر، کمینه و بیشینه ارتفاع آبخیز به ترتیب ۱۶۳۵ و ۲۴۵۵ متر از سطح دریا در غرب شهرستان سنقر وکلیایی در استان کرمانشاه قرارگرفته است. این آبخیز از شمال و غرب با مرز استان کردستان، از جنوب با روستاهای قلاق سردار اشرف، کشکمیر علیا و چشمه رنگی و از شرق با روستاهای سرخم، باقرآباد سامله و خلیفه باپیر مجاور است (۲۳).

روش انجام پژوهش

به‌منظور انجام پژوهش، روش الگویی ارائه‌شده توسط صادقی و همکاران (۳۷) با تلاش مضاعف در تکمیل کاستی‌های احتمالی استفاده شد. به همین منظور، ابتدا نقشه واحدهای کاری از ترکیب لایه‌های اطلاعاتی سنگ‌شناسی، قابلیت اراضی و شیب استخراج شد (۳۹). ازآنجایی‌که در آبخیز مطالعاتی، لایه سنگ‌شناسی و قابلیت اراضی یک رده بود از سایر لایه‌های اطلاعاتی شامل ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت شیب با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای تهیه واحدهای کاری مناسب استفاده شد.

1- Land Degradation
2- Ecosystem
3- Biological measures
4- Tillage
5- Bio-crust
6- Mulch



شکل ۱- موقعیت و واحدهای کاری حوزه آبخیز گاوشان در استان کرمانشاه و کشور

Figure 1- An overview of the Gavoshan Watershed in the Kermanshah Province, Iran

جدول ۱- مساحت کاربری‌های مختلف در حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه

Table 1- Area of different Land-uses in the Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran

کاربری Land-use	باغ Orchard	کشاورزی دیم و آبی Rainfed and irrigated agriculture	مسکونی Residential	مرتع خوب Good rangeland	مرتع متوسط Moderate rangeland	مرتع ضعیف Poor rangeland
مساحت (هکتار) Area (ha)	1107.14	968.65	22.08	1406.24	2843.30	1375.47

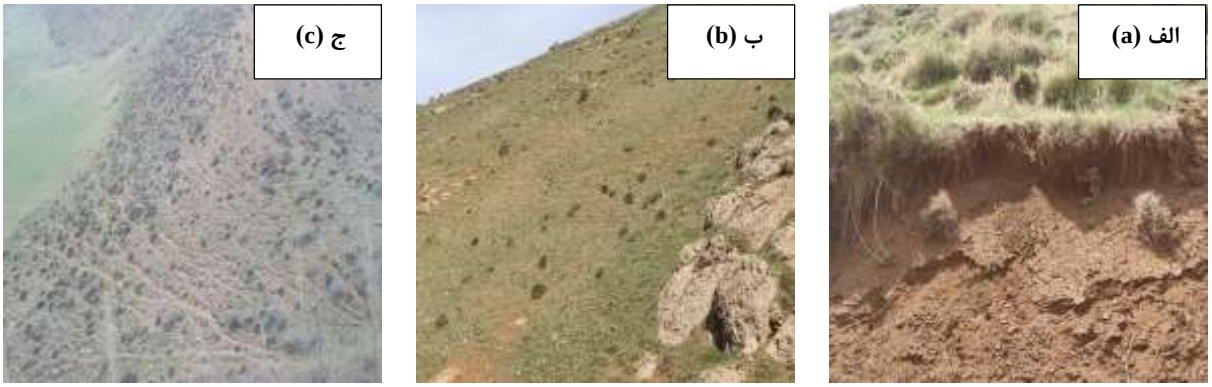
سپس اصلاحات لازم در نقشه واحدهای کاری از طریق ادغام واحدهای با مساحت کم‌تر از ۴۰ هکتار در نزدیک‌ترین واحد کاری انجام و نهایتاً ۱۸ واحد کاری باقابلیت انجام اقدامات مدیریت زیستی در اقدامات مدیریتی اجرایی حوزه آبخیز استخراج شد. در شکل ۱ موقعیت عمومی و واحدهای کاری و در جدول ۱ مساحت کاربری اراضی آبخیز مطالعاتی ارائه‌شده است. در ادامه به‌منظور تعیین وضعیت فرسایشی در هر واحد کاری با بازدید صحرایی در تمام زیرحوزه‌های آبخیز مطالعاتی و تهیه عکس با استفاده از روش BLM [1] (۱۱، ۳۷ و ۳۹) بر اساس نظرات کارشناسی حدود ۱۰ نفر، جدول مربوطه برای هر یک از واحدهای کاری تکمیل و میانگین گرفته شد.

1- Bureau of Land Management (BLM)

جدول ۲- امتیازدهی فرسایش خاک در واحدهای کاری حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه

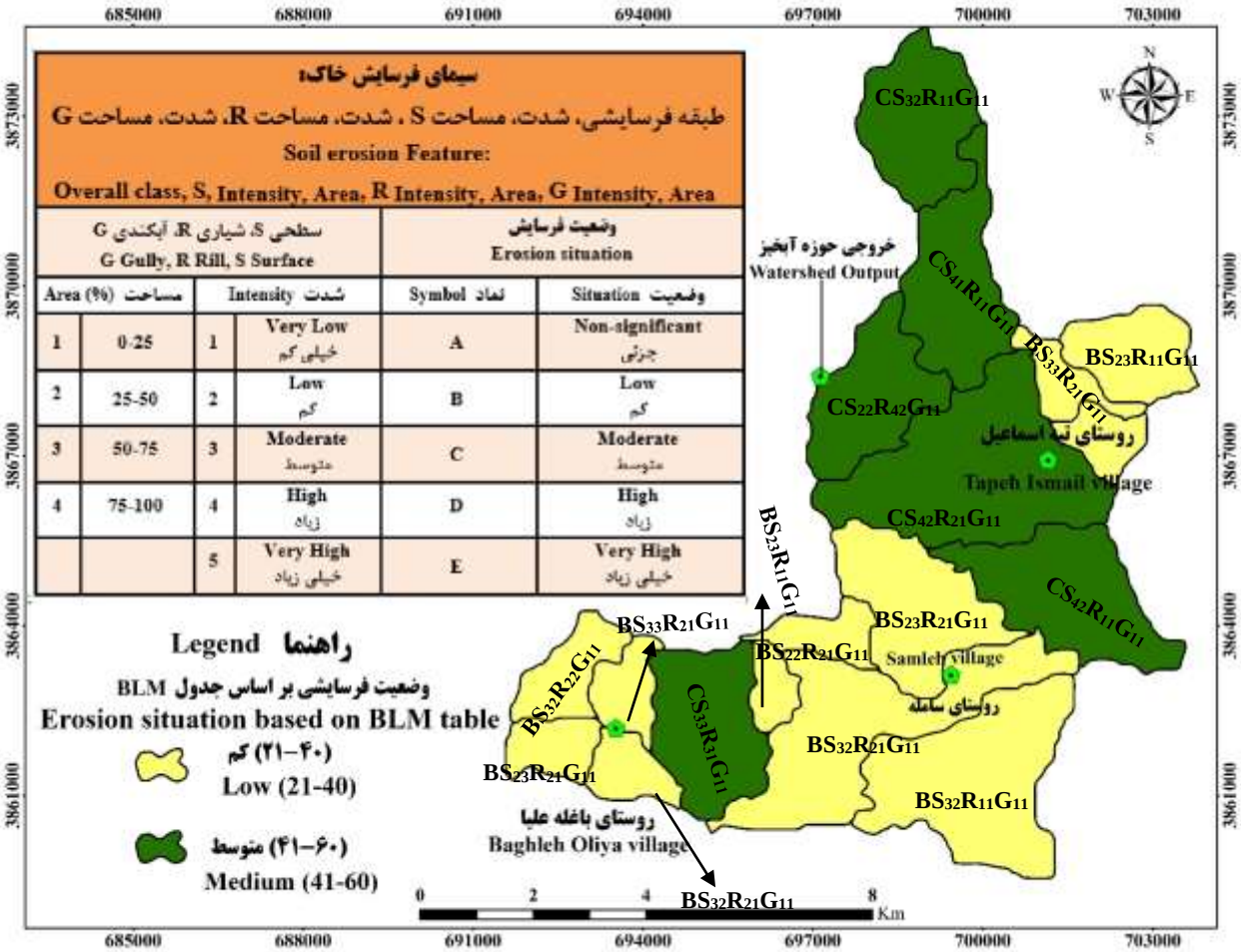
Table 2- Soil erosion scoring in land units of the Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran

وضعیت فرسایشی Erosion Status	جمع امتیازات Total Points	فرسایش آبکندی Gully erosion	شکل آبراهه Ravine form	فرسایش شیاری Rill erosion	مجسمه‌های فرسایشی Pedestals erosion	وضعیت سنگ و سنگ‌ریزه Rock Status	بقایای گیاهی Plant remnants	حرکت خاک Soil movement	واحد کاری Land unit
متوسط Moderate	41	1	8	14	5	3	5	5	1
متوسط Moderate	49	1	8	1	5	12	12	10	2
کم Low	29	1	7	3	5	5	4	4	3
کم Low	28	1	4	1	2	10	3	7	4
متوسط Moderate	43	2	8	3	13	5	4	8	5
کم Low	33	3	4	2	3	6	12	3	6
متوسط Moderate	44	1	4	4	13	2	12	8	7
کم Low	30	1	4	3	7	7	3	5	8
کم Low	28	1	5	2	4	6	3	7	9
کم Low	27	1	4	3	3	8	4	4	10
کم Low	33	1	4	3	8	5	4	8	11
کم Low	25	1	6	2	5	2	5	4	12
متوسط Moderate	47	1	12	9	5	5	5	10	13
کم Low	37	3	9	3	3	2	12	5	14
کم Low	33	3	4	3	5	6	4	8	15
کم Low	37	1	7	4	4	8	4	9	16
کم Low	28	1	7	3	3	6	4	4	17
متوسط Moderate	41	1	8	4	5	12	5	6	18



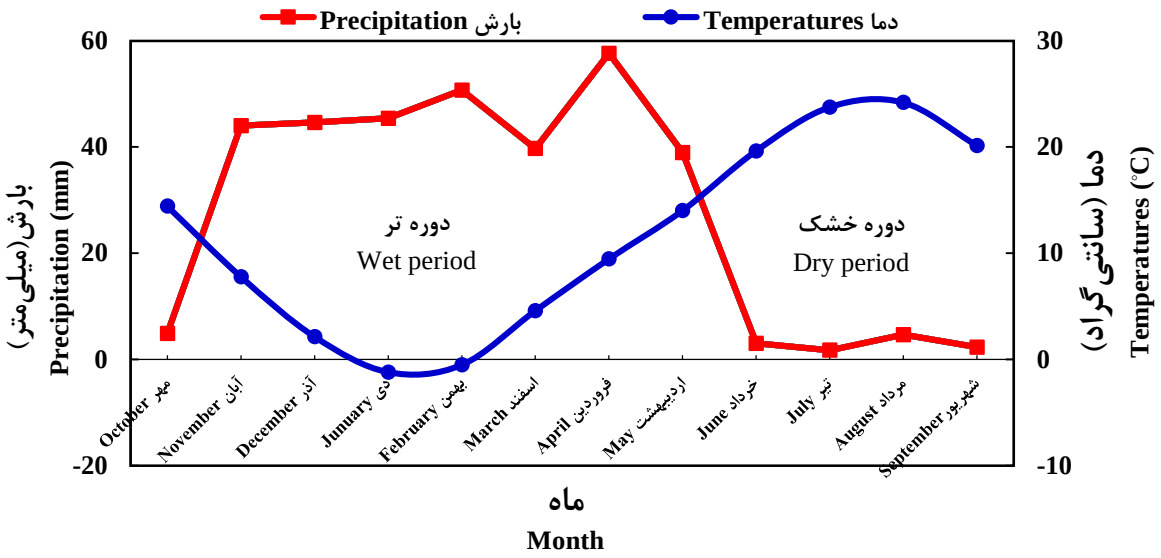
شکل ۲- نمایی از نقش حفاظتی پوشش گیاهی (الف)، فرسایش سطحی (ب) و تختانک (ج)
در حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه

Figure 2- Views of conservation role of vegetation cover (a), sheet erosion (b) and terracette (c) in the Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran



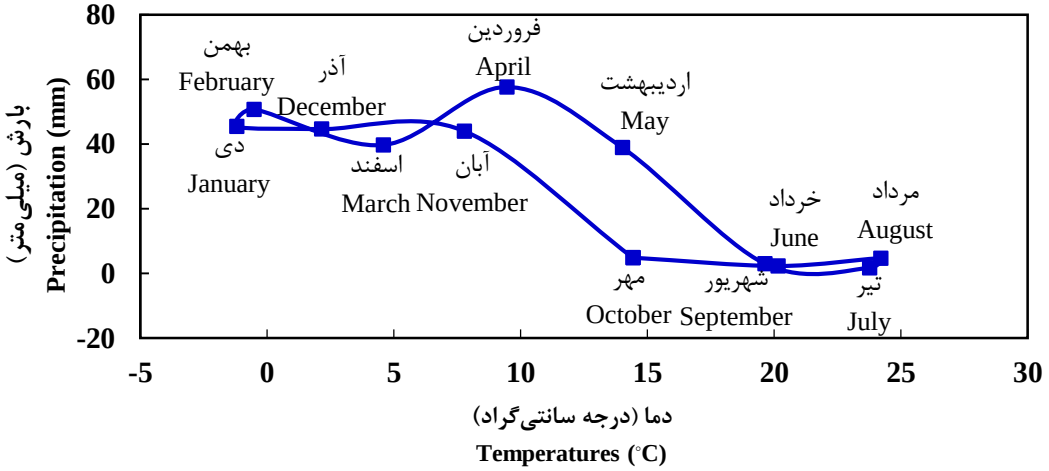
شکل ۳- نقشه وضعیت فرسایشی حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه

Figure 3- Soil erosion map of the Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran



شکل ۴- نمودار آمبروترمیک حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه

Figure 4- Ombrothermic diagram of the Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran



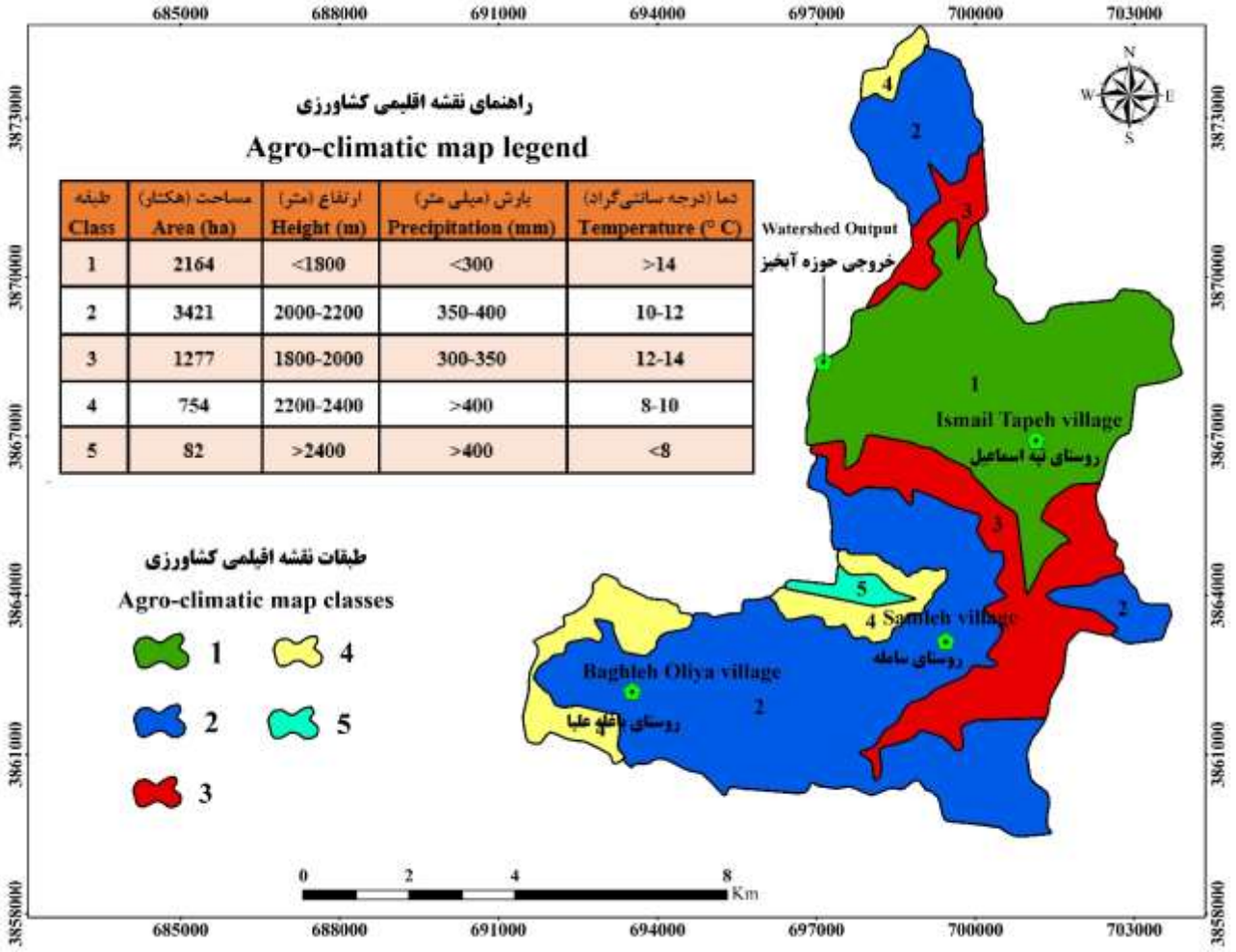
شکل ۵- هایترگراف حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه

Figure 5- Hythergraph of the Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran

پس از تکمیل جدول BLM، وضعیت فرسایشی با لحاظ نوع، شدت و مساحت انواع فرسایش (سطحی، شیاری و آبکندی) در واحدهای کاری تعیین شد. در ادامه با استفاده از داده‌های ۲۵ ساله موجود (۱۳۶۷ تا ۱۳۹۲) به تهیه نمودار آمبروترمیک و هایترگراف آبخیز مطالعاتی اقدام شد (۹). در همین راستا و باهدف تهیه نقشه اقلیمی-کشاورزی[1]، از ایستگاه‌های اطراف آبخیز مطالعاتی برای تهیه لایه‌های دما، بارش و تبخیر به روش زمین‌آمار و لایه رطوبت نسبی به سبب کوچک بودن آبخیز مطالعاتی و تغییراتی کم رطوبت نسبی از روش تیسن استفاده شد (۱۲، ۱۹ و ۳۷). نتایج نشان داد رطوبت نسبی و تبخیر در واحدهای مختلف کاری آبخیز گاوشان به‌طور متوسط مشابه بوده و در یک طبقه قرارگرفته است که به ترتیب برابر با ۶۴/۹ درصد و ۱۶۱/۵ میلی‌متر در سال گزارش‌شده است (۱۷). سپس پهنه‌بندی استفاده از گونه‌های گیاهی مرتعی مناسب در آبخیز مطالعاتی با توجه به مطالعات جامعه‌شناسی گیاهی، فیزیوگرافی، ارتفاع، اقلیم (بارش و درجه حرارت)، دوره رشد[2]، نقش حفاظتی گونه‌های انتخابی در مهار انواع مختلف فرسایش و طبیعتاً در تطابق با توقعات بوم‌شناسی، در مقیاس واحدهای کاری ارائه شد (۳۷).

1- Agroclimatic map

2- Phenology



شکل ۶- نقشه اقلیمی-کشاورزی حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه

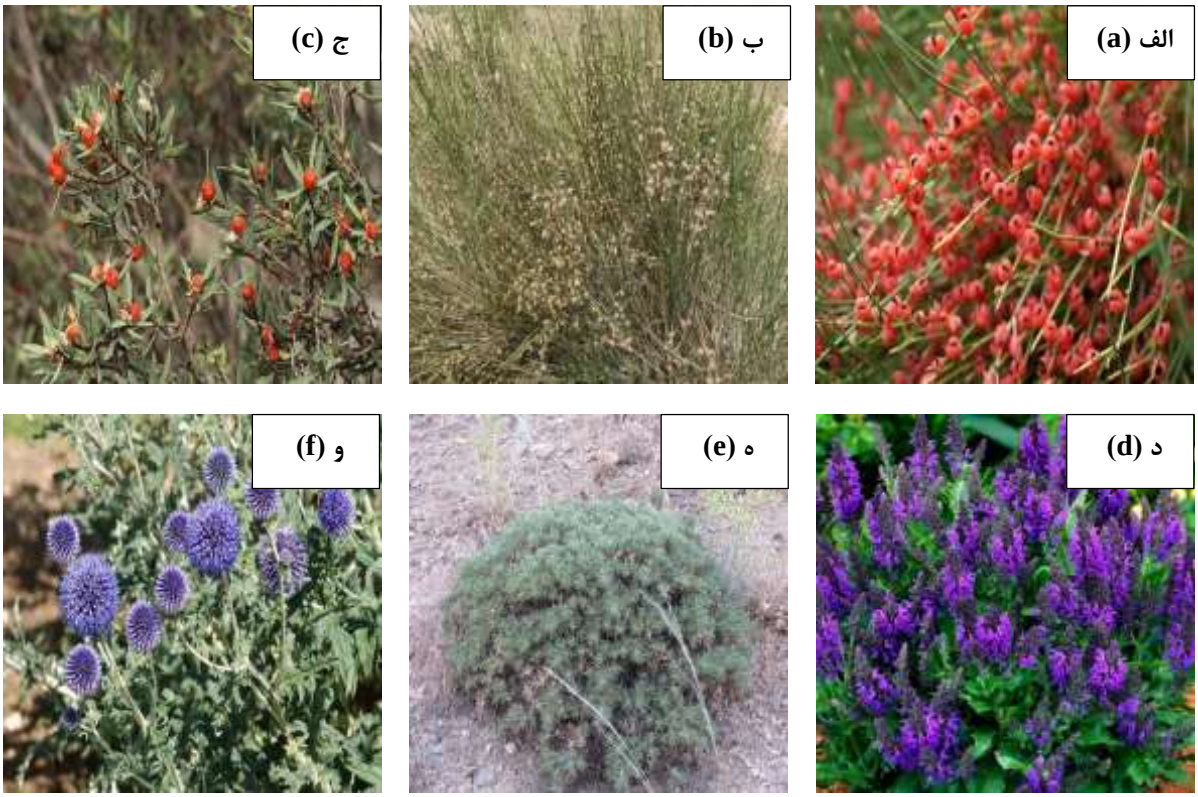
Figure 6- Agro-climatic map of the Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran

نتایج و بحث

پژوهش حاضر باهدف مدیریت زیستی فرسایش در حوزه آبخیز گاوشان انجام پذیرفت. در این خصوص و بر اساس روش کار ارائه‌شده، ابتدا نتایج تکمیل امتیازدهی BLM به‌صورت ارائه‌شده در جدول ۲ نشان داد که وضعیت فرسایشی در طبقه کم و متوسط قرار دارد. هم‌چنین نتایج نشان داد که فرسایش سطحی در منطقه غلبه دارد و لذا تناسب شرایط برای اقدامات مدیریت زیستی مورد تائید قرار گرفت. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب شرایط غالب فرسایشی و وضعیت فرسایشی واحدهای کاری آبخیز مطالعاتی را نشان می‌دهند.

هم‌چنین نمودار آمبروترمیک و هایترگراف به‌منظور تعیین دوره مرطوب و خشک سال و تغییرات دمایی و بارشی و برای آگاهی از شرایط اقلیمی گونه‌های غالب به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه‌شده است. نتایج نشان داد ماه‌های خشک آبخیز گاوشان خرداد، تیر، مرداد و شهریور است. هم‌چنین شکل ۵ نشان داد که از ماه آبان تا اردیبهشت تغییرات دمایی نسبت به بارش بیش‌تر و از ماه خرداد تا مهر تغییرات دمایی و بارشی تقریباً مشابه هستند و به‌طورکلی تغییرات دما نسبت به بارش بیش‌تر است. در ادامه به‌منظور انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب اقدام به تهیه نقشه اقلیمی-کشاورزی به‌صورت ارائه‌شده در شکل ۶ شد. نتایج نشان داد بر اساس نقشه اقلیمی-کشاورزی، آبخیز مطالعاتی به پنج رده تقسیم‌شده است. در همین راستا رده دو با مساحت ۳۴۲۱ هکتار بیش‌ترین و رده پنج با مساحت ۸۲ هکتار کم‌ترین مساحت را داشته‌اند.

با توجه به‌این‌که اقدامات مدیریت زیستی در کاربری مرتع قابل‌اجراست، مراتع خوب به لحاظ وجود پوشش گیاهی متراکم و مناسب صرف‌نظر و مراتع متوسط و ضعیف در اولویت قرار گرفت (۳۷).



شکل ۷- نمایی از برخی از گونه‌های غالب ریش‌بز (الف)، بادام‌کوهی (ب)، زالزالک (ج)، مریم‌گلی (د)، گون کتیرا (ه) و شکرتیغال(و) در حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه

Figure 7- A view of some of the dominant species of *Ephedra sinica* (a), *Amygduluse orintalis* (b), *Crataegus azarolus* (c), *Salvia officinalis* (d), *Astragalus gossypinus* (e) and *Echinops robustus* (e) in Gavoshan watershed, Kermanshah Province

جدول ۳- مشخصات گونه‌های مناسب مدیریت زیستی فرسایش در حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه

Table 3- Characteristics of suitable species for biologic management of soil erosion in the Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran

نام فارسی Persian name	نام علمی Scientific name	ویژگی‌های فیزیکی و زیستی منطقه Physical and biological characteristics of the area	
		اقلیم Climate	خشک و نیمه‌خشک Dry and semi-dry
		ارتفاع (متر) Height (m)	1850-2700
		دما (درجه سانتی‌گراد) Temperature (°C)	-30-40
بادام‌کوهی	*Amygduluse orintalis*	بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	300-400
		خصوصیات ظاهری و مراحل رشد Appearance and phenology	درختچه با ارتفاع حدود ۳ متر و زمان کاشت در پاییز قبل از سرمای زمستان Shrubs with a height of about 3 m and planting time in the auttnmn

ادامه جدول ۳- مشخصات گونه‌های گیاهی غالب در حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه

Continuation of Table 3- Characteristics of suitable species for biologic management of soil erosion in the Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran

نام فارسی Persian name	نام علمی Scientific name	ویژگی‌های فیزیکی و زیستی منطقه Physical and Biological Characteristics of the Area	
		نقش حفاظتی در کاهش فرسایش Conservation role in reducing erosion	شاخه‌های انبوه و گسترده و ریشه‌های انبوه و گسترده مؤثر در حفاظت خاک (۴۳) Dense branches and roots and effective in soil conservation
		رده اقلیمی- کشاورزی Agro-climatic class	2 &3
دافنه	*Daphne macronata*	اقلیم Climate	خشک و نیمه‌خشک Dry and semi-dry
		ارتفاع (متر) Height (m)	1700-2700
		دما (درجه سانتی‌گراد) Temperature (°C)	2-22
		بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	400-800
		خصوصیات ظاهری و مراحل رشد Appearance and phenology	گیاهی پایا با بوته‌های چوبی یا نیمه یا درختچه‌هایی به ارتفاع ۱ تا ۲ متر، ساقه متعدد و منشعب، کاشت از طریق قلمه و گل‌دهی از اردیبهشت تا خرداد semi-shrubs or shrubs with 1 to 2 meters high, multiple stems and branches, planting through from May to June
		نقش حفاظتی در کاهش فرسایش Conservation role in reducing erosion	با عمق ریشه‌دوانی زیاد و زمینه‌ساز تحکیم ساختمان خاک (۲) high root depthl and effective in soil structure consolidation
		رده اقلیمی- کشاورزی Agro-climatic class	2,4 &5
درمنه دشتی	*Artemisia siberi*	اقلیم Climate	خشک و نیمه‌خشک Dry and semi-dry
		ارتفاع (متر) Height (m)	600-1700
		دما (درجه سانتی‌گراد) Temperature (°C)	10-19
		بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	> 100
		خصوصیات ظاهری و مراحل رشد Appearance and phenology	انشعابات متعدد و متراکم و بوته‌ای شکل با ارتفاع ۳۰-۵۰ سانتی‌متر، دارای ساقه زیرزمینی ضخیم و جزو گیاهان مقاوم به خشکی Dense branches and shrubs with 30 to 50 cmeters high, drought tolerant plants

ادامه جدول ۳- مشخصات گونه‌های گیاهی غالب در حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه

Continuation of Table 3- Characteristics of suitable species for biologic management of soil erosion in the Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran

نام فارسی Persian name	نام علمی Scientific name	ویژگی‌های فیزیکی و زیستی منطقه Physical and Biological Characteristics of the Area	
		نقش حفاظتی در کاهش فرسایش Conservation role in reducing erosion	برخوردار از سطح تاج پوشش مطلوب و مؤثر در کاهش رواناب، ممانعت از فرسایش سطحی خاک و توان بالایی در ترسیب کربن اتمسفری (۱۵) favorable canopy surface and effective in reducing runoff and surface erosion and high power in precipitation of atmospheric carbon
		رده اقلیمی- کشاورزی Agro-climatic class	3
ریش‌بز	*Ephedra sinica*	اقلیم Climate	خشک و نیمه‌خشک Dry and semi-dry
		ارتفاع (متر) Height (m)	800-1800
		دما (درجه سانتی‌گراد) Temperature (°C)	2-25
		بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	> 300
		خصوصیات ظاهری و مراحل رشد Appearance and phenology	به‌صورت بوته‌ای و درختچه‌ای و ارتفاع کم‌تر از یک متر shrubs and bushes and height <1 m
		نقش حفاظتی در کاهش فرسایش Conservation role in reducing erosion	سامانه ریشه‌ای بسیار فعال و انشعابات وسیع در پیرامون خود و مؤثر در حفاظت خاک (۴) Highly active root system and effective in soil conservation
		رده اقلیمی- کشاورزی Agro-climatic class	2, 3, 4 &5
زالزالک	*Crataegus azarolus*	اقلیم Climate	خشک و نیمه‌خشک Dry and semi-dry
		ارتفاع (متر) Height (m)	2000-2500
		دما (درجه سانتی‌گراد) Temperature (°C)	4-21
		بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	300-400
		خصوصیات ظاهری و مراحل رشد Appearance and phenology	ارتفاع ۲ تا ۴ متر، تاج پوشش زیاد و مقاومت بالا به خشکی و قابل رشد در انواع خاک‌ها Height 2 - 4 m, high canopy, high drought resistance and can grow in a variety of soils
		نقش حفاظتی در کاهش فرسایش Conservation role in reducing erosion	برخوردار از ریشه‌های بسیار عمیق و مؤثر در حفظ خاک در مناطق کوهستانی (۲۹، ۳۰) Highly deep root system and effective in soil conservation in mountainous areas

ادامه جدول ۳- مشخصات گونه‌های گیاهی غالب در حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه

Continuation of Table 3- Characteristics of suitable species for biologic management of soil erosion in the Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran

نام فارسی Persian name	نام علمی Scientific name	ویژگی‌های فیزیکی و زیستی منطقه Physical and Biological Characteristics of the Area	
		رده اقلیمی- کشاورزی Agro-climatic class	2 & 3
شکرتیغال	*Echinops robustus*	اقلیم Climate	خشک و نی‌مه‌خشک Dry and semi-dry
		ارتفاع (متر) Height (m)	> 1800
		دما (درجه سانتی‌گراد) Temperature (°C)	13-19
		بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	> 100
		خصوصیات ظاهری و مراحل رشد Appearance and phenology	گیاهی علفی چندساله با ارتفاع متوسط ۵۰ سانتی‌متر و مقاوم به گرمای شدید و کم‌آبی Grass plant with an average height of 50 cm, resistant to extreme heat and low water
		نقش حفاظتی در کاهش فرسایش Conservation role in reducing erosion	سامانه ریشه‌ای قوی و جذب آب زیاد (۳). Strong root system and high water absorption
		رده اقلیمی- کشاورزی Agro-climatic class	3
گون کتیرا	*Astragalus gossypinus*	اقلیم Climate	سرد و نیمه‌خشک Cold and semi-dry
		ارتفاع (متر) Height (m)	2000-3500
		دما (درجه سانتی‌گراد) Temperature (°C)	9-13
		بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	223-362
		خصوصیات ظاهری و مراحل رشد Appearance and phenology	گیاهی بوته‌ای با ارتفاع ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر، رشد اولیه از اواسط فروردین تا اواسط اردیبهشت Shrub plant with a height of 10 to 15 cm, initial growth from mid-April to mid-May
		نقش حفاظتی در کاهش فرسایش Conservation role in reducing erosion	سامانه ریشه‌ای بسیار پیچیده با عمق نفوذ ۶ تا ۸ متر در خاک، قابلیت حفظ خاک تا ۱۵ برابر سطح تاج پوشش، ظرفیت نگهداری بالای آب به علت کرک‌های موجود در سطح برگ‌ها و ممانعت از ب روز سیلاب (۲۷) Very complex root system with an infiltration depth of 6 to 8 m, the ability to conserve the soil up to 15 folds of canopy, high water retantion capacity and flood prevention
		رده اقلیمی- کشاورزی Agro-climatic class	2 & 3

ادامه جدول ۳- مشخصات گونه‌های گیاهی غالب در حوزه آبخیز گاوشان، استان کرمانشاه

Continuation of Table 3- Characteristics of suitable species for biologic management of soil erosion in the Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran

نام فارسی Persian name	نام علمی Scientific name	ویژگی‌های فیزیکی و زیستی منطقه Physical and Biological Characteristics of the Area	
		اقلیم Climate	خشک و نیمه‌خشک Dry and semi-dry
		ارتفاع (متر) Height (m)	1900-2500
		دما (درجه سانتی‌گراد) Temperature (°C)	9-15
		بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	300-500
مریم‌گلی	*Salvia officinalis*	خصوصیات ظاهری و مراحل رشد Appearance and phenology	گیاهی چندساله و علفی با ارتفاع ۵۰ تا۸۰ سانتی‌متر، زمان گلدهی در بهار و رویشگاه آن در دامنه‌های صخره‌ای Grass with a height of 50 to 80 cm, flowering time in spring
		نقش حفاظتی در کاهش فرسایش Conservation role in reducing erosion	انشعابات فراوان ساقه و ممانعت از برخورد مستقیم باران به خاک (۴۰) Abundant stem and conserve soil from rain
		رده اقلیمی- کشاورزی Agro-climatic class	2, 3 & 4

بر همین اساس ۴۲۱۸/۷۷ هکتار از آبخیز مطالعاتی قابلیت انجام اقدامات مدیریت زیستی را دارد. در رده اقلیمی یک هرچند وضعیت فرسایشی متوسط است اما به لحاظ نوع کاربری که شامل باغ، زراعت دیم و مراتع خوب است از انجام اقدامات پیشنهادی مدیریت زیستی کنار گذاشته شد. درنهایت پس از مشخص شدن مساحت کاربری‌های مختلف و با توجه به نقشه‌های وضعیت فرسایشی و اقلیمی- کشاورزی و هم‌چنین نمودار آمبروترمیک و هایترگراف اقدام به تهیه گونه‌های مناسب مرتعی شامل بوته و درختچه و بر اساس خصوصیات مورد توقع ارتفاعی، بارشی، دمایی، مراحل رشد و هم‌چنین نقش مؤثر در حفاظت خاک انتخاب و برای هر رده اقلیمی- کشاورزی به شرح مندرج در شکل ۷ و جدول ۳ پیشنهاد شد. انتظار می‌رود با انجام اقدامات زیستی مهار فرسایش در مراحل اولیه رخداد، صورت گرفته و با افزایش سطح پوشش گیاهی در ۵۴/۶۳ درصد از سطح آبخیز مطالعاتی علاوه بر مهار فرسایش خاک و یا حداقل توقف آن در مراحل ابتدایی، شرایط ترسیب کربن، تثبیت نیتروژن و افزایش حاصلخیزی بهتر خاک نیز صورت گیرد (۷، ۲۴، ۲۵، ۳۷ و ۴۲).

