



- ۱ اثر آبیاری بخشی ریشه و بستر کاشت بر عملکرد و اجزای عملکرد کینوا
صابر جمالی - حسین انصاری - سیده محبوبه زین الدین
- ۱۱ تأثیر رویکرد پیوندی آب، انرژی و غذا در مدیریت یکپارچه منابع آب شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود
زینب اسلامی - سمیه جنت رستمی - افشین اشرف زاده - یاور پورمحمد
- ۲۷ ارزیابی روش‌های مختلف مقیاس‌سازی معادله نفوذ فیلپ
محمد طاهر پوزن - محمدمهدی چاری - پیمان افراسیاب
- ۴۳ بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر هیدروگراف سیل رودخانه کشف‌رود با تحلیل نتایج روش SCS-CN
مهدی محمودی - مهدی هرمند - فرزین ناصری - صدیقه محمدی
- ۵۵ طبقه‌بندی کاربری اراضی و تعیین الگوی تغییرات سال‌های ۹ تا ۹۶ با استفاده از داده‌های سنجنده OLI
سید بهروز حسینی - علی صارمی - محمد حسین نوری قیداری - حسین صدقی - علیرضا فیروزفر
- ۷۳ ردیابی ژن اندوگلوکاناز در باکتری‌های تجزیه‌کننده سلولز غربال شده از خاک‌های جنگلی مازندران، ایران
الناز قدیری - نفیسه سادات نقوی - کامران قانلی
- ۸۵ توزیع مکانی جیوه در خاک‌های اطراف کارخانه سیمان کرمان
مریم یوسفی‌فرد - اعظم جعفری
- ۹۷ تأثیر حذف ماده آلی بر شاخص‌های پسماند فشر در خاک‌های آهکی
معصومه مهدی‌زاده - عادل ریحانی‌تبار - شاهین اوستان
- ۱۱۵ وضعیت ماده آلی خاک در توده‌های جنگلی ارسباران
حسین رضائی - علی اصغر جعفرزاده - احمد علیچاپور - فرزین شهبازی - خلیل ولیزاده کامران
- ۱۲۹ پیامد باکتری‌های باسیلوس در آزادسازی فشر از پسماند جامد کارخانه روغن کشتی در یک خاک آهکی
الهه هاشمپور - محمدباقر فرهنگ - نسرتین قربان‌زاده - محمود فاضلی سنگانی
- جداسازی باکتری‌های کارا در رسوب زیستی کرنات کلسیم (MICP) و ارزیابی توانایی آنها در کنترل فرسایش بادی خاک‌های شور اطراف دریاچه ارومیه
مریم معین‌فر - میرحسن رسولی صدقیانی - محسن برین - فرخ اسدزاده
- ۱۴۳ اثر برخی تنظیم‌کننده‌های رشد و سورفکتانت بر گیاه گلرنگ در خاک آلوده به کروم
سمیرا کشاورز - رضا قاسمی فسایی
- ۱۵۵ مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری کربن آلی در کاربری‌های مختلف خاک‌های آهکی استان لرستان
هانیه سپه‌وند - محمد فیضیان - رضا میرزایی تالارپشتی - تورستن مولر
- ۱۷۹ برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و درختی
پاسر استواری - سید علی اکبر موسوی - حسن مظفری
- تأثیر غلظت نانوذره و اندازه ذرات ماسه بر منحنی‌های انتقال و نگهداشت نانوذرات CMC-nZVI
امیر صابری‌نصر - محمد نخعی - محسن رضایی - سید موسی حسینی
- ۱۹۵ تشکیل و تکامل خاک‌های رخنمون شده مناطق باستانی کنارصندل و دقیانوس در شهر جیرفت، استان کرمان
الهام سلیمانی ساردو - محمد هادی فرپور
- ۲۲۵ اثر تغییرات اقلیمی بر رواناب و تبخیر و تعرق حوزه آبخیز مهرگرد
زهرا نوری - علی طالبی - بابک ابراهیمی

Contents

- The Effects of Partial Root Zone Drying and Growing Bed on Yield and its Components of Quinoa (cv. Titicaca) 10
S. Jamali- H. Ansari - S.M. Zeynodin
- Water, Energy, Food Nexus Approach Impact on Integrated Water Resources Management in Sefid-Rud Irrigation and Drainage Network 25
Z. Eslami - S. Janatrostami- A. Ashrafzadeh- Y. Pourmohamad
- Evaluation Different Methods of Scaling the Philip Equation 42
M.T. Poozan - M.M. Chari- P. Afrasiab
- The Effect of Land Use Changes on the Flood Hydrograph in the Kashaf-Rood River by Analyzing of SCS-CN Results 54
M. Mahmoodi - M. Honarmand- F. Naseri- S. Mohammadi
- Land Use Classification and Determining the Pattern of Changes for 0-07, using OLI Sensor's Data 71
S.B. Hosseini - A. Saremi - M.H. Noori Gheydari- H. Sedghi- A.R. Firoozfar
- Detection of Endoglucanase Gene in Cellulose Degrading Bacteria Screened from Forest Soils of Mazandaran, Iran 83
E. Ghadiri - N.S. Naghavi - K. Ghaedi
- Spatial Distribution of Mercury Contamination in Soils around of Kerman Cement Plant 95
M. Yousefifard - A. Jafari
- Effect of Organic Matter Removal on Phosphorus Hysteresis Indices (HI) in Calcareous Soils 114
M. Mahdizadeh - A. Reyhanitabar - Sh. Oustan
- Soil Organic Matter Condition in Forest Stands of Arasbaran 127
H. Rezaei - A.A. Jafarzadeh- A. Alijanpour- F. Shahbazi- Kh. Valizadeh Kamran
- The Effect of *Bacillus* Bacteria on Phosphorus Release from Oil Refinery Plant-solid Waste in a Calcareous Soil 141
E. Hashempour- M.B. Farhangi- N. Ghorbanzadeh- M. Fazeli Sangani
- Isolation of Efficient Bacteria in Microbial-induced Calcite Precipitation and Evaluation of their Ability in Control of Windy Erosion of Saline Soils around Urmia Lake 154
M. Moinfar - M.H. Rasouli-Sadaghiani- M. Barin- F. Asadzadeh
- The Effect of some Plant Growth Regulators and Surfactant on Safflower in Chromium Contaminated Soil 167
S. Keshavarz - R. Ghasemi-Fasaei
- Comparison of Different Methods for the Determination of Organic Carbon in Calcareous Soils under Different Land Uses of Lorestan Province 177
H. Sepahvand- M. Feizian- R. Mirzaeitalarposhti- T. Mueller
- Estimating the Soil Loss Tolerable (T-value) Using Linear and Regression Tree Methods 193
Y. Ostovari - A.A. Moosavi - H. Mozaffari
- The Effect of Particle Concentration and Sand Grain Size on Transport Breakthrough Curves and Retention Profiles of CMC-nZVI Particles in Saturated Media 207
A. Saberinasr - M. Nakhaei- M. Rezaei- S.M. Hosseini
- Genesis and Evolution of Exhumed Soils in Konarsandal and Daqyanous Archaeological Sites, Jiroft Area, Kerman Province 223
E. Soleimani Sardoo - M.H. Farpour
- Analysis of Effect of the Climate Parameters Change on Runoff and Evapotranspiration of Mehrgerd Watershed 239
Z. Nouri- A. Talebi- B. Ebrahimi

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

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

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد 34 شماره 1 فروردین - اردیبهشت سال 1399

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

سرمدیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

استاد - علوم خاک (دانشگاه تبریز)	اوستان، شاهین
استادیار - آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، امریکا)	تقوئیان، صالح
استاد - علوم خاک (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)	خرمالی، فرهاد
استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)	علیزاده، امین
استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)	فتوت، امیر
استاد - خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)	قدیری، حسین
دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران)	کمالی، غلامعلی
استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)	لکزیان، امیر
استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)	لیاقت، عبدالمجید
استاد - آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)	مساعدی، ابوالفضل
استاد - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)	موسوی بایگی، محمد

چاپ: چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

ناشر: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

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

این نشریه در پایگاههای زیر نمایه شده است:

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

پست الکترونیکی: jswa3@um.ac.ir

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

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

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

1	اثر آبیاری بخشی ریشه و بستر کاشت بر عملکرد و اجزای عملکرد کینوا صابر جمالی - حسین انصاری - سیده محبوبه زین الدین
11	تأثیر رویکرد پیوندی آب، انرژی و غذا در مدیریت یکپارچه منابع آب شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود زینب اسلامی - سمیه جنت رستمی - افشین اشرف زاده - یاور پورمحمد
27	ارزیابی روش‌های مختلف مقیاس‌سازی معادله نفوذ فیلیپ محمد طاهر پوزن - محمد مهدی چاری - پیمان افراسیاب
43	بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر هیدروگراف سیل رودخانه کشف‌رود با تحلیل نتایج روش SCS-CN مهدی محمودی - مهدی هنرمند - فرزین ناصری - صدیقه محمدی
55	طبقه‌بندی کاربری اراضی و تعیین الگوی تغییرات سال‌های 9 تا 96 با استفاده از داده‌های سنجنده OLI سید بهروز حسینی - علی صارمی - محمد حسین نوری قیداری - حسین صدقی - علیرضا فیروزفر
73	ردیابی ژن اندوگلوکاناز در باکتری‌های تجزیه‌کننده سلولز غربال شده از خاک‌های جنگلی مازندران، ایران الناز قدیری - نفیسه سادات نقوی - کامران قانندی
85	توزیع مکانی جیوه در خاک‌های اطراف کارخانه سیمان کرمان مریم یوسفی فرد - اعظم جعفری
97	تأثیر حذف ماده آلی بر شاخص‌های پسماند فاسر در خاک‌های آهکی معصومه مهدی‌زاده - عادل ریحانی‌تبار - شاهین اوستان
115	وضعیت ماده آلی خاک در توده‌های جنگلی ارسباران حسین رضائی - علی اصغر جعفرزاده - احمد علیجانپور - فرزین شهبازی - خلیل ولیزاده کامران
129	پایامد باکتری‌های باسیلوس در آزادسازی فاسر از پسماند جامد کارخانه روغن‌کشی در یک خاک آهکی الهه هاشم‌پور - محمدباقر فرهنگی - نسرين قربان‌زاده - محمود فاضلی سنگانی
143	جداسازی باکتری‌های کارا در رسوب زیستی کربنات کلسیم (MICP) و ارزیابی توانایی آنها در کنترل فرسایش بادی خاک‌های شور اطراف دریاچه ارومیه مریم معین‌فر - میرحسن رسولی صدقیانی - محسن برین - فرخ اسدزاده
155	اثر برخی تنظیم‌کننده‌های رشد و سورفکتانت بر گیاه گلرنگ در خاک آلوده به کروم سمیرا کشاورز - رضا قاسمی فسایی
169	مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری کربن آلی در کاربری‌های مختلف خاک‌های آهکی استان لرستان هانیه سپه‌وند - محمد فیضیان - رضا میرزایی تالارپشتی - تورستن مولر
179	برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و درختی یاسر استواری - سید علی اکبر موسوی - حسن مظفری
195	تأثیر غلظت نانوذره و اندازه ذرات ماسه بر منحنی‌های انتقال و نگهداشت نانوذرات CMC-nZVI در محیط متخلخل اشباع امیر صابری‌نصر - محمد نخعی - محسن رضایی - سید موسی حسینی

209 **تشکیل و تکامل خاک‌های رخنمون شده مناطق باستانی کنارصندل و دقیانوس در شهر جیرفت، استان کرمان**
الهام سلیمانی ساردو - محمد هادی فرپور

225 **اثر تغییرات اقلیمی بر رواناب و تبخیر و تفرق حوزه آبخیز مهرگرد**
زهرا نوری - علی طالبی - بابک ابراهیمی



اثر آبیاری بخشی ریشه و بستر کاشت بر عملکرد و اجزای عملکرد کینوا

صابر جمالی^۱ - حسین انصاری^{۲*} - سیده محبوبه زین الدین^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸

چکیده

در آبیاری به روش آبیاری بخشی ریشه (PRD)، نیمی از محیط ریشه به تواتر به صورت کامل آبیاری شده و نیم دیگر خشک نگه داشته می شود. هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی عملکرد و اجزای عملکرد کینوا با کاربرد روش آبیاری PRD در سه نوع بستر کاشت می باشد. آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی با چهار تکرار در سال ۱۳۹۷ در شرایط گلخانه ای که شامل دو مدیریت آبیاری (آبیاری کامل FI و آبیاری بخشی ناحیه ریشه PRD) و سه بستر کشت (سیلتی رسی S₁، لوم رسی S₂ و لوم شنی S₃) بود، اجرا شد. نتایج نشان داد که بیشترین ارتفاع گیاه در تیمار FI (۸۴/۴ سانتی متر) و کمترین ارتفاع گیاه در تیمار PRD (۸۲/۵ سانتی متر) می باشد. با کاهش ۵۰ درصد میزان آب آبیاری از تیمار FI به تیمار PRD، وزن هزاردانه ۹/۱ درصد کاهش یافت، بیشترین و کمترین وزن هزاردانه گیاه به ترتیب ۴/۰ و ۳/۶ گرم در بوته در تیمارهای FI و PRD به دست آمد. عملکرد دانه با تغییر مدیریت آبیاری از تیمار FI به PRD، ۱۰/۲ درصد کاهش داشت و حداکثر و حداقل مقدار آن به ترتیب در تیمارهای FI (۱۹/۷ گرم در بوته) و PRD (۱۷/۷ گرم در بوته) اندازه گیری شد. بیشترین و کمترین عملکرد دانه (۲۰/۲ و ۱۸/۴ گرم در بوته) به ترتیب مربوط به تیمارهای S₁ و S_{2,3} است. تیمار خاک سیلتی رسی با وزن هزار دانه ۴/۱۲ گرم، دارای وزن هزار دانه بیشتری نسبت به خاک های لوم رسی و لوم شنی (بترتیب با ۳/۷۸ و ۳/۷۸ گرم) داشت. به طور کلی، تأثیر روش آبیاری PRD بر کاهش مصرف آب در کشت گلخانه ای کینوا مثبت بود و قابل توصیه می باشد.

واژه های کلیدی: روش PRD، شرایط گلخانه ای، عملکرد دانه و سنبله، کم آبیاری، کینوا، وزن هزار دانه

مقدمه

رشدی و متابولیت های ثانویه گیاه کینوا نشان دادند که کاهش میزان آب آبیاری به میزان ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه منجر به کاهش وزن تر و خشک اندام هوایی و ارتفاع بوته شد. بیشترین میزان کاهش این صفات نیز در تیمار آبیاری به میزان ۲۰ درصد نیاز آبی مشاهده شد. نتایج تحقیق نشان داد که بیشترین میزان از وزن خشک اندام هوایی در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی (۰/۸۵ گرم) و کمترین میزان آن نیز در تیمار ۲۰ درصد نیاز آبی (۰/۲۵ گرم) مشاهده شد. در پژوهش ایشان بیشترین و کمترین میزان ارتفاع با ۳۵ و ۲۰ سانتی متر به ترتیب در تیمار شاهد و ۲۰ درصد نیاز آبی مشاهده شد. هریچی و همکاران (۹) در پژوهشی به منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف کم آبیاری بر بهبود بهره وری مصرف آب در گیاه ذرت شیرین، نخود، باقلا و کینوا نشان دادند که در گیاه نخود کاهش میزان آب آبیاری منجر به کاهش عملکرد دانه، وزن خشک اندام هوایی و نسبت ریشه به ساقه گردید، ولی شاخص برداشت افزایش یافت. در گیاه ذرت شیرین افزایش تنش آبی منجر به کاهش وزن تر اندام هوایی و عملکرد بلال تازه گردید، ولی شاخص برداشت و نسبت ریشه به ساقه افزایش یافت. در گیاه کینوا افزایش تنش آبی منجر به کاهش وزن خشک اندام هوایی و عملکرد دانه گردید، ولی شاخص برداشت و نسبت ریشه به ساقه

تنش ها یکی از علل کاهش رشد و عملکرد محصول در زمین های کشاورزی محسوب می شود (۲۶) که از جمله این تنش ها که باعث کاهش رشد و کاهش محصول در گیاهان می شود تنش خشکی است (۱۳)، که یکی از محدودیت های عمده در بهره وری کشاورزی در سرتاسر جهان بوده و این احتمال وجود دارد که در آینده افزایش یابد (۲۰ و ۲۱). تنش خشکی، یکی از مهم ترین عوامل اقلیمی محدود کننده تولید محصولات کشاورزی است که بر پراکنش، رشد و نمو گیاهان مؤثر است و می تواند باعث تغییرات مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در گیاه گردد (۱۱ و ۱۲). عزیز و همکاران (۲) به منظور بررسی اثر کم آبیاری بر خواص

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*) نویسنده مسئول: (Email: Ansary@um.ac.ir)
۳- دانشجوی کارشناسی، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
DOI: 10.22067/jsw.v34i1.81937

گویای این موضوع است که در شرایط توامان تنش شوری و خشکی نیز تمامی این صفات (به جز در تیمار شوری ۵۰ میلی-مولار و ۵۰ درصد نیاز آبی) نسبت به شاهد کاهش معنی داری داشته است. سانچز و همکاران (۲۲) در مطالعه خود اثر خشکی بر روی گیاه کینوا رقم cv. Real را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که اعمال تنش کم و شدید آبی منجر به کاهش ۳/۵ و ۵ درصدی (وزن تر اندام هوایی) و کاهش ۱۰ درصدی و بدون تغییر در وزن خشک اندام هوایی شد.

نتایج پژوهش میدانشاهی و همکاران (۱۴) بر روی گیاه گوجه فرنگی نشان داد که بیشترین ارتفاع گیاه در تیمار آبیاری کامل (۱۷۶/۲ سانتی متر) و کمترین میزان آن در آبیاری بخشی ریشه (۱۴۱/۴ سانتی متر) می باشد. با کاهش ۵۰ درصد میزان آب آبیاری در تیمار آبیاری بخشی ریشه، تعداد خوشه (۱۵/۲ درصد)، وزن گیاه (۴۰/۱ درصد)، تعداد میوه (۳۴/۶ درصد) و عملکرد (۴۴/۷ درصد) کاهش یافت ولی کارایی مصرف آب (۱۰/۹ درصد) افزایش یافت. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که بیشترین و کمترین وزن تر اندام هوایی گیاه به ترتیب در تیمارهای آبیاری کامل و آبیاری بخشی ریشه به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که خاک لوم شنی در هر دو روش آبیاری دارای کارایی مصرف آب بیشتری نسبت به اعمال تیمارهای آبیاری در خاک لوم رسی بود و عملکرد نیز در این خاک ۲۴/۲ درصد بیشتر بود. در تحقیقی دیگر دانش پژوه و همکاران (۴) به منظور بررسی اثر آبیاری بخشی ریشه بر روی گیاه فلفل دلمه ای آزمایشی را در دانشگاه شهرکرد اجرا کرده و نشان دادند که آبیاری بخشی ریشه نسبت به آبیاری کامل منجر به کاهش وزن تر و خشک اندام هوایی شد. در پژوهشی دیگر میدانشاهی و همکاران (۱۵) بر روی گیاه گلرنگ اظهار داشتند که روش آبیاری بخشی ریشه منجر به کاهش وزن هزاردانه (۳۲ درصد)، وزن خشک اندام هوایی (۳۴ درصد)، ارتفاع (۵۴/۱ درصد) و عملکرد دانه (۳۰ درصد) نسبت به تیمار آبیاری کامل شده است ولی کارایی مصرف آب ۳۵ درصد افزایش یافته است. همچنین ایشان بیان کردند که بیشترین میزان عملکرد دانه در خاک لوم شنی (۸/۸ گرم) مشاهده شده است (نسبت به بافت لوم رسی با ۸/۳ گرم).

با توجه به کمبود منابع آب شیرین و افزایش روز افزون جمعیت و نیاز به مواد غذایی بیشتر از یک سو و خشکسالی های اخیر از سوی دیگر، نیاز به استفاده از روش های بهبود کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی را بیش از پیش مورد توجه قرار داده است. از جمله روش های بهبود کارایی مصرف آب در کشاورزی، کشت گیاهان سازگار با کم آبی و شرایط فوق می باشد، که از مهمترین راهکارهای رسیدن به امنیت غذایی در کشور نیز به شمار می رود. کینوا گیاهی با ارزش غذایی مطلوب و پتانسیل بالای رشد و تولید در شرایط نامساعد محیطی که در بالا ذکر شد، می باشد. ایران دارای تنوع اقلیمی

افزایش یافت. از طرفی در گیاه باقلا، کاهش میزان آب آبیاری به صورت دوره ای منجر به کاهش وزن تر اندام هوایی و عملکرد بلال تازه گردید، ولی وزن خشک دانه، وزن تر محصول، تعداد دانه در غلاف، تعداد غلاف در بوته، وزن هزار دانه، بیومس کل، شاخص برداشت و نسبت ریشه به ساقه افزایش یافت. همچنین در گیاه ذرت شیرین افزایش تنش آبی دوره ای منجر به افزایش وزن تر بلال، وزن خشک دانه، وزن هزار دانه، زی توده کل، شاخص برداشت و نسبت ریشه به ساقه گردید ولی افزایش تنش بر تعداد بلال در بوته معنی دار نشد. از سوی دیگر در گیاه کینوا رقم DO708 افزایش تنش آبی دوره ای به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی در دوره رویشی منجر به افزایش عملکرد دانه در بوته (۱۱/۵ درصد)، شاخص برداشت (۱۶/۲ درصد)، بهره وری مصرف آب (۲۰/۲ درصد) و نسبت ریشه به ساقه (۱۲/۹ درصد) گردید، ولی زی توده کل کاهشی به میزان ۳/۹ درصد داشت. از طرفی در گیاه کینوا رقم QM1113 افزایش تنش آبی به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی در دوره رویشی منجر به افزایش عملکرد دانه در بوته (۶/۶ درصد)، زی توده کل (۴/۲ درصد)، شاخص برداشت (۲/۴ درصد)، بهره وری مصرف آب (۱۴/۵ درصد) و نسبت ریشه به ساقه (۲ درصد) شد. در پژوهشی دیگر رزاقی و همکاران (۱۹) به منظور بررسی اثر بافت های مختلف خاک و کود نیتروژن بر روی گیاه کینوا رقم Titicaca نشان دادند که اعمال تنش آبی در بافت شنی (کاهش ۱۲ درصدی)، لوم شنی (افزایش ۳/۳ درصدی) و لوم رس شنی (کاهش ۵/۹ درصدی) عملکرد دانه شد. همچنین ایشان نشان دادند که در شرایط آبیاری کامل بافت لوم رس شنی (۳/۴ مگاگرم در هکتار) نسبت به بافت های شنی (۲/۵ مگاگرم در هکتار) و لوم شنی (۳/۰ مگاگرم در هکتار) دارای عملکرد دانه بیشتری بوده است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که زی توده کل در شرایط اعمال تنش آبی در بافت شنی و لوم رس شنی به ترتیب به میزان ۷/۸ و ۷/۶ درصد نسبت به شرایط اعمال آبیاری به صورت کامل، کاهش می یابد. لازم به ذکر است که در پژوهش ایشان زی توده کل در تیمار استفاده از بافت لوم شنی در شرایط اعمال تنش و آبیاری کامل یکسان بود. در پژوهشی دیگر که به منظور کاهش اثر تنش های محیطی مانند خشکی بر روی گیاه کینوا در ۳ بافت خاک اجرا شده بود، نتایج نشان داد که استفاده از بیوجار و کمپوست اسیدی منجر به تقلیل اثر خشکی نسبت به تیمار شاهد شده به طوری که اعمال این مواد به خاک تحت تنش خشکی سبب بهبود در وزن خشک اندام هوایی به میزان ۶۴/۵ درصد (بیوجار اسیدی) و ۴۱/۹ درصد (کمپوست اسیدی) و عملکرد دانه به میزان ۶۲/۱ درصد (بیوجار اسیدی) و ۴۶/۵ درصد (کمپوست اسیدی) می شود (۱۸). در تحقیقی دیگر علی و همکاران (۱) نشان دادند که کاهش میزان آب آبیاری منجر به کاهش طول ریشه، ارتفاع، وزن تر اندام هوایی و ریشه و عملکرد دانه گیاه کینوا در شرایط آب و هوایی عربستان سعودی در سطح احتمال ۵ درصد شد. نتایج ایشان

وسيله‌ی هدايت سنج الكتريكي و اسيديته خاك در گل اشباع با استفاده از pH متر و چگالي ظاهري خاك به روش استوانه‌اي (در مزرعه) اندازه‌گيري شد (۲۷). خصوصيات فيزيكي و شيميايي خاك مورد استفاده در اين پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است.

پس از تهيه محيط كشت مركب، آن را به گلدان‌هاي پلاستيكي انتقال داده و با ترازو وزن گلدان‌ها را بررسي کرده تا شرايط يکسان باشد، لازم به ذکر است که ابتدا در کف گلدان‌ها به‌صورت يکسان لايه‌اي از سنگ‌ريزه به‌عنوان فيلتر جهت بهبود زهكشي و تهويه قرار داده شد و ۵ سانتی‌متر بالايي گلدان‌ها به‌منظور اعمال آبياري خالي در نظر گرفته شد و بقيه حجم خالي گلدان‌ها از خاك مركب پر شدند.

جهت جلوگیری از نشست خاک در گلدان و رسیدن به وزن مخصوص ظاهري خاك مزرعه، پر کردن خاك گلدان به‌صورت تدريجي و در لايه‌هاي پنج سانتی‌متری همراه با كوبش انجام شد. به‌منظور از بين بردن شوري، محيط كشت گلدان‌ها را با آب شهري اشباع کرده و اجازه داده شد که آب از زهكش‌هاي آن خارج شود. به‌منظور كاشت بذر در تاريخ ۱۵ ارديبهشت ۱۳۹۷، ۱۰ بذر کینوا رقم Titicaca برای آبياري كامل (FI) وسط هر گلدان و برای آبياري بخشی (PRD) دقیقاً روی صفحه تقارن به‌صورت مستقيم كاشته شد. طی مدت زمان جوانه زنی هر روز ۱۰۰ سی‌سی آب به هر گلدان با استفاده از پيست اضافه شد. پس از رسیدن گیاهان به مرحله ۴ برگچه‌اي تراکم بوته‌ها در گلدان به ۳ بوته تقليل يافت. دور آبياري در اين طرح متغير و عمق آبياري ثابت بوده که با استفاده از روش وزنی تعيين شد. تا مرحله استقرار گیاه، آبياري تمام تیمارها با استفاده از آب شهري و به‌ميزان حد ظرفيت زراعی (FC) انجام شد و سپس اعمال تیمارها صورت پذيرفت. دور آبياري بر اساس تعيين رطوبت موجود در خاك با استفاده از دستگاه TDR مدل PMS-714 اعمال گردید. به‌منظور اعمال آبياري بخشی ریشه، پس از طی يك دور آبياري، جهت نيمي از حجم خاك گلدان، مقدار آبی، برابر با نصف نیاز آبی تیمار آبياري كامل داده شد، به‌عبارت ديگر ۵۰ درصد نیاز آبی آبياري كامل، به نصف گلدان تیمار آبياري بخشی اضافه گشته و نيمه ديگر خشك نگه داشته شد. در دور بعدی آبياري، قسمتی از خاك که خشك بوده آبياري شد. لازم به ذکر است که در اين فرايند، هيچگونه کم‌آبياري در حين آبياري بخشی اعمال نشد و ۱۰۰ درصد نیاز آبی را طی دو مرحله که در فوق بدان اشاره شد، به‌صورت بخشی بر روی گلدان‌ها اعمال شدند. وجين علف‌هاي هرز با دست و در طی ۴ مرحله انجام شد. جهت اندازه‌گيري صفات وزن هزار دانه و عملکرد دانه و سنبله نیز گیاهان در تاريخ ۱ مهر ۱۳۹۷ برداشت شدند. صفات فيزبولوژيكي و زراعی برداشت شده برای تمامی گیاهان (۳ بوته در هر گلدان) شامل ارتفاع بوته (با استفاده از متر)، وزن هزار دانه، وزن تر برگ، ساقه و ریشه، عملکرد سنبله که همان وزن سنبله‌هاي موجود در هر بوته بوده و عملکرد دانه (با استفاده از ترازوی ديگيتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گيري شد)

متنوعی است به‌عنوان مثال كشت کینوا از نظرتوليد به‌خصوص در مناطقی از استان خراسان رضوی که با کمبود آب مواجه است، می‌تواند موجب ايجاد تنوع در محصولات زراعی، توليد پايدار و ايجاد افزايش درآمد کشاورزان و امنيت غذايي شود. کینوا از آنجا که گیاهی دارویی و همچنين بدون گلوتن است، غذايي ارزشمند بوده و به سلامت جامعه نیز کمک خواهد نمود. از اين رو در اين پژوهش علاوه بر گیاه مقاوم کینوا به کم‌آبی، از روش آبياري بخشی ریشه جهت بهبود کارايي مصرف آب در بسترهاي مختلف كشت نیز استفاده شده و هدف از اين پژوهش بررسي اثر روش آبياري مذکور و بسترهاي مختلف بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه کینوا رقم Titicaca می‌باشد.

مواد و روش‌ها

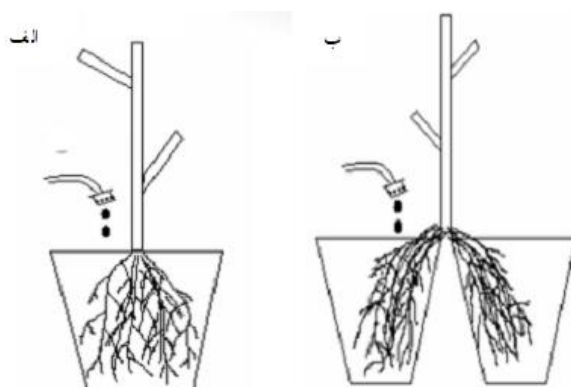
به‌منظور بررسي اثر بسترهاي مختلف كشت و روش‌هاي آبياري بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه کینوا رقم Titicaca، آزمایشی بر پایه كشت گلدانی و به‌صورت فاکتوريل دو عاملی در قالب طرح كاملاً تصادفی در گلخانه تحقيقاتی دانشكده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد با طول جغرافيايي ۵۹ درجه و ۳۶ دقيقه شرقی و عرض جغرافيايي ۳۶ درجه و ۱۶ دقيقه شمالی و ارتفاع ۹۸۵ متری از سطح دریا در سال ۱۳۹۷ اجرا گردید. تیمارهاي بستر كشت مورد بررسي در اين پژوهش شامل ۳ سطح (نسبت ۱:۲:۲ خاك زراعی و کود دامی که دارای بافت سيلتی رسی بوده S₁، نسبت ۱:۲:۲ خاك زراعی، ماسه و کود دامی که دارای بافت لوم رسی بوده، S₂؛ نسبت ۱:۴:۲ خاك زراعی، ماسه و کود دامی که دارای بافت لوم شنی بوده، S₃) و تیمار روش آبياري شامل ۲ سطح (روش متداول آبياري^۱ FI^۱ و آبياري بخشی ریشه PRD^۳) بود. برای اين پژوهش ۲۴ گلدان پلاستيكي به قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر تهيه گردید. جهت تیمارهاي آبياري بخشی، تيغه‌اي از جنس پلی‌كربنات، با توجه به ابعاد صفحه تقارن گلدان بریده و با چسب اکواريوم در محل خود نصب و آب‌بندی شد. به‌منظور كشت بذر در وسط صفحه و قسمت بالای آن به‌صورت مثلی برش داده تا ریشه‌ها بتوانند، در دو سمت تيغه رشد داشته باشند (شكل ۱). در شكل ۲ نیز نمونه‌اي از گیاهان كشت شده ارائه شده است. جهت تجزيه‌هاي فيزيكي و شيميايي خاك، نمونه‌ها به آزمایشگاه انتقال داده شد. نمونه‌ها بعد از خشك شدن از الك ۲ میلی‌متری عبور داده و برای تعيين بافت خاك از روش هيدهرومتری استفاده شد. قابليت هدايت الكتريكي خاك در عصاره گل اشباع به

۱- آبياري متداول: كل نیاز آبی گیاه در هر بار آبياري در اختيار آن قرار می‌گیرد.

2- Full irrigation

3- Partial Rootzone Drying

بود. در انتها نتایج با نرم افزار SAS (ver. 9.4) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه میانگین ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.



شکل ۱- الف: آبیاری کامل، ب: آبیاری بخشی ریشه
Figure 1- a: Full Irrigation, b: Partial Rootzone Drying



شکل ۲- نمونه ای از گیاهان کشت شده در گلدان
Figure 2- Sample of planted crops in pots

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی آب آبیاری مورد استفاده

Table1- Chemical properties of used water

کیفیت آب Water quality	ترکیبات شیمیایی Chemical properties									
	pH	EC ₂₅ (dS/m)	HCO ₃ (meq/L)	SO ₄ (meq/L)	Mg (meq/L)	Ca (meq/L)	K (meq/L)	Na (meq/L)	Cl (meq/L)	SAR
آب چاه Freshwater	8.2	1.2	7.8	1.7	2.8	4.4	0.6	4.1	2.4	1.73

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 2- Some of chemical and physiological properties of Soil

بافت خاک Soil texture	pH	هدایت الکتریکی Electrical conductivity dSm ⁻¹	چگالی ظاهری Bulk density gcm ⁻³	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand
سیلتی رسی (S ₁)	7.85	1.25	1.34	42	50	8
لوم رسی (S ₂)	7.58	1.46	1.1	30	33	37
لوم شنی (S ₃)	7.64	1.35	1.47	16	30	54

نتایج و بحث

تجزیه واریانس صفات عملکردی و اجزای عملکردی گیاه کینوا در جدول (۵)، بسترهای مختلف کاشت بر شاخه جانبی، عرض سنبله، تعداد سنبله، ارتفاع بوته، قطر ساقه، وزن سنبله، وزن اندام هوایی، عملکرد دانه و وزن هزار دانه در سطح احتمال یک درصد و بر صفت طول متوسط سنبله در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار شد. همچنین بر اساس نتایج این جدول روش‌های آبیاری نیز بر طول و عرض سنبله، ارتفاع بوته، قطر ساقه، وزن سنبله، وزن اندام هوایی، عملکرد دانه و وزن هزار دانه در سطح احتمال یک درصد و بر تعداد سنبله در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار شد، لازم به ذکر است که روش‌های آبیاری بر تعداد شاخه جانبی معنی دار نشد. نتایج گویای این است که اثر متقابل بر ارتفاع بوته، وزن سنبله، وزن اندام هوایی، عملکرد دانه و وزن هزار دانه در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد ولی بر بقیه صفات مورد بررسی معنی دار نشد.

در کل، تیمار FI نسبت به تیمار PRD در صفات مذکور دارای ارجحیت بوده و تقریباً بستر S₁ نسبت به سایر بسترها در تمامی صفات دارای مقادیر حداکثری بوده، که دلیل آن می‌تواند نگهداشت بیشتر آب و جذب بهتر آن توسط گیاه در شرایط تنش رطوبتی حاصل از آبیاری به روش PRD باشد. نتایج حاصل از روش‌های آبیاری نیز به دلیل اینکه در روش PRD تنها نیمی از نیاز آبی گیاه در هر بار آبیاری در اختیار آن قرار می‌گرفته خود می‌تواند دلیلی بر این باشد که گیاه در این شرایط کم‌آبیاری داشته و برای اینکه بتواند با این شرایط همزیستی داشته باشد، تعداد برگ‌ها و توسعه برگ‌ها نسبت به روش FI کمتر شده که خود دلیلی بر تشکیل کمتر شیره پرورده نسبت به حالتی است که گیاه تحت تنش نیست به عبارت دیگر در شرایط تنشی گیاه با بستن روزنه‌هایش، تعرق از سطح برگ را کاهش داده و کاهش تعرق گیاه به دلیل کاهش فتوسنتز و کاهش تولید شیره پرورده منجر به کاهش رشد گیاه می‌شود، از این رو کاهش این صفات قابل توجیه می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه در اکثر صفات کمترین مقدار مربوط به بستری است.

مطابق با جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۳) اثر متقابل روش آبیاری و بسترهای مختلف کشت بر ارتفاع بوته نشان از این دارد که بیشترین میزان از این صفت در تیمار S₁FI (۹۳/۰ سانتی‌متر) و کمترین میزان آن در تیمار S₃PRD (۷۶/۳ سانتی‌متر) نمایان شد، همچنین نتایج نشان‌دهنده این است که بین تیمارهای S₁FI و S₂PRD تفاوت معنی‌دار آماری در سطح ۵ درصد در صفت ارتفاع بوته وجود ندارد. مطابق با جدول (۳) ملاحظه می‌گردد که S₃FI با مقدار ۲۳/۸ گرم دارای بیشترین و تیمار S₁PRD (۱۸/۷ گرم) دارای کمترین میزان وزن تر اندام هوایی بود. همچنین نتایج نشان‌دهنده این است که بیشترین وزن هزار دانه و عملکرد دانه در تیمار S₁FI (به ترتیب با ۴/۳ و ۲۱/۲ گرم) و کمترین میزان این صفات در تیمار S₃PRD (به ترتیب با ۳/۳ و ۱۵/۹ گرم) مشاهده شد. بر اساس جدول (۴) که نشان‌دهنده اثر ساده تیمارهای مورد بررسی بر مقایسه میانگین‌هاست، بیشترین میزان وزن اندام هوایی نیز در تیمار بستر کشت (S₃) با ۲۱/۷ گرم در تک بوته مشاهده شد. در اکثر صفات، بهترین تیمار از نظر بافت خاک همان تیمار بستر کشت S₁ می‌باشد. در صفت تعداد شاخه جانبی بین تیمار S₁ و S₂ در سطح احتمال ۵ درصد از نظر مقایسه میانگین‌ها تفاوتی مشاهده نشد. همچنین در صفت طول سنبله نیز بین تمامی تیمارها (به جز S₁) تفاوتی در سطح ۵ درصد نمایان نشد. در صفت عرض و تعداد سنبله نیز به ترتیب بین تیمارهای S₂ و S₃ و بین تیمارهای S₁ و S₂ تفاوت معنی‌دار آماری در سطح ۵ درصد مشاهده نشد. نتایج همچنین نشان داد که در بین تیمارهای روش آبیاری در کلیه صفات (بجز وزن سنبله) روش FI که آب مورد نیاز گیاه به‌طور کامل در اختیار آن قرار می‌گرفت نسبت به تیمار PRD، بیشترین میزان را داشته است. به عبارت دیگر بیشترین مقدار در صفت طول سنبله (۱۱/۸ سانتی‌متر)، عرض سنبله (۳/۳ سانتی‌متر)، تعداد سنبله (۵/۴ عدد)، قطر ساقه (۰/۶۷ سانتی‌متر) در آبیاری متداول مشاهده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل بافت خاک و روش آبیاری بر صفات رشدی و عملکردی گیاه کینوا

Table 3- Mean comparison of interaction of irrigation methods and growing bed on growth and yield properties of Quinoa

ترکیبات تیماری	وزن هزاردانه	عملکرد دانه	وزن اندام هوایی	وزن سنبله	ارتفاع
Treatment	1000 kernel weight	Grain yield	Shoot weight	Panicle weight	Plant height
S ₁ FI	4.33 a	21.22 a	21.97 b	28.19 b	92.98 a
S ₂ FI	3.7 e	17.98 e	20.35 d	23.79 d	87.19 b
S ₃ FI	4.24 b	20.8 b	23.82 a	23.82 d	77.09 d
S ₁ PRD	3.92 c	19.19 c	18.71 f	21.82 e	79.14 c
S ₂ PRD	3.85 d	18.77 d	21.29 c	25.72 c	91.97 a
S ₃ PRD	3.3 f	15.95 f	19.67 e	28.88 a	76.3 d

حروف مشترک در ستون‌ها بیانگر عدم معنی‌داری در سطح ۵ درصد است.

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

مناسب نیست از این رو در این پژوهش تیمارهای دیگر نظیر استفاده از ماسه مساوی خاک و میزان ۲ برابر ماسه نیز مورد بررسی قرار گرفت.

که تنها از خاک زراعی استفاده شده است، می‌توان دلیل آن را اینگونه بیان کرد که استفاده از خاک زراعی به تنهایی به دلیل کمبود مواد غذایی بستر مناسبی برای رشد گیاه نیست. از آنجایی که بافت خاک مورد استفاده تقریباً سنگین بوده و برای کشت گیاه کینوا نیز

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات ساده بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه کینوا
Table 4- Mean comparison of yield and yield components of Quinoa plant

ترکیبات تیماری Treatment	وزن هزار دانه 1000 kernel weight	عملکرد دانه Grain yield	وزن اندام هوایی Shoot weight	وزن سنبه Panicle weight	قطر Diameter	ارتفاع Plant height	تعداد سنبه Panicle number	عرض سنبه Panicle width	طول سنبه Panicle length	شاخه جانبی Branches
سیلتی رسی (S1)	3.78 b	18.4 b	21.7 a	26.34 b	0.57 b	76.7 c	4.5 b	2.9 b	10.7 b	4.5 b
لوم رسی (S2)	3.78 b	18.4 b	20.8 b	24.7 c	0.59 b	89.6 a	6.0 a	3.0 b	10.8 b	7.2 a
لوم شنی (S3)	4.12 a	20.2 a	20.62 b	27.09 a	0.75 a	86.06 b	6.0 a	3.4 a	11.9 a	6.5 a
آبیاری متداول FI	4.04 a	19.7 a	21.4 a	25.2 b	0.67 a	84.35 a	5.4 a	3.3 a	11.8 a	5.8 a
آبیاری بخشی ریشه PRD	3.64 b	17.7 b	20.4 b	26.4 a	0.61 b	82.53 b	4.8 b	2.9 b	10.5 b	5.1 a

حروف مشترک در ستون‌ها بیانگر عدم معنی‌داری در سطح ۵ درصد است.

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

جدول ۵- تجزیه واریانس صفات مرتبط با عملکرد و اجزای عملکرد گیاه کینوا
Table 5- Analysis of variance of yield and yield components characteristics of Quinoa

میانگین مربعات											
منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	وزن هزار دانه 1000 kernel weight	عملکرد دانه Grain yield	وزن اندام هوایی Shoot weight	وزن سنبه Panicle weight	قطر Diameter	ارتفاع Plant height	تعداد سنبه Panicle number	عرض سنبه Panicle width	طول سنبه Panicle length	شاخه جانبی Branches
بافت خاک Soil texture	2	0.3**	6.7 **	3.2 **	4.4 **	0.06 **	266.2 **	4.5*	0.4 **	2.7 *	11.5**
روش آبیاری Irrigation method	1	0.7**	18.7 **	20.9 **	0.2 ns	0.02 *	48.5 **	2.7 *	0.8 **	5.6 **	6.7 *
بافت خاک * روش آبیاری Soil texture * Irrigation method	2	0.5**	11.9 **	11.1 **	52.3 **	0.0002 ^{ns}	137.1 **	0.4 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.3 ^{ns}	1.5 ^{ns}
خطا Error	12	0.001	0.04	0.1	0.1	0.002	1.1	0.5	0.01	0.2	1.0
ضریب تغییرات C.V.		1.8	1.9	1.6	2.9	7.8	1.2	12.8	3.3	3.9	16.5

** معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد (significant at 1 % levels). * معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد (significant at 5 % levels) و ^{ns} عدم معنی‌داری (non-significant)

از آنجایی که در این پژوهش اثر آبیاری PRD نیز مورد توجه بود، بستر S₃ در این روش دارای مقادیر کمتری از صفات مورد بررسی نسبت به سایر بسترهای مورد مطالعه بوده که دلیل آن می‌تواند زهکشی سریع آب خاک به دلیل سبک بودن بافت خاک باشد. دلیل اینکه بستر S₁ نسبت به دو بستر دیگر در هر دو روش آبیاری نتایج بهتری داشته می‌تواند این باشد که خاک دارای نگهداشت آب بیشتری بوده و خود منجر به بهبود جذب عناصر غذایی و آب مورد نیاز گیاه می‌شود و گیاه نیز اندام هوایی خود را توسعه می‌دهد. در شرایط تنش خشکی بین اندام‌های هوایی و ریشه برای جذب مواد فتوسنتزی رقابت ایجاد شده و سهم بیشتری از مواد فتوسنتزی به ریشه اختصاص می‌یابد، بطوری که کاهش مواد فتوسنتزی اختصاصی به اندام هوایی خود دلیلی بر کاهش وزن تر و خشک اندام‌های هوایی می‌شود. شارما و همکاران (۲۵) گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش رشد و شاخص‌های مربوط به آن می‌گردد. با کاهش مقدار آب میزان تجمع مواد فتوسنتزی و سرعت رشد نسبی کاهش می‌یابد و افت قابل توجه سرعت رشد نسبی بیانگر کاهش ماده خشک تولید شده در اثر کاهش رشد شاخ و برگ در مرحله رشد سبزینه‌ای است که می‌تواند یکی از علل کاهش عملکرد محصول باشد. از مهمترین دلایل کاهش در وزن گیاه در طول دوره تنش را می‌توان به اثرات سوء تنش بر رشد و فیزیولوژی گیاه شامل: رشد رویشی، سیستم فتوسنتزی، جذب عناصر غذایی و متابولیسم نیتروژن دانست. رشد و نمو یک گیاه به تقسیم سلولی، رشد و تمایز سلول‌ها وابسته است. رشد سلولی یکی از حساس‌ترین واکنش‌های گیاهی در برابر تنش خشکی می‌باشد. نتیجه کاهش اندازه سلول در رابطه با الگوی رشد گیاه به زمان وقوع کمبود آب از نظر فنولوژی گیاه بستگی دارد. اگر تنش آبی در ابتدای چرخه رشد گیاه اتفاق بیافتد، سطح برگ کاهش یافته و در نتیجه تثبیت کربن در فصل رشد کاهش خواهد یافت. دیگر اثرات ثانویه حاصل از کاهش سطح برگ شامل تغییر در الگوی مصرف آب و نیتروژن می‌باشد (۱۶). هامرونی و همکاران (۸) بیان کردند خشکی منجر به کاهش ارتفاع گیاه می‌شود زیرا تقسیم سلولی و بزرگ شدن سلول‌ها در اثر کاهش فشار اسمزی درون سلول کاهش می‌یابد. از طرفی کاهش ارتفاع گیاه به موازات افزایش تنش خشکی را می‌توان به اختلال در فتوسنتز به واسطه تنش خشکی و کاهش تولید مواد فتوسنتزی جهت ارائه به اندام‌های در حال رشد گیاه و نهایتاً عدم دستیابی گیاه به پتانسیل ژنتیکی از نظر ارتفاع نسبت داد (۱۷). کلارک و همکاران (۳) به این نتیجه رسیدند که در زمان پر شدن دانه، کمبود آب از طریق تقلیل فتوسنتز باعث کاهش عملکرد دانه در واحد سطح می‌شود. خشکی در مرحله پر شدن دانه مخصوصاً اگر با افزایش دما همراه باشد، موجب تسریع در پیری برگ‌ها، کاهش طول دوره پر شدن دانه، میانگین وزن دانه‌ها و عملکرد می‌شود. این

عمل توسط کاهش انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌های در حال توسعه صورت می‌پذیرد. امام و همکاران (۶) نتیجه گرفتند که با وجود شرایط مساعد رطوبتی تا پیش از گلدهی، تنش خشکی از گلدهی تا رسیدن دانه بر عملکرد دانه اثر بارزی دارد و سبب افت عملکرد دانه می‌گردد. اثر تنش رطوبت در مرحله پر شدن دانه‌ها بسیار بارز است، چون عملکرد بالقوه بسته به وزن هر دانه دارد، که این مستلزم تجمع مواد فتوسنتزی در دانه‌ها می‌باشد (۷). افزایش رقابت درون بوته‌ای به دلیل عرضه محدودتر مواد پرورده، ممکن است بر بقای پنجه‌ها، نمو سنبلک و پر شدن دانه تأثیر گذارد و دوام فرآیند یاد شده نیز ممکن است به وسیله میزان مسن شدن سایه انداز و سایر فرآیندهای بیوشیمیایی، تعیین شود. بنابراین، خشکی بر حسب زمان، طول و شدت دوره تنش می‌تواند عملکرد دانه را از طریق تأثیر بر هر یک از اجزاء یا ترکیبی از آنها کاهش دهد. با وجود شواهد خوبی در تأیید این نظر، انتقال مجدد مواد پرورده ذخیره شده می‌تواند کاهش عرضه مواد پرورده را پس از گل دهی، تا زمانی که ساقه و سنبله سبز می‌باشد، جبران کند (۵). مواد جمع شده در دانه از دو منبع فتوسنتز در خود دانه و انتقال مواد فتوسنتزی از قسمت‌های گیاه به دانه تأمین می‌گردد (۷). قسمتی از مواد فتوسنتزی قبل از گرده افشانی ساخته شده و در ساقه یا قسمت‌های دیگر گیاه ذخیره شده، بعداً به دانه‌های در حال تشکیل منتقل می‌شود، ولی قسمت اعظم مواد ساخته شده در دانه بعد از گرده افشانی ساخته می‌شود. بنابراین تنش رطوبتی در این مرحله انتقال مواد غذایی از برگ‌ها به دانه‌ها را کاهش داده و با توجه به اینکه خشکی باعث می‌شود دانه‌ها سریعتر برسند. دانه‌ها چروکیده شده و از عملکرد دانه کم می‌شود (۲۳). نتایج این تحقیق با نتایج عزیز و همکاران (۲) روی کینوا، رضانی و همکاران (۱۸) روی کینوا، جمالی (۱۰) بر روی گیاه کینوا رقم Titicaca، هریچی و همکاران (۹) روی گیاه کینوا، شریفان و همکاران (۲۴) بر روی ذرت علوفه‌ای و رزاقی و همکاران (۱۹) روی گیاه کینوا مطابقت داشت.

نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهش حاضر بیانگر این بود که بیشترین وزن هزار دانه (۴/۱ گرم)، عملکرد دانه (۲۰/۲ گرم)، عملکرد سنبله (۲۷/۱ گرم) و تعداد سنبله در بوته (۶/۰ عدد) به‌عنوان مهمترین پارامترهای عملکردی گیاه در بستر S₁ مشاهده شده و کمترین میزان آنها نیز به ترتیب با ۳/۸، ۱۸/۴ و ۲۴/۷ گرم و ۴/۵ عدد در بستر S₃ (به جز عملکرد سنبله که در بستر S₂ مشاهده شد) به‌دست آمد. همچنین تمامی صفات مذکور بیشترین مقدار در تیمار FI مشاهده شد. کاهش آب آبیاری به میزان ۵۰ درصد در تیمار آبیاری PRD به‌ترتیب منجر به کاهش ۹/۹ و ۱۰/۲ درصدی وزن هزار دانه و عملکرد دانه شده

عنوان یک راه کار مناسب جهت استفاده در شرایط بحران آب توصیه شود، هرچند که لازم است آزمایش های بیشتری (به ویژه در شرایط مزرعه ای) جهت تأیید نتایج پژوهش حاضر انجام شود. تیمار بهینه جهت حصول عملکرد اقتصادی برای زارع، S_1FI بوده و پس از آن تیمار S_1PRD (با کاهش عملکرد به میزان ۹/۶ درصدی نسبت به تیمار S_1FI) می باشد.

است. مطابق نتایج به دست آمده و از آنجایی که از دانه های گیاه کینوا نسبت به سایر قسمت ها نظیر برگ بیشتر استفاده می شود و با عنایت به موضوع کمبود منابع آب شیرین در ایران می توان از تیمار آبیاری بخشی با در نظر گرفتن کاهش عملکرد دانه استفاده کرد. بنابراین استفاده از آبیاری بخشی ریشه برای آبیاری محصولات کشاورزی نظیر گیاه کینوا در کشور با مدیریت مناسب و مطلوب می تواند به

منابع

- 1- Aly A.A., Al-Barakah F.N., and El-Mahrouky M.A. 2018. Salinity Stress Promote Drought Tolerance of *Chenopodium Quinoa* Willd. Communications in Soil Science and Plant Analysis 49(11): 1331-1343.
- 2- Aziz A., Akram N.A., and Ashraf M. 2018. Influence of natural and synthetic vitamin C (ascorbic acid) on primary and secondary metabolites and associated metabolism in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plants under water deficit regimes. Plant Physiology and Biochemistry 123: 192-203.
- 3- Clark J.M., Smith T.F., cage MCt N., and Gerr D. 1983. Growth analysis of spring Wheat Cultivars of Varying drought resistance. Crop Science 24: 537-41.
- 4- Daneshpazhoh P., Ghasemi A.R., Noori M.R., and Barzegar R. 2018. The Effect of Partial Root-Zone Drying and Zeolite on Water Use Efficiency and Physiological Characteristics of Sweet Pepper. Journal of Water and Soil 32(4): 675-690. (In Persian with English abstract)
- 5- Emam Y., and Niknejad V. 2011. An Introduction to the Physiology of Crop Performance. 3ed. Shiraz University publication. 571 pp. (In Persian)
- 6- Emam Y., Ranjbari A., and Bohrani, M.J. 2007. Evaluation of grain yield and its components in wheat genotypes under drought stress condition after anthesis. Journal Agriculture Natural Resource Science Technology 11: 317-327.
- 7- Fisher R.A., and Maurer R. 1988. Drought resistance in spring wheat cultivars I: grain yield responses. Australian journal of Agriculture Research 29: 897-912.
- 8- Hamrouni, I., Salah, H. B., and Marzouk B. 2001. Effects of water-deficit on lipids of safflower aerial parts. Phytochemistry 58(2): 277-280.
- 9- Hirich A., El-Omari H., El-Youssfi L., Fahmi H., Rami A., Laajaj K., Jacobsen S.E., and Choukr-Allah R. 2013. Using deficit irrigation with treated wastewater to improve crop water productivity of sweet corn, chickpea, faba bean and quinoa. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires 2(1): 15-22.
- 10- Jamali S. 2017. Investigation the effects of different levels of salinity and deficit irrigation on yield and yield components of Quinoa. MSc thesis. Gorgan university of Agriculture science and Natural resource. (In Persian with English abstract)
- 11- Javadi T., Arzani K., and Ebrahimzadeh H. 2008. Study of proline, soluble sugar, and chlorophyll a and b changes in nine Asian and one European pear cultivar under drought stress. Acta Horticulture 769: 241-246.
- 12- Khoyerdi F.F., Shamshiri M.H., and Estaji A. 2016. Changes in some physiological and osmotic parameters of several pistachio genotypes under drought stress. Scientia horticulturae 198: 44-51.
- 13- Kolenc Z., Vodnik D., Mandelc S., Javornik B., Kastelec D., and Čerenak A. 2016. Hop (*Humulus lupulus* L.) response mechanisms in drought stress: proteomic analysis with physiology. Plant Physiology and Biochemistry 105: 67-68.
- 14- Meidanshahi M., Mousavi S.F., Mostafazadeh-Fard B., and Landi E. 2013a. Effect of PRD deficit-irrigation method and sodium salicylate on yield, yield components and water use efficiency of tomato. Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture Soilless Culture Research Center 4(1): 1-14. (In Persian with English abstract)
- 15- Meidanshahi M., Mousavi S.F., and Mostafazadeh-Fard B. 2013b. Effect of PRD Deficit-irrigation Method and Growth Stabilizer on Yield, Yield Components and Water Use Efficiency of Safflower. Journal of Crop production and processing 3(8): 37-51. (In Persian with English abstract)
- 16- Molden D., Murry-Rust H., Sakthivadival R., and Makin I. 2001. A water productivity framework for understanding and action. Workshop on Water Productivity, 12 -13 November. 2001. Wadduwe, Sri Lanka.
- 17- Naderi M.R., Nourmohammadi Gh., Majidi A., Darvish F., Shirani-Rad A.H., and Madani, H., 2005. Evaluation of summer safflower response to different intensities of drought stress in Isfahan region. Agro-Breed Journal 7(3): 212-225. (In Persian with English abstract)
- 18- Ramzani P.M.A., Shan L., Anjum S., Ronggui H., Iqbal M., Virk Z.A., and Kausar S. 2017. Improved quinoa growth, physiological response, and seed nutritional quality in three soils having different stresses by the application of acidified biochar and compost. Plant Physiology and Biochemistry 116: 127-138.

- 19- Razzaghi F., Plauborg F., Jacobsen S.E., Jensen C.R., and Andersen M.N. 2012. Effect of nitrogen and water availability of three soil types on yield, radiation use efficiency and evapotranspiration in field-grown quinoa. *Agricultural Water Management* 109: 20-29.
- 20- Sadiq M., Akram N.A., Ashraf M., Ali S. 2017. Tocopherol confers water stress tolerance: Sugar and osmoprotectant metabolism in mung bean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek]. *Agrochimica* 61: 28-42.
- 21- Sai S.K.P.V., Sandya V., Manjari S., and Ali S. 2016. Enhancement of drought stresstolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research* 184: 13–24.
- 22- Sanchez H.B., Lemeur R., Damme P.V., and Jacobsen S.E. 2003. Ecophysiological analysis of drought and salinity stress of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International* 19(1-2): 111-119.
- 23- Sarmadnia G.H. and Kouchaki A. 2013. *Plant Physiology*. 17 ed. Jahad-daneshgahi of Mashhad publication. 467 pp. (In Persian)
- 24- Sharifan H., Mirzaei Sh., and Seilsepour M. Effect of Different levels of Super Absorbent Polymer and Water Stress on Yield Components of Forage Corn. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 8(4): 705-712. (In Persian with English abstract)
- 25- Sharma B.D., Sharma U.C., and Kaul H.N. 1990. Physiological traits for high yield in potato. *Indian Journal of Hill Farming* 3(1): 41-46.
- 26- Yasmeen R., and Siddiqui Z.S. 2018. Ameliorative effects of *Trichoderma harzianum* on monocot crops under hydroponic saline environment. *Acta Physiologiae Plantarum* 40(4): 1-14.
- 27- Zarinkafsh M. 1993. *Applied soil science: soil survey and soil-plant-water analysis*. Tehran University publication. 342 pp. (In Persian)



The Effects of Partial Root Zone Drying and Growing Bed on Yield and its Components of Quinoa (cv. Titicaca)

S. Jamali¹- H. Ansari^{2*} - S.M. Zeynodin³

Received: 24-07-2019

Accepted: 29-12-2019

Introduction: Since the agriculture is the main water consumer, it is necessary to increase water use efficiency. As a management practice, deficit irrigation strategy is applied to cope with water shortages, especially during drought periods. A greenhouse experiment was conducted to investigate the impact of water and salt stress on Quinoa plants (*Chenopodium quinoa* Willd.), Aly et al (2) showed that quinoa plants can tolerate water stress (50% FC) when irrigated with moderately saline water (T1 and T2, respectively). The results of some studies showed that Amaranth was the most responsive plant to water. Quinoa showed the best performance in the treatment with the upper-middle water level among the other evaluated species. Millet showed thermal sensitivity for cultivation in the winter, making grain production unfeasible; however, it showed exceptional ability to produce biomass even in the treatment with higher water deficit. Water stress can affect plants by reducing the plant height, relative growth rate, cell growth, photosynthetic rate, and the respiration activation. Cultivated plants have several mechanisms of adaptation to water deficit, but the responses are complex and adaptation is attributed to the ability of plants to control water losses by transpiration, which depends on the stomatal sensitivity and greater capacity of water absorption by the root system, among other factors. In PRD method, half of the root zone is watered and the other half is kept dry intermittently. The objective of this research was to study yield and yield components of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Titicaca cultivar, using PRD irrigation method in three growing bed, under greenhouse conditions.

Materials and Methods: This research was conducted to study the effects of water stress on yield and its components of Quinoa under the different growing beds in the experimental research greenhouse of Ferdowsi University of Mashhad during 2018. Titicaca cultivar of Quinoa was planted and experimental design was factorial, based on complete randomized design and three replications, included two irrigation managements (FI, full irrigation and PRD, partial root-zone drying method) and three levels of growing bed (S₁, silty clay, S₂ clay loam and, S₃ sandy loam). Research station is located in north-east Iran at 36° 16' N latitude and 59° 36' E longitude and its height from sea level is 985 meters. The seeds of Quinoa were planted at a depth of 1.5 centimeters in the soil of each pot and were irrigated with tap water. Plants were harvested after 4 months and plant height, branches number, panicle number, thousand kernel weights, grain yield, biomass; stem, leaf, and panicle dry weight panicles were measured. Physical and chemical properties of irrigation water and soil were determined before the beginning of the experiment. The obtained data analyzed using the statistical software of SAS (Ver. 9.4) and the means were compared using LSD test at 5 % percent levels.

Results and Discussion: Results showed that the highest plant height (84.4 cm) was in FI treatment and the shortest plant height (82.5 cm) was in PRD treatment. The highest and the lowest 1000 kernel weights and grain yield were measured in FI (4.0 and 19.7 g per plant) and PRD (3.6 and 17.7 g per plant) treatments, respectively. With a 50 % reduction of water in PRD compared to FI treatment, 1000 kernel weights were decreased by 9.1%. Grain yield was decreased by 10.2% (changing from FI to PRD). The highest and the least grain yield (20.2 and 18.4 g per plant) were obtained in S₁ and S_{2,3} soils, respectively. Silty clay soil with 1000 kernel yield of 4.12 g had higher than clay loam and sandy loam soil, which produced 3.78 g and 3.78 g, respectively.

Conclusion: In general, the effect of the PRD irrigation method on reducing water use in the greenhouse production of Quinoa was positive and recommendable. Silty clay soil with 1000 kernel yield of 4.12 g had higher than clay loam and sandy loam soil, which produced 3.78 g and 3.78 g, respectively.

Keywords: 1000 kernel weights, Deficit irrigation, Greenhouse conditions, Panicle and grain yield, PRD method, Quinoa

1 and 2- Ph.D. Candidate and Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

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

3- B.Sc. Student, Faculty of Natural Resource and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.81937

تأثیر رویکرد پیوندی آب، انرژی و غذا در مدیریت یکپارچه منابع آب شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود

زینب اسلامی^۱ - سمیه جنت رستمی^{۲*} - افشین اشرف زاده^۳ - یاور پورمحمد^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۳۰

چکیده

جمعیت رو به افزایش جهان به خصوص کشورهای در حال توسعه از یک سو و نیاز به تأمین غذا برای این جمعیت از سوی دیگر، نتیجه‌ای جز برداشت بی‌رویه از منابع را به دنبال نداشته است. به دنبال تعیین اهداف هزاره سوم سازمان ملل متحد، پژوهشگران رویکردهای میان‌رشته‌ای متنوعی را برای دستیابی به نوعی تعادل پویا در تولید و مصرف منابع ارائه داده‌اند که از مهم‌ترین آن‌ها رویکرد پیوند آب، انرژی و غذا است. با توجه به محدودیت‌های منابع موجود که روز به روز تشدید می‌گردد، این رویکرد با استفاده از یکپارچه‌سازی چرخه آب، انرژی و غذا سبب افزایش بهره‌وری می‌گردد. آب، انرژی و غذا علی‌رغم داشتن تفاوت‌های ذاتی از دیدگاه سیستمی، شباهت‌های فراوانی دارند، که به دلیل این ارتباط سیستمی و اثر متقابل آن‌ها بر یکدیگر، امروزه مفهوم جدیدی به نام رویکرد پیوندی مطرح شده است. با توجه به اهمیت این رویکرد در مدیریت یکپارچه منابع آب در این پژوهش، به منظور مدیریت شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود واقع در استان گیلان، یکی از استان‌های واقع در حوضه آبریز سفیدرود از این رویکرد استفاده شده است. در این راستا، از نرم‌افزارهای WEAP برای مدیریت منابع آب و غذا و نرم‌افزار LEAP برای مدیریت بخش انرژی در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود استفاده شد. سپس با برقراری ارتباط بین این دو نرم‌افزار، به مدیریت یکپارچه منابع آب این منطقه پرداخته شد. سپس پارامترهای خروجی مدل ارتباطی توسعه داده شد، مانند نیاز خالص آب در منطقه، نقطه نیاز به منابع آبی، آب عرضه نشده و درصد تأمین نیاز بدون در نظر گرفتن بخش انرژی و با در نظر گرفتن انرژی مقایسه شدند. نتایج این مطالعه نشان داد نیاز خالص آبی و آب عرضه شده به شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود در سال ۲۰۱۶ با رویکرد پیوندی، به ترتیب ۸/۶ و ۸/۷ میلیون متر مکعب بیشتر از حالت بدون رویکرد پیوندی به دست آمد. بنابراین بخش قابل توجهی از مقادیر عرضه و تقاضا در مدیریت غیرپیوندی در نظر گرفته نمی‌شود. در حالی که، هر چه این مقادیر به واقعیت نزدیک‌تر باشد، برنامه‌ریزی‌های مدیریتی منطقی‌تر و درصد اجرای آن‌ها نیز افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: استان گیلان، رابطه پیوندی، مدیریت یکپارچه، LEAP، WEAP

مقدمه

توسعه و مدیریت همزمان آب، زمین و منابع وابسته را به منظور حداکثر کردن رفاه اقتصادی و اجتماعی به شیوه‌ای عادلانه و بدون آسیب به پایداری اکوسیستم‌های حیاتی دنبال می‌کند (۱). با افزایش توسعه در جوامع جهانی و همچنین رشد جمعیت نیاز به منابع حیاتی همچون آب، انرژی و غذا نیز افزایش یافته است (۲). لذا اعمال رویکردهایی به منظور بهبود مدیریت و حفظ منابع حائز اهمیت است. آب، انرژی و غذا به طور جدایی‌ناپذیری با یکدیگر در ارتباط هستند، به طوری که هر یک از این منابع به یکدیگر وابسته هستند (۳). آب نقش مهمی را در هر یک از مراحل استخراج انرژی ایفا می‌کند، که شامل استخراج، تولید و فرآوری سوخت‌های فسیلی، تولید برق و تصفیه ضایعات مربوط به فعالیت‌های بخش انرژی است. آب و انرژی برای تولید مواد غذایی در کشاورزی مورد نیاز است، که عمدتاً برای آبیاری، تولید و فرآوری محصولات کشاورزی استفاده می‌شود (۴).

برنامه‌ریزان منابع آب در سراسر دنیا به طور گسترده از مفهوم مدیریت یکپارچه منابع آب استفاده می‌کنند. با توجه به تعریف سازمان جهانی همکاری آب^۵، مدیریت یکپارچه منابع آب فرایندی است که

۱ و ۲ - به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، استادیار و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

(*) - نویسنده مسئول: Email: janatrostami@guilan.ac.ir

۴ - دانش‌آموخته دکتری تخصصی آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.81897

5- The World Bank IEG

بخش آب و کشاورزی و ابزار LEAP برای مدل‌سازی منابع و مصارف بخش انرژی استفاده شد.

مواد و روش‌ها

مدل‌های مورد استفاده

در ژانویه ۲۰۱۵ آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر^۳ (IRENA)، هشت ابزار برای مدل‌سازی رابطه پیوندی معرفی کردند که کادورا و ال خطیب قابلیت مدل‌سازی این ابزارها را بررسی کردند (۴). از قابلیت‌های مدل‌های WEAP و LEAP به عنوان یکی از ابزارهای کاربردی رویکرد پیوندی که توسط کادورا و ال خطیب بررسی شده‌اند، می‌توان به دسترسی رایگان کشورها در حال توسعه به این ابزارها اشاره کرد. علاوه بر این، محیط کار با نرم‌افزار، بسیار کاربرپسند است و این ابزارها قابلیت انجام تجزیه و تحلیل‌های اقتصادی پروژه‌ها را دارند (۱۲). شایان ذکر است که دو مدل WEAP و LEAP به تنهایی به عنوان ابزار پیوندی به حساب نمی‌آیند که در صورت اتصال آن‌ها با یکدیگر، به عنوان ابزار پیوندی تا حدودی یکپارچه‌سازی بین بخش‌های آب و انرژی را انجام می‌دهد (۱۳). به نسبت سایر ابزارها ساختار داده‌های ورودی آن‌ها به راحتی توسط کاربر قابل تنظیم است. در جایی که داده‌ها به صورت کامل در دسترس نباشد، کاربر می‌تواند این ابزار را بر اساس یک ساختار داده محدود ایجاد کند. تجزیه و تحلیل سناریوهای مختلف در هر دو ابزار نهفته است و کاربر را در تصمیم‌گیری صحیح یاری می‌رساند. ویژگی‌هایی که ذکر شد، مانند عدم الزام گستردگی داده‌های ورودی، محیط کاربرپسند، رایگان بودن و غیره از دلایل انتخاب این ابزار برای پیاده‌سازی مدیریت توامان آب، غذا و انرژی در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود در استان گیلان می‌باشد. با توجه به اینکه، یکی از موانع برای دستیابی به اهداف این پژوهش، محدودیت دسترسی به داده‌های منسجم و صحیح می‌باشد، این ابزارها برای مدل‌سازی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود استفاده شدند.

مدل WEAP

مدل WEAP در سال ۱۹۹۰ توسط مؤسسه محیط زیست استکهلم^۴ توسعه یافت و تاکنون طی دو نسخه WEAP99 که تحت سیستم عامل DOS بوده و WEAP21 که تحت سیستم عامل Windows بوده، به بازار عرضه شده است. WEAP یک نرم‌افزار جامع و پیشرفته شبیه‌سازی سیستمی منابع آب است که در مدیریت

آب، انرژی و غذا به‌رغم داشتن تفاوت‌های ذاتی، از دیدگاه سیستمی شباهت‌های فراوانی دارند. به دلیل ارتباط نزدیک از دیدگاه سیستمی و اثر متقابل آن‌ها بر یکدیگر، امروزه مفهوم جدیدی به نام رویکرد پیوندی^۱ مطرح شده است، که اشاره به ذات بهم پیوسته و اثرات متقابل منابع سه‌گانه به یکدیگر دارد (۵). ارتباط بین منابع آب، انرژی و غذا به صورت رابطه آب-انرژی-غذا^۲ (WEF) تعریف می‌شود. مدیریت رویکرد پیوندی با هدف تأمین امنیت WEF مستلزم رویکردهای یکپارچه و یا ابزاری برای تجزیه و تحلیل است، که قادر به شناسایی تبادلات بین بخش‌های مختلف، برنامه‌ریزی مقرون به صرفه تولید و مدیریت استراتژی‌ها و سیاست‌ها باشد (۶). امروزه، با توجه به اهمیت محدودیت این سه منبع حیاتی و افزایش سریع جمعیت جهان، مفهوم رابطه پیوندی در مدیریت منابع آب، انرژی و غذا، توجه محققان زیادی را در سطح بین‌المللی به خود معطوف کرده است (۷). از این رو، کاراتایو و همکاران در تحقیقی رویکرد پیوندی را برای شناسایی ارتباط بین منابع آب و تولید انرژی و کشاورزی در کشور قزاقستان به کار گرفتند (۸). اخیراً کادورا و ال خطیب در مطالعه‌ای با بررسی ابزارهای موجود برای مدل‌سازی رویکرد پیوندی در جهت استفاده برای مدیریت یکپارچه به معرفی قابلیت‌های ابزارهای موجود برای کمک به سیاست‌گذاران، متخصصان و فعالان حیطه‌ی رویکرد پیوندی پرداختند (۴). امروزه تجزیه و تحلیل مسائل منابع آب با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی که فرآیندهایی از قبیل بارش، تبخیر، نفوذ و رواناب و همچنین مدل‌های هیدرولوژیکی که تأثیر سازهایی از قبیل سدها و کانال‌ها را در مدیریت سیستم شبیه‌سازی می‌کنند، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است (۹). لذا برای پیاده‌سازی رویکرد پیوندی در این پژوهش، با توجه به قابلیت‌ها و محدودیت‌های ابزارهای موجود نرم‌افزارهای WEAP و LEAP برای مدل‌سازی انتخاب شدند. در راستای این هدف کالبرگ و همکاران با استفاده از ابزار پیوند WEAP و LEAP سناریوهای مدیریتی را در راستای تعادل بین عرضه و تقاضا در کشور اتیوپی توسعه دادند (۱۰). سان و همکاران نیز با استفاده از همین ابزار به بررسی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب و انرژی منطقه پکن چین پرداختند (۱۱). بنابراین، در این پژوهش به منظور نمایش اهمیت استفاده از رویکرد پیوندی آب، غذا و انرژی در مدیریت منابع آب، این رویکرد در مدیریت آبی پایین‌دست سد مخزنی سفیدرود به عنوان یکی از سدهایی که علاوه بر تأمین انرژی برقایی، دارای هدف تأمین آب اراضی کشاورزی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود است، به کار گرفته شد. در مدل‌سازی رویکرد پیوندی از ابزار WEAP برای مدل‌سازی

3- International Renewable Energy Agency

4- Stockholm Environment Institute

1- Nexus Approach

2- Water-Energy-Food

مدل LEAP

LEAP یک سیستم برنامه‌ریزی یکپارچه است که مانند WEAP توسط مؤسسه محیط‌زیست استکهلم توسعه یافته است. این مدل، قابلیت مدل‌سازی و تحلیل مسائل گسترده برق و آب کشور را میسر می‌کند. استفاده از این مدل بسیار شفاف بوده و امکان برنامه‌ریزی حقیقی برای رسیدن به اهداف واقعی را فراهم می‌کند و در عین سادگی بسیار قدرتمند بوده و یک سیستم هوشمند یکپارچه برای مدیریت دو بخش استراتژیک برق و آب کشور می‌باشد. مدل LEAP بر پایه محاسبات سلسله مراتبی و سیستماتیک می‌باشد که به دلیل ساختار داده‌های انعطاف‌پذیر در این مدل، این امکان فراهم می‌شود تا تصمیم‌گیران به راحتی ایده مورد نظر خود را در یک محیط و بستر مجازی که نماینده سیستم انرژی است بدون ذخیره مدل‌های بسیار پیچیده ارزیابی نمایند. LEAP به عنوان ابزار پیش‌بینی، کاربران را قادر می‌سازد که عرضه و تقاضای انرژی را در افق برنامه‌ریزی پیش‌بینی نمایند و همچنین به عنوان ابزار تجزیه و تحلیل سیاست‌های انرژی، تأثیرات فیزیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی برنامه‌های انرژی جایگزین، سرمایه‌گذاری و اقدامات بهینه‌سازی را فراهم می‌کند (۱۵). از جمله کاربردهای مدل LEAP در مقیاس جهانی می‌توان به مطالعه روند انرژی جهان در یک مدل ۲۰ منطقه‌ای برای اجلاس Rio+20 در سال ۲۰۱۲ اشاره کرد. همچنین در سال ۲۰۱۲ برای پشتیبانی برنامه‌ریزی انرژی پاک و تغییرات آب و هوایی ماساچوست مدل‌سازی انجام شد.

ارتباط مدل‌های WEAP و LEAP

برای دستیابی به رویکرد پیوندی در مدیریت منابع سه‌گانه آب، انرژی و غذا، بخش عرضه و تقاضای انرژی الکتریکی منطقه با استفاده از نرم‌افزار LEAP مدل‌سازی می‌شود. تولید غذا نیز نیازمند مصرف توأمان آب و انرژی می‌باشد، استحصال و عرضه آب سطحی و زیرزمینی به هدف کشاورزی نیازمند صرف انرژی است، که ایجاد ارتباط ما بین این‌ها در نرم‌افزار شبیه‌سازی سیستم انرژی LEAP، با تبدیل حجم آب مصرفی کشاورزی تعریف شده در نرم‌افزار شبیه‌ساز منابع آبی WEAP، به واحد جرم و سپس تبدیل آن به واحد نیرو و در نهایت با تکیه بر مفهوم کار در فیزیک (کار انجام شده برابر است با حاصل ضرب نیرو در جابجایی) انجام می‌شود. با استفاده از ابزار تعبیه شده در نرم‌افزارهای WEAP و LEAP، دو نرم‌افزار به یکدیگر متصل می‌شوند.

منطقه مورد مطالعه

استان گیلان با مساحت ۱۴۰۴۴ کیلومترمربع از استان‌های شمالی ایران است، به علت بارش‌های متعدد در زمره استان‌هایی با آب و

منابع آب حوضه‌های آبریز کاربرد گسترده‌ای دارد. این نرم‌افزار، یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری است و امکان تحلیل کاملی از منابع و مصارف آب در حال و آینده را فراهم می‌سازد. هنگامی که مصرف آب به صورت چند منظوره و با رقابت انجام می‌شود، مدل WEAP این امکان را فراهم می‌کند که الگوهای مختلف مدیریتی تحلیل و بررسی شوند (۱۴). این مدل، بر اساس معادلات پایه بیلان آبی عمل کرده و آن را می‌توان در سیستم‌های شهری و کشاورزی، حوضه‌های مستقل یا سیستم‌های رودخانه‌ای مرزی پیچیده به کار برد. علاوه بر این می‌تواند محدوده زیادی از مسائل مانند تحلیل نیاز هر بخش، حفاظت آب، حقابه‌ها و اولویت‌های تخصیص، شبیه‌سازی آب‌های سطحی و زیرزمینی، بهره‌برداری از مخزن، تولید انرژی برقی، روندیابی آلودگی، نیازهای اکوسیستم، ارزیابی آسیب‌پذیری و تحلیل سود-هزینه طرح را پوشش دهد. اساس این نرم‌افزار بر پایه محاسبه بیلان آب می‌باشد و مهندسی منابع آب و مهندسی محیط‌زیست را به‌طور همزمان مورد توجه قرار می‌دهد. در مدل WEAP از رابطه (۱) برای محاسبه نیاز کل آب سیستم استفاده می‌شود.

$$AD = \sum(TAL \times WUR) \quad (1)$$

در این معادله، AD نیاز آب سالانه، TAL سطح فعالیت کل که بسته به نوع نقطه نیاز ممکن است برای مناطق مسکونی نفر یا کشاورزی هکتار باشد و WUR سرانه مصرف آب که واحد آن متر مکعب در سال می‌باشد. رواناب در مدل با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$R = MAX(0, PAE_{ETp}) + (P \times (1 - PE)) + ((1 - IF) \times S) \quad (2)$$

که در این رابطه، R رواناب، PAE میزان بارندگی که مستقیماً تبخیر می‌شود، ETp تبخیر و تعرق پتانسیل، P بارش، PE بارش مؤثر، IF جزء آبیاری و S حجم ذخیره می‌باشد (تمام اجزاء بر حسب میلی‌متر). برای محاسبه میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی از رواناب‌ها از رابطه (۳)، و برای محاسبه حجم آب‌های سطحی از رابطه (۴) استفاده می‌شود:

$$RTG = \sum(R \times RTGF) \quad (3)$$

$$RTS = \sum(R \times (1 - RTGF)) \quad (4)$$

که RTG تغذیه آب زیرزمینی (متر مکعب)، RTGF ضریب تغذیه آب زیرزمینی و RTS تغذیه آب سطحی (متر مکعب) می‌باشد. جریان آب رودخانه در پایین‌دست مدل با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$DO = UI + SI + GFTR - RFTG - E \quad (5)$$

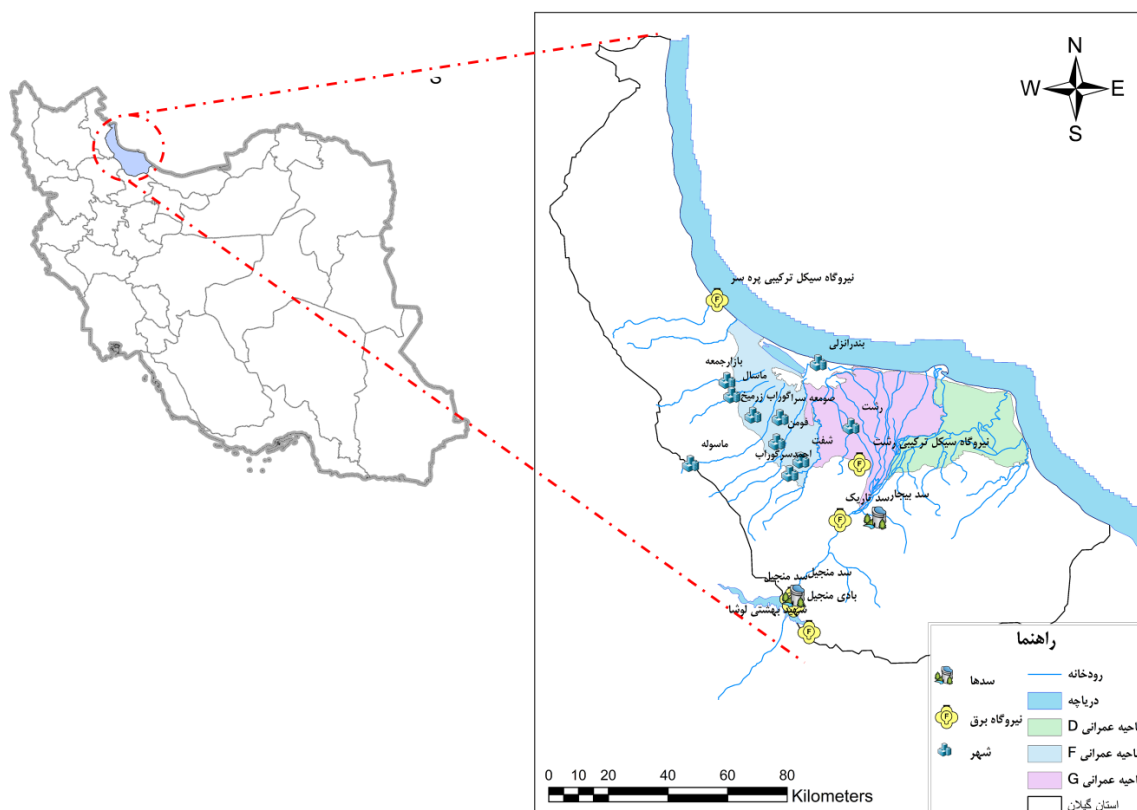
که در آن DO جریان آب در پایین دست، UI جریان آب در بالا دست، SI ورود جریان آب سطحی، GFTR تغذیه توسط آب زیرزمینی، RFTG تخلیه به آب زیرزمینی و E تبخیر می‌باشد. کلیه واحدها در این رابطه به متر مکعب بر ثانیه تنظیم شده‌اند (۱۴).

سفیدرود، رودخانه‌های محلی، زهکش‌ها، منابع آب زیرزمینی و همچنین آب‌بندان‌های موجود در منطقه به عنوان مخازن تنظیمی (بافر) در نظر گرفته شده است. مصارف آب نیز شامل بخش‌های کشاورزی (در سه ناحیه مجزای شرق، مرکزی و فومنات) و شرب (در سه ناحیه مجزای شرق، مرکزی و فومنات و در دو بخش شرب شهری و شرب روستایی) و صنعت (در سه ناحیه مجزای شرق، مرکزی و فومنات) می‌باشد، که کشاورزی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین مصرف‌کنندگان آب در این ناحیه می‌باشد.

آماده‌سازی داده‌ها

پیش از پیاده‌سازی رویکرد پیوندی بین منابع آب، انرژی و غذا با استفاده از ابزارهای نام‌برده، به هدف تجزیه و تحلیل‌های سریع‌تر و صحیح‌تر نیاز به آماده‌سازی داده‌هایی با ساختار متناسب با ابزارهای LEAP و WEAP در بخش‌های گوناگون وجود دارد. در این پژوهش، در قسمت تقاضای آب، مصارف کشاورزی، شرب و صنعت و در بخش عرضه‌ی آب منابع رودخانه‌ها، چاه‌های آب، آب‌بندان‌های موجود در منطقه توسط نرم‌افزار WEAP مدل‌سازی شد.

هوای معتدل و مرطوب قرار دارد (۱۶). با احداث سد مخزنی سفیدرود به گنجایش ۱۸۰۰ میلیون متر مکعب، اجرای شبکه‌های آبیاری در دشت گیلان از سال ۱۳۴۰ آغاز و توسعه کشت برنج ادامه یافته است. شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود گیلان با مساحت جغرافیایی ۲۸۴۱۸۰ هکتار بین طول جغرافیایی ۴۹/۱۲ و ۵۰/۲۷ و عرض جغرافیایی ۳۷/۰۸ و ۳۷/۶۰ در استان گیلان قرار دارد و در قالب ۱۷ واحد عمرانی شکل گرفته است (۱۷ و ۱۸). واحدهای عمرانی شبکه آبیاری سفیدرود در سمت راست رودخانه سفیدرود شامل واحدهای D1 تا D5، در ساحل چپ واحدهای G1 تا G7 و در ناحیه فومنات F1 تا F5 می‌باشد. از این مساحت در وضع موجود ۱۸۹۸۳۳ هکتار ناخالص تحت کشت برنج است. کشت شالی به‌عنوان یکی از محصولات استراتژیک مهم، پهنه وسیعی از اراضی شبکه سفیدرود را پوشش می‌دهد. به‌طوری‌که در حدود ۹۴ درصد از کل اراضی کشاورزی شبکه به کشت شالی اختصاص دارد (۱۹). رودخانه سفیدرود به عنوان منبع اصلی تأمین آب شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود بوده که آب رها شده از سد سفیدرود توسط سدهای انحرافی و همچنین کانال‌های منشعب از آن‌ها، به نواحی مختلف شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود منتقل می‌شود (۱۸). در این پژوهش، منابع آب شبکه سد



شکل ۱- موقعیت استان گیلان در ایران و نواحی عمرانی F، G و D در استان گیلان و اجزای مورد استفاده در مدیریت پیوندی آب، انرژی و غذا
Figure 1- Location of Guilan province in Iran and development areas F, G and D in Guilan province and components used in water, energy and food nexus management

همچنین تقاضای انرژی به صورت سرانه مصرف بخش‌های خانگی، عمومی، صنعتی، کشاورزی، سایر مصارف و روشنایی معابر وارد مدل LEAP شده است و منابع انرژی منطقه در دو بخش انرژی‌های تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر وارد مدل شده‌اند. به دلیل گستردگی داده‌ها در مدلسازی بخش کشاورزی در مدل WEAP، اطلاعات کشاورزی منطقه در قالب اطلاعات حوضه آبریز وارد مدل شده است.

داده‌های مربوط به حوضه آبریز

نقاط نیاز کشاورزی به صورت گره‌های نیاز حوضه آبریز در نواحی F، G و D در نظر گرفته شد. در این مطالعه، از اطلاعات سازمان جهاد کشاورزی برای مشخص کردن سطح زیرکشت برنج در هر ناحیه استفاده شد. مساحت ناحیه عمرانی F، G و D به ترتیب ۸۴۳۱۴، ۱۱۸۲۵۰ و ۸۱۶۱۵ هکتار است. اطلاعات مربوط به مساحت گیاهان کشت شده در منطقه که وارد مدل شده طبق جدول یک می باشد.

با استناد به داده‌های مرکز آمار ایران، جمعیت شهرهای واقع در منطقه مورد مطالعه وارد مدل شد و از آنجایی که توزیع جمعیت در

روستاها به صورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود، جمعیت روستاها به صورت نسبت مساحت جغرافیایی واقع در هر ناحیه عمرانی محاسبه شد و وارد مدل گردید. با توجه به آمار جمعیت و نرخ رشد ۱/۲۵ درصدی مستخرج از آمار موجود، جمعیت برای افق ۶۰ ساله توسط مدل توسعه داده شده پیش‌بینی خواهد شد (۲۰).

داده‌های مربوط به مصارف شرب

با توجه به گزارشات آب و فاضلاب استان گیلان، مقدار سرانه مصرف شرب شهری ۷۶/۶۵ متر مکعب به ازای هر نفر در سال و مقدار سرانه مصرف شرب روستایی ۷۳ متر مکعب به ازای هر نفر در سال تعیین شد (۲۱).

داده‌های مربوط به مصارف صنعت

رشد صنایع به تأمین مطمئن و پایدار نیاز آبی آن بستگی دارد، لذا همواره باید به حفظ منابع آب توجه داشت. با توجه به گزارش مطالعات انجام شده، میزان تقاضا برای بخش صنعت به ازای هر نفر ۶/۵ متر مکعب در سال در نظر گرفته شد (۲۱).

جدول ۱- سطح زیرکشت محصولات منتخب در نواحی عمرانی

Table 1- Conservation area of selected products in developmental areas

نام محصول Product's name	سطح زیر کشت در ناحیه عمرانی *D		سطح زیر کشت در ناحیه عمرانی G		سطح زیر کشت در ناحیه عمرانی F	
	Cultivation area of D		Cultivation area of G		Cultivation area of F	
	هکتار ha	درصد %	هکتار ha	درصد %	هکتار ha	درصد %
برنج Rice	54555	66	78503	66	56775	67
لوبیا کشاورزی Agricultural beans	308.59	0.38	12.30	0.01	654.58	0.78
هندوانه Watermelon	108.94	0.13	0.99	0	235.61	0.28
شیدر Clover	181.52	0.22	22.59	0.02	219.60	0.26
بادام زمینی Groundnut	910.08	1.12	0.02	0	1.95	0
چای Tea	1553.41	1.90	100.48	0.08	841.69	1
سایر** Others**	23997.47	—	39610.62	—	28855.57	—
مساحت کل Total area	81615		118250		84314	

* نسبت‌ها به مساحت کل حوضه است.

* The values are the ratios to the total area of the basin.

** گندم، جو، حبوبات، نباتات علوفه‌ای و سبزی و صیفی

** Wheat, barley, legumes, fodder crops and vegetables

نواحی عمرانی فومنت، مرکزی و شرق، حجم هر کدام از آنها به عنوان ظرفیت آب زیرزمینی مدل در نظر گرفته شد.

داده‌های مربوط به تقاضای انرژی در منطقه

با توجه به اطلاعات استخراج شده از نشریه آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه توزیع برق، به مشترکین بخش‌های خانگی، عمومی، کشاورزی، صنعتی، سایر مصارف و روشنایی معابر تقسیم‌بندی شد و وارد مدل گردید (۲۳).

داده‌های انرژی تجدیدپذیر

این منطقه از پتانسیل بالایی برای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر برخوردار است (۲۴). از نمونه این منابع انرژی، الکتریسیته تولید شده توسط سد سفیدرود و نیروگاه بادی در شهر منجیل برخوردار است. طبق جدول سه که توسط شرکت مادر تخصصی توانیر تهیه شده است، اطلاعاتی در خصوص نیروگاه‌های تجدیدپذیر منطقه وارد مدل گردیده است (۲۳).

داده‌های انرژی غیرتجدیدپذیر

استان گیلان دارای دو نیروگاه سیکل ترکیبی در شهر رشت و پره‌سر است.

داده‌های مربوط به آب سطحی

با استفاده از آمار و اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان، مقدار دبی ماهانه برای کل رودخانه‌های جاری در شبکه سفیدرود که نهایتاً به دریا می‌ریزند، با توجه به موقعیت آنها در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود وارد مدل شد. یکی دیگر از منابع آبی در دسترس که در تأمین آب مورد نیاز مزارع تحت پوشش شبکه سفیدرود به عنوان منبع کمکی تأمین آب مورد استفاده قرار می‌گیرد، ذخایر آب موجود در آب‌بندان‌ها می‌باشد. حجم ذخیره آب‌بندان‌ها در هر کدام از نواحی F، G و D طبق جدول ۲ و با استناد به اطلاعات دفتر بهره‌برداری و نگهداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی در سازمان سهامی آب منطقه‌ای گیلان وارد مدل گردید. لازم به ذکر است که حجم ذخیره با فرض متوسط عمق یک متر لحاظ گردیده است (۲۲).

داده‌های مربوط به آب زیرزمینی

در این پژوهش، برای تعیین حجم اولیه و کلی آب زیرزمینی مقدار آن در هر یک از نواحی عمرانی به صورت یک توده یکپارچه پر از آب در نظر گرفته شد. بنابراین با استفاده از اطلاعات مربوط به دشت‌ها و نواحی مطالعاتی گردآوری شده توسط وزارت نیرو و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS ارتفاع متوسط سفره آب زیرزمینی به دست آمد، که نهایتاً با در نظر گرفتن مساحت آبخوان هر یک از

جدول ۲- تعداد و مساحت آب‌بندان‌ها در نواحی عمرانی

Table 2- Number and area of the reservoirs in the developmental areas

واحد عمرانی Command area	تعداد پهنه آب‌بندان Number of pond	مساحت آب‌بندان‌ها Pond area	حجم ذخیره (میلیون متر مکعب) Storage volume (MCM)
F	399	1167.11	11.67
G	116	1531.29	15.31
D	110	3949.33	39.49

جدول ۳- مشخصات نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر استان گیلان

Table 3- Specifications of renewable energy plants in Guilan province

نام نیروگاه Name of power plant	تعداد واحد Number of units	میانگین		تولید ناخالص Gross production	مصرف داخلی فنی Technical consumption	ساعت کارکرد Plant operation hours
		قدرت اسمی Nominal power	قدرت عملی Average practical power			
		مگاوات Mw	مگاوات Mw			
سد سفیدرود Sefid-rud Dam	5	88	88	124895	624	1622
بادی منجیل Wind power plant of Manjil	1	92	92	115526	0	—

می‌شود، همچنین به نسبت مقدار «تقاضای تامین شده» را به مقدار «نقطه نیاز به منبع آبی» درصد تأمین مصارف حاصل می‌شود. در نهایت نیز اثر مدیریت پیوندی بر حجم مخازن و مقدار واقعی تبخیر-تعرق در محدوده مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته است.

نیاز خالص آب

شکل ۲، نیاز خالص متوسط ماهانه محدوده مطالعاتی را به تفکیک نقاط نیاز نشان می‌دهد. با شروع فصل کشت در ماه‌های آوریل تا سپتامبر نیاز خالص آبیاری به سبب افزایش نیاز آبی محصولات افزایش یافته است. این نیاز در ماه جون با افزایش دما و به دنبال آن افزایش تبخیر-تعرق به حداکثر می‌رسد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود بیشترین تغییرات نیاز خالص آبی مربوط به کشاورزی است و دیگر نقاط نیاز با توجه به ماهیت آن‌ها تغییرات قابل توجهی در طول سال ندارند. همچنین شکل ۳ نشان دهنده تفاوت نیاز خالص متوسط ماهانه تحت دو سناریوی در نظر گرفتن رویکرد پیوندی و بدون رویکرد پیوندی در محدوده مطالعاتی است. علاوه بر این، در جدول پنج تفاوت نیاز خالص سالانه محدوده مطالعاتی در دو سناریو برای پنج سال آورده شده است. تفاوت نیاز خالص آب تحت دو سناریو با توجه به مصرف آب غیر قابل انکار بخش انرژی در مدیریت یکپارچه منابع آب قابل توجهیه است.

نیروگاه سیکل ترکیبی رشت با شش واحد گازی و سه واحد بخاری فعالیت می‌کند و نیروگاه سیکل ترکیبی پره‌سر متشکل از دو واحد گازی و یک واحد بخاری است. یک نیروگاه از نوع حرارتی با دو واحد گازی و دو واحد بخاری در شهر لوشان فعالیت می‌کند. آب مصرفی نیروگاه سیکل ترکیبی رشت توسط چاه فلمن از بستر رودخانه سفیدرود تأمین می‌شود، آب مصرفی نیروگاه پره‌سر نیز از طریق آب شور دریا و آب زیرزمینی عمیق تأمین می‌شود که استفاده از آب دریا اثرات آلودگی زیادی برجا می‌گذارد. نیروگاه حرارتی لوشان نیز از آب رودخانه شاهرود در بالادست سد سفیدرود استفاده می‌کند.