نتیجه‌گیری

مدیریت زیستی فرسایش رویکردی مؤثر در حفظ پایدار منابع خاک‌وآب است که در مراحل آغازین فرسایش، هدررفت خاک را مهار و از تخریب بوم‌سازگان جلوگیری می‌کند. در همین راستا یکی از روش‌های زیستی فرسایش استفاده از پوشش گیاهی غالب حوزه‌های آبخیز است. افزایش تاج پوشش مانع از برخورد مستقیم قطرات باران به سطح خاک می‌شود و از طرفی سامانه ریشه‌ای گیاه باعث به‌هم‌چسبیدگی خاکدانه‌ها می‌شود. از طرفی با افزایش سطح پوشش گیاهی علاوه بر افزایش سبزینگی، ظرفیت چرا در بوم‌سازگان‌های مرتعی افزایش خواهد یافت. بااین‌حال استفاده از پوشش گیاهی به سبب زمان‌بر بودن برای اثربخشی کم‌تر موردتوجه قرارگرفته است و نیاز به ترویج در سازمان‌های اجرایی و همچنین آبخیزنشینان به‌عنوان رکن اصلی آبخیز ضرورت دارد. از طرفی رویکرد استفاده از پوشش گیاهی غالب منطقه در مناطق مرتعی قابلیت اجرایی دارد. ازاین‌رو، پژوهش حاضر باهدف بررسی رویکرد مدیریت زیستی در حوزه آبخیز گاوشان انجام‌شده است. نتایج نشان داده بیش از نیمی از آبخیز مطالعاتی قابلیت انجام اقدامات زیستی با استفاده از گونه‌های بومی را

دارد. اگرچه رویکرد پیشنهادی قابلیت استفاده در بخش عمده‌ای حوزه‌های آبخیز مرتعی کشور را دارد ولی انجام بررسی‌های صحرایی مناسب و پایش پیوسته کارکرد پیشنهادی برای ارائه جمع‌بندی‌های جامع و همه‌جانبه در راستای مدیریت منابع خاک‌وآب ضرورت خواهد داشت.

منابع

1- Alavizadeh F., Naseri K., Golkarian A., and Tavili A. 2014. The study of biological soil crust (mosses) roles in protection of surface soil in front of water erosion (Case study: Rangelands around Torogh Dam in Khorasan Razavi Province). Journal of Rangeland and Watershed Management 67(1): 83-92. (In Persian)

2- Babaie S., Niknahad H., Fatahi B., and Akbarlo M. 2012. Investigation of botanical characteristics and importance of *Daphne mucronata* Royle. 1st National Conference on Strategies for Achieving Sustainable Development. 4 P. (In Persian)

3- Baghaeifar Z., Mofidinia M., and Chehregani A.K. 2016. Microsporogenesis and megasporogenesis in *Echinops ilicifolius* L. *Cellurar and Molecular Researches* (Iranian Journal of Biology) 29(4): 349-358. (In Persian with English abstract)

4- Bagheri A., Safdari V., Lashgari A., and Tajdini A. 2014. Comparative wood anatomy of three Ephedra species (*Ephedra procera*, *Ephedra strobilacea* and *Ephedra intermedia*) of Iran. Wood and Paper Science Research 28(4): 709-719. (In Persian with English abstract)

5- Belnap J., Walker B.J., Munson S.M., and Gill R.A. 2014. Controls on sediment production in two US deserts. Aeolian Research 14: 15-24.

6- Boardman J., Vandaele K., Evans R., and Foster I. D. 2019. Off-site impacts of soil erosion and runoff: Why connectivity is more important than erosion rates. Soil Use and Management 35(2): 245-256.

7- Chamizo S., Rodríguez-Caballero E., Román J.R., and Cantón Y. 2017. Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall. Catena 148(2): 117-125.

8- Cheng C., Li Y., Long M., Gao M., Zhang Y., Lin J., and Li X. 2020. Moss biocrusts buffer the negative effects of karst rocky desertification on soil properties and soil microbial richness. Plant and Soil 1-16.

9- Delavar M., and Hamidi Madani N. 2014. Investigation of Ombrothermic curves in the interpretation of drought phenomenon (Case study: Fars Province). 1th National Conference on Water, Human, Earth. 13 P. (In Persian)

10- Dharma-Wardana M.W.C. 2018. Fertilizer usage and cadmium in soils, crops, and food. Environmental Geochemistry and Health 40(6): 2739-2759.

11- Esmali A., and Abdollahi Kh. 2011. Watershed Management & Soil Conservation. University of Mohaghegh Ardabili 612 p. (In Persian)

12- Farajzadeh M., and Takalo-Bighash A. 2001. Agroclimatic zoning in Hamedan Province using GIS technology based on dry wheat. Geographical Research Quarterly 21: 93-105. (In Persian)

13- Farsi R., Yeganeh H., Hoseinalizadeh M., and Azimi M.S. 2021. Estimating the economic value of the role of vegetation in controlling soil erosion (Case Study: Kechik Watershed). Water and Soil Conservation 27 (6): 137-152. (In Persian with English abstract)

14- Gao L., Bowker M.A., Sun H., Zhao J., and Zhao Y. 2020. Linkages between biocrust development and water erosion and implications for erosion model implementation. Geoderma 357: 113973.

15- Ghasemi Aryan Y., Arzani H., Filekesh E., and Yari R. 2013. Estimating the production of Artemisia siberi through the measurement of plant's dimensions (Case study: southwest Sabzevar). Iraninn Journal of Rangeland and Desert Research 20(1): 1-10. (In Persian with English abstract)

16- Gholami L., Karimi N., and Kavian A. 2017. Soil bioengineering methods used in water management and stabilization of steep slopes. Ecohydrology 4(1): 149-162. (In Persian)

17- Haghizadeh A., Bayat V., and Arshia A. 2019. Estimation of The Evapotranspiration potential of Kermanshah synoptic stations Using Genetic Programming. Geographic Space 67(19): 29-42. (In Persian)

18- Haidarian Aghakhani M., Naghipour Borj A.A., and Nasri M. 2010. The effects of exclosure on vegetation and soil chemical properties in Sisab rangeland, Bojnord, Iran. Renewable National Research 1(2): 14-24. (In Persian with English abstract)

19- Hanafi A., and Khoshhal Dastjerdi J. 2017. Identifying Suitable Areas for Dry-farming Wheat in Zanjan Province Based on Agricultural Climatic Parameters. Geographic Space 59(17): 47-66. (In Persian)

20- Hosseini Tavasol M., and Yousefi Khanghah Sh. 2007. Provide a method for managing and rehabilitating watersheds using appropriate biological programs (Case study of Gorbaghi watershed). 4th National Conference on Watershed Management Science and Engineering of Iran (Watershed Management) 10 P. (In Persian)

21- Hosseini S.A., Raeini M., Sharifi F., and Gholami M. 2018.Evaluation of bio mulch erodibility on steep lands using rainfall simulation. Watershed Engineering and Management 10(1): 108-120. (In Persian with English abstract)

22- Kavianpour A., Jafarian Z., Esmaeili A., and Kavian A. 2015. Effect of Vegetation on Reduction of Runoff and

Soil Loss Using Rain Simulation in Nashu Rangelands of Mazandaran Province. Geography and Environmental Planning 58(2): 179-190. (In Persian)
23- Kermanshah Development Engineering Consulting Company, 2015. Detailed-executive studies of area No. 4 of Gavoshan dam in Songor and Keliai. 172 p. (In Persian)
24- Khatibi S.A., Golkarian A., Mosaedi A., and Sojasi Qeidari H. 2017. Evaluation biological and biomechanical watershed management activities Case study: Mahvid Catchment. Extension and Development of Watershed Management 5(16): 45-54. (In Persian with English abstract)
25- Kheirfam H., and Asadzadeh F. 2020. Stabilizing sand from dried-up lakebeds against wind erosion by accelerating biological soil crust development. European Journal of Soil Biology 98: 103189.
26- Le Bissonnais Y., Cerdan O., Lecomte V., Benkhadra H., Souchère V., and Martin P. 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. Catena 62(2-3): 111-124.
27- Maassoumi A. 2016. Role of Astragalus in equilibrium ecosystem. Iran Nature 1(1): 41-47. (In Persian with English abstract)
28- Mooshakhian Y., Sheikh A., Vetiver role in soil erosion control. 2009. 5th National Conference on Watershed Management Science and Engineering of Iran (Sustainable Management of Natural Resources). 10p. (In Persian)
29- Rafiee F., Jafari A., and Askari Y. 2014. An overview of the botanical characteristics of *Crataegus* sp. 2th National Conference on Forest Science Students 9 P. (In Persian)
30- Rafiee Gh., Jafari R., Matinkhah S.H., Tarkesh Isfahani M., Karimzadeh H.R, and Jafari Z. 2020. Predicting the Potential Habitat Distribution of *Crataegus Pontica* C. Koch, Using a Combined Modeling Approach in Lorestan Province. Applied Ecology Isfahan University of Technology 9(2): 45-59. (In Persian with English abstract)
31- Refahi H.Gh. 2015. Water erosion and conservation. 2nd edition. University of Tehran Press 674 P. (In Persian)
32- Sadeghi S.H.R., Kheirfam H., Homaee M., Zarei-Darki B., and Vafakhah M. 2017. Improving runoff behavior resulting from direct inoculation of soil micro-organisms. Soil and Tillage Research 171: 35-41.
33- Sadeghi S.H.R., Ghavimi-Panah M.H., Younesi H., and Kheirfam H. 2018. Ameliorating some quality properties of an erosion-prone soil using biochar produced from dairy wastewater sludge. Catena 171: 193-198.
34- Sadeghi S.H.R., Gholami L., Homaee M., and Khaledi Darvishan A. 2015. Reducing sediment concentration and soil loss using organic and inorganic amendments at plot scale, Solid Earth 6(2): 445-455.
35- Sadeghi S.H.R., Najafinejad A., Gharemahmudli S., Zarei-Darki B., Behbahani A. M., and Kheirfam H. 2021. Reduction in soil loss caused by a freeze-thaw cycle through inoculation of endemic soil microorganisms. Applied Soil Ecology 157: 103770.
36- Sadeghi S.H.R., Sadeghi Satri M., Kheirfam H., and Zarei-Darki B. 2020. Runoff and soil loss from small plots of erosion-prone marl soil inoculated with bacteria and cyanobacteria under real conditions. European Journal of Soil Biology 101: 103214.
37- Sadeghi S.H.R., Jafarpoor A., Zabihi Silabi M., Molashahi S., Naghdi M., Sharifi Moghani M., Ghysoori Z., and Farzadfar E. 2021. Biologic Management Framework of Soil Erosion in the Watershed (Applied study: Oshnavieh Galazchai, West Azerbaijan, Iran). Iranian Journal of Soil and Water Research 52(4): 1-15. (In Persian with English abstract)
38- Sadeghi S.H.R., Kheirfam H., Homaee M., and Zarei-Darki B. 2017. Improving runoff behavior resulting from direct inoculation of soil micro-organisms. Soil and Tillage Research 171: 35-41.
39- Sadeghi S.H.R. 2005. A semi-detailed technique for soil erosion mapping based on BLM and satellite image applications, Journal of Agricultural Sciences and Technology (JAST) 7(3-4): 133-142.
40- Saffariha M., Azarnivand H., Zare Chahouki M.A., Tavili A., Nejad Ebrahimi S., and Potter D. 2019. Investigating the effect of flowering stage on the quality and quantity of *Salvia limbata* essential oil in different altitudes in Taleghan rangelands. Range and Watershed Management 27(1): 139-149. (In Persian)
41- Servati R., Ahmadi H., Mirbagheri B., and Bahramifard H. 2011. Erosion estimation of Zidasht-Fashndak watershed (Taleghan). Natural Geography 4(12): 17-28. (In Persian)
42- Shirmardi H.A., Gholami P., Mohammadi Najafabadi H., and Fakhimi Abarghoei E. 2018. Investigation of changes production and consumption of *Bromus tomentellus* Boiss in Karsanak Rangelands in Chaharmahal & Bakhtiari Province. 7th National SConference on Range and Range Management of Iran 12 p. (In Persian with English abstract)
43- TavaKoli M., and Pirozi F. 2011. Preliminary study of the causes of drought and decay of Arjan (*Amygduluse orientalis*) shrubs in Lorestan Province. Central Zagros National Forest Conference; Capabilities and bottlenecks 8p. (In Persian)
44- Xiao B., Sun F., Hu, K., and Kidron G.J. 2019. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem. Journal of Hydrology 568: 792-802.
45- Young K.E., Bowker M.A., Reed S.C., Duniway M.C., and Belnap J. 2019. Temporal and abiotic fluctuations may be preventing successful rehabilitation of soil-stabilizing biocrust communities. Ecological Applications 29(5): 1-13.

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 551-566

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۵۶۶-۵۵۱

Biological Management of Soil Erosion (Case Study: Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran)

S.H. Sadeghi[1]*- A. Jafarpoor[2]- M. Farajolahi[3]- D. Khatibi Roodbarsara[3]- M. Moradi Sefidcheghayi[3]- M. Zabihi Silabi[4]- M. Khosravi[5]- E. Kolani[6]- B. Mohammedi[7]- M.J. Adibi[8] and H. Azarniya[9]

Received: 03-07-2021
Accepted: 10-08-2021

Introduction: One of the most important causes of land degradation and reduced fertility is soil erosion, a severe threat to human welfare and food security. With the intensification of erosion and sediment transport in the watershed, water quality is reduced, and sediment production and flood risks are increased. The consequences of soil impoverishment cause irreparable damage, including the abandonment of farms, increased migration, economic, social, and political problems. In this regard, paying attention to soil and water resources conservation is one of the most necessary measures to control erosion. So that the performance of natural ecosystems increases through conserving the soil and preventing the occurrence and intensification of erosion. Therefore, it is essential to know different stages of erosion and evaluation of the factors governing it in properly managing soil and water resources in a watershed. So far, various biological methods and structures are used to control soil and runoff loss in watersheds. Since biological methods are based on ecosystems' conditions, it is essential to control soil erosion in the early stages. In recent years, extensive methods for the conservation of soil and water resources have been introduced and used in practice. Therefore, one of the most important methods of protecting soil and water resources is the use of biological methods in terms of low use of tillage operations, limited intervention, and manipulation in nature, cost-effectiveness, and also better efficiency than structural measures. However, the biological management of soil erosion has not yet been welcomed by executive experts due to the lack of a proper implementation model.

Materials and Methods: The present study was conducted to investigate biological erosion management in the Gavoshan Watershed, Iran, due to distributed and manageable erosion and the available information. The Gavoshan Watershed, with an area of 7736 ha, the mean annual precipitation of 339 mm, the minimum and maximum elevations of 1635, and 2455 meters above sea level, is located in Kermanshah Province. After determining the erosion status, climatic characteristics, and plant growth conditions, the executive procedure of biological management of the region was proposed.

Results and Discussion: The results showed that surface erosion is predominant in the area, and therefore the suitability of the conditions for bio-management measures was confirmed. While reporting the prevalence of sheet erosion, the results emphasized the erosion status in the low and moderate classes and the ability to perform biological approaches in the watershed based on the climatic-agricultural map. The results further showed that according to the climatic-agricultural map, the whole study watershed was divided into five categories. In this regard, the second category with an area of 3421 ha had the highest, and the fifth category with 82 ha had the lowest areas. Finally, after determining the area of different land-uses and according to the maps of soil erosion and climatic-agricultural conditions as well as ombrothermic and hetherograph diagrams, suitable rangeland species were selected and suggested for each climatic-agricultural category based on the expected characteristics of elevation, precipitation, temperature, phenology and adequate role in soil conservation. Finally, the executive plan of biological management of soil erosion in the Gavoshan Watershed was presented based on phytosociology and relevant ecological expectations. Since bio-management measures

1, 2, 3 and 4- Professor, Former Ph.D. Student, M.Sc. Students and Ph.D. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor Mazandaran Province, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Emails: sadeghi@modares.ac.ir)
5- Assistant Professor, Department of Natural Resources Engineering, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran
6- Expert, Rangeland, Natural Resources Department of Kermanshah, Kermanshah, Iran
7- Master Expert, Desertification Management, Natural Resources Department of Kermanshah, Kermanshah, Iran
8- Master Expert, Watershed Management, Natural Resources Department of Songhor, Kermanshah, Iran
9- Former B.Sc. Student in Soil Science, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran
DOI: 10.22067/JSW.2021.70989.1060

are applicable in rangelands with moderate and poor vegetation conditions, the good rangelands were not prioritized for the planning. Accordingly, moderate and weak rangelands with an area of about 4219 ha, i.e.> 54%, of the watershed were considered for biological activities. It is expected that by taking biological measures, erosion control will be done in the early stages, and by increasing the vegetation level in 54.63% of the watershed, in addition to controlling soil erosion or at least stopping it in the early stages, carbon sequestration conditions, nitrogen fixation, and increase soil fertility. The use of endemic species in this watershed would facilitate ecological balance and at the same time protect the basic resources of water, soil, and vegetation by increasing the level of ground cover.

Conclusion: Biological management is a new approach in soil and water resource sustainable management that inhibits soil loss in the early stages of erosion and prevents the destruction of ecosystems. The results of the present study are anticipated to meet the expected needs in the protection of soil and water resources in similar watersheds in the west of the country. The results of the present study can be used in soil and water resources management in the western regions of the country with similar ecological conditions. Although the proposed approach can be used in most parts of the country rangelands, appropriate field studies and continuous monitoring of the proposed function will be necessary to provide comprehensive and integrated conclusions for soil and water resources management.

Keywords: Adaptive soil conservation, Bio-climatic zoning, Erosion bioengineering, Vegetation cover management

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 567-581

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۵۸۱-۵۶۷

مقاله پژوهشی

برآورد مقدار کربن آلی خاک با استفاده از دادهای طیفی در گستره VIS-NIR-SWIR-TIR

حمیدرضا متین فر[1*]- محبوبه جلالی[2]- زهرا دیبایی[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۰

چکیده

شناخت توزیع مکانی کربن آلی خاک یکی از ابزارهای کاربردی در پیشبرد مدیریت پایدار اراضی و محیط زیست می‌باشد. داده‌کاوی و مدل‌سازی مکانی همراه با تکنیک‌های یادگیری ماشینی به منظور بررسی میزان کربن آلی خاک مبتنی بر داده‌های سنجش از دور به صورت گسترده مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این مطالعه،استفاده از تصاویر با دامنه طیفی مرئی تا مادون قرمز حرارتی و داده‌های زمینی برای مدل‌سازی میزان کربن آلی خاک می‌باشد. با استفاده از الگوی نمونه‌برداری تصادفی۱۵۶نمونه از خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) جمع‌آوری شد. داده‌ها به دو دسته ۸۰ درصد برای آموزش و ۲۰ درصد جهت اعتبارسنجی دسته‌بندی شدند و از سه الگوریتم یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی، کوبیست و رگرسیون حداقل مربعات جزئی برای براورد و تهیه نقشه کربن آلی خاک استفاده شد. متغیرهای کمکی جهت پیش‌بینی کربن آلی خاک شامل باندها و شاخص‌های منتج از سنجنده‌ی OLI و TIRS لندست ۸ می‌باشد. به منظور کاهش حجم داده‌ها و انتخاب ویژگی‌هایی با بیشترین تأثیر بر براورد کربن آلی خاک، از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. آنالیز مؤلفه‌های اصلی داده‌های سنجش از دور منجر به گزینش ۴ متغیر کمکی TSAVI، RVI، Band10 و Band11 به‌عنوان مؤثرترین عوامل کمکی محیطی انتخاب گردیدند. همچنین مقایسه رویکردهای مختلف تخمین نشان داد که مدل جنگل تصادفی به ترتیب با مقادیر ضریب تبیین، خطای جذر میانگین مربعات و میانگین مربعات خطا ۰/۷۴، ۰/۱۷ و ۰/۰۲ بهترین کارایی را نسبت به سایر رویکردهای مورد استفاده در برآورد کربن آلی خاک سطحی در منطقه مطالعاتی ارائه نمود. به طور کلی نتایج این مطالعه بر قابلیت داده‌های سنجش از دور و مدل یادگیری جنگل تصادفی در تخمین مکانی کربن آلی خاک به طور همزمان دلالت دارد. لذا می‌تواند به عنوان روشی جایگزین برای روش‌های مرسوم آزمایشگاهی در تعیین برخی ویژگی‌های خاک از جمله کربن آلی خاک مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: توزیع مکانی، سنجنده لندست ۸، طیف مرئی مادون قرمز، کربن آلی خاک، مدل‌سازی

مقدمه

ماده آلی بعنوان یک ویژگی بسیار مهم از خاک، اهمیت بسیاری در توسعه و مدیریت کشاورزی پایدار دارد. ماده آلی خاک تأثیر قابل توجهی بر فعل و انفعالات خاک-گیاه داشته و ارتباط تنگاتنگی با کیفیت خاک دارد. این ماده به عنوان شاخصی برای بیان تخریب و فرسایش خاک، فاکتور تنظیم کننده فرایندهایی از جمله دسترسی گیاه به نیتروژن توانایی خاک برای جذب مواد غذایی، و قابلیت دسترسی زیستی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه محسوب می‌شود. همچنین بر تولید محصول، تشکیل ساختمان خاک، تنظیم و آزادسازی مواد غذایی، تسریع فعالیت‌های بیولوژیکی و افزایش ظرفیت تبادل یونی خاک نیز تاثیر بسزایی دارد (۳، ۹ و ۳۴). اهمیت اصلی مواد آلی خاک در کیفیت، کمیت، پایداری خاک و سلامت محیط زیست می‌باشد (۹). کربن آلی خاک شاخص مهمی برای ارزیابی وضعیت حاصلخیزی خاک و از شاخص‌های اصلی کیفیت خاک است و هدررفت آن موجب تخریب اراضی می‌گردد (۲۱). وظیفه نهایی کربن آلی خاک حفظ تنوع زیستی[3] جهت افزایش سلامت خاک در فرایند تولید هر ساله محصولات کشاورزی می‌باشد (۹). همچنین کربن آلی خاک بخشی از چرخه بسیار بزرگتر جهانی کربن، شامل چرخه کربن از طریق خاک، پوشش گیاهی، اقیانوس و اتمسفر می‌باشد (۱۲). ذخایر مخزن کربن آلی خاک در یک متر اولیه خاک (۱۵۰۰) پیکوگرم[4] برآورد می‌شود که

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشیار، استادیار و دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه لرستان
(*- نویسنده مسئول: Email: Matinfar.h@lu.ac.ir)
DOI: 10.22067/JSW.2021.71065.1062

3- Bodiversity
4 Pico gram(1015)

کربن بیشتری از آنچه که در اتمسفر (تقریبا ۸۰۰ پیکوگرم) و پوشش گیاهی (۵۰۰ پیکوگرم) است (۱۳). این مخزن دائمی کربن آلی دائماً بین مخازن مختلف جهانی کربن در اشکال مختلف در حال چرخش است (۲۰). مقدار مواد آلی خاک عموما بر اساس مقدار کربن آلی خاک (SOC[1]) اندازه‌گیری می‌شود. محققین نشان دادند که تغییرات کاربری اراضی منجر به درخطر افتادن محتوا و ترکیب مواد آلی خاک شده است، بنابراین پایش مستمر میزان کربن آلی خاک می‌تواند نقشی مهمی در کنترل کیفیت و عملکرد خاک داشته باشد (۲۵ و ۲۸). از آنجا که روش‌های معمول آزمایشگاهی اندازه‌گیری کربن آلی خاک، به ویژه در مقیاس‌های مکانی بزرگ خصوصا در سطح ملی، عمدتاً پرهزینه و زمان‌بر هستند و آنالیزهای شیمیایی آزمایشگاهی اندازه‌گیری کربن آلی با ورود کروم شش ظرفیتی ناشی از دی کرومات پتاسیم در ایجاد بسیاری از سرطان و بیمارهای نورودژنراتیو مثل پارکینسون و آلزایمر نقش دارد (۸). به همین دلیل، امروزه استفاده موفقیت‌آمیز از روش‌های رقومی همچون فناوری سنجش از دور و نزدیک در تخمین بسیاری از ویژگی‌های خاک و گیاه، محققین علوم خاک را به سوی استفاده از این فناوری نوین سوق داده است. استفاده از از داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ جهت پیش-بینی ویژگی شاخص سطح برگ در مراحل مختلف رشد گیاه ذرت دانه‌ای (۲۹) و استفاده از محدوده مرئی –مادون قرمز نزدیک توسط سنجنده‌های مختلف از جمله این موارد است (۶). تخمین کربن آلی خاک در تکنیک‌های سنجش از دور و نزدیک اغلب در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک انجام می‌شود (۲۳، ۷، ۱۰ و ۴).

در سال‌های اخیر تکنیک‌های چندمتغیره شبیه الگوریتم رگرسیون حداقل مربعات جزئی[2] و شبکه‌های عصبی مصنوعی[3] و کوبیست[4] به منظور ایجاد مدل‌های تخمین کربن آلی خاک استفاده شده است. برخی طول موج‌ها با مقدار کربن آلی در خاک ارتباط دارند (۳۵ و ۳۷). در برخی از مطالعات طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز در سطح آزمایشگاهی برای کمی نمودن کربن آلی و نیتروژن کل خاک موفق بوده است. در تحقیقی برآورد مقدار ماده آلی خاک را با استفاده از مدل‌های آماری و رگرسیون حداقل مربعات جزئی و رگرسیون مؤلفه اصلی PCA [5] انجام شد. نتایج مدل‌سازی به روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی نشان داد که مقادیر R2، RMSE و RPD در مرحله اعتبارسنجی برای پیش‌بینی ماده آلی به ترتیب ۰/۸۵، ۰/۱۴ و ۲/۷۸ بوده است (۲۹). سایر مطالعاتی که از مدل PLSR استفاده کردند نیز همبستگی بالایی را بین ماده آلی و نیتروژن کل اندازه‌گیری شده و تخمینی کسب کردند (۲۴، ۱۴ و ۲).

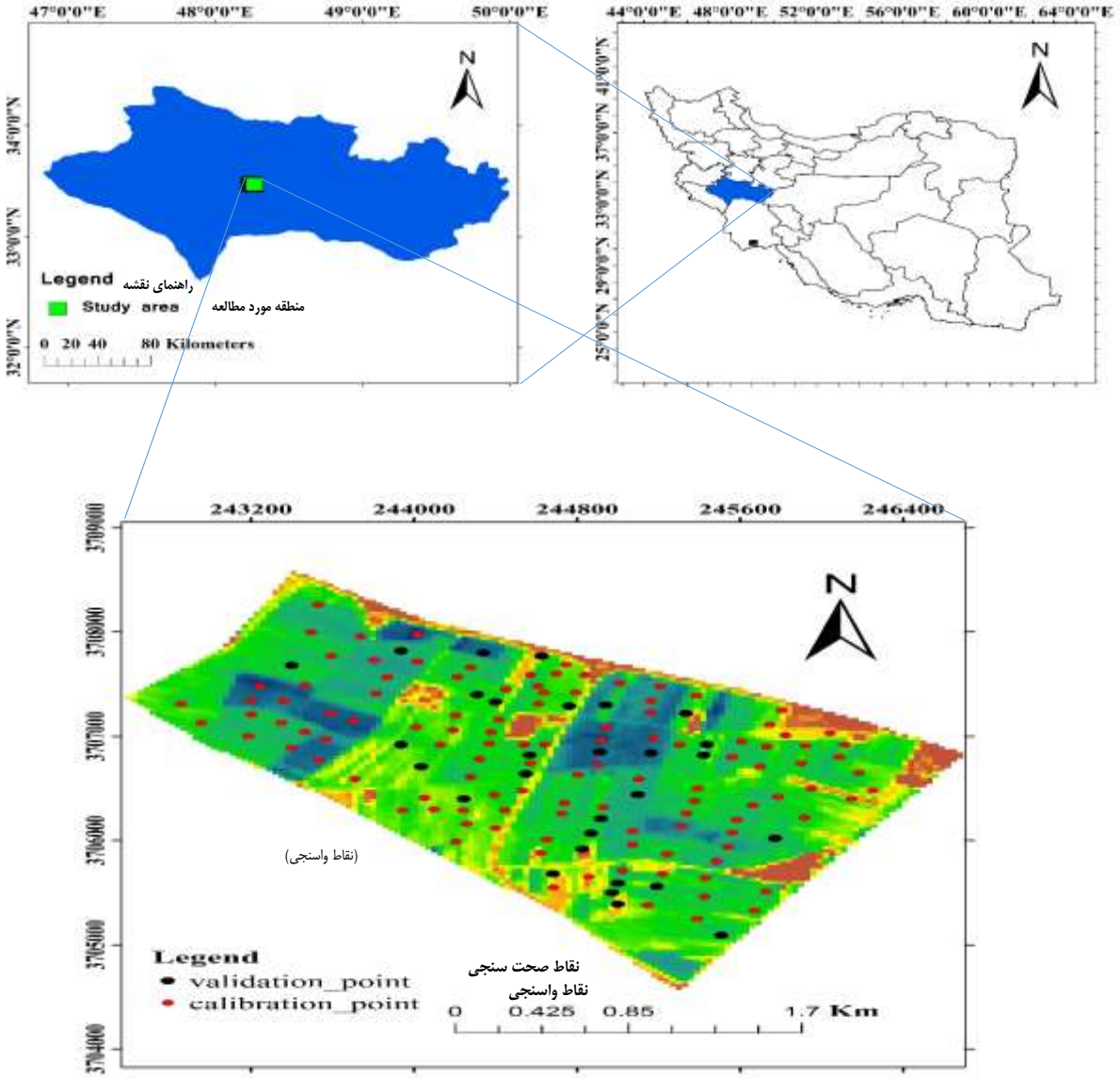
نتایج مدلسازی ,CEC، درصد اشباع بازی، ماده آلی، رس و شن در برزیل حاکی از ارجحیت مدلسازی جنگل تصادفی[6] نسبت به روش‌های PLS بوده است (۱۰). شناسایی توزیع مکانی خصوصیات خاک از جمله کربن آلی در هر منطقه کلید مهمی برای مدیریت صحیح اراضی در کشاورزی پایدار می‌باشد. بنابراین آگاهی و دانش در مورد توزیع منابع کربن و تغییرات آن برای تشخیص مکانیسم‌های کنترلی و پایداری میزان کربن فعلی در مدیریت این اراضی ارزشمند است (۱۶ و ۵). هدف از این مطالعه تعیین قابلیت داده‌های طیفی ماهواره ای در محدوده مرئی- مادون قرمز نزدیک، موج کوتاه و حرارتی و داده‌های زمینی برای مدل‌سازی میزان کربن آلی خاک می‌باشد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه واقع در استان لرستان، و منطقه سراب چنگایی می‌باشد (شکل ۱). این ناحیه دارای تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد و مرطوب است و فصل مرطوب از آبان ماه شروع و در اردیبهشت ماه خاتمه می‌یابد. میانگین بارندگی سالیانه آن ۵۱۶ میلی‌متر و حداکثر بارندگی در ماه فروردین به مقدار ۷۸/۱ میلی‌متر گزارش شده است. با توجه به نقشه رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک‌های ایران، رژیم رطوبتی خاک‌های منطقه زریک[7] می‌باشد. از نظر فیزیوگرافی خاک‌های منطقه مورد مطالعه بر روی واحد دشت‌های دامنه‌ای با حداقل و حداکثر شیب دو و پنج درصد قرار دارند. جهت شمال–جنوب، جهت شیب غالب در منطقه مطالعاتی می‌باشد. مواد مادری خاک‌ها بر اساس نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ (سازمان زمین‌شناسی کشور)، شامل مواد مادری با منشأ آهکی که مربوط به دوران زمین‌شناسی کرتاسه تا پلیوسن می‌باشد. رده‌بندی خاک‌های منطقه بر اساس سامانه رده‌بندی آمریکایی (۲۰۱۴) و نقشه خاک با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ موجود در دو رده اینسپتی‌سول و انتی‌سول قرار دارند. کار بری اراضی محدوده مطالعاتی زراعت ابی، شامل گندم، جو و ذرت می‌باشد.

1 Soil Organic Carbon
2 Partial least-squares regression
3 Artificial Neural Network (ANN)
4- Cubist
5- Principal Component Analysis
6- Random Forest
7- Xeric



شکل ۱- موقعیت منطقه و نقاط مورد مطالعه

Figure 1- Location of the study area and points

نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی

جهت تعیین نقاط نمونه‌برداری پس از تفسیر چشمی تصویر رنگی کاذب و مشاهدات میدانی بر اساس الگوی نمونه‌برداری تصادفی، ۱۵۶ نقطه انتخاب و نمونه‌های خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری برداشت شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس مقدار کربن آلی به روش والکی و بلک (۴۰)، اندازه‌گیری و محاسبه شد.

متغیرهای کمکی محیطی

در مطالعه حاضر، از باندهای مربوط به تصاویر سنجنده‌ی OLI لندست ۸ (۸ ژوئن ۲۰۱۸)، در مسیر و ردیف ۱۶۶ و ۳۷ تصاویر از پایگاه اینترنتی (USGS) دریافت شده است (۳۹). با توجه به هدف پژوهش، باندهای مرئی (باندهای ۲، ۳ و ۴)، مادون قرمز نزدیک (باند ۵)، مادون قرمز طول موج کوتاه (باندهای ۶ و ۷) با اندازه پیکسل‌های ۳۰ متر و باندهای حرارتی (باندهای ۱۰ و ۱۱) با اندازه پیکسل‌های ۱۰۰ متر برای استخراج ارزش‌های طیفی متناظر با نقاط زمینی و تجزیه و تحلیل استفاده شد.

جدول ۱- شاخص‌های گیاهی منتج از داده‌های طیفی

Table 1- Plant indices resulting from spectral data

شاخص Index	مخفف Abbreviation	رابطه Formula	منبع References
(شاخص گیاهی درصد مادون قرمز نزدیک) Infrared Percentage Vegetation Index	IPVI	$\frac{NIR}{NIR + Red}$	(41)
(شاخص گیاهی تعدیل کننده اثر خاک) Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI	$\frac{(1 + L)(NIR - Red)}{(NIR + Red + L)}$	(17)
(شاخص تغییر یافته گیاهی تعدیل کننده اثر خاک) Transformed Soil Adjusted Vegetation Index	TSAVI	$\frac{a(NIR - aRed - b)}{Red + a(NIR - a) + 0.08(1 + a^2)}$	(1)
(شاخص گیاهی تعدیل کننده اثر خاک (۲)) Soil Adjusted Vegetation Index2	SAVI2	$\frac{NIR}{Red + \frac{b}{a}}$	(26)
(شاخص نسبتی) Ratio Vegetation Index	RVI	$\frac{NIR}{Red}$	(41)
(شاخص بهینه شده گیاهی تعدیل کننده اثر خاک) Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	OSAVI	$\frac{1.16(NIR - Red)}{(NIR + Red + 0.16)}$	(33)

تصحیحات هندسی با نقاط کنترل زمینی و دقت نیم پیکسل انجام شد و تصحیح اتمسفری به روش جسم سیاه بر روی تصاویر انجام شد. شاخص‌های گیاهی تبدیلات ریاضی هستند که بر اساس باندهای مختلف سنجنده‌ها تعریف شده و برای ارزیابی و بررسی گیاهان در مشاهدات ماهواره‌ای چند طیفی طراحی شده‌اند. محاسبه و استخراج کلیه داده‌های مزبور برای تمام نقاط نمونه‌برداری در پنجره Raster calculator نرم‌افزار ArcGIS10.4.1 صورت گرفت. در نهایت کلیه متغیرهای محیطی (سنجش از دور) جهت فرآیند مدلسازی به پیکسل سایز یکسان ۱۵× ۱۵ متر با استفاده از بسته Resampling در نرم‌افزار Arc GIS 10.7.1 تبدیل شدند. همچنین در این پژوهش، شناسایی مؤثرترین متغیرهای کمکی در پیش‌بینی کربن آلی خاک بر اساس آنالیز مؤلفه‌های اصلی که در نرم‌افزار SPSS 21 قابل اجرا است صورت پذیرفت. روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی به منظور کاهش حجم داده‌ها، به صورت گزینش ویژگی‌هایی که بیشترین تأثیر را بر متغیر موثر در براورد متغیر وابسته دارند، به صورت زیر مجموعه‌ای از کل ویژگی‌های مورد بررسی خاک استفاده شد (۳۲).

برآورد کربن آلی خاک

در این تحقیق از رویکردهای جنگل تصادفی، کوبیست و رگرسیون حداقل مربعات جزئی برای مدل‌سازی مکانی کربن آلی خاک استفاده شد.

جنگل تصادفی

مدل جنگل تصادفی (RF[1]) یک روش نوین و قدرتمند در فرآیند مدل‌سازی می‌باشد که پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در تکنولوژی داده‌کاوی ارائه داده است. رویکرد جنگل تصادفی مبتنی بر روش‌های جدید ترکیب اطلاعات است که در آن تعداد زیادی درخت تصمیم ایجاد گردیده است. سپس تمام درختان با هم برای پیش‌بینی ترکیب می‌شوند. در روش یادگیری جنگل تصادفی، هر درخت تصمیم‌گیری با استفاده از یک نمونه تصادفی از داده‌های آموزشی، آموزش می‌بینند. همچنین انتخاب متغیرهای پیش‌بینی کننده نیز که برای تقسیم‌بندی گره‌ها استفاده می‌شود. جنگل تصادفی در حقیقت مجموعه‌هایی از درخت‌های پیش‌بینی کننده با احتمال یکسان و دارای پراکندگی یکسان هستند. این روش بر پایه انتخاب خطای داده‌های بزرگ‌تر به‌عنوان خطای اصلی و ایجاد همبستگی بین خطاهای دیگر داده‌ها است. انتخاب خطای عمومی بر اساس بزرگ‌ترین داده‌ها، پیش‌بینی دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتری به ما می‌دهد و زمانی این پیش‌بینی دقیق‌تر می‌شود که داده‌های ورودی به مدل بدون اعمال تغییرات باشد. این الگوریتم به‌عنوان یکی از کارآمدترین الگوریتم‌های یادگیری است و برای بسیاری از مجموعه داده‌ها، طبقه‌بندی با صحت بالایی ارائه می‌نماید. ویژگی مثبت این طبقه‌بندی کننده این است که بر روی

1- Random Forest

مجموعه داده‌های بزرگ بسیار خوب عمل می‌کند. مهم‌ترین ویژگی جنگل‌های تصادفی عملکرد بالای آن‌ها در اندازه‌گیری اهمیت متغیرهاست که مشخص می‌کند هر متغیر چه نقشی در پیش‌بینی پاسخ دارد. مدل‌سازی با روش جنگل تصادفی، ابتدا بر روی داده‌های آموزشی سپس بر روی داده‌های اعتبارسنجی اجرا می‌شود. درنهایت مدلی انتخاب می‌شود که دارای کمترین خطای OOB[1] باشد. در نهایت برای مدل‌سازی RF از بسته Caret (kuhn, 2015) در محیط نرم‌افزار RStudio 3.5.0 استفاده شد.

کوبیست[2]

روش کوبیست در واقع هیبریدی از رگرسیون‌های معمولی و رگرسیون درختی است که مدل‌های رگرسیونی چندگانه را از داده‌ها ایجاد می‌کند. کوبیست یکسری قواعد "اگر–سپس" ایجاد کرده که هر قاعده یک مدل خطی چند متغیره دارد. بر خلاف درخت رگرسیونی که فقط از یک درخت استفاده می‌کند، کوبیست از چند رگرسیون چند متغیره استفاده می‌کند و از میانگین همه درختان برای رسیدن به پیش‌بینی نهایی بهره می‌گیرد. از مزایای دیگر این روش، زمان کمتر برای پردازش آن است.

رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)

PLSR، یک روش نسبتاً جدید برای ساختن معادلات رگرسیونی تک متغیره و چند متغیره می‌باشد. بنابراین ممکن است چندین متغیر وابسته داشته باشیم. برای ایجاد ارتباط بین متغیرهای وابسته و متغیرهای مستقل، PLS متغیرهای تبیینی جدیدی ایجاد می‌کند. برخلاف مدل‌یابی مبتنی بر کواریانس، کمترین مجذورات جزئی (PLS)، به جای بازتولید ماتریس کواریانس تجربی، بر بیشترین واریانس تبیین شده متغیرهای وابسته با استفاده از متغیرهای مستقل تمرکز دارد. یکی از مهم‌ترین دلایل استفاده از تکنیک رگرسیون حداقل مربعات جزئی این است که این تکنیک به فرض نرمال بودن جامعه و حجم نمونه متکی نیست. همچنین این تکنیک امکان بررسی هم زمان روابط متغیرهای کمکی و متغیرهای قابل مشاهده را فراهم می‌آورد.

اعتبارسنجی نتایج مدلسازی

برای مدل‌سازی کربن آلی خاک، داده‌ها به دو گروه داده‌های واسنجی (۸۰٪ داده‌ها) و داده‌های اعتبارسنجی (۲۰٪ داده‌ها) تقسیم شدند. در انتها به منظور ارزیابی دقت در هر یک از روش‌های مدل‌سازی مورد استفاده در برآورد میزان کربن آلی خاک از آماره‌های ضریب تبیین[3] (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا[4] (RMSE) و میانگین خطای استاندارد (MSE[5]) استفاده شد که معادلات این روش‌ها به شرح زیر است:

اگر انحراف معیار متغیرهای X و Y به ترتیب به صورت Sx و Sy باشد و کواریانس آنها با علامت Covxy نشان داده شود ضریب تبیین از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$R^2 = \frac{S_{xy}^2}{S_{xx}\ S_{xy}}$$ رابطه (۱)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}$$ رابطه (۲)

در رابطه ۲، n: تعداد داده‌ها، yi: مقدار اندازه‌گیری شده کربن آلی خاک، $\hat{y}_i$: مقدار پیش‌بینی شده کربن آلی خاک می‌باشد (۵۰).

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[Yi - \hat{y}_i]^2$$ رابطه (۳)

در رابطه ۳، yi : مقدار اندازه‌گیری شده کربن آلی خاک، $\hat{y}_i$: مقدار پیش‌بینی شده کربن آلی خاک و n تعداد داده‌ها می‌باشد (۴۵).

نتایج و بحث

خلاصه آماری داده‌های مشاهداتی برای کربن آلی خاک به عنوان متغیر اصلی و سایر متغیرهای کمکی در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج آماره‌های توصیفی نشان داد که کربن آلی خاک از ۰/۰۲ تا ۲/۳۴ درصد با میانگین ۰/۵۶ و ضریب تغییرات ۶۹/۶۴ درصد بر اساس استاندارد ویلدینگ (۴۲) در کلاس تغییرپذیری بالا (≥۰/۳۵) قرار می‌گیرد. با توجه به مقدار میانگین کربن آلی خاک می‌توان بیان داشت که میزان کربن آلی خاک در منطقه پایین می‌باشد. در عین حال بالا بودن مقدار ضریب تغییرات کربن‌آلی مؤید تغییرپذیری مکانی زیاد آن در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. این تغییرات شدید می‌تواند به تغییر کاربری اراضی، مدیریت اراضی و سایر عناصر محیطی در منطقه مورد مطالعه نسبت داده شود (۳۶). به عبارتی دیگر، پایین بودن میزان کربن آلی خاک را می‌توان به جمع‌آوری بقایای گیاهی و عدم بازگشت آنها به خاک نسبت داد. یکی دیگر از عوامل کاهش مقدار کربن آلی، تغییر کاربری اراضی است که عمدتاً تأثیر منفی بر کیفیت و عملکرد خاک دارد (۴۳). به طور کلی، چگونگی استفاده از زمین، عملیات خاکورزی، شدت و تناوب عملیات کشت، شخم، کودهی، نوع محصول کشت شده بر کاهش و افزایش میزان کربن آلی خاک مؤثر است.

1- Out of Bag
2- Cubist
3- Cofficent of determination
4- Root mean square error
5- Mean square error

جدول ۲- آنالیز آماری کربن آلی خاک سطحی و متغیرهای سنجش از دور

Table 2- Statistical analysis of surface soil organic carbon and remote sensing variables

پارامترها Parameters	کربن آلی Organic Carbon	Band10	Band11	شاخص گیاهی نسبتی RVI	شاخص گیاهی تغیر یافته تعدیل کننده اثر خاک TSAVI
میانگین Mean	0.56	33134	30126	1.38	0.01
انحراف معیار Standard Deviation	0.39	1530	1122	0.81	0.0
چولگی Skewness	1.68	0.82	0.88	2.182	0.84
کشیدگی Kurtosis	3.98	−0.57	−0.48	3.738	−0.13
حداقل Minimum	0.02	29695	27514	0.8	−0.014
حداکثر Maximum	2.34	35216	31610	4.38	−0.006
ضریب تغییرات Coefficient of Variation (%)	69.64	4.62	3.72	58.70	۰/۰

پیش‌بینی مکانی و مدلسازی کربن آلی

انتخاب متغیرهای کمکی (داده کاوی)

نتایج حاصل از انتخاب متغیرهای کمکی مؤثر در پیش‌بینی کربن آلی خاک، بر اساس آنالیز مؤلفه‌های اصلی و آزمون KMO[1] برای داده‌های سنجش از دور منجر به گزینش ۴ متغیر کمکی گردید (جدول ۳). متغیرهای سنجش از دور توانستند ۹۸/۱۴ درصد تغییرات متغیرهای مستقل را در منطقه مطالعاتی توجیه نمایند (جدول ۴). تجزیه متغیرهای محیطی با استفاده از روش PCA ضمن ارائه یک تفسیر گرافیکی، به خوبی روابط موجود بین متغیرهای محیطی را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن حداقل همبستگی، شاخص‌های سنجش از دور در مؤلفه اول شامل شاخص گیاهی تغییر یافته تعدیل کننده اثر خاک (TSAVI) و شاخص گیاهی نسبی (RVI)، مؤلفه دوم باند حرارتی ۱۰ و مؤلفه سوم باند حرارتی ۱۱ را نشان داد.

عدم انتخاب سایر شاخص‌های کمکی مورد استفاده در این مطالعه که انتظار می‌رفت بتوانند در مدل‌های پیش بینی، تغییرات کربن آلی را به خوبی رصد نمایند، نشان دهنده پیچیدگی پراکنش این متغیر در خاک‌های منطقه مطالعاتی می‌باشد. نتایج این مطالعه نیز مطابق با یافته‌های پولادی و همکاران (۳۱) می‌باشد، که اهمیت بالای داده‌های سنجش از دور را برای پیش‌بینی کربن آلی خاک تأیید نمودند. مک کارتی و همکاران (۳۰)، نشان داد که شاخص مادون قرمز حرارتی (TIR[2]) می‌تواند ۹۳٪ از کل تغییرات کربن آلی خاک را نشان دهد.

جدول ۳- متغیرهای محیطی مهم برای پیش‌بینی کربن آلی خاک با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی

Table 3- Important environmental variables for soil organic prediction using principal component analysis

متغیرها Covariates	جنس متغیرها Covariates type
TSAVI	Spectral reflection
RVI	Spectral reflection
BAND 10	Spectral reflection
BAND 11	Spectral reflection

جدول ۴- نتایج تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی

Table 4- Results of principal component analysis

مؤلفه‌ها Components	واریانس % of Variance	واریانس تجمعی Cumulative of Variance %
PC1	70.506	78.50
PC2	14.825	93.33
PC3	4.816	98.14

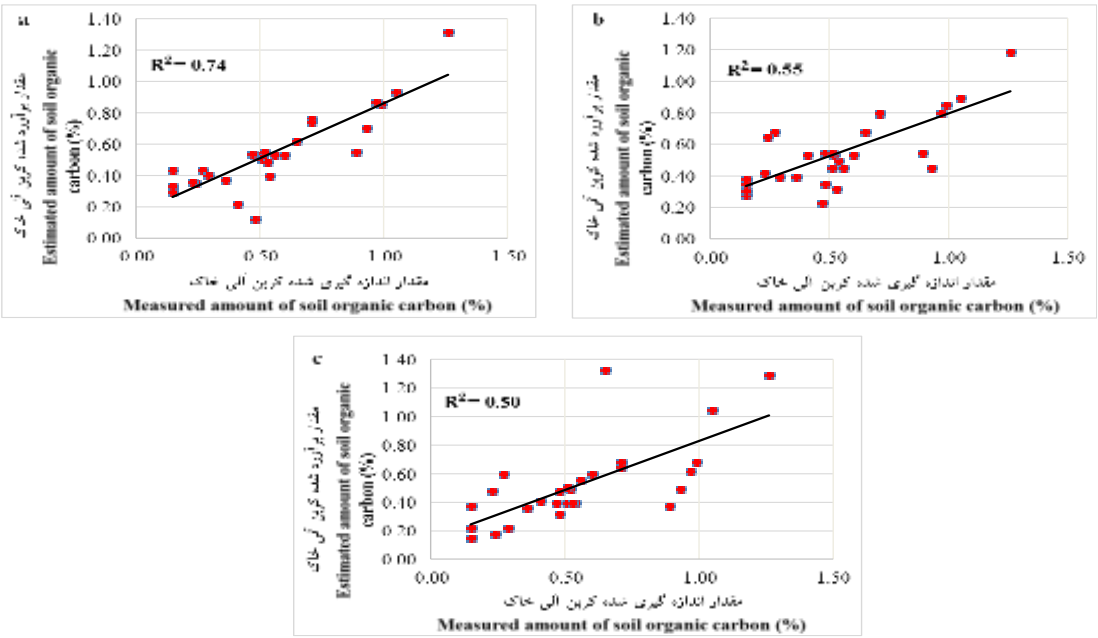
1- Kaiser-Meyer-Olkin Measure of sampling adequancy

2- Thermal Infrared

جدول ۵- ارزیابی الگوریتم های یادگیری ماشین در پیش بینی کربن آلی خاک سطحی

Table 5- Evaluation of machine learning algorithms in predicting surface soil organic carbon

شاخص ارزیابی Evaluation Index	جنگل تصادفی Random forest	رگرسیون حداقل مربعات جزئی PLSR	کوبیست Cubist
R2	0.74	0.55	0.5
RMSE	0.17	0.25	0.23
MSE	0.02	0.06	0.14



شکل ۲- مقادیر کربن آلی اندازه گیری شده در مقابل مقادیر پیش بینی شده بر اساس مدل‌های (a): RF، (b): PLSR و (c): Cubist

Figure 2- Measured organic carbon values versus predicted values based on models)a :(RF), b :(PLSR), c :(Cubist)

فلاحت‌کار و همکاران (۱۲) دریافتند که شاخص‌های سنجش از دور معمولا پیش‌بینی کننده‌های قوی کربن آلی خاک هستند که نتایج این مطالعات، مطابق با نتایج مطالعه حاضر بود اسوارنا و همکاران (۱۱).

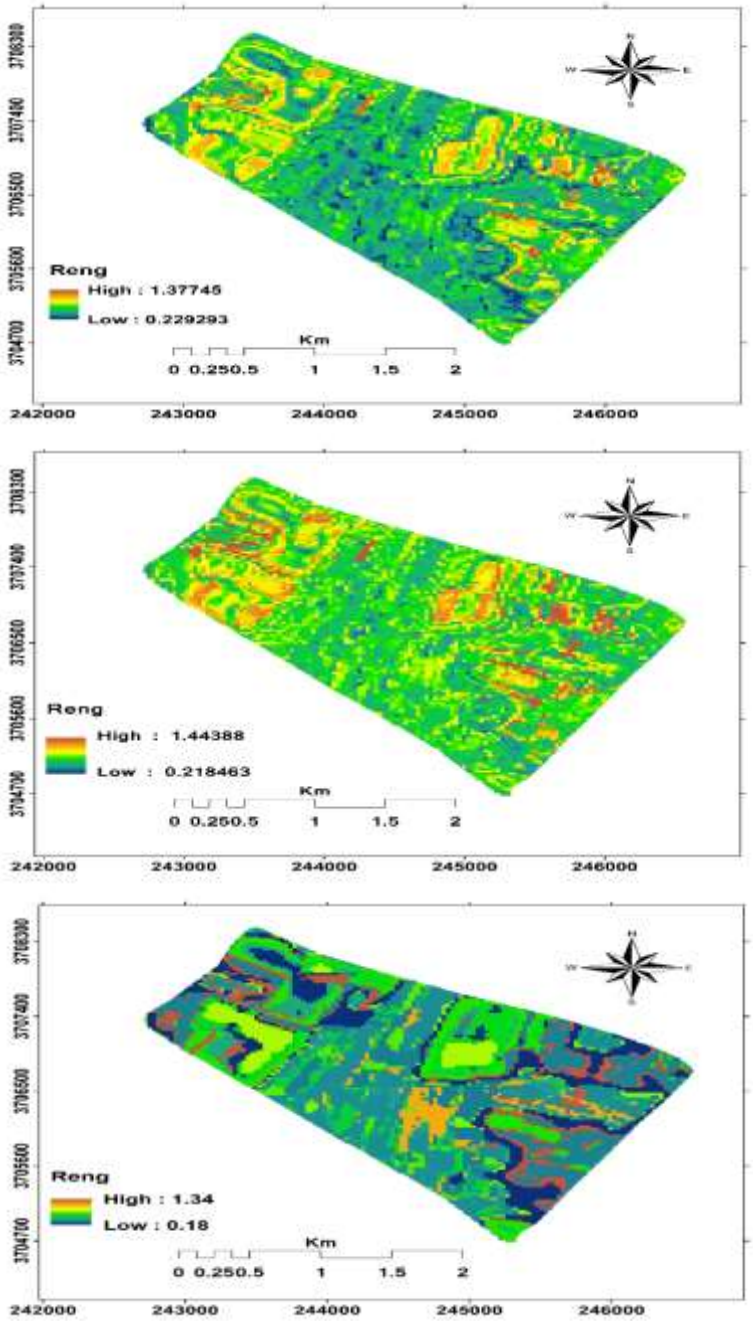
ارزیابی کارایی مدل‌ها

نتایج ارزیابی روش‌های جنگل تصادفی، کوبیست و رگرسیون حداقل مربعات جزئی در تخمین کربن آلی خاک در جدول ۵ آورده شده است. برای شناسایی دقیق‌ترین روش، اساس قضاوت کمترین مجذور میانگین مربع خطاها (RMSE[1])، میانگین مربع خطاها (MSE) و بیشترین R^2 می باشد. طبق نتایج به دست آمده از جدول ۵، بهترین روش مدل‌سازی برای نقشه‌برداری رقومی کربن آلی خاک، روش جنگل تصادفی با حداقل RMSE و MSE به ترتیب برابر ۰/۱۷ و ۰/۰۲ و بیشترین R^2 برابر با ۰/۷۴ به دست آمد.

نتایج این تحقیق با مطالعه زراعت‌پیشه و همکاران (۴۴)، نیز همسو می باشد که مدل جنگل تصادفی را در مقایسه با مدل‌های کوبیست، رگرسیون درختی و رگرسیون چند متغیره به عنوان مدل برتر معرفی نمودند. جمشیدی و همکاران (۲۱)، در مطالعه‌ی خود ارزیابی روش‌های رقومی در تهیه نقشه سه بعدی کربن آلی خاک را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل جنگل تصادفی با RMSE برابر با ۰/۴۹ نسبت به روش‌های کوبیست و رگرسیون خطی چند متغیره در تمامی اعماق از خطای کمتر و توانایی بیشتری در نشان دادن توزیع مکانی مقادیر کربن آلی خاک برخوردار است، هنگل و همکاران(۱۸). همچنین هنگل و همکاران (۱۸)، در مطالعه‌ی خود عملکرد دو روش جنگل تصادفی و رگرسیون خطی را برای نقشه‌برداری خصوصیات خاک بررسی نمودند، نتایج حاصل از

1- Root Mean Square Error

اعتبارسنجی نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی بـه طـور مـداوم از الگوریتم رگرسیون خطی بـا کـاهش ۷۵-۱۵ درصـدی خطـای جـذر میانگین مربعـات (RMSE) در خـواص و عمـق خـاک، بهتـر عمـل می‌کند، هوت (۱۹). در شکل ۲، نمودار پراکنش داده‌های پـیش‌بینـی شده در مقابل مقادیر اندازه گیری شده کربن آلی برای مدل‌های RF، PLSR و Cubist ارائه شده است.مدل جنگل تصادفی نسبت به سایر مدل‌های مورد استفاده دارای بالاترین میزان صـحت و حـداقل خطـا برای تخمین کربن آلی خاک می‌باشد.

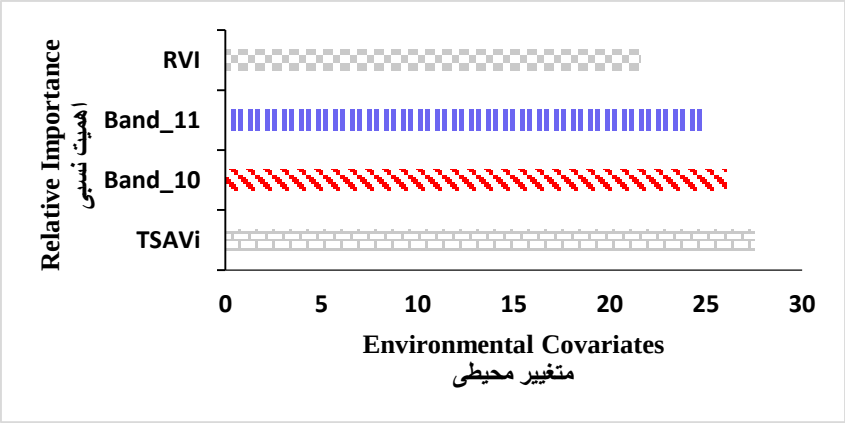


PLSR
رگرسیون حداقل مربعات جزء

Random Forest
جنگل تصادفی

Cubist Model
مدل کوبیست

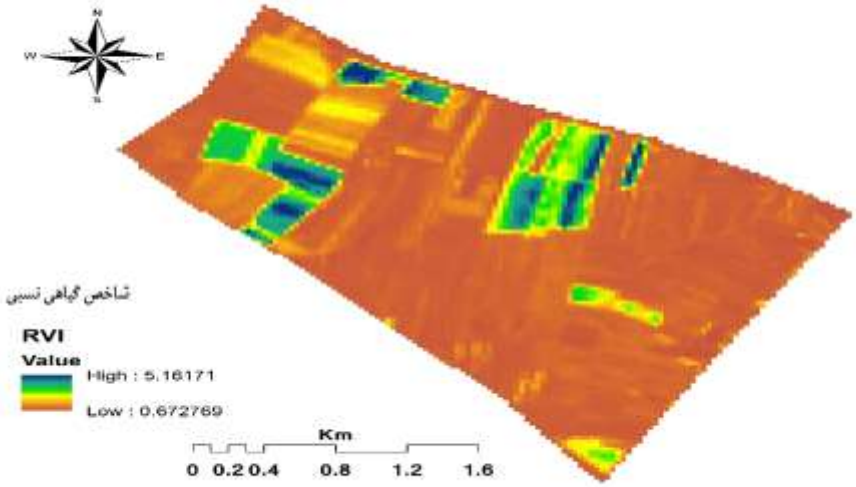
شکل ۳- توزیع مکانی کربن آلی خاک با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی
Figure 3- Spatial distribution of soil organic carbon using prediction model

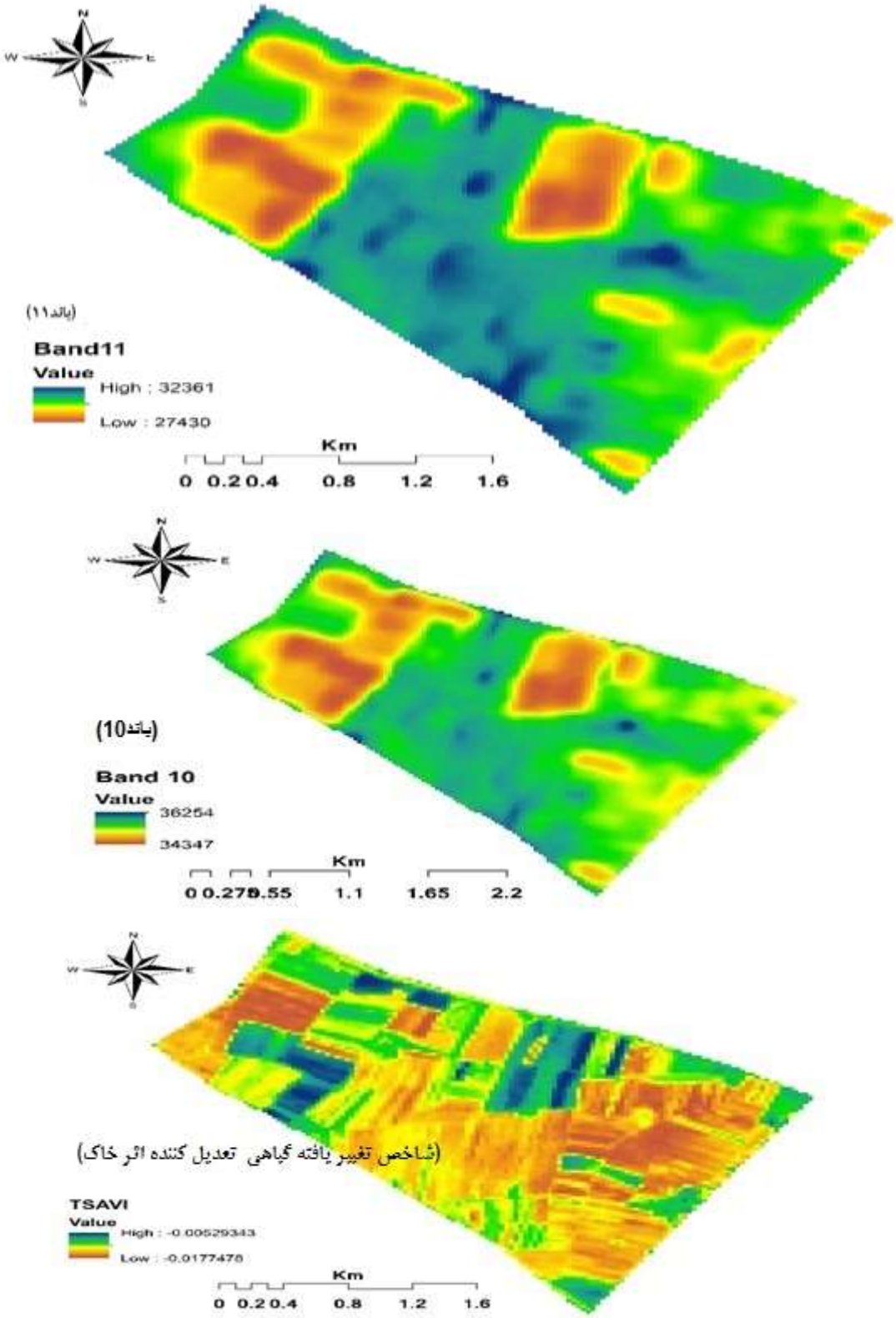


شکل ۴- اهمیت نسبی متغیرهای سنجش از دور در پیش بینی کربن آلی خاک بر اساس آنالیز حساسیت IncMSE% در مدل جنگل تصادفی

Figure 4- Relative importance of remote sensing variables in predicting soil organic carbon based on% IncMSE sensitivity analysis in random forest model

بررسی نقشه‌های پیش‌بینی حاصل، گویای قابلیت بالای مدل RF به عنوان بهترین مدل برای تخمین کربن آلی خاک می‌باشد (شکل ۳). مقدار کربن آلی خاک الگوی تصادفی نداشته و دارای تغییرات مکانی می‌باشد، همانطور که در نقشه‌های پیش‌بینی کربن آلی خاک نشان داده شده است، روند کاهشی کربن آلی خاک در نواحی مرکزی و جنوبی اراضی نسبت به نواحی شمالی شدیدتر می‌باشد. به عبارتی، بیشترین مقدار کربن آلی خاک در خاک‌های منطقه در نواحی شرقی و غربی قرار دارد. به نظر می‌رسد که علت پراکندگی کربن آلی خاک ناشی از تغییرپذیری ذاتی فاکتورهای تشکیل دهنده خاک و بخشی از آن تابع شیوه‌های مدیریتی (مانند عملیات مدیریتی خاک، کودهی، تناوب زراعی و فرسایش) می‌باشد. انگیرام و همکاران (۲۰)، بیان داشتند که در یک اکوسیستم، میزان ترسیب کربن آلی خاک تحت تاثیر دو عامل مدیریت اراضی و چگونگی فرایندهای زیستی ریزجانداران خاکی می‌باشد. قابل ذکر است که فعالیت زیستی ریزجانداران خاک، به وسیله عواملی چون اقلیم، رطوبت خاک، پوشش گیاهی و فرسایش‌پذیری خاک کنترل می‌شود (۱۵).