نتایج

نتایج مدل ترکیبی WEAP و LEAP به صورت کلی شامل هفت قسمت کلی نیاز خالص، نقطه نیاز به منبع آبی، آب عرضه شده، تقاضای برطرف نشده، درصد تأمین مصارف، حجم مخازن و تبخیر-تعرق واقعی است. نیاز خالص، نیاز هر گره بدون در نظر گرفتن آب از دست‌رفته، استفاده مجدد و برگشت آب است. نقطه نیاز به منبع آبی به معنای نیاز آب خالص هر گره با در نظر گرفتن آب از دست‌رفته، استفاده مجدد و برگشت آب است. آب عرضه شده نیز به معنای مقدار آبی است که از منبع آبی به هر گره تخصیص داده شده است که ممکن است تمام نیاز گره را تأمین نکند. تقاضای برطرف نشده نیاز از اختلاف مقدار «نقطه نیاز به منبع آبی» و «آب عرضه شده» حاصل

جدول ۴- مشخصات نیروگاه‌های انرژی غیر تجدیدپذیر در استان گیلان

Table 4- Specifications of non-renewable energy plants in Guilan province

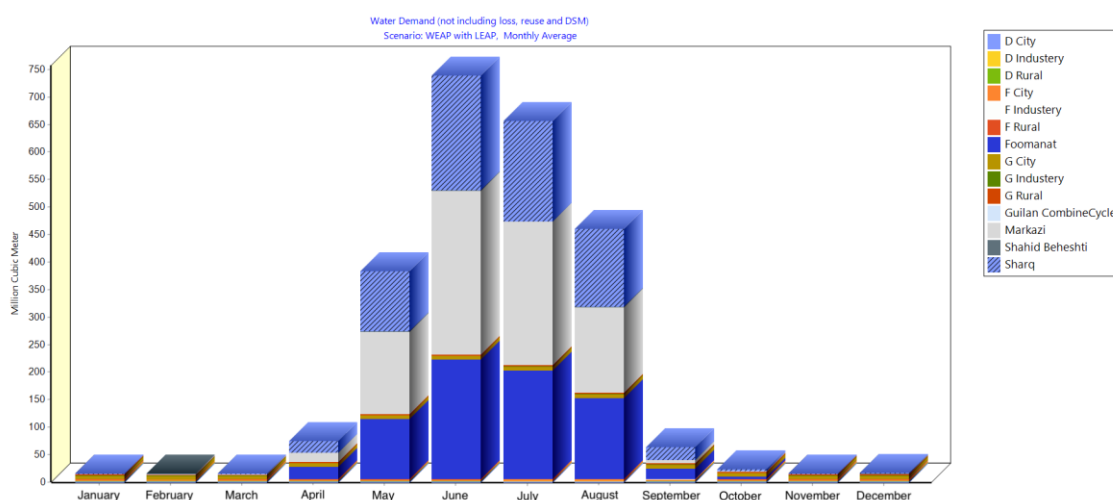
نام نیروگاه Name of power plant	تعداد واحد Number of units	قدرت اسمی (مگاوات) Nominal power (Mw)	میانگین قدرت عملی (مگاوات) Average practical power (Mw)	تولید ناخالص (هزار کیلووات ساعت) Gross production (1000 Kw/h)	مصرف داخلی فنی (هزار کیلووات ساعت) Technical consumption (1000Kw/h)	سوخت مصرفی Fuel consumption			ساعت کارکرد Plant operation hours	بازده حرارتی (کیلووات ساعت) Thermal efficiency (Kw/h)	راندمان (درصد) Efficiency (%)
						گازوئیل (هزار لیتر) Gasoline (1000L.it)	گاز (هزار مترمکعب) Gas (1000 Lit)	نفت کوره (هزار لیتر) Fuel oil (1000 Lit)			
سیکل ترکیبی گیلان Combined cycle of Guilan	9	1306	1186	80680910	181385	304580	1496324	0	8035	1832	46.90
سیکل ترکیبی پره سر Combined cycle of Parehsar	3	968	902	5330560	106611	235646	955551	0	—	1836	46.80
شهید بهشتی لوشان Shahid Beheshti of Loshan	4	360	336	1484634	86809	36553	437516	0	—	2956	29.85

نقطه نیاز به منبع آبی

در شکل ۴ نیاز آبی منطقه مورد مطالعه با در نظر گرفتن تلفات و استفاده مجدد در دو حالت بدون در نظر گرفتن رویکرد پیوندی و با در نظر گرفتن آن به صورت متوسط ماهانه درازمدت (۶۲ سال؛ ۲۰۱۴-۲۰۷۵) آورده شده است. لازم به ذکر است که این مقادیر مجموع تقاضاها به منابع آبی را نشان می‌دهد و الزاماً تمام مقادیر نیاز برآورد شده توسط نرم‌افزار، تامین نمی‌شوند و میزان برآورده شدن هر کدام از نیازها به مقدار منابع موجود منطقه بستگی دارد، در حقیقت با توجه به مقدار منابع موجود در منطقه کمبود مصارف مشخص خواهد شد.

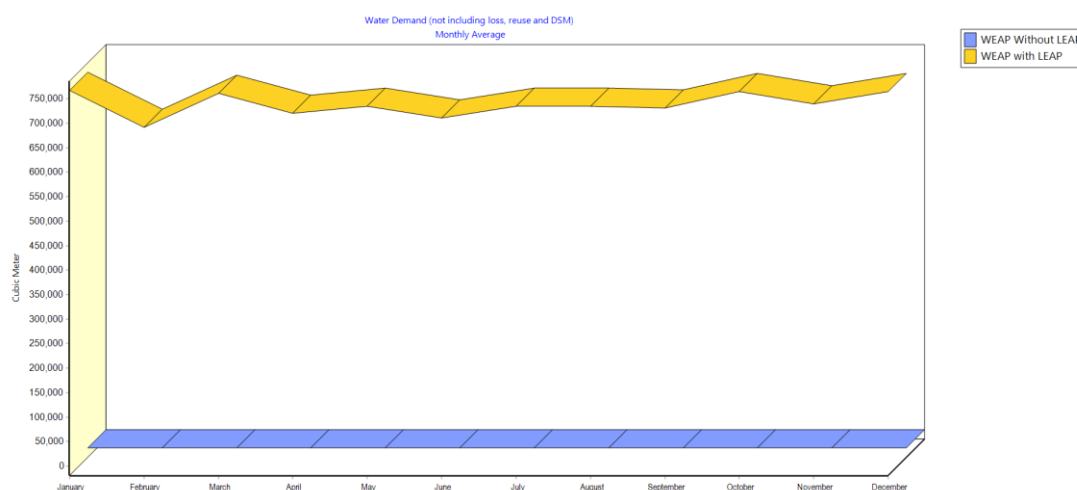
شکل ۳ نیز میزان تغییرات نیاز خالص آب سالانه به متر مکعب در محدوده مطالعاتی نسبت به سناریو بدون در نظر گرفتن رویکرد پیوندی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن رویکرد پیوندی در مدیریت یکپارچه منابع آب، نیاز خالص به آب در همه ماه‌های سال افزایش داشته و تغییرات این افزایش نیز در شکل ۳ آورده شده است.

جدول ۵، مقادیر نیاز خالص آب به میلیون متر مکعب در سال را برای همه گره‌های نیاز در طولانی مدت (تا سال ۲۰۲۰) را نشان می‌دهد. همانطور که نتایج این مدل ترکیبی نشان می‌دهد، اختلاف زیادی در دو مدیریت منابع آب با رویکرد پیوندی و غیر پیوندی وجود دارد.



شکل ۲- متوسط ماهانه درازمدت نیاز خالص آب (میلیون متر مکعب) همه گره‌های نیاز تحت سناریو مرجع (بدون در نظر گرفتن دیدگاه پیوندی)

Figure 2- Long-term average monthly net water requirement (million cubic meters) All required nodes under the reference scenario (regardless of nexus perspective)



شکل ۳- تفاوت نیاز خالص آب با در نظر گرفتن رویکرد پیوندی و بدون در نظر گرفتن رویکرد پیوندی (متر مکعب)

Figure 3- Difference of net water requirement by considering the linkage approach, regardless of the linkage approach (cubic meter)

جدول ۵- نیاز خالص سالانه (میلیون متر مکعب) همه گره‌های نیاز در محدوده مطالعاتی تا ۲۰۲۰

Table 5- Annual net water requirement (MCM) all demand nodes in the study range up to 2020

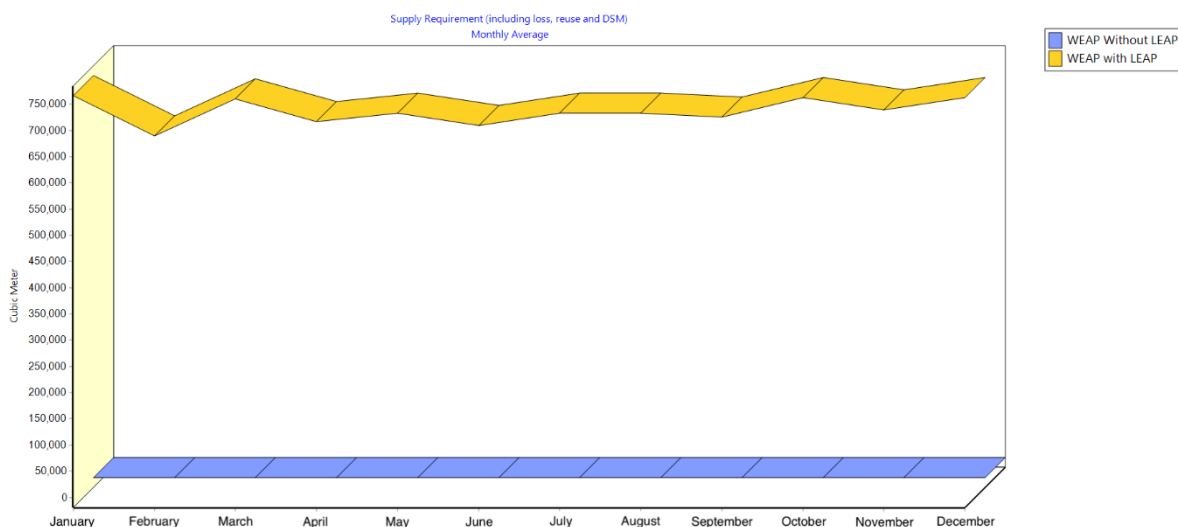
	2016	2017	2018	2019	2020
بدون رویکرد پیوندی Without Nexus approach	2113.026	1819.634	2136.954	2050.667	2275.556
با رویکرد پیوندی With Nexus approach	2121.670	1828.291	2145.952	2059.421	2284.292

لحاظ کردن مقدار تلفات و استفاده مجدد، در مقایسه با حالت اول مدل‌سازی، یعنی بدون در نظر گرفتن نیازهای نیروگاه حرارتی شهید بهشتی لوشان و سیکل ترکیبی رشت که مشترکا از منابع آبی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود استفاده می‌کنند، قابل ملاحظه است. همچنین نتایج بیان شده در جدول ۷، تفاوت مقدار آب عرضه شده سالانه به شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود را تحت دو سناریو و برای پنج سال بیان می‌کند.

در جدول ۶ مقدار آب تحویلی به شبکه و مقدار نیاز شبکه به منبع آبی تحت دو سناریو آورده شده است. طبق نتایج، همه ساله به طور متوسط مقدار نیازهای آبی برآورد شده در شبکه ۱۳۳ میلیون متر مکعب بیشتر از توان برآورده شدن نیازهای آبی در منطقه است. این تفاوت گویای کمبود سالانه آب در مصارف گوناگون شبکه است.

آب عرضه شده

در شکل ۵ مقدار متوسط ماهانه درازمدت آب تحویلی به شبکه، با



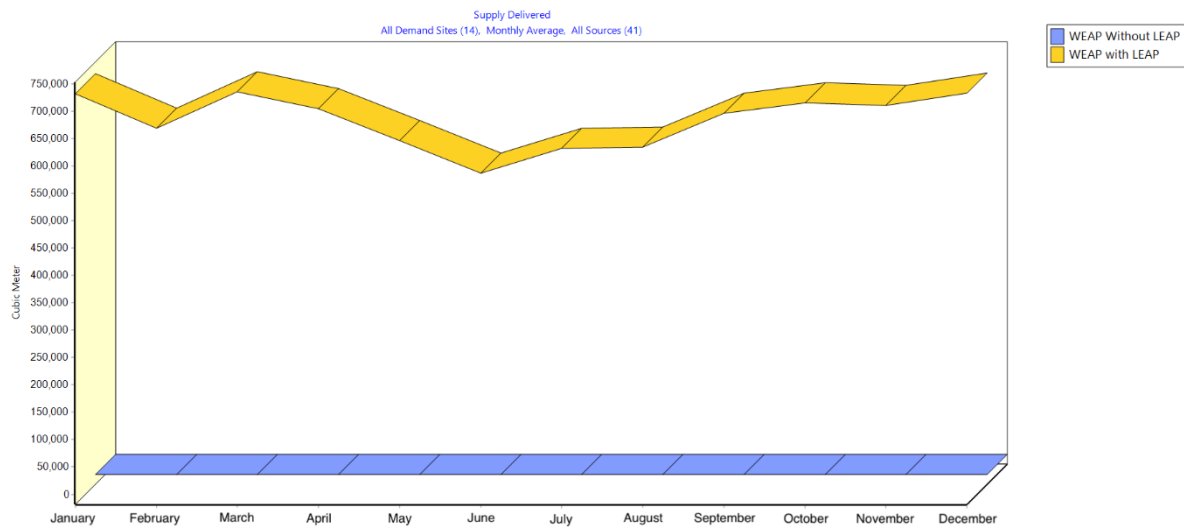
شکل ۴- تفاوت نیاز به منابع آبی شبکه در مقایسه با حالت در نظر نگرفتن بخش انرژی

Figure 4- The difference between the water requirement of the network and the non-energy sector

جدول ۶- مقادیر آب تحویلی و نیاز شبکه به صورت متوسط دراز مدت ۲۰۱۴-۲۰۷۵ (مقادیر به میلیون متر مکعب)

Table 6- The values of delivered water and the requirement of network for medium-long term 2014-2014 (MCM)

کل آب تحویلی به شبکه Total water delivered to the network	بدون رویکرد پیوندی Without Nexus approach	1603.188
	با رویکرد پیوندی With Nexus approach	1611.700
مقدار نیاز شبکه به منبع آبی Water demand	بدون رویکرد پیوندی Without Nexus approach	1736.206
	با رویکرد پیوندی With Nexus approach	1744.718

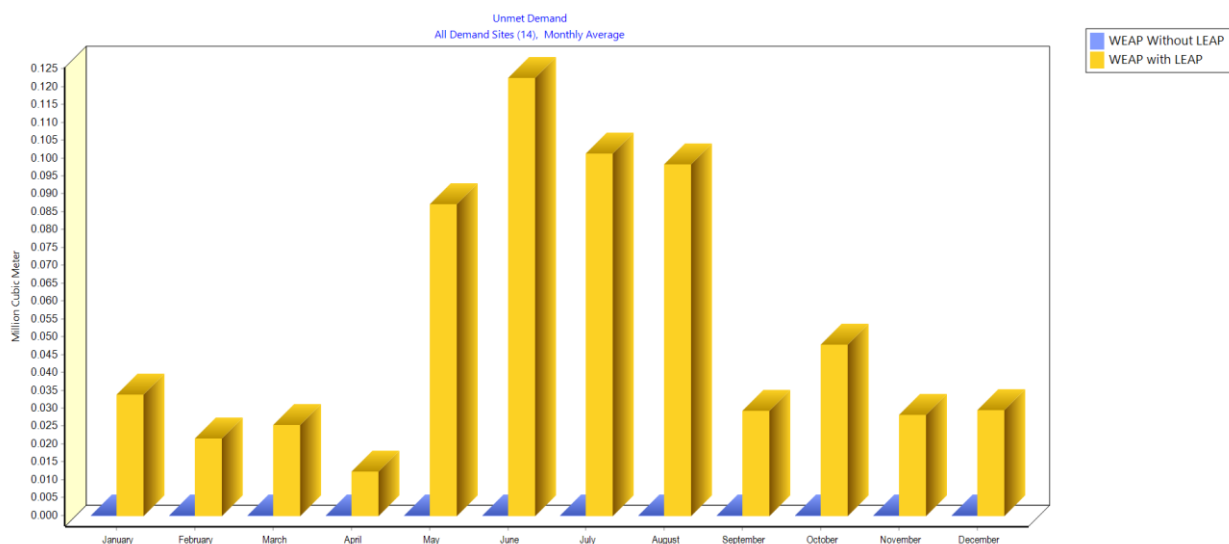


شکل ۵- تفاوت آب عرضه شده در مقایسه با حالت در نظر نگرفتن بخش انرژی
Figure 5- Difference of supplied water compared to non-consideration of the energy sector

جدول ۷- مقدار آب عرضه شده سالانه (میلیون متر مکعب)

Table 7- Annual Water Supply (MCM)

	2016	2017	2018	2019	2020
بدون رویکرد پیوندی Without Nexus approach	1349.7	1225.8	1275.1	1218.6	1399.6
با رویکرد پیوندی With Nexus approach	1358.4	1234.5	1283.7	1222.4	1407.5



شکل ۶- تفاوت نیاز برطرف نشده در مقایسه با حالت در نظر نگرفتن بخش انرژی
Figure 6- The difference of unmet demand compared to non-energy sector

برطرف نشده منطقه مورد مطالعه با در نظر گرفتن رویکرد پیوندی و بدون آن است. همانطور که مشاهده می‌شود زمانی که رویکرد

تقاضای بر طرف نشده
شکل ۶ نشان‌دهنده تفاوت در متوسط ماهانه دراز مدت نیازهای

نظر گرفتن بخش انرژی در مدل سازی، آب کمتری در سد مخزنی وجود خواهد داشت و بخشی از آب به مصرف نیروگاه شهید بهشتی لوشان برای خنک سازی و سایر مصارف می رسد. تغییرات ماهانه آب حجم آب پشت سد نشان دهنده تفاوت در آورد ورودی به سد در ماه های سال است.

تبخیر و تعرق واقعی و آبیاری

شکل ۷ نشان دهنده تفاوت تبخیر و تعرق تحت دو سناریوی در نظر گرفتن رویکرد پیوندی و بدون آن است. با توجه به اینکه این تفاوت در فصل های کشاورزی افزایش می یابد می توان چنین استناد کرد که در حالت بدون رویکرد پیوندی به دلیل اینکه آب بیشتری در دسترس اراضی کشاورزی قرار می گیرد، تبخیر و تعرق بیشتری نیز صورت می گیرد.

نتیجه گیری

به منظور بررسی اثر رویکرد پیوندی آب، انرژی و غذا، شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود واقع در استان گیلان در دو نرم افزار WEAP و LEAP تا افق ۲۰۷۵ مدل شدند. از این رو داده های اقلیمی، اطلاعات گره های نیاز و منابع آب در مدل WEAP و اطلاعات مربوط به انرژی های تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر در مدل LEAP وارد شدند. مدل پیوندی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود با هدف بررسی اثر رویکرد پیوندی واسنجی گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که با در نظر گرفتن این رویکرد در مدیریت منابع آب تفاوت معناداری در تخصیص و تأمین منابع وجود خواهد داشت که در مدیریت غیر پیوندی رایج (آب و غذا) این تفاوت ها دیده نشده است.

پیوندی و یا به عبارتی بخش انرژی در ارتباطات مابین منابع در نظر گرفته می شود، کمبود آب بیشتری وجود دارد. کمبود آب در ماه های کشت برنج به اوج خود می رسد. از آنجایی که بیشترین مصرف کننده آب در این منطقه کشاورزی است.

در جدول ۸ مقدار کمبود آب در بخش کشاورزی نواحی فومنات، مرکزی و شرق با در نظر گرفتن رویکرد پیوندی و بدون آن و به صورت میانگین ماهانه دراز مدت برای هر یک از نواحی آورده شده است. قابل مشاهده است که کمبود آب بیشتری در حالت در نظر گرفتن انرژی وجود دارد و ناحیه مرکزی به عنوان بزرگترین و طولی ترین ناحیه عمرانی، بیشترین کمبود را در مقایسه با سایر نواحی داراست.

جدول ۸- مقدار کمبود آب به صورت میانگین ماهانه دراز مدت در مقایسه با حالت در نظر گرفتن بخش انرژی (مقادیر برحسب میلیون متر مکعب)

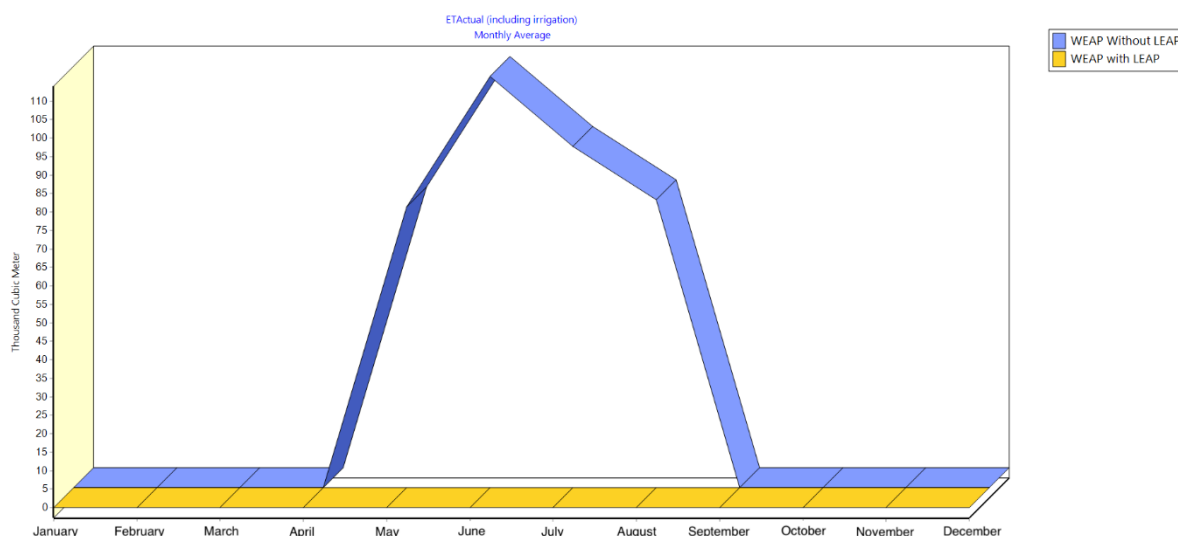
کشاورزی Agriculture			
مصرف کننده Consumer	فومنات Foumanat	مرکزی Central	شرق East
بدون رویکرد پیوندی Without Nexus approach	55.798	136.176	117.571
با رویکرد پیوندی With Nexus approach	55.811	136.431	117.680

حجم مخازن

جدول ۹ نشان دهنده مقادیر میانگین ماهانه طولانی مدت حجم آب ذخیره شده در مخزن سد سفید رود است. قابل ملاحظه است با در

جدول ۹- تغییرات ماهانه حجم آب ذخیره شده در مخزن سد سفیدرود به صورت میانگین دراز مدت (میلیون متر مکعب)
Table 9- Monthly changes in the storage volume of the Sefidrud Dam as a long-term average (MCM)

سناریو Scenario	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
بدون رویکرد پیوندی Without Nexus approach	1161.1	1152.5	1149.9	1122.2	1141.8	1163.5	1225.9	1286.5	1294.2	1272.7	1164.5	1169
با رویکرد پیوندی With Nexus approach	1159.7	1151	1145.4	1120.6	1140.2	1161.9	1225	1285.7	1293.5	1272.2	1163.5	1167.7



شکل ۷- تفاوت مقادیر تبخیر و تعرق در دو رویکرد پیوندی (در نظر گرفتن انرژی) و بدون رویکرد پیوندی (بدون در نظر گرفتن انرژی)
Figure 7- Difference between evapotranspiration values in both Nexus (energy considerations) and without Nexus (without energy)

دیگر در صورت نگهداری آب و رهاسازی کمتر آب و به تبع آن تولید کمتر انرژی الکتریسیته، نیاز تأمین انرژی بر عهده نیروگاه‌های غیرتجدیدپذیر خواهد بود که خود به نوعی مصرف‌کننده آب به منظور تولید انرژی هستند. از این رو بررسی مدیریت پیوندی امری مفید و در مواردی نیز غیرقابل اجتناب است.

در نهایت برای تعیین بهترین رویکرد مدیریتی و ارائه آن به برنامه‌ریزان منابع آب منطقه پیشنهاد می‌شود که با توجه به مدل منابع و مصارف تهیه شده با رویکرد پیوندی آب، غذا و انرژی، سناریوهای مدیریتی مختلفی در راستای اهداف سد تعریف و مورد بررسی قرار گیرد. در تعریف این سناریوها بهتر است علاوه بر برنامه ریزی آبیاری اراضی کشاورزی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود، ظرفیت رودخانه‌ها و سدهای تنظیمی و انحرافی پایین‌دست سد مخزنی سفیدرود نیز تعیین شود.

این نتیجه بیانگر این واقعیت است که بخش قابل توجهی از نیازها و مصارف در مدیریت رایج منابع آب (دیدگاه غیرپیوندی) در نظر گرفته نمی‌شود، این در حالی است که هر چه مقادیر عرضه و تقاضا به واقعیت نزدیکتر باشد، برنامه‌های مدیریتی منابع آب منطقی‌تر و در صد اجرای آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. در منطقه مورد مطالعه این پژوهش، یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار در تفاوت مدیریت پیوندی و غیرپیوندی وجود سد سفیدرود است که علاوه بر هدف تأمین آب کشاورزی پایین‌دست، دارای هدف تولید انرژی برقابی نیز می‌باشد. در راستای تأمین هدف برقابی، حجمی از آب ذخیره‌شده سد برای تولید انرژی موردنیاز منطقه رهاسازی می‌شود. در حالی که حجم ذخیره سد مخزنی در ماه‌های خشک توانایی تأمین نیاز کشاورزی اراضی زیرکشت پایین‌دست سد را ندارد و کشاورزان برای تأمین آب موردنیاز اراضی خود به برداشت منابع آب زیرزمینی روی خواهند آورد که برداشت از این منابع نیز مستلزم مصرف انرژی است. از طرف

منابع

- 1- The World Bank IEG. 2010. The Global Water Partnership 4(3).
- 2- Pourmohamad Y., Alizadeh A., Mousavi Baygi M., Gebremichael M., Ziaei A.N., and Bannayan M. 2019. Optimizing cropping area by proposing a combined water-energy productivity function for Neyshabur Basin, Iran. *Agricultural Water Management* 217: 131–140.
- 3- Hettiarachchi H., and Ardakanian R. 2016. Environmental Resource Management and the Nexus Approach: Managing Water, Soil, and Waste in the Context of Global Change. Dresden, Germany.
- 4- Kaddoura S., and El Khatib S. 2017. Review of water-energy-food Nexus tools to improve the Nexus modelling approach for integrated policy making. *Environmental Science & Policy* 77: 114–121.
- 5- Mahdavi Moghadam M. 2016. Investigation of Water, Energy and Food Nexus in Integrated. K. N. Toosi University of Technology. (In Persian with English abstract)
- 6- Zhang X., and Vesselinov V.V. 2016. Energy-water nexus: Balancing the tradeoffs between two-level decision makers. *Applied Energy* 183: 77–87.

- 7- Font Vivanco D., Wang R., and Hertwich E. 2018. Nexus strength: A novel metric for assessing the global resource nexus. *Journal of Industrial Ecology* 22(6): 1473–1486.
- 8- Karatayev M., Rivotti P., Mourão Z.S., Konadu D.D., Shah N., and Clarke M. 2017. The water-energy-food nexus in Kazakhstan: challenges and opportunities. *Energy Procedia* 125: 63–70.
- 9- Oki T., and Kanae S. 2006. Global hydrological cycles and world water resources. *Science* 313 (5790): 1068–1072.
- 10- Karlberg L., Hoff H., Amsalu T., Andersson K., Binnington T., Flores-López F., Bruin A., Gebrehiwot S. G., Gedif B., Heide F., Johnson O., Osbeck M., and Young C. 2015. Tackling complexity: Understanding the food-energy-environment nexus in Ethiopia's Lake Tana Sub-basin. *Water Alternatives* 8(1): 710–734.
- 11- Pan B., Sun L., Lu H., Wang W., and Gu A. 2017. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93: 27–34.
- 12- Assaf H., and saadeh M. 2008. Environmental Modelling, Software and Decision Support. *Developments in Integrated Environmental Assessment* 3: 229–246.
- 13- Stockholm Environment Institute, *WEAP- TUTORIAL* Water Evaluation And Planning System, no. August. 2016.
- 14- Sieber J., and Purkey D. 2007. User guide for WEAP21. Stockholm Environment Institute.
- 15- Heaps C.G. 2012. Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system. [Software version 2012.0016] Stockholm Environment Institute, Somerville, MA, USA.
- 16- Salahi-Moghaddam A., Habibi-Nokhandam M., and Fuentes M.V. 2011. Low-altitude outbreaks of human fascioliasis related with summer rainfall in Gilan province, Iran. *Geospatial Health* 133–136.
- 17- Mardani Z., Ghorashi M., Arian M., and Khosrotehrani K.H. 2011. Geomorphic Signatures of Active Tectonics in the Talaghan Rud, Shah Rud and Sefidrud Drainage Basins in Central Alborz, N Iran.
- 18- Hajiabadi R., and Zarghami M. 2014. Multi-objective reservoir operation with sediment flushing; case study of Sefidrud reservoir. *Water Resources Management* 28(15): 5357–5376.
- 19- Hadizadeh F., Allahyari M.S., Damalas C.A., and Yazdani M.R. 2018. Integrated management of agricultural water resources among paddy farmers in northern Iran. *Agricultural Water Management* 200:19–26.
- 20- The Statistical Centre of Iran. 2016. [Online]. Available: <https://www.amar.org.ir/>. [Accessed: 05-Jan-2019].
- 21- Sayyidrud Consulting Engineers Company Guilan, Determine per capita water consumption, Rasht, 1392.
- 22- Office of operation and maintenance of irrigation and drainage networks, Water Resources in Sefidrud Irrigation and Drainage Network, Gilan Regional Water Authority, Rasht, 2017.
- 23- Research and Human Resources Department. 2013. Detailed statistics of Iran's power industry, Tavanir Organization, Tehran, p. 156.
- 24- Zafarnejad F. 2009. The contribution of dams to Iran's desertification. *International Journal of Environmental Studies* 66(3): 327–341.



Water, Energy, Food Nexus Approach Impact on Integrated Water Resources Management in Sefid-Rud Irrigation and Drainage Network

Z. Eslami¹ - S. Janatrostami^{2*} - A. Ashrafzadeh³ - Y. Pourmohamad⁴

Received: 24-07-2019

Accepted: 20-01-2020

Introduction: Implementing Integrated Water Resources Management requires balancing conflicting goals, and the effects on developing countries, which have a poor institutional capacity for change, and suggests a slower pace of integrated water resources management. The growing population of the world, especially in developing countries on one hand, and the need to provide food for this population, on the other hand, have not been the result of overreaching of resources. In this manner, the continuation of an untapped harvest of resources will endanger the sustainability of the region in the near future. Food production is largely depending on the water so that 70 to 80 percent of the water extracted from resources is consumed for irrigation, which is the reason why irrigated cultivation is regarded as inefficient consumers. Understanding how to extract, manage and consume water is the key to solve this problem. On the other hand, the health and safety of communities and agricultural production require energy. Principally in irrigation, it is not possible to extract water without consuming energy. Seeking to establish the goals of the third millennium of the United Nations, researchers have presented a variety of interdisciplinary approaches to achieve a dynamic balance in the food production and consumption of resources, most notably the approach of Water, Energy and Food (WEF) Nexus. Considering the limitation of the resources which is increasing day by day. This approach causes productivity increase by integrating water, energy and food cycles. Managing water, energy and food, despite the inherent systemic differences, are very similar, due to the close relationship between the system perspective and their interaction with each other, a new concept is now called a Nexus approach. This viewpoint describes the interconnected nature and the interplay of the three sectors.

Materials and Methods: This research was carried out in Sefid-Rud dam Irrigation and Drainage Network. Sefid-Rud basin is located in the Guilan province, which is benefits from high precipitation, but factors such as dams construction in the upper reaches of the Sefid-Rud dam, the timely inconvenient precipitation and the lack of infrastructure to harvest the runoff, causes water shortages in the area. It is worth mentioning that 50% of the Guilan households have engaged in rice cultivation and more than 70% of the lands are located in the irrigation and drainage network of the Sefid-Rud dam. Hence, reducing rice cultivation in this region will have a great impact on economic and social life. Managing a Nexus approach to provide WEF security requires integrated and analytical approaches that can identify cross-sectoral exchanges, cost-effective planning, policy, and strategy management. Therefore, in this study, WEAP and LEAP software were used for managing water and food resources and managing the energy sector in Sefid-Rud irrigation and drainage network, respectively. Then, the integrated water resources management in the area was addressed by establishing a linkage between these two applications. In the first part of this study, the parameters output such as net water demand, water resources share for each demand node, unmet demand and the coverage regardless of the energy sector were compared.

Results and Discussion: The results reveal that the annual water requirement of the Sefid-Rud irrigation and drainage network in 2016 with the NEXUS approach estimated about 8 million cubic meters more than the non-NEXUS approach. Agriculture is the most water-consuming node in the region and there are lots of dependencies on rice cultivation as the most water-consuming crop in the Guilan region. The next step aims to balance the supply and demand, the unmet demand at the agricultural section in the Foomanat, Central and East areas under various management scenarios. These scenarios are including dredging, increase the efficiency of transmission and distribution channels of irrigation and drainage networks, and eliminating unauthorized wells were evaluated.

1, 2 and 3- M.Sc. Graduated in Water Resources Engineering, Assistant Professor and Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Agricultural Sciences, University of Guilan, respectively.

(*- Corresponding Author Email: janatrostami@guilan.ac.ir)

4- Ph.D. Graduated in Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering and Sciences, Ferdowsi University of Mashhad

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.81897

Conclusion: By examining the results of the applied management scenarios mentioned above, the 30% increase in the efficiency of transmission and distribution channels of irrigation and drainage networks in Sefid-Rud has the greatest impact on meeting the demand and reducing the unmet demands of triple areas. As a result of the 30% efficiency improvement scenario, decrease the agricultural demands of the Foomanat area, the central area, and the east (about 29.1, 84.5 and 62.1 million cubic meters, respectively) more than the reference scenario.

Keywords: Guilan province, Integrated Management, Nexus Approach, LEAP, WEAP



ارزیابی روش‌های مختلف مقیاس‌سازی معادله نفوذ فیلپ

محمد طاهر پوزن^۱ - محمد مهدی چاری^{۲*} - پیمان افراسیاب^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۵

چکیده

نفوذ آب به خاک یکی از مهم‌ترین پارامترها در آبیاری و کشاورزی است. تعیین تغییرپذیری مکانی فرآیند نفوذ در خاک با وجود دشواری زیاد، یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای دستیابی به کشاورزی دقیق است. هدف از مطالعه حاضر، مقیاس‌سازی پارامترهای معادله نفوذ دو جزئی فیلپ و تجزیه و تحلیل تنوع مکانی ویژگی‌های نفوذپذیری، با استفاده از حداقل اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای بود. در این تحقیق یک روش جدید برای مقیاس‌سازی معادله نفوذ ارائه شد و با روش‌های قبلی مقیاس‌سازی معادله فیلپ شامل: بر اساس ضریب جذب (α_s)، بر اساس ضریب انتقال (α_A)، بر اساس فاکتور بهینه به دست آمده با استفاده از کمترین مربعات خطا (α_{opt})، میانگین‌های هندسی، حسابی و هارمونیک مقایسه شد. برای این منظور از ۲۲ آزمایش نفوذ استفاده شد. پارامترهای این مدل (ضریب جذب S و فاکتور انتقال A) تغییرات وسیعی در مکان‌های آزمایشی نشان دادند. در روش جدید عامل مقیاس (F_s) برای هر معادله نفوذ برابر با عمق آب نفوذ کرده پس از زمان مشخص (t_s) در معادله نفوذ مورد نظر به عمق آب نفوذ کرده پس از زمان مشخص در معادله نفوذ مرجع است. نتایج نشان داد که روش ارائه شده در این تحقیق دارای بالاترین مقدار R^2 (۰/۹۹) و دارای کمترین مقدار خطا بر اساس RMSE و MBE است. برخلاف سایر روش‌های مقیاس‌سازی معادله نفوذ، منحنی مرجع در روش جدید اختیاری بوده و هریک از معادله‌های نفوذ را می‌توان به عنوان منحنی مرجع انتخاب کرد.

واژه‌های کلیدی: ضریب انتقال، ضریب جذب، مقیاس‌سازی، نفوذ

مقدمه

ویژگی‌های خاک باعث تغییرات زمانی و مکانی ظرفیت نفوذ خاک در مقیاس مزرعه (۳، ۶، ۲۰ و ۲۷) و مقیاس ناحیه می‌شود (۱۵ و ۳۸). از آنجایی که ویژگی‌های نفوذ تابعی از زمان و مکان بوده در نتیجه به تعداد نسبتاً زیادی اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای نیاز است تا بیانی از متوسط شرایط مزرعه باشد (۲). همچنین مشکل اساسی برای مدل سازی نفوذ در حوضه‌های آبریز، چگونگی بیان تغییرپذیری مکانی خاک است. مطالعات پیشین نشان داده است که تغییرپذیری مکانی اراضی منجر به تغییرپذیری زیاد رفتار نفوذ آب به خاک می‌شود (۳۴) و (۳۸). در سال‌های اخیر پژوهشگران روش‌هایی را برای کاهش نیاز به اندازه‌گیری داده‌های مزرعه‌ای و ناحیه‌ای مورد نیاز برای بیان مشخصات پویایی آب در خاک ارائه کرده‌اند. یکی از این روش‌ها مقیاس‌سازی می‌باشد که اولین بار توسط میلر و میلر (۱۷) با تکیه بر نظریه‌ی محیط‌های متشابه در دانش آب و خاک ظهور یافت (۲۵).

تحقیقات مقیاس‌سازی در زمینه نفوذ شامل سه دسته است. دسته اول شامل مقیاس‌سازی برای خاک‌های یکنواخت هستند (۱۳، ۲۶ و ۳۷). واریک و حسین (۳۷) با استفاده از تکنیک مقیاس‌سازی، معادله ریچاردز را برای فرآیند نفوذ و زهکشی مقیاس‌سازی نمودند. در تحقیقی دیگر، روشی برای مقیاس‌سازی معادله ریچاردز در شرایط

توزیع مکانی خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک بر رفتارهای هیدرولوژیکی، انتقال رسوب و آب به آب‌های سطحی و زیرسطحی مؤثر می‌باشد. سرعت نفوذ بیشترین تغییرات مکانی را در بین خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک دارد (۳۱). اهمیت فرآیند نفوذ منجر به توسعه چندین مدل برای پیش‌بینی نفوذ شده است. برخی مدل‌هایی بر اساس ترسیم منحنی بین سرعت نفوذ و زمان تحلیل شده‌اند و خصوصیات فیزیکی خاک را دربرمی‌گیرند مدل‌های تجربی نامیده می‌شوند (۸، ۹، ۱۲ و ۳۲) و برخی دیگر بر مبنای خصوصیات فیزیکی خاک بنا شده‌اند (۵ و ۲۲).

پارامترهای نفوذ معمولاً با استفاده از داده‌های آزمایشی "تک حلقه" یا "دو حلقه" تعیین می‌شود (۴). با این حال، تفاوت‌های

۱ و ۲ - به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل

* - نویسنده مسئول: (Email: m.mahdi.chari@gmail.com)

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.82567

توزیع مجدد ارائه شد، به نحوی که به شکل خاصی از توابع هیدرولیکی محدود نشود و امکان استفاده از همه مدل‌های ارائه شده برای توابع هیدرولیکی در حل معادله ریچاردز وجود داشته باشد (۲۴). صادقی و همکاران (۲۶) معادله ریچاردز را برای خاک‌های نامتشابه مقیاس کرده و پس از حل معادله ریچاردز مقیاس شده، معادله نفوذی مشابه معادله نفوذ سه جزیی فیلیپ برای فرآیند نفوذ آب در خاک ارائه کردند. نتایج نشان داد که معادله نفوذ ارائه شده با دقت خوبی فرآیند نفوذ آب در خاک را پیش‌بینی می‌کند. این موارد بیشتر برای خاک‌های یکنواخت کاربرد دارد و کمتر در شرایط مزرعه می‌توان از آن استفاده کرد.

دسته دوم شامل کاربرد مقیاس‌سازی در معادله‌های نفوذ به کاربرده شده در آبیاری سطحی است. رسول‌زاده و سپاسخواه (۲۳) با استفاده از آنالیز ابعادی و مقیاس‌سازی و داده‌های نفوذ شش سری خاک، یک رابطه عمومی قابل استفاده در آبیاری شیاری ارائه کردند. رابطه حاصل تابعی از محیط خیس شده و حجم آب ورودی به مزرعه بود. ارزیابی رابطه نفوذ مقیاس شده نشان داد که این رابطه برای سایر جویچه‌های دارای بافت و شرایط هیدرولیکی متفاوت قابل استفاده خواهد بود و مقدار نفوذ را با دقت بسیار مناسبی تخمین می‌زند. مطالعات رسول‌زاده و سپاسخواه (۲۳) درباره مقیاس‌سازی نفوذ، برای تعیین ضرایب نفوذ دارای پیچیدگی‌های زیادی است و نیاز به داده‌های اولیه زیادی دارد. به همین دلیل ختری و اسمیت (۱۰)، یک روش برآورد ضرایب نفوذ با استفاده از یک نقطه پیشروی و یک منحنی نفوذ مدل (نمونه) پیشنهاد نمودند. آنها یک فاکتور مقیاس برای هر یک از مزارع تعریف کردند و پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکوف-لوئیس را به دست آوردند. این روشی آسان برای استفاده و کاربرد در سطح مزرعه است که فقط به پیشروی در یک نقطه به علاوه شدت جریان و سطح مقطع جریان در ورودی شیاری نیاز دارد. روش مقیاس‌سازی ارائه شده به وسیله ختری و اسمیت (۱۰) برای تعیین زمان واقعی قطع جریان در آبیاری شیاری خودکار استفاده شد. در این روش با توجه به زمان رسیدن آب به وسط مزرعه و فرآیند مقیاس‌سازی پارامترهای نفوذ در آبیاری شیاری تعیین و پس از آن زمان قطع جریان بهینه تعیین شد (۱۱). نیو و همکاران (۱۸) با استفاده از فرآیند مقیاس‌سازی رابطه‌ای عمومی شبیه معادله کوستیاکوف برای نفوذ ارائه کردند. در این روش برای تعیین فاکتور مقیاس یک تابع انتقالی ارائه کردند که به درصد رس، درصد شن، چگالی ظاهری و درصد رطوبت اولیه بستگی داشت.

دسته سوم شامل مدل‌سازی تغییرات مکانی نفوذ در حوضه آبریز می‌باشد. شارما و همکاران (۲۸) از روش مقیاس‌سازی برای تعیین معادله نفوذ واحد در سطح حوضه استفاده نمودند و روشی را برای محاسبه پارامترهای معادله نفوذ دو جزیی فیلیپ ارائه دادند. ماچیوال و همکاران (۱۵) در تحقیقی با استفاده از استوانه مضاعف ۲۴ آزمایش

نفوذ در محدوده‌ای به وسعت ۶۶/۲ هکتار انجام دادند و عوامل مقیاس‌بندی بر اساس عامل انتقال و ضریب جذب محاسبه شد. نتایج نشان داد که عامل مقیاس‌بندی شده بر اساس عامل انتقال نتایج بهتری را نشان می‌دهد. بابایی و همکاران (۱) از مقیاس‌سازی برای مدل کردن تغییرات مکانی نفوذ در زمین‌های کشاورزی یک منطقه خشک در ایران استفاده شد. در این روش منحنی مرجع برابر با میانگین حسابی عامل انتقال و ضریب جذب برای ۶۰ نقطه اندازه‌گیری نفوذ در نظر گرفته شد و سپس عامل مقیاس برای هر یک از خاک‌ها با استفاده از شش روش مختلف به دست آمد. نتایج نشان دادند که فاکتور مقیاس به دست آمده با استفاده از روش کمترین مربعات خطا دارای بیشترین دقت است. در روش‌های بیان گردیده در این بخش چنانچه خاکی خارج از دایره داده‌های اولیه باشد نمی‌توان از منحنی مرجع و مقیاس‌سازی استفاده کرد.

منطقه سیستان واقع در جنوب شرق ایران یکی از مناطقی است که تغییرات مکانی خاک بسیار زیاد است. از طرفی بخش بسیار زیادی از اشتغال (حدود ۳۸٪) در این منطقه مربوط به بخش کشاورزی می‌باشد (۳۳). در سال‌های اخیر دولت اقداماتی را برای توسعه کشاورزی در این بخش انجام داده است. تعیین تغییرپذیری مکانی فرآیند نفوذ در خاک با وجود دشواری زیاد، یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای دست‌یابی به کشاورزی دقیق است. با توجه به اهمیت مدل‌سازی تغییرات نفوذ در مقیاس مزرعه و حوضه آبریز در این تحقیق یک روش جدید برای مدل کردن تغییرات مکانی نفوذ با استفاده از مقیاس‌سازی، بر اساس معادله نفوذ فیلیپ برای یک منطقه گرم و خشک توسعه یافت و با روش‌های موجود مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

خصوصیات منطقه مورد مطالعه و اندازه‌گیری نفوذ

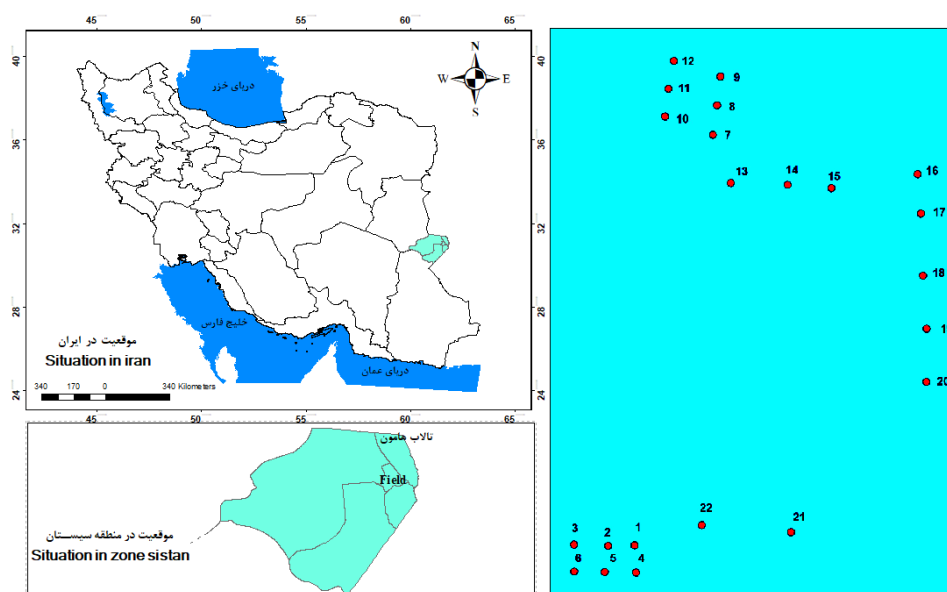
در این تحقیق از داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه آموزشی و پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه زابل واقع در استان سیستان و بلوچستان استفاده شد. این مزرعه آزمایشی در موقعیت جغرافیایی ۶۱ درجه و ۳۱ دقیقه شرقی و ۳۱ درجه و ۲ دقیقه شمالی قرار دارد و ارتفاع آن از سطح دریا ۴۸۱ متر می‌باشد. آب و هوای شهرستان زابل بر اساس طبقه‌بندی کوپن، جزء اقلیم‌های خشک و بسیار گرم با تابستان‌های گرم و خشک می‌باشد. براساس آمار ۳۰ ساله ایستگاه هواشناسی زابل، میانگین بارش سالانه این شهرستان ۵۹/۶ میلی‌متر و دمای آن در سال بین ۹/۵- تا ۴۹ درجه سانتی‌گراد متغیر است. همچنین میانگین حرارت سالانه ۲۲ درجه سانتی‌گراد و میزان تبخیر سالانه ۴۸۲۰/۵۴ میلی‌متر می‌باشد (۲۹). برای بدست آوردن پارامترهای معادله فیلیپ از روش استوانه مضاعف استفاده شده است. جزئیات این روش به وسیله (۹) ارائه شده است.

لومی_رسی، لومی_سیلتی، لومی_شنی، لومی_رسی_سیلتی و لومی_رسی_شنی بود. بیشترین درصد رس در خاک با بافت لومی_رسی_سیلتی با مقدار ۳۵/۶٪ و کمترین مقدار رس برابر با ۱۷/۴٪ در خاک با بافت لومی_شنی بود. بیشترین و کمترین مقدار سیلت به‌ترتیب بین ۵۲/۲٪ و ۱۸٪ در خاک‌های با بافت لومی_رسی_سیلتی و لومی_رسی_شنی است. و همچنین بیشترین و کمترین درصد شن به ترتیب ۵۸/۶٪ و ۱۴/۲۶٪ در خاک‌های با بافت لومی_شنی و لومی_رسی_سیلتی می‌باشد.

۲۲ مکان از منطقه به صورت تصادفی برای آزمایش‌های نفوذ انتخاب شد که مختصات محلی (UTM) هر نقطه در شکل ۱ نشان داده شده است. اندازه‌گیری‌ها در ماه ۱۳۹۷ انجام شد. نقاط مورد نظر در در سطح زمین‌های زراعی با پراکندگی مناسب مورد آزمایش قرار گرفتند.

درصد ذرات تشکیل دهنده خاک (بافت خاک)

جدول ۱ نتایج مربوط به بافت خاک ۲۲ آزمایش نفوذ را نشان می‌دهد. بافت‌های خاک در منطقه مورد مطالعه لومی،



شکل ۱- موقعیت نقاط مورد مطالعه

Figure 1- Position of the study area

جدول ۱- مشخصات خاک‌های استفاده شده در این تحقیق

Table 1- the properties of used soils in the study

بافت خاک Soil texture	تعداد Number	رس (درصد) Clay (%)		شن (درصد) Sand (%)		سیلت (درصد) Silt (%)	
		حداکثر Max	حداقل Min	حداکثر Max	حداقل Min	حداکثر Max	حداقل Min
لوم Loam	9	17.6	25.7	26.2	50.3	28	48
لوم رسی Clay loam	5	27.2	31.6	24.4	36.4	34	48
سیلتی لوم Silty loam	1	25.4	25.4	24.6	24.6	50	50
لوم رس سیلتی Silty clay loam	4	31.4	35.6	14.3	18.6	46	52
لوم شنی Sandy loam	2	17.4	19.4	56.6	58.6	24	24
لوم رس شنی Sandy clay loam	1	33.6	33.6	48.3	48.3	18	18

مدل فیلیپ

نتایج تحقیقات بسیاری از محققان نشان می‌دهد که مدل فیلیپ بهترین مدل تطبیقی نفوذ آب برای توصیف خصوصیات زمانی نفوذ برای هر خاک خاص است. این مدل به دلیل سهولت در تخمین پارامترها و اینکه می‌تواند زمان را به صورت تابع ضمنی از نفوذ تجمعی و بالعکس بیان کند، انتخاب شده است (۱۵). مدل نفوذ دوجزئی فیلیپ به صورت زیر بیان شده است (۲۲):

$$I = St^{0.5} + At \quad (۱)$$

در این رابطه I کل نفوذ آب (mm)، S (ضریب جذب آب، $mm/min^{0.5}$) و A (ضریب انتقال، mm/min) پارامترهای نفوذ می باشد.

مروری بر روش‌های موجود مقیاس‌سازی معادله فیلیپ

هدف اصلی مقیاس‌سازی، تعیین رابطه بین خواص هیدرولیکی خاک در یک مکان مشخص با خاک مرجع با استفاده از عوامل مقیاس است (۱). مقیاس‌سازی به طور وسیع در بررسی تغییرات خصوصیات خاک و خصوصیات هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفته است (۱۹، ۳۵ و ۳۶). میلر و میلر (۱۷) برای تخمین تغییرپذیری خاک‌ها، نظریه محیط‌های متشابه را معرفی نمودند. آنها فرض کردند که ساختار میکروسکوپی دو خاکی که از نظر هندسی متشابه هستند، تنها در یک نسبت‌هایی از یک طول مشخصه فیزیکی فرق می‌کنند. بر اساس تحلیل بی‌بعد کردن، پارامترهای مدل دو جمله‌ای فیلیپ، S (ضریب جذب آب) و A (عامل انتقال) توسط (۲۱ و ۲۲) مقیاس شد به طوری که:

$$\frac{S_j}{\lambda_j^{1/2}} = \frac{S_r}{\lambda_r^{1/2}} \quad (۲)$$

و

$$\frac{A_j}{\lambda_j^{1/2}} = \frac{A_r}{\lambda_r^{1/2}} \quad (۳)$$

در این رابطه پارامتر λ طول مشخصه‌ای از خصوصیات خاک منطقه است و زیرنویس r شماره نقطه‌های مورد آزمایش است که در این پژوهش ۲۲ نقطه بودند و زیرنویس j شماره نقطه‌ای است که به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است (متوسط خصوصیات آب و خاک). اگر از فرضیه محیط‌های متشابه درست استفاده شود، آنگاه λ در معادله ۲ و ۳ دارای مقادیر یکسانی خواهند شد. عامل مقیاس بدون بعد α به این صورت تعیین می‌شود که:

$$\alpha_j = \frac{\lambda_j}{\lambda_r} = \frac{\lambda_j}{\lambda} \quad (۴)$$

در این رابطه $\bar{\lambda}$ طول مشخصه خاک مرجع با در نظر گرفتن

متوسط خصوصیات خاک و برای هر خاک عامل مقیاس دارای واحد یکسانی است. با استفاده از معادله‌های (۲) و (۳) عامل مقیاس بدون بعد α_S و α_A ، برای S و A و معادله‌های نفوذ مختلف با استفاده از معادله‌های زیر به دست آمد:

$$\alpha_{S_j} = \left(\frac{S_j}{S}\right)^2 \quad (۵)$$

$$\alpha_{A_j} = \left(\frac{A_j}{A}\right)^{1/2} \quad (۶)$$

در این رابطه $\bar{S}$ متوسط ضریب جذب آب و $\bar{A}$ متوسط ضریب انتقال است (۱، ۱۵ و ۲۸).

منحنی نفوذ تجمعی (I_t) می‌تواند با استفاده از (α_S) و (α_A) به وسیله معادله‌های زیر مقیاس شود (۲۸):

$$I^* = \alpha I \quad (۷)$$

$$t^* = \alpha^3 t \quad (۸)$$

در این رابطه‌ها، I^* و t^* به ترتیب نفوذ تجمعی و زمان مقیاس شده هستند و α فاکتور مقیاس است و می‌تواند هر یک از فاکتورهای مقیاس α_S ، α_A و میانگین‌های حسابی (α_m)، هندسی (α_G) و هارمونیک (α_H) باشد که براساس آن، نفوذ و زمان مقیاس‌بندی می‌شود.

اگر نفوذ را بتوان در هر مکان به طور مناسب با مدل دو جزئی فیلیپ تقریب زد (رابطه ۱) و شرایط محیط کاملاً متشابه باشد، خصوصیت نفوذ همه مکان‌ها در شکل مقیاس‌بندی شده باید به صورت رابطه (۹) توصیف شود:

$$I^* = \bar{S} t^{*1/2} + \bar{A} t^* \quad (۹)$$

فاکتورهای مقیاس‌بندی همچنین با استفاده از بهینه‌سازی آماری محاسبه شده است. با استفاده از روابط (۷) و (۸)، فاکتور مقیاس‌بندی بهینه (α_{opt}) برای هر آزمایش نفوذ با حداقل کردن تفاضل مجموع مربعات خطا (SSE)، بین نفوذ مقیاس‌بندی شده (I^*) و نفوذ میانگین ($\bar{I}$) بر پایه $\bar{S}$ و $\bar{A}$ با رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$SSE = \sum_{t_j} (I_{t_j}^* - \bar{I}_{t_j})^2 \quad (۱۰)$$

که در آن، مجموع همه مقادیر t_j^* ، کل زمان آزمایش نفوذ را در برمی‌گیرد و اندیس j بازه‌های زمانی در هر آزمایش نفوذ را مشخص می‌کند.

روش پیشنهادی

در این تحقیق یک روش ساده و جدید برای مقیاس‌سازی معادله فیلیپ ارائه شد. در این روش، ابتدا پارامترهای معادله نفوذ میانگین منحنی نفوذ مرجع (I_{Ref}) نامیده می‌شود مشخص می‌شود. چنانچه برای سایر نقاط آزمایش، عمق آب نفوذ کرده برای یک زمان

نتایج و بحث

تخمین پارامترهای مدل نفوذ

داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف به مدل فیلپ برازش شد و با روش حداقل مربعات، پارامترهای مدل S و A به دست آمد. مقدار پارامتر ضریب جذب آب (S) $(\text{mm}/\text{min}^{0.5})$ بین $4/44$ و $9/44$ و مقدار پارامتر ضریب انتقال (A) $(\text{mm}/\text{min}^{0.5})$ بین $0/01$ و $0/15$ متغیر بود که به تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک در منطقه مورد مطالعه اشاره دارد. شکل ۲، رابطه بین ضریب جذب آب (S) و ضریب انتقال (A) را نشان می‌دهد. ضریب تبیین $R^2 = 0/09$ نشان‌دهنده‌ی رابطه ضعیف بین پارامتر (S) و (A) می‌باشد. بابایی و همکاران (۱) و مهرابی و سپاسخواه (۱۶) نشان دادند که رابطه معنی‌داری بین ضریب جذب و ضریب انتقال وجود ندارد. همچنین تالسا (۳۰) رابطه بین ضریب جذب و هدایت هیدرولیکی اشباع ضعیف بیان کردند. در حالی که ماچیوال و همکاران (۱۵) و شارما و همکاران (۲۸) تمایل به افزایش مقدار S با افزایش مقدار A را گزارش کرده‌اند.

مقیاس‌بندی پارامترهای مدل

با استفاده از داده‌های ۲۲ سری اندازه‌گیری مقادیر S و A در مکان‌های آزمایشی، مقدار پارامترهای منحنی مرجع (میانگین) محاسبه شد. منحنی‌های نفوذ با استفاده از روش‌های مختلف مقیاس بندی شدند. شکل ۳، منحنی نفوذ مقیاس شده را بر اساس فاکتورهای مقیاس F_{si} و $\alpha_{opt}, \alpha_H, \alpha_G, \alpha_m, \alpha_A, \alpha_S$ نشان می‌دهد. نقاط مقیاس بندی شده بر اساس α_S بیشتر در زیر منحنی میانگین قرار دارد، در حالی که مقیاس بندی بر اساس (α_A) ، رابطه معنی را نسبت به منحنی نفوذ میانگین نشان نمی‌دهد.

مشخص (t_s) (که در این تحقیق از عمق آب نفوذ کرده پس از ۴ ساعت استفاده شد) به دست آید، عامل مقیاس (F_s) بدون بعد) برابر با عمق آب نفوذ کرده پس از زمان مشخص (t_s) در نوار مورد نظر به عمق آب نفوذ کرده پس از زمان مشخص در نوار مرجع خواهد بود:

$$F_{si} = \frac{I_i}{I_{Ref}} = \frac{S_i t_s^{0.5} + A_i t_s}{S_r t_s^{0.5} + A_r t_s} \quad (11)$$

در این رابطه F_{si} فاکتور مقیاس مربوط به هر واقع آبیاری، I_i ($i=1, 2, \dots, n$) عمق آب نفوذ کرده پس از یک زمان مشخص (t_s) برای هر بار آبیاری (در این تحقیق برابر با ۲۴۰ دقیقه در نظر گرفته شد) و I_{Ref} عمق آب نفوذ کرده پس از زمان مشخص در نوار مرجع، S_r و A_r پارامترهای معادله نفوذ میانگین تحت عنوان منحنی مرجع هستند. در نتیجه، مقدار نفوذ مقیاس شده (I_s) برای هر یک از نقاط مورد آزمایش برابر است با:

$$I_s = F_s (S t^{0.5} + A t) \quad (12)$$

و همچنین پارامترهای نفوذ مقیاس شده $(S_{si}$ و $A_{si})$ برای هر نقطه (واقع آبیاری) به صورت زیر می‌باشد:

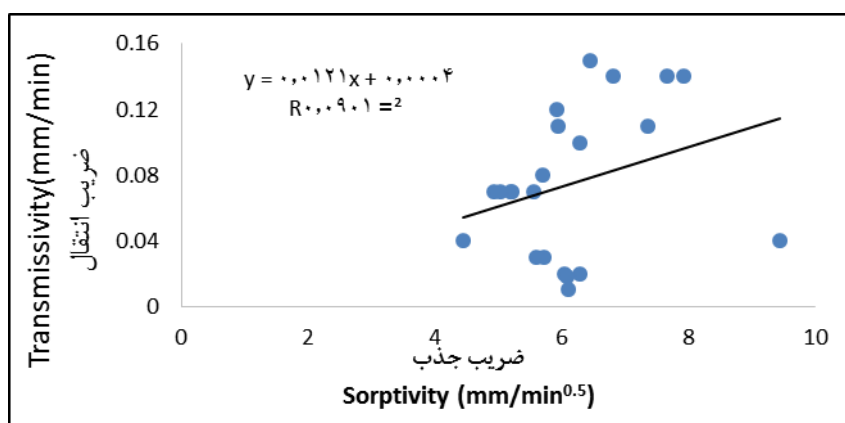
$$S_{si} = F_{si} S_r, A_{si} = F_{si} A_r \quad (13)$$

برای ارزیابی روش مقیاس‌سازی پیشنهاد شده در این تحقیق از ضریب تبیین (R^2) ، میانگین انحراف خطا (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطا $(RMSE)$ استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{reference} - Z_{scaled})^2}{n}} \quad (15)$$

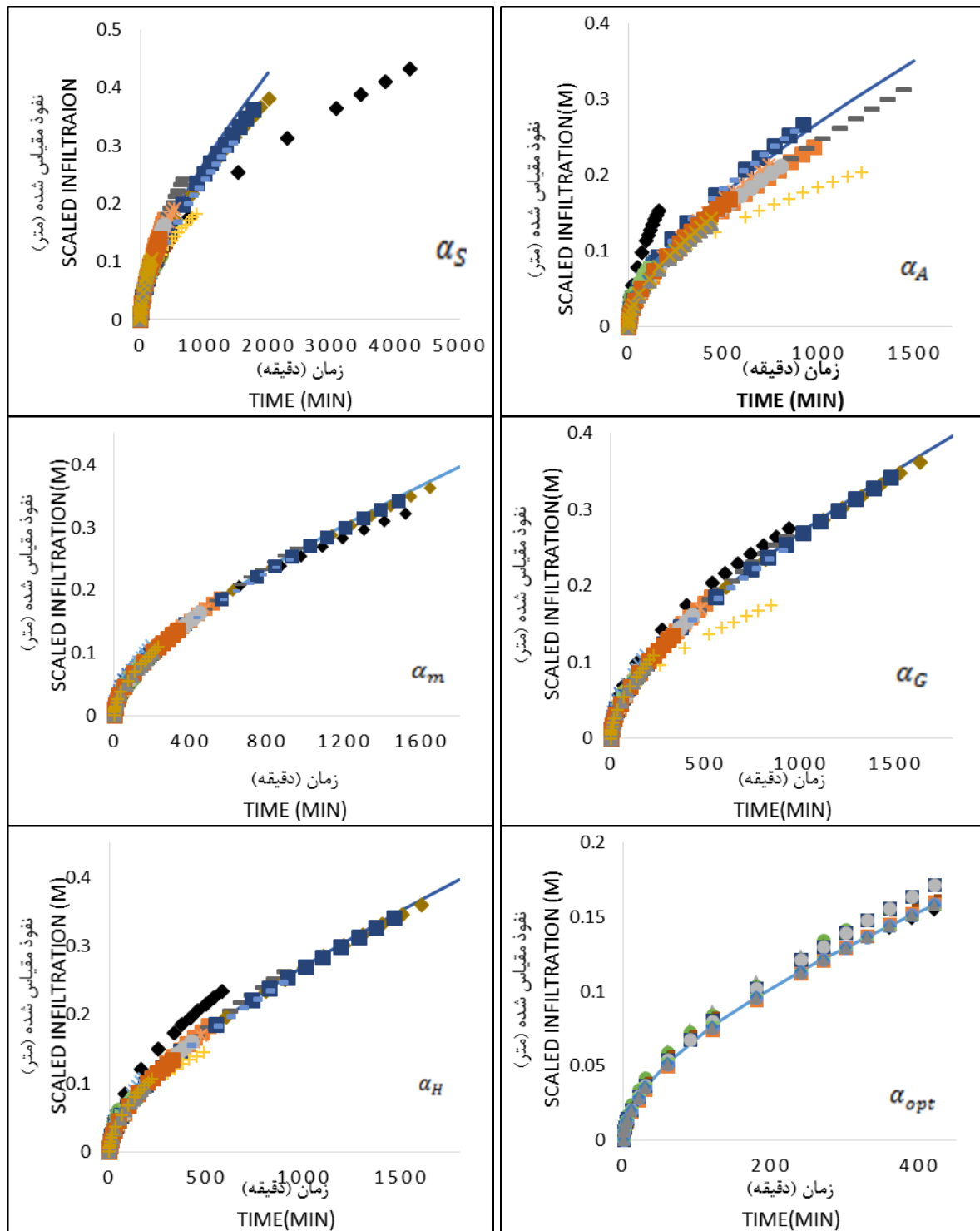
$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{reference} - Z_{scaled}) \quad (16)$$

که در آن $Z_{reference}$ = مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده (نقطه مرجع)، Z_{scaled} = نفوذ تجمعی مقیاس شده و n تعداد داده‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲- رابطه بین ضریب جذب و ضریب انتقال نقاط مورد مطالعه

Figure 2- Relation between sorptivity and transmissivity parameter in study area



شکل ۳- منحنی نفوذ مقیاس شده بر اساس فاکتورهای مقیاس مختلف برای ۲۲ نقطه مورد آزمایش

Figure 3- Infiltration curves of 22 sites scaled by different scaling factors

قرار گیرند (۱۵ و ۱۶). در تحقیقی دیگر برای خاک‌های کشاورزی رابطه خاصی در مورد نحوه قرارگیری منحنی‌های نفوذ مقیاس شده نسبت به منحنی مرجع به دست نیامد (۱).

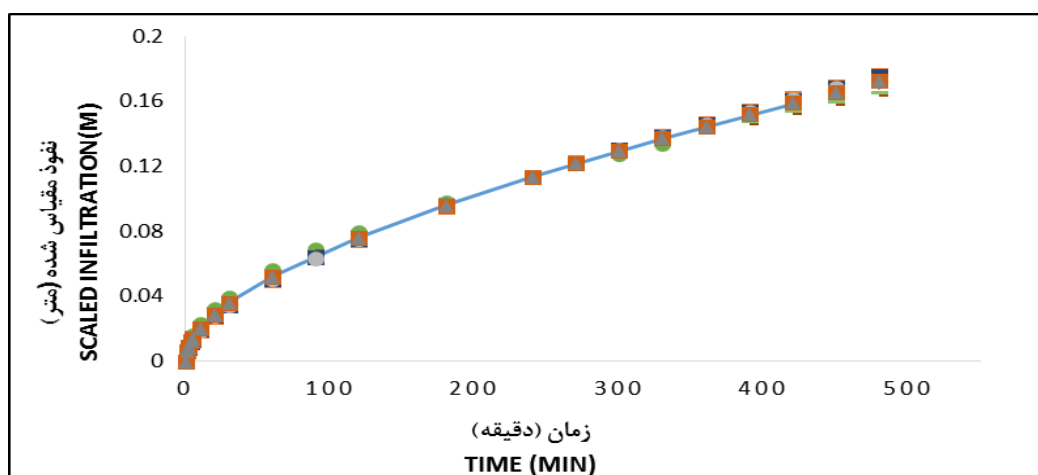
تحقیقات گذشته در این زمینه بیان می‌کند که مقیاس‌بندی توسط (α_S) ، سبب گردیده که منحنی‌های نفوذ اکثر در زیر منحنی مرجع و مقیاس‌بندی بر اساس α_A ، با کمی اختلاف در بالای منحنی میانگین

میانگین مقیاس کرده است. جدول ۲، نتایج شاخص‌های آماری را برای فاکتورهای مقیاس مختلف ارائه شده در این تحقیق نشان می‌دهد. مقادیر مثبت MBE نشان از بیش‌برآوردی و مقادیر منفی نشان از کم‌برآوردی نفوذ مقیاس شده نسبت به منحنی مرجع است. به استثناء روش ارائه شده در این تحقیق برای به دست آوردن فاکتور مقیاس (F_{si}) در سایر موارد مقدار MBE مثبت بوده که نشان‌دهنده بزرگتر بودن داده‌های نفوذ مقیاس شده نسبت به منحنی نفوذ میانگین (مرجع) است. در اکثر موارد مقدار R^2 نزدیک ۰/۹ و یا بزرگتر از ۰/۹ است. در تحقیقی دیگر نشان داده شده که مقدار R^2 در تمامی موارد بزرگتر از ۰/۹ است (۳). بهترین نتایج مربوط به فاکتور مقیاس F_{si} با مقدار نزدیک به عدد یک ($R^2 = ۰/۹۹۹۶$)، مقدار پائین RMSE ($< ۰/۰۰۶$) و مقدار $MBE = +۰/۰۰۱۹$ است. نتایج نشان می‌دهد که روش ارائه شده در این تحقیق دارای برتری نسبت به روش‌های قبلی مقیاس‌سازی معادله فیلیپ دوجزیبی (۱، ۱۵ و ۲۸) است.

شکل ۳ نشان می‌دهد که داده‌های مقیاس‌بندی شده بر اساس نسبت به مقیاس‌بندی بر اساس α_A و α_S و سایر فاکتورهای مقیاس برآزش و یکنواختی بهتر را نشان می‌دهد و پراکندگی در اطراف منحنی میانگین را نسبت به هر دو کاهش داده است. همچنین نسبت به α_m و α_H داده‌ها را بهتر مقیاس‌سازی کرده است. در تحقیق بابایی و همکاران (۱)، α_H بهتر از α_m و α_G فرآیند مقیاس‌سازی را انجام داده بود.

مقیاس‌سازی با استفاده از فاکتور مقیاس F_s (روش پیشنهادی)

شکل ۴، مقیاس داده‌ها را با استفاده از فاکتور مقیاس F_s نشان می‌دهد. در شکل ۵ فاکتور مقیاس بر اساس t_s برابر با ۲۴۰ دقیقه به دست آمده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که این روش نسبت به بقیه روش‌های مقیاس‌سازی، داده‌ها را با کمترین خطا نسبت به منحنی



شکل ۴- منحنی نفوذ مقیاس شده بر حسب فاکتور مقیاس F_s

Figure 4- Scaled infiltration curve based on scaling factor F_s

جدول ۲- نتایج شاخص‌های آماری بر اساس فاکتورهای مقیاس مختلف

Table 2- Results of statistical indices based on different scale factors

فاکتور مقیاس Scaling factor	RMSE	MBE	R^2
α_A	0.043	+0.00029	0.858
α_S	0.064	- 0.0071	0.872
α_{SA}^G	0.049	- 0.0041	0.932
α_{SA}^G	0.047	- 0.0017	0.905
α_{SA}^H	0.046	+ 0.0033	0.927
α_{opt}	0.005	- 0.0011	0.992
F_s	0.006	+ 0.0019	0.999

مقدار پارامترهای آماری برای روش بهینه‌سازی برابر با 0.9918 ، $R^2 = 0.005$ ، $RMSE$ برابر با 0.005 و MBE برابر با -0.0011 است. فاکتور مقیاس براساس α_A ($MBE=0.00029$ و $RMSE=0.043$) دارای عملکردی بهتری نسبت به فاکتور مقیاس α_S ($MBE=-0.0071$ و $RMSE=0.064$) است که با تحقیقات بابایی و همکاران (۱) مطابقت دارد.

رابطه فاکتورهای مقیاس مختلف

جدول ۳ فاکتور مقیاس براساس α_H ، α_G ، α_m ، α_A ، α_S ، F_{si} و α_{opt} را برای ۲۲ نقطه مورد آزمایش و استفاده از منحنی میانگین به عنوان منحنی مرجع نشان می‌دهد. مقدار فاکتور مقیاس F_{si} به استثنای نقاط ۷، ۱۰، ۱۱ و ۱۴ و مقدار α_{opt} به استثنای نقاط ۱۴، ۱۶ و ۱۹ در سایر نقاط موارد بین α_S و α_A قرار دارد. در نتیجه کاربرد α_H ، α_m و α_H به عنوان فاکتور مقیاس در بسیاری از نقاط می‌تواند مفید باشد. همچنین نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که مقدار فاکتور مقیاس بهینه و F_{si} بیشترین نزدیکی را دارد. بیشترین مقدار F_{si} برابر با $1/44$ و کمترین مقدار آن برابر با $0/7$ است. مقادیر بیشینه و کمینه برای فاکتور مقیاس α_{opt} به ترتیب برابر با $1/37$ و $0/65$ است.

همچنین جدول ۳ خصوصیات آماری مختلف فاکتورهای مقیاس متفاوت و همچنین همبستگی آن‌ها با فاکتور مقیاس روش ارائه شده در این تحقیق بیان شده است. مقدار میانگین حسابی α_A و α_S در این تحقیق به ترتیب برابر با $0/93$ و $1/03$ به دست آمد. در تحقیقی در خاک‌های هند این مقادیر به ترتیب با $0/857$ و $1/41$ به دست آمد (۱۵). در تحقیقی دیگر میانگین حسابی α_A و α_S برابر با $0/94$ و $1/24$ به دست آمد (۲۸) که به خصوص با میانگین حسابی α_A در تحقیق حاضر همخوانی دارد. مقدار میانگین حسابی فاکتور مقیاس برای تمامی روش‌ها نزدیک به یکدیگر است که با تحقیقات قبلی

همخوانی دارد (۱۵، ۱۶ و ۲۸). بیشترین ضریب تغییرات مربوط به فاکتور مقیاس بر اساس ضریب جذب (α_S) است. در پژوهش‌های گذشته نیز بیشترین مقدار ضریب تغییرات مربوط به فاکتور مقیاس ضریب جذب آب بود (۱۵، ۱۶ و ۲۸). کمترین ضریب تغییرات فاکتور مقیاس مربوط به روش ارائه شده در این تحقیق (F_{si}) و روش بهینه سازی (α_{opt}) با مقدار برابر ۱۸٪ است. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که به استثنای α_A در سایر موارد فاکتورهای مقیاس همبستگی خوبی با F_s دارند. بابایی و همکاران (۳) برای تعدادی از خاک‌های استان سمنان در ایران نشان دادند که کمترین ضریب همبستگی بین α_{opt} و α_A وجود دارد. بیشترین ضریب همبستگی F_s با α_{opt} با مقدار $0/96$ و پس از آن با α_S و α_m دیده می‌شود.

تأثیر انتخاب منحنی نفوذ مرجع بر مقیاس‌سازی معادله نفوذ

یکی از مزیت‌های روش ارائه گردیده در این تحقیق (F_{si}) نسبت به روش‌های به کاربرده شده در گذشته اختیاری بودن انتخاب منحنی مرجع است. می‌توان هر یک از نقاط آزمایش را به عنوان منحنی مرجع در نظر گرفت. شکل ۵، منحنی نفوذ تجمعی مقیاس‌شده و زمان را بر اساس انتخاب نقاط ۱، ۷، ۱۵، ۱۸ و ۲۲ به عنوان منحنی مرجع نشان می‌دهد. انتخاب منحنی مرجع به گونه‌ای بوده که شامل منحنی‌های نفوذ متفاوت باشد. انتخاب منحنی مرجع به ترتیب شامل خاک‌های با بافت مختلف (سیلتی لومی، لومی شنی، لوم، لومی رسی شنی و لومی رسی)، باشد. شکل ۵ نشان می‌دهد که هریک از نقاط را می‌توان به عنوان منحنی مرجع انتخاب کرد و منحنی‌های نفوذ با دقت مناسبی نزدیک به منحنی مرجع شده‌اند. برای ارزیابی بهتر نتایج آماری مربوط به مقیاس‌سازی منحنی نفوذ بر اساس انتخاب نقاط مختلف به عنوان منحنی مرجع در در جدول ۴ نشان داده شده است.

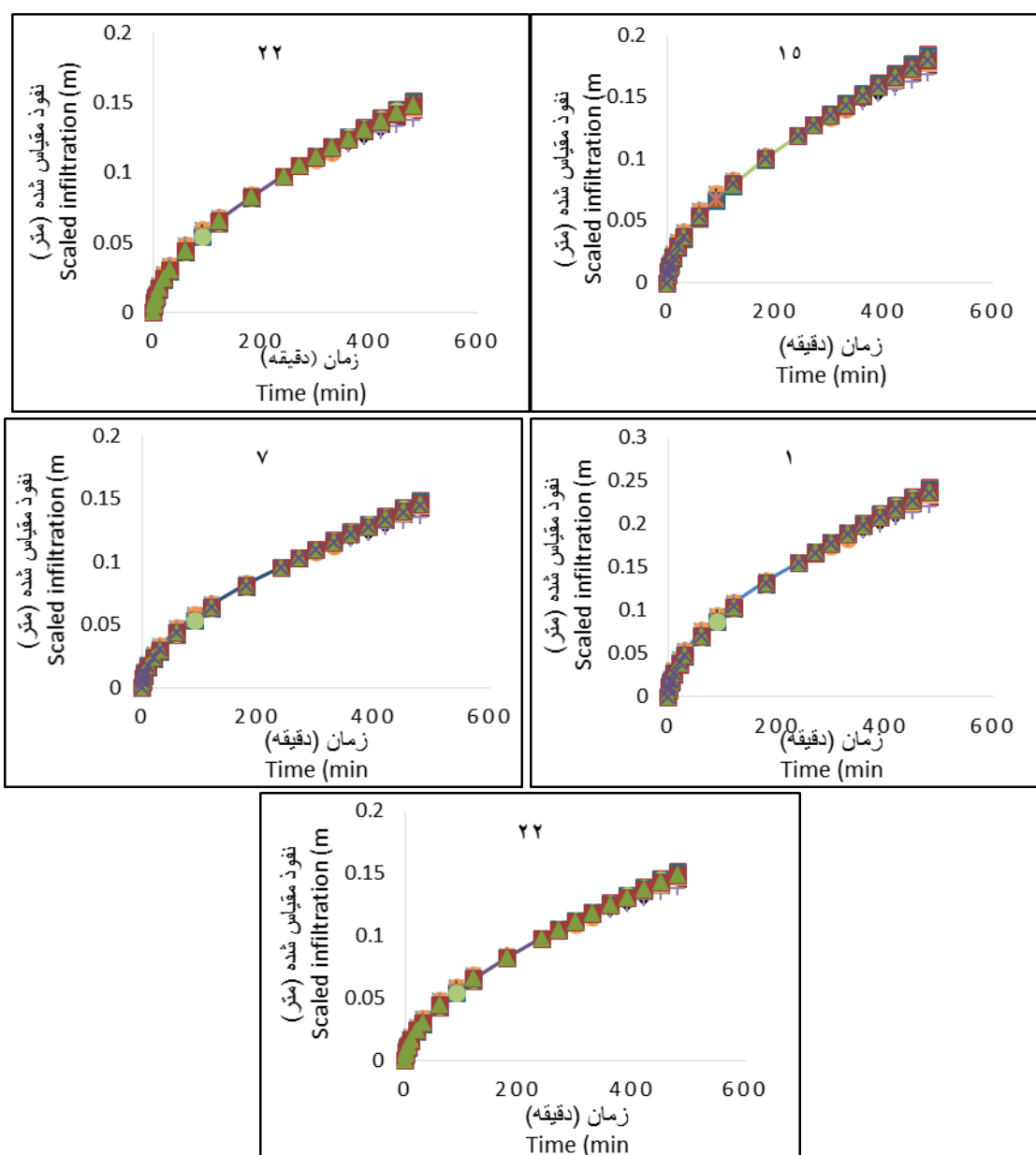
جدول ۳- خصوصیات آماری فاکتورهای مقیاس‌بندی و همبستگی آنها با فاکتور مقیاس‌بندی F_s

Table 3- Statistical characteristics of the scaling factors and their correlation with scaling factor F_s

فاکتور مقیاس	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)	دامنه	ضریب همبستگی
Scaling factor	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation	Range	Correlation coefficient
α_A	0.93	0.32	35	0.51-2.34	0.44
α_S	1.03	0.40	38	0.51-1.41	0.93
α_m	0.99	0.29	29	0.62-1.53	0.91
α_G	0.95	0.28	29	0.59-1.50	0.87
α_H	0.92	0.28	29	0.53-1.49	0.80
α_{opt}	0.95	0.20	18	0.65-1.37	0.96
F_s	0.98	0.19	18	0.70-1.44	-

دهد. مقدار MBE به دست آمده از جدول ۲ برای منحنی میانگین به عنوان منحنی مرجع برابر با ۰/۰۰۱۹ بوده است. از آنجا که در جدول ۲ از منحنی میانگین استفاده کرده‌ایم در تعدادی از منحنی‌ها مقیاس- شده مقدار MBE مثبت و در تعدادی منفی بوده است در نتیجه همدیگر را خنثی می‌کنند در صورتی که در جدول ۴ چون منحنی میانگین به عنوان منحنی مرجع انتخاب نگردیده ممکن است مقدار MBE در یک جهت افزایش یافته باشد.

نتایج نشان می‌دهد که در تمامی موارد R^2 به عدد یک (>0.99) نزدیک است. مقدار RMSE دارای بیشترین مقدار برابر با ۰/۰۰۸۶ برای نوار مرجع ۱ و کمترین مقدار برابر با ۰/۰۰۵۰ برای نوار مرجع ۱۸ است. مقدار RMSE به دست آمده از منحنی میانگین به عنوان منحنی مرجع در جدول ۲ برابر با ۰/۰۰۰۶ بود که نشان‌دهنده این است که در بعضی موارد انتخاب منحنی نفوذ متفاوت از منحنی میانگین باعث کاهش خطا شده است. منفی بودن مقدار MBE در نقاط ۷ و ۱۵ نشان از کم‌برآوردی و در سایر نقاط بیش‌برآوردی را نشان می



شکل ۵- منحنی نفوذ مقیاس شده بر اساس منحنی مرجع مختلف

Figure 5- Scaled infiltration curve based on different reference curve

جدول ۴- نتایج شاخص‌های آماری بر اساس منحنی نفوذ مرجع مختلف

Table 4- The results of Statistical characteristics based on different reference curve

منحنی مرجع Reference curve	RMSE	R ²	MBE
1	0.0086	0.9890	+ 0.0041
7	0.0050	0.9937	- 0.0020
15	0.0058	0.9922	- 0.0027
18	0.0050	0.9902	+ 0.0019
22	0.0052	0.9925	+ 0.0022

α_S در حالت خارج از مقیاس دارای دقت مناسبی نمی‌باشند. دقت روش‌های میانگین شامل α_H ، α_G ، α_m در حالت خارج از مقیاس دقت روش‌های α_A و α_S بیشتر ولی دقت آنها از روش‌های F_S و α_{opt} کمتر است.

ارزیابی روش پیشنهادی با داده‌های موجود در منابع

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی در این پژوهش با داده‌های بانک اطلاعاتی، از ۱۵ نمونه از خاک‌های مورد استفاده به وسیله مهرابی و سپاسخواه (۱۶) استفاده گردید. پارامترهای نفوذ این خاک‌ها در جدول ۵ مشخص شده است. از آنجا که انتخاب منحنی مرجع در روش پیشنهاد شده در این تحقیق اختیاری است منحنی نفوذ خاک شماره ۱۰ را به طور تصادفی به عنوان منحنی مرجع انتخاب شد. عامل مقیاس با استفاده از رابطه (۱۱) بدست آمده و در جدول ۵ بیان گردیده است.

به طور کلی نتایج شکل ۹ و جدول ۴ نشان می‌دهد که روش ارائه شده در این تحقیق وابسته به منحنی میانگین نقاط نبوده و هر یک از نقاط را می‌توان به عنوان منحنی مرجع انتخاب کرد.

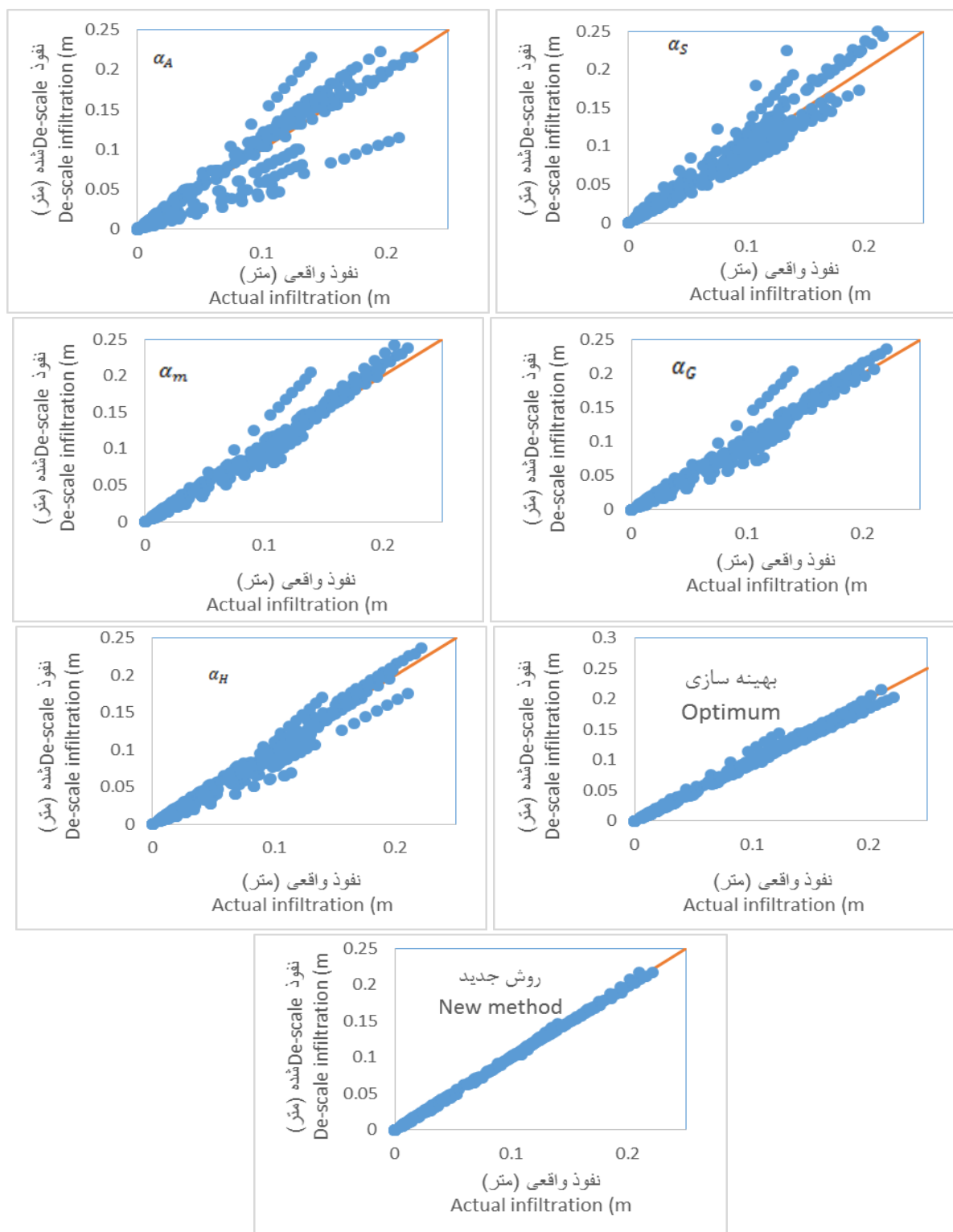
خارج کردن از مقیاس (de-scale)

برای ارزیابی جامع‌تر فرآیند مقیاس‌سازی، با استفاده از منحنی مرجع میانگین و فاکتورهای مقیاس، منحنی نفوذ تجمعی مقیاس شده ترسیم و با منحنی نفوذ واقعی مقایسه می‌گردد. شکل ۶ منحنی نفوذ تجمعی واقعی و منحنی نفوذ مقیاس شده به دست آمده از فرآیند de-scale را برای فاکتورهای مقیاس مختلف (α_H ، α_G ، α_m ، α_A ، α_S)، α_{opt} و F_S نسبت به خط یک به یک نشان می‌دهد. نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد که در حالت خارج کردن از حالت مقیاس بهترین نتایج مربوط به فاکتور مقیاس F_S است و در این روش اکثر داده‌ها بر خط یک به یک منطبق شده‌اند. دقت روش α_{opt} مناسب بوده و حدودا داده‌های نزدیک خط یک به یک قرار گرفته‌اند. نتایج مربوط به α_A و

جدول ۵- پارامترهای معادله نفوذ و فاکتور مقیاس برای ۱۵ نمونه خاک داده‌های مهرابی و سپاسخواه

Table 5- Parameters and scaling factor of the infiltration for 15 soil samples of Mehrabi and Sepaskhah data

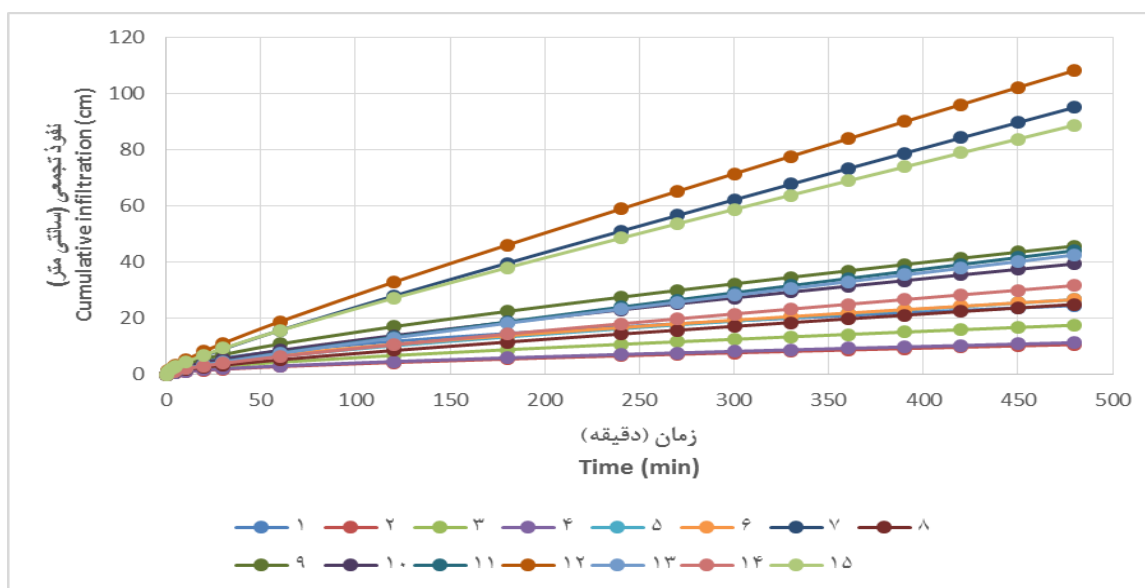
شماره خاک Soil number	ضریب جذب $S (cm \min^{-0.5})$	ضریب انتقال $A (cm \min^{-1})$	فاکتور مقیاس (F_S) Scaling factor (F_S)
1	1.038	0.004	0.737
2	0.289	0.009	0.288
3	0.429	0.017	0.465
4	0.319	0.009	0.308
5	0.648	0.026	0.707
6	0.736	0.022	0.725
7	0.755	0.164	2.717
8	0.418	0.033	0.625
9	1.017	0.049	1.195
10	0.727	0.049	1
11	0.417	0.073	1.042
12	1.049	0.178	2.561
13	0.424	0.069	1.012
14	0.483	0.044	0.783
15	0.903	0.144	2.109



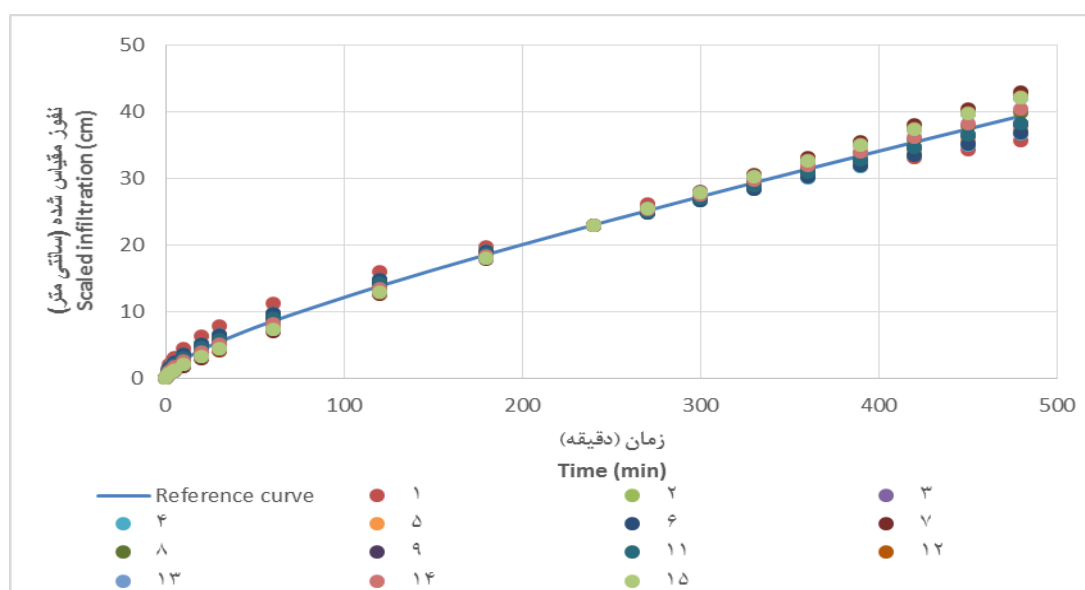
شکل ۶- مقایسه بین نفوذ واقعی و نفوذ de-scale شده بر اساس فاکتورهای مقیاس مختلف
Figure 6- Comparison of between actual and de-scale infiltration curve by different scaling factor

شکل ۸ منحنی نفوذ تجمعی مقیاس شده ۱۵ نمونه خاک را با استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

شکل ۷ منحنی نفوذ تجمعی برای ۱۵ نمونه خاک مورد استفاده قرار گرفت از تحقیق مهرابی و سپاسخواه (۱۶) را نشان می‌دهد. در



شکل ۷- منحنی نفوذ تجمعی برای ۱۵ نمونه از داده‌های مهرابی و سپاسخواه
Figure 7- Cumulative infiltration curves of 15 sites over Mehrabi and Sepaskhah data



شکل ۸- منحنی نفوذ مقیاس شده تجمعی برای ۱۵ نمونه از داده‌های تحقیق مهرابی و سپاسخواه
Figure 8- Scaled cumulative infiltration curves of 15 sites over Mehrabi and Sepaskhah data

نتیجه‌گیری

اطلاع از خصوصیات نفوذپذیری خاک برای طراحی و مدیریت مطلوب روش‌های مختلف آبیاری ضروری است. تعیین تغییرپذیری مکانی فرآیند نفوذ در خاک با وجود دشواری زیاد، یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای رسیدن به کشاورزی دقیق است. در این پژوهش یک روش جدید برای مقیاس‌سازی معادله فیلیپ دوجزیی ارائه گردیده و با روش‌های قبلی مقیاس‌سازی معادله فیلیپ دوجزیی بر اساس فاکتور

شکل ۸ نشان می‌دهد که روش ارائه شده در این تحقیق با دقت مناسبی ۱۵ منحنی نفوذ ارائه شده در تحقیق مهرابی و سپاسخواه (۱۳۹۲) را مقیاس کرده است. نتایج شکل ۸ نشان می‌دهد که روش ارائه شده در این تحقیق برای داده‌های مورد استفاده در سایر منابع نیز معتبر است.

روش‌های مقیاس‌سازی، روش α_{opt} دارای مقادیر مناسب‌تر بود. برخلاف روش‌های مقیاس‌سازی گذشته که منحنی مرجع برابر با منحنی میانگین پارامترهای نفوذ بود، در روش ارائه شده در این تحقیق منحنی مرجع اختیاری بود.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه زابل با کد پژوهانه UOZ-GR-9718-122 انجام شد که بدین وسیله از آن تشکر و قدردانی می‌گردد.