شکل ۵- نقشه توزیع مکانی متغیرهای کمکی مؤثر در پیش بینی کربن آلی خاک

Figure 5- Spatial distribution map of auxiliary variables effective in predicting soil organic carbon

آنالیز حساسیت

در این تحقیق، نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که اهمیت نسبی متغیرهای کمکی برای پیش‌بینی نحوه توزیع کربن آلی خاک متفاوت بوده و برخی متغیرهای کمکی از توانایی بیشتری برخوردار بودند. نتایج اهمیت متغیرهای کمکی در نقشه‌های تولید شده توسط مدل RF بر اساس الگوریتم آنالیز حساسیت INCMSE% در شکل ۴، ارائه شده است. با توجه به شکل ۴، اهمیت نسبی متغیرهای کمکی به دست آمده بر اساس مدل RF، شامل TSAVI (۶۵/ ۲۷درصد)، باند حرارتی ۱۰ (۲۶/۲۳ درصد)، RVI (۲۱/۷۰ درصد)، باند حرارتی ۱۱ (۲۴/۹۵ درصد) جزو با اهمیت‌ترین متغیرها در تخمین نقشه تولید شده می‌باشند. بر همین اساس می‌توان بیان داشت که شاخص‌های سنجش از دور نقش مهمی در مدل داشتند. صباغ زاده و همکاران (۳۸)، در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که شاخص‌های گیاهی مانند TSAVI بیشترین ضرایب تبیین و کمترین مقدار مجذور خطای مربعات را با داده‌های زمینی دارند (۳۸). در مطالعه‌ای دیگر، برای مدل‌سازی کربن آلی خاک در خاک‌های سطحی ایران پس از تعیین اهمیت نسبی متغیرها، نتیجه‌گیری شد که RVI مهمترین متغیر کمکی برای پیش‌بینی کربن آلی خاک در منطقه نیمه‌خشک است (۴۴). همچنین مک کارتی (۳۰) نشان داد که شاخص منتج از مادون قرمز حرارتی (TIR) می‌تواند ۹۳٪ از کل تغییرات کربن آلی خاک را نشان دهد مک کارتی و همکاران (۳۰). کومار و همکاران (۲۲)، در مطالعه‌ای پیش‌بینی توزیع کربن آلی خاک را با استفاده از داده‌های سنجش از دور در حوضه آبخیز سارسیکاتیگر انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که داده‌های حاصل از سنجش از دور پتانسیل بالایی در پیش‌بینی کربن آلی خاک در مقیاس وسیع دارند (۲۲). در شکل ۶، میزان تغییرپذیری متغیرهای کمکی در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از مدل‌سازی، نقش مهم و اثرگذار داده‌های سنجش از دور در این مطالعه تأیید می‌شود. به نظر می‌رسد در مناطقی که توزیع پیش‌بینی کننده‌ها یکنواخت‌تر و تغییرپذیری کمتری داشته باشد، مدل‌ها سریع تر رابطه پیش‌بینی کننده و متغیر وابسته را تشخیص می‌دهند و ارتباط برقرار می‌کنند. این موضوع در مورد هماهنگی توزیع مکانی کربن آلی خاک و شاخص‌های سنجش از دور همچون TSAVI، RVI، کاملا صادق است (شکل ۶).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با توجه به اهمیت کربن آلی خاک، کارائی سه مدل مختلف نقشه‌برداری رقومی به منظور تهیه نقشه کربن آلی خاک در خاک‌های دشت–خرم آباد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که متغیرهای کمکی از جمله TSAVI، RVI، Band 10 و Band11 مهمترین متغیرها در براورد کربن آلی خاک این ناحیه می باشند. دامنه وسیع تغییرات کربن آلی خاک می‌تواند متأثر از نوع کاربری اراضی و رفتارهای مدیریتی کشاورزان باشد. همچنین، نتایج گویای این موضوع است که مدل‌های مختلف، صحت‌های مختلفی را در برآورد کربن آلی خاک داشتند و نتایج برتری مدل جنگل تصادفی را نسبت به سایر مدل‌ها نشان داد. از سوی دیگر می‌توان بیان داشت که استفاده از سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند بر محدودیت‌های ناشی از روش‌های سنتی غلبه کند و به عنوان یک جایگزین مناسب جهت بررسی تغییرات کربن الی خاک با امکان نمایش نتایج در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف استفاده شود. با توجه به مشخص شدن میزان کربن آلی خاک و پراکنش مکانی آن‌ها در سراسر منطقه، نتایج حاضر می‌تواند مبنای علمی و همچنین پایگاه اطلاعاتی و داده مناسبی جهت اجرای هر گونه عملیات صحرایی، مدیریت نهاده‌های کشاورزی هر گونه مطالعه مرتبط در کشاورزی پایدار با خصوصیات خاک در این منطقه باشد.

منابع

1- Baret F., and Guyot G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LA APAR assesment. Remote Sensing of Environment 35: 161-173.
2- Camdevyren H., Demyr N., Kanik A., and Keskyn S. 2005. Use of principal component scores in multiple linear regression models for prediction of Chlorophyll-a in reservoirs. Ecological Modelling 181: 581-589.
3- Chang C.-W., Laird D.A., Mausbach M.J., and Hurburgh C.R. 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy – principal components regression analyses of soil properties. Soil Science Society of America Journal 65(2): 480–490.
4- Chang C.W., Laird D.A., and Hurburgh Jr C.R. 2005. Influence of soil moisture on near-infrared reflectance spectroscopic measurement of soil properties. Soil Science 170(4): 244-255.
5- Chen D.Z., Zhang J.X., and Chen J.M. 2010. Adsorption of methyl tert-butyl ether using granular activated carbon: Equilibrium and kinetic analysis. International Journal of Environmental Science & Technology 7(2): 235-242.
6- Chen F., Kissel D.E., West L.T., and Adkins W. 2000. Field-scale mapping of surface soil organic carbon using

remotely sensed imagery. Soil Science Society of America Journal 64(2): 746-753.
7- Dalal R.C., and Henry R.J. 1986. Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry 1. Soil Science Society of America Journal 50(1): 120-123.
8- Dashti A., Soodi M., and Amani N. 2015. Evaluation of Cr (VI) induced Neurotoxicity and Oxidative Stress in PC12 Cells. Modares Journal of Medical Sciences: Pathobiology 18(1): 55-65.
9- Datta A., Setia R., Barman A., Guo Y., and Basak N. 2019. Carbon Dynamics in Salt-affected Soils. Springer Nature Singapore Pte Ltd. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5832-6_12 .
10- De Santana F B., de Souza A M., and Ronei Poppi J. 2018. Visible and near infrared spectroscopy coupled to random forest to quantify some soil quality parameters. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 191: 454–462.
11- Eswaran H., Van Den Berg E., and Reich P. 1993. Organic carbon in soils of the world. Soil Science Society of America Journal 57(1): 192-194.
12- Falahatkar S., Hosseini S.M., Ayoubi S., and Salmanmahiny A. 2016. Predicting soil organic carbon density using auxiliary environmental variables in northern Iran. Archives of Agronomy and Soil Science 62(3): 375-393.
13- FAO I. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR)–technical summary. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
14- Gelsleichter Y.A., dos Anjos L.H.C., Costa E.M., Valente G., Debiasi P., Homem Antunes M.A., and Robson Altiellys Tosta Marcondes. 2019. Machine Learning Algorithms for Soil Properties Prediction with Treated Vis–NIR Spectrums from the Itatiaia National Park.Geoderma. doi:10.20944/preprints 201911.0053.v1.
15- Habibzade A.M., Nikjou R., and Peyrovan H.R. 2013. Survey amount of runoff and sediment in Marn East Azerbaijan. Rangeland Scientific Research Journal 17(43): 71-91. (In Persian)
16- He T., Wang J., Lin Z., and Cheng Y. 2009. Spectral features of soil organic matter. Geo-spatial Information Science 12(1): 33-40.
17- He Y., Huang M., García A., Hernández A., and Song H. 2007. Prediction of soil macronutrients content using near-infrared spectroscopy. Computers and Electronics in Agriculture 58(2): 144-153.
18- Heng T., Heuvelink G.B., Kempen B., Leenaars J.G., Walsh M.G., Shepherd K.D., and Tondoh J.E. 2015. Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: Random forests significantly improve current predictions. PloS one. 10:6.
19- Huete A., Huete A.R. 1988. Soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment. Remote Sensing of Environment 25: 295-309.
20- Ingram L.J., Stahl P.D., Schuman G.E., Buyer J.S., Vance G.F., Ganjegunte G.K., and Derner J.D. 2008. Grazing impacts on soil carbon and microbial communities in a mixed-grass ecosystem. Soil Science Society of America Journal 72(4): 939-948.
21- Jamshidi M., Delavar M.A., Taghizadehe-Mehrjerdi R., and Brungard C. 2019. Evaluating Digital Soil Mapping Approaches for 3D Mapping of Soil Organic Carbon. Soil Research Journal (Soil and Water Sciences) 33(2): 228-240. (In Persian)
22- Kumar N., Velmurugan A., Hamm N.A., and Dadhwal V.K. 2018. Geospatial mapping of soil organic carbon using regression kriging and remote sensing. Journal of the Indian Society of Remote Sensing 46(5): 705-716.
23- Lal R. 2006. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. 2006. Land Degradation and Development 17(2): 197–209.
24- Ludwig B., Khanna P.K., Bauhus J., and Hopmans P. 2002. Near infrared spectroscopy of forest soils to determine chemical and biological properties related to soil sustainability. Forest Ecology Managment 171(1-2): 121-132.
25- Mahmoudzadeh H., Matinfar H.R., Taghizadeh-Mehrjardi R., and Kerry R. 2020. Spatial prediction of soil organic carbon using machine learning techniques in western Iran. 2020. Geoderma Regional 21) e00260.
26- Major D.J., Baret F., and Guyot G. 1990. A ratio vegetation index adjusted for soil brightness International Journal of Remote Sensing 11: 727-740.
27- Matinfar H.R., Sarvi Moganloo V., and Dibaei Z. 2017. Evaluation of the ability of red and infrared wavelengths near the OLI sensor in estimating the leaf area index of different stages of grain growth of corn (Moghan plain). In: Geomatic Tehran .(In Persian)
28- Matinfar H.R., and Sadikhani R. 2015. Measurement of soil moisture using remote sensing Measurement of soil moisture using remote sensing. In: The first national conference on sustainable management of soil resources and the environment. Kerman Shahid Bahonar University. 2015 (In Persian)
29- Matinfar H.R., Mahmodzadeh H., and Fariabi A. 2018. Estimation Soil Organic Matter (SOM) Content Using Visible and Near Infrared Spectral data, PLSR and PCR Statistical Models. Iranian Remote Sensing & GIS. 10(2): 15-32. (In Persian)
30- McCarty G.W., Reeves J.B., Reeves V.B., Follett R.F., and Kimble J.M. 2002. Mid-infrared and nearinfrared diffuse reflectance spectroscopy for soil carbon measurements. Soil Science Society of America Journal 66: 640–646.
31- Pouladi N., Møller A.B., Tabatabai S., and Greve M.H. 2019. Mapping soil organic matter contents at field level

with Cubist, Random Forest and kriging. Geoderma 342: 85-92.
32- Qi Y., Darilek J.L., Huang B., Zhao Y., Sun W., and Gu Z. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. Geoderma 149(3-4): 325-334.
33- Rondeaux G., Steven M., and Baret F. 1996. Optimisation of soil-adjusted vegetation indices. Remote Sensing of Environment 55: 95−107.
34- Robertson G.P., Gross K.L., and Hamilton S.K. L. Doug 2014. Farming for ecosystem services: an ecological approach to production agriculture. Bioscience 64: 404–415.
35- Rossel R.V., McBratney P.A.B., Minasny D.B., Stenberg B., and Rossel R.A.V. 2010. Diffuse Reflectance Spectroscopy for High-Resolution Soil Sensing Proximal Soil Sensing. Soil Science. Germany, 434p.
36- Smith J.A. 2004. Reflecting on the development of interpretative phenomenological analysis and its contribution to qualitative research in psychology. Qualitative Research in Psychology 1(1): 39-54.
37- Song Y.Q., Yang L.A., Li B., Hu Y.M., Wang A.L., Zhou W., and Liu Y.L. 2017. Spatial prediction of soil organic matter using a hybrid geostatistical model of an extreme learning machine and ordinary kriging. Sustainability 9(5): 754.
38- Sabaghzadeh S., Zare M., and Mokhtari M. 2017. Estimating of above ground biomass of Haloxylon using sattelite based vegetation indices (Case Study: Marak, Birjand). Iranian Journal of Range and Desert Research 23(4): 844-855. (In Persian)
39- U.S. Geology Survey. 2014. Geology.com/news/2010/free-lansatimages-from-USGS-2. http://glovis.usgs.gov.
40- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37(1): 29-38.
41- Wiegand C.L., Richardson A.J., Escobar D.E., and Gerbermann A.H. 1991. Vegetation indices in crop assessments. Remote Sensing of Environment 35(2–3): 105-119.
42- Wilding L.P. 1985. Spatial variability: its documentation, accommodation and implicationto soil surveys. P 166-194, In: D.R. Nielsen and J. Bouma (eds.), Soil Spatial Variability, Pudoc, Wageningen, the Netherlands.
43- Walker, S.M., and Desanker, P.V. 2004. The impact of land use on soil carbon in Miombo Woodlands of Malawi. Forest Ecology and Management 203: 345–360.
44- Zeraatpisheh M., Ayoubi S., Jafari A., Tajik S., and Finke P. 2019. Digital mapping of soil properties using multiple machine learning in a semi-arid region, central Iran. Geoderma 338: 445-452.
45- Zhou J., Li Enming Wei., Haixia Li., Chuanqi Qiao Qiuqiu., and Danial J.A. 2019. Random Forests and Cubist Algorithms for Predicting Shear Strengths of Rockfill Materials. Appl. Sci. 9: 1621.

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 567-581

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۵۸۱-۵۶۷

Estimation of the Amount of Soil Organic Carbon Using Spectral Data in the VIS-NIR-SWIR-TIR Spectral Range

H.R. Matinfar[1]*- M. Jalali[2]- Z. Dibaei[3]
Received: 03-07-2021
Accepted: 11-08-2021

Introduction: Understanding the spatial distribution of soil organic carbon (SOC) is one of the practical tools in determining sustainable land management strategies. Over the past two decades, the use of data mining approaches in spatial modeling of soil organic carbon using machine learning techniques to investigate the amount of carbon to soil using remote sensing data has been widely considered. Accordingly, the aim of this study was to investigate the feasibility of estimating soil organic matter using satellite imagery and to assess the ability of spectral and terrestrial data to model the amount of soil organic matter.

Materials and Methods: The study area is located in Lorestan province, and Sarab Changai area. This area has hot and dry summers and cold and wet winters and the wet season starts in November and ends in May. A total of 156 samples of surface soil (0-30 cm) were collected using random sampling pattern. Data were categorized into two categories: 80% (117 points) for training and 20% (29 points) for validation. Three machine learning algorithms including Random Forest (RF), Cubist, and Partial least squares regression (PLSR) were used to prepare the organic soil carbon map. In the present study, auxiliary variables for predicting SOC included bands related to Lands 8 OLI measurement images, and in order to reduce the volume of data, the principle component analysis method (PCA) was used to select the features that have the greatest impact on quality.

Results and Discussion: The results of descriptive statistics showed that soil organic carbon from 0.02 to 2.34% with an average of 0.56 and a coefficient of variation of 69.64% according to the Wilding standard was located in a high variability class (0.35). According to the average amount of soil organic carbon, it can be said that the amount of soil organic carbon in the region is low. At the same time, the high value of organic carbon change coefficient confirms its high spatial variability in the study area. These drastic changes can be attributed to land use change, land management, and other environmental elements in the study area. In other words, the low level of soil organic carbon can be attributed to the collection of plant debris and their non-return to the soil. Another factor in reducing the amount of organic carbon is land use change, which mainly has a negative impact on soil quality and yield. In general, land use, tillage operations, intensity and frequency of cultivation, plowing, fertilizing, type of crop, are effective in reducing and increasing the amount of soil organic carbon. Based on the analysis of effective auxiliary variables in predicting soil organic carbon, based on the principle component analysis for remote sensing data, it led to the selection of 4 auxiliary variables TSAVI, RVI, Band10, and Band11 as the most effective environmental factors. Comparison of different estimation approaches showed that the random forest model with the values of coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE) and mean square error (MSE) of 0.74, 0.17, and 0.02, respectively, was the best performance ratio another study used to estimate the organic carbon content of surface soil in the study area.

Conclusion: In this study, considering the importance of soil organic carbon, the efficiency of three different digital mapping models to prepare soil organic carbon map in Khorramabad plain soils was evaluated. The results showed that auxiliary variables such as TSAVI, RVI, Band 10, and Band11 are the most important variables in estimating soil organic carbon in this area. The wide range of soil organic carbon changes can be affected by land use and farmers' managerial behaviors. Also, the results indicated that different models had different accuracy in estimating soil organic carbon and the random forest model was superior to the other models. On the other hand, it can be said that the use of remote sensing and satellite imagery can overcome the limitations of traditional methods and be used as a suitable alternative to study carbon to soil changes with the possibility of displaying results at different time and space scales. Due to the determination of soil organic carbon content and their spatial distribution throughout the region, the present results can be a scientific basis as well as a suitable database and data for the implementation of any field operations, management of agricultural

1, 2 and 3- Associate Professor, Assistant Professor and Ph.D. Student of Soil Science, Lorestan University, respectively.
(*- Corresponding Author Email: matinfar.h@lu.ac.ir)
DOI: 10.22067/JSW.2021.71065.1062

inputs, and any study in sustainable agriculture with soil properties in this area. In general, the results of this study indicated the ability of remote sensing techniques and random forest learning model in simultaneous estimation of soil organic carbon location. Therefore, this method can be used as an alternative to conventional laboratory methods in determining some soil characteristics, including organic carbon.

Keywords: Modeling, Remote sensing, Soil organic carbon, Spatial distribution

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 583-597

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۵۹۷-۵۸۳

مقاله پژوهشی

تأثیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه و فیلترکیک بر رشد و غلظت عناصر غذایی در گیاه اسفناج در برهم‌کنش با علف‌کش

کوثر اسدزاده[۱]- حبیب ا.. نادیان[۲]- عبدالرضا سیاهپوش[۳]- وحید کشاورز توحید[۴]*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵

چکیده

گیاه اسفناج گیاهی حساس به علف‌های هرز بوده و علف‌کش اختصاصی برای آن وجود نداشته و استفاده از علف‌کش‌های پیشنهادی مانند متری-بیوزین باعث اختلالات متابولیکی در اسفناج شده که نتیجه آن کاهش مؤلفه‌های رشدی و تغذیه‌ای در این گیاه می‌باشد. در این پژوهش تأثیر باکتری-های ریزوسفری محرک رشد گیاه از گروه سودوموناس (جدایه‌های RUM14 و CHA0) و فیلترکیک به عنوان محصول جانبی کارخانه شکر (F) و ماده‌ای غنی بر غلظت عناصر غذایی و وزن خشک در گیاه اسفناج بررسی شد. همچنین تأثیر باکتری‌های ذکر شده و فیلتر کیک بر کاهش اثرات منفی تنش ناشی از علف‌کش متری‌بیوزین مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد و فیلترکیک هر کدام به‌تنهایی و یا با استفاده همزمان باعث افزایش غلظت عناصر پرمصرف (فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم) و کم‌مصرف (مس، روی و آهن) و همچنین افزایش وزن خشک در گیاه اسفناج می‌گردد. از نظر آماری بیشترین افزایش غلظت عناصر و وزن خشک در تیمار استفاده همزمان جدایه RUM14 و فیلترکیک (RUM14+F) مشاهده گردید. همچنین مشخص گردید استفاده از علف‌کش متری‌بیوزین باعث کاهش غلظت عناصر و وزن خشک می‌گردد و از نظر آماری با افزایش مصرف علف‌کش این تغییرات افزایش می‌یابد. بررسی‌های آماری نشان داد که استفاده از باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد و فیلتر کیک به تنهایی و یا با هم، اثر تنش ناشی از استفاده علف‌کش (کاهش وزن خشک و همچنین کاهش غلظت عناصر) را به میزان زیادی در گیاه اسفناج کاهش می‌دهد و از نظر اماری تیمار RUM14+F موثرترین تیمار بود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که جدایه‌های باکتری سودوموناس و فیلترکیک در افزایش رشد گیاه اسفناج، افزایش عناصر پر مصرف و کم مصرف در گیاه اسفناج و همچنین در کاهش تنش ناشی از استفاده از علف‌کش مؤثر می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: سودوموناس، عناصر پر مصرف، عناصر کم مصرف، متری‌بیوزین

مقدمه

در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در راستای بهبود و حفظ باروری خاک، بهبود کیفیت محصولات کشاورزی و حذف آلاینده‌های زیست‌محیطی انجام شده است. کاهش این مخاطرات زیست‌محیطی، همگام با افزایش عملکرد گیاهان نیازمند به‌کارگیری تکنیک‌های نوین بهره‌برداری است (۲۳). در این راستا، کاهش سموم کشاورزی از جمله علف‌کش‌ها و استفاده بیشتر از کودهای زیستی به جای کودهای شیمیایی که اساس و اهداف کشاورزی پایدار و ارگانیک جهت دست‌یابی به زنجیره غذایی سالم را تشکیل می‌دهد مورد توجه فراوان قرار گرفته است (۳). کودهای زیستی شامل جمعیت متراکم یک یا چند موجود زنده مفید خاکزی و یا به‌صورت فرآورده‌ی متابولیک این موجودات می‌باشند که قادر به افزایش حاصلخیزی خاک، افزایش رشد گیاه و عملکرد محصول می‌گردند (۳۶). از جمله این ریزجانداران می‌توان به دستجات مختلف باکتری‌ها از جمله

۱ و ۲- به‌ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد و استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
۳- استادیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
۴- استادیار گروه گیاه‌پزشکی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
(*- نویسنده مسئول: Email: keshavarz@asnrukh.ac.ir)
DOI: 10.22067/JSW.2021.71455.1069

باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه[1]، قارچ‌های آربسکولار مایکوریزا و دیگر قارچ‌های مفید خاک اشاره کرد. این ریزجانداران به‌روش‌های مختلف مانند تثبیت نیتروژن، انحلال ترکیبات فسفری نامحلول، افزایش قابلیت جذب عناصری نظیر آهن، روی و مس به رشد گیاهان کمک می‌نمایند (۲۱). در بین باکتری‌های محرک رشد گیاه، باکتری‌های جنس سودوموناس به‌دلیل توزیع گسترده در خاک، توانایی کلونیزه کردن ریزوسفر بسیاری از گیاهان و تولید طیف متنوعی از متابولیت‌ها مانند سیدروفورها، آنتی‌بیوتیک‌ها و هورمون‌های گیاهی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. از میان گونه‌های مختلف جنس سودوموناس گونه‌های متعلق به گروه *Pseudomonas putida* و *P. fluorescens* نقش بسیار مهمی در افزایش رشد و جذب عناصر غذایی از جمله فسفر دارند (۳۶ و ۵). از دیگر خصوصیات برخی جدایه‌های باکتری‌های جنس سودوموناس توانایی تجزیه‌ی آلاینده‌های آلی از جمله مشتقات نفتی مانند علف‌کش‌ها می‌باشد (۶، ۴۶، ۲۴ و ۲۶).

فیلترکیک از فرآورده‌های جانبی کارخانه تولید شکر می‌باشد که در فرآیند رسوب‌گذاری و تصفیه‌ی شربت به‌دست می‌آید و دارای عناصر غذایی مورد نیاز گیاه از جمله فسفر، نیتروژن، آهن، منگنز، روی، مس، منیزیم و کلسیم می‌باشد. افزودن آن‌ها به خاک می‌تواند سبب بهبود حاصلخیزی و دیگر ویژگی‌های خاک شود (۱). از این ماده برای بهبود ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک استفاده می‌شود. این ماده به‌دو صورت در بخش کشاورزی استفاده می‌گردد: به‌صورت مستقیم (کود تازه) و یا غیر مستقیم (کمپوست) (۱۶).

اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) یکی از مهم‌ترین سبزی‌های برگی است و در زمره‌ی گیاهان دارویی و خوراکی محسوب می‌گردد. اسفناج گیاهی یکساله، دوپایه و متعلق به خانواده‌ی چغندرسانان (Chenopodiacea) بوده (۴۴) و غنی از ویتامین‌ها، ترکیبات آنتی اکسیدان و عناصر ضروری از جمله آهن و سلنیوم می‌باشد (۹). با توجه به اینکه اسفناج مربوط به مناطق معتدل و سرد می‌باشد، در فصول پاییز و زمستان در خوزستان کشت می‌شود (۴۳). گیاه اسفناج نسبت به علف‌های هرز حساس بوده و در رقابت با علف‌های هرز دچار خسارت‌های کیفی و کمی شدید می‌گردد. اما علف‌کش‌هایی که برای کنترل علف‌های هرز اسفناج استفاده می‌شود بسیار محدود و غیر اختصاصی می‌باشند و مهم‌ترین این علف‌کش‌ها می‌توان به پندی‌متالین، تریفورالین، ارادیکان و متری‌بیوزین اشاره کرد (۱۴). همانطور که ذکر شد علف‌کش‌های مورداستفاده در اسفناج صد در صد انتخابی نیستند و باعث اختلالات متابولیتی که نتیجه آن کوتاه قدی، کلروزه و نکروزه شدن و یا حتی از بین رفتن گیاهچه اسفناج شوند (۳۲).

ایران از جمله کشورهایی است که متاسفانه مصرف سموم آن چه به جهت مبارزه با امراض و آفات و چه به جهت مبارزه با علف‌های هرز بسیار زیاد است. اگرچه تأثیر ریزجانداران مفید خاک بر مؤلفه‌های رشدی و تغذیه‌ای گیاه (۲۷، ۳۳ و ۳۵) و نیز کاهش تنش‌های غیر زنده بر گیاه مانند شوری (۳۸، ۳۹ و ۴۸) و خشکی (۳۷، ۱۷ و ۱۸) بسیار بررسی شده است ولی تأثیر احتمالی این ریز جاندران در کاهش اثرات سوء ناشی از مصرف علف‌کش‌ها در گیاهان خصوصا همراه با کودهای آلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به حساسیت گیاه اسفناج به علف‌کش و کمی تحقیقات در خصوص استفاده از ریزجانداران مفید خاک و کودهای آلی در کاهش خسارات ناشی از علف‌کش‌ها بر اسفناج، پژوهشی با هدف بررسی تأثیر باکتری سودوموناس به‌عنوان باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه و فیلترکیک به‌عنوان کود آلی بر مؤلفه‌های رشدی و تغذیه‌ای گیاه اسفناج در برهم‌کنش با مصرف علف‌کش متری‌بیوزین انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

تیمارها و شرایط انجام آزمایش

در این تحقیق به‌منظور بررسی اثرات تنش ناشی از علف‌کش متری‌بیوزین (پیشنهاد شده برای مزارع اسفناج) بر رشد گیاه اسفناج و جذب عناصر، وزن خشک، میزان عناصر پر مصرف (پتاسیم، کلسیم، منیزیم و فسفر) و کم‌مصرف (مس، روی و آهن) در گیاه اسفناج تیمار شده با علف‌کش متری‌بیوزین در ۳ سطح ۰، ۵۰ و ۱۰۰ اندازه‌گیری گردید (H0, H1, H2). در ادامه تأثیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاهی در ۳ تیمار عدم تلقیح باکتری (B0)، استفاده از جدایه‌ی *P. protogenes* CHA0 (CHA0) و استفاده از جدایه‌ی *P. alloputida* RUM14 (RUM14) و فیلترکیک در ۲ سطح، عدم کاربرد (F0) و کاربرد ۳ درصد وزنی (F3%) (معادل ۳۹ تن بر هکتار) بر رشد و میزان عناصر غذایی و کاهش تنش ناشی از علف‌کش متری‌بیوزین بررسی شد. به‌طور کلی آزمایشات در ۱۸ تیمار در ۳ تکرار در ۵۴ گلدان انجام شد.

این پژوهش در گلخانه‌ی گروه خاک‌شناسی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان اجرا گردید. متوسط درجه حرارت روزانه و شبانه گلخانه در زمستان به‌ترتیب ۱۹ و ۸ درجه سلسیوس بود. بذور اسفناج در گلدان‌های حاوی ۴۰ درصد خاک مزرعه و ۶۰ درصد ماسه کشت شدند (با توجه به میزان بالای رس و لای خاک و جلوگیری از جدا شدن خاک گلدان از بدنه داخلی گلدان با کاهش رطوبت خاک در طول آزمایش، به نسبت فوق، خاک توسط ماسه سبک گردید). لازم به ذکر است که برای پایین آوردن شوری ماسه، آن را کاملا با آب مقطر چندین بار شسته و سپس در معرض هوا

1- Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)

خشک گردید. برای حذف پاتوژن‌ها، قارچ‌ها و باکتری‌های بومی خاک و ایجاد محیط بدون رقابت جهت وضوح اثرات باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد، خاک و ماسه را با دستگاه اتوکلاو، در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس به‌مدت ۱ ساعت استریل شدند. گلدان‌های این آزمایش با قطر دهانه‌ی ۱۶/۵ سانتی‌متری مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به حجم گلدان‌ها درون هر گلدان ۲۹۷۰ گرم خاک فوق‌الذکر ریخته شد. برای کشت اسفناج از رقم ورامین استفاده گردید. بذور این گیاه به‌صورت مستقیم و در تمامی ۵۴ گلدان به تعداد یکسان بذر (۱۰ عدد) به عمق یک سانتی‌متر که توسط میله‌ی شیشه‌ای ایجاد گردید، کشت شد. قسمت بالای گلدان‌ها جهت آبیاری تا عمق ۲ سانتی‌متری خالی نگه داشته شد. در هر دور آبیاری رطوبت گلدان‌ها در تمامی مراحل آن‌ها در حد ظرفیت زراعی تعیین گردید. در این آزمایش گلدان‌های شاهد بدون اضافه کردن تیمارها، و بقیه‌ی گلدان‌ها با تیمارهای فیلترکیک، باکتری ریزوسفری محرک رشد و علف‌کش در سطوح تعیین شده به خاک گلدان‌ها اضافه شد.

مایه‌زنی باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد

سوسپانسیون باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد به‌منظور بررسی تاثیر آن در میزان رشد و جذب عناصر در گیاه اسفناج در شرایط عادی و تحت تنش علف‌کش مورد استفاده قرار گرفت. در این تیمارها از ۲ جدایه باکتری سودوموناس *P. protogenes* CHA0 و *P. alloputida* RUM14 تهیه شده از کلکسیون گروه گیاه‌پزشکی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان استفاده گردید. جدایه‌ی *P. protogenes* CHA0 یک جدایه‌ی استاندارد بین‌المللی با خصوصیات محرک رشد گیاهی بوده و جدایه‌ی *P. alloputida* RUM14 که از خاک مزارع ایران جداسازی شده و پیش از این خصوصیات محرک رشد آن به اثبات رسیده است (۲۷). همچنین جدایه‌ی *P. alloputida* RUM14 دارای آنزیم ای‌سی‌سی‌دی امیناز[1] می‌باشد که در تنظیم میزان اتیلن در گیاه تحت تنش مؤثر می‌باشد. به‌منظور مایه‌زنی جدایه‌های باکتری از روش کشاورز توحید و همکاران (۲۷) استفاده گردید. در این روش جدایه‌های باکتری در محیط کشت مغذی مایع رشد داده شدند و پس از جداسازی پیکره باکتری از محیط کشت مایع بوسیله سانتریفیوژ، از آنها سوسپانسیونی با چگالی نوری یک در جذب نوری ۶۰۰ تهیه گردید (OD_{600}=1). تیمار CHA0 و RUM14 با مایه‌زنی ۵۰ سی‌سی از سوسپانسیون تهیه‌شده باکتری به خاک گلدان حاوی گیاچه‌های ۱۴ روزه اعمال گردید. تیمار شاهد با آب مقطر استریل مایه‌زنی گردید.