مقیاس مختلف شامل $\alpha_H, \alpha_G, \alpha_m, \alpha_A, \alpha_S$ و α_{opt} مقایسه شد. برای ارزیابی از داده‌های اندازه‌گیری شده در ۲۲ نقطه از مزارع پراکنده در پردیس دانشگاه زابل استفاده شد. روش ارائه شده در این تحقیق برخلاف سایر روش‌های مقیاس‌سازی معادله فیلپ به پارامترهای فیزیکی معادله فیلپ شامل ضریب جذب آب (α_S, S) و ضریب انتقال (α_A, A) بستگی ندارد و پارامتر مقیاس (F_s) براساس مقدار نفوذ پس از زمان مشخص در نقاط مختلف به دست می‌آید. نتایج نشان داد که روش ارائه شده در این تحقیق به منظور به دست آوردن پارامتر مقیاس (F_s) دارای بهترین نتایج است. در میان سایر

منابع

- 1- Babaei F., Zolfaghari A.S., Yazdani M.R., and Sadeghipour A. 2018. Spatial analysis of infiltration in agricultural lands in arid areas of Iran. *Catena* 170: 25–35.
- 2- Bautista E., and Wallender W.W. 1985. Spatial variability of infiltration in furrows. *Transactions of the ASAE* 28: 1846–1851.
- 3- Childs J., Wallender W.W., and Hopmans J.W. 1993. Spatial and seasonal variation of furrow infiltration. *Irrigation and Drainage Engineering* 119(1): 74-90.
- 4- Duan R., Fedler C.B., and Borrelli J. 2011. Field evaluation of infiltration models in lawn soils. *Irrigation Science* 29: 379–389.
- 5- Green W.H., and Ampt G.A. 1911. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Agriculture Science* 4(1): 1-24.
- 6- Guzmán-Rojó D.P., Bautista E., Gonzalez-Trinidad J.G., and Bronson K.F. 2019. Variability of furrow infiltration and estimated infiltration parameters in a macroporous Soil. *Irrigation and Drainage Engineering* 145(2): 04018041.
- 7- Haise H.R., Donnan W.W., Phelan J.T., Lawhon L.F., and Shockley D.G. 1956. The use of ring infiltrometers to determine the infiltration characteristics of irrigated soils. *Publ ARS41 USDA. Agricultural Research Service and Soil conservation Service* 26(6): 451-463.
- 8- Holtan H.N. 1961. Concept for infiltration estimates in watershed engineering. *USDA-ARS Bull.* 41–51.
- 9- Horton R.E. 1941. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil Science Society of America* 5(C): 399-417.
- 10- Khatri K.L., and Smith R.J. 2006. Real-time prediction of soil infiltration characteristics for the management of furrow irrigation. *Irrigation Science* 25(1): 33-43.
- 11- Koech R.K., Smith R.J., and Gillies M.H. 2014. A real-time optimisation system for automation of furrow irrigation. *Irrigation Science* 32(4): 319-327.
- 12- Kostiaikov A.N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from the dynamic point of view for the purposes of amelioration. *Trans. Sixth Comm. International. Soil Science Society* 7-21.
- 13- Kutilek M., and Nielsen D.R. 1994. *Soil hydrology: textbook for students of soil science, agriculture, forestry, geoecology, hydrology, geomorphology and other related disciplines.* Catena Verlag 370 pp.
- 14- Kutilek M., Zayani K., Haverkamp R., Parlange J.Y., and Vachaud G. 1991. Scaling of Richards' equation under invariant flux boundary conditions. *Water Resource Research* 27: 2181–2185.
- 15- Machiwal D., Jha M.K., and Mal B.C. 2006. Modelling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering* 95(4): 569-582.
- 16- Mehrabi F., and Sepaskhah A.R. 2013. Spatial Variability of Infiltration Characteristics at Watershed Scale: a case study of Bajgah plain. *Journal of Agricultural Engineering Research* 14 (1): 13-32. (In Persian with English abstract)
- 17- Miller E.E., and Miller R.D. 1956. Physical theory for capillary flow phenomena. *Journal of Applied Physics* 27(4): 324-332.
- 18- Nie W.B., Li Y.B., Zhang F., Dong S.X., Wang H., and Ma X.Y. 2018. A Method for Determining the Discharge of Closed-End Furrow Irrigation Based on the Representative Value of Manning's Roughness and Field Mean Infiltration Parameters Estimated Using the PTF at Regional Scale. *Water* 10, 1825; doi:10.3390/w10121825.
- 19- Nielsen D.R., Biggar J.W., and Erh K.T. 1973. Spatial variability of field-measured soil-water properties. *Hilgardia* 42: 215–259.

- 20- Oyonarte N.A., Mateos L., and Palomo M.J. 2002. Infiltration variability in furrow irrigation. *Irrigation and Drainage Engineering* 128(1): 26-33.
- 21- Philip J.R. 1969. *Theory of Infiltration*. Academic Press, New York Vol. 9, pp 215-295
- 22- Philip J.R. 1957. The theory of infiltration: 3. Moisture profiles and relation to experiment. *Soil Science* 84(2): 163-178.
- 23- Rasoulzadeh A., and Sepaskhah A.R. 2003. Scaled infiltration equations for furrow irrigation. *Biosystems Engineering* 86(3): 375-383.
- 24- Sadeghi M., Ghahraman B., Davary K., Hasheminia S.M., and Reichardt K. 2011. Scaling to generalize a single solution of Richards' equation for soil water redistribution. *Science Agriculture* 68: 582-591.
- 25- Sadeghi M., Ghahraman B., Warrick A.W., Tuller M., and Jones S.B. 2016. A critical evaluation of Miller and Miller similar media theory for application to natural soils. *Water Resources Research* 52(4): 1-18
- 26- Sadeghi M., Ghahraman B., Ziaei A.N., Davary K., and Reichardt K. 2012. Additional scaled solutions to Richards' equation for infiltration and drainage. *Soil and Tillage Research* 119: 60-69.
- 27- Schwankl L.J., Raghuwanshi N.S., and Wallender W.W. 2000. Furrow irrigation performance under spatially varying conditions. *Irrigation and drainage engineering* 126: 355-361.
- 28- Sharma M L., Gander G.A., Hunt C.G. 1980. Spatial variability of infiltration in a watershed. *Journal of Hydrology* 45: 122-101.
- 29- Shahriari M., Delbari, M., Afrasiab P., Pahlavan-Rad M.R. 2019. Predicting regional spatial distribution of soil texture in floodplains using remote sensing data: A case of southeastern Iran. *Catena* 182: 1-12.
- 30- Talsma T. 1969. In situ measurement of sorptivity. *Soil Research* 7(3): 269-276.
- 31- Tsegaye T., and Hill R. L. 1998. Intensive tillage effects on spatial variability of soil physical properties. *Soil Science* 16(2): 143-154.
- 32- US Department of Agriculture, Natural Resources and Conservation Service. 1974. *National Engineering Handbook*. Section 15. Border Irrigation. National Technical Information Service, Washington, DC, Chapter 4.
- 33- Van Beek E., Bozorgy B., Vekerdy Z., and Meijer K. 2008. Limits to agricultural growth in the Sistan Closed Inland Delta, Iran. *Irrigation Drainage System* 22:131-143.
- 34- Warrick A.W. 1998. Spatial variability. In: *Environmental Soil Physics* (Hillel D, ed), pp 655-676. Academic Press, San Diego, CA.
- 35- Warrick A.W., and Nielsen D.R. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: *Applications of Soil Physics* (Hillel D, ed), pp 319-344. Academic Press, New York.
- 36- Warrick A.W., Mullen G.J., and Nielsen D.R. 1977. Scaling field-measured soil hydraulic properties using a similar media concept. *Water Resources Research* 13(2): 355-362.
- 37- Warrick A.W., and Hussen A.A. 1993. Scaling of Richards' equation for infiltration and drainage. *Soil Science Society of America* 57: 15-18.
- 38- Zapata, N., and Playán E. 2000. Elevation and infiltration in a level basin. I. Characterizing variability. *Irrigation Science* 19(4): 155-164.



Evaluation Different Methods of Scaling the Philip Equation

M.T. Poozan¹- M.M. Chari^{2*}- P. Afrasiab³

Received: 11-09-2019

Accepted: 16-11-2019

Introduction: Infiltration is found to be the most important process that influences uniformity and efficiency of surface irrigation. Prediction of infiltration rate is a prerequisite for estimating the amount of water entering into the soil and its distribution. Since the infiltration properties are a function of time and space, a relatively large number of field measurements is needed to represent an average of farm conditions (Bautista and Wallender, 1985). In recent years, researchers have proposed methods to reduce the requirement of the regional and field data in order to describe water dynamic in the soil. One of these methods is scaling which at the first was presented by Miller and Miller (1956) and developed on the similar media theory in the soil and water sciences (Miller and Miller, 1956; Sadeghi et al., 2016). According to similar media theory, soils can be similar, provided that different soils can be placed on a reference curve with ratios of a physical characteristic length, called "scaling factor". The objective of the present study was scaling the Philip infiltration equation and analyzing the spatial variability of infiltration characteristics by using minimum field measurements. In this research, a new method was presented for scaling infiltration equation and compared with previous methods scaling including: based on sorptivity (α_s), transmissivity (α_A), the optimum scaling factors (α_{opt}) arithmetic, geometric and harmonic.

Materials and Methods: The basic assumption of scaling through this method was "the shape of the infiltration characteristics curve is almost constant despite the variations in the rate and depth of infiltration". The data required for infiltration scaling were a reference infiltration curve (whose parameters are known) and the depth of water infiltrated within a specified time period in other infiltration curves. In this method, first, equation infiltration parameters are specified for one infiltration curve, called the reference infiltration curve (I_{Ref}). If, for other infiltration equations, the depth of water infiltrated is obtained after the specified time (t_s) (for example, depth of infiltration water after 4 hours), the scale factor (F_s , dimensionless) is equal to the depth of water infiltrated after t_s in the reference infiltration equation to depth of infiltrated water after t_s even infiltration equation is as follows:

$$F_{si} = \frac{I_i}{I_{Ref}} = \frac{S_i t_s^{0.5} + A_i t_s}{S_r t_s^{0.5} + A_r t_s} \quad (1)$$

where I_i ($i=1,2, \dots, n$) is depth of infiltrated water after a given time (t_s) for each infiltration families and I_{Ref} is depth of infiltrated water after a given time in reference, and S_r and A_r are parameters of reference curve. In order to assess the proposed scaling method, root mean square error (RMSE), mean bias error (MBE) and coefficient of determination (R^2) were used for a totally 24 infiltration tests.

Results and Discussion: The parameters of this model (i.e. sorptivity S and transmissivity factor A) showed a wide variation among the study sites. The variation of these parameters showed no significant difference between sorptivity and transmissivity factors. In addition, Talsama et al. (1969) illustrated that there is a weak relationship between sorptivity and saturated hydraulic conductivity. Results showed that scaling achieved using α_A was better than that obtained using α_s . Mean curve was chosen as reference curve and scale curve was obtained by different methods. The results of statistical analysis showed that the proposed method had the best performance (RMSE=0.006, MBE=0.0019 and $R^2=0.9996$). In order to evaluate the effect of the reference curve selection on the results, the scaled cumulative infiltration curve based on different reference curves (different infiltration equation) was evaluated. The results showed that the selection of the reference infiltration curve is optional and each cumulative infiltration families can be selected as the reference curve. For defining the

1, 2 and 3- M.Sc. Student, Assistant Professor and Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, respectively.

(*- Corresponding Author Email: m.mahdi.chari@gmail.com)

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.82567

relationship between F_s and α_{opt} , α_H , α_S , α_A , α_m , α_G data, a statistical analysis was performed. According to our results, F_s had the highest correlation with α_{opt} .

Conclusion: In this study, a new method for penetration scaling was presented. In this method, the infiltration curve can be obtained using the minimum information including a reference curve and the depth of infiltrated water after a given time. The selection of the reference infiltration curve is optional and each cumulative infiltration equation can be selected as the reference curve. In the light of the results of this research, it can be concluded that the proposed method in this study is promising to be used for surface irrigation management.

Keywords: Infiltration, Scaling, Sorptivity, Transmissivity



بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر هیدروگراف سیل رودخانه کشف‌رود با تحلیل نتایج روش SCS-CN

مهدی محمودی^۱ - مهدی هنرمند^{۲*} - فرزین ناصری^۳ - صدیقه محمدی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۸

چکیده

تغییر کاربری اراضی و به طور کلی پوشش اراضی تأثیر مستقیمی بر تغییر رژیم هیدرولوژیکی دارد و ویژگی‌های سیل در هر منطقه می‌تواند تابع کاربری اراضی آن حوضه باشد. این تحقیق با هدف تعیین میزان تغییر کاربری اراضی طی ۲۸ سال (۱۳۶۶ تا ۱۳۹۴) و تأثیر آن بر هیدروگراف سیل رودخانه کشف‌رود انجام شد. برای این منظور، نقشه کاربری اراضی با استفاده از نرم‌افزار Erdas Imaging 2014 از تصاویر لندست TM سال ۱۳۶۶ و OLI سال ۱۳۹۴ با دقت ۸۷/۳ و در ۱۰ کلاس کاربری استخراج شد. سپس با تلفیق نقشه‌های کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیک خاک در محیط GIS نقشه شماره منحنی رواناب، حاصل شد. در مرحله بعد وقایع بارش-رواناب در مدل HEC-HMS با استفاده از روش SCS-CN شبیه سازی شد و پارامترهای هیدرولوژیکی مربوط به سال ۱۳۶۶ و ۱۳۹۴ واسنجی و اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد به علت تغییرات کاربری اراضی که در جهت کاهش مساحت مراتع متوسط و افزایش مساحت مراتع فقیر اتفاق افتاده است، متوسط شماره منحنی حوضه در این مدت از ۷۷/۵ به ۷۸/۴ افزایش یافته است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که میزان دبی اوج و حجم سیلاب حوضه کشف‌رود طی دوره مورد مطالعه به طور متوسط به ترتیب ۱۵/۲ و ۱۳/۷ درصد افزایش یافته ولی زمان رسیدن به دبی اوج هیدروگراف سیل تغییری نداشته است.

واژه‌های کلیدی: سیل، شماره منحنی، لندست، HEC-HMS

مقدمه

منحنی سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS-CN) است (۷) و چنانچه در برآورد پارامترهای مهم آن مانند کاربری اراضی از فن‌آوری‌های سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شود، صحت و سرعت در دستیابی به نتایج آن بیشتر می‌شود (۴) و (۲۵).

در زمینه تغییر کاربری اراضی و ارتباط آن با عوامل مختلف سیلاب تحقیقات زیادی در سطح ایران و جهان صورت گرفته است، که به چند مورد اشاره می‌شود. سوریا و مودگال (۳۰) با استفاده از مدل HEC-HMS و داده‌های سنجش از دور، تأثیر تغییر کاربری اراضی طی ۲۹ سال را در حوضه تیروسولام بر روی سیلاب بررسی کردند. در نهایت با استفاده از مدل HEC-RAS نقشه پهنه‌بندی سیل را تهیه کردند. در تحقیق دیگری در شرق هندوستان سانپال و همکاران (۲۶) با استفاده از داده‌های ماهواره لندست در دوره ۲۸ ساله نقشه کاربری اراضی را با استفاده از نرم‌افزار ENVI تهیه کردند. سپس نقش هر یک از زیرحوضه‌ها را در تعیین دبی اوج سیلاب خروجی حوضه بررسی کردند و آنها را به لحاظ سیل‌خیزی اولویت‌بندی کردند. نوحه‌گر و همکاران (۱۹) در تحقیقی در حوضه تنگ بستانک شیراز تغییر کاربری اراضی و تأثیر آن بر پتانسیل

در مقایسه با بلایای طبیعی دیگر، سیل با فراوانی وقوع زیاد و به دلیل اینکه در محدوده وسیع رخ می‌دهد، از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که از نظر مالی و جانی خسارات زیادی را به همراه دارد (۳۲). فرآیندهای هیدرولوژیکی متعددی که در تولید رواناب سطحی و به ویژه سیل مؤثرند، در حوضه‌های آبریز رخ می‌دهند، لذا برنامه‌ریزی و مدیریت یکپارچه آن اهمیت ویژه‌ای دارد (۱۴). مؤلفه‌های زیادی مانند شرایط اقلیمی، توپوگرافی، خصوصیات خاک، پوشش اراضی و... در تولید رواناب سطحی نقش دارند و کاربری زمین یکی از مهم‌ترین آنهاست (۲۴). برآورد مقدار کمی رواناب از دغدغه‌های اصلی هیدرولوژیست‌ها است که در محاسبات و طراحی‌های عمرانی مختلف نقش اساسی دارد. رایج‌ترین مدل برآورد رواناب سطحی مدل شماره

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب دانشجوی دکتری مهندسی آبخیزداری و استادیار گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

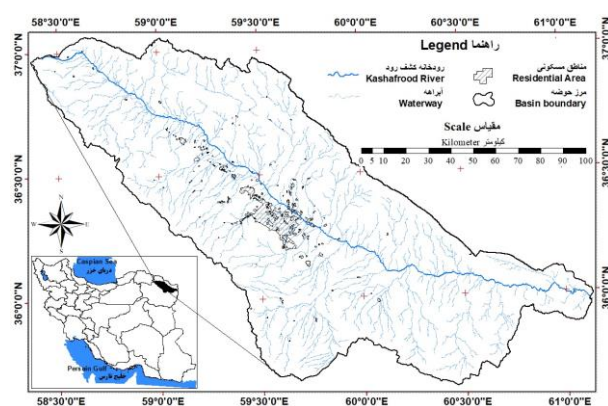
(*)- نویسنده مسئول: (Email: mehonarmand167@yahoo.com)

DOI: 10.22067/jsw.v34i2.84342

ویژگی‌های سیلاب این حوضه تأثیرگذار بوده است. این تحقیق با هدف شناسایی این تأثیرات، برای اولین بار به ارزیابی روش‌های مختلف تهیه نقشه کاربری اراضی و صحت‌سنجی نتایج آنها، همچنین واسنجی و اعتبارسنجی مدل HEC-HMS و مقایسه تغییرات سیلاب شبیه‌سازی طی ۲۸ سال، در قالب یک طرح پژوهشی و تحقیقاتی در سطح حوضه کشف‌رود انجام شد.

مواد و روش‌ها

حوضه کشف‌رود بخشی از حوضه قره‌قوم است و موقعیت آن در شکل ۱ ارائه شده است. حوضه قره‌قوم در سیستم استاندارد تقسیم‌بندی حوضه‌های کشور ششمین حوضه اصلی و در طول جغرافیایی $61^{\circ}00'00''$ تا $58^{\circ}00'00''$ شرقی و عرض جغرافیایی $37^{\circ}00'00''$ تا $35^{\circ}00'00''$ شمالی قرار دارد. وسعت این حوضه ۱۶۷۷۹ کیلومتر مربع بوده و بالاترین نقطه در این حوضه ۳۲۳۵ متر و پایین‌ترین آن ۳۷۸ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. این حوضه از غرب به حوضه اترک، از شرق به مرز کشور افغانستان، از شمال به رشته کوه‌های هزار مسجد و از جنوب به رشته کوه‌های بینالود محدود می‌شود. طول رودخانه کشف‌رود از بلندترین نقطه تا خروجی حوضه حدود ۳۷۴ کیلومتر است و شیب خالص و ناخالص آن به ترتیب 0.0028 و 0.0043 متر بر متر است. این رودخانه بزرگ‌ترین زهکش شهر مشهد بوده که از شمال آن عبور کرده و جهت جریان آن از غرب به شرق است. این رودخانه پس از دریافت شعبات دیگر در شمال مشهد در جهت غربی-شرقی جاری شده، جاده مشهد-سرخس را قطع نموده و در جنوب مزداوند وارد دره‌ای تنگ می‌شود و پس از خروج از آن در محلی بنام پل خاتون با هریرود تلاقی کرده و رودخانه تجن را تشکیل می‌دهند.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Location of study area

جهت محاسبه خصوصیات فیزیکی و هیدرولوژیکی و همچنین

سیل‌خیزی را مطالعه نمودند. این مطالعه در یک دوره ۱۸ ساله انجام شد و نتایج نشان داد که حوضه مذکور ۹ درصد سیل‌خیزتر شده است. بهنام و همکاران (۳) در محدوده شهری اصفهان اثر تغییر کاربری اراضی بر هیدروگراف سیل را با کمک تصاویر ماهواره‌ای و روش SCS بررسی کردند. آنها نشان دادند که تأثیر تغییر کاربری اراضی با افزایش دوره بازگشت کاهش می‌یابد. به طوری که به دلیل تغییر کاربری اراضی، دبی پیک سیل ۵ ساله ۳۹/۹ درصد افزایش یافته ولی دبی پیک ۲۰۰ ساله ۱۰/۳ درصد افزایش داشته است. تحقیقاتی نیز در زمینه برآورد میزان رواناب با روش SCS-CN انجام شده است. وینیترا و یشودا (۳۱) و ساتیشکومار و همکاران (۲۷) نشان دادند که این مدل و روش برای تخمین میزان رواناب منطقه مورد مطالعه خود بسیار کارآمد است. شنائی هویزه و همکاران (۲۸) تغییر هیدروگراف سیل حوضه ابوالعباس در استان خوزستان را در یک دوره ۱۹ ساله با استفاده از مدل HEC-HMS بررسی کردند. در مطالعه آنها، ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم شبکه عصب مصنوعی ۸ کلاس کاربری استخراج شد و با روش شماره منحنی، رواناب حوضه مطالعه شد. نتایج ایشان نشان داد که میزان دبی اوج و حجم سیل در این حوضه به ترتیب ۵/۵ و ۵/۱ درصد افزایش داشته است. حجازی و مزبانی (۱۰) در حوضه سراب در منطقه دره‌شهر با استفاده از روش شماره منحنی مقدار ارتفاع رواناب و دبی حداکثر سیل را تعیین کردند. تحقیقات ایشان نشان داد پارامتر مساحت و تراکم زهکشی نسبت به سایر عوامل تأثیر بیشتری در پتانسیل سیل‌خیزی این حوضه دارد. مصطفی‌زاده و همکاران (۱۸) تغییرات زمانی مقدار شماره منحنی را در حوضه جعفرآباد بررسی کردند. آنها نشان دادند میانگین شماره منحنی در فصل تابستان و زمستان حدود ۶۰ و در فصل بهار و پائیز به ترتیب ۵۰ و ۵۶ بود. محرم‌پور و همکاران (۱۷) با هدف محاسبه توان سیل‌خیزی و ترسیم نقشه شماره منحنی در حوضه نازل‌چای تحقیقی را انجام دادند. آنها با استفاده از الحاقی Arc CN-Runoff در محیط ArcGIS نقشه شماره منحنی را تهیه و میانگین آن را در منطقه معادل ۷۸ برآورد کردند. سپس نقشه ارتفاع رواناب را به دست آوردند. حسین‌زاده و همکاران (۱۱) با هدف تعیین شماره منحنی و سپس برآورد حداکثر دبی اوج سیل، از روش SCS-CN استفاده کردند. آنها نشان دادند وضعیت هیدرولوژیکی اراضی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک در سطح حوضه مهم‌ترین پارامتر تعیین‌کننده CN است و بر روی رواناب تأثیر می‌گذارد. دابی و همکاران (۵) نیز در زمینه اصلاح مقدار تلفات اولیه و تلفات کل رواناب در پنج زیرحوضه در استان گلستان تحقیقی را انجام دادند. نتایج آنها نشان داد مدل اصلاح شده شماره منحنی (رابطه غیرخطی تلفات اولیه و تلفات کل رواناب) موجب بهبود کارایی مدل SCS-CN خواهد شد.

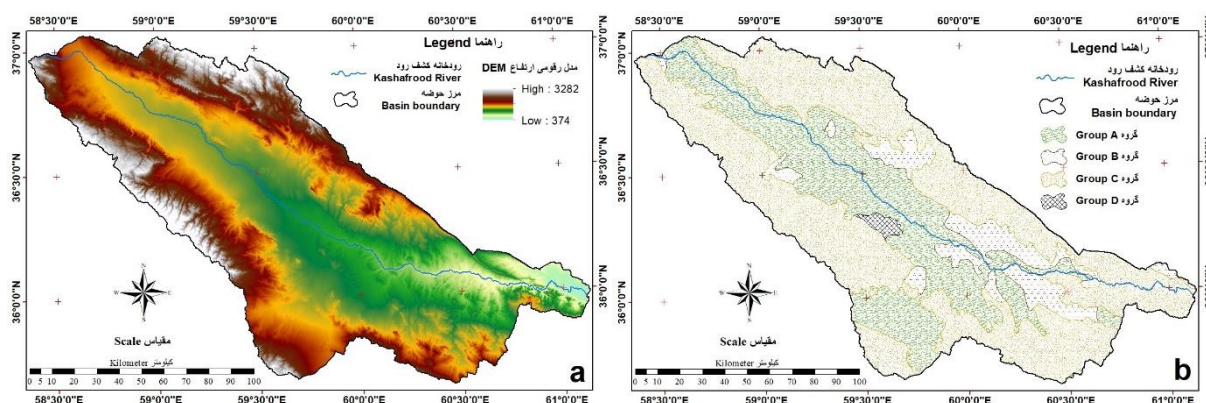
یکی از مشکلاتی که در حوضه کشف‌رود رخ داده است تغییرات گسترده کاربری اراضی است. قطعاً این تغییرات در درازمدت روی

آشکارسازی است، لذا در این تحقیق سعی شد یک بازه ۳۰ ساله انتخاب شود ولی به دلیل رعایت شرایط انتخاب تصویر مناسب (فاقد خطای سنجنده، اتمسفری، یکسان بودن قدرت تفکیک زمانی و مکانی و...)، یک بازه ۲۸ سال برای تصاویر ماهواره‌ای انتخاب شد. چون یکی از اهداف مطالعه بررسی تغییرات کاربری اراضی است، داده‌ها طوری از میان تصاویر انتخاب شد که تاریخ آن تا حد امکان به هم نزدیک باشند. به طور کلی، پنج تصویر از ماهواره لندست برای پوشش کامل حوضه کشف‌رود نیاز است. برای قدیمی‌ترین داده‌ها از تصاویر لندست ۵ و برای جدیدترین داده‌ها، از تصاویر لندست ۸ استفاده شد (جمعا ۱۰ تصویر استفاده شد). برخی مشخصات این تصاویر در جدول ۱ آمده است. تصویر نهایی که حاصل ترکیب ۵ تصویر است، مربوط به سال ۱۳۶۶ و ۱۳۹۴ در شکل ۳ نشان داده شد.

برای پردازش رقومی تصاویر ماهواره‌ای از نرم‌افزار ERDAS IMAGINE 2014 استفاده شد. تصحیح هندسی به روش تصویر به تصویر با ریشه میانگین مربعات خطا کمتر از ۰/۵ پیکسل انجام شد (۱۶).

انجام تصحیحات هندسی مورد نیاز بر روی تصاویر ماهواره‌ای، مدل رقومی ارتفاعی استفاده می‌شود (۲۸). در این تحقیق از داده‌های مدل جهانی رقومی ارتفاع ماهواره استر با دقت مکانی ۳۰ متر استفاده شد. پس از تولید نقشه جهت جریان، و تجمع جریان، نقشه آبراهه تولید شد و سپس پارامترهایی مانند مساحت، شیب، زمان تمرکز و سایر خصوصیات فیزیوگرافی و هیدرولوژیکی محاسبه شد. نقشه گروه هیدرولوژیکی خاک، از طریق نقشه خاک‌شناسی، بعضی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مانند ساختمان، بافت، عمق و جنس سنگ بستر، سرعت نفوذپذیری خاک و پوشش گیاهی تهیه می‌شود. با استفاده از این ویژگی‌ها و با توجه به استاندارد گروه‌های خاک انجمن حفاظت خاک آمریکا نقشه گروه هیدرولوژیک تهیه می‌شود (۸). در این مطالعه، از نقشه گروه هیدرولوژیکی خاک تهیه شده در مطالعات به‌هنگام‌سازی بیان قره‌قوم (۱۳) استفاده شد. نقشه گروه هیدرولوژیک خاک و مدل رقومی ارتفاع حوضه کشف‌رود در شکل ۲ ارائه شده است.

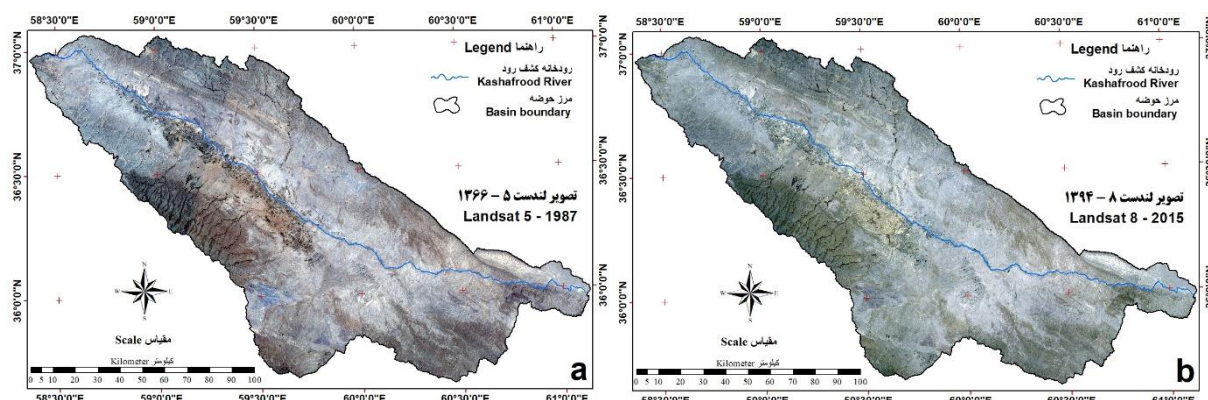
در مرحله بعد نقشه کاربری اراضی حوضه تهیه شد. از آنجاکه تغییر کاربری در زمان کوتاه رخ نمی‌دهد و در بازه‌های طولانی قابل



شکل ۲- مدل رقومی ارتفاع (a) و گروه هیدرولوژیک خاک (b) منطقه مورد مطالعه
Figure 2- Digital elevation model (a) and soil hydrologic group (b) of study area

جدول ۱- تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در دوره زمانی مورد مطالعه

Table 1- Satellite images applied over the study period				
ردیف/گذر Path/Row	تاریخ تصاویر لندست ۵		تاریخ تصاویر لندست ۸	
	Date of landsat 5 images (TM)		Date of landsat 8 images (OLI)	
	هجری خورشیدی Solar Hijri	میلادی Gregorian	هجری خورشیدی Solar Hijri	میلادی Gregorian
158/35	1366/04/06	1987/06/27	1394/04/03	2015/06/24
159/34	1366/03/28	1987/06/18	1394/03/25	2015/06/15
159/35	1366/03/28	1987/06/18	1394/03/25	2015/06/15
160/34	1366/04/04	1987/06/25	1394/04/01	2015/06/22
160/35	1366/04/04	1987/06/25	1394/04/01	2015/06/22



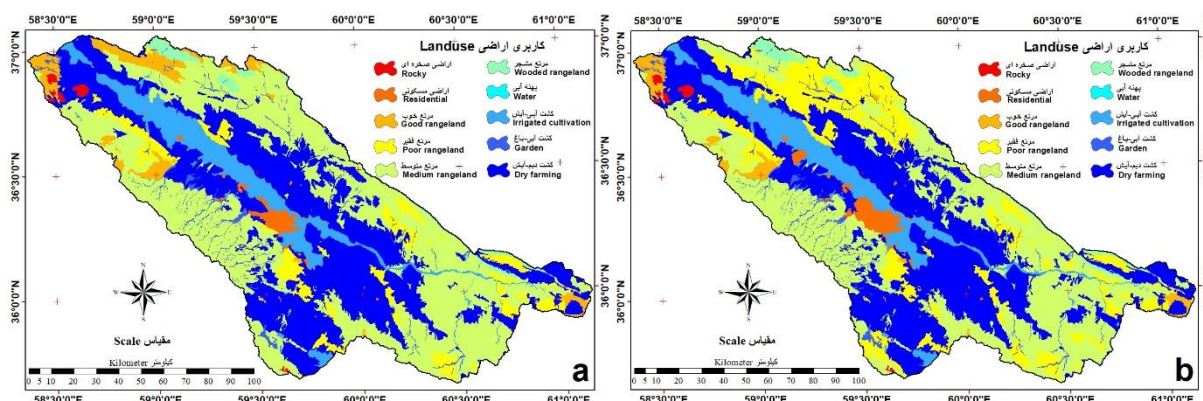
شکل ۳- تصویر لندست ۵ سال ۱۳۶۶ (a) و لندست ۸ سال ۱۳۹۴ (b)- حاصل از ترکیب ۵ تصویر
Figure 3- Image of Landsat 5, 1987 (a) and Landsat 8, 2015 (b)- the combination of five images

لذا تهیه نقشه شماره منحنی در هر یک از سال‌های مورد مطالعه ضروری می‌باشد (۲۸). از ترکیب نقشه گروه هیدرولوژیک خاک و نقشه کاربری اراضی که از تصاویر ماهواره‌ای لندست تهیه شده بود و استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.3 نقشه شماره منحنی مربوط به سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۹۴ تهیه شد.

در نهایت از روش استاندارد شماره منحنی سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS-CN) برای محاسبه مقدار بارش مازاد و تلفات در مدل HEC-HMS استفاده شد (۲۸). مدل HEC-HMS یک مدل هیدرولوژیکی است که توسط ارتش ایالات متحده آمریکا توسعه داده شده است. در این روش تنها نیاز است که متغیرهای کاربری اراضی، گروه هیدرولوژیک خاک و شیب منطقه محاسبه شود و با وجود سادگی، نتایج آن بسیار بهتر از مدل‌های پیچیده است (۳۰). برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی حوضه این مدل سه زیر مدل شامل مدل حوضه، مدل اقلیم و شاخص‌های کنترلی دارد. در مجموع نه روش متفاوت برای محاسبه تلفات بارش در بخش زیرمدل حوضه وجود دارد، در این تحقیق از روش SCS-CN استفاده شد. برای کالیبراسیون مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS از چهار واقعه سیلاب در ایستگاه هیدرومتری پل خاتون-کشف‌رود که دارای بارش متناظر نسبتاً فراگیر بودند انتخاب شد. به طوری که از سه واقعه سیلاب برای واسنجی و از یک واقعه برای اعتبارسنجی استفاده شد. سپس با استفاده از معیارهای ارزیابی مدل، عوامل تلفات اولیه و زمان تأخیر برای شبیه‌سازی جریان در رودخانه کشف‌رود بهینه شد. توزیع مکانی بارش در سطح منطقه برای این چهار واقعه نیز تهیه و میانگین بارش به عنوان بارش مولد سیلاب تعیین شد. به دلیل اینکه ایستگاه سینوپتیک مشهد در مرکز ثقل حوضه قرار دارد و همچنین دقت بیشتری در اندازه‌گیری و ثبت آمار دارد، از این ایستگاه برای مشخص کردن توزیع زمانی بارش مولد سیلاب استفاده شد. با استفاده از نرم افزار ArcGIS نیز پارامترهای طول آبراهه، شیب طولی و... محاسبه شد.

برای تصحیح رادیومتریکی، از آنجا که تغییرات شرایط روشنایی، بر تابش واقعی رسیده به یک پیکسل تأثیر می‌گذارد، تصحیح اتمسفری قبل از تصحیح توپوگرافی اعمال شد (۲۲). تصحیح اتمسفری مهمترین بخش قبل از پردازش تصاویر است و به ویژه در مواردی که مقایسه و تجزیه و تحلیل تصاویر چند زمانه مدنظر است، استفاده می‌شود (۹). برای تشخیص پوشش گیاهی (نوع و تراکم)، انواع شاخص‌های پوشش گیاهی مانند شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص پوشش نسبی (RVI) و شاخص پوشش گیاهی خاک اصلاح شده (SAVI) استفاده شد (۱). با وجود نتایج مثبت سابقه تحقیق که از روش حداکثر شباهت استفاده کرده‌اند، در تحقیق حاضر برای طبقه‌بندی علاوه بر آن از روش‌های حداقل فاصله و فاصله ماکسیمی نیز استفاده شد. تنها پس از ارزیابی دقت طبقه‌بندی و کسب اطمینان از صحت نقشه استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای، می‌توان گفت که طبقه‌بندی به طور صحیح انجام شده است. نتایج ارزیابی دقت معمولاً به صورت ماتریس خطا ارائه می‌شود. این ماتریس حاصل مقایسه پیکسل به پیکسل، پیکسل‌های معلوم با پیکسل‌های متناظر در نتایج طبقه‌بندی است (۲۲). بنابراین برای انتخاب روش مناسب طبقه‌بندی، پس از اعمال الگوریتم‌های طبقه‌بندی مختلف برای تصویر سال ۱۳۹۴، اقدام به ارزیابی دقت طبقه‌بندی آنها شد (زیرا اطلاعات زمینی تنها برای سال ۱۳۹۴ در دسترس بود) و بر اساس روش منتخب، تصویر سال ۱۳۶۶ نیز طبقه بندی شد. به منظور تعیین بارش مازاد یا رواناب، بایستی تلفات کل بارش (S) با استفاده از یک عامل بدون بعد به نام شماره منحنی (CN) محاسبه شود (۱۵). تغییر کاربری اراضی یک حوضه بر میزان نفوذپذیری تأثیر می‌گذارد و وضعیت هیدرولوژیکی را تغییر می‌دهد و

- 1- Normalized Difference Vegetation Index
- 2- Ratio Vegetation Index
- 3- Soil Adjusted Vegetation Index



شکل ۴- نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه مربوط به سال ۱۳۶۶ (a) و ۱۳۹۴ (b)
Figure 4- Land use maps of the study area for the years 1987 (a) and 2015 (b)

نتایج و بحث

در این تحقیق، برای طبقه‌بندی از ۳ الگوریتم حداقل فاصله، ماه‌لانویز و الگوریتم حداکثر شباهت استفاده شد. پس از انجام طبقه بندی کاربری‌ها در سال ۱۳۹۴ دقت کلی نقشه‌های کاربری اراضی با روش صحت کلی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که دقت کلی آنها در ارزیابی و شناسایی پدیده‌ها به ترتیب ۷۸/۵، ۸۳/۷ و ۸۷/۳ است. بنابراین روش الگوریتم حداکثر شباهت به عنوان روش مناسب برای طبقه‌بندی انتخاب شد. بدین ترتیب تصویر سال ۱۳۶۶ نیز با این روش طبقه‌بندی شد (شکل ۴). نتایج نشان داد که ۱۰ کلاس کاربری در منطقه مورد مطالعه وجود دارد.

با استفاده از روش مقایسه پس از طبقه‌بندی، تغییرات مربوط به کاربری‌های مختلف آشکارسازی شد. بررسی این تغییرات شامل کاهش‌ها، افزایش‌ها و تغییرات خالص برای هر طبقه و انتقال از یک طبقه به طبقه‌های دیگر است. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS برای حوضه کشف‌رود، مقدار تغییر بین هر یک از کاربری‌ها بین سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۹۴ محاسبه شد. در جدول ۲ مساحت هر یک از این کاربری‌ها و درصد اختصاص یافته و همچنین مقدار و درصد تغییرات هر کلاس نشان داده شده است. نتایج نشان داد طی ۲۸ سال مورد مطالعه، کاربری اراضی صخره‌ای و مراتع مشجر تغییر نداشت. بیشترین درصد تغییر مربوط به پهنه آبی، مرتع فقیر و اراضی مسکونی است که به ترتیب ۱۸۹، ۱۴۳ و ۵۰ درصد افزایش داشتند. بیشترین مقدار افزایش مساحت مربوط به مرتع فقیر با ۱۵۱۴ کیلومتر مربع و بیشترین مقدار کاهش مربوط به مراتع متوسط با ۱۲۷۸ کیلومتر مربع است. پس از بررسی‌های بیشتر تغییرات کاربری، مشخص شد که دلیل افزایش ۱۸۹ درصدی مساحت پهنه‌های آبی مربوط به سدسازی

هایی بوده که در این بازه زمانی (دوره سازندگی بین ۱۳۶۸ تا ۱۳۷۶) انجام شده است. افزایش درصد اراضی مسکونی و گسترش مرتع فقیر نیز به دلیل آغاز رشد چشم‌گیر و صعودی جمعیت در کشور می‌باشد. یکی از نکات مهم و حایز اهمیت افزایش مراتع فقیر در حوضه طی یک دوره ۲۸ ساله است که صدمه زیادی به منابع طبیعی وارد نموده است. طبق جدول ۲ همان‌طور که از جمع مقدار کاهش مرتع خوب و متوسط روشن است، با جمع مقدار افزایش مساحت مرتع فقیر تقریباً برابری می‌کند که حاکی از تغییر مرتع خوب و متوسط به مرتع فقیر در این سال‌ها است و حاکی از گسترش فعالیت‌های انسانی و بی‌توجهی به وضعیت منابع طبیعی است.

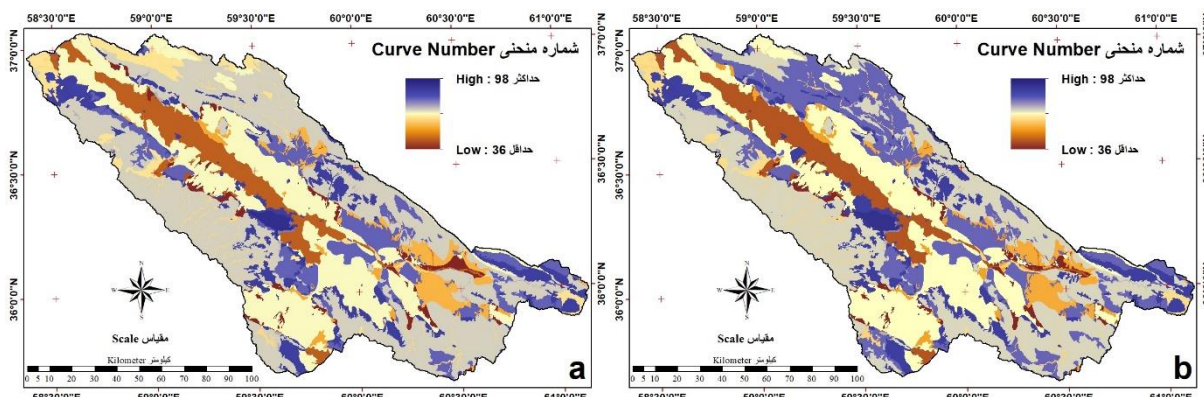
با تلفیق نقشه‌های گروه هیدرولوژیک خاک و کاربری اراضی در محیط ArcGIS و استفاده از جداول استاندارد، نقشه شماره منحنی برای سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۹۴ تهیه شد (شکل ۵). میانگین وزنی شماره منحنی در شرایط رطوبتی متوسط برای سال ۱۳۶۶، ۷۷/۵ واحد و برای سال ۱۳۹۴، ۷۸/۴ به دست آمد. با توجه به اینکه ویژگی‌های خاک و توپوگرافی، در کوتاه مدت تغییر نمی‌کند و جزو عوامل پایدار به حساب می‌آیند، در بازه مورد مطالعه ثابت در نظر گرفته شد. از آنجا که تنها نقشه کاربری اراضی برای این سال‌ها متفاوت است، بنابراین مقدار افزایش ۰/۹ واحدی در شماره منحنی، ناشی از تغییر کاربری اراضی بین سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۴ است.

برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در تحقیق حاضر از چهار واقعه سیل که در ایستگاه هیدرومتری پل خاتون- کشف‌رود که دارای بارش متناظر نسبتاً فراگیر بودند استفاده شد. تاریخ این وقایع شامل ۱۳۹۴/۰۸/۱۱، ۱۳۹۴/۱۲/۲۶، ۱۳۹۵/۰۱/۱۴ و ۱۳۹۵/۰۲/۳۰ بوده و دارای بارش تقریباً فراگیر بودند.

جدول ۲- تغییر مساحت کاربری اراضی بین سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۴

Table 2- Change of land use area from 1987 to 2015

کاربری اراضی Land use	مساحت (۱۳۶۶)		مساحت (۱۳۹۴)		مقدار تغییر	
	Area (1987) (km ²)	%	Area (2015) (km ²)	%	The amount of change (km ²)	%
Rocky اراضی صخره‌ای	65.67	0.39	65.67	0.39	0.00	0.00
Residential مناطق مسکونی	195.84	1.17	293.88	1.75	98.04	50.06
Water پهنه آبی	0.83	0.00	2.40	0.01	1.58	189.16
Irrigated cultivation کشت آبی	1417.56	8.45	1420.25	8.46	2.69	0.19
Garden کشت باغ	281.59	1.68	279.21	1.66	-2.38	-0.85
Dry farming کشت دیم	5762.94	34.35	5760.98	34.33	-1.96	-0.03
Good rangeland مرتع خوب	682.19	4.07	348.25	2.08	-333.95	-48.95
Poor rangeland مرتع فقیر	1056.83	6.30	2571.36	15.32	1514.54	143.31
Medium rangeland مرتع متوسط	7044.95	41.99	5766.39	34.37	-1278.56	-18.15
Wooded rangeland مرتع مشجر	270.51	1.61	270.51	1.61	0.00	0.00
Total جمع کل	16778.91	100.00	16778.91	100.00	0.00	0.00



شکل ۵- نقشه شماره منحنی منطقه مورد مطالعه مربوط به سال ۱۳۶۶ (a) و ۱۳۹۴ (b)

Figure 5- Curve Number maps of the study area for the years 1987 (a) and 2015 (b)

اعتبارسنجی مدل با استفاده از ورود میانگین پارامترهای بهینه شده و از طریق مقایسه داده‌های هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف سیل ثبت شده در تاریخ ۱۳۹۵/۰۲/۳۰ انجام شد. جدول ۴ نتایج اعتبارسنجی مدل را نشان می‌دهد.

پس از انجام مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، برای بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر هیدروگراف سیل رودخانه کشف‌رود طی ۲۸ سال بین سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۴ از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده شد. برای این منظور با ثابت در نظر گرفتن مشخصات بارش، مدل رقومی ارتفاع، نقشه گروه هیدرولوژیکی خاک و... با مقادیر بهینه شده ضرایب تلفات اولیه و زمان تأخیر و همچنین مقادیر شماره منحنی محاسبه شده، هیدروگراف سیلاب برای سال ۱۳۶۶ شبیه‌سازی شد و اختلاف بین دبی اوج، حجم و زمان رسیدن به دبی اوج سیل مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۵).