1- ACC deaminase

انجام تیمار فیلترکیک

تیمار فیلترکیک یا گل صافی قبل از کاشت و هنگام آماده‌سازی گلدان‌ها صورت گرفت، به این صورت که قبل از کاشت بذرهای اسفناج در گلدان‌ها، ۹۰ گرم فیلترکیک تازه، تهیه شده از مؤسسه تحقیقات و اموزش نیشکر، شرکت توسعه‌ی کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر در جنوب استان خوزستان، به‌صورت پودر و با خاک گلدان‌ها به‌صورت یکنواخت مخلوط گردید. این میزان فیلترکیک معادل ۳ درصد وزنی گلدان ۳ کیلویی می‌باشد (تیمار F3%). تیمار F0 فاقد فیلترکیک در نظر گرفته شد.

تیمار علف‌کش بر گیاهچه‌های اسفناج

بر اساس آزمایشات و مشاهدات اولیه انجام شده ۳ سطح علف‌کش متری‌بیوزین صفر (H0)، ۵۰ گرم (H1) و ۱۰۰ گرم (H2) در هکتار در نظر گرفته شد (به‌ترتیب معادل ۰، ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌گرم برای هر گلدان). سطوح مذکور در یک نوبت همراه با آب آبیاری در حد ظرفیت مزرعه به گلدان‌ها اضافه گردید. تیمار علف‌کش در هفته‌ی چهارم بعد از کشت بذور اسفناج انجام گرفت. تاثیر سطوح مختلف علف‌کش بر گیاه اسفناج به تنهایی، همراه با سایر تیمارها (باکتری ریزوسفری محرک رشد گیاه و فیلترکیک) بررسی گردید.

بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در گلدان‌ها

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نمونه برداری شده از مزرعه شامل بافت خاک به‌روش هیدرومتری (۱۵)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به‌روش چاپمن (۱۰)، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره‌ی گل اشباع به‌وسیله‌ی دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی (۴۷)، واکنش یا اسیدیته‌ی خاک توسط دستگاه پ‌هاش‌متر در گل اشباع (۵۱)، سدیم محلول و پتاسیم قابل جذب با دستگاه فلیم فتومتر (۲۵)، نیتروژن کل به‌روش کجلدال (۱۹)، میزان ماده آلی به‌روش هضم تر (۵۳)، فسفر قابل جذب به‌روش اولسن با دستگاه اسپکتروفتومتر (۴۱)، درصد آهک (۱۹)، میزان جذب آهن، روی، مس و منگنز به‌روش لیندزی و نورول (۳۱) با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری گردید (جدول ۱).

اندازه‌گیری برخی از خصوصیات فیلترکیک

میزان عناصر غذایی پرمصرف فیلترکیک (نیتروژن کل، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، فسفر) و کم‌مصرف (روی، آهن، مس و منگنز) از روش خشک‌سوزانی (۵۲) استفاده شد. اندازه‌گیری توسط مؤسسه تحقیقات و اموزش نیشکر، شرکت توسعه‌ی کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر انجام گردید. همچنین در این تحقیق برخی خصوصیات دیگر شامل هدایت الکتریکی و اسیدیته (در حالت عصاره اشباع طبق

دستورالعمل مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر) مواد آلی، خاکستر، رطوبت، C/N بر اساس روش و دستورالعمل‌های موسسه تحقیقات و آموزش نیشکر نیز اندازه‌گیری گردید (جدول ۲).

اندازه‌گیری عناصر پرمصرف، کم‌مصرف و تعیین ماده خشک اندام هوایی

به‌منظور بررسی میزان عناصر غذایی پرمصرف (پتاس، فسفر، کلسیم و منیزیم)، کم‌مصرف (مس، آهن و روی) و وزن خشک اندام هوایی در تیمارهای مختلف انتهای هفته‌ی هشتم برداشت گیاهان به‌صورت دستی و با استفاده از قیچی باغبانی انجام گرفت. برای این منظور اندام‌هوایی گیاه از سطح خاک به‌وسیله‌ی قیچی باغبانی قطع گردید و در پاکت‌های کاغذی قرار گرفتند. به‌منظور تعیین وزن ماده خشک گیاه قطعات برداشت شده به‌مدت ۷۲ ساعت در آون با ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و سپس توزین شدند. در این آزمایش، برای اندازه‌گیری عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف از روش خشک‌سوزانی (۵۲) استفاده شد.

طرح آزمایشی و محاسبات آماری

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کاملا تصادفی اجرا گردید. تجزیه و تحلیل آماری داده‌های حاصل از این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه‌ی میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد. با توجه به اینکه در گلخانه بر خلاف اتاق رشد شرایط دریافت نور یکسان نمی‌باشد و در طول روز با توجه به چرخش جهت تابش نور خورشید، نور دریافتی در گلخانه از طلوع تا غروب متفاوت هست لذا برای رفع این اشکال از طرح بلوک‌های کاملا تصادفی استفاده شد تا بلوک‌ها (تکرارها) در جهت عمود بر چرخش نور خورشید قرار گیرند و دریافت نور برای تمام گلدان‌ها از یکنواختی نسبی برخوردار باشند.

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نشان داد که خاک نمونه‌برداری شده از مزرعه یک خاک آهکی با بافت لومی رسی و فقیر از مواد آلی می‌باشد (جدول ۱). کمبود مواد آلی در خاک باعث کمبود عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن می‌شود که به‌صورت عمده از منابع مختلف آلی و شیمیایی برای گیاه تأمین می‌گردند.

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این پژوهش

Table 1- Some physical and chemical properties of the soil and Filter cake used in this study

خصوصیات Properties	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC ($cmol^+/kg$)	مواد آلی OM (%)	شوری EC (dS/m)	pH	بافت خاک Soil texture	رس Clay %	لای Silt %	شن Sand %
خاک مزرعه از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری Soil sample (0-30 cm)	15.2	0.54	3.5	7.6	Clay Loam	31	38	31

	منگنز Mn (mg/kg)	روی Zn (mg/kg)	مس Cu (mg/kg)	آهن Fe (mg/kg)	پتاسیم قابل جذب K (mg/kg)	فسفر قابل جذب P (mg/kg)	نیتروژن کل N (%)	آهک $CaCo_3$ (%)	سدیم محلول Na^+ (meq/L)
	9.4	1.2	1.9	4.5	225	3.2	0.06	37	10.76

جدول ۲- نتایج اندازه‌گیری برخی از خصوصیات فیلترکیک

Table 2- The results of measurement of some properties of Filter cake

فیلترکیک* Filter cake	فسفر P (mg/kg)	C/N	نیتروژن کل N (%)	خاکستر Ash (%)	مواد آلی قابل اکسیده OM (%)	شوری EC (dS/m)	pH
	325	13.19	1.07	13.3	24.3	4.62	6.1

	مس Cu (mg/kg)	روی Zn (mg/kg)	منگنز Mn (mg/kg)	آهن Fe (mg/kg)	منیزیم Mg (mg/kg)	کلسیم Ca (mg/kg)	پتاسیم K (mg/kg)
	64	109.2	278	268	35040	78000	1800

*خصوصیات توسط موسسه تحقیقات و اموزش نیشکر، اندازه‌گیری شده است.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مورد مطالعه بر غلظت عناصر پتاسیم، کلسیم، منیزیم، فسفر، روی، مس، آهن و وزن خشک در اندام‌هوایی گیاه اسفناج

Table 3- The results of variance analysis of the effect of treatments on the concentration of potassium, calcium, magnesium, phosphorus, zinc, copper, iron and leaf dry weight of spinach plant

منابع تغییرات s.o.v	وزن خشک اندام هوایی Leaf dry weight	آهن Fe	مس Cu	روی Zn	فسفر P	منیزیم Mg	کلسیم Ca	پتاسیم K	درجه آزادی df
علف‌کش Herbicide	34.34**	8627.62**	215.61**	3999.34**	6426613.96**	7997279.63**	7992279.64**	12585796296**	2
فیلتر کیک Filter cake	21.05**	7245.39**	132.25**	4090.74**	782489.41**	9350016.67**	9352516.67**	170666667**	1
باکتری Bacteria	26.58**	3932.54**	83.08**	2005.55**	319464649.63**	12969846.30**	19969846.30**	1258351852**	2
علف‌کش×فیلتر کیک Herbicide* Filter cake	0.19ns	83.62 ns	37.68**	76.25*	9897.41 ns	8641116.67*	866161.67 *	23166667 ns	2
علف‌کش×باکتری Herbicide* Bacteria	1.48**	51.32 ns	18.77**	49.94*	78657.41*	2004409.07 ns	210449.16 ns	3796296 ns	4
فیلتر کیک×باکتری Filter cake* Bacteria	3.99**	225.81 ns	1.70 ns	3.85 ns	16853.58 ns	191383.89**	119338.89**	722222 ns	2
باکتری×فیلتر کیک×علف‌کش Herbicide* Filter cake* Bacteria	0.01ns	51.32ns	4.91**	29.82ns	29938.19 ns	498363.89*	49843.89*	1722222ns	4
خطای آزمایشی Erorr	0.24	74.77	0.1973981	14.51	47580.00	1172721.22	1712271.22	12351852	36
ضریب تغییرات (%) (CV)	9.55	4.96	9.81	7.57	8.43	5.35	5.20	5.28	-

ns، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** are non-significant, significant at P≤0.05 and P≤0.01, respectively.

برخی از خصوصیات اندازه‌گیری شده برای فیلترکیک

براساس نتایج حاصل از تجزیه‌ی فیلترکیک، این ماده‌ی آلی دارای پ-هاش نسبتا اسیدی بوده و بر مبنای وزن خشک، حاوی مقادیر قابل توجهی عناصر غذایی پر مصرف از جمله: فسفر، کلسیم، منیزیم، پتاسیم و نیتروژن و کم‌مصرف شامل روی، مس، منگنز و آهن می‌باشد (جدول ۲). از لحاظ خصوصیات ظاهری فیلترکیک دارای ظاهری اسفنجی و سیاه رنگ است که ظرفیت جذب رطوبتی بالایی دارد. این ماده مهم‌ترین پسماند تولید شکر می‌باشد. در واقع، فیلترکیک یا گل صافی بقایای حاصل از تصفیه (فیلتر) نمودن شربت نیشکر در فرایند استحصال شکر در کارخانه می‌باشد.

تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر غلظت عناصر پر مصرف و کم مصرف و وزن خشک

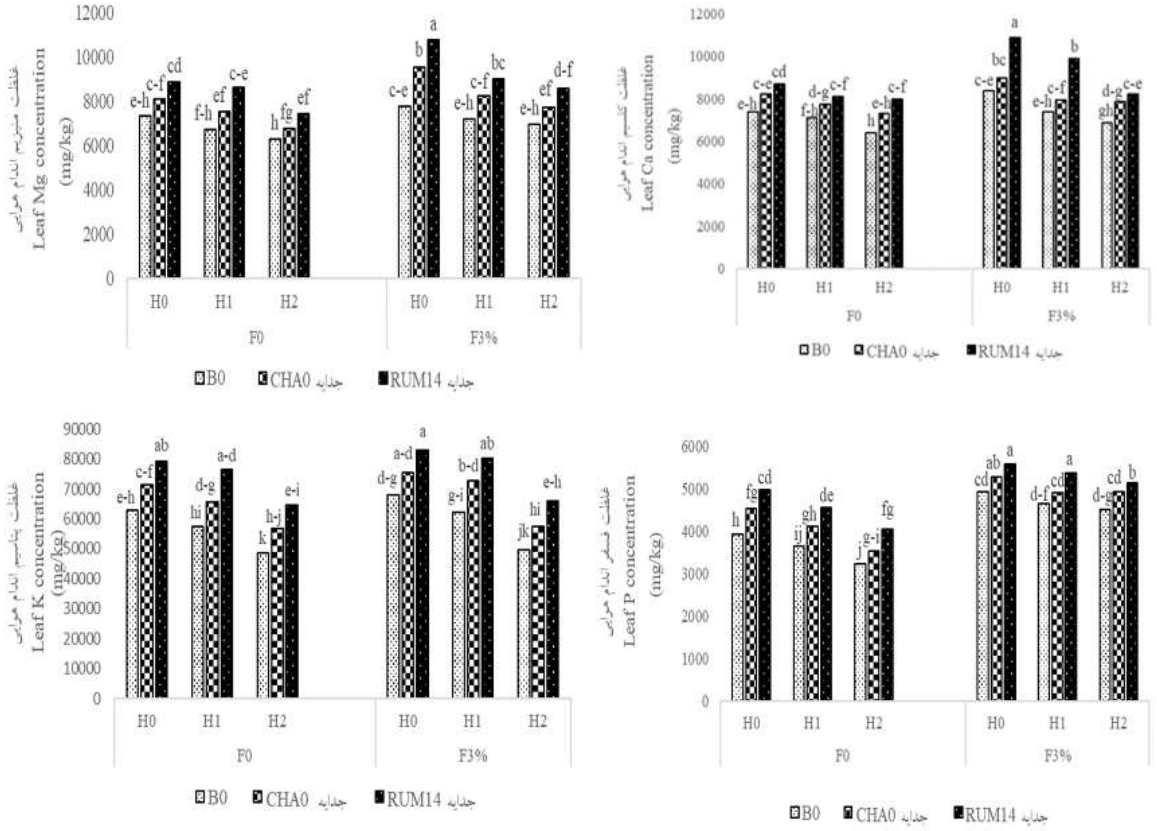
جدول تجزیه واریانس نشان می‌دهد که اثرات اصلی علف‌کش، فیلترکیک، باکتری در سطح احتمال ۱ درصد بر غلظت عناصر پر مصرف (پتاسیم، کلسیم، منیزیم و فسفر)، کم‌مصرف (روی، مس و آهن) و وزن خشک در اندام هوایی گیاه معنی‌دار شد. مطابق با نتایج تجزیه واریانس مشاهده می‌شود که اثرات متقابل تیمارهای علف‌کش و فیلترکیک، برای عناصر کلسیم، منیزیم و روی در سطح احتمال ۵ درصد، و برای عنصر مس در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد. اثر متقابل علف‌کش و باکتری، برای عناصر فسفر و روی در سطح احتمال ۵ درصد و برای عنصر مس و وزن خشک اندام هوایی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل فیلترکیک و باکتری برای عناصر کلسیم، منیزیم و وزن خشک اندام هوایی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۳).

تأثیر باکتری ریزوسفری محرک رشد، فیلترکیک و علف‌کش بر غلظت عناصر پر مصرف

بررسی آماری بر هم‌کنش سه‌گانه‌ی علف‌کش، فیلترکیک و باکتری سودوموناس برای عناصر کلسیم و منیزیم در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد. این بررسی سه‌گانه نشان داد، بیشترین غلظت این عناصر در گیاه اسفناج مربوط به تیمار عدم کاربرد علف‌کش و استفاده‌ی همزمان از فیلترکیک و باکتری سودوموناس جدایه RUM14 می‌باشد (RUM14+F3%+H0) و پس از آن تیمار RUM14+F3%+H1 از نظر آماری در جایگاه بعد قرار گرفت (شکل ۱). همچنین بررسی‌های آماری نشان داد کم‌ترین غلظت عناصر پر مصرف در اندام هوایی متعلق به عدم کاربرد باکتری ریزوسفری محرک رشد و فیلترکیک و استفاده ۱۰۰ گرم در هکتار علف‌کش می‌باشد (B0+F0+H2) (شکل ۱). بررسی‌های آماری نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش غلظت علف‌کش میزان غلظت عناصر پر مصرف در اندام هوایی اسفناج کاهش می‌یابد، اما استفاده از باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد خصوصا RUM14 و یا فیلترکیک (F3%) کمبود عناصر پر مصرف در اندام هوایی گیاهان تحت تنش را جبران می‌نماید. بیشترین غلظت پتاسیم، کلسیم، منیزیم و فسفر با میانگین به‌ترتیب ۸۳۰۰۰، ۱۰۸۸۶/۷، ۱۰۷۶۶/۶ و ۵۵۸۳/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک در تیمار (RUM14+F3%+H0) و کم‌ترین غلظت پتاسیم، کلسیم، منیزیم و فسفر در اندام هوایی با میانگین به‌ترتیب ۴۸۸۶۷، ۶۴۰۳/۳، ۶۲۸۳/۳ و ۳۲۳۳/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک در تیمار (B0+F0+H2) می‌باشد.

پیش از این سایر محققین نشان دادند که استفاده از باکتری‌های سودوموناس و فیلترکیک می‌تواند میزان عناصر پر مصرف در گیاهان مختلف را افزایش دهد. محمودزاده و همکاران (۳۳) نشان دادند باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد و قارچ‌های آربسکولار میکوریزا از طریق تجزیه سیلیکات‌ها و انحلال کانی‌ها باعث آزادسازی پتاسیم و افزایش جذب عناصر غذایی پر مصرف مانند نیتروژن و فسفر در گیاه نعناع فلفلی می‌گردد. شریفی (۴۹) بیان کرد استفاده از فیلترکیک باعث افزایش فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در نیشکر می‌گردد. همچنین بهمنیان و همکاران (۷) تاثیر فیلتر کیک در افزایش عنصر کلسیم در گیاه گشنیز را نشان داد.

نتایج این تحقیق نیز بیان‌گر افزایش میزان عناصر پر مصرف با استفاده از باکتری‌های سودوموناس و فیلترکیک در گیاه اسفناج می‌باشد. اما نکته‌ی قابل توجه در این تحقیق افزایش بیشتر عناصر پر مصرف در گیاه اسفناج در استفاده‌ی همزمان این دو تیمار است به‌نحوی که تنش ناشی از استفاده‌ی علف‌کش را به‌میزان زیادی کنترل می‌نماید. تحقیقات پیشین نشان داده است که باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاهی با فعالسازی سیگنال‌های دفاعی مانند هیدروژن پراکساید (H_2O_2) و یا نیتریک اکساید (NO) گیاه را برای دفاع در برابر تنش‌زنده و غیره زنده مقاومتر می‌نمایند. این باکتری‌ها در ادامه با تحریک گیاه به تولید انواع آنتی اکسیدانت‌ها (مانند پراکسیداز، کاتالاز و...) باعث تنظیم سیگنال‌های دفاعی در گیاه شده و مانع از آسیب گیاه بر اثر تولید بی‌رویه این سیگنال‌ها در گیاه می‌گردند (۴۲ و ۲۸). همچنین این باکتری‌ها با افزایش حجم ریشه می‌توانند باعث افزایش وزن خشک و جذب بیشتر عناصر در گیاه شوند (۲۸). پیشتر کشاورز توحید و همکاران (۲۸) توانایی جدایه CHA0 و RUM14 در القا گیاه به تولید سیگنال، تنظیم فعالیت آنتی‌اکسیدانی و افزایش حجم ریشه نشان داده‌اند که این عوامل می‌تواند از علل بهبود رشد گیاه اسفناج و کاهش تنش ناشی از علف‌کش در گیاه اسفناج باشد.



شکل ۱- تأثیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه *P. protogenes* CHA0 و *P. alloputida* RUM14 و فیلترکیک بر غلظت عناصر پر مصرف پتاسیم، کلسیم، منیزیم و فسفر در گیاه اسفناج در سطوح مختلف علف‌کش

میانگین‌های با حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد می‌باشند.

Figure 1- The effect of plant growth-promoting bacteria *P. protogenes* CHA0 and *P. alloputida* RUM14 and filter cake on the concentration of macro nutrients (potassium, calcium, magnesium and phosphorus) in spinach at different levels of herbicide

Means with the same letters according to the Duncan test have no significant difference at the statistical level of 5%.

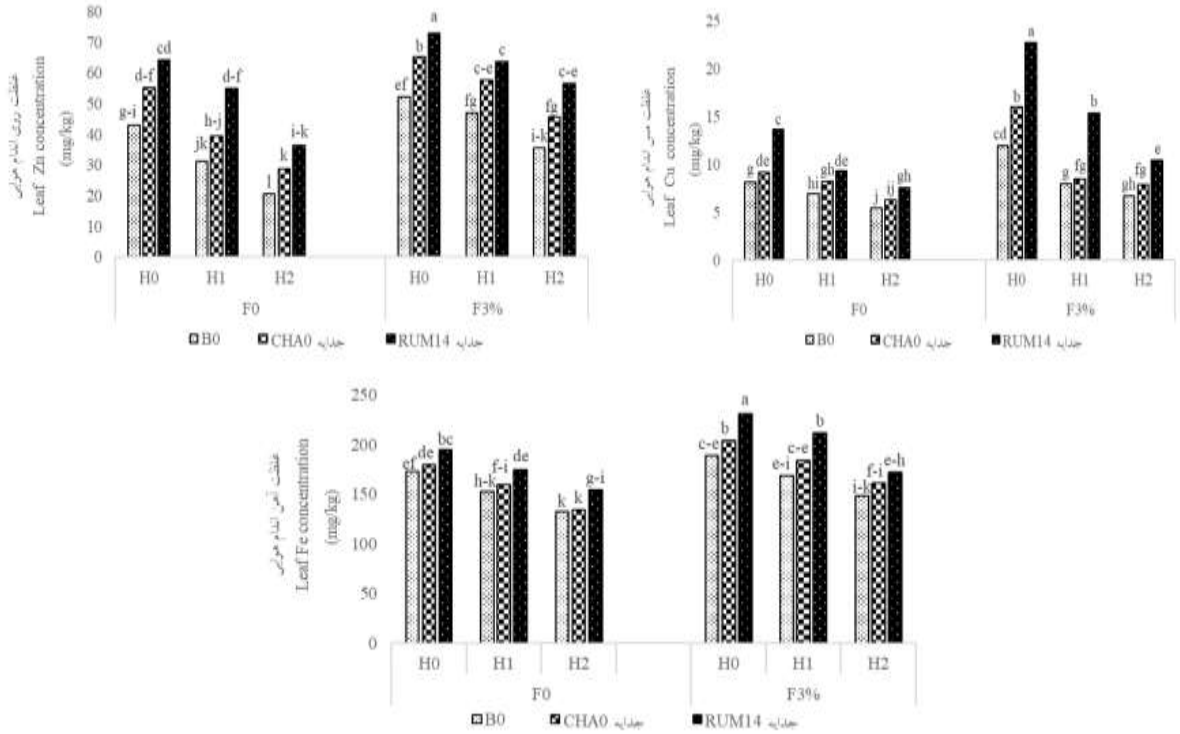
تأثیر باکتری ریزوسفری محرک رشد، فیلترکیک و علف‌کش بر غلظت عناصر کم‌مصرف

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس، بر هم‌کنش سه‌گانه‌ی علف‌کش، فیلترکیک و باکتری سودوموناس، برای عنصر مس در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد. بیشترین غلظت روی، مس و آهن در گیاه اسفناج (به‌ترتیب با میانگین ۷۳، ۲۲/۷۳ و ۲۳۱/۳۶ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن ماده خشک)، مربوط به تیمار RUM14+F3%+H0 می‌باشد و تیمار CHA0+F3%+H0 در جایگاه بعد قرار گرفت (شکل ۲). کم‌ترین غلظت عناصر کم‌مصرف روی، مس و آهن در اندام هوایی گیاه اسفناج (به‌ترتیب با میانگین ۱۹/۵۰، ۴/۴۰ و ۱۳۲/۶۶۷ میلی‌گرم در کیلوگرم) مربوط به تیمار استفاده‌ی ۱۰۰ گرم در هکتار علف‌کش به‌تنهایی و بدون کاربرد فیلترکیک و باکتری ریزوسفری محرک رشد (B0+F0+H2)، می‌باشد (شکل ۲). پیش از این شریفی (۴۹) و داوری‌راد و همکاران (۱۱)، تاثیر مثبت فیلترکیک در افزایش عناصر کم‌مصرف را به‌ترتیب در کلزا و شبدر نشان دادند. آن‌ها نشان دادند که فیلترکیک باعث افزایش عنصر مس در کلزا و روی، مس و آهن در شبدر می‌گردد. همچنین تأثیر استفاده از باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد در افزایش عناصر کم‌مصرف در گیاهان توسط محققین مختلف نیز نشان داده شده است. استیکن و همکاران (۱۳) بیان کردند با استفاده از جدایه‌های باکتری سودوموناس و باسیلوس میزان روی در برگ توت‌فرنگی افزایش می‌یابد (۱۳). شیرمردی و همکاران (۵۰) با تلقیح بذر افتابگردان به باکتری سودوموناس فلورسنت نشان دادند که این باکتری باعث افزایش معنی‌داری در جذب روی و مس می‌گردد.

گیاهان می‌توانند از سیدروفورهای تولید شده توسط باکتری‌ها به‌عنوان عاملی برای تأمین آهن مورد نیاز خود استفاده کنند (۳۰ و ۵). نیک‌مهر و همکاران (۲۰۱۴)، بیان کردند که کاربرد جدایه‌های باکتری سودوموناس باعث افزایش معنی‌دار آهن در گیاه کنجد می‌گردد (۴۰). دو جدایه CHA0 و RUM14 نیز توانایی تولید سیدروفور داشته (۲۷) که می‌تواند یکی از دلایل افزایش عنصر آهن در گیاه اسفناج در این تحقیق باشد.

برخی از باکتری‌های محرک رشد گیاهی توانایی تجزیه علف‌کش‌ها را دارا می باشند. رضایی و همکاران (۴۶) نشان دادند که گونه‌های مختلف سودوموناس توانایی تجزیه علف‌کش آترازین را دارا می‌باشند. همچنین اینتاما و همکاران (۲۰۲۱) توانایی باکتری باسیلوس در تجزیه پاراکوآت را بیان کردند. با توجه به اینکه جدایه‌هایی از گونه *P. alloputida* نیز توانایی تجزیه ترکیبات عالی را دارا می‌باشند (۲۹) احتمال تجزیه علف‌کش متری‌بیوزین توسط جدایه RUM14 مورد استفاده در این تحقیق نیز وجود داشته که اثرات مضر علف‌کش را در گیاه اسفناج کاهش می‌دهد.

بررسی آماری نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از باکتری سودوموناس به‌عنوان باکتری ریزوسفری محرک رشد گیاهی و فیلترکیک به‌تنهایی می‌توانند میزان عناصر کم مصرف را در گیاه اسفناج در شرایط عادی و همچنین در شرایط تنش ناشی از استفاده‌ی علف‌کش افزایش دهند. همچنین مشاهده گردید استفاده همزمان این دو تیمار بهترین تاثیر در کاهش تنش ناشی از علف‌کش را دارا می‌باشد. یانگ و همکاران (۵۴) بیان کردند که باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاهی در کنترل انواع تنش‌های محیطی و افزایش جذب مواد غذایی توسط گیاهان موثر می‌باشند که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که باکتری سودوموناس جدایه‌ی RUM14 در مقایسه با جدایه‌ی CHA0 نه‌تنها در شرایط عادی بلکه در شرایط تنش ناشی از استفاده علف‌کش جذب عناصر کم‌مصرف را بیشتر افزایش داده و این توانایی می‌تواند به‌دلیل سازگاری این جدایه با خاک و آب و هوای ایران و داشتن آنزیم ای‌سی‌سی‌دی آمیناز در تنظیم میزان اتیلن در گیاه تحت تنش باشد (۲۷ و ۲۰).

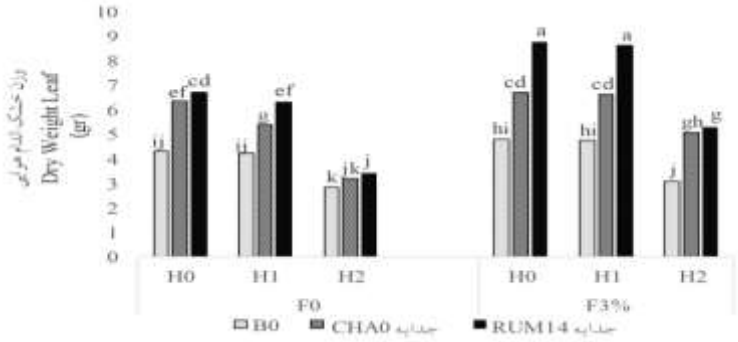


شکل ۲- تأثیر استفاده از باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد *P. protogenes* CHA0، *P. alloputida* RUM14 و فیلترکیک بر غلظت عناصرکم‌مصرف روی، مس وآهن در گیاه اسفناج در سطوح مختلف علف‌کش

میانگین‌های با حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد می‌باشند.

Figure 2– The effect of plant growth-promoting bacteria *P. protogenes* CHA0, *P. alloputida* RUM14 and filter cake on the concentration of micro nutrients (zinc, copper and iron) in spinach at different levels of herbicide

Means with the same letters according to Duncan test have no significant difference at the statistical level of 5%.



شکل ۳- تأثیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد *P. protogenes* CHA0 و یا *P. alloputida* RUM14 و فیلترکیک بر وزن ماده خشک اندام هوایی اسفناج در سطوح مختلف علف‌کش

میانگین‌های با حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد می‌باشند.

Figure 3– The effect of plant growth-promoting bacteria *P. protogenes* CHA0 or *P. alloputida* RUM14 and filter cake on leaf dry weight of spinach at different levels of herbicide

Means with the same letters according to Duncan test have no significant difference at the statistical level of 5%.

تأثیر باکتری ریزوسفری محرک رشد، فیلترکیک و علف‌کش بر وزن خشک اندام هوایی گیاه اسفناج

بررسی‌های آماری این تحقیق نشان داد بیشترین وزن خشک گیاه با میانگین ۸/۷۶ و ۷/۶۸ گرم به‌ترتیب در تیمار RUM14+F3%+H0 و RUM14+F3%+H1 و کم‌ترین وزن خشک با میانگین ۲/۸۳ گرم در تیمار B0+F0+H2 ملاحظه گردید (شکل ۳). با توجه به اینکه علف‌کش متری‌بیوزین باعث اختلال در زنجیره‌ی انتقال الکترون در فتوسیستم II می‌شود (۵۵) به‌نظر می‌رسد علت این کاهش در میزان وزن خشک اندام هوایی به‌علت کاهش در فتوسنتز و تولید قند می‌باشد. بخش‌محمدنژاد و ایزدی (۸)، بیان کرد کاربرد علف‌کش‌های اکسی‌فلورفن، ارادیکان، متری‌بیوزین و پندی‌متالین سبب کاهش وزن خشک گیاه بالنگو (*Lallemantia* sp.) می‌شود. هوانگ و همکاران (۲۲) نیز گزارش کرده‌اند که کاهش وزن ماده خشک اندام هوایی گیاه ذرت، تحت سمیت متری‌بیوزین، به‌علت کاهش فتوسنتز و به‌دنبال آن اختلال در انباشتگی کربوهیدرات‌ها می‌باشد. همچنین مطابق با نتایج مکاریان و همکاران (۳۴)، کاربرد علف‌کش متری‌بوزین به طور قابل توجهی باعث کاهش ماده خشک اندام هوایی گیاه ذرت و جو می‌شود. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که استفاده از علف‌کش متری‌بیوزین باعث کاهش وزن خشک اندام هوایی اسفناج شده و با افزایش غلظت علف‌کش کاهش وزن خشک افزایش می‌یابد که با نتایج محققین پیشین همخوانی دارد.

پشت‌دار و همکاران (۴۵) و الهی‌نیک و همکاران (۱۲) نشان دادندکه استفاده از فیلترکیک به‌ترتیب باعث افزایش ماده خشک در ذرت و دانهال‌های پسته می‌گردد. در این تحقیق نیز تیمار گیاهچه‌های اسفناج با فیلترکیک در تنش و یا بدون تنش علف‌کش باعث افزایش وزن خشک گردید. در تحقیقی دیگر منجزی و همکاران (۳۵)، بیان کردند که با افزایش مصرف فیلترکیک و کود زیستی وزن ماده‌ی خشک کلزا افزایش می‌یابد. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که استفاده‌ی همزمان فیلترکیک و باکتری‌های سودوموناس محرک رشد گیاهی (RUM14+F3%) نه‌تنها بهترین اثر در افزایش وزن خشک در گیاه اسفناج را داشته بلکه این تیمار بیشترین تأثیر در کاهش تنش ناشی از استفاده علف‌کش را دارا می‌باشد (شکل ۳). برخی از باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاهی با تولید هورمون‌های گیاهی (مانند اکسین و سیتوکنین) باعث افزایش رشد در گیاه می‌گردند. برخی دیگر با تولید سیدروفور باعث افزایش جذب آهن در گیاه و در نتیجه افزایش رشد گیاه می‌گردند (جدایه‌های این تحقیق نیز توانایی تولید سیدروفور را دارا می‌باشند (۲۷)).