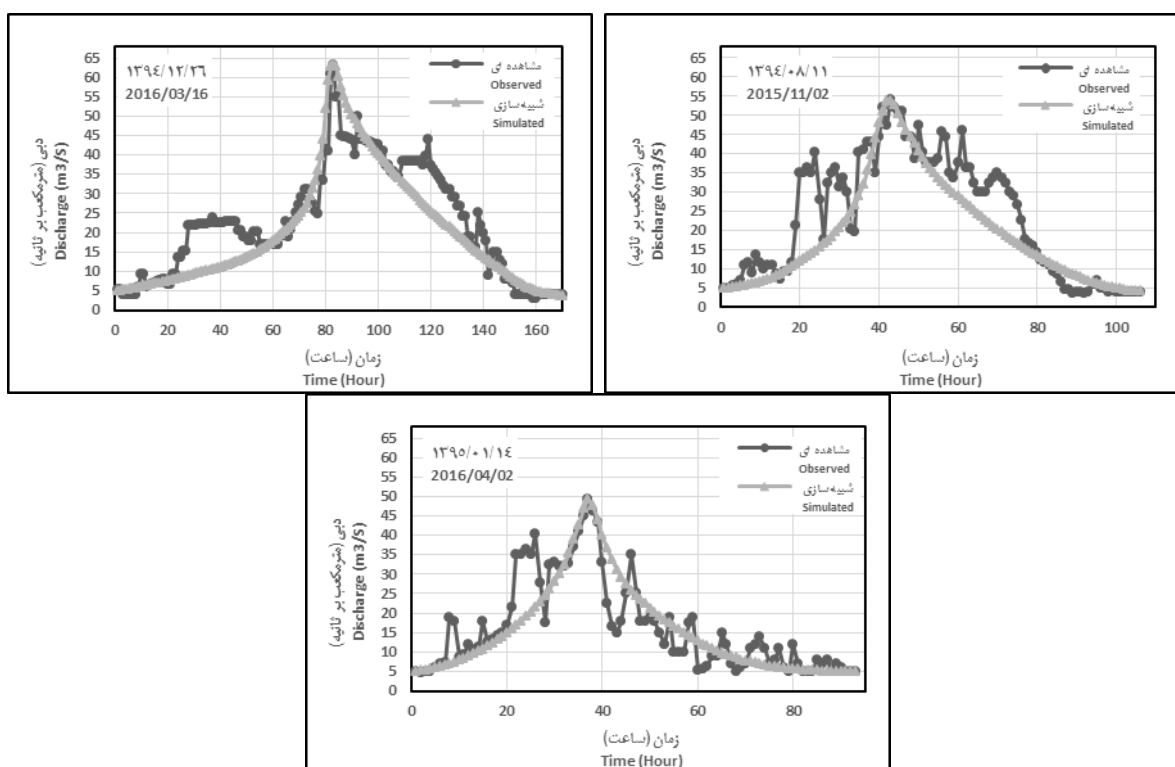
به منظور واسنجی، از سه رگبار اول استفاده شد و اطلاعات مربوط به رگبار همراه با داده‌های هیدروگراف مشاهده‌ای به مدل وارد شد. برای تخمین اولیه زمان تأخیر از روابط تجربی که برای برآورد زمان تمرکز ارائه شده (مانند کریپیچ، کالیفرنیا، چاو، و... SCS) کمک گرفته شد و سپس زمان تأخیر با استفاده از زمان تمرکز برآورد شد. تلفات اولیه به صورت فرضی برآورد شد و شماره منحنی در شرایط رطوبتی متوسط در طی بهینه‌سازی ثابت نگه داشته شد. سپس پارامترهای ورودی مدل با مقایسه و برازش هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، بهینه‌سازی شد که نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

نتایج مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای واقعه سیلاب مورخ ۱۳۹۴/۱۲/۲۶ در شکل ۶ آمده است. به منظور ارزیابی کارایی مدل پس از انجام عملیات واسنجی،

جدول ۳- بهینه‌سازی زمان تاخیر و جذب اولیه در وقایع مختلف

Table 3- Optimization of Lag time and initial abstraction in different events

تاریخ وقایع	زمان تاخیر (ساعت)	جذب اولیه (میلی‌متر)
Date of event	Lag time (hr)	Initial abstraction (mm)
۱۳۹۴/۰۸/۱۱	34.8	23.7
2015/11/02		
۱۳۹۴/۱۲/۲۶	36.4	24.8
2016/03/16		
۱۳۹۵/۰۱/۱۴	29.8	20.3
2016/04/02		
میانگین	33.7	22.9
Average		



شکل ۶- هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای سه واقعه بعد از واسنجی مدل HEC-HMS

Figure 6- Simulated and observed hydrograph of the three events after HEC-HMS model calibration

جدول ۴- بهینه‌سازی زمان تاخیر و جذب اولیه در وقایع مختلف

Table 4- Optimization of Lag time and initial abstraction in different events

عامل	مشاهده‌ای	شبیه‌سازی شده	اختلاف (درصد)
Parameter	Observed	Simulated	
دبی اوج سیل (متر مکعب بر ثانیه)	63.4	63.1	0.5
Flood peak (m ³ /s)			
حجم سیلاب (هزار متر مکعب)	13805.1	12300.3	10.9
Flood volume (1000m ³)			
زمان رسیدن دبی به اوج	2016/05/19-17:00	2016/05/19 – 17:00	0.0
Time to peak			

جدول ۵- اثر تغییر کاربری اراضی بر خصوصیات سیلاب در رودخانه کشف‌رود

Table 5- The effect of land-use changes on flood characteristics in the Kashafrud River

زمان دبی اوج (ساعت)	حجم رواناب (هزار متر مکعب)	دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه)						
			Flood peak (m ³ /s)			Flood volume (1000m ³)		
سال ۱۳۹۴	سال ۱۳۶۶	مقدار تغییر (درصد)	سال ۱۳۹۴	سال ۱۳۶۶	مقدار تغییر (درصد)	سال ۱۳۹۴	سال ۱۳۶۶	مقدار تغییر (درصد)
Year 1987	Year 2015	The change (%)	Year 1987	Year 2015	The change (%)	Year 1987	Year 2015	The change (%)
38.5	38.5		9098	10543	+13.7	46.2	54.1	+14.5
40.1	40.1		10430	12300	+15.2	52.4	63.1	+16.9
33.5	33.5		4369	4920	+11.2	21.8	25.2	+13.7
33.9	33.9		11404	13354	+14.6	57.9	68.5	+15.5
36.5	36.5		8825	10279	+13.7	44.6	52.7	+15.2

نتیجه‌گیری

عوامل متعددی در ایجاد سیل و خصوصیات آن مؤثر است. وقوع سیلاب تابع وقایع اقلیمی مانند مقدار، شدت و توزیع مکانی بارندگی و ویژگی‌های مختلف حوضه مانند مساحت، شیب، کاربری اراضی و... است. نتایج تحقیق گویای این است که استفاده از داده‌های سنجش از دور و تلفیق نتایج در سیستم اطلاعات جغرافیایی در ارزیابی تغییرات زمانی کاربری اراضی، به‌منظور آگاهی از نوع و درصد کاربری اراضی و میزان تغییرات آنها در منابع طبیعی بسیار کارآمد است. همچنین استفاده از داده‌های ماهواره‌ای لندست نسبت به سایر منابع برتری دارد. مهم‌ترین قابلیت‌های آن، یکپارچه و وسیع بودن، تنوع طیفی، تهیه پوشش‌های تکراری و ارزان بودن، آرشو بسیار غنی و قدیمی و... در مقایسه با سایر داده‌های ماهواره‌ای است. بنابراین استفاده از این داده‌ها در سطوحی وسیع مانند سطح حوضه کشف‌رود، نتایج خوبی ارائه داده و توصیه می‌شود (۲ و ۲۰). نتایج مقایسه سه روش طبقه‌بندی تصاویر شامل حداقل فاصله، ماهالانوبیز و حداکثر شباهت نیز نشان داد که دقت روش حداکثر شباهت از سایر روش‌ها بیشتر است که با نتایج کادیوگولری و باسکنت (۱۲)، رام و چوهان (۲۱) و سعادت و همکاران (۲۳) مطابقت دارد. با توجه به نتایج جدول ۴، مشخص شد که درصد خطای محاسباتی در دبی اوج هیدروگراف سیل حدود ۰/۵ درصد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل بهینه شده در این حوضه عملکرد بسیار مناسبی دارد و نتایج قابل قبولی در برآورد دبی اوج سیل خواهد داشت. از طرفی این مدل حجم سیلاب را با ۱۰/۹ درصد خطا برآورد کرده است و حاکی از داشتن دقت بسیار کمتر نسبت به دبی اوج برآوردی است که با نتایج شکری

کوچک و همکاران (۲۹) و شنانی هویزه و همکاران (۲۸) که در مطالعات خود عملکرد مدل HEC-HMS را در برآورد هیدروگراف سیل حوضه بررسی کردند، مطابقت دارد. طبق نتایج جدول ۵، در تمامی وقایع تغییرات کاربری اراضی باعث افزایش دبی اوج و حجم سیلاب در طول ۲۸ سال مورد بررسی شده است. به طور میانگین میزان دبی اوج سیل در سال ۱۳۹۴ نسبت به دبی اوج سیل در سال ۱۳۶۶، ۱۵/۲ درصد افزایش داشته است و به طور مشابه میزان حجم سیلاب نیز در دوره مورد مطالعه، ۱۳/۷ درصد افزایش یافت. به طور کلی می‌توان گفت تغییرات کاربری اراضی با ایجاد تغییراتی در میزان نفوذپذیری خاک و به تبع آن تغییر در شماره منحنی حوضه، موجب ایجاد تغییراتی در دبی اوج و حجم سیلاب می‌شود که با نتایج محققانی مانند دو و همکاران (۶)، بهنام و همکاران (۳)، سانپال و همکاران (۲۶) و شنانی هویزه و همکاران (۲۸) هماهنگی دارد. در کل می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در سال‌های اخیر در حوضه کشف‌رود تغییرات کاربری اراضی ناشی از دخالت‌های انسانی با تأثیرگذاری بر خصوصیات سیلاب باعث افزایش خطر سیل در حوضه کشف‌رود شده است و بایستی با مدیریت کاربری اراضی و جلوگیری از تخریب بیشتر منابع طبیعی، مانع تشدید روند سیل‌خیزی منطقه شد.

سپاسگزاری

تحقیق حاضر با حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی (طی قرارداد شماره ۳۲۲۷) انجام شده است و لذا در اینجا برای در اختیار قراردادن اطلاعات و پوشش دادن هزینه‌های این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

- 1- Alishah Aratboni F., Arzani H., Hosseini S.Z., Babaie Kafaki S., and Mirakhorlou Kh. 2013. Rangelands vegetation cover mapping using IRS-LissIII data image processing (Case study: Sorkh Abad Basin, Mazandaran). *Iranian Journal of Range and Desert Research* 20(3): 454-462. (In Persian with English abstract)
- 2- Arekhi S. 2015. Detecting Land cover/Land use Changes by Object-oriented Processing of Satellite Images using IdrisiSelva Software (Case study: Abdanan Region). *The Journal of Geographical Data (SEPEHR)* 24(95): 61-62. (In Persian with English abstract)
- 3- Behnam P., Samadi H., Shayannejad M., and Ebrahimi A. 2013. Evaluation of impacts of land use changes on Zayandehroud river flood hydrograph in Isfahan region. *Journal of Water and Wastewater* 24(4): 103-111. (In Persian with English abstract)
- 4- Costache R., Fontanine I., and Corodescu E. 2014. Assessment of surface runoff depth changes in Sărățel River Basin, Romania using GIS techniques. *Central European Journal of Geosciences* 6(3): 363-372.
- 5- Daei S., Salari Jazi M., Ghorbani K., and Meftah Halaghi M. 2018. Improvement of Estimation of Flood Hydrograph Using Modified Curve Number (non-linear Ia-S) Model. *Iranian Journal of Ecohydrology* 5(3): 931-939. (In Persian with English abstract)
- 6- Du J., Qian L., Rui H., Zuo T., Zheng D., Xu Y., and Xu C.Y. 2012. Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhuai River basin. *Journal of Hydrology* 464-465(0): 127-139.
- 7- Ghaffari Gilandeh A., Sobhani B., and Babakandi E. 2017. Estimate of curve number and runoff height in Arc-GIS (Case study: Meshkinshahr City). *Hydrogeomorphology* 3(9): 159-175. (In Persian with English abstract)
- 8- Ghoie S. 2016. Erosion risk assessment using network analysis and geographic information system in Cham Bagh Khorramabad watershed. M.Sc. thesis. Department of Geomorphology, Shahid Beheshti University. 130 pp. (In Persian with English abstract)
- 9- Hadjimitsis D.G., Papadavid G., Agapiou A., Themistocleous K., Hadjimitsis M., Retalis A., Michaelides S., Chrysoulakis N., Toullos L., and Clayton C. 2010. Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: impact on vegetation indices. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10(1): 89-95.
- 10- Hejazi A., and Mezbani M. 2017. The Estimation of Runoff Volume and Maximum Discharge by Using Curve Number (CN) Method (Case Study in Darrehshahr Drainage Basin). *Hydrogeomorphology* 2(5): 63-81. (In Persian with English abstract)
- 11- Hoseinzadeh M.M., Nosrati K., and Imeni S. 2018. Determining curve number and estimating runoff yield in Hesarak catchment. *Researches in Geographical Sciences* 18(51): 133-150. (In Persian with English abstract)
- 12- Kadioğullari A.I., and Başkent E.Z. 2008. Spatial and temporal dynamics of land use pattern in Eastern Turkey: a case study in Gümüşhane. *Environmental Monitoring and Assessment* 138(1-3): 289-303.
- 13- Kavosh Pey Mashhad Co. 2015. Updating studies of water resources balance in the Ghareghom basin. Part 2. Regional Water Company of Khorasan Razavi. 112p. (In Persian with English abstract)
- 14- Lagadec L.R., Patrice P., Braud I., Chazelle B., Moulin L., Dehotin J., and Breil P. 2016. Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method. *Journal of Hydrology* 541: 495-509.
- 15- Mahdavi M. 2014. Applied hydrology. 8th edition. Tehran University Press. (In Persian with English abstract)
- 16- Mohammadi Sh., Habashi Kh., and Pourmanafi S. 2018. Monitoring and prediction land use/ land cover changes and its relation to drought (Case study: sub-basin Parsel B2, Zayandeh Rood watershed). *RS & GIS for Natural Resources* 9(1): 24-39. (In Persian with English abstract)
- 17- Moharampour E., Nazarnejad H., and Babaei S. 2018. Estimation of the Curve Number and Runoff Height Using Arc GIS Software with the Arc CN-Runoff Tool (Case study: Nazluchai Basin of Urmia). *Watershed Management Research* 31(2): 41-49. (In Persian with English abstract)
- 18- Mostafazadeh R., Mirzaei Sh., and Nadiri P. 2018. Curve Number Determination using Rainfall and Runoff Data and its Variations with Rainfall Components in a Forested Watershed. *Journal of Water and Soil Science* 21(4): 15-28. (In Persian with English abstract)
- 19- Nohegar A., Kazemi M., Roshan M., and Rezaei P. 2012. Survey of the Effects of Land use Variation on Flooding Potential in Tang-e-Bostanak Watershed. *Environmental Erosion Research Journal* 2(1): 28-41. (In Persian with English abstract)
- 20- Omidvar K., Narangifard M., and Abbasi H. 2015. Detecting the Changes of land uses and vegetation cover using remote sensing in Yasooj city. *Geography and Territorial Spatial Arrangement* 5(16): 111-126. (In Persian with English abstract)
- 21- Ram B., and Chauhan J.S. 2009. Application of Remote Sensing and GIS to assess Land Use Changes in Jhunjhun District of Arid Rajasthan. *Journal of Indian Society Remote Sensing* 37(4): 671-680.
- 22- Rostam Zadeh H., Darabi S., and Shahabi H. 2017. Change detection of Oak forests using object-based classification of multitemporal Landsat imageries (Case study: forests of the northern province of Ilam). *RS & GIS*

- for Natural Resources 8(2): 92-110. (In Persian with English abstract)
- 23- Saadat H., Adamowski J., Bonnell R., Sharifi F., Namdar M., and Ale-Ebrahim S. 2011. Land use and land cover classification over a large area in Iran based on single date analysis of satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66(5): 608-619.
- 24- Sajikumar N., and Remya R.S. 2015. Impact of land cover/land use change on runoff characteristics. *Journal of Environmental Management* 161: 468-460.
- 25- Salih A.A., and Hamid A.A. 2017. Hydrological studies in the Nile State in Sudan. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 20(1): 31-38.
- 26- Sanyal J., Densmore A.L., and Carbonneau P. 2014. Analysing the effect of land-use/cover changes at sub-catchment levels on downstream flood peaks: A semi-distributed modelling approach with sparse data. *CATENA* 118: 28-40.
- 27- Satheeshkumar S., Venkateswaran S., and Kannan R. 2017. Rainfall-runoff estimation using SCS-CN and GIS approach in the Pappiredipatti watershed of the Vaniyar sub basin, South India. *Modeling Earth Systems and Environment* 3(24): 1-8.
- 28- Shanani Hoveyze S.M., Zarei H., and Ramezani H. 2017. The Effect of Land-Use Changes on Flood Hydrograph (Case Study: Abolabbas Basin). *Journal of Irrigation Sciences and Engineering* 40(1): 219-229. (In Persian with English abstract)
- 29- Shokri S., Behnia A.A., Radmanesh F., and Akhond A.M. 2012. Watershed Flood Hydrograph Estimation Using HEC-HMS and Geographic Information System (Case Study: Idanak Watershed). *Journal of Watershed Management Research* 3(5): 63-80. (In Persian with English abstract)
- 30- Suriya S., and Mudgal B.V. 2012. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed-A case study. *Journal of Hydrology* 412-413: 210-219.
- 31- Vinithra R., and Yeshodha L. 2016. Rainfall-runoff modelling using SCS-CN method: a case study of Krishnagiri District, Tamilnadu. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 5(3): 2319-7064.
- 32- Ward P.J., Eisner S., Florke M., Dettinger M.D., and Kummer M. 2014. Annual flood sensitivities to El Nino-southern oscillation at the global scale. *Hydrology and Earth System Sciences* 18(1): 47-66.



The Effect of Land Use Changes on the Flood Hydrograph in the Kashaf-Rood River by Analyzing of SCS-CN Results

M. Mahmoodi¹- M. Honarmand^{2*}- F. Naseri³- S. Mohammadi⁴

Received: 09-12-2019

Accepted: 28-01-2020

Introduction: Runoff estimation is one of the main concerns of hydrologists and plays a key role in various engineering calculations and designs. Many factors such as climate, topography, soil properties, land cover, etc, are involved in producing surface runoff. Land use and land cover changes have a direct impact on the hydrological cycle in the ecosystem. The most common model of surface runoff estimation is the curve number model developed by the US Soil Conservation Service (SCS-CN). Accurate estimation of its important parameters increases its precision and performance. Land use is one of the most important parameters of this model. Remote sensing (RS) and geographic information system (GIS) technologies are used in order to increase its speed and accuracy of estimation. One of the problems that have occurred in the Kashaf-Rood Basin is the extensive land use changes that may cause changes in peak discharge and surface runoff volume. In this study, due to the great importance and impact of land cover change on increasing flood risk, the effects of land use change over 28 years (from 1987 to 2015) on flood hydrograph characteristics were investigated.

Materials and Methods: The Kashaf-Rood basin is a part of the Ghara-Ghum basin. The total area of the basin is 16779 square kilometers with the highest and lowest elevation of 3235 and 378 meters above sea level, respectively. The length of the Kashaf-Rood River from the highest point to the outlet of the basin is about 374 km and its average and gross river slope are 0.0028 and 0.0043 m/m, respectively. The digital elevation model was used to calculate the topographical properties, hydrological properties and geometrical corrections required on satellite images. In this research, the data of the Global Digital Elevation Model (ASTER) with a spatial accuracy of 30 m was used. Also, the soil hydrologic group map prepared in Ghara-Ghum water resources balance studies was used. Since no land use change occurs in the short term and can be detected at long intervals, a 28-year interval was chosen for satellite imagery. In general, five images of Landsat satellite are needed for full coverage of the Kashaf-Rood Basin. For the oldest data, Landsat 5 images and for the latest data, Landsat 8 images were used. ERDAS IMAGINE 2014 software was used to digitally process satellite images. The images were classified in three methods: The Minimum distance, Mahalanobis distance and the Maximum Likelihood. In order to select the appropriate method, after applying different classification algorithms for the image of 2015, the accuracy of their classification was evaluated and, the image of 1987 was also classified based on the selected method. By combining soil hydrological group and land use map derived from Landsat satellite imagery using ArcGIS 10.3 software, the curve number maps for 1987 and 2015 were prepared. In the present study, the US soil conservation service standard curve number method (SCS-CN) was used to calculate the amount of rainfall and losses in the HEC-HMS model. For the calibration of the HEC-HMS model, four flood events at the bridge of Khatun Kashaf-Rood hydrometric station with relatively concomitant precipitation were selected. Three flood events were used for calibration and one flood event for validation.

Results and Discussion: The images were classified into three methods: The Minimum distance, Mahalanobis distance, and the Maximum Likelihood. Comparing the results of these three methods showed that their overall accuracy in evaluating and identifying land use was 78.5, 83.7 and 87.3, respectively. Thus, the maximum likelihood algorithm was used to classify the images and the image of the year 1987 was classified with this method. Ten land use classes were identified in the study area. The results showed that during the 28 years of study, the area of rocky lands and rangelands did not change. The highest percentage of change was due to water zones, poor rangelands and residential lands, which increased by 189, 143 and 50 percent, respectively. The highest amount of increase in the area occurred in the poor rangelands, which 1514 km², and the highest decrease occurring in moderate rangelands which is 1278 km². By combining soil hydrological group maps and land use maps in ArcGIS software and using standard tables, the curve number maps for 1987 and 2015 were prepared. The weighted average of the curve number in the mean moisture conditions for 1987 and 2015 was

1, 2, 3 and 4- Ph.D. Student and Associate Professors of Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: mehonarmand167@yahoo.com)

77.5 and 78.4 units, respectively. After performing the calibration and validation steps, the HEC-HMS hydrological model was used to investigate the impact of land-use change on the flood hydrograph of the Kashaf-Rood River between 1987 and 2015. According to the results, in all four events which were studied, land-use changes have increased the peak of discharge and the flood volume over the 28 years of study. On average, the peak flood discharge in 2015 was 15.2% higher than the peak flood discharge in 1987, and similarly, the flood volume increased by 13.7% during the study period.

Conclusion: In conclusion, it can be derived that in recent decades, land-use changes which were caused by human interference, affected the flood characteristics and increased the risk of flooding in the Kashaf-Rood river. Therefore, land use must be managed and prevented further destruction of natural resources to prevent flooding in the area.

Keywords: Flood, Curve number, Landsat, HEC-HMS

طبقه‌بندی کاربری اراضی و تعیین الگوی تغییرات سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ با استفاده از داده‌های

سنجده OLI

سید بهروز حسینی^۱ - علی صارمی^{۲*} - محمد حسین نوری قیداری^۳ - حسین صدقی^۴ - علیرضا فیروزفر^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹

چکیده

بررسی تغییرات کاربری اراضی، یکی از مهم‌ترین جنبه‌های مدیریت منابع طبیعی و بازنگری در تغییرات محیطی است. با افزایش نیاز به تأمین مواد غذایی و ملزومات زندگی بشر، تغییراتی در سطح زمین ایجاد می‌شود که می‌تواند موجب تخریب اراضی و منابع موجود در آن گردد. این تغییرات، در اثر تقابل نیازهای همیشگی جوامع انسانی و محیطی با زمین ایجاد می‌شود. در تحقیق حاضر با استفاده از تکنیک سنجش از دور، تغییرات کاربری اراضی منطقه طارم (در شمال غرب ایران) در بازه زمانی بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ با استفاده از تصاویر لندست ۸ مورد پایش قرار گرفت. تصحیحات اتمسفری به وسیله الگوریتم FLAASH در نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام شد و از روش طبقه‌بندی نظارت شده حداکثر درست‌نمایی، برای تولید نقشه های کاربری اراضی در پنج طبقه (شامل اراضی بایر، جنگل و باغ، پهنه سنگی، زراعت و پیکره آبی) استفاده گردید. نتایج نشان داد که نقشه‌های تهیه شده برای سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۶، به ترتیب دارای دقت کلی ۹۲/۱۶ و ۸۹/۱۹ درصد بود. آماره کاپای این تصاویر نیز به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۸۵ محاسبه شد که در محدوده قابل قبول می‌باشد. در منطقه طارم، بیش‌ترین مساحت محدوده مطالعاتی، متعلق به پهنه کوهستانی است (بیش از ۷۰ درصد مساحت منطقه) و مشخص گردید که بیش‌ترین تغییرات در کاربری اراضی (کاهش ۸۳ کیلومتر مربع)، متعلق به اراضی بایر و مراتع بود که در طی سه سال، تبدیل به باغات گردیده و در آنها درختکاری (عموماً درخت زیتون، گردو و انار) انجام شده است. علت تغییرات ذکر شده، رهاسازی آب از سد بالادست منطقه مورد مطالعه بود.

واژه‌های کلیدی: آماره کاپا، تصاویر ماهواره‌ای، حوضه طارم، لندست ۸، نرم‌افزار ENVI

مقدمه

به جنگل‌زدایی، از دست رفتن تنوع گونه‌های زیستی، گرمایش جهانی و افزایش تعداد سیلاب‌های فاجعه بار می‌گردد (۶۰ و ۷۲). بنا به گفته ریس (۶۰)، مشکلات زیست‌محیطی اغلب با تغییرات LULC مرتبط است و تأثیرات تغییرات کاربری اراضی بر پایدار بودن اکوسیستم‌ها، در تحقیقات و مطالعات تغییرات جهانی، به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه واقع شده است. به‌نظر می‌رسد که اقدامات و فعالیت‌های انسانی، به بزرگ‌ترین عامل تغییرات در وضعیت فعلی سطح زمین، منجر شده است. تغییرات در پوشش سطح زمین، سبب تغییر در تعادل انرژی، چرخه آب در سطح محلی، منطقه‌ای و جهانی می‌شود و موجب عدم پایداری دسترسی به منابع طبیعی و فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی می‌گردد (۶۹). بنابراین، داده‌هایی که از بررسی تغییرات در کاربری اراضی تهیه می‌گردد، می‌تواند اطلاعات مهم و حیاتی، برای تصمیم‌گیری‌های بهتر در مورد مدیریت منابع زیست‌محیطی و منابع آب را فراهم کند (۳۲) جمعیت در حال افزایش و رشد نیازهای اجتماعی و اقتصادی، سبب افزایش فشار بر اراضی موجود و تغییرات کاربری آن‌ها می‌شود. این فشار، منجر به ایجاد تغییرات غیرقابل کنترل و برنامه

مدیریت کاربری اراضی و تغییرات پوشش زمین، به‌عنوان ابزار اصلی و مهم برای کنترل تغییرات در مقیاس فضایی و زمانی مختلف، می‌باشد (۴۱). تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی (LULC)، فرایندی در حال گسترش می‌باشد که به‌وسیله اقدامات انسانی، هدایت می‌شود و در بسیاری از موارد، تغییراتی که انسان‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، هدایت می‌کند (۲). این تغییرات به‌طور عمده منجر

۱، ۲ و ۴ - به‌ترتیب دانشجوی دکتری، استادیار و استاد گروه مهندسی منابع آب،

دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

(*) - نویسنده مسئول: Email: Ali.Saremi.srbiau@gmail.com

۳ - استادیار گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

۵ - استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

DOI: 10.22067/jsw.v34i2.74878

6- Land Use Land Cover

ریزی نشده در پوشش اراضی و کاربری آنها می‌گردد (۷۱، ۴۲، ۲۵ و ۲). تغییرات کاربری اراضی و الگوی این تغییرات، یک فرآیند پویا و پیوسته است (۵۵)، بنابراین، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه این موضوع، همراه با بررسی پیامدهای محیط زیستی و آثار اجتماعی-اقتصادی آن، در مقیاس فضایی و زمانی، می‌تواند به موضوع مهم و جذابی، تبدیل شود (۴۴). علاوه بر عوامل بیان شده، شرایط و ویژگی‌های اجتماعی-اقتصادی نیز، می‌تواند به تغییرات قابل توجهی در پوشش زمین و کاربری اراضی، کمک کند (۸ و ۷۱). تغییرات LULC عموماً ناشی از عدم مدیریت زمین‌های کشاورزی، اراضی واقع شده در محدوده‌های شهری، دامنه کوهستان‌ها، مراتع و جنگل است که منجر به مشکلات زیست‌محیطی شدید، مانند زمین‌لغزش، سیل و غیره می‌شود. بنابراین، مطالعات در مورد تغییرات در کاربری اراضی و پوشش زمین‌های مختلف برای نظارت کلی بر محیط‌زیست، امری مهم و ضروری است (۴۰).

با توجه به اینکه تغییرات در کاربری اراضی و پوشش زمین، یک روند اکولوژیکی قابل توجه در سطح محلی و جهانی است، ممکن است پیامدهای مهمی برای تغییرات آینده در محیط زیست و تبعات جبران‌ناپذیر داشته باشد (۲). از این رو، اطلاعات مربوط به تغییرات LULC، می‌تواند نقش حیاتی در مدیریت منابع طبیعی ایفا کند. مطالعات پیشین و مطالعاتی که در حال حاضر، توسط سازمان‌ها و مؤسسات تحقیقاتی در سراسر جهان انجام می‌شود، عمدتاً در مورد موضوع تغییرات LULC^۱ و منابع تامین داده‌های مورد نیاز برای این قبیل از مطالعات (مانند فناوری سنجش از دور)، متمرکز شده است. همان‌طور که توسط اولبریچ و هکندورف (۶۷)، بیان شده است، تصاویر حاصل از سنجش از دور، مهم‌ترین منابع برای پایگاه داده سامانه اطلاعات جغرافیایی^۲ (GIS) می‌باشد. GIS یک محیط قابل انطباق برای جمع‌آوری داده‌ها، ذخیره‌سازی، نمایش و تجزیه و تحلیل داده‌های دیجیتالی مانند نقشه‌های LULC و از ملزومات مهم برای تشخیص تغییرات کاربری اراضی می‌باشد. GIS، اطلاعات دقیق و مناسبی را از نحوه توزیع فضایی (مکانی) تغییرات LULC در مناطق بزرگ فراهم می‌کند (۱۵ و ۷۴). روش‌های مختلف و متعددی برای کشف و ارزیابی LULCC^۳، مورد استفاده محققان مختلف، قرار گرفته است. در میان این روش‌ها، سنجش از دور (RS^۴) و تکنیک GIS، به‌طور گسترده‌ای توسط محققان در زمینه مطالعه کاربری اراضی و بررسی تغییرات مکانی و زمانی آن، مورد استفاده قرار گرفته است (۹، ۳۲، ۴۸ و ۱۸). لمبین و همکاران (۴۱)، جنگل‌زدایی در

مناطق گرمسیری، اصلاح مراتع، استحکام کشاورزی، شهرنشینی و جهانی‌سازی را به‌عنوان عوامل اصلی تغییرات پوشش زمین و کاربری اراضی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی، بیان کردند. اصغری سراسکانرود و همکاران (۷)، به بررسی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از RS و GIS پرداختند. آنها با کمک تصاویر OLI لندست ۸، با الگوریتم طبقه بندی نظارت شده، نقشه کاربری اراضی دو سال ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶ را برای منطقه شهرستان نیر (اردبیل) تهیه نمود. صحت نتایج آنها با کمک پارامتر ضریب کاپای بیش از ۰/۸۵ تأیید شد. مطالعه نحوه تغییرات کاربری اراضی با کمک مجموعه تصاویر ماهواره لندست ۷ و ۸ برای دوره زمانی ۱۹۸۹-۲۰۱۵ در حوضه آبریز سد علویان (مراغه) نشان داده است که علاوه بر افزایش اراضی باغی، تبدیل اراضی مرتعی پر تراکم به مراتع کم‌تراکم و زراعت دیم، به عنوان مهم‌ترین تغییرات منطقه‌ای است که می‌تواند بر میزان آسیب‌پذیری و افزایش فرسایش آن مؤثر باشد (۲۴).

با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت شده، نقشه کاربری اراضی منطقه حوضه آبخیز سد گاوشان (کردستان) توسط محمودی و امین‌خواه (۴۶) تهیه شد. نتایج مطالعه آنها نشان داد که با کمک تصاویر ماهواره لندست ۸ و بر اساس نمونه‌های تهیه شده از نرم‌افزار گوگل ارث، می‌توان با دقت کلی بیش از ۷۸ درصد، کلاس‌های مختلف کاربری و پوشش اراضی مانند جنگل، باغ و مرتع را تفکیک نمود. کریمی فیروزجایی و همکاران (۳۶)، به پایش و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی به‌منظور بررسی گسترش شهر بابل پرداختند. آنها با کمک تصاویر چند زمانه ماهواره لندست، توسط الگوریتم حداکثر مشابهت، اراضی منطقه را طبقه‌بندی نموده و بیان نمودند که تغییرات کاربری اراضی، روند رو به رشدی را در توسعه شهر و تخریب اراضی زراعی و فضای سبز حاشیه شهر دارد. پایش تغییرات کاربری اراضی و مدل‌سازی آن با کمک RS و GIS، بر اساس داده‌های ماهواره لندست ۷ و ۸، در مقیاس حوضه ای در منطقه تایلند، نشان داد که با آماره دقت کلی بیش از ۸۰ درصد، می‌توان تغییرات کلاس‌های زراعی و باغی را رصد نمود (۱۶). ال‌بیل‌بیلی^۵ (۵)، به پایش مکانی گسترش مناطق شهری عمان (اردن) با کمک سنجش از دور پرداخت و با مقایسه تصویر سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۱۷، بر اساس الگوریتم نظارت شده، اعلام نمود که گسترش مناطق شهری با نرخ متوسط سالانه ۱/۷۹، موجب کاهش اراضی زراعی، پهنه کوه و سنگی شده است.

فشارهای افزایشی بر منابع طبیعی و محیط زیست در حوضه طارم، از جمله افزایش تولید محصولات گیاهی و کشاورزی (مانند سیر، کرفس، زیتون و انار)، همزمان با افزایش نرخ جمعیت، منجر به

- 1- Land Use and Land Cover
- 2- Geographical Information System
- 3- Land Use and Land Cove Change
- 4- Remote Sensing

شیب شدید است. در حقیقت، طارم یک منطقه کوهستانی است (۲۰)، که ارتفاع آن از ۳۰۰ تا ۲۴۰۰ متر (نسبت به سطح دریا) با مساحت ۵۲۲۰ کیلومتر مربع است (شکل ۱).

بررسی آمار بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در منطقه (سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۷)، نشان می‌دهد که بارندگی بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر (ارتفاعات شمالی) متغیر می‌باشد و متوسط سالانه بارش، برابر با ۳۵۶ میلی‌متر است (۶۶). قابل ذکر است که متوسط بارندگی برای ایران ۲۳۲ میلی‌متر می‌باشد (سایت دفتر مطالعات پایه منابع آب^۲). حوضه طارم، ناحیه‌ای دشتی-کوهستانی محدود به دو رشته کوه است که رودخانه اصلی و گذرنده از آن با نام قزل‌اوزن، در جهت شمال‌غربی و جنوب‌شرقی آن، جریان دارد. در این مرز و بوم، طیف گسترده‌ای از جریان‌های سطحی کم‌عمق (مسیل‌های فصلی) تا عمیق جاری می‌باشد که جریان اصلی آن از ایستگاه هیدرومتری استور در نزدیکی شهر میانه، تا ایستگاه هیدرومتری گیلوان، گسترده شده است (۶۶). شکل ۲، مسیل‌های زهکشی را نشان می‌دهد. این مسیل‌ها، با استفاده از ابزار basin موجود در محیط Arc GIS ترسیم شد که ورودی آن، نقشه رقومی سنجنده ماهواره ASTER بود.

منطقه طارم، انواع مختلفی از محصولات زراعی (بیش از ۵۰ نوع محصول)، مانند زیتون، انار، سیر، برنج و کرفس تولید می‌کند. در بخش مرکزی طارم، میزان تولید محصولات زراعی، برابر بیش از ۱۳۳۰۰۱ تن می‌باشد و سهم منطقه مطالعاتی در زمینه تولیدات کشاورزی به بیش از ۵۰ درصد از سهم تولیدات استان می‌رسد (سایت مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی، سیمای کشاورزی استان^۳). با توجه به شرایط آب و هوایی مناسب برای کشاورزی، کاربری اراضی و نوع پوشش زمین، به سرعت تغییر نموده است.

داده‌های مورد استفاده

تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا، که توسط USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) از ماهواره لندست ۸ برای سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۷ ارائه شده است، برای شناسایی کاربری اراضی و پوشش گیاهی زمین مورد استفاده قرار گرفت. دو تصویر در ردیف ۱۶۶ و مسیر ۳۴ و ۳۵ منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد. پس از انجام تصحیحات اتمسفری و تأیید صحت زمین‌مرجع بودن تصاویر، آنها با یکدیگر ادغام شدند. سایر مواد مورد استفاده در تحقیق، عبارتند از: عکس هوایی از منطقه (تهیه شده از اداره جهاد کشاورزی زنجان)، داده‌های برداشت زمینی (توسط GPS)، نقشه‌های توپوگرافی استاندارد و نقشه‌های Google Earth.

تغییرات گسترده‌ای در نوع پوشش زمین‌های لخت و چراگاه‌های طبیعی شده است. این تغییرات، در نهایت پوشش طبیعی اراضی را دچار تحول و دگرگونی کرده و پوشش طبیعی اراضی را به کاربری های مختلف، تبدیل می‌کند. تبدیل اراضی طبیعی، به زمین‌هایی با کاربری مورد استفاده ساکنین در منطقه مورد مطالعه، تأثیرات عظیم و قدرتمندی بر زیستگاه‌های طبیعی، طبقات و گونه‌های مختلف گیاهی و حیوانی منطقه دارد و همان‌طور که توسط اسلام^۱، اشاره شده است، این قبیل تغییرات ناگهانی، تهدیدی برای اکوسیستم شکننده حوضه های آبریز مختلف است (۳۱). در منطقه طارم، تاکنون مطالعاتی برای بررسی تأثیر عدم مدیریت اراضی بر تخریب آنها و همچنین، بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی، بر ویژگی‌های اقلیمی، قدرت تولید سیلاب، فرسایش و تخریب خاک صورت نگرفته است. بنابراین، اطلاعات ما در مورد تغییرات کاربری اراضی در منطقه طارم و تأثیر آن بر اکوسیستم اطراف آن، بسیار محدود است. از اینرو، در این مطالعه با فرض اینکه سال ۱۳۹۳ به عنوان سال پایه برای انجام تحقیق است، تغییرات LULC را از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ بررسی گردیده و از طریق انجام این فرایند، تغییراتی را که در کاربری اراضی و پوشش آنها رخ داده است، شناسایی شده است. قابل ذکر است که منطق انتخاب دوره زمانی ذکر شده، این موضوع بود که بنا به اظهار کارشناسان شرکت آب منطقه‌ای زنجان، در این محدوده نسبت به سال‌های اخیر و حداقل در دوره ۱۰ ساله گذشته، در این سال‌ها، تغییرات عمده در پوشش گیاهی و کاربری اراضی اتفاق افتاده است. در این تحقیق، از تکنیک‌های RS و ابزار GIS برای کشف، تجزیه و تحلیل LULCC با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در منطقه طارم، با هدف پاسخ به سوال «کاربری اراضی منطقه طارم در طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ چه تغییراتی داشته است؟» استفاده شد.

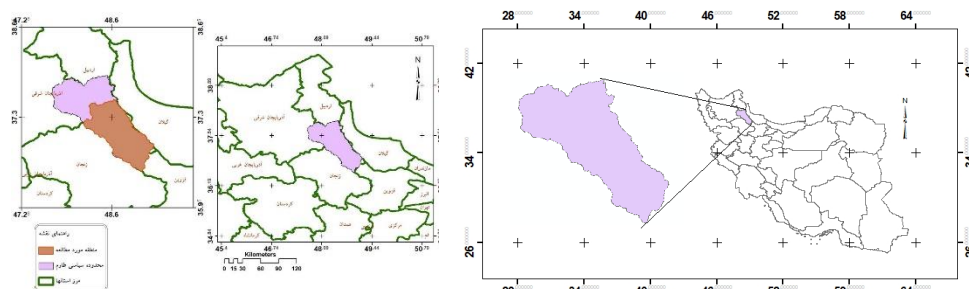
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

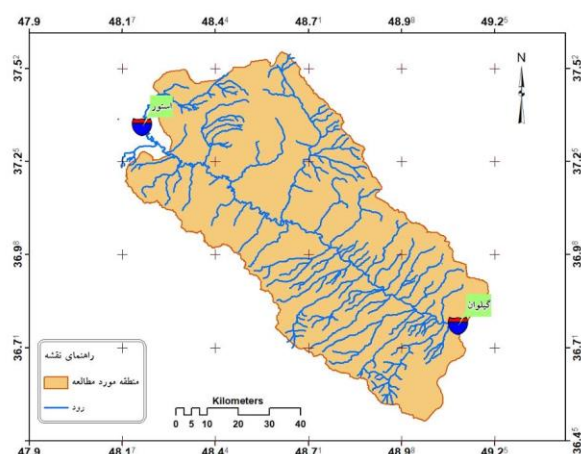
حوضه مطالعاتی طارم (بین ۴۸° و ۴۹° شمالی و ۴۸° و ۴۹° شرقی)، در محدوده‌ای که محدوده به چهار استان یعنی زنجان، گیلان، اردبیل و آذربایجان شرقی می‌باشد، قرار دارد. منطقه مذکور، از بخش جنوبی، محدود به استان‌های زنجان و از بخش شمالی، محدود به استان اردبیل است. در حالی که این حوضه توسط گیلان از سمت شرق محدود شده است، آذربایجان شرقی قسمت‌های غربی حوضه مطالعاتی طارم را پوشش می‌دهد (۲۰). بخشی از حوضه طارم که در این پروژه به عنوان محدوده مطالعاتی در نظر گرفته شده است، شامل دشت‌های کم ارتفاع و کوه‌های بلند با دامنه‌هایی دارای

2- http://wrs.wrri.ir/m3/gozaresh_print.asp

3- <https://zanrrc.ir>



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه در نقشه ایران
Figure 1- Study Area in Iran map



شکل ۲- منطقه مطالعاتی طارم و رودخانه‌های جاری
Figure 2- Study area and streams

دریافتی جدا گردید. قابل ذکر است که در این مطالعه، تصحیح اتمسفری با استفاده از الگوریتم FLAASH انجام شد (۴۵).

روش شناسایی و تشخیص تغییرات کاربری اراضی

همانطور که قبلاً ذکر شد، هدف بررسی کاربری اراضی و پوشش گیاهی زمین، کشف و شناسایی تغییرات آنها با استفاده از تصاویر دیجیتال و در تاریخ‌های مختلف می‌باشد (۵۴ و ۵۶). در این مطالعه، پنج کلاس LULC به‌عنوان کلاس‌های غالب منطقه در نظر گرفته شد (جدول ۱). از هر یک از کلاس‌های LULC، حداقل ۵۰۰ نمونه برای طبقه‌بندی تصاویر جمع‌آوری شد. حدود نیمی از این نمونه‌ها که به‌عنوان "نمونه‌های آموزشی" مورد استفاده قرار گرفت. بخش دیگر داده‌ها نیز، توسط نقشه‌های کاربری اراضی موجود و تصاویر گوگل ارث با زوم بالا تهیه شدند. بسیاری از محققین نیز، این روش را توصیه نموده‌اند (۴۷، ۵۲، ۱۴ و ۱۷).

مشخصات داده‌های لندست ۸، در جدول ۱ ارائه شده است. از مجموع این ۱۱ باند، فقط آن‌هایی که در کوتاه‌ترین طول موج (باند ۴-۱ و ۸) هستند، توسط چشم غیر مسلح، قابل مشاهده هستند و باقی آنها، در قسمت طیف نامرئی هستند. به منظور جلوگیری از اثر شرایط ابرناکی و کاهش دقت تصاویر، از گزینه تعیین میزان ابرناکی، به‌عنوان معیار انتخاب تصاویر در محدوده تاریخ مورد نظر استفاده شد، زیرا تصاویری که بخشی از آنها دارای ابر باشد، می‌تواند به‌طور قابل توجهی دقت کار طبقه‌بندی را کاهش دهد.

پردازش تصاویر^۱

نرم‌افزار ENVI 5.3 برای پردازش دو تصویر منتخب از منطقه، در این پژوهش استفاده شد. با استفاده از ابزار ترکیب باندها، باندهای حرارتی و طیفی (مرئی و نامرئی) از دو تصویر، به یک لایه تبدیل شدند و با استفاده از ابزار برش، منطقه مورد نظر، از کل تصویر

جدول ۱- نوارها (باندها)ی طیفی و مقادیر GSD مجموعه داده‌های لندست ۸ (۵۰)

Table 1- Spectral bands and GSD values of Landsat 8 datasets

مشخصات باندهای Landsat 8		
نام باند Band name	طول موج (میکرومتر) Band width (μm)	رزولوشن (متر) Resolution (m)
باند ۱- فوق آبی Band 1- Ultra blue or coastal/aerosol	0.43-0.45	30
باند ۲- آبی Band 2- Blue	0.45-0.51	30
باند ۳- سبز Band 3- Green	0.53-0.59	30
باند ۴- قرمز Band 4- Red	0.64-0.67	30
باند ۵- مادون قرمز نزدیک Band 5- Near infrared (NIR)	0.85-0.88	30
باند ۶- مادون قرمز طول موج کوتاه ۱ Band 6- Shortwave infrared (SWIR 1)	1.57-1.65	30
باند ۷- مادون قرمز طول موج کوتاه ۲ Band 7- Shortwave infrared (SWIR 2)	2.11-2.29	30
باند ۸- سیاه و سفید Band 8- Panchromatic	0.50-0.68	15
باند ۹- ابر سیروس Band 9- Cirrus	1.36-1.39	30
باند ۱۰- مادون قرمز طول موج بلند ۱ Band 10- Thermal infrared (TIRS 1)	10.60-11.19	100×30
باند ۱۱- باند ۱۰- مادون قرمز بلند ۲ Band 11- Thermal infrared (TIRS 2)	11.50-12.51	100×30

با در نظر گرفتن شرایط مورد نظر، یعنی حداقل پوشش ابر و حداکثر میزان سبز بودن در گیاهان و درختان موجود در منطقه، تصاویر مربوط به تاریخ ۲۷ اوت (۵ شهریور) برای ادامه مراحل تحقیق انتخاب شد.

Considering the conditions, ie minimum cloud cover and maximum in the study area, images of August 27 were selected to continue the investigation.

لندست ۸ که دارای تاریخ‌های برداشت مختلف (اما دوره برداشت یکسان) هستند، با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده حداکثر درست‌نمایی^۲ مقایسه شدند. روش حداکثر درست‌نمایی، یکی از کارآمدترین روش‌های طبقه‌بندی تصاویر می‌باشد (۳۳) و در مطالعات محققین بسیاری نیز به آن اشاره شده است (۳۷ و ۶۱). در این روش طبقه‌بندی، دو یا چند تصویر با تاریخ‌های مختلف به‌طور جداگانه دسته‌بندی می‌شوند (۶۲، ۴۹ و ۷۰). تصویر اول، تحت عنوان تصویر پایه، نام‌برده می‌شود و سایر تصاویر (که تاریخ متفاوتی دارند)، با تصویر پایه مقایسه می‌شوند.

قابل ذکر است که نمونه‌های آموزشی تهیه شده از سراسر منطقه، از تمام ناحیه طارم به‌طور یکنواخت برداشت شد. برای افزایش دقت نمونه‌ها، تلاش گردید که نمونه‌های انتخابی، از مناطقی با شیب و ارتفاع مختلف جمع‌آوری گردد. در این تحقیق، از نرم‌افزار ENVI 5.3 برای تهیه نقشه‌های کاربری اراضی و تولید ماتریس خطا به منظور بررسی صحت نقشه‌های تولیدی، استفاده شد.

برای تفکیک پیکسل‌های تصاویر لندست در روش طبقه‌بندی نظارت‌شده، نیاز به نمونه‌های تعلیمی بود و طی بازدیدهای میدانی و همچنین، با کمک نمونه‌گیری در نرم‌افزار گوگل ارث، این نمونه‌ها تهیه شد. نمونه‌ها در پنج کلاس متفاوت و طبق توضیحات ارائه شده در جدول ۲ انتخاب گردیدند.

به‌عنوان ورودی نرم‌افزار ENVI، دو مجموعه داده از تصاویر

1- supervised classification

2- Maximum likelihood

جدول ۲- طرح طبقه‌بندی پوشش زمین
Table 2- Land cover classification scheme

توضیح Description	کلاس‌های کاربری اراضی Landuse classes
اراضی بایر، خاک لخت بدون پوشش گیاهی، جاده‌ها و مسیرهای خاکی، اراضی مسکونی و صنعتی	زمین‌های بایر Bare land
اراضی با پوشش درخت (طبیعی مانند جنگل) و مصنوعی مانند باغات احداث شده (زیتون، انار، به و ...)	جنگل Forest
اراضی کوهستانی مرتفع، پهنه سنگی و صخره	کوهستان Mountain
اراضی تحت زراعت و شالیزارها	زراعی Vegetation
مسیل‌های موقت و دائمی جریان، رود و رودخانه	پهنه آبی Water body
Temporary and permanent rivers and streams	

می‌شود و فرض می‌شود که هر کلاس کاربری در هر باند، تابع توزیع نرمال می‌باشد. در این روش، احتمال تعلق یک پیکسل مشخص، به یک کلاس مورد نظر را بر اساس معادله نشان داده شده در رابطه ۱ محاسبه می‌کند (۲۳).

$$g_i(x) = \ln p(w_i) - \frac{1}{2} \ln |\sum_i i| - \frac{1}{2} (x - m_i)^T \sum_i x_i^{-1} (x - m_i) \quad (1)$$

در رابطه فوق، i نشانگر هر کلاس کاربری می‌باشد. X ، داده n بعدی است (n ، تعداد باندها می‌باشد). پارامتر $p(w_i)$ احتمال اینکه کلاس w_i در تصویر وجود داشته باشد را محاسبه می‌کند و فرض شده است که مقدار آن برای همه کلاس‌ها یکسان است. $|\sum_i i|$ ، دترمینان ماتریس کوواریانس داده‌ها در کلاس w_i ، $\sum_i x_i^{-1}$ ، ماتریس معکوس آن و m_i نیز، بردار میانگین است.