تنش‌های زیستی (حمله انواع پاتوژن) و غیر زیستی (آلاینده‌های آلی، شوری، خشکی، فلزات و ...) باعث افزایش ۱-آمینوسیکلوپروپان۱-کربوکسیلات[1] (ACC) شده که نتیجه آن افزایش اتیلن در گیاه و ایجاد زردی و ریزش برگ می‌گردد (۲۰). گلیک (۲۰) بیان می‌کند کاهش ACC به روش شیمیایی و یا استفاده از میکروارگانیسم‌هایی که دارای آنزیم ای‌سی‌سی دی‌آمیناز می‌باشند می‌توانند باعث کاهش خسارت ناشی از افزایش اتیلن در گیاهان تحت تنش گردند. تعدادی از باکتری‌های محرک رشد گیاهی با تولید آنزیم ای‌سی‌سی‌دی آمیناز پیش ماده تولید اتیلن (ACC) را در گیاهان تحت تنش کاهش داده و مانع افزایش این هورمن در شرایط تنش‌زا شده و در نتیجه باعث کاهش زردی و ضعف در گیاه می‌گردند. افزایش تولید اتیلن در گیاهان بر اثر استفاده از علف‌کش‌ها قبلا توسط

5-1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC)

برخی از محققین بیان شده است (۲) بنابراین احتمال کاهش اتیلن توسط آنزیم ای‌سی‌سی‌دی آمیناز تولید شده توسط جدایه *P. alloputida* RUM14 وجود داشته و می‌تواند یکی از دلایل موفقیت این جدایه در کاهش تنش ناشی از علف‌کش متری‌بیوزین در گیاه اسفناج باشد. از طرف دیگر تعداد زیادی از جدایه‌های گونه *P. alloputida* دارای توانایی زیست پالایندگی و تجزیه‌کنندگی ترکیبات آروماتیک می‌باشند (مانند *P. alloputida* K2440, JLR11, S12, ND6) بنابراین توانایی تجزیه علف‌کش متری‌بیوزین و کاهش آسیب به گیاه اسفناج توسط جدایه *P. alloputida* RUM14 دور از انتظار نیست (۲۹).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاهی (*P. alloputida* RUM14 و *P. protogenes* CHA0) و فیلترکیک (به‌عنوان کود آلی) باعث افزایش مواد معدنی برگی از جمله عناصر پرمصرف (پتاسیم، کلسیم، منیزیم و فسفر) و عناصر کم‌مصرف (مس، روی و آهن) و همچنین وزن ماده خشک اندام هوایی اسفناج می‌گردند. در این میان بیشترین تغییرات در گیاهان تیمار شده با باکتری *P. alloputida* RUM14 مشاهده گردید. استفاده‌ی همزمان از جدایه‌ی *P. alloputida* RUM14 و فیلترکیک افزایش چشم‌گیری در غلظت عناصر پرمصرف و کم‌مصرف و وزن خشک اسفناج داشت. در ادامه مشاهده شد علف‌کش متری‌بیوزین منجر به کاهش غلظت عناصر و وزن خشک برگی می‌گردد. اما گیاهان تیمار شده با باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد و فیلتر کیک خصوصا ترکیب توام جدایه‌ی *P. alloputida* RUM14 و فیلترکیک شدیدا تنش ناشی از استفاده‌ی علف‌کش متری‌بیوزین را کاهش داد. هرچند مواد آلی موجود در خاک سبب کنترل آب‌شویی آفت‌کش‌ها و کاهش آلودگی آب‌های زیر زمینی می‌شود اما افزایش فعالیت میکروبی خاک می‌تواند سبب تسریع فرایند تجزیه‌ی علف‌کش شود. همانطور که ذکر گردید توانایی زیست‌پالایندگی جدایه‌های *P. alloputida* قبلا توسط سایر محققین گزارش گردیده شده است. با توجه به بهبود جذب عناصر و وزن خشک اسفناج تحت تنش علف‌کش در زمان استفاده از *P. alloputida* RUM14 احتمال توانایی این جدایه در تجزیه علف‌کش متری‌بیوزین نیز امکان‌پذیر بوده اما نیازمند تحقیقات بیشتر در این خصوص می‌باشد. از طرف دیگر *P. alloputida* RUM14 با داشتن آنزیم ای‌سی‌سی‌دی آمیناز توانایی تنظیم اتیلن در گیاه اسفناج را دارا می‌باشد. در مجموع توانایی تیمار باکتری ریزوسفری محرک رشد گیاهی و فیلتر کیک در افزایش رشد گیاه اسفناج را می‌توان ناشی از ۱- تأمین مواد غذایی بیشتر برای گیاه اسفناج به‌دلیل غنی بودن فیلتر کیک ۲- توانایی باکتری‌های سودوموناس در القا مقاومت در گیاه تحت تنش، تأمین برخی از مواد غذایی مانند آهن بدلیل توانایی تولید سیدروفور ۳- تأمین مواد غذایی توسط فیلتر کیک برای رشد بیشتر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاهی و احتمال افزایش جمعیت این باکتری‌ها در استفاده همزمان با فیلتر کیک ۴- غنی بودن فیلتر با مواد آلی که وضعیت فیزیکی و بیولوژیکی خاک را بهبود می‌بخشد دانست. نتایج این تحقیق نشان داد که باکتری ریزوسفری محرک رشد گیاهی *P. alloputida* RUM14 و فیلترکیک، پتانسیل مناسب برای تولید کودهای زیستی و آلی و همچنین کاهش اثرات منفی علف‌کش را دارا می‌باشند.

منابع

1- Abdollahi L. 2005. Investigation of the effect of filter cake and bagasse as organic fertilizer on changes in carbon content, soil nutrient content, soil properties and growth and yield of sugarcane. Master Thesis of Chamran University. Ahvaz. (In Persian)

2- Abeles F.B. 1968. Herbicide-induced ethylene production: role of the gas in sublethal doses of 2, 4-D. Weed Science 16(4): 498-500.

3- AghaAlikhani M., Iranpour A., and Naghdi Badi H. 2013. Changes in agronomical and phytochemical yield of purple coneflower (*Echinaceae purpurea* (L.) Moench) under urea and three biofertilizers application. Journal of Medicinal Plants 12(46): 121-136. (In Persian with English abstract)

4- Ahmad F., Ahmad I., and Khan M.S. 2008. Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. Microbiological Research 163(2): 173-181.

5- Ahmad M., and Kibret M. 2014. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria current perspective. Journal of King Saud University- Science 26(1): 1–20.

6- Ahmadi A., Najafgholi H.M., Aeini M., and Kakulvand K. 2021. Isolation and Identification of Othello, Atlantis, and Puma Super Herbicide-resistant Bacteria Isolated from the Soil of Wheat Farms 37: 67-77. (In Persian with English abstract)

7- Bahmanian H., Nadian H., and Rangzan N. 2018. Investigation of the interaction effect of mycorrhiza fungus and filter cake on the yield of coriander. Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture) 43(2): 143-161. (In

Persian with English abstract)
8- Bakhsh Mohammad Nejad R., and Izadi Darbandi I. 2015. Evaluation of the effect of some herbicides on the growth and yield of (*Lallemantia royleana* Benth). 6th Chemical management of weeds and herbicides. Birjand, Iran. (In Persian)
9- Bunea A., Andjelkovic M., Socaciu C., Bobis O., Neacsu M., Verhe R., and Van Camp J. 2008. Total and individual carotenoids and phenolic acids content in fresh. Refrigerated and processed spinach (*Spinacia oleracea* L.). Food Chemistry 108: 649–656.
10- Chapman H.D. 1965. Cation Exchanges Capacity. p. 891-901. In: C.A. Black (ed.) Methods of soil analysis, part 2. ASA, Madison, WI.
11- Davari Rad M., Nadian H., Rangzan N., and Farkhari M. 2017. Effect of different levels of phosphate and filter cake on some growth and nutritional components of clover plant colonized with Arbuscular mycorrhiza. Bavi, The first national conference on Agricultural and Environmental Sciences of Iran. Mollasani, Iran. (In Persian)
12- Elahi Nik B., Heidari M., Salehi Salmi M., and Nadian H. 2018. The effects of filter cake and calcium nitrate on vegetative growth and the amount of some elements in pistachio seedlings. The second national conference of Iranian pistachios. Rafsanjan, Iran. (In Persian)
13- Estiken A., Yildiz H.E., Ercisli S., Donmez M.F., Turan M., and Gunes A. 2010. Effects of plant growth promoting bacteria (PGPR) on yield, growth and nutrient contens of organically growth strawberry. Scientia Horticulture 124(2): 62-66.
14- Fennimore S.A., Smith R.F., and Mc Giffen M.E. 2001. Weed management in fresh market spinach with S-metolachlor. Weed Technology 15(3): 511-516.
15- Gee G.W., Bauder J.W., and Klute A. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. SSSA, Madison, WI.
16- Georgian A., Shahidi Yasaki A., and Hassan Sarai A. 2014. New methods of recycling and quality improvement of products from the wastes of sugar factories. The first national conference on the development of comprehensive strategic quality in food health. Tehran, Iran. (In Persian)
17- Ghasem J.N., Nadian H.E., Khalil M.B., Heydari M., and Gharineh M.H. 2015. Influence of mycorrhizal symbiosis on growth and proline content in Leek (*Allium porrum* L.) and two genotypes of persian Leek (*Allium ampeloprasum* ssp. *persicum* L.) under drought stress. Journal of Plant Production 38(1): 15-26. (In Persian with English abstract)
18- Ghasem J.N., Nadian H., Khalili M.B., Heidary M., and Gharineh M. 2015. influence of arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress on some macronutrient uptake in three leek genotypes with different root morphology. Journal of Water and Soil 29(1): 198-209. (In Persian with English abstract)
19- Ghazanshahi M.J. 1997. Plant and Soil Analysis. Homa Press, Tehran. (In Persian)
20- Glick B.R. 2014. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. Microbiological Research 161(1): 30-39.
21- Gupta M., Kiran S., Gulati A., Singh B., and Tewari R. 2012. Isolation and identification of phosphate solubilizing bacteria able to enhance the growth and aloin-A biosynthesis of Aloe barbadensis Miller. Microbiology Research 167(6): 358-363.
22- Huang H., Zhang S.H., Shan X.Q.B., Chen D., Zhu Y.G., and Bell J.N.B. 2007. Effects of arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus caledonium*) on the accumulation and metabolism of atrazine in maize (*Zea mays* L.) and atrazine dissipation in soil. Environmental Pollution 146(2): 452-457.
23- Inanloofar M., Omidi H., and Pazoki A.R. 2013. Morphological, agronomical changes and oil content in purslane (*Portulaca oleracea* L.) under drought stress and biological/chemical fertilizer of nitrogen. Journal of Medicinal Plants 12(48): 170-184. (In Persian with English abstract)
24- Inthama P., Pumas P., Pathom-Aree W., Pekkoh J., and Pumas C. 2021. Plant Growth and Drought Tolerance-Promoting Bacterium for Bioremediation of Paraquat Pesticide Residues in Agriculture Soils. Frontiers in Microbiology 12: 446.
25- Jackson M.L. 1969. Soil Chemical Analysis-Advanced Course. Soil Chemical Analysis-Advanced Course. University of Wisconsin press, Madison.
26- Jilani S., and Khan M.A. 2006. Biodegradation of Cypermethrin by pseudomonas in a batch activated sludge process. Journal of Environmental Science & Technology 3(4): 371-380.
27- Keshavarz-Tohid V., Taheri P., Muller D., Prigent-Combaret C., Vacheron J., Taghavi S.M., Tarighi S., and Moenne-Loccoz Y. 2017. Phylogenetic diversity and antagonistic traits of root and rhizosphere pseudomonads of bean from Iran for controlling *Rhizoctonia solani*. Research in Microbiology 168(8): 760-772.
28- Keshavarz-Tohid V., Taheri P., Taghavi S.M., and Tarighi S. 2016. The role of nitric oxide in basal and induced resistance in relation with hydrogen peroxide and antioxidant enzymes. Journal of Plant Physiology 199: 29-38.
29- Keshavarz-Tohid V., Vacheron J., Dubost A., Prigent-Combaret C., Taheri P., Tarighi S., Taghavi S.M., Moenne-Loccoz Y., and Muller D. 2019. Genomic, phylogenetic and catabolic re-assessment of the *Pseudomonas putida* clade supports the delineation of *Pseudomonas alloputida* sp. nov., *Pseudomonas inefficax* sp. nov., *Pseudomonas*

persica sp. nov., and *Pseudomonas shirazica* sp. nov. Systematic and Applied Microbiology 42(4): 468-480.
30- Kuffner M., Puschenreiter M., Wieshammer G., Gorfer M., and Sessitsch A. 2008. Rhizosphere bacteria affect growth and metal uptake of heavy metal accumulating willows, Plant Soil 304(2): 35-44.
31- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society of American Journal 42(3): 421-428.
32- Madhaj A., and Sabet Zangeneh H. 2015. Chemical control of spinach weeds (Spinacia oleracea). Mashhad, Journal of Plant Protection 29(4): 511-520. (In Persian with English abstract)
33- Mahmoudzadeh M., Rasouli Sedghiani H., and Asgari Lajair H. 2015. The effect of rhizosphere bacteria stimulating plant growth and Arbuscular mycorrhizal fungi on morphological characteristics and concentrations of high consumption elements of peppermint (*Mentha piperita* L.) in greenhouse conditions. Journal of Science and Technology of Greenhouse Cultivation 24(6): 155-167. (In Persian with English abstract)
34- Makarian H., Poozesh V., Asghari H.R., and Nazari M. 2016. Interaction Effects of Arbuscular Mycorrhiza Fungi and Soil Applied Herbicides on Plant Growth. Communications in Soil Science and Plant Analysis 47(5): 619-629.
35- Manjezi H., Moradi Talawat M., Siadat A., Kouchakzadeh A., and Hamdi H. 2014. The effect of application of sugarcane Filter cake, chemical fertilizer and biofertilizer on the yield and quality of rapeseed and some soil properties. Journal of Crop Improvement 16(2): 445-457. (In Persian with English abstract)
36- Mitter E.K., Tosi M., Obregón D., Dunfield K.E., and Germida J.J. 2021. Rethinking crop nutrition in times of modern microbiology: innovative biofertilizer technologies. Frontiers in Sustainable Food Systems, 5, 29.
37- Nadian H. 2011. Effect of drought stress and mycorrhizal symbiosis on growth and phosphorus uptake by two Sorghum cultivars different in root morphology. Journal of Water and Soil Science 15(57): 127-139. (In Persian with English abstract)
38- Nadian H., Heidari M., Gharineh M.H., and Daneshvar M.H. 2013. The effects of different levels of sodium chloride and mycorrhizal colonization on growth, P, K and Na uptake by saffron (*Crocus sativus* L.). Journal of Plant Productions 36(2):49-59. (In Persian with English abstract)
39- Nadian H., Jafari S., and Sadeghzadeh B. 2015. Effect of different levels of salinity and urea fertilizer on growth components, proline content, ionic composition of straw syrup and absorption of some nutrients by sugarcane (commercial variety CP69-1062). Environmental Stresses in Crop Sciences 8(1): 53-61. (In Persian with English abstract)
40- Nikmehr S., Akhgar A., Madah Hosseini Sh., and Mozaffari V. 2014. The effect of Pseudomonas phosphate-soluble fluorescents and phosphorus fertilizers on growth and nutrient uptake in sesame plant. Journal of Soil Management and Sustainable Production 4(3): 61-86. (In Persian with English abstract)
41- Olsen S.R., Sommers L.E., and Page A.L. 1982. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties of Phosphorus p. 403-430. Agronomy monograph, ASA, Academic Press, Madison.
42- Ortega-Galisteo A.P., Rodríguez-Serrano M., Pazmiño D.M., Gupta D.K., Sandalio L.M., and Romero-Puertas M.C. 2012. S-Nitrosylated proteins in pea (*Pisum sativum* L.) leaf peroxisomes: changes under abiotic stress. Journal of Experimental Botany 63(5): 2089-2103.
43- Pauzesh Shirazi M., and Rakhshandero M. 2008. Studying the effects of irrigation regimes, plant density and cultivation method on spinach yield. Water and Soil Science 22(2): 187-198 (In Persian with English abstract)
44- Peyvast Gh. 2011. Vegetable. Guilan University Press. (In Persian)
45- Poshtdar A., Siadat A., Abdali Mashhadi A., Moosavi A., and Hamdi H. 2012. Comparison between application of PGPR bacteria and chemical fertilizers on quality and total silage yield of maize under different organic seed bed. International Journal of Agriculture and Crop Sciences 11(4): 713-717.
46- Rezaei D., Haghnia Gh., Lakzian A., Hassanzadeh Khayyat M., and Nasirly H. 2011. Study of Atrazine Biodegradation by *Pseudomonas fluorescence* and *Pseudomonas aeruginosa* (*In Vitro*). Journal of Water and Soil 25(4): 799-806. (In Persian with English abstract).
47- Rhoades J. 1986. soluble salt. p. 167-180. in: A.L., Miller, R.H., Keeny, D.R (eds). Methods of Soil Analysis, part 2. chemical and microbiological properties. 2nd edition ASA and SSSA, Madison, WI.
48- Safari-Zargani H., Nadian H., Rangzan N., and Moradi-Talavat M. 2021. Effect of Different Levels of Salinity, Zinc, and Sulfur Inoculated with Thiobacillus on Rapeseed Growth Parameters and Some Nutrient Uptake (*Brassica napus* L.). Iranian Journal of Soil Research 34(4): 529-545. (In Persian with English abstract)
49- Sharifi M. 2014. The effect of filter cake fertilizers, humic acid and humic base on quantitative and qualitative components of sugarcane under different salinity levels. Master Thesis of Ramin University of Agriculture and Natural Resources. Press, 125p. (In Persian)
50- Shirmardi M., Savaghebi G., Khavazi K., Farahbakhsh M., Rejali F., and Sadat A. 2010. Investigation of mycorrhiza and *Pseudomonas* on leaf water potential and yield of two sunflower (*Helianthus annus*) cultivars in a saline soil. Iran Soil and Water Research Journal 2: 221-228. (In Persian with English abstract).
51- Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. p. 475-490. In: D.L. Sparks et al. (eds.) Methods of Soil Analysis, Part III, 3rd Ed. ASA, Madison, WI.
52- Waling I., Vark V.I.W., Houba V.J.G., and Van der Lee J.J. 1989. Soil and plant analysis, a series of syllabi, part 7:

Plant analysis procedures. Wageningen Agricultural University Press, Wageningen.
53- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37(1): 29-38.
54- Yang J., Kloepper J.W., and Ryu C.M. 2009. Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. Trends in Plant Science 14(1): 1-4.
55- Zand I., Baghestani M., Shimi P., and Faghih A. 2003. An Analysis on the Management of Herbicides in Iran. Tehran University Press. (In Persian)

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 583-597

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۵۹۷-۵۸۳

Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria and Filter Cake on Growth and Nutrient Concentration in Spinach Plant in Interaction with Herbicide

K. Asadzadeh[1]- H. Nadian[2]- A. Siahpoosh[3]- V. Keshavarz-Tohid[*4]

Received: 24-07-2021
Accepted: 06-09-2021

Background and Objectives: In recent years, the production of healthy foods through environmentally friendly methods has received much attention. Spinach is a vegetable plant rich in minerals and vitamins which is used in green and cooked forms. Thus, healthy production of this plant with the greatest quantitative and qualitative yield is of particular importance. Weeds as unwanted plants in spinach fields can damage this plant significantly. Nevertheless, spinach is severely sensitive to different herbicides. The goal of this study was to investigate the effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR), filter cake and metribuzin herbicide on growth and mineral nutrition of spinach plant. In this study, the growth and nutritional parameters of spinach interact with PGPR, filter cake and metribuzin herbicide was also aimed.

Materials and Methods: The spinach seeds (*Spinacia oleracea* L. Varamin cultivar) were sown in pots containing 40% field soil and 60% sand (10 seeds in each pots). To investigate the impact of PGPR isolates and filter cake on concentration of macronutrients (K, Ca, Mg, and P), micronutrients (Cu, Zn, and Fe) and leaves dry weight, *Pseudomonas protogenes* CHA0 (CHA0) as a reference strain, *P. alloputida* RUM14 (RUM14) which was collected from Iranian field soil and 3% by weight of fresh filter cake (F3%) were used. Spinach seedlings were inoculated for 14 days with 50 mL of bacteria strains suspension with optical density one (OD_{600}=1). 3% by weight of filter cake were mixed to soil of pots before sowing the seeds. Metribuzin herbicide at three levels (0 (H0), 50 (H1) and 100 (H2) grams per hectare) were used. The effects of PGPR, filter cake and metribuzin herbicides and their interactions were also studied (CHA0 + F0 + H1, RUM14 + F0+ H1, CHA0 + F0 + H2, RUM14 + F0 + H2, B0 + F3% + H0, B0 + F3% + H1, B0 + F3% + H2, CHA0 + F3% + H1, RUM14 + F3% + H1, CHA0 + F3% + H2, RUM14 + F3% + H2). The experiment had a randomized complete block design with three replications. The treatments (3 metribuzin herbicide × 2 filter cake × 3 PGPR) were arranged in factorial combination. The statistical analysis was performed using Duncan's multiple range test at 5% probability level.

Results: Statistical analysis revealed that the application of PGPR (CHA0 and RUB14), filter cake, and their interaction increased tissue plant concentration of macronutrients, micronutrient and leaf dry weight of spinach plant. Statistically, the highest concentration of P, K, Ca, and Mg macronutrients (5583.30, 83000.00, 10886.70, 10766.60 mg kg^{-1} dry matter, respectively), Cu, Zn, and Fe micronutrients (22.73, 73.00, and 221.36 mg kg^{-1} dry matter, respectively) and dry weight of leaves (8.76 g) was observed in treatment of combination of PGPR and filter cake. The application of Metribuzin herbicide led to decline the concentration of macronutrients, micronutrient, and leaf dry weight of spinach plant. The decline increased with increasing herbicide concentration. The lowest concentration of P, K, Ca, and Mg macronutrients (3233.30, 48867.00, 6403.30, and 6283.30 mg kg^{-1} leaf dry weight, respectively), Cu, Zn, and Fe micronutrient (4.40, 19.50, and 132.66 mg kg^{-1}, respectively), and leaf dry weight (2.83 g) was observed in B0+F0+H2 treatment (using just herbicide 100 g ha^{-1}). However, the detrimental effect of herbicide on leaf dry weight and mineral nutrition of spinach plant were alleviated using the PGPR (CHA0 and RUB14) and filter cake (F3%) either alone or together (RUM14+F3%, CHA0+F3%). Statistically, the greatest alleviation of the detrimental effect of herbicide was observed in the treatment of RUM14+F3%.

1 and 2- Graduated of Master of Science and Professor, Department of Soil Science, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, respectively.
3- Assistant Professor, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan
4- Assistant Professor, Department of Plant Protection, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan
(*- Corresponding Author Email: keshavarz@asnrukh.ac.ir)
DOI: 10.22067/JSW.2021.71455.1069

Conclusion: The results of this research showed that inoculation of spinach with *Pseudomonas* PGPR *(P. protogenes* CHA0, *P. alloputida* RUM14) with and without filter cake not only improved the growth and mineral nutrition of spinach plant, but also alleviated the detrimental effect of herbicide in the plant. In general, the proper function of PGPR and filter cake in spinach plant growth is due to 1- Supplying more nutrients to the spinach plant due to filter cake rich in nutrients 2- The ability of Pseudomonas bacteria to induce resistance of the plants to stress and supply of some nutrients such as iron due to its ability to produce siderophore 3- Supply of food by filter cake for further growth of PGPR and the possibility of increasing the population of these bacteria. 4- Filter cake rich in organic matter can improve the physical and biological properties of the soil and can provide the better conditions for plant growth and nutrition. The results of this research showed that *P. alloputida* RUM14 and filter cake can be used as biological and organic fertilizers.

Keywords: Macronutrient elements, Metribuzin, Micronutrient elements, Pseudomonas

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 599-612

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۶۱۲-۵۹۹

مقاله پژوهشی

واکاوی تغییرپذیری طول فصل رشد و درجه-روزهای رشد محصولات کشاورزی در مناطق مرتفع و ساحلی

سید فاضل ضیائی اصل[۱]- علی اکبر سبزی پرور[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۱

چکیده

پایداری در تولید به عوامل گوناگونی وابسته است. یکی از مهمترین عواملی که پایداری در تولید را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث افزایش یا کاهش عملکرد محصولات کشاورزی می‌گردد، عوامل محیطی به‌ویژه عوامل اقلیمی می‌باشد. رشد و نمو و گذر از مراحل فنولوژی گیاهان، تا حد زیادی به‌واسطه دمای پایه (T_b) و میزان تجمع درجه-روزهای رشد (GDD) در طول فصل رشد (GSL) تنظیم می‌شود. در این پژوهش شاخص‌های کشاورزی GDD و GSL طی سال‌های زراعی ۱۳۳۸– ۱۳۳۷ تا ۱۳۹۷–۱۳۹۶ بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر اساس دمای روزانه همگن ۲۷ ایستگاه سینوپتیک هواشناسی نواحی مرتفع و ساحلی کشور محاسبه شد. با استفاده از آزمون من-کندال، روند تغییرات GDD و GSL تحت برنامه R استخراج و تحلیل شد. نتایج نشان داد که شاخص GSL برای آستانه‌های دمایی صفر و ۵ درجه سانتی‌گراد در دوره‌های آماری ۳۰ ساله اول (۱۳۳۸–۱۳۶۷) و ۳۰ ساله دوم (۱۳۶۸–۱۳۹۷) تغییرات کمی را شاهد بوده است، ولی برای دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد در ۱۱ ایستگاه دارای روندی معنادار بود. میزان انحراف از میانگین GSL در نواحی ساحلی بیشتر از نواحی مرتفع بود. این روند افزایشی در نواحی ساحلی از دهه ۵۰ و در نواحی مرتفع از دهه ۷۰ شمسی آغاز و تاکنون ادامه دارد. در این پژوهش مجموع سالانه GDD در دوره آماری سی‌ساله اول حدود ۴۱ درصد ایستگاه‌ها روند معنادار افزایشی را تجربه نمودند، در حالی‌که برای سی سال دوم به دلیل شتابگیری سیگنال‌های تغییر اقلیم روند افزایشی GDD به ۹۳ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه گسترش یافت.

واژه‌های کلیدی: آزمون من-کندال، آستانه‌های دمایی، تحلیل روند، تغییر اقلیم، واحدهای گرمایی

مقدمه

اهمیت تولیدات کشاورزی در امنیت غذایی و اشتغال و همچنین وابستگی بسیار بالای بخش کشاورزی به آب‌وهوا و تغییرات آن و از طرفی دیگر وجود تهدید عمده تغییر اقلیم برای آینده، موجب شده تا محققان مختلف همواره بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر بخش کشاورزی را در دستور کار قرار بدهند (۱۶ و ۳۳). دما مهم‌ترین فاکتور تعیین‌کننده میزان رشد و نمو و تولید گیاهان است و تمام فرآیندهای بیولوژیکی به دما وابسته است (۳۵). افزایش میانگین دمای کره زمین و تغییرات آن نمایه‌ای از تغییرات اقلیمی است که در همه نظریه‌های تغییر اقلیم به آن توجه شده است. در میان این افزایش جهانی دمای هوا، بسیاری از تحقیقات فنولوژیکی، هواشناسی و ماهواره‌ای از افزایش درجه-روز رشد[۳] و طول فصل رویشی[۴] ناشی از افزایش دما در مناطق شمالی در طی قرن بیستم خبر می‌دهند (۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۲۵، ۲۷ و ۲۸). از سوی دیگر پیش‌نگری وضعیت اقلیمی آینده و تأثیر آن بر روی محصولات کشاورزی (۱، ۲، ۴، ۶، ۷، ۱۱،۱۵، ۲۱، ۲۳ و ۲۴) مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از شاخص‌های اقلیم کشاورزی که نقش عمده‌ای در مراحل تکامل و رشد گیاه بر عهده دارد، پارامتر GDD مورد نیاز گیاه است (۱۸). در این پژوهش به واکاوی روند تغییرات GSL و تغییرات GDD مورد نیاز گیاهان زراعی در نواحی

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و استاد هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
(*- نویسنده مسئول: Email: swsabzi@basu.ac.ir)
DOI: 10.22067/JSW.2021.69480.1041

3- Growing Degree-Day
4- Growing Season Length

ساحلی و مرتفع، از داده‌های مشاهداتی گذشته پرداخته شده است. در ایران مطالعاتی در زمینه پهنه‌بندی GDD و GSL انجام شده است (۱۳، ۲۹، ۳۷، ۳۸). میزان تغییرات مجموع GDD بر مبنای ۱۰ درجه سانتی‌گراد (GDD_{10}) در طول فصل رشد در ایران نشان‌دهنده تغییرات بیشتر آن‌ها نسبت به مجموع GDD بر مبنای پنج درجه سانتی‌گراد (GDD_5) بوده همچنین GSL از جنوب به شمال و از شرق به غرب کشور کاهش داشته است (۲۶). مشخص شده است طی دوره ۱۹۶۲-۲۰۰۴ در ایران شروع دوره رشد زودتر و پایان آن با تأخیر همراه بوده که به افزایش GSL منجر شده است (۲۲). بررسی روند تغییرات GDD در کشور نشان‌دهنده تغییرات بیشتر در سری‌های مربوط به GDD_{10} بود است (۲۷).

مطالعه‌ای در اروپا به بررسی ارتباط بین تغییرات سالانه و دوره‌های فصل رشد بر پایه تغییرات دمای هوا پرداخته است. نتایج پژوهش نشان داد با افزایش ۰/۸ درجه سانتی‌گرادی متوسط دما در دهه ۱۹۹۸ -۱۹۸۹ در اروپا، فصل رشد ۸ روز زودتر آغاز شد (۵). ارزیابی تغییرات GSL در قرن اخیر ارتباط افزایش آن با گرمایش جهانی را مشخص کرده است (۱۹). پژوهشی در کشور چین نشان داده است که طی دو دهه (۲۰۰۰-۱۹۸۱) تغییرات دما، فنولوژی محصولات را تغییر داده و بر بازدهی آن‌ها تأثیر داشته است (۳۴). یافته‌های مطالعه دیگری نشان داده است که طی دوره ۱۹۶۱-۲۰۰۳ در بخش‌های شرقی و مرکزی فلات تبت GSL حدود ۱۷ روز افزایش یافته است (۲۰). در مطالعه‌ای GDD در لهستان و تغییرپذیری آن‌ها در دوره تغییر شرایط حرارتی در اروپا مورد ارزیابی واقع شده است و افزایش GDD را معلول افزایش GSL دانسته است (۳۶). در پژوهشی تغییرات GDD و GSL در دوره آماری ۱۹۶۰-۲۰۱۱ در چین مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان‌دهنده افزایش ۲۱۹ تا ۴۰۰ درجه روز در GDD طی این مدت و آغاز زودتر و خاتمه دیرتر فصل رشد را به دنبال داشته است (۳۸).

در پژوهش حاضر، تلاش شده است ضمن بهره‌گیری از تجربیات و روش‌های مورد استفاده در تحقیقات خارجی و داخلی، با تقسیم دوره آماری ۶۰ ساله ایستگاه‌های مورد مطالعه به دو دوره ۳۰ ساله، به بررسی و مقایسه میزان روند تغییرات تاریخ آغاز و خاتمه فصل رشد، GSL و GDD مربوطه در این دو دوره بر اساس آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد در نواحی مرتفع و نواحی ساحلی کشور پرداخته و پهنه‌بندی آن‌ها ترسیم شده است.

مواد و روش‌ها

الف) داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش از داده‌های دمای روزانه ۲۷ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کشور شامل ۱۹ ایستگاه در نواحی مرتفع (با ارتفاع بالاتر از ۱۰۰۰ متر از سطح دریا) و ۸ ایستگاه در نواحی ساحلی در دوره آماری ۶۰ ساله (۱۳۳۸-۱۳۹۷) استفاده شد. نقشه موقعیت و پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

خلاءهای آماری با روش خودهمبستگی بازسازی شد. دوره آماری ۶۰ ساله مورد اشاره به دو دوره ۳۰ ساله اول (۱۳۳۸-۱۳۶۷) و ۳۰ ساله دوم (۱۳۶۸-۱۳۹۷) تقسیم شد و در هر دو دوره مورد اشاره ویژگی‌های آماری GSL و GDD در سه آستانه دمایی صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد در مناطق ساحلی و مرتفع محاسبه گردید. میزان GDD فصل رشد و مجموع GDD سال‌های زراعی، بر مبنای سه آستانه دمایی صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه و استخراج شد. میزان GDD در طول فصل رشد با استفاده از کدبندی روز ژولیوسی[1](اول ژانویه با کد یک و ۳۱ دسامبر با کد ۳۶۵) استخراج گردید. روند داده‌ها توسط آزمون من- کندال[2] در محیط برنامه R مورد آزمون واقع شد و سری‌های زمانی که با سطح معناداری پنج درصد و یک درصد دارای تغییر یا روند بودند به همراه نوع روند و شیب تغییرات شناسایی شدند.

ب) روش پژوهش

تعاریف مختلف طول فصل رشد (GSL)

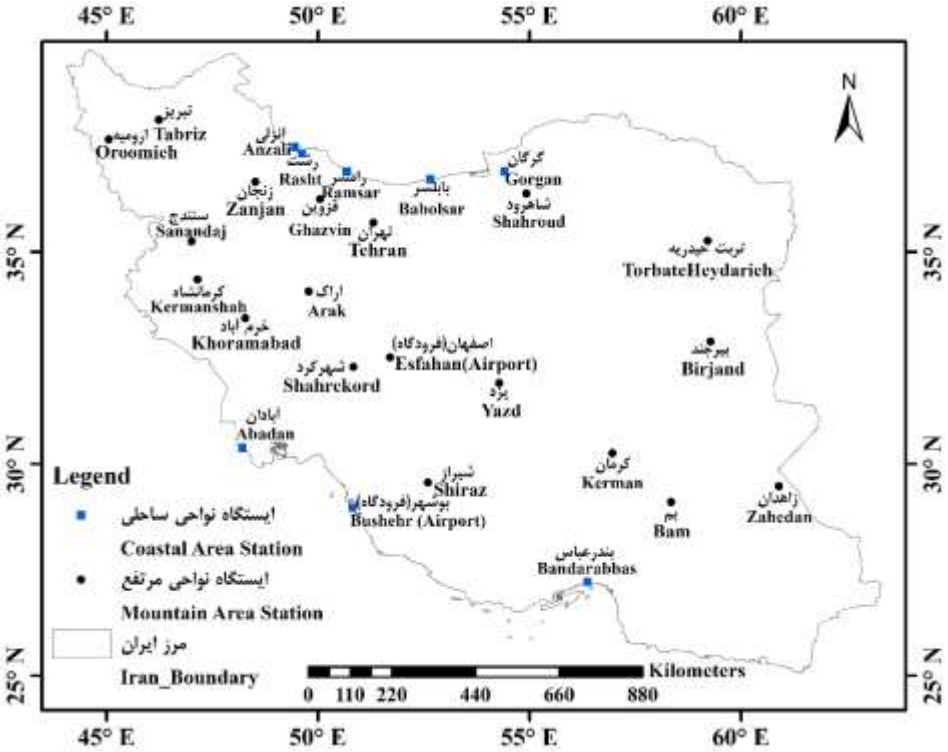
طول فصل رشد تابعی از دماست. تعاریف مختلفی از طول فصل رشد در تحقیقات انجام گرفته ذکر می‌شود که تشابه زیادی بین آن‌ها وجود دارد. سه تعریف زیر از جمله این تعاریف است:

الف) در آمریکا و کانادا طول فصل رشد معمولاً عبارت است از تعداد روزهای ما بین آخرین و اولین یخبندان (دمای شبانه‌روزی صفر درجه سانتی‌گراد و کمتر) که عموماً حد فاصل ماه‌های می تا اکتبر است (۳۰).

ب) در اکثر مناطق اروپا طول فصل رشد عبارت است از متوسط تعداد روزهایی سال، که میانگین دمای شبانه‌روزی آن حداقل پنج درجه سانتی‌گراد و در برخی مناطق شش درجه سانتی‌گراد است. این دوره عموماً بین ماه‌های آوریل تا اکتبر است؛ گرچه برحسب عرض جغرافیایی و ارتفاع تغییرات چشمگیری دارد.

ج) در انگلستان شروع فصل رشد زمانی است که متوسط دمای هوا در پنج روز متوالی از پنج درجه سانتی‌گراد تجاوز کند و خاتمه آن زمانی است که متوسط دمایی هوا در پنج روز متوالی از پنج درجه سانتی‌گراد کمتر باشد. دمای پنج درجه سانتی‌گراد معمولاً آستانه پایان تحمل اکثر گیاهان در طول چرخه زندگی آن‌ها در نظر گرفته می‌شود (۹).

1- Julian day
2- Mann-Kendall



شکل ۱- نقشه موقعیت و پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه

Figure 1- Location map and distribution of studied stations

با توجه به تطابق بیشتر تعریف اول با اکثر مناطق کشور و به منظور استفاده از آمار طول فصل رشد در کاشت گونه‌های گیاهی سازگار با آستانه‌های دمایی صفر و پنج درجه سانتی‌گراد (گیاهان سردسیری) و ۱۰ درجه سانتی‌گراد (گیاهان گرمسیری) به صورت جداگانه، شروع فصل رشد (SGS[1])، اولین روز با دمای کمینه روزانه، مساوی یا بزرگ‌تر از صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد (Tmin≥۰، Tmin≥۵ و Tmin≥۱۰) و پایان فصل رشد (EGS[2])، اولین روز پس از شروع دوره رشد که دمای کمینه روزانه، کوچک‌تر از صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد (Tmin<۰، Tmin<۵ و Tmin<۱۰) در نظر گرفته شد.

واحدهای گرمایی یا درجه-روز رشد (GDD)

دامنه تغییرات دمای هر منطقه، تعیین کننده گونه‌های گیاهی و زراعی است که کشاورزان می‌توانند براساس آن به کشت محصول بپردازند. بررسی شاخص‌های گرمایی و رطوبتی در ارزیابی نواحی اقلیمی-کشاورزی در مقیاس‌های مختلف، به منظور برنامه‌ریزی‌های کاشت محصول، میزان ریسک کاشت محصولات و تعیین فصول رویشی محصول حائز اهمیت است (۳). استفاده از GDD برای بیان طول مراحل نمو گیاهان نسبت به تقویم زمانی ترجیح داده می‌شود. بر این اساس، تعیین GDD و پهنه‌بندی مناطق براساس آن‌ها در انجام عملیات زراعی به موقع و صحیح و هم چنین استفاده بهتر از زمین‌های کشاورزی دارای اهمیت ویژه‌ای است (۳۷).

برای محاسبه حرارت مورد نیاز دوره‌های فنولوژیکی گیاه از دو روش متداول سامانه درجه-روز مؤثر و درجه-روز رشد فعال استفاده می‌شود. در سامانه درجه-روز مؤثر، از دمای پایه بیولوژیکی گیاه استفاده می‌گردد و در سامانه درجه-روز فعال، دمای صفر درجه به عنوان دمای پایه مورد استفاده قرار می‌گیرد. تعیین درجه-روز مؤثر با استفاده از رابطه (۱) صورت می‌پذیرد. که در آن $\overline{T}_i$ میانگین دمای روزانه، T_b دمای پایه و n فاصله دو مرحله نمو بر حسب روز هستند (۱۷).

$$GDD = \sum_{i=1}^{n}(\overline{T}_i - T_b) \Rightarrow \text{if } \overline{T}_i > T_b \qquad (۱)$$

دمای پایه برای محصولات زراعی مختلف از قبل تعیین شده است.

برای محاسبه در سامانهٔ درجه-روز رشد فعال نیز از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$Hu = \sum_{i=1}^{n}\overline{T}_i \Rightarrow \text{if } \overline{T}_i > 0 \qquad (۲)$$

1- Start of the Growing Season
2- End of the Growing Season

چون در درجه حرارت فعال، دمای بالاتر از صفر در نظر گرفته می‌شود، در این رابطه T_b برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش از روش درجه روز-رشد مؤثر در سه آستانه صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد به قسمی که آستانه‌های صفر و پنج درجه سانتی‌گراد برای گیاهان مناطق سردسیر و آستانه ۱۰ درجه سانتی‌گراد برای گیاهان مناطق گرمسیری در نظر گرفته شده است.

روش تحلیل روند

یکی از روش‌های متداول جهت تحلیل سری‌های زمانی هواشناسی بررسی وجود یا عدم وجود روند در آن‌ها با استفاده از روش‌های آماری است. اثبات وجود روند معنادار در یک سری آماری به تنهایی نمی‌تواند دلیل قاطع بر وقوع تغییر اقلیم در یک منطقه باشد؛ بلکه فرض رخداد آن را تقویت می‌کند (۳۱). روش‌های آماری متعددی جهت تحلیل روند سری‌های زمانی ارائه شده است. این روش‌ها در دو دسته کلی روش‌های پارامتری و ناپارامتری قابل تقسیم هستند. روش‌های ناپارامتری نسبت به روش‌های پارامتری کاربردی وسیع‌تر و چشمگیرتر دارند. مبنای کلیه روش‌های آماری مطرح کردن دو فرضیه صفر (H_0) و یک (H_1) و آزمودن آن‌ها بر اساس تکنیک‌های خاص و در نهایت پذیرش یکی از دو فرضیه است. پذیرفتن فرض صفر یعنی عدم وجود روند و پذیرفتن فرض یک یعنی وجود روند معنادار در سری داده‌ها، آزمون ناپارامتری مورد استفاده در این تحقیق شامل آزمون من-کندال است. از نقاط قوت این روش می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی‌ای که توزیع آنها نامشخص است، اشاره کرد. تأثیر ناچیز این روش از مقادیر حدّی، که در برخی سری‌های زمانی مشاهده می‌شود، از دیگر مزایای استفاده از این روش است. فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و عدم روند در سری داده‌ها دلالت می‌کند و پذیرفتن فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها است. مراحل محاسبه آماره این آزمون به شرح زیر است:

الف) محاسبه اختلاف مشاهدات متوالی و اعمال تابع علامت و استخراج پارامتر s :

$$s = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n} sign(x_j - x_k) \qquad (۳)$$

n تعداد مشاهدات سری و x_j و x_k به ترتیب داده‌های j ام و داده‌های k ام سری‌اند. تابع علامت نیز به شرح زیر قابل محاسبه است:

$$sign(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & if(x_j - x_k) > 0 \\ 0 & if(x_j - x_k) = 0 \\ -1 & if(x_j - x_k) < 0 \end{cases} \qquad (۴)$$

ب) محاسبه واریانس با یکی از روابط زیر:

(۵)

$$Var(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{m} t(t-1)(2t+5)}{18} \quad \text{اگر} \quad n > 10$$

$$Var(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad \text{اگر} \quad n \le 10 \qquad (۶)$$

n تعداد داده‌های مشاهده‌ای و تعداد سری‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. t نیز بیانگر فراوانی داده‌ها با ارزش یکسان است.

ج) استخراج آماره z :

$$z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{Var(s)}} & \text{if } s>0 \\ 0 & \text{if } s=0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{Var(s)}} & \text{if } s<0 \end{cases} \qquad (۷)$$

در آزمون دو دامنه، جهت روندیابی سری داده‌ها، فرض صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که $|z| \le z_{\alpha/2}$ باشد؛ که α سطح معنادار است و برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و $z_{\alpha/2}$ آماره نرمال استاندارد در سطح معنادار $\alpha/2$ است. در بررسی‌های این تحقیق این آزمون برای سطوح ۹۵ درصد و ۹۹ درصد به کار برده می‌شود. در صورتی که آماره z مثبت باشد، روند سری داده‌ها صعودی و در صورتی که منفی باشد، روند سری داده‌ها نزولی در نظر گرفته می‌شود. این آماره برای سطوح اطمینان ۹۵ درصد و ۹۹ درصد به ترتیب برابر با ۱/۹۶ و ۲/۵۸ است. برای محاسبات آماری فوق از نرم‌افزار R استفاده شد.

نتایج

به منظور مقایسه نتایج یافته‌های این پژوهش، دوره آماری ۶۰ ساله مورد مطالعه به دو دوره ۳۰ ساله تقسیم گردید. در هر دو دوره مورد اشاره ویژگی‌های آماری طول فصل رشد و واحدهای گرمایی در سه آستانه دمایی صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد در مناطق ساحلی و مرتفع بررسی و مقایسه گردید. بر این اساس در ادامه این پژوهش هر جا از نواحی مرتفع و نواحی ساحلی سخن به میان آمد به ترتیب به ایستگاه‌های نواحی مرتفع و ایستگاه‌های نواحی ساحلی مورد مطالعه در این پژوهش اشاره دارد.

الف) دوره آماری ۳۰ ساله اول (۱۳۳۸-۱۳۶۷)

مقایسه طول فصل رشد و واحدهای گرمایی بر مبنای آستانه‌های دمایی صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد

برای محاسبه واحدهای گرمایی بر مبنای صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد، نخست تاریخ شروع و خاتمه دمای صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد و طول فصل رشد استخراج شد. سپس میزان واحدهای گرمایی طول فصل رشد برای هر یک از ایستگاه‌ها محاسبه گردید.

جدول ۱- ویژگی‌های آماری دوره ۳۰ ساله اول (۱۳۳۸-۱۳۶۷) بر مبنای آستانه‌های دمایی صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد در ایستگاه‌های منتخب

Table 1- Statistical characteristics of the first 30 years (1959-1988) based on temperature thresholds of zero, five and 10 degrees Celsius in selected stations

متغیر Variable	(S)M	(S)C	متغیر Variable	(S)M	(S)C	متغیر Variable	(S)M	(S)C
E_{S0}	۱۵ اسفند 5Mar (Yazd)	۱۸ اسفند 8Mar (Gorgan)	E_{S5}	۱۹ اسفند 9Mar (Bam)	۲۸ بهمن 16Feb (Abadan)	E_{S10}	۱۴ فروردین 4Jun (Bam)	۲۵ بهمن 13Feb (Bandar Abbas)
L_{S0}	۲۹ فروردین 18Apr (Zanjan, Shahrekord	۲۲ اسفند 12Mar (Rasht)	L_{S5}	۴ خرداد 24May (Zanjan)	۲۳ فروردین 12Apr (Rasht)	L_{S10}	۳۰ خرداد 19Jun (Zanjan)	۲۴ اردیبهشت 14May (Rasht)
E_{E0}	۳۰ مهر 21Oct (Sharekord)	۱۷ آذر 7Dec (Rasht)	E_{E5}	۳۰ شهریور 20Sep (Shahrekord ,Kerman)	۱۶ آبان 6Nov (Rasht, Ramsar)	E_{E10}	۷ شهریور 28Aug (Shahrekord ,Zanjan)	۱۶ مهر 7Oct (Rasht)
L_{E0}	۱۱ آذر 1Dec (Tehran)	۱۹ آذر 9Dec (Tehran)	L_{E5}	۶ آذر 26Nov (Bam)	۱۴ آذر 4Dec (Abadan)	L_{E10}	۱۲ آبان 2Nov (Bam)	۱۷ آذر 7Dec (Bandar Abbas)
S_{SG0}	186 (Shahrekord)	323 (Bam)	S_{SG5}	120 (Shahrekord)	208 (Rasht)	S_{SG10}	70 (Zanjan)	146 (Rasht)
L_{SG0}	276 (Rasht)	365 (Bushehr ,Bandar Abbas)	L_{SG5}	261 (Bam)	364 (Bandar Abbas)	L_{SG10}	212 (Bam)	310 (Bandar Abbas)
A_{SG0}	229	331	A_{SG5}	171	270	A_{SG10}	116	207
m_{CV0}	4.38 (Esfahan)	6.9 (Rasht)	m_{CV5}	5.07 (Bam)	4.41 (Abadan)	m_{CV10}	6.77 (Bam)	4.15 (Abadan)
M_{CV0}	12.01 (Khorramabad)	4.85 (Gorgan)	M_{CV5}	14.94 (Sanandaj)	8.33 (Rasht)	M_{CV10}	23.31 (Khorramabad)	16.27 (Rasht)
m_{D0}	3575 (Zanjan)	5139 (Rasht)	m_{D5}	2012 (Zanjan)	3348 (Rasht)	m_{D10}	938 (Zanjan)	1915 (Rasht)
M_{D0}	6096 (Yazd)	6086 (Gorgan)	M_{D5}	5718 (Bam)	6776 (Abadan)	M_{D10}	4004 (Bam)	5662 (Bandar Abbas)
m_{T0}	4303 (Zanjan)	5752 (Rasht)	m_{T5}	2874 (Zanjan)	3976 (Ramsar)	m_{T10}	1731 (Zanjan)	2412 (Ramsar)
M_{T0}	8284 (Bam)	9865 (Bandar Abbas)	M_{T5}	6467 (Bam)	8039 (Bandar Abbas)	M_{T10}	4724 (Bam)	6212 (Bandar Abbas)
T_{S0}	21%	0%	T_{S5}	26%	0%	T_{S10}	47%	25%
T_{Y0}	47%	25%	T_{Y5}	53%	25%	T_{Y10}	53%	25%

نواحی مرتفع (نام ایستگاه) و نواحی ساحلی(نام ایستگاه) بترتیب: (S)M و (S)C، زودترین و دیرترین میانگین تاریخ آغاز رخداد صفر ، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بترتیب: زودترین (E_{S0}، E_{S5} و E_{S10}) و دیرترین(L_{S0}، L_{S5} و L_{S10})، زودترین و دیرترین میانگین تاریخ خاتمه رخداد صفر ، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بترتیب: زوردترین (E_{E0}، E_{E5} و E_{E10}) و دیرترین (L_{E0}، L_{E5} و L_{E10})، کوتاه‌ترین، بلندترین و میانگین طول فصل رشد بر حسب روز بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بترتیب: کوتاه‌ترین (S_{SG0}، S_{SG5} و S_{SG10})، بلندترین (L_{SG0}، L_{SG5} و L_{SG10}) و میانگین (A_{SG0}، A_{SG5} و A_{SG10})، کمترین و بیشترین مقدار ضریب تغییرات بر حسب درصد در طول فصل رشد بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بترتیب: کمترین (m_{CV0}، m_{CV5} و m_{CV10}) و بیشترین (M_{CV0}، M_{CV5} و M_{CV10})، کمترین و بیشترین میانگین واحدهای گرمایی فصل رشد برحسب درجه-روز بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بترتیب: کمترین (m_{D0}، m_{D5} و m_{D10}) و بیشترین (M_{D0}، M_{D5} و M_{D10})، کمترین و بیشترین میانگین واحدهای گرمایی سال زراعی برحسب درجه-روز بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بترتیب:کمترین (m_{T0}، m_{T5} و m_{T10}) و بیشترین (M_{T0}، M_{T5} و M_{T10})، درصد ایستگاه‌های دارای روند معنادار طول فصل رشد بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد (T_{S0}، T_{S5} و T_{S10})، درصد ایستگاه‌های دارای روند معنادار مجموع درجه-روزهای رشد سال زراعی بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد (T_{Y0}، T_{Y5} و T_{Y10})، * معنادار در سطح اعتماد ۹۵ یا ۹۹ درصد.

Elevated areas (station name) and coastal areas (station name): (S)M and (S)C, respectively, the earliest and latest average of the start date of zero, five and 10 °C, respectively: the earliest (E_{S0}, E_{S5} and E_{S10}) and The latest (L_{S0}, L_{S5} and L_{S10}), the earliest and the latest average of the zero, five and 10 °C event termination dates: the strongest (E_{E0}, E_{E5} and E_{E10}) and the latest (L_{E0}, L_{E5} and L_{E10}), the shortest, longest and average season length, respectively. Growth by day based on thresholds of zero, five and 10 °C, respectively: shortest (S_{SG0}, S_{SG5} and S_{SG10}), highest (L_{SG0}, L_{SG5} and L_{SG10}) and average (A_{SG0}, A_{SG5} and A_{SG10}), lowest and highest coefficient of variation per Percentage during the growing season based on thresholds of zero, five and 10 °C, respectively: lowest (m_{CV0}, m_{CV5} and m_{CV10}) and highest (M_{CV0}, M_{CV5} and M_{CV10}), lowest and highest average of heating units of the growing season in terms of degree-day based Zero, five and 10 °C thresholds, respectively: lowest (m_{D0}, m_{D5} and m_{D10}) and highest (M_{D0}, M_{D5} and M_{D10}), lowest and highest average of crop year heat units in terms of degree-day based on zero, five and five thresholds: 10 °C, respectively: lowest (m_{T0}, m_{T5} and m_{T10}) and highest (M_{T0}, M_{T5} and M_{T10}), percentage of stations with a significant trend during the growing season based on thresholds of zero, five and 10 °C (T_{S0}, T_{S5} and T_{S10}), percentage Stations with a significant trend Total degree of growth days of the crop year based on thresholds of zero, five and 10 degrees Celsius (T_{Y0}, T_{Y5} and T_{Y10}), * significant at 95 or 99% confidence level.

جدول ۲- ویژگی‌های آماری دوره ۳۰ ساله دوم (۱۳۶۸-۱۳۹۷) بر مبنای آستانه‌های دمایی صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد در ایستگاه‌های منتخب

Table 2- Statistical characteristics of the second 30-year period (1989-2018) based on temperature thresholds of zero, five and 10 degrees Celsius in selected stations

متغیر Variable	(S)M	(S)C	متغیر Variable	(S)M	(S)C	متغیر Variable	(S)M	(S)C
E_{S0}	۱۵ اسفند 5Mar (Yazd)	۹ اسفند 27Feb (Rasht)	E_{S5}	۶ اسفند 24Feb (Bam)	۲۱ بهمن 9Feb (Abadan)	E_{S10}	۱ فروردین 21Mar (Kerman)	۲۲ بهمن 10Feb (Bandar Abbas)
L_{S0}	۱۰ اردیبهشت 30Apr (Shahrekord)	۱۴ اسفند 4Mar (Gorgan)	L_{S5}	۱۲ خرداد 1Jun (Shahrekord)	۲۰ فروردین 9Apr (Gorgan)	L_{S10}	۳۰ خرداد 19Jun (Shahrekord)	۱۲ اردیبهشت 2May (Gorgan)
E_{E0}	۲۳ مهر 14Oct (Sharekord)	۱۹ آذر 9Dec (Rasht)	E_{E5}	۲۶ شهریور 16Sep (Shahrekord)	۲۰ آبان 10Nov (Gorgan)	E_{E10}	۵ شهریور 26Aug (Shahrekord)	۲۷ مهر 18Oct (Gorgan)
L_{E0}	۱۶ آذر 6Dec (Tehran)	۲۰ آذر 10Dec (Gorgan)	L_{E5}	۱۵ آذر 5Dec (Bam)	۱۸ آذر 8Dec (Abadan)	L_{E10}	۲۵ آبان 15Nov (Bam)	۱۷ آذر 7Dec (Bushehr)
S_{SG0}	168 (Sharekord)	285 (Gorgan)	S_{SG5}	106 (Sharekord)	215 (Gorgan)	S_{SG10}	68 (Sharekord)	169 (Gorgan)
L_{SG0}	346 (Bam)	365 (Bandar Abbas ,Bushehr)	L_{SG5}	286 (Bam)	362 (Bandar Abbas)	L_{SG10}	235 (Bam)	303 (Bandar Abbas)
A_{SG0}	239	342	A_{SG5}	183	281	A_{SG10}	127	223
m_{CV0}	4.97 (Arak)	6.41 (Gorgan)	m_{CV5}	5.19 (Tehran)	4.95 (Abadan)	m_{CV10}	6.8 (Esfahan)	4.94 (Bandar Abbas)
M_{CV0}	11.40 (Zanjan)	6.91 (Rasht)	M_{CV5}	18.23 (Zanjan)	7.47 (Ramsar)	M_{CV10}	20.78 (Zanjan)	9.74 (Ramsar)
m_{D0}	3233 (Sharekord)	5619 (Rasht)	m_{D5}	1767 (Sharekord)	3736 (Rasht)	m_{D10}	880 (Sharekord)	2365 (Rasht)
M_{D0}	6783 (Zanjan)	5959 (Rasht)	M_{D5}	6384 (Bam)	7372 (Abadan)	M_{D10}	4578 (Bam)	5761 (Ramsar)
m_{T0}	4321 (Sharekord)	6089 (Rasht)	m_{T5}	2812 (Sharekord)	4297 (Rasht)	m_{T10}	1631 (Sharekord)	2687 (Ramsar)
M_{T0}	8780 (Bam)	9903 (Bandar Abbas)	M_{T5}	6961 (Bam)	8077 (Bandar Abbas)	M_{T10}	5195 (Bam)	6251 (Bandar Abbas)
T_{S0}	37%	13%	T_{S5}	42%	0%	T_{S10}	47%	25%
T_{Y0}	89%	100%	T_{Y5}	89%	100%	T_{Y10}	89%	100%

نواحی مرتفع (نام ایستگاه) و نواحی ساحلی(نام ایستگاه) بترتیب: M(S) و C(S)، زودترین و دیرترین میانگین تاریخ آغاز رخداد صفر ، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بترتیب: زودترین (E_{S0}، E_{S5} و E_{S10}) و دیرترین(L_{S0}، L_{S5} و L_{S10})، زودترین و دیرترین میانگین تاریخ خاتمه رخداد صفر ، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بترتیب: زوردترین (E_{E0}، E_{E5} و E_{E10}) و دیرترین (L_{E0}، L_{E5} و L_{E10})، کوتاه‌ترین، بلندترین و میانگین طول فصل رشد بر حسب روز بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بترتیب: کوتاه‌ترین(S_{SG0}، S_{SG5} و S_{SG10})، بلندترین (L_{SG0}، L_{SG5} و L_{SG10}) و میانگین (A_{SG0}، A_{SG5} و A_{SG10})، کمترین و بیشترین مقدار ضریب تغییرات بر حسب درصد در طول فصل رشد بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بترتیب: کمترین (m_{CV0}، m_{CV5} و m_{CV10}) و بیشترین (M_{CV0}، M_{CV5} و M_{CV10})، کمترین و بیشترین میانگین واحدهای گرمایی فصل رشد برحسب درجه-روز بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بترتیب: کمترین (m_{D0}، m_{D5} و m_{D10}) و بیشترین (M_{D0}، M_{D5} و M_{D10})، کمترین و بیشترین میانگین واحدهای گرمایی سال زراعی برحسب درجه-روز بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بترتیب:کمترین (m_{T0}، m_{T5} و m_{T10}) و بیشترین (M_{T0}، M_{T5} و M_{T10})، درصد ایستگاه‌های دارای روند معنادار طول فصل رشد بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد (T_{S0}، T_{S5} و T_{S10})، درصد ایستگاه‌های دارای روند معنادار مجموع درجه-روزهای رشد سال زراعی بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد (T_{Y0}، T_{Y5} و T_{Y10})، * معنادار در سطح اعتماد ۹۵ یا ۹۹ درصد.

Elevated areas (station name) and coastal areas (station name): (S)M and (S)C, respectively, the earliest and latest average of the start date of zero, five and 10 °C, respectively: the earliest (E_{S0}, E_{S5} and E_{S10}) and The latest (L_{S0}, L_{S5} and L_{S10}), the earliest and the latest average of the zero, five and 10 °C event termination dates: the strongest (E_{E0}, E_{E5} and E_{E10}) and the latest (L_{E0}, L_{E5} and L_{E10}), the shortest, longest and average season length, respectively. Growth by day based on thresholds of zero, five and 10 °C, respectively: shortest (S_{SG0}, S_{SG5} and S_{SG10}), highest (L_{SG0}, L_{SG5} and L_{SG10}) and average (A_{SG0}, A_{SG5} and A_{SG10}), lowest and highest coefficient of variation per Percentage during the growing season based on thresholds of zero, five and 10 °C, respectively: lowest (m_{CV0}, m_{CV5} and m_{CV10}) and highest (M_{CV0}, M_{CV5} and M_{CV10}), lowest and highest average of heating units of the growing season in terms of degree-day based Zero, five and 10 °C thresholds, respectively: lowest (m_{D0}, m_{D5} and m_{D10}) and highest (M_{D0}, M_{D5} and M_{D10}), lowest and highest average of crop year heat units in terms of degree-day based on zero, five and five thresholds: 10 °C, respectively: lowest (m_{T0}, m_{T5} and m_{T10}) and highest (M_{T0}, M_{T5} and M_{T10}), percentage of stations with a significant trend during the growing season based on thresholds of zero, five and 10 °C (T_{S0}, T_{S5} and T_{S10}), percentage Stations with a significant trend Total degree of growth days of the crop year based on thresholds of zero, five and 10 degrees Celsius (T_{Y0}, T_{Y5} and T_{Y10}), * significant at 95 or 99% confidence level.

به منظور مقایسه میزان واحدهای گرمایی فصل رشد و سال زراعی، مجموع واحدهای گرمایی هر سال زراعی، بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه و استخراج شد. اهمیت تاریخ گذر از دمای پنج درجه سانتی‌گراد برای بیشتر محصولات کشاورزی مناطق سردسیری و معتدل دارای اهمیت زیادی است. از سوی دیگر مطالعه و بررسی تاریخ گذر دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد برای بسیاری از محصولات کشاورزی از جمله محصولات گرمسیری حائز اهمیت فراوان است. کلیه اطلاعات آماری برای هر سه آستانه دمایی مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است.

بر اساس نتایج بدست آمده، طول فصل رشد از جنوب به سمت غرب و شمال کشور کاهش یافته و در نواحی شمالی به سبب رطوبت و دمای بیشتر، طول فصل رشد طولانی‌تر از نواحی غربی است.

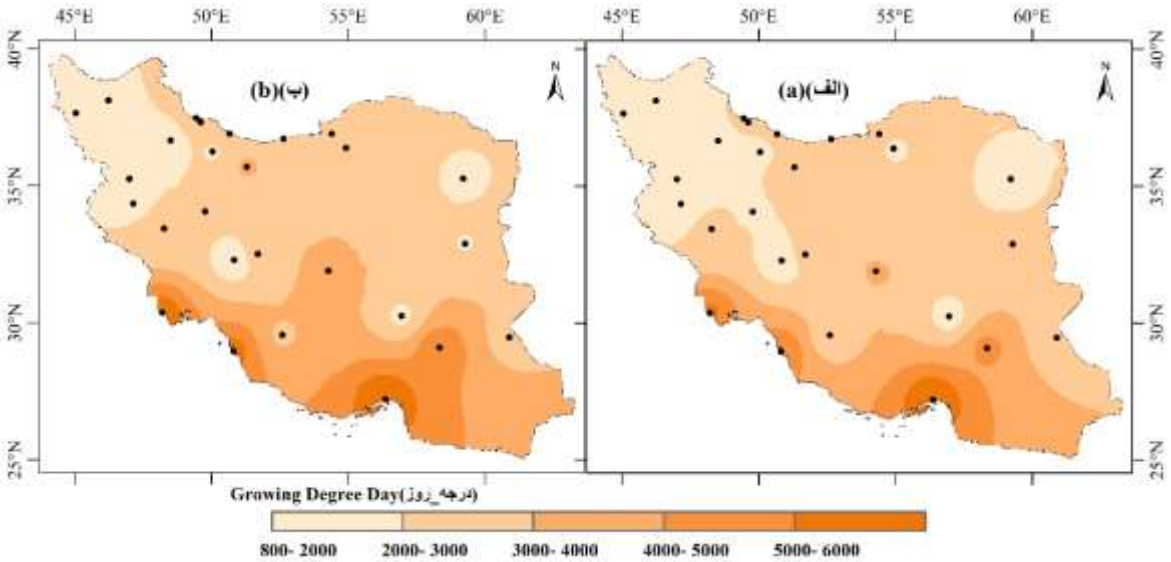
ب) دوره آماری ۳۰ ساله دوم (۱۳۶۸-۱۳۹۷)

مقایسه طول فصل رشد و واحدهای گرمایی بر مبنای آستانه‌های دمایی صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد

برای محاسبه واحدهای گرمایی بر مبنای صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد، نخست تاریخ شروع و خاتمه دمای صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد و طول فصل رشد استخراج شد. سپس میزان واحدهای گرمایی طول فصل رشد برای هر یک از ایستگاه‌ها محاسبه گردید. به منظور مقایسه میزان واحدهای گرمایی فصل رشد و سال زراعی، مجموع واحدهای گرمایی هر سال زراعی، بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه و استخراج شد. به دلیل طولانی بودن فصل رشد در بیشتر نواحی ساحلی و افزایش نسبی دما در این نواحی، وقوع دماهای آستانه صفر درجه سانتی‌گراد کم بوده و امکان محاسبه میانگین بلندمدت برای همه ایستگاه‌ها وجود نداشت.

به منظور مقایسه دو دوره آماری ۳۰ ساله مورد مطالعه، پهنه‌بندی میزان واحدهای گرمایی طول فصل رشد بر مبنای آستانه ۱۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد (شکل ۲). با دقت در نقشه‌ها مشاهده می‌شود که واحدهای گرمایی ایستگاه‌های رشت، شاهرود، تهران، یزد، آبادان و بوشهر در دوره آماری ۳۰ ساله دوم (۱۳۶۸-۱۳۹۷) نسبت به دوره آماری ۳۰ ساله اول (۱۳۳۸-۱۳۶۷) بیشتر شده است. از سویی دیگر در ایستگاه‌های جنوبی کشور میزان واحدهای گرمایی در مقایسه با ایستگاه‌های سردسیر غرب و شمال غرب بیشتر است که نشان دهنده مناسب‌تر شدن شرایط برای گیاهان گرمسیری در این مناطق است.

نتایج حاصل از بررسی روند شاخص طول فصل رشد به تفکیک اقلیم و دوره آماری به روش من-کندال در جدول ۳ آمده است. این نتایج نشان دهنده افزایش نسبی تعداد ایستگاه‌های دارای روند مثبت در دوره ۳۰ ساله دوم (۱۳۶۸-۱۳۹۷) نسبت به دوره ۳۰ ساله اول (۱۳۳۸-۱۳۶۷) است.