برای محاسبه و اندازه‌گیری تغییرات بزرگی هر یک از کلاس‌های LULC، تفاضل مساحت محدوده هر کلاس در سال دوم (۱۳۹۶) از مساحت سال اول (یا تصویر پایه سال ۱۳۹۳) و بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$MC = A_{i2} - A_{i1} \quad (2)$$

در رابطه فوق، MC = بزرگی تغییرات^۴، A_{i2} و A_{i1} نیز به ترتیب، مساحت کلاس i در سال دوم و مساحت آن کلاس در تصویر پایه (سال اول) است. با تقسیم نتیجه معادله ۲ بر مقدار مساحت آن کلاس در سال پایه (و ضرب در ۱۰۰)، روند یا درصد تغییر^۵ هر کلاس محاسبه می‌شود (معادله ۳).

$$PC = (MC/A_{i1}) \times 100 \quad (3)$$

بر اساس گفته جنسن (۳۴)، ارزیابی دقت تصاویر برای اطمینان از نتایج بررسی تغییرات کاربری اراضی، امری ضروری است. برای به دست آوردن بهترین نتایج برای طبقه‌بندی تصاویر (به عنوان مثال اطلاعات موجود در تصاویر لندست ۸)، تعدادی از عوامل مانند انتخاب بهترین روش طبقه‌بندی و پیش‌پردازش^۱ تصاویر، باید مورد توجه قرار گیرد (۶۵ و ۷۳). از سوی دیگر، تصحیح هندسی و رادیومتریک با استفاده از روش‌های مناسب بر روی تصاویر دریافت شده، بخش مهمی از اجرای تکنیک‌های RS برای استخراج بهترین نتایج است (۶۵ و ۷۶). در مطالعه حاضر، پس از جمع‌آوری نمونه‌های آموزشی برای هر کلاس و بررسی صحت هندسه تصاویر لندست ۸ (از نظر زمین مرجع بودن)، در مرحله بعدی پیش‌پردازش داده‌ها، مقادیر DN^2 تصاویر، باید با استفاده از الگوریتم مناسبی مانند FLAASH^۳ به مقادیر بازتاب در محل ماهواره، تبدیل شوند. این الگوریتم برای از بین بردن اثرات اتمسفر، که توسط پراکنش و جذب مولکولی ذرات موجود در اتمسفر در هنگام تابش و در حسگر در هنگام بازتاب از سطح استفاده می‌شود (۶۲). در این مطالعه از الگوریتم مذکور و به کمک ماژول تصحیح اتمسفری موجود در ENVI، صورت پذیرفت. توضیح کاملی از روش انجام کار و روابط مورد استفاده در تصحیح، توسط اندرسون و همکاران (۶) تشریح شده است. برای کلاس‌بندی تصاویر نیز، از روش حداکثر درست‌نمایی که یک روش نظارت‌شده و پر کاربرد است، استفاده شد (۱۳، ۱۴، ۴۰ و ۵۹). در این روش، از پارامترهای آماری برای هر دسته (کلاس) از کاربری اراضی استفاده

1- pre-processing

2- Digital Number

3- Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes

4- Magnitude change

5- Percentage Change

نهایت، الگوی تغییرات در طی این دوره سه ساله، شناسایی شد.

نتایج

استخراج پارامترهای ارزیابی صحت طبقه‌بندی

پس از اعمال روش طبقه‌بندی نظارت‌شده حداکثر احتمال یا درست‌نمایی، مطابق مطالعات پیشین (۳۸ و ۶۴)، ماتریس خطا توسط نرم‌افزار تولید و بر اساس مقادیر داخل این ماتریس آماره‌های ضریب کاپا و دقت کلی، ارزیابی دقت نتایج تهیه شده، انجام شد. در مطالعه حاضر نیز از پارامترهای مذکور که بر اساس مقایسه نمونه‌های تصادفی از منطقه و پیکسل‌های طبقه‌بندی‌شده به‌دست می‌آید، استفاده شد (جدول ۳).

دقت کلی و آماره کاپا برای طبقه‌بندی نظارت شده

بررسی صحت طبقه‌بندی تصاویر به روش نظارت‌شده برای دو تایم فریم مختلف (۱۳۹۳ و ۱۳۹۶) که از طریق ابزار ارزیابی دقت تصاویر به‌دست آمد، نشان می‌دهد که بالاترین مقدار دقت کل، برای طبقه‌بندی تصاویر سال ۲۰۱۴ بود (۹۲/۱۶ درصد). این آماره برای سال ۲۰۱۷ برابر با ۸۹/۱۹ بود که البته، هم‌چنان نشان‌دهنده صحت طبقه‌بندی است. آماره کاپا نیز، برای سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۷، به‌ترتیب برابر با ۰/۸۹ و ۰/۸۵ بود که هر دو، در محدوده مورد تأیید قرار دارند (۵۸ و ۵۹).

جدول ۳- بررسی دقت نقشه‌های طبقه‌بندی شده سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۶

Table 3- Accaracy assessment of produced maps (2014-2017)

آماره طبقه‌بندی		سال Year
صحت کلی Overall accuracy	ضریب کاپا Kappa coeff.	
92.16 %	0.89 %	2014
89.19 %	0.85 %	2017

بر اساس مقادیر محاسبه شده، می‌توان دریافت که خروجی‌های حاصل از الگوریتم مورد استفاده مطلوب می‌باشد و این موضوع با نتایج به‌دست آمده توسط محققان مختلف مطابقت دارد (۵، ۱۳ و ۵۸).

شناسایی کلاس‌های LULC و برآورد تغییرات

پس از تأیید دقت و کیفیت تفکیک پیکسل‌ها، بر اساس اطلاعات پیشین و بررسی‌های میدانی، نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی منطقه مطالعاتی طارم که شامل اطلاعات مربوط به توزیع فضایی کلاس‌های LULC می‌باشد، تهیه شد.

در نهایت، به‌منظور درک میزان تغییرات (نرخ تغییرات) سالانه^۱ هر کلاس، همان‌طور که در معادله ۴ نشان داده شده است، مساحت کلاس مورد نظر در سال دوم (در تحقیق حاضر، سال ۱۳۹۶) از مساحت آن کلاس در سال پایه کسر شده و سپس، تقسیم بر تعداد سال بین دو تاریخ مورد نظر خواهد شد:

$$ARC = MC/N \quad (۴)$$

که در رابطه ۴، متغیر N، تفاوت فاصله زمانی بین دو سال مورد نظر می‌باشد. به‌عنوان مثال، در این مطالعه، فاصله زمانی بین ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶، برابر با ۳ سال است.

ارزیابی دقت طبقه‌بندی

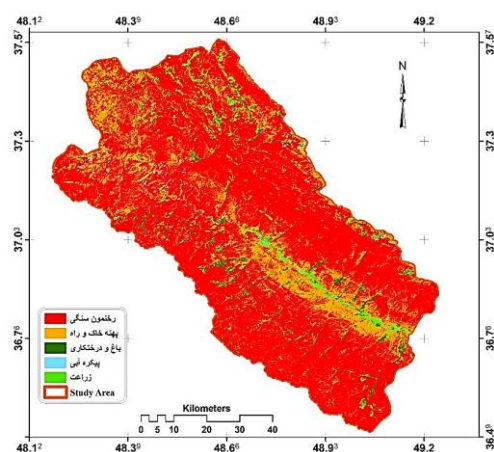
برای برآورد دقت روش طبقه‌بندی مورد استفاده (طبقه‌بندی نظارت شده)، برای هر دو تصویر با استفاده از نرم‌افزار ENVI v5.3، بررسی دقت تصاویر انجام شد. ماتریس خطا^۲ و آماره کاپا^۳، از داده‌های مرجع (نمونه‌های آموزشی) و داده‌های حاصل از تصاویر طبقه‌بندی شده (پیکسل‌های طبقه‌بندی شده)، با استفاده از خروجی ماتریس خطا در نرم‌افزار تولید شد. قابل ذکر است که در ماتریس خطا، ردیف‌های ماتریس، بیانگر طبقات در تصویر کلاس‌بندی شده، می‌باشند و هر ردیف ماتریس نیز، بیانگر طبقاتی هستند که بر اساس مقادیر نمونه‌های آموزشی، به نرم‌افزار معرفی شده است. با استفاده از مقادیر داخل ماتریس خطا، مقدار صحت کلی^۴ محاسبه شد. این آماره، حاصل تقسیم مجموع ورودی‌ها در قطر اصلی تقسیم بر تعداد پیکسل‌های آزمون شده می‌باشد (۳۹). ضریب کاپای توافقی نیز، از طریق روش تشریح شده در مقاله عقیفی، محاسبه می‌شود (۱). قابل ذکر است که ضریب کاپا، میزان دقت را بر خلاف روش دقت کلی، بر اساس تمامی پیکسل‌هایی که درست و غلط طبقه‌بندی شده‌اند محاسبه می‌نماید. آماره کاپا نیز، مکانیسمی برای اندازه‌گیری بین داده‌های صحت‌سنجی و داده‌های دسته‌بندی شده توسط کاربر می‌باشد که مقدار آن اگر بین ۰/۸۱ تا ۱ باشد، بیانگر تطابق کامل بین داده‌های طبقه‌بندی شده و داده‌های صحت‌سنجی (مشاهده شده) است (۴، ۴۴، ۶۹ و ۷۲). پس از طبقه‌بندی پیکسل‌ها توسط الگوریتم نام برده و تأیید دقت تولید نتایج، تصاویر یا همان نقشه‌های کاربری اراضی برای سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۶، بر اساس کلاس‌های LULC ذکر شده، نقشه‌های مربوطه در ArcMap 10.5 تهیه شد. پس از تهیه نقشه‌ها، به‌منظور شناخت الگوی کاربری اراضی طارم، مساحت کلاس‌های مختلف LULC برای سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۶ تهیه و در

1- Annual Rate of Change

2- Error matrix

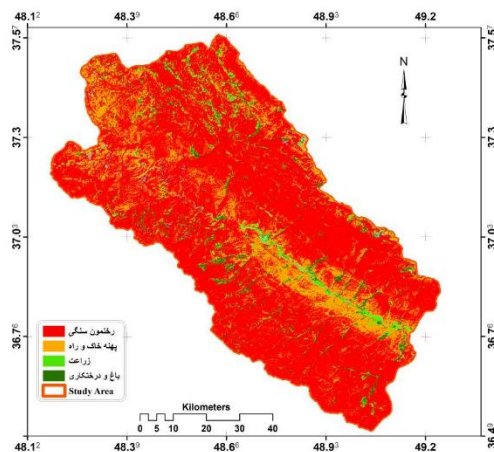
3- Kappa statistics

4- Overall accuracy



شکل ۴- نقشه کاربری اراضی (سال ۱۳۹۶)

Figure 4- LULC map (2017)



شکل ۳- نقشه کاربری اراضی (سال ۱۳۹۳)

Figure 3- LULC map (2014)

برون‌زدگی سنگی است. این بخش‌های کوهستانی، مساحت زیادی از منطقه مطالعاتی را به خود اختصاص داده است و به همین سبب، در آنها امکان زراعت و باغبانی وجود ندارد. بخش‌های نشان داده شده با رنگ سبز و سبز روشن، اراضی کشاورزی (کلاس پوشش درختی مانند جنگل و کلاس پوشش گیاهی زراعی) بود. قابل ذکر است که عموماً کلاس اراضی زراعی، در اطراف رودخانه قزل‌اوزن و مسیل‌های منتهی به آن، مشاهده می‌شود. دلیل آن نیز، ارتفاع کم و وجود خاک حاصلخیز است.

در جدول فوق، منظور از پیکسل‌های ناشناخته نیز، پیکسل‌هایی است که در هیچ‌کدام از کلاس‌های نام‌برده، طبقه‌بندی نشده است و دلیل آن را می‌توان عدم توانایی روش مورد استفاده در تفکیک پیکسل‌ها و یا در ابری بودن این نواحی، در هنگام برداشت تصاویر توسط سنجنده OLI بیان نمود. نتایج بررسی مساحت انواع کاربری اراضی سال ۱۳۹۶ نیز، در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس مقادیر داخل جدول می‌توان دریافت که بالاترین رده از نظر اختصاص مساحت در کل منطقه، همانند سال ۱۳۹۳، برای کلاس پهنه کوه و برون‌زدگی سنگی بود (۳۵۳۲ کیلومتر مربع، معادل ۶۷/۷ درصد از کل مساحت). اراضی باقیمانده نیز در کلاس‌های اراضی بایر (۲۳/۲۱ درصد)، جنگل (۲/۷۳ درصد)، گیاه و زراعی (۴/۳ درصد) و پیکره آبی (۱/۷۵ درصد) طبقه‌بندی شد. پیکسل‌های ناشناخته و دسته‌بندی نشده‌ای نیز در این سال شناسایی شد که ۰/۳۱ درصد از مساحت کل منطقه را به خود اختصاص داد. به‌طور کلی، می‌توان بیان نمود که از مجموع مساحت ۵۲۲۰ کیلومتر مربعی منطقه مورد مطالعه، بیش‌ترین نوع پوشش فیزیکی اراضی، متعلق به کلاس کوهستانی و برون‌زدگی سنگی می‌باشد (۶۷ درصد) و بنابراین، کم‌ترین میزان تغییرات در این طبقه مورد انتظار بود.

بر اساس این نقشه‌ها، مساحت هر کلاس و شناسایی تغییرات کلاس‌های مختلف در طول دوره زمانی مورد مطالعه محاسبه گردید. نقشه‌های کاربری اراضی و پوشش گیاهی زمین که از تصاویر سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۶ به‌دست آمد، در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

پس از اعمال پیش‌پردازش‌ها و تولید نقشه‌ها، نحوه تغییرات در مساحت کلاس‌های مختلف کاربری اراضی برای تاریخ‌های مورد نظر محاسبه شد و نتیجه در ادامه ارائه شده است.

الگوی کاربری اراضی طارم در سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۶

توزیع فضایی کلاس‌های LULC در محدوده مورد مطالعه طارم، برای سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۹۶، در جدول ۳ ارائه شده است. قابل ذکر است که مساحت محدوده مورد بررسی، ۵۲۲۰ کیلومتر مربع بود. از مجموعه کلاس‌های پنج‌گانه شناسایی شده در منطقه، کلاس پهنه کوه و برون‌زدگی سنگی، با ۳۵۳۲ کیلومتر مربع پوشش (۶۲/۷۵ درصد از کل مساحت منطقه مطالعاتی) بالاترین رده را در سال ۱۳۹۳ به خود اختصاص داد. کلاس یا طبقه اراضی بایر، با وسعت ۱۲۹۵ کیلومتر مربع (۲۴ درصد) و پوشش گیاهی زراعی با وسعت ۱۹۴/۶ کیلومتر مربع (۳/۷ درصد) در رده‌های بعدی قرار دارند. سایر کلاس‌های LULC مورد نظر در منطقه نیز عبارت بودند از کلاس جنگل و پوشش باغی (۲/۷ درصد پوشش) و کلاس پهنه آبی (۱/۴ درصد پوشش)، در حالی که پیکسل‌های ناشناخته مساحتی در حدود ۸ کیلومتر مربع را که معادل با ۰/۱۵ درصد از مساحت اراضی مورد مطالعه است، به خود اختصاص می‌دهد. در شکل ۳، نقشه کاربری اراضی سال ۱۳۹۳ ارائه شده است. در این شکل، بخش‌های زرد تیره نشان‌دهنده اراضی بایر و بخش‌های قرمز، نشانگر مناطق کوهستانی و

دارای افزایش در مساحت بود که علت آن را در منطقه جست و جو نمودیم. نهایتاً نتیجه شد که این افزایش در مقدار اراضی پوشیده شده با آب، به سبب رهاسازی آب از سد بالادست منطقه (سد مراش) می باشد.

دومین طبقه که بیش‌ترین مساحت اراضی را در سال ۱۳۹۶ به خود اختصاص داده است، تحت عنوان اراضی بایر معرفی گردید که در طول دوره مورد بررسی، با کاهش ۸۳ کیلومتر مربع در طول سه سال، مواجه شده است. طبقه پیکره آبی نیز در طول دوره مورد مطالعه

جدول ۳- توزیع کلاس‌های LULC در طارم برای سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۹۶
Table 3- LULC Distribution and classes of Tarom from 2014-2017

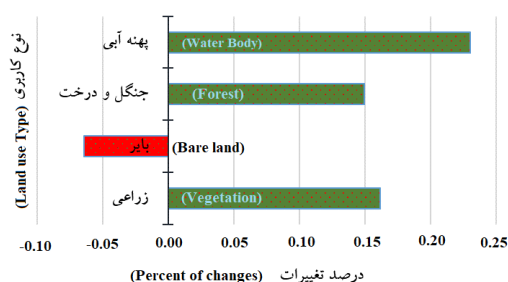
کلاس‌های کاربری اراضی Land use classes	کاربری اراضی سال ۱۳۹۳ Land use 2014		کاربری اراضی سال ۱۳۹۶ Land use 2017	
	مساحت (کیلومتر مربع) Area (KM ²)	درصد از مساحت % of Area	مساحت (کیلومتر مربع) Area (KM ²)	درصد از مساحت % of Area
۱ اراضی بایر Bare land	1295	24 %	1212	23.21 %
۲ جنگل و درختکاری Forest	124	2.7 %	142.5	2.73 %
۳ کوهستان و سنگ Mountain and rock	3524	67.5 %	3532	67.7 %
۴ زراعی Vegetation	194.6	3.7 %	226	4.3 %
۵ پیکره آبی Water body	74.4	1.4 %	91.5	1.75 %
۶ ناشناخته Unknown	8	0.15 %	16	0.31 %
مجموع Total	5220	100 %	5220	100 %

جدول ۴- تغییرات کاربری اراضی (۱۳۹۳-۱۳۹۶)
Table 4- Land Use Change (2014-2017)

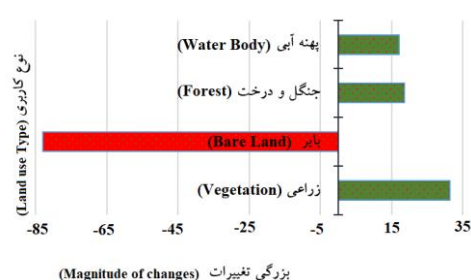
کلاس‌های کاربری اراضی Land use classes	تغییرات کاربری اراضی (۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶) Land use changes (2014-2017)		
	بزرگی تغییرات (کیلومتر مربع) Changes magnitude (KM ²)	درصد تغییرات % of changes	نرخ سالانه تغییرات Annual cate of change
۱ اراضی بایر Bare land	83 (-)	6.41 (-)	-27.7
۲ جنگل و درختکاری Forest	18.5 (+)	14.92 (+)	6.17
۳ زراعی Vegetation	31.4 (+)	16.14 (+)	10.46
۴ پیکره آبی Water body	17.1 (+)	22.98 (+)	5.7
۵ کوهستان و سنگ Mountain and rock		NA	
۶ ناشناخته Unknown			

علائم (+) و (-) در جدول شماره ۴، نشان‌دهنده افزایش و کاهش تغییرات در میزان مساحت کاربری اراضی مختلف و در فواصل زمانی مورد نظر است و "NA" نیز، به عدم تغییر در کلاس‌ها اشاره می‌کند.

The (+) and (-) symbols in Table 4 indicate the increase and decrease in changes in the area of land use at different intervals, and the "NA" also indicates no change in the classes.



شکل ۶- درصد تغییرات کاربری اراضی طارم
Figure 6- Percent of Relative change in land use in Tarom



شکل ۵- تغییرات نسبی کاربری اراضی طارم
Figure 5- Relative change in land use in Tarom

می تواند به عنوان تهدید جدی برای پایداری اکوسیستم منطقه طارم در نظر گرفته شود.

بحث و نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، با هدف تعیین انواع کاربری اراضی و مساحت هر کدام از کلاس های پوشش اراضی منطقه مطالعاتی طارم، از تصاویر ماهواره لندست ۸ استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که طبقه بندی پیکسل های برداشت شده توسط سنجنده ماهواره لندست، با کمک روش نظارت شده حداکثر درست نمائی، گزینه مناسبی برای مطالعات و بررسی کاربری اراضی، تغییرات آن در بستر زمان و مدل سازی تغییرات زیست محیطی است (۳۵). نتیجه بررسی فلاح سورکی و اکبری (۲۲) و موهاجنه^۲ (۵۱)، تایید می کند که با کمک الگوریتم MLC، می توان با دقت بالایی، نقشه های کاربری اراضی را تولید نمود. همچنین، اطلاع از نسبت کاربری های و ارزیابی نحوه تغییرات انواع کاربری اراضی با استفاده از تصاویر برداشت شده در زمان های مختلف (چند زمانه) یکی از مهم ترین اطلاعات مورد نیاز در برنامه ریزی و سیاست گذاری حفاظت از منابع آب و خاک می باشد که توسط محققین دیگر نیز بیان گردیده است (۷ و ۱۸). داده های ماهواره لندست ۸، اخیراً به یکی از پرکاربردترین منابع اطلاعاتی در مطالعات پوشش زمین تبدیل شده است و قدرت تفکیک مکانی و طیفی نسبتاً خوب این داده ها (۳۰ متر)، می تواند اطلاعات خوبی را در اختیار محققان رشته های مختلف قرار دهد (۳). در تحقیق ارائه شده، به ارزیابی و پایش تغییرات کاربری اراضی رخ داده در طی یک دوره سه ساله در منطقه طارم استان زنجان پرداخته شد. این مطالعه برای درک و اکتشاف میزان تغییرات کاربری اراضی محدوده مطالعاتی مورد نظر و به کمک روش سنجش از دور و تکنیک GIS، انجام شد. این روش ساده و کم هزینه، می تواند در مدیریت و برنامه ریزی کاربری

به عنوان بخش نهایی تحقیق، سناریوهای تغییرات بین تایم فریم های^۱ مورد بررسی، در جدول ۴ ارائه شده است.

کم ترین نرخ تغییرات سالانه در طی دوره آماری مورد بررسی، متعلق به کلاس پیکره آبی بود و بیش ترین نرخ تغییرات نیز در مجموعه زمین های بایر اتفاق افتاده است و ضمن تخریب این اراضی، احداث باغ های زیتون و انار و سیب و امثالهم و افزایش اراضی تحت زراعت آبی، در منطقه مشاهده شد.

تغییرات نسبی در کاربری اراضی منطقه طارم

تغییرات نسبی در کاربری اراضی منطقه مطالعاتی (شکل ۵)، براساس داده های جدول ۴ ارزیابی شد. تغییرات نسبی در سال های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ برخی الگوهای نامنظم را در این منطقه نشان داد. تغییر کاربری اراضی و پوشش گیاهی در این دوره، تغییرات مثبت را در برخی کلاس ها تایید می کند. حدود ۳۱/۴ کیلومتر مربع به وسعت اراضی دارای پوشش گیاهی (در دوره ۱۳۹۳-۱۳۹۶) افزوده شده است که نشان دهنده تغییر مثبت ۱۶/۱۴ درصدی بود (شکل ۶). در حالی که کاهش ۸۳ کیلومتر مربع، (۶/۴ درصد) در مساحت اراضی بایر مشاهده شد (بر اساس مقادیر جدول ۴). اما بررسی درصد تغییرات در مساحت جنگل ها و مناطق درختکاری شده (مانند زیتون و دیگر درختان ذکر شده در بخش معرفی منطقه) از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ نشان دهنده روند مثبت در این کلاس کاربری اراضی است (۱۴/۹۲ درصد که مساحتی بیش از ۱۸ کیلومتر مربع را شامل می شود). در طول دوره زمانی مورد مطالعه، تغییرات مثبت (۲۲/۹۸ درصد) در مساحت پیکره (پهنه) آبی تعیین شد و این افزایش پیکره آبی، به دلیل رهاسازی آب ذخیره شده از سد مراش (در منطقه بالادست طارم) در طی ماه های خرداد تا مرداد است. بر اساس نتایج به دست آمده، تغییراتی که در کاربری اراضی و پوشش گیاهی منطقه رخ داده است،

اراضی مورد استفاده قرار گیرد (۱۲، ۲۱، ۴۸ و ۶۰). تعداد کاربری اراضی موجود، با توجه به بازدهی‌های میدانی و نقشه‌های موجود و شرایط فعلی منطقه، برای تهیه نقشه کاربری اراضی به پنج کلاس مختلف تقسیم و نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که برداشت نمونه‌های کافی از طبقات مختلف پوشش گیاهی زمین و کاربری اراضی، احتمال تعلق صحیح هر یک از پیکسل‌های تصویر دریافتی از ماهواره، به طبقات مناسب و صحیح را افزایش می‌دهد و بنابراین، حصول نتایج مناسب از طبقه‌بندی تصاویر به کمک روش نظارت‌شده حداکثر احتمال، در گرو نمونه‌های تعلیمی کافی و مناسب است. از سوی دیگر، کیفیت نقشه‌های تهیه شده، به قدرت تفکیک طیفی و پردازش‌های مناسب پیش و پس از طبقه‌بندی وابسته بود. با نظر گرفتن قدرت تفکیک مکانی تصاویر لندست ۸ که در این تحقیق استفاده شد (۳۰ متر)، دقت نقشه‌های تهیه شده نیز متناسب با همین کیفیت بود (۵). دقت طبقه‌بندی کلی، برای سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۶ به ترتیب برابر با ۹۲/۱۶ و ۸۹/۱۹ محاسبه شد. آماره ضریب کاپا نیز برای این سال‌ها به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۸۵ به دست آمد که مقادیر بیان شده، می‌تواند روش انتخاب شده برای طبقه‌بندی پیکسل‌های برداشت شده از منطقه را با روش نظارت شده، رضایت‌بخش اعلام نماید. هاشمی نسب و همکاران در سال ۱۳۹۷ و محققان دیگری نیز بیان نموده‌اند که محدوده ۰/۸۵، به معنای توافق مناسب بین پیکسل‌های طبقه‌بندی شده و موقعیت آنها در انواع طبقات کاربری موجود در زمین است (۲۷، ۴۳، ۶۳ و ۶۸). قابل ذکر است که بخش‌هایی از منطقه طارم که امکان افزایش اراضی زراعی و باغی را دارد، تحت فشارهای مختلفی مانند افزایش نرخ جمعیت قرار گرفته است و زمین‌های این منطقه، تبدیل به کاربری‌های متفاوتی نسبت به شرایط طبیعی آن شده است. همچنین، در دوره سه ساله منتخب، با رهاسازی آب از سد بالادست منطقه مطالعاتی، مقدار آب در رودخانه گذرنده از منطقه افزایش یافته و این امر موجب شده تا با انتقال آب از رودخانه قزل‌اوزن به اراضی مرتفع و بخش‌هایی که قبلاً در آنها زراعت و درختکاری انجام نمی‌گردید، مساحت اراضی بایر کاهش یافته و زمین‌های تحت کشت، افزایشی را در حدود ۱۰ درصد به صورت سالانه داشته باشد. تعیین روند تغییرات استفاده از زمین در این مطالعه، به‌ویژه تخمین میزان درصد افزایش مساحت زمین‌های زراعی و درختکاری شده و از سوی دیگر، محاسبه میزان کاهش سطح زمین‌های بایر و مراتع طبیعی، می‌تواند به سیاست‌گذاران برای تصمیم‌گیری مناسب در مورد نحوه گسترش اراضی و تخریب اراضی طبیعی کمک شایانی نماید. زیرا، این تغییرات علاوه بر تاثیر در مقدار تولید رواناب، می‌تواند بر میزان فرسایش خاک‌های اراضی بایر نیز تاثیر

گذار باشد. با توجه به اینکه عموماً تغییرات اراضی بایر به اراضی زراعی و درختکاری شده، در سطوح شیب‌دار منطقه اتفاق افتاده است، با توجه به نتایج سایر محققان مانند آذرتاج و همکاران (۱۳۹۷)، این امر، حجم رواناب تولیدی را می‌تواند افزایش داده و بر این اساس، میزان ضریب رواناب نیز افزایش می‌یابد (۱۰)، که پیشنهاد می‌گردد به عنوان ادامه مراحل تحقیق حاضر، برای مطالعات آتی، این موضوع مد نظر گیرد. در مراتع دست‌خورده، غلظت رسوب عموماً افزایش می‌یابد و موجب هدررفت خاک گردد، که این امر توسط سایر محققان نیز تایید شده است (۱۱ و ۳۰). با این تغییرات در حال افزایش در منطقه مورد مطالعه، باید انتظار داشت که پتانسیل سیل‌خیزی در آن و به‌ویژه در مناطقی که اراضی بایر آن در حال تغییر است افزایش یافته و با توجه به کاهش کیفیت مراتع (تبدیل به اراضی تحت کشاورزی)، حداکثر دبی سیلاب و توان فرسایش خاک نیز افزایش یابد. چنین نتیجه‌ای در تحقیق حسینی همکاران که اخیراً و در سال ۱۳۹۸ انجام شده نیز تایید شده بود (۲۸). به‌منظور بحث بیش‌تر در زمینه کیفیت تصاویر تولید شده، می‌توان بیان نمود که اگر چه دقت کلی و ضریب کاپای محاسبه شده در این مطالعه، در محدوده مقادیر رضایت‌بخشی بود (۴ و ۵۸)، اما هم‌چنان، مسائلی وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرد. با توجه به این موضوع که تصاویر دریافتی، باید در حد امکان پوشش ابر نداشته باشد، اگرچه فیلتر ابرناکی زیر ۱۰ درصد انتخاب گردید، اما بخش‌های بسیار کمی از منطقه، پیکسل‌های ناشناخته را داشت که می‌تواند به‌عنوان منبع خطا مورد بررسی و توجه قرار گیرد. از آنجایی دسترسی به تصاویر با کیفیت بالا همواره دغدغه‌ای برای انجام مطالعات با کمک تصاویر ماهواره‌ای است، لذا استفاده از تصاویر لندست ۸، که به صورت رایگان در اختیار است، می‌تواند به‌عنوان منبع مهم داده، مورد استفاده قرار گیرد. به‌سبب توالی زمانی برداشت‌های تصاویر در مجموعه ماهواره‌های لندست، می‌توان آنها را به صورت سری زمانی در اختیار مدل‌های پیش‌بینی یا ماژول پیش‌بینی نرم‌افزار ENVI قرار داد و بر اساس روش‌هایی مانند زنجیره مارکف، تغییرات احتمالی کلاس‌های کاربری اراضی و شاخص‌های گیاهی منطقه را برای دوره‌های آتی و بر اساس الگوهای پیشین، پیش‌بینی نمود (۱۹)، ۲۹ و ۵۳). بنابراین، پیشنهاد می‌شود برای منطقه مورد مطالعه، ضمن استفاده از اطلاعات ثبت شده توسط سایر سنجنده‌ها، از الگوریتم پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی استفاده شده و ضمن مقایسه نتایج، الگوی تغییرات احتمالی آتی نیز تعیین گردد. این کار می‌تواند علاوه بر ارائه دیدی کلی از وضعیت آسیب‌پذیری منطقه، به‌منظور مدیریت بهتر منابع طبیعی و حفاظت از اکوسیستم منطقه (۵۷)، بسیار حائز اهمیت باشد.

- 1- Afify H.A. 2011. Evaluation of change detection techniques for monitoring landcover changes: a case study in new Burg El-Arab area. *Alexandria Engineering Journal* 50: 187–195.
- 2- Agarwal C., Green G.M., Grove J.M., Evans T.P., and Schweik C.M. 2001. A Review and Assessment of Land-Use Change Models Dynamics of Space, Time, and Human Choice. CIPEC Collaborative Report Series No. 1, Center for the Study of Institutions Population, and Environmental Change Indiana University.
- 3- Akbari E., Zangane Asadi M.A., and Taghavi E. 2016. Change detection on land use and land cover regional neyshabour using Different methods of statistical training theory. *Geographical Planning of Space* 6(20): 35-50. (In Persian with English abstract)
- 4- Akyürek D., Koç O., Akbaba E.M., and Sunar F. 2018. Land use/Land Cover Change Detection Using Multi-Temporal Satellite Dataset: A case Study in Istanbul New Airport. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-3/W4, Geo Information for Disaster Management, 18–21 March, Istanbul, Turkey.
- 5- Al-Bilbisi H. 2019. Spatial Monitoring of Urban Expansion Using Satellite Remote Sensing Images: A Case Study of Amman City, Jordan. *Sustainability* 11(8): 1-14. doi:10.3390/su11082260.
- 6- Anderson G.P., Felde G.W., Hoke M.L., Ratkowski A.J., et al. 2002. MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm: FLAASH (fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes). In *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultra Spectral Imagery VIII* (Proceedings of SPIE); She SS, Lewis P., Eds.; Society of Photo Optics: Orlando FL, USA: 65–71.
- 7- Asghari Saraskanroud S., Aghayary L., and Pirouzi E. 2018. Study of land use change and its effect on erosion in Nir city using GIS and RS (Case study: Nir county). *Journal of RS and GIS for Natural Resources* 8(4): 49-62. (In Persian with English abstract)
- 8- Aspinall R. 2004. Modelling land use change with generalized linear models– A multi-model analysis of change between 1860 and 2000 in Gallatin Valley, Montana. *Journal of Environmental Management* 72: 91–103.
- 9- Avci Z.D.U., Karaman M., Ozelkan E., and Papila I. 2011. A Comparison of Pixel-Based and Object-Based Classification Methods, a Case Study: Istanbul, Turkey. 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Sydney, Australia.
- 10- Azartaj E., Rasoolzade A., and Esmali oori A. 2014. Investigation of the Impact of Land Use Changes on Soil Erosion and Surface Runoff Using Precipitation Simulation (Case Study: Band Almas, Ardabil Province). 1st National Conference on Sustainable Management of Soil and Environmental Resources. 10-11 Sep. 2003. Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.
- 11- Azartaj E., Rasoulzadeh A., and Asghari A. 2018. Investigation of land use change effect on runoff and soil erosion using rainfall simulation in Heiran area, Ardabil. *Watershed Engineering and Management* 10(1): 1-13. (In Persian with English abstract)
- 12- Baatz M., and Schäpe A. 1999. Multiresolution Segmentation: An Optimization Approach for High Quality Multi-Scale Image Segmentation, XI. *Beitrage zum AGIT Symposium*, Salzburg, Germany.
- 13- Benedictsson J.A., Swain P.H., and Ersoy O.K. 1990. Neural Network Approaches versus Statistical Methods in Classification of Multisource Remote Sensing Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 28(4): 540–551.
- 14- Brandt J.S., Haynes M.A., Kuemmerle T., Waller D.M., and Radeloff V.C. 2013. Regime shift on the roof of the world: alpine meadows converting to shrublands in the southern Himalayas. *Biological Conservation* 158: 116–127.
- 15- Carlson T.N., and Azofeifa S.G.A. 1999. Satellite Remote Sensing of land Use changes in and around San Jose', Costa Rica. *Remote Sensing of Environment* 70: 247–256.
- 16- Chaikaew P. 2018. Land Use Change Monitoring and Modelling using GIS and Remote Sensing Data for Watershed Scale in Thailand. *IntechOpen*, 165-181. DOI: 10.5772/intechopen.79167.
- 17- Chen J., Zhu X., Vogelmann J.E., Gao F., and Jin S. 2011. A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM+ slc-off images. *Remote Sensing Environment* 115(4): 1053–1064.
- 18- Dewan A.M., and Yamaguchi Y. 2009. Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: using remote sensing to promote sustainable urbanization. *Applied Geography* 29: 390–401.
- 19- Dutta D., Kundu A., Patel N.R., Saha S.K., and Siddiqui A.R. 2015. Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 18: 53–63.
- 20- Economic Development and Rural Employment Program in Zanjan Province. 2018. Plan and Budget Organization, Presidency Islamic republic of Iran. (In Persian)
- 21- Elhag M., and Boteva S. 2016. Mediterranean Land Use and Land Cover Classification Assessment Using High Spatial Resolution Data. 5–9 Sep. 2016. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 44(4): 042032.
- 22- Fallah Sourki M., Kavian A., and Omidvar E. 2016. Prioritization of Haraz sub-watersheds in order to Soil and Water Conservation Practices Based on Morphometric and Land Use Characteristics. *Journal of Science and*

- Technology of Agriculture and Natural Resources 20(77): 85-99. (In Persian with English abstract)
- 23- Fan F., Weng Q., and Wang Y. 2007. Land use land cover change in Guangzhou, China, from 1998 to 2003, based on Landsat TM/ETM+ imagery. *Sensors* 7: 1323-1342.
- 24- Feizizadeh B. 2017. Modeling the Trends of the Land Use/Cover Change and Its Impacts on the Erosion System of the Allavian Dam Based on the Remote Sensing and GIS Techniques. *Hydrogeomorphology* 3(11): 21-38. (In Persian with English abstract)
- 25- Geist H.J. 2005. The land-use and cover change (lulc) project. Land use, land cover and soil sciences, I. Retrieved from <http://www.eolss.net/sample-chapters/c19/E1-05.pdf>.
- 26- Habib A.F., Kersting A.P., Shaker A., and Yan W.Y. 2011. Geometric Calibration and Radiometric Correction of LiDAR Data and Their Impact on the Quality of Derived Products. *Sensors* 11(9): 9069-9097.
- 27- Hasheminasab S.N., and Jafai R. 2018. Evaluation of Land Use Changes order to Desertification Monitoring Using Remote Sensing Techniques. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards* 5(3): 67-82. (In Persian with English abstract)
- 28- Hosseini Y., Ramezani Moghadam J., and Abdolali zade Z. 2019. Evaluating the Impact of Land Use Changes on Flooding and Flood Runoff in Amuqin Drainage Basin. *Natural Environmental Hazards*, (in press) DOI: 10.22111/JNEH.2019.27508.1464
- 29- Hu Y., Dong Y., and Batunacun. 2018. An automatic approach for land-change detection and land updates based on integrated NDVI timing analysis and the CVAPS method with GEE support. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 146: 347-359.
- 30- Iqbal M.F., and Khan I.A. 2014. Spatiotemporal land use land cover change analysis and erosion risk mapping of Azad Jammu and Kashmir, Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 17: 209-229.
- 31- Islam K., Jashimuddin M., Nath B., and Nath T.K. 2016. Quantitative Assessment of land cover change using landsat time series data: case of Chunati Wildlife Sanctuary (CWS), Bangladesh. *International Journal of Environment Geoinformatics* 3: 45-55.
- 32- Islam K., Jashimuddin M., Nath B. and Nath T.K. 2018. Land use classification and change detection by using multi-temporal remotely sensed imagery: The case of Chunati wildlife sanctuary, Bangladesh. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 21: 37-47.
- 33- Jensen J.R. 1996. A remote sensing perspective. In *Introductory Digital Image Processing*; Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA.
- 34- Jensen J. 2005. *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (3rd Ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 526 pp.
- 35- Kantakumar L.N., and Neelamsetti P. 2015. Multi-temporal land use classification using hybrid approach. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 18: 289-295.
- 36- Karimi Firozjahi M., Kiyavarz M., and Kalantari, M. 2017. Monitoring and prediction of land use changes and physical expansion of Babol city during 1985-2040 using multi-temporal Landsat imagery. *Physical Development Planning* 3(7): 32-52. (In Persian with English abstract)
- 37- Kazemi M., Nohegar A., and Mirdadi M. 2017. Comparison of different classification algorithms in Landsat OLI imagery to produce land use maps (Case study: Beheshte Gomshode region). *Journal of Natural Ecosystems of Iran* 8(1): 79-97. (In Persian)
- 38- Kyani V., Alizadeh Shaabani A., and Nazari Samani A. 2014. Assessing the Classification accuracy of LISS-III Sensor Image of IRS-P6 Satellite using Google Earth's Database to provide land coverage/ Land use maps (Case study: Taleghan Watershed). *Geographical Data* 23(90): 51-59. (In Persian with English abstract)
- 39- Kumar R., Nandy S., and Agarwal R. 2014. Kushwaha, S.P.S. Forest cover dynamics analysis and prediction modeling using logistic regression model. *Ecological Indicators* 45: 444-455.
- 40- Lal A.M., and Margret Anouncia S. 2015. Semi-supervised change detection approach combining sparse fusion and constrained k means for multi-temporal remote sensing images *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 18: 279-288.
- 41- Lambin E.F. 1997. Modelling and monitoring land cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography* 21:375-393.
- 42- Lambin E.F., Turner B.L., Geist H.J., Agbola S.B., Angelsen A., Folke C., Bruce J.W., Coomes O.T., et al. 2001. The causes of land-use and landcover change: moving beyond the myths. *Global Environment Change* 11: 261-269.
- 43- Landis J.R., and Koch G.G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33(1): 159-174.
- 44- López E., Bocco G., Mendoza M., and Duhau E. 2001. Predicting land cover and land use change in the urban fringe. *Landscape Urban Plann* 55(4): 271-285.
- 45- López-Serrano P.M., Corral-Rivas J.J., Díaz-Varela R.A., Álvarez-González J.G. and López-Sánchez, C.A. 2016. Evaluation of radiometric and atmospheric correction algorithms for aboveground forest biomass estimation using landsat 5 TM data. *Remote Sensing* 8(5): 1-19.

- 46- Mahmoodi M.A., and Aminkhah S. 2018. Providing Land Use and Land Cover Maps Using Remote Sensing Data and Artificial Neural Network. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 49(5): 1171-1180. (In Persian with English abstract)
- 47- Malarvizhi K., Kumar S.V., and Porchelvan P. 2016. Use of High Resolution Google Earth Satellite Imagery in Landuse Map Preparation for Urban Related Applications. *Procedia Technology* 24: 1835-1842.
- 48- Mamun A.Al, Mahmood A., and Rahman M. 2013. Identification and Monitoring the Change of Land Use Pattern Using Remote Sensing and GIS: A Case Study of Dhaka City. *Journal of Mechanical and Civil Engineering* 6(2): 20-28.
- 49- Manakos I., Manevski K., Kalaitzidis Ch., and Edler D. 2011. Comparison between FLAASH & ATCOR atmospheric correction modules on the basis of WorldView-2 imagery and in situ spectroradiometric measurements. *EARSeL 7th SIG-Imaging Spectroscopy Workshop*, Edinburgh 11-13 April.
- 50- Marangoz A.M., Sekertekin A., and Akcin H. 2017. Analysis of Land Use Land Cover Classification Results Derived from Sentinel-2 Image. *Conference: 17th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference at: Albena, Varna, Bulgaria.*
- 51- Mohajne M., Essahlaoui A., Oudija, F., et al. 2018. Land Use/Land Cover (LULC) Using Landsat Data Series (MSS, TM, ETM+ and OLI) in Azrou Forest, in the Central Middle Atlas of Morocco. *Environments* 5(12): 2-16.
- 52- Mohammady M., Moradi H.R., Zeinivand H., and Temme A.J.A.M. 2015. A comparison of supervised, unsupervised and synthetic land use classification methods in the north of Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology* 12(5): 1515-1526.
- 53- Mombeni M., and Asgari H. 2018. Monitoring, assessment and prediction of spatial changes of Land Use /Cover using Markov Chain Model (Case study: Shushtar- Khuzestan). *Geograohical Data* 27(105): 35-47.
- 54- Mondal M.S., Sharma N., Kappas M., and Garg P.K. 2012. Modeling of spatio-temporal dynamics of LULC – a review and assessment. *Journal of Geomatics* 6(2): 93-103.
- 55- Mondal M.S., Sharma N., Garg P.K., and Kappas M. 2016. Statistical independence test and validation of CA Markov land use land cover (LULC) prediction results. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 19(2): 259-272.
- 56- Muttitanon W., and Tiipathi N.K. 2005. Land use/land cover changes in the coastal zone of Ban Don Bay, Thailand using Landsat 5 TM data. *International Journal of Remote Sensing* 26(11): 2311-2323.
- 57- Pullanikkatil D., Palamuleni L., and Ruhiiga T. 2016. Assessment of land use change in Likangala River catchment, Malawi: A remote sensing and DPSIR approach. *Applied Geography* 71: 9-23.
- 58- Rafii S., Alavipanah B., malekmohammadi B., ramazani Mehrian M., and Nasiri H. 2012. Producing land cover maps using remote sensing and decision tree algorithm (Case study: Bakhtegan national park and wildlife refuge). *Geography and Environmental Planning* 23(3): 111-132. (In Persian with English abstract)
- 59- Rawat J.S., and Kumar M. 2015. Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: a case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 18: 77-84.
- 60- Reis S. 2008. Analyzing Land Use/Land Cover Changes Using Remote Sensing and GIS in Rize, North-East Turkey. *Sensors* 8:6188-6202.
- 61- Riahi bakhtiary H.R., Darvish sefat A.A., and Zobairy M. 2000. Determining the most suitable method for preparing natural resource land use maps in scale of 1: 250,000 using satellite data in the Arzhan plain area. *Geomatics*, Tehran, Iran.
- 62- San B.T., and Suzan M.L. 2010. Evaluation of Different Atmospheric Correction Algorithms for EO-1 Hyperion Imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science (XXXVIII)*8: 392-397.
- 63- Shenani Hoveize S.M., and Zareii H. (2017). Investigation of Land Use Changes During the Past Two Last Decades (Case Study: Abolabas Basin). *Journal of Watershed Management Research* 7(14): 237-244. (In Persian with English abstract)
- 64- Sophia S.R., and Ndambuki J.M. 2017. Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS. *International Journal of Geosciences* 8: 611-622.
- 65- Song C., Woodcock C.E., Seto K.C., Lenney M.P., and Macomber S.A. 2001. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment* 75: 230-244.
- 66- Sustainable Rural Development Sector Plan in Centern of Tarom, Iran. 2017. Housing Foundation of Islamic Revolution. Pp: 674. (In Persian)
- 67- Ulbricht K.A., and Heckendorf W.D. 1998. Satellite images for recognition of landscape and land use changes. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 53: 235-243.
- 68- Van Vliet J., Bregt A.K., and Hagen-Zanker A. 2011. Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models. *Ecological Modelling* 222(8): 1367-1375.
- 69- Vescovi F.D., Park S.J., and Vlek P.L. 2002. Detection of human-induced land coverchanges in a savannah

- landscape in Ghana: I. Change detection and quantification. In 2nd Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Remote Sensing for Developing Countries. Bonn, Germany.
- 70- Yang X., and Lo C.P. 2002. Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area. *International Journal of Remote Sensing* 23(9): 1775–1798.
- 71- Zeng Y.N., Wu G.P., Zhan F.B., and Zhang H.H. 2008. Modeling spatial land use pattern using autologistic regression. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVII*: 115–118.
- 72- Zhao G.X., Lin G., and Warner T. 2008. Using ThematicMapper data for change detection and sustainable use of cultivated land: a case study in the Yellow River delta, China. *International Journal of Remote Sensing* 25(13): 2509-2522.
- 73- Zhu Z., Fu Y., Woodcock C.E., Olofsson P., Vogelmann J.E., Holden C., Wang M., Dai S., and Yu Y. 2016. Including land cover change in analysis of greenness trends using all available Landsat 5, 7, and 8 images: A case study from Guangzhou, China (2000–2014). *Remote Sensing of Environment* 185: 243–257.
- 74- Zsuzsanna D., Bartholy J., Pongracz R., and Barcza Z. 2005. Analysis of land-use/land-cover change in the Carpathian region based on remote sensing techniques. *Physics and Chemistry of Earth* 30(1-3): 109-115.



Land Use Classification and Determining the Pattern of Changes for 2014-2017, using OLI Sensor's Data

S.B. Hosseini¹ - A. Saremi^{2*} - M.H. Noori Gheydari³ - H. Sedghi⁴ - A.R. Firoozfar⁵

Received: 07-12-2018

Accepted: 08-02-2020

Introduction: Land use is an aggressive process applying to human activities and different uses accomplished over land. It can be argued that human actions can lead to significant changes in current state of earth's surface. Changes in surface cover (land cover change) may in turn lead to alternations in balance of energy, water, and geochemical fluctuations at local, regional or global levels. Thus, studies on different land uses changes seem necessary in general environmental evaluation. LULC change detection include implementing multi-temporal Remote Sensing (RS) knowledge to analyze the historical LULC data (maps) and therefore helps in determining the trend of changes associated with LULC properties.

Materials and Methods: Image processing and performing supervised image classification helps to extract information from imageries. In this study, ENVI 5.3 software was used for processing two selected imageries in this project (2014 and 2017). Five LULC classes were established as forest, bare land, vegetation, mountain and water body. For each LULC class, 500 samples were collected at least and used for the supervised classification of images in ENVI. About half of these samples, which were used as "training samples" were collected from the study area through Land Surveying Geographical Positioning System GPS (ground truth data) and Google Earth images. The first step in pre-processing of LANDSAT 8 OLI data in this study referred to the collection of training samples for each class and validating the geometric accuracy of Landsat images, while the next step belonged to the conversion of DNs into At-Satellite radiance using algorithms such as FLAASH. Two dated Landsat images were compared via the supervised classification technique. In this classification technique, two or more images with different dates are independently classified. Maximum Likelihood Classification (MLC) algorithm as a supervised classification method was carried out using training areas and test data for accuracy assessment in ENVI 5.3 and accuracy assessment was done for both images using ENVI v5.3.