شکل ۲- نقشه پهنه‌بندی واحدهای گرمایی فصل رشد بر مبنای آستانه ۱۰ درجه سانتی‌گراد، (الف) طی دوره ۳۰ ساله اول (۱۳۳۸-۱۳۶۷)، (ب) طی دوره ۳۰ ساله دوم (۱۳۶۸-۱۳۹۷) در ایستگاه‌های منتخب

Figure 2- Zoning map of heating units of the growing season based on the threshold of 10 °C, (a) during the first 30-year period (1959-1988), (b) during the second 30-year period (1989-2018) in selected stations

جدول ۳- تعداد ایستگاه دارای روند مشخص(مثبت، منفی و صفر) شاخص طول فصل رشد در دوره ۳۰ ساله اول (۱۳۳۸-۱۳۶۷) و دوره ۳۰ ساله دوم (۱۳۶۸-۱۳۹۷) در ایستگاه‌های منتخب

Table 3- Number of stations with a definite trend (positive, negative and zero) of the growth season length index in the first 30-year period (1959-1988) and the second 30-year period (1989-2018) in selected stations

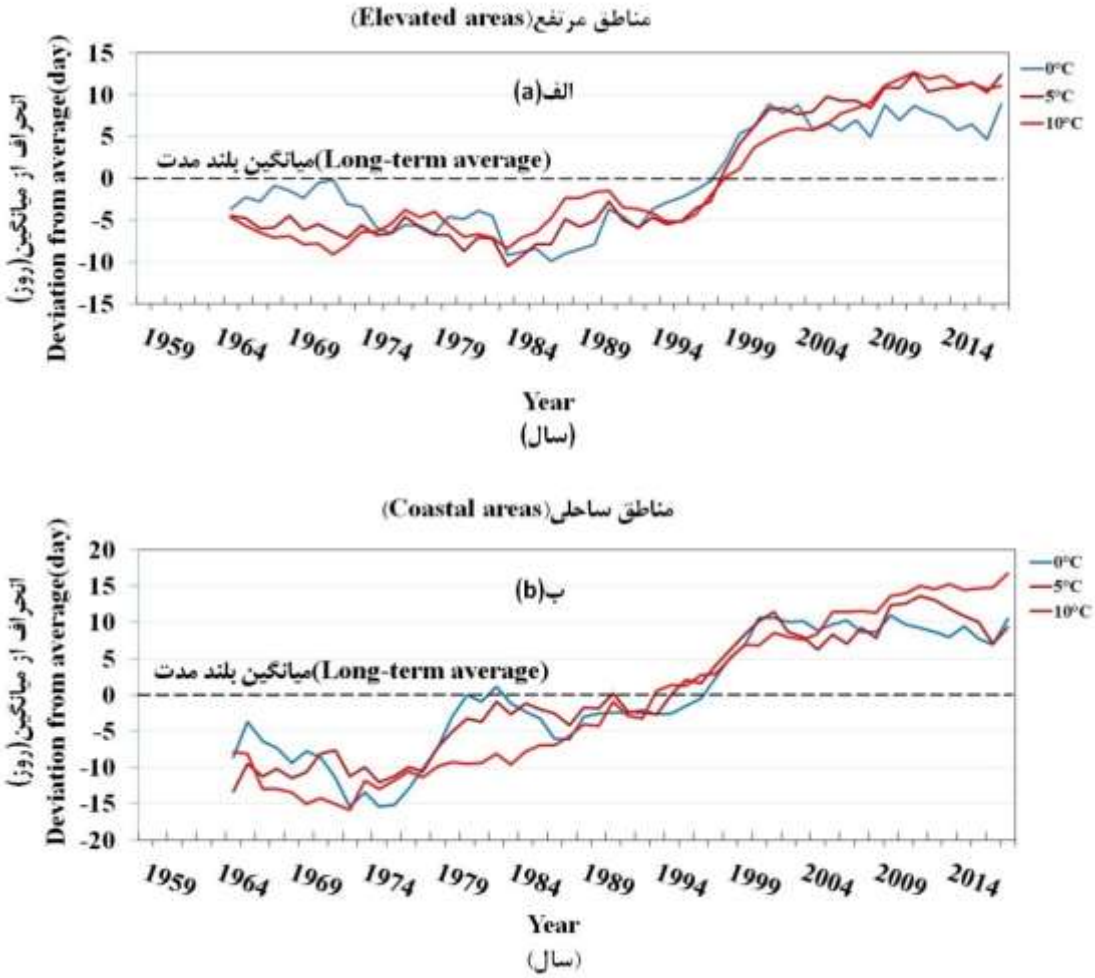
اقلیم Climate	دوره ۳۰ ساله اول The first 30-year period									دوره ۳۰ ساله دوم The second 30-year period								
	آستانه ۰°C Threshold 0 °C			آستانه ۵°C Threshold 5 °C			آستانه ۱۰°C Threshold 10 °C			آستانه ۰°C Threshold 0 °C			آستانه ۵°C Threshold 5 °C			آستانه ۱۰°C Threshold 10 °C		
	روند مثبت Positive Trend	روند منفی Negative Trend	عدم روند N0 Trend	روند مثبت Positive Trend	روند منفی Negative Trend	عدم روند N0 Trend	روند مثبت Positive Trend	روند منفی Negative Trend	عدم روند N0 Trend	روند مثبت Positive Trend	روند منفی Negative Trend	عدم روند N0 Trend	روند مثبت Positive Trend	روند منفی Negative Trend	عدم روند N0 Trend	روند مثبت Positive Trend	روند منفی Negative Trend	عدم روند N0 Trend
فرا خشک(۷) Hyper arid(7)	0	0	7	0	0	7	2	1	4	2	0	5	1	0	6	3	0	4
خشک(۴) Arid(4)	0	1	3	0	1	3	2	1	1	1	0	3	0	0	4	1	0	3
نیمه‌خشک(۱۲) Semi-arid(12)	0	3	9	1	3	8	2	3	7	1	3	8	5	2	5	5	1	6
مرطوب(۱) Humid(1)	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
خیلی مرطوب نوع الف(۲) Very humid type a(2)	0	0	2	0	0	2	0	0	2	1	0	1	0	0	2	1	0	1
خیلی مرطوب نوع الف(۲) Very humid type b(2)	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
مجموع Total	0	4	23	1	4	22	6	5	16	5	3	19	6	2	19	10	1	16

اعداد داخل پرانتز تعداد ایستگاه در هر اقلیم است.

The numbers in parentheses are the number of stations in each climate.

ج) مقایسه انحراف از میانگین طول فصل رشد طی دوره آماری ۶۰ ساله (۱۳۳۸-۱۳۹۷)

در این پژوهش به منظور تکمیل بررسی میزان تغییرات طول فصل رشد، از یکی از مشخصه‌های پراکنش بنام انحراف از میانگین استفاده شد. این شاخص میزان پراکندگی داده‌ها حول میانگین را نشان می‌دهد. این معیار از طریق محاسبه مقادیر انحراف از میانگین طول فصل رشد هر سال در هر ناحیه بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد از میانگین ۶۰ ساله آن ناحیه بدست می‌آید. به منظور هموارسازی مقادیر انحراف‌ها، از میانگین متحرک با گام ۷ سال استفاده شده، شکل ۳- الف برای نواحی مرتفع و شکل ۳- ب برای نواحی ساحلی بدین منظور ترسیم شد. خطوط شکل ۳- الف تعداد روزهای کوتاه‌تر یا طولانی‌تر از میانگین ۱۹ ایستگاه نواحی مرتفع بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. این خطوط با استفاده از میانگین متحرک ۷ ساله هموار شد. شکل ۳- ب نیز به همین ترتیب برای ۸ ایستگاه نواحی ساحلی کشور بدست آمده است. به استناد شکل ۳- ب ، از سال ۱۳۷۰ به بعد در میانگین ایستگاه‌های مورد بررسی در این پژوهش، یک افزایش مشهود در طول فصل رشد بخوبی دیده می‌شود. این انحراف از میانگین در همه آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد از سال ۱۳۷۰ با شیب و تداوم متفاوت افزایشی است.



شکل ۳- میزان انحراف از میانگین طول فصل رشد بر مبنای آستانه‌های دمایی صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد در الف) ایستگاه‌های نواحی مرتفع ب) ایستگاه‌های نواحی ساحلی مورد مطالعه طی دوره آماری ۶۰ ساله (۱۳۳۸-۱۳۹۷)

Figure 3- Deviation from the average of the growing season length based on temperature thresholds of zero, five and 10 degrees Celsius in (a) elevated stations; (b) coastal stations studied during the statistical period of 60 years (1959-2018)

در این نواحی بیشترین رشد مثبت انحراف از میانگین طول فصل رشد بر مبنای آستانه ۱۰ درجه سانتی‌گراد با افزایشی ۱۷ روزه در طی سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۱ دیده می‌شود. بر مبنای آستانه‌های صفر و پنج درجه سانتی‌گراد ، افزایشی ۱۴ روزه در میانگین طول فصل رشد نواحی مرتفع طی سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۸۰ دیده می‌شود. در این نواحی از اواسط دهه ۷۰ شمسی تاکنون مقادیر انحراف از میانگین طول فصل رشد، مثبت بوده است. در نواحی ساحلی کشور و بر اساس شکل ۳- ب افزایش ۳۳ روزه نسبت به میانگین طول فصل رشد، طی سال‌های ۱۳۵۱ تاکنون بر مبنای آستانه ۱۰ درجه سانتی‌گراد دیده می‌شود. بر مبنای آستانه‌های صفر و پنج درجه سانتی‌گراد ، دو دوره زمانی افزایش در میانگین طول فصل رشد در نواحی ساحلی یکی در دهه ۵۰ و دیگری در دهه ۷۰ شمسی اتفاق افتاده است. در این نواحی از اوایل دهه ۷۰ شمسی تاکنون مقادیر انحراف از میانگین طول فصل رشد، مثبت بوده است.

نتایج و بحث

بررسی روند تغییرات طول فصل رشد در دوره آماری ۳۰ ساله اول (۱۳۳۸-۱۳۶۷) نشان دهنده وجود روند معنادار در تعداد محدودی از ایستگاه‌ها است. همچنین با افزایش آستانه دمایی از صفر و پنج درجه سانتی‌گراد به ۱۰ درجه سانتی‌گراد وجود روند معنادار و کاهشی در تعداد بیشتری از ایستگاه‌ها به چشم می‌خورد. با در نظر گرفتن آستانه دمایی۱۰ درجه سانتی‌گراد برای بررسی سری‌های زمانی طول فصل

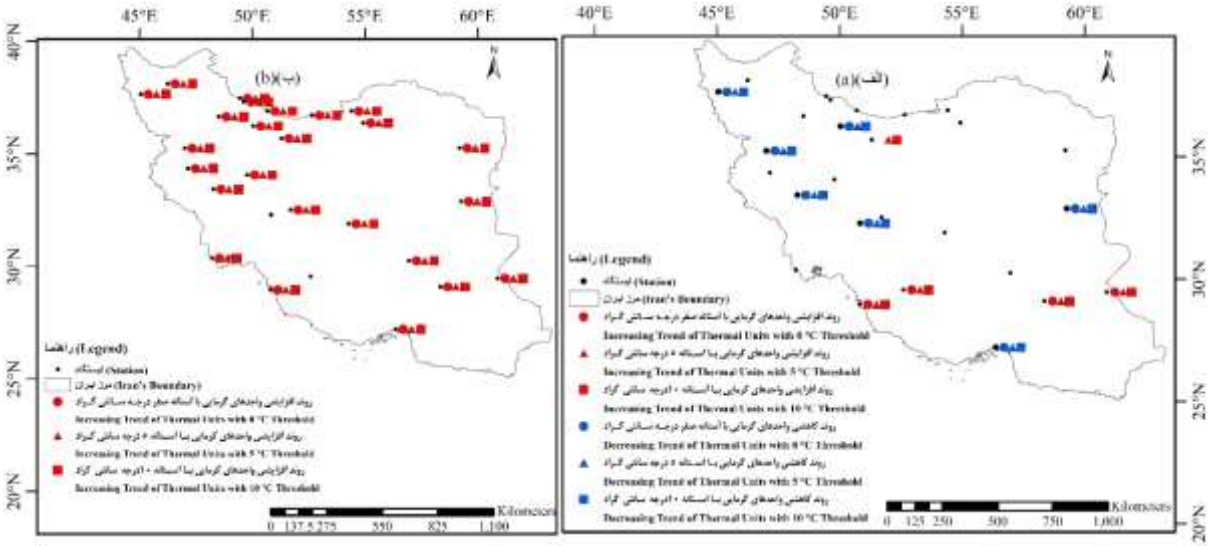
رشد، در ایستگاه‌های ارومیه، سنندج، خرم‌آباد، بیرجند و بندرعباس روند معنادار و کاهشی و در ایستگاه‌های تبریز، تهران، کرمانشاه، اصفهان، یزد و بوشهر روند معنادار و افزایشی مشاهده شد. نتایج بررسی‌ها، تغییرات کمتری را در سری‌های زمانی طول فصل رشد بر مبنای آستانه‌های دمایی صفر و پنج درجه سانتی‌گراد در دوره آماری ۳۰ ساله دوم (۱۳۶۸-۱۳۹۷) نشان می‌دهد. از طرفی دیگر نتایج بدست آمده نشانگر معنادار بودن روند طول فصل رشد در تعداد بیشتری از ایستگاه‌ها در دوره آماری اخیر بر مبنای آستانه ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. نتایج محاسبه انحراف از میانگین طول فصل رشد نشان‌دهنده میزان انحراف بیشتر در نواحی ساحلی نسبت به نواحی مرتفع بوده به قسمی که سری زمانی طول فصل رشد بر پایه ۱۰ درجه سانتی‌گراد در هر دو ناحیه با شیب و تداوم بیشتر افزایشی بوده است. این روند افزایشی انحراف از میانگین در نواحی ساحلی از اوایل دهه ۵۰ شمسی و در نواحی مرتفع از اوایل دهه ۷۰ شمسی آغاز و تاکنون ادامه دارد. در همین راستا ایستگاه بندرعباس و بعد از آن ایستگاه بوشهر دارای طولانی‌ترین فصل رشد بودند و ایستگاه شهرکرد کوتاه‌ترین طول فصل رشد در بین سایر ایستگاه‌های مورد بررسی را داشته است. نتایج این پژوهش می‌تواند در راستای نتایج مظفری و همکاران (۲۵) که در آن تغییرات در بین سری‌هایی با آستانه ۱۰ درجه سانتی‌گراد از فراوانی و نظم بهتری نسبت به سری‌هایی با آستانه ۵ درجه سانتی‌گراد برخوردار بودند و همچنین نتایج مظفری و همکاران (۲۶) که در بین آستانه‌های ۵ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد، ایستگاه بندرعباس و سپس بوشهر دارای طولانی‌ترین فصل رشد و ایستگاه شهرکرد کوتاه‌ترین فصل رشد در بین سایر ایستگاه‌های مورد بررسی را داشته است باشد.

مقایسه پهنه‌بندی واحدهای گرمایی طول فصل رشد طی دوره آماری ۳۰ ساله دوم (۱۳۶۸-۱۳۹۷) نشان‌دهنده کاهش واحدهای گرمایی طول فصل رشد از جنوب به شمال کشور و از شرق به غرب کشور می‌باشد. نتایج این پژوهش می‌تواند در راستای نتایج مظفری و همکاران (۲۷) باشد که در آن برای آستانه ۱۰ درجه سانتی‌گراد میزان واحدهای گرمایی طول فصل رشد از جنوب به شمال کشور کاهش و از غرب به شرق افزایش می‌یابد. بر این اساس در ایستگاه‌های جنوبی کشور در مقایسه با ایستگاه‌های سردسیر غرب و شمال غرب، شرایط برای گیاهان گرمسیری (آستانه دمایی۱۰ درجه سانتی‌گراد) در این مناطق مناسب‌تر شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان پیشنهاد کرد که در مناطقی که طول فصل رشد کاهش می‌یابد، با توجه به اینکه کشاورزان با کاهش عملکرد محصول و همچنین محصولاتی که به خوبی نرسیده‌اند مواجه‌اند، بهتر است از کشت محصولات با دوره رشد کمتر یا گیاهان زودرس استفاده کنند تا واحدهای گرمایی مورد نیاز گیاه در طول فصل رشد تأمین شود.

تحلیل سری‌های زمانی میانگین مجموع واحدهای گرمایی سال‌های زراعی بر مبنای سه آستانه دمایی مورد بررسی در دوره آماری ۳۰ ساله اول (۱۳۳۸-۱۳۶۷) نشان دهنده وجود روند در ۴۱ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه بود (شکل ۴- الف). این در حالی است که تحلیل سری‌های زمانی میانگین مجموع واحدهای گرمایی سال‌های زراعی بر مبنای سه آستانه دمایی مورد بررسی در دوره آماری ۳۰ ساله دوم (۱۳۶۸-۱۳۹۷) نشان‌دهنده وجود روند معنادار و افزایشی در ۹۳ درصد ایستگاه‌های مورد بررسی بود. طی این مدت ایستگاه‌های شهرکرد و شیراز در هر سه آستانه مذکور روند معناداری را نشان نداد (شکل ۴- ب). با توجه به نتایج بدست آمده از این پژوهش شاید در نواحی سردسیر به دلیل افزایش واحدهای گرمایی، تامین واحدهای سرمایی گیاهان با اختلال روبرو شود. در حالی که در نیمه جنوبی کشور به علت تامین شدن واحدهای گرمایی در روزهای کمتر، کوتاهی فصل رشد و عدم تجمع کافی ماده خشک در محصول و احتمالاً افت عملکرد مشاهده شود. با توجه به نتایج بدست آمده، شاخص GDD محصولات کشاورزی در حال افزایش است، بنابراین پیشنهاد می‌شود با روش‌های آماری بکار رفته در این پژوهش یا روش‌های مشابه دیگر نسبت به بررسی و ارزیابی محصولات، ارقام و همچنین بررسی تغییر رشد محصولات کشاورزی چندساله و ارزیابی اختلال گرده افشانی و تغییر عملکرد احتمالی آن‌ها مطالعاتی صورت گیرد. از طرفی دیگر با طولانی شدن فصل رشد شاهد افزایش تخم‌ریزی و تعدد نسل حشرات و آفات محصولات کشاورزی در طول سال خواهیم بود. بر این اساس پیشنهاد می‌شود ضمن مطالعه افزایش جمعیت حشرات در مزارع و باغ‌ها، نسبت به ارزیابی مقاومت بیشتر آن‌ها در برابر آفت‌کش‌ها تحقیق شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از سازمان هواشناسی به دلیل در اختیار قرار دادن اطلاعات مورد نیاز این پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد.



شکل ۴- تغییرات روند مجموع واحدهای گرمایی سال‌های زراعی بر مبنای آستانه‌های صفر، پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد الف) دوره آماری ۳۰ ساله اول (۱۳۳۸-۱۳۶۷) ب) دوره آماری ۳۰ ساله دوم (۱۳۶۸-۱۳۹۷)

Figure 4- Changes in the trend of total heat units of crop years based on thresholds of zero, five and 10 degrees Celsius (a) The first 30-year statistical period (1958-1987); (b) The second 30-year statistical period (1989-1397)

منابع

1- Azizzadeh J., Ahmadi H., Baaghideh M., and Entezari A. 2020. Whether climate change is an opportunity or a threat? evaluation of potential climate change on tropical trees of Iran, Case Study: Palm Dates. Journal of Climate Research (40): 61-80. (In Persian)

2- Berhane A. 2018. Climate change and variability impacts on agricultural productivity and food security. Journal of Climatology & Weather Forecasting 6(3): 1-6.

3- Bishnoi O.P. 2010. Applied Agroclimatology. Oxford book company, India.

4- Ceglar A., Zampieri M., Toreti A., and Dentener F. 2019. Observed northward migration of agro-climate zones in Europe will further accelerate under climate change. Earth's Future 7(9): 1088–1101.

5- Chmielewski F-M., and Rötzer T. 2002. Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. Climate Research 19(3): 257–264.

6- Christiansen D.E., Markstrom S.L., and Hay L.E. 2011. Impacts of climate change on the growing season in the United States. Earth Interactions 15(33): 1-17.

7- Egbebiyi T.S., Crespo O., Lennard C., Zaroug M., Nikulin G., Harris I., Price J., Forstenhäusler N., and Warren R. 2020. Investigating the potential impact of 1.5, 2 and 3 °C global warming levels on crop suitability and planting season over west Africa. PeerJ, 8:e8851.

8- Fallah Ghalhary G., and Ahmadi H. 2017. Trend analysis of phenological stages length and chilling requirements of apple tree (Case study: Karaj station). Journal of Agricultural Meteorology 5(1):57-70. (In Persian with English abstract)

9- Frich P., Alexander L.V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A.M.G., and Peterson T. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. Climate Research 19(3): 193–212.

10- Grigorieva E. 2020. Evaluating the sensitivity of growing degree days as an agro-climatic indicator of the climate change impact: A Case Study of the Russian far east. Atmosphere, 11, 404.

11- Hejabi S., Abasalinezhad Sheramin H., and Doulati Baneh H. 2019. Effect of climate change on the phenology of "Bidaneh Sefid" table grape variety in West Azerbaijan province. Research in Pomology 4(2): 43-52. (In Persian)

12- Høgda K.A., Tømmervik H., and Karlsen S.R. 2013. Trends in the start of the growing season in fennoscandia 1982–2011. Remote Sensing (5): 4304-4318.

13- Kamali G., Mollaei P., and Behyar M. 2010. Development of Zanjan province dry land wheat atlas by using climatic data and GIS. Journal of Water and Soil 24(5): 894-907. (In Persian with English abstract)

14- Karlsen S.R., Solheim I., Beck P.S.A., Høgda K.A., Wielgolaski F.E., and Tømmervik H. 2007. Variability of the start of the growing season in Fennoscandia, 1982–2002. International Journal of Biometeorology 51: 513–524.

15- Kheirandish M., Ghahreman N., and Bazrafshan J. 2014. A study of the effects of climate change on length of growing season in several climatic regions of Iran. Iranian Journal of Soil and Water Research 44(2): 143-150. (In Persian)
16- Kiani S., Shahraki J., Akbari A., and Sardar Shahraki A. 2020. The effect of climate change on Iran's agricultural production: A case study of Wheat crop. Applied Field Crops Research 32(04): 109-127. (In Persian with English abstract)
17- Koocheki A. 2002. Crop Production in Dry Regions. Mashhad Jahad Daneshgahi Press, Mashhad.
18- Koocheki A., Nassiri M., Kamali G.A., and Shahandeh H. 2006. Potential impacts of climate change on agrometeorological indicators in Iran. Arid Land Research and Management 20(3): 245-259.
19- Linderholm H.W. 2006. Growing season changes in the last century. Agricultural and Forest Meteorology 137: 1–14.
20- Liu X., Yin Z., Shao X., and Qin N. 2006. Temporal trends and variability of daily maximum and minimum, extreme temperature events, and growing season length over the estern and central Tibetan Plateau during 1961-2003. Journal of Geophysical Research 111(D19): 1–19.
21- Lobell D.B., Schlenker W., and Costa-Roberts J. 2011. Climate trends and global crop production since 1980. Science 333: 616-620.
22- Masoodian S.A., and Darand M. 2014. Recognition and analysis of agro climatic indices changes in Iran. Geographical Researches 29(2): 39-50. (In Persian)
23- Mirdrikvand F., Nasiri B., and Karampour M. 2017. The effect of climate change on the length of growing season of wheat in Lorestan province (A case study of Khorramabad, Boroujerd and Doroud stations). In: Proceedings of 5th natioal & 1st international conference on organic vs. conventional agriculture, 16-17 Aug. University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
24- Morovat S., Ebrahimi H., and Bakhsh Kelarestaghi K. 2013. Evaluate conditions climate change and effect of that upon farming calendar implant of Wheat in Mashhad. New Finding in Agriculture 7(4): 341-356. (In Persian)
25- Mozaffari G., and Torki M. 2010. Surveying about trend of variations of growth season's length in Iran. Geographic Thought 4(8): 24-43. (In Persian)
26- Mozaffari G., and Dehghan H. 2013. Zoning the length of growing period based on temperature characteristics in Iran. Journal of Geography and Regional Development 11(21): 121-137. (In Persian)
27- Mozaffari G., Fatemi M., and Dehghan H. 2019. Zonation and estimation of the trend of the thermal unit of growing season due to temperature changes, Iran. Physical Geography Research Quarterly 50(4): 731-746. (In Persian)
28- Pathak T.B., Maskey M.L., Dahlberg J.A., Kearns F., Bali K.M., and Zaccaria D. 2018. Climate change trends and impacts on California agriculture: A detailed review. Agronomy, 8, 25.
29- Rasooli S.J., and Ghaemi A.R. 2012. Canola cultivation area dividing about climatic temperature needs used GIS in Khorasan provinces. Journal of Crop Production 3(1): 121-138. (In Persian with English abstract)
30- Robeson S.M. 2002. Increasing growing-season length in Illinois during the 20th century. Climatic Change 52: 219- 238.
31- Serrano A., Mateos V.L., and Garcia J.A. 1999. Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921-1995. Physics and Chemistry of the Earth, Part (B) 24(1-2): 85-90.
32- Sharma P., Singh M., Bhardwaj S.K., and Bhatia H.S. 2019. Impact of accumulated growing degree days (GDD) on phenology of apple (*Malus domestica* Borkh) in Kullu district of Himachal Pradesh. Pharma Innovation 8(6): 850-854.
33- Shokouhi M. 2019. Evaluation of the impact of climate change on temperature and precipitation of rainfed wheat production in Kurdistan province. Journal of Agricultural Meteorology 7(1): 22-35. (In Persian with English abstract)
34- Tao F., Yokozawa M., Xu Y., Hayashi Y., and Zhang Z. 2006. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000. Agricultural and Forest Meteorology 138: 82-92.
35- Weikai Y., and Hunt L.A. 1999. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. Annals of Botany 84(5): 607–614.
36- Wypych A., Sulikowska A., Ustrnul Z., and Czekierda D. 2017. Variability of growing degree days in Poland in response to ongoing climate changes in Europe. International Journal of Biometeorology 61: 49–59.
37- Yasari T., and Shahsavari M.R. 2013. Growing degree days zoning of developmental stages of spring Safflower in Isfahan province. Journal of Crop Production and Processing 3(8): 61-71. (In Persian)
38- Yazdanpanah H., Ebrahimi R., and Taghavi nia F. 2017. The introduction of a new system of zoning Iran the cooling needs in the coming decade. Journal of Climate Research 1396(29): 125-139. (In Persian)
39- Yin Y., Deng H., and Wu S. 2019. Spatial-temporal variations in the thermal growing degree-days and season under climate warming in Chaina during 1960-2011. International Journal of Biometeorology 63(5): 649-658.

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 4, Sep.-Dec. 2021, p. 599-612

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۴، مهر – آبان ۱۴۰۰، ص. ۶۱۲-۵۹۹

Investigating the Variability of Growing Season Length and Growing Degree-Days of Crops in Elevated and Coastal Areas

S.F. Ziaeiasl[1]- A.A. Sabziparvar[2]*
Received: 11-04-2021
Accepted: 22-06-2021

Introduction: It is possible to guide the agricultural experts to achieve a suitable genotype and adapt to climatic conditions in proportion to the length of the modified growing season by identifying the impact of climate change in recent years on the cumulative rate of degree-days of plant growth. This will prevent the waste of capital and agricultural inputs and ultimately prevent the reduction of the final crop due to the mismatch of genotype-crop with the current climate. In the present study, an attempt has been made to study and compare the trend in the start and end of the growing season, the growing season length (GSL), and growing degree-days(GDD) during 1959-2018 in the elevated and coastal areas of Iran.

Materials and Methods: For this study, the daily temperature of 27 synoptic stations were used including 19 stations in elevated areas and 8 stations in coastal areas during 1959-2018. The first day with a minimum daily temperature equal to or greater than 0, 5, and 10 °C was considered as the start of the growing season (SGS). Moreover, the first day after the start of the growing season which has a minimum daily temperature of less than 0, 5, and 10 °C was considered as the end of the growing season (EGS). Trend analysis was performed in time series of GSL and GDD based on thresholds of 0, 5, and 10 °C using the Mann-Kendall test. To compare the results, the statistical period of 60 years was divided into two periods of 30 years (1959-1988 and 1989-2018). In both periods, the statistical characteristics of the GSL and GDD based on the three thresholds mentioned in coastal and elevated areas were surveyed and compared. In this study, deviation from the mean was used to complete the study of changes in the GSL. This index shows the scatter of data around the mean.

Results and Discussion: The GSL extension came from both the advance in SGS and the delay in EGS. Comparison results of the two 30-year periods (1959-1988 and 1989-2018) showed that during 1989-2018, in most stations the GSL has increased. During this period, based on 0 °C, the earliest and latest SGS were on February 24 and April 30 in Yazd and Shahrekord, respectively. Accordingly, the earliest and latest EGS were on October 15 and December 11 in Shahrekord and Gorgan, respectively. Based on 5 °C, the earliest and latest SGS were on February 10 and June 2 in Abadan and Gorgan, respectively. Accordingly, the earliest and latest EGS on September 17 and December 6 were at Shahrekord, Bam, and Abadan, respectively. Based on 10 °C, the earliest and latest SGS was on February 11 and June 20 at stations, respectively. Accordingly, the earliest and latest EGS were on August 27 and December 8 in Shahrekord and Bushehr, respectively. The shortest and longest GSLs based on all three thresholds of 0, 5, and 10 °C were Shahrekord and Bandar Abbas, respectively. The highest and lowest coefficient of variation of GSL were 20.8% in Zanjan and 4.9% in Bandar Abbas, respectively. Based on 0, 5, and 10 °C, the lowest GDDs in GSL are 3233, 1767, and 880 °C.d, respectively, and all of them were obtained at Shahrekord. On the other hand, the highest GDD_0, GDD_5, and GDD_{10} in GSL were 6783, 7372, and 5761 °C.d, respectively, in Yazd, Abadan, and Bandar Abbas. The most significant trend in GSL was in Zanjan, Zahedan, and Khorramabad.

Conclusion: Examination of changes in the GSL indicates the existence of a significant trend in a limited number of stations. Also, with increasing the threshold from 0 to 5 and from 5 to 10 °C, there is a significant decreasing trend in more stations. At the threshold of 10 °C a significant and decreasing trend of GSL was observed in Urmia, Sanandaj, Khorramabad, Birjand, and Bandar Abbas stations, In following, a significant increasing trend was observed in Tabriz, Tehran, Kermanshah, Isfahan, Yazd, and Bushehr stations. The results of the studies showed fewer changes in the time series of the GSL based on thresholds of 0 and 5 °C in the statistical period of 1989-2018. On the other hand, the results showed that the GSL trend is significant in more stations in the recent period based on the threshold of 10 °C. Deviation from the average GSL in coastal areas was greater than the elevated areas so that the GSL based on 10 °C in both areas increased with greater slope and

1 and 2- Ph.D. Candidate and Professor in Meteorology, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: swsabzi@basu.ac.ir)
DOI: 10.22067/JSW.2021.69480.1041

continuity. This increasing trend of deviation from the average in the coastal areas from the early '70s and the elevated areas from the early '90s and continues until now. In this regard, Bandar Abbas station and then Bushehr station had the longest GSL, and Shahrekord station had the shortest GSL among other stations which has been studied. Comparison of GDDs of the GSL during 1989-2018 showed the decrease of GDDs from south to north and from west to east of the country. Accordingly, in the southern stations of the country, the conditions for tropical plants (threshold of 10 °C) have become more suitable than the cold stations of the west and northwest, Time series analysis of the average annual GDDs based on the three thresholds during 1989-2018 showed a significant increasing (positive) trend in 93% of the stations. During the second 30-years period, Shahrekord and Shiraz stations did not show a significant trend in all three mentioned thresholds. However, the analysis of the annual average of GDDs during 1959-1988 showed the trend in 41% of the stations. According to the results of this study, it can be concluded that in cold regions, due to the increase in GDDs, the supply of cooling units for plants with certain cooling needs is more difficult. In the south of the country, as the total required GDD is achieved earlier, the GSL gets shorter, and therefore less dry biomass will accumulate in the product. This likely leads to a reduction in crop yields in this part of the country.

Keywords: Climate change, Mann-Kendall test, Temperature thresholds, Thermal heat units, Trend analysis

Contents

The Effect of Tillage Methods on some Soil Properties and Water Productivity of Two Sugar Beet Cultivars 473
M. Khorramian – M.S. Hasanvandi - S.R. Ashrafeizadeh
Estimation of Suspended Sediment Load Using Integrated Intelligent Methods with Considering Model Uncertainty 488
S.M. Saghebian
Estimation of Groundwater Recharge Lag Time in Mashhad-Chenaran Aquifer Using Cross-Correlation Method 504
M. Arjmand Sharif - H. Jafari
Effects of Fungal Phytases (Aspergillus Strains) on Availability of Phosphorus from Sodium Phytate and Phosphorus Uptake in Corn Plant 517
T. Valizadeh - A. Lakzian- A. Halajnia- M. Mazhari
Investigation of Bioaccumulation Capacity of Barley for Soil Lead and Chromium under Drought Stress Conditions 534
M. Madahinasab - M. Mousavi Nik - A. Ghanbari- A.R. Sirousmehr- Sh. Kouhestani
Response of Different Citrus Rootstocks to Sulfur Granular Compost and Nitrogen 549
M. Mahmoudi - Sh. Kazemi
Biological Management of Soil Erosion (Case Study: Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran) 566
S.H. Sadeghi - A. Jafarpoor- M. Farajolahi- D. Khatibi Roodbarsara- M. Moradi Sefidcheghayi- M. Zabihi Silabi- M. Khosravi- E. Kolani- B. Mohammedi- M.J. Adibi and H. Azarniya
Estimation of the Amount of Soil Organic Carbon Using Spectral Data in the VIS-NIR-SWIR-TIR Spectral Range 581
H.R. Matinfar - M. Jalali- Z. Dibaei
Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria and Filter Cake on Growth and Nutrient Concentration in Spinach Plant in Interaction with Herbicide 597
K. Asadzadeh- H. Nadian- A. Siahpoosh- V. Keshavarz-Tohid
Investigating the Variability of Growing Season Length and Growing Degree-Days of Crops in Elevated and Coastal Areas 612
S.F. Ziaeiasl - A.A. Sabziparvar

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 35 No. 4 2021

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
Fotovat, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Ghadiri, H.	Soil Science	Prof. Griffith University
Kamali, Gh.	Agricultural Meteorology	Assoc. Prof., Islamic Azad University, Tehran
Khorassani,R	Soil Science	Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Khormali, F.	Soil Science	Prof., Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan
Lakzian, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Liaghat, A.	Irrigation and Drainage	Prof., University of Tehran
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	Prof., Tabrzi University
Taghvaeian, S.	Irrigation	Assoc. Prof., Oklahoma University

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
P.O. Box: 91775- 1163
Fax: +98 51 8787430
E-Mail: jswa3@um.ac.ir
Web Site: https://jsw.um.ac.ir/

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).