Results and Discussion: In order to recognize the past land use pattern of Tarom, researchers first focused on imagery of Landsat 8 ETM+ for the year 2014. Summary of supervised classification accuracy for the 2 different time frames (2014 and 2017) found from accuracy assessment showed that the highest accuracy was found for 2014 supervised classification (92.16% accuracy). Kappa value is also used to check accuracy in classification and having a Kappa value (0.81–1.00) denotes almost perfect match between the classified and referenced data. Different LULC classes had been recognized and used as the base map. From the identified LULC classes, Mountain area by 3524 km² (62.75% of total land area) was the highest category, after which, came bare land areas with 1295 km² (24.0%) coverage and vegetation area with 194.6 Km² (3.7%). Forest was the next class with (2.7%) coverage whereas, water body (1.4%) and unknown pixels 8 km² (0.15%) specified the least amount of coverage, respectively. Based on the 2017 image classification results, the highest category belonged to mountain area (3532 Km², sharing 67.7% of total area). The remaining land uses were bare land (23.21%), forest (2.73%), vegetation (4.3%), and water body (1.75%). The unknown and uncategorized pixels were identifiable in this stage that shared 0.31% of the total area. The relative changes in land use and land cover from 2014 and 2017 images showed some irregular patterns in the study area. Land-use change from this period showed positive changes in most of the categories. About 31.4 Km² of vegetation area had increased in 2014–2017 period which showed a positive change of (+16.14%). While a negative decrease (83 Km², -6.4%) in bare land category. The results showed that the extraction of adequate samples from different classes of land cover/land use would increase the possibility of correct distinction of image pixels received from the satellite and accurate extraction of LULC classes. Thus, obtaining accurate results from the classification of images via the

1, 2 and 4- Ph.D. Student, Assistant Professor and Professor Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: Ali.Saremi.srbiau@gmail.com)

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

5- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

DOI: 10.22067/jsw.v34i2.74878

maximum likelihood method is depending on adequate and appropriate training samples. The trend of land-use changes found in this study, especially percentage increase in forest land and a decrease in bare lands will be helpful for policymakers to make appropriate decisions.

Conclusion: Land cover is the physical material at the earth's surface and an essential variable which links the physical environment by human activities, and land use is the description of how the land has been utilized for the socio-economic activities purposes. Population growth increases the demand for food, water, and energy, which causes a prompt change in land cover and pattern of land-use. The mentioned process depends on the social and economic development of the nation. In order to have appropriate and unrestrictive management of natural resources (water and soil), it is necessary to have complete information about the pattern of land use and its alteration pattern over time. Thus, it can be concluded that remote sensing is a proper technique to investigate the land-use changes using satellite imagery. Spatiotemporal analyses of LULC help us to manage the environmental changes, which are an appropriate tool for decision-makers on water resources' to enhance their decisions. In the presented study, LULC map for Tarom basin, Iran, acquired from OLI sensor data sets (Landsat-8) by applying a pixel-based classification method (MLC) with the aid of remote sensing technology. The results that are presented in this study proved the usefulness, effectiveness and also convenience of the MLC technique for generating land-use maps by using a free archive of Landsat data and processing the digital images through the ENVI software. Accuracy assessment using overall accuracy and kappa coefficient for 2014 and 2017, shows the performance of the used algorithm. What matters most in this regard is the accuracy, speed, and quality of land-use maps. In the present study, it was shown that due to high speed and accuracy in generating land-use maps of Tarom, MLC method, would act as the best classification method in this area. However, it is suggested to classify the data by using other methods and compare the results with image outputs provided by Landsat 8 satellite.

Keywords: ENVI, Kappa coefficient, LANDSAT 8, Satellite imagery, Tarom basin



ردیابی ژن اندوگلوکاناز در باکتری‌های تجزیه کننده سلولز غربال شده از خاک‌های جنگلی مازندران، ایران

الناز قدیری^۱ - نفیسه سادات نقوی^{۲*} - کامران قائدی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۷

چکیده

هدف این پژوهش، غربال‌گری باکتری‌های تجزیه کننده سلولز از خاک مناطق جنگلی مازندران و ردیابی ژن رمز کننده آنزیم اندوگلوکاناز در جدایه واجد بالاترین فعالیت سلولازی بوده است. جدایه‌های مولد سلولاز با استفاده از رنگ کنگورد در محیط کشت کربوکسی متیل سلولز انتخاب شدند و میزان فعالیت اندوگلوکانازی آنها با روش سنجش میزان قند احیای آزاد شده با معرف دی نیتروسالیسیلیک اسید اندازه‌گیری شد. شناسایی گونه باکتری‌ها از طریق تکثیر و توالی‌یابی 16S rDNA انجام شد. همچنین، تولید آنزیم در جدایه منتخب در شرایط رشدی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس در بانک ژنی توالی‌های ژن اندوگلوکاناز در سویه‌های مختلف گونه باکتریایی که واجد بالاترین فعالیت اندوگلوکانازی بود جستجو شد و بر اساس اطلاعات به دست آمده اقدام به طراحی پرایمر جهت تکثیر ژن گردید. توالی قطعه تکثیر شده در بانک ژنی با توالی‌های موجود مقایسه شد. سنجش فعالیت آنزیم نشان داد که بالاترین فعالیت اندوگلوکانازی به ترتیب متعلق به جدایه‌های *باسیلوس سوبتیلیس* A2 (1/92 U/min.ml)، *باسیلوس سوبتیلیس* B2 (1/65 U/min.ml) و *باسیلوس سرئوس* H3 (1/51 U/min.ml) بود. ارزیابی مولکولی ژن اندوگلوکاناز در *باسیلوس سوبتیلیس* B2 مشابهت ۷۷ درصدی با ژن اندوگلوکاناز (*elgS*) *باسیلوس سوبتیلیس* زیر گونه سوبتیلیس را نشان داد. همچنین بیشترین تولید اندوگلوکاناز جدایه *باسیلوس سوبتیلیس* B2 در غلظت ۸ گرم در لیتر کربوکسی متیل سلولز، pH برابر با ۷ و فقدان نمک کلرید سدیم بود. توالی ژن اندوگلوکاناز این جدایه توانمند به عنوان یک توالی جدید در این مطالعه تکثیر و خالص شد و می‌تواند به منظور اهداف کلونینگ مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: اندوگلوکاناز، *باسیلوس سوبتیلیس*، باکتری‌های خاک، *elgS*

مقدمه

حمله قرار می‌گیرد و سلوبیوز آزاد می‌شود. سلوبیوز در نهایت توسط بتاگلوکوزیداز به مونومرهای گلوکز هیدرولیز می‌شود (۱۶). سلولازها دومین آنزیم از آنزیم‌های صنعتی بزرگ مورد استفاده در تجارت هستند که کاربردهای صنعتی مختلفی مانند صنعت نساجی، تولید دترجنت‌ها، تولید غذای حیوانات و انسان، صنعت کاغذ و صنعت سوخت زیستی دارند. پتانسیل تجاری سلولاز در کارایی تبدیل سلولز به مونومرهای آن نهفته است. شهرت سلولازها به علت فعالیت در مسیر تولید اتانول از لیگنوسلولز می‌باشد. اتانول زیستی به عنوان جایگزین برای سوخت فسیلی در نظر گرفته می‌شود. با اینکه روش‌های مختلفی برای تبدیل توده سلولزی به اتانول وجود دارد، روش آنزیمی به علت سازگاری با محیط زیست و پایداری از معروف‌ترین روش‌ها می‌باشد. بزرگترین مشکل در راه کاربرد صنعتی سلولازها قیمت بالا و راندمان کم تولید آنها می‌باشد. بنابراین هنوز مطالعات و تحقیقات بر روی سلولاز و یافتن سویه‌هایی با تولید سلولاز بالاتر ادامه دارد. همچنین با ترکیب دانش مهندسی ژنتیک انتظار می‌رود که

سلولازها کمپلکس‌های آنزیمی با ۳ جزء اندو ۱ و ۴ بتا دی گلوکاناز (اندوسلوبیوهیدرولاز)، آگزو ۱ و ۴ بتا دی گلوکاناز (آگزوسلوبیوهیدرولاز) و بتا گلوکوزیداز می‌باشد. تمامی این سه جزء به صورت هم‌افزایی عمل می‌کنند تا پلیمر سلولز را به طور کامل به مونومرهای گلوکز تبدیل کنند. اندو ۱ و ۴ بتا دی گلوکاناز به صورت تصادفی بین فیبرهای سلولزی عمل کرده، انتهاهای احیاء کننده یا غیر احیاء کننده ایجاد می‌کند که توسط آگزوسلوبیوهیدرولاز مورد

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد میکروبیولوژی و استادیار، گروه میکروبیولوژی، واحد فلاورجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
(*) نویسنده مسئول: Email: naghavi@iaufala.ac.ir

۳- استاد، گروه زیست‌شناسی سلولی و مولکولی و میکروبی‌شناسی، دانشکده علوم و فناوری‌های زیستی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

سلولازها در مقدار فراوان تولید شوند و در بسترهای ارزان قیمت در زیست پالایی به کار روند (۵ و ۱۶).

منابع اصلی تولید کننده سلولاز، قارچ‌ها و باکتری‌ها می‌باشند. میکروارگانیسم‌های زیادی قادر به تولید سلولاز هستند اما تنها تعداد کمی از آنها مقادیر قابل توجهی از این آنزیم را تولید می‌کنند. در میان باکتری‌های هوازی تجزیه کننده سلولز، بیشترین مطالعه روی *سلولوموناس* و *کلوستریدیوم* انجام شده است (۷). این در حالی است که *باسیلوس سوبتیلیس* از مهمترین باکتری‌هایی است که برای تولید سلولاز به کار گرفته شده‌اند. همچنین بیان سلولاز در برخی از گونه‌های باکتریایی از قبیل گونه‌های *باسیلوس*، *سودوموناس فلئورسنس*، *راستونیا آتروپا* و *زیموموناس موبیلیس* و همچنین برخی از گونه‌های مخمر از قبیل *ساکارومایسس سرویسیه* و *پیشیا پاستوریس* و برخی از گونه‌های قارچی از قبیل *آسپرژیلوس* و *تریکودرما* گزارش شده است (۹). خاک‌های جنگلی به دلیل غنی بودن از نظر مواد آلی سلولزی محیط مناسبی برای جداسازی میکروارگانیسم‌های هتروتروف مولد سلولاز بوده‌اند. به عنوان مثال در ایران در برخی مطالعات قبلی به غربالگری سوبه‌های میکروبی در میان جمعیت‌های هتروتروفی جداسازی شده از خاک‌های جنگلی پرداخته شده است و جدایه‌های توانمندی به دست آمده‌اند (۱ و ۱۲) لذا هدف پژوهش حاضر غربالگری باکتری‌های تجزیه کننده سلولز از خاک‌های جنگلی استان مازندران که بیشترین جمعیت هتروتروفی را دارا بودند و ردیابی و تکثیر ژن اندوگلوکاناز در جدایه‌هایی با بیشترین فعالیت آنزیمی بود.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری: به منظور جمع‌آوری باکتری‌های تولید کننده سلولاز از خاک‌های جنگل‌های مناطق مختلف استان مازندران نمونه‌گیری به عمل آمد. پس از کنار زدن سطح رویی خاک، از عمق ۲-۳ سانتی متری خاک از ایستگاه‌های مختلف نمونه تهیه شد و به آزمایشگاه منتقل گردید. جهت شمارش باکتری‌های هتروتروف ابتدا ۱۰ گرم از هر نمونه خاک به ۹۰ میلی لیتر سرم فیزیولوژی اضافه شد و به خوبی مخلوط گردید تا سوسپانسیونی با رقت یک دهم به دست آید. از سوسپانسیون حاصل رقت‌های مختلف در سرم فیزیولوژی تهیه شد و ۰/۵ میلی لیتر از هر رقت به طور جداگانه در سطح محیط آگار غذایی پخش گردید. محیط‌های کشت به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد گرمخانه گذاری شد. سپس کلنی‌های باکتریایی حاصل شمارش شد و میانگین واحدهای تشکیل دهنده کلنی در هر گرم (Cfu/g) از هر نمونه خاک با احتساب رقت و حجم مایه‌زنی شده محاسبه گردید. سپس از خاک‌هایی که بیشترین جمعیت هتروتروفی را دارا بودند برای جداسازی باکتری‌های مولد آنزیم سلولاز استفاده شد.

جداسازی باکتری‌های تجزیه کننده سلولز: برای جداسازی

باکتری‌های مولد آنزیم سلولاز، نمونه‌ها به محیط کشت کربوکسی متیل سلولز (CMC) براث با ترکیب ۶ گرم کربوکسی متیل سلولز، ۰/۵ گرم عصاره مخمر، ۰/۵ گرم آمونیوم سولفات و ۰/۲ گرم کلسیم کلرید در ۱۰۰۰ میلی لیتر آب مقطر (۱) انتقال یافت. محیط‌های کشت به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد با سرعت تکان ۱۶۰ دور در دقیقه گرمخانه‌گذاری شد. سپس کشت‌های مایع به محیط کشت جامد کربوکسی متیل سلولز حاوی ۱٪ آگار و ۰/۰۱٪ کنگورد (CMC+CR) جهت خالص‌سازی انتقال یافت و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد گرمخانه‌گذاری شد. پس از طی شدن زمان انکوباسیون، کلنی‌هایی که در اطراف آنها هاله بی‌رنگ ایجاد شده بود برای آزمایش‌های بعدی انتخاب شدند (۱۴). جدایه‌های غربال شده از نظر خصوصیات میکروسکوپی، واکنش گرم و آزمون‌های بیوشیمیایی اولیه مورد ارزیابی قرار گرفتند (۴).

سنجش فعالیت اندوگلوکاناز: باکتری‌های تولید کننده سلولاز

که قبلاً انتخاب شده بودند، در محیط کربوکسی متیل سلولز براث کشت داده شدند و به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد با تکان ۱۶۰ دور در دقیقه رشد یافتند. سپس محیط‌های کشت با دور ۱۰۰۰۰ در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ گردید و مایع رویی آنها جهت سنجش فعالیت آنزیم جمع‌آوری شد. سنجش فعالیت آنزیم اندوگلوکاناز بر اساس اندازه‌گیری میزان تولید قند احیاء از سوبسترای کربوکسی متیل سلولز صورت گرفت (۱۰). به این ترتیب که ۱ میلی لیتر از مایع رویی با ۱ میلی لیتر محلول کربوکسی متیل سلولز یک درصد و ۱ میلی لیتر از محلول بافر سیترات ۰/۱ مولار با pH برابر با ۴/۵ مخلوط شد و به مدت ۳۰ دقیقه در بن‌ماری با دمای ۴۵ درجه سانتی گراد گذاشته شد. سپس ۲ میلی لیتر از محلول دی نیتروسالیسیلیک اسید (DNS)، با ترکیب ۱۰ گرم سود، ۳/۵ گرم DNS، ۲ میلی لیتر فنل و ۰/۵ گرم سولفیت سدیم در یک لیتر آب مقطر، برای توقف فعالیت آنزیم به هریک از لوله‌ها اضافه شد و به منظور ایجاد رنگ مناسب در بن‌ماری جوش به مدت ۵ دقیقه قرارگرفت. پس از آن ۵ میلی لیتر آب مقطر به هر مخلوط اضافه شد و جذب نوری در طول موج ۵۴۰ نانومتر قرائت گردید. در نهایت با مراجعه به منحنی استاندارد جذب نوری غلظت‌های مختلف گلوکز سنجش شده با روش بالا، میزان قند آزاد شده در هر مخلوط اندازه گیری شد. هر میکرومول گلوکز آزاد شده در واحد دقیقه به عنوان یک واحد فعالیت آنزیم در هر میلی لیتر محلول آنزیمی (U/min.ml) در نظر گرفته شد (۸). جدایه با بالاترین فعالیت اندوگلوکانازی برای ردیابی ژن رمزکننده آنزیم انتخاب شد.

شناسایی مولکولی باکتری‌های تولید کننده سلولاز: برای

شناسایی دقیق گونه باکتری‌های مولد اندوگلوکاناز از تکثیر و توالی یابی ژن رمزکننده 16SrRNA استفاده شد. استخراج DNA با

R-endoG (GGATCCGAAACGTTCTATCTCTATC-3' و 5'-AAGCTTGTTCGGTTCGGTAC-3') در واکنش زنجیره پلی‌مراز با برنامه حرارتی شامل یک دوره دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه و پس از آن ۳۵ دوره با مراحل حرارتی ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ ثانیه، ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵۰ ثانیه و ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه انجام شد. این برنامه بر اساس دمای ذوب آغازگرها بهینه‌سازی گردید.

نتایج و بحث

شمارش و جداسازی باکتری‌ها: نتایج شمارش باکتری‌های هتروتروف نشان‌دهنده وجود بیشترین تعداد باکتری‌های هتروتروف در ایستگاه B جنگل سیاکلا بود (جدول ۱). پس از آن ایستگاه A جنگل نانواکلا و ایستگاه G جنگل سی‌سنگان به ترتیب بیشترین تعداد باکتری‌های هتروتروف را دارا بودند.

از ۸ ایستگاه جنگلی منتخب که در جدول ۱ مشاهده شد، تعداد ۸ جدایه برتر تولید کننده سلولاز در محیط کشت CMC+CR انتخاب شدند که محل جداسازی، مشخصات و میزان فعالیت اندوگلوکانازی آنها در جدول ۲ آمده است. نتایج نشان دهنده بالاترین فعالیت آنزیم اندوگلوکانازی به ترتیب در جدایه‌های A2، B2 و H3 بود.

شناسایی مولکولی جدایه‌های منتخب: تکثیر ژن 16SrRNA منجر به تشکیل باند ۱۵۰۰ جفت بازی پس از الکتروفورز بر روی ژل آگارز گردید (شکل ۱). نتایج توالی‌یابی محصولات PCR خالص سازی شده از ژل و جستجوی توالی‌ها در بانک جهانی داده بیوتکنولوژی (NCBI) نشان داد جدایه‌های A2 و B2 با ۹۹٪ مشابهت متعلق به گونه *باسیلوس سوتیلیس* بودند. همچنین جدایه H3 با ۹۹٪ مشابهت متعلق به گونه *باسیلوس سرئوس* بود. قرابت جدایه‌ها در نرم افزار MEGA-6 به صورت درخت فیلوژنی به دست آمد (شکل ۲).

شناسایی مولکولی جدایه‌های منتخب: تکثیر ژن 16SrRNA منجر به تشکیل باند ۱۵۰۰ جفت بازی پس از الکتروفورز بر روی ژل آگارز گردید (شکل ۱ الف). نتایج توالی‌یابی محصولات PCR خالص سازی شده از ژل و جستجوی توالی‌ها در بانک جهانی داده بیوتکنولوژی (NCBI) نشان داد جدایه‌های A2 و B2 با ۹۹٪ مشابهت متعلق به گونه *باسیلوس سوتیلیس* بودند. همچنین جدایه H3 با ۹۹٪ مشابهت متعلق به گونه *باسیلوس سرئوس* بود. قرابت جدایه‌ها در نرم‌افزار MEGA-6 به صورت درخت فیلوژنی به دست آمد (شکل ۲).

استفاده از کیت شرکت پیشگامان انتقال ژن (ایران) با شماره کاتالوگ DV01100 انجام شد. ژن 16SrDNA با استفاده از آغازگرهای عمومی 27F (5'-AGAGTTTCCTGGCTCAG-3') و 1492R (5'-ACGGCTACCTTGTACGATT-3') در واکنش زنجیره پلی‌مراز با برنامه حرارتی شامل یک دوره دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه و پس از آن ۳۰ دوره با مراحل حرارتی ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۳ ثانیه، ۵۹/۹ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۵ ثانیه و ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ ثانیه انجام شد. این برنامه بر اساس دمای ذوب آغازگرها بهینه‌سازی گردید. قطعه تکثیر شده در ژل آگارز ۱٪ الکتروفورز شد و باند تشکیل شده پس از استخراج از ژل با استفاده از کیت شرکت کیاژن (آمریکا) با شماره کاتالوگ ۲۸۷۰۴، جهت توالی‌یابی به شرکت ژن فناوری ارسال گردید. تعیین توالی به صورت یک طرفه انجام شد. توالی ژن در بانک جهانی داده بیوتکنولوژی (NCBI) با توالی‌های موجود مقایسه شد و گونه باکتری جداسازی شده مشخص گردید.

مطالعات آنزیم‌شناسی: با توجه به این که منبع کربن، pH و نمک از جمله تأثیرگذارترین عوامل بر روی بیان سلولازهای باکتریایی معرفی شده‌اند (۲ و ۱۳)، تأثیر این عوامل بر روی میزان تولید آنزیم در باکتری منتخب مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور بررسی اثر منبع کربن، pH و نمک کلرید سدیم بر تولید اندوگلوکاناز توسط جدایه منتخب، از محیط‌های کشت کربوکی متیل سلولز مایع به ترتیب با غلظت‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ گرم در لیتر کربوکی متیل سلولز به عنوان منبع کربن، مقادیر pH ۴، ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵، ۷، ۷/۵، ۸، ۸/۵، ۹، ۹/۵ و ۱۰ و غلظت‌های ۰، ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ گرم در لیتر کلرید سدیم در ارلن‌های جداگانه استفاده گردید. به هر محیط کشت تعداد $10^8 \times 1/5$ باکتری مایه‌زنی شد و به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت تکان ۱۶۰ دور در دقیقه گرمخانه گذاری شد. در پایان آزمایش میزان فعالیت آنزیم در عصاره‌های سلولی پس از سانتریفوژ اندازه‌گیری شد. کلیه آزمایش‌ها در ۳ تکرار انجام شد و برای بررسی اختلاف میانگین‌ها آزمون ناپارامتری کروسکال-والیس مورد استفاده قرار گرفت. در تمام آزمون‌ها سطح خطای ۵ درصد در نظر گرفته شد.

تکثیر ژن اندوگلوکاناز با استفاده از آغازگرهای اختصاصی: پس از شناسایی گونه باکتریایی که واجد بالاترین فعالیت سلولازی بود، توالی ژن اندوگلوکاناز در سویه‌های مختلف آن در بانک جهانی داده بیوتکنولوژی (NCBI) جستجو شد و توالی ژن‌ها با درصد بالای تشابه به دست آمد. سپس بر اساس اطلاعات به دست آمده، آغازگرها در برنامه Oligo7 همراه با جایگاه برشی *BamHI* و *HindIII* روی ادپتورهای پلاسمیدی طراحی شدند تا بتوان در تحقیقات بعدی از قطعه تکثیر شده برای همسانه‌سازی نیز استفاده نمود. این آغازگرهای اختصاصی شامل F-endoG (5'-

جدول ۱- شمارش کل باکتری‌های هتروتروف در ایستگاه‌های جنگلی مورد مطالعه

Table 1- The results of total heterotrophic bacterial count in the studied forest stations with maximum heterotrophic population

نام ایستگاه جنگلی The name of forest station	نانواکلا Nanocla (A)	سیاکلا Siakla (B)	سومعه سرا Someesara (C)	نمک آبرود Namakabroud (D)	نور Noor (E)	ایزدشهر Izadshahr (F)	سی سنگان Sisangan (G)	سه هزار Sehezar (H)
میانگین شمارش The mean count (Cfu/g)	2.53×10^6	1.77×10^8	1.95×10^6	1.41×10^6	1.01×10^8	1.21×10^6	2.34×10^6	1.07×10^6

جدول ۲- باکتری‌های تولید کننده سلولاز غربال شده در محیط کشت CMC+CR

Table 2- Cellulase producing bacteria screened by congo red screening and their characteristics

نام جدایه Isolate number	شکل و واکنش گرم The shape and Gram reaction	اکسیداز Oxidase	کاتالاز Catalase	حرکت Motility	تولید اسید از گلوکز Acid production from glucose	فعالیت اندوگلوکانازی Endoglucanase activity (U/min.ml)
A2	باسیل گرم مثبت Gram-positive rod	+	+	+	+	1.65
A4	کوکسی گرم مثبت Gram-positive cocci	-	+	-	-	1.16
B1	کوکسی گرم مثبت Gram-positive cocci	-	+	+	-	1.40
B2	باسیل گرم مثبت Gram-positive rod	+	+	+	+	1.92
E1	کوکسی گرم منفی Gram-negative cocci	-	+	+	-	1.12
F1	باسیل گرم منفی Gram-negative rod	-	+	+	+	0.98
H4	باسیل گرم منفی Gram-negative rod	-	+	+	+	1.21
H3	باسیل گرم مثبت Gram-positive rod	+	+	+	+	1.51

یابی ژن 16SrRNA شناسایی نمودند. این جدایه‌ها به جنس‌های *جئوباسیلوس*، *باسیلوس* و *کریسئوباکتر* تعلق داشتند. فعالیت اندوگلوکانازی *باسیلوس سوتیلیس* جدایه B2 در بررسی حاضر در حدود ۱/۹۲ واحد در یتر در دقیقه بود که نسبت به بیشتر مطالعات قبلی بالا می باشد. ستی و همکاران (۱۵) باکتری‌های مختلف تولید کننده سلولاز از جمله *باسیلوس سوتیلیس* را از خاک جداسازی کردند و بیشترین فعالیت سلولازی آنها را در حدود ۰/۹ واحد در میلی لیتر در دقیقه گزارش کردند. لیانگ و همکاران (۶) باکتری‌های مختلف مولد سلولاز را از خاک جداسازی کردند. برترین جدایه مولد سلولاز متعلق به جنس *بورخولدریا* با بیشترین فعالیت سلولازی ۰/۲ واحد در میلی لیتر در دقیقه بود. پندی و همکاران (۱۱) فعالیت اندوگلوکانازی

در مطالعات دیگر در خاک‌های جنگلی ایران برای جداسازی باکتری‌های تولید کننده سلولاز، جنس *باسیلوس* از جمله باکتری‌هایی با بیشترین فعالیت آنزیم سلولاز بوده است. در پژوهشی که توسط پاست و همکاران (۱۲) بر روی ۴۰ باکتری جدا شده از خاک نواحی مازندران انجام شد، تعداد ۲۴ باکتری جدا شده در جنس *باسیلوس* شناسایی شدند که در محیط کربوکسی متیل سلولز قادر به تولید آنزیم سلولاز بودند. همچنین، آساره و همکاران (۱) باکتری‌های ترموفیل و مزوفیل تولید کننده سلولاز را از خاک جنگلی چیتگر واقع در شهر تهران در حضور سلولز میکروکریستالی به عنوان تنها منبع کربن، با استفاده از تکنیک زایموگرام در پلیت جداسازی و خالص سازی کردند و جدایه‌های دارای بیشترین فعالیت آنزیم سلولاز را از طریق توالی

با شماره دسترسی MK158077 ثبت گردید. پندی و همکاران (۱۱) توالی ۳۵ اندوگلوکاناز باکتریایی را در بانک NCBI مورد بررسی قرار دادند و از بین آنها توالی‌های اندوگلوکاناز ثبت شده در سویه‌های *باسیلوس* را برای طراحی پرایمر انتخاب کردند. توالی به دست آمده در مطالعه حاضر با اندوگلوکاناز دیگری از جمله اندوگلوکاناز ثبت شده توسط پندی و همکاران (۱۱) مشابهت نشان نداد.

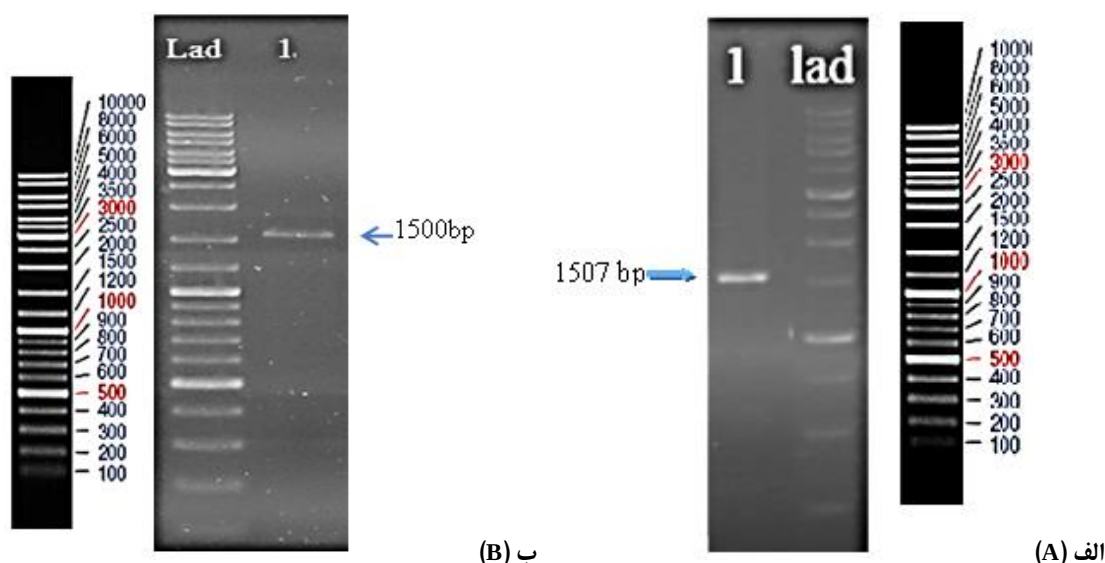
تأثیر منبع کربن، pH و نمک بر تولید اندوگلوکاناز در جدایه منتخب: به دلیل این که جدایه B2 بیشترین تولید آنزیم اندوگلوکاناز را در میان باکتری‌های جداسازی شده دارا بود، سعی گردید تولید آنزیم توسط این جدایه با تغییر شرایط رشد ارتقاء یابد. نتایج بهینه‌سازی غلظت‌های منبع کربن و نمک کلرید سدیم جهت تولید اندوگلوکاناز در جدایه منتخب B2 در نمودار شکل‌های ۳، ۴ و ۵ مشاهده می‌شود.

جدایه B2 در غلظت‌های مختلف کربوکی متیل سلولز به عنوان منبع کربن قادر به رشد بود اما بیشترین فعالیت اندوگلوکانازی در غلظت ۸ گرم در لیتر با اختلاف معنی‌داری نسبت به سایر غلظت‌ها مشاهده شد که بیشتر از مقدار مورد استفاده در محیط کشت کربوکی متیل سلولز برات (۶ گرم در لیتر) می‌باشد (۱).

باسیلوس سوبتیلیس جداسازی شده از خاک را برابر با ۲/۸ واحد در میلی‌لیتر در دقیقه گزارش کرده‌اند. مطالعه ما نشان داد جنگل‌های نور از جمله بهترین مکان‌ها برای جداسازی سویه‌های توانمند باکتریایی مولد سلولاز می‌باشند.

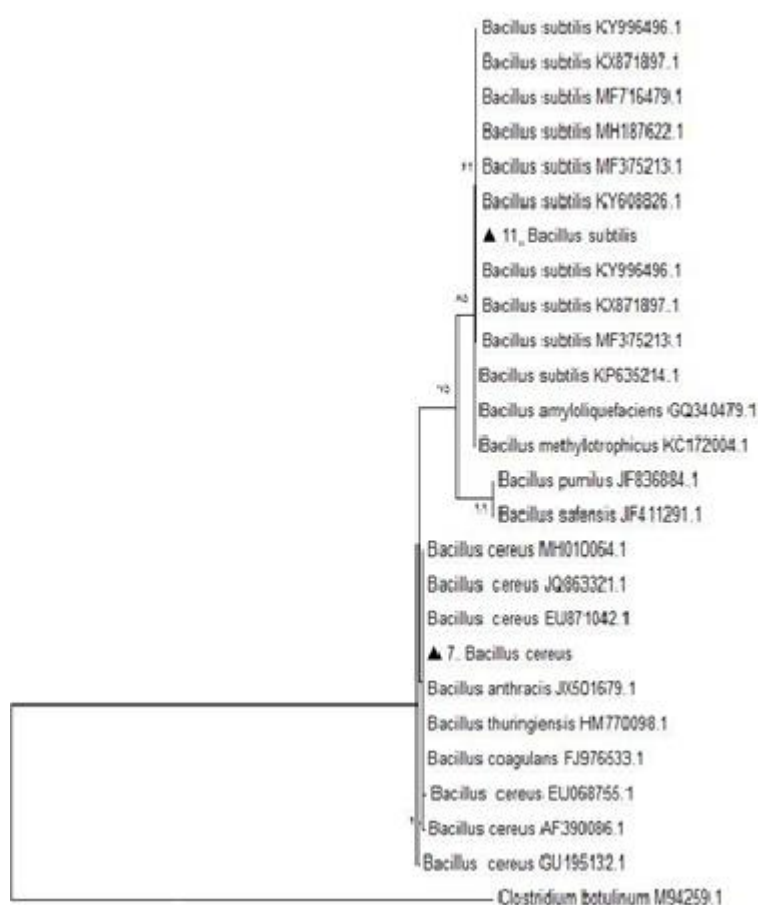
ردیابی ژن کد کننده اندوگلوکاناز در جدایه منتخب: با توجه به این که باکتری *باسیلوس سوبتیلیس* جدایه B2 بیشترین فعالیت اندوگلوکانازی را نشان داد، ژن سلولاز در این باکتری ردیابی شد و برای تکثیر آن جفت پرایمرهای F-endoG (GGATCCATGAAACGTTCTATCTCTATC) و R-endoG (AAGCTTCTAGTTCGGTTCGGTAC) طراحی گردید.

تکثیر ژن اندوگلوکاناز در *باسیلوس سوبتیلیس* جدایه B2 منجر به حصول قطعه ۱۵۰۷ جفت بازی گردید که تصویر ژل الکتروفورز آن در آگارز ۱٪ در شکل ۱ ب مشاهده می‌شود. توالی‌یابی ژن اندوگلوکاناز تکثیر شده و مقایسه توالی آن در بانک NCBI، مشابهت ۷۷ درصدی با ژن اندوگلوکاناز (*egls*) *باسیلوس سوبتیلیس* زیر گونه *سوبتیلیس* (با شماره دسترسی NC_000964.3 در NCBI) نشان داد که توسط بلدا و همکاران (۳) در کل ژنوم *باسیلوس سوبتیلیس* زیر گونه *سوبتیلیس* ثبت شده است. این توالی در بانک جهانی داده بیوتکنولوژی (NCBI)

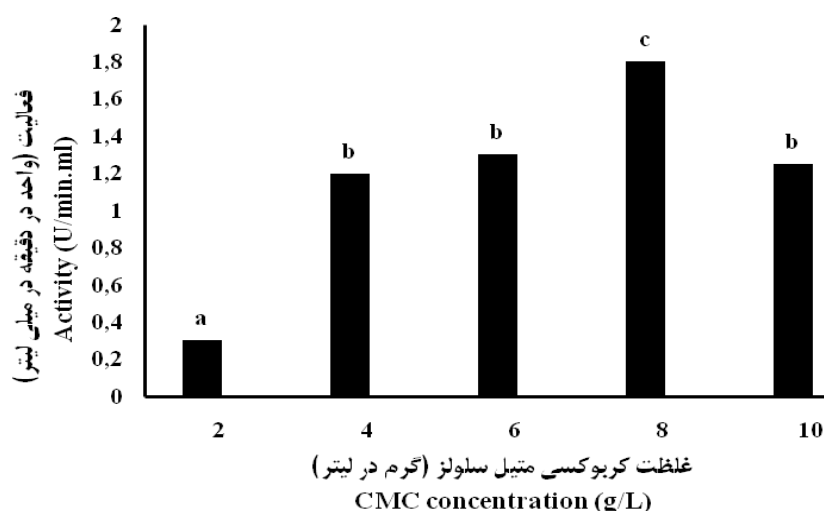


شکل ۱- الف: ژل الکتروفورز محصول PCR ژن 16SrRNA بر روی ژل آگارز ۱٪. چاهک lad: مارکر ۱۰۰ جفت بازی، چاهک (۱): نمونه باند تکثیر شده. ب: نتیجه ژل الکتروفورز جهت بررسی محصول PCR ژن اندوگلوکاناز بر روی ژل آگارز ۱٪. چاهک lad: مارکر ۱۰۰ جفت بازی، چاهک (۱): کنترل منفی، چاهک (۲): باند تکثیر شده با پرایمرهای اختصاصی ژن اندوگلوکاناز

Figure 1- A: Gel electrophoresis of 16SrRNA gene PCR product on agarose 1% gel. Lad well: 100bp marker, well 1: a sample of the amplified band. B: The result of gel electrophoresis for analysis of endoglucanase gene PCR product on agarose 1% gel. Lad well: 100bp marker, well 2: the amplified band using specific primers for endoglucanase gene



شکل ۲- درخت فیلوژنی جدایه‌های باکتری مولد سلولاز که شامل گونه‌های *باسیلوس سوبتیلیس* و *باسیلوس سرئوس* می‌باشند
Figure 2- Phylogenetic tree of the cellulase producing bacterial isolates including *Bacillus subtilis* and *Bacillus cereus*

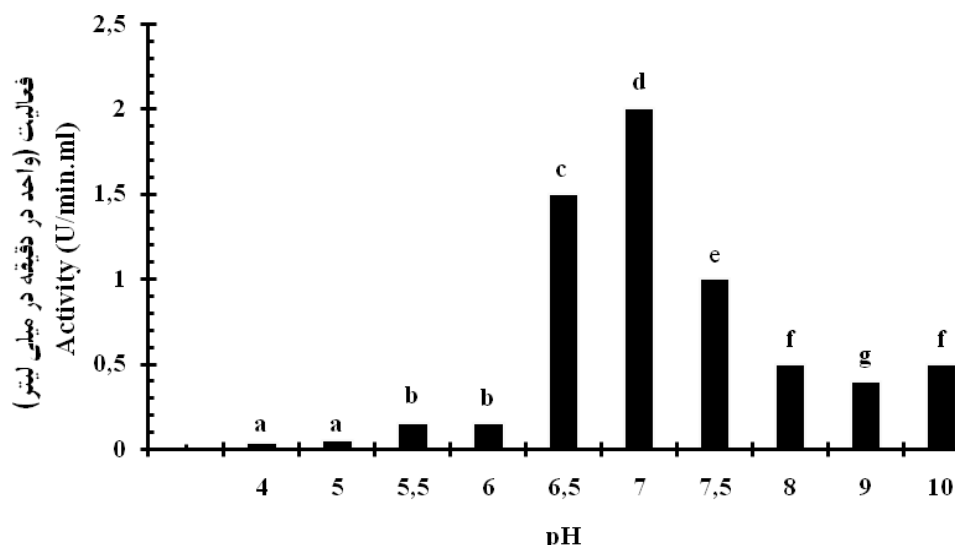


شکل ۳- تأثیر غلظت‌های مختلف منبع کربن کربوکسی متیل سلولز بر تولید اندوگلوکاناز توسط جدایه B2 در محیط کشت کربوکسی متیل سلولز
براث

اختلاف میانگین بین گروه‌هایی که حروف آماری مشترک دارند، از لحاظ آماری معنی‌دار نیست ($p < 0.05$).

Figure 3- The effect of different concentrations of carboxymethyl cellulose carbon source on endoglucanase production rate by B2 strain in carboxymethyl cellulose broth medium

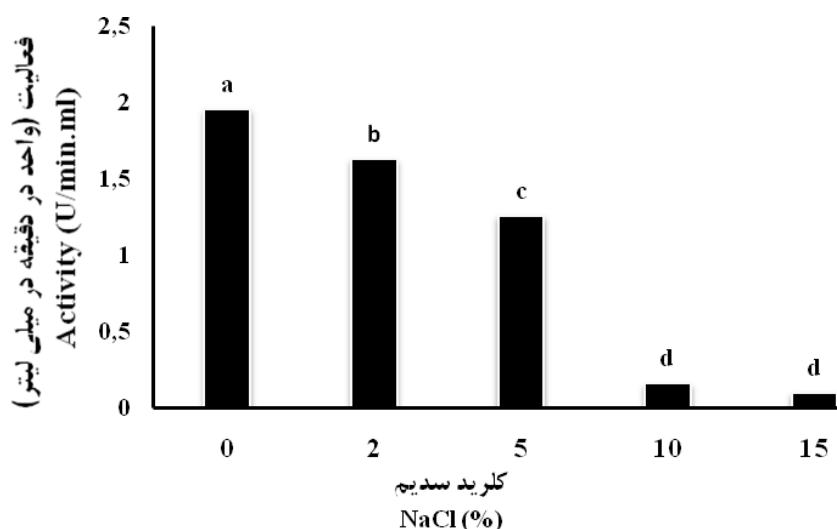
No significant differences were seen between the groups showed with the same letters.



شکل ۴- تأثیر pH محیط کشت بر تولید آنزیم اندوگلوکاناز توسط جدایه B2 در محیط کشت کربوکسی متیل سلولز برات اختلاف میانگین بین گروه‌هایی که حروف آماری مشترک دارند، از لحاظ آماری معنی‌دار نیست ($p < 0.05$).

Figure 4- The effect of culture medium pH on endoglucanase production rate by B2 strain in carboxymethyl cellulose broth medium

No significant differences were seen between the groups showed with the same letters.



شکل ۵- تأثیر غلظت‌های مختلف نمک کلرید سدیم بر تولید آنزیم اندوگلوکاناز توسط جدایه B2 در محیط کشت کربوکسی متیل سلولز برات اختلاف میانگین بین گروه‌هایی که حروف آماری مشترک دارند، از لحاظ آماری معنی‌دار نیست ($p < 0.05$).

Figure 5- The effect of different concentrations of sodium chloride salt on endoglucanase production rate by B2 strain in carboxymethyl cellulose broth medium

No significant differences were seen between the groups showed with the same letters.

آمیلولیکوئی فاسینس جداسازی شده توسط پی و همکاران (۱۸) نیز در pH برابر با ۷ بالاترین تولید اندوگلوکاناز را نشان داده است. همچنین در مطالعه حاضر نمک کلرید سدیم در غلظت‌های بیش از ۲ درصد به طور معنی‌دار موجب کاهش دهنده تولید اندوگلوکاناز توسط باسیلوس سوبتیلیس جدایه B2 شد. به‌طوری‌که باکتری جداسازی شده قادر به

بهترین pH برای تولید سلولاز، در محدوده ۷ با اختلاف معنی‌داری نسبت به سایر مقادیر pH بود و تولید آنزیم در محدوده pH برابر با ۶/۵ تا ۷۵ درصد حفظ می‌شد. این در حالی است که جدایه‌های باسیلوس جداسازی شده از خاک جنگلی چیتگر در تهران نیز در pH برابر با ۷/۱ بهترین عملکرد را نشان دادند (۱). باسیلوس

(۱/۹۲) در pH خنثی بود و تولید آنزیم در محدوده pH اسیدی ضعیف تا ۷۵ درصد حفظ می‌شد. هم‌چنین باکتری جداسازی شده قادر به ادامه تولید اندوگلوکاناز در غلظت ۵ درصد نمک به میزان ۶۵ درصد از تولید در محیط بدون نمک بود که اهمیت استفاده از این باکتری جهت حذف باقی‌مانده‌های سلولزی در محیط‌های شور را نشان می‌دهد. ژن اندوگلوکاناز به دست آمده از این باکتری در بررسی حاضر دارای توالی جدیدی می‌باشد و محصول آن دارای فعالیت مناسبی نسبت به سایر اندوگلوکانازهای باکتریایی است. با افزایش بیان این ژن در همین سویه یا سویه‌های باکتریایی دیگر می‌توان از آن برای تولید بالای اندوگلوکاناز در صنعت انرژی زیستی استفاده کرد.

سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد فلاورجان به علت در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی قدردانی می‌شود.

ادامه تولید اندوگلوکاناز در غلظت‌های ۲ و ۵ درصد نمک به‌ترتیب به میزان ۷۵ و ۶۵ درصد از تولید در محیط بدون نمک بود. مطالعات مختلفی بر روی تولید سلولازها در محیط‌های نمکی انجام شده است که در میان آن‌ها مطالعه ونگ و همکاران (۱۷) از جمله تحقیقاتی است که در آن بالاترین تولید و فعالیت سلولاز در گونه‌ای از باکتری *سالینوویبریو* در محیط حاوی کلرید سدیم اندازه‌گیری شده است. به طوری که بیشترین تولید و فعالیت در حضور ۵٪ کلرید سدیم مشاهده شده است و این مقدار با افزایش نمک سدیم کلرید تا غلظت ۲۵٪ به ۲۴٪ تولید اولیه کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری

بررسی حاضر با هدف غربال‌گری سویه‌های توانمند تولید کننده اندوگلوکاناز از خاک‌های جنگلی مازندران، بهینه‌سازی فعالیت آنزیم و ردیابی ژن رمز کننده آن در باکتری‌های تجزیه کننده سلولز جداسازی شده از خاک مناطق جنگلی مازندران انجام شد. جدایه‌های *باسیلوس سوتیلیس* A2 دارای فعالیت بالای اندوگلوکانازی (U/min.ml)

منابع

- 1- Assareh R., Zahiri H.S., and Eshghi S. 2014. Isolation and identification of native cellulose-degrading bacteria from soil. *Journal of Cell and Molecular Research* 27(1): 99-110. (In Persian)
- 2- Azizi M., and Hemmat J. 2016. Isolation of thermotolerant *Isoptericola variabilis* IDAH9 and optimization of its exoglucanase activity. *Modares Journal of Biotechnology* 7(2): 70-80. (In Persian)
- 3- Belda E., Sekowska A., Le Fèvre F., Morgat A., Mornico D., Ouzounis C., Vallenet D., Médigue C., and Danchin A. 2013. An updated metabolic view of the *Bacillus subtilis* 168 genome. *Microbiology* 159(4): 757-70.
- 4- Brooks G.F., Butel J.S., and Morse S.A. 2010. *Jawets Melnick and Adelbergs medical microbiology*, McGraw Hill companies, New York.
- 5- Ho S.H., Li P.J., Liu C.C., and Chang J.S. 2013. Bioprocess development on microalgae-based CO₂ fixation and bioethanol production using *Scenedesmus obliquus* CNW-N. *Bioresource Technology* 145: 142-149.
- 6- Liang Y.L., Zhang Z., Wu M., Wu Y., and Feng J.X. 2014. Isolation, screening, and identification of cellulolytic bacteria from natural reserves in the subtropical region of China and optimization of cellulase production by *Paenibacillus terrae* ME27-1. *BioMedical Research International* 512497.
- 7- Lynd L.R., Weimer P.J., and VanZyl W.H. 2002. Microbial cellulose utilization: Fundamentals and biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 66: 506-577.
- 8- Mandel M., and Weber J. 1969. Exoglucanase activity by microorganisms. *Advances in Chemistry* 95: 391-414.
- 9- Menendez E., Garcia-Fraile P., and Rivas R. 2015. Biotechnological applications of bacterial cellulases. *AIMS Bioengineering* 2(3): 163-182.
- 10- Naghavi N.S., Saffari S., Zia M.A., and Ghalamkari G.R. 2012. Isolation and identification of the fungus *Caecomyces* from sheep rumen and optimization of its cellulolytic activity. *Journal of Veterinary Research* 12: 27-34. (In Persian)
- 11- Pandey S., Kushwah J., Tiwari R., Kumar R., Somvanshi V.S. Nain, L., and Saxena A.K. 2014. Cloning and expression of β -1, 4-endoglucanase gene from *Bacillus subtilis* isolated from soil long term irrigated with effluents of paper and pulp mill. *Microbiology Research* 169(9-10): 693-698.
- 12- Past S., Nazemi A., Khataminejad M.R., Mirinargesi M.S., Mousavi S., and Salehi A. 2012. Isolation and molecular identification of cellulase producing *Bacillus* strains from Mazandaran forests soil. *Microbial Biotechnology* 4(12): 1-6. (In Persian)
- 13- Rastogi G., Aditya B., Adhikari A., Bischoff K., Hughes S., Christopher L., and Sani R. 2010. Characterization of thermostable cellulases produced by *Bacillus* and *Geobacillus* strains. *Bioresource Technology* 101: 8798-8806.
- 14- Rasul F., Afroz A., Rashid U., Mehmood S., Sughra K., and Zeeshan N. 2015. Screening and characterization of cellulase producing bacteria from soil and waste (molasses) of sugar industry. *International Journal of Bioscience*

- 6(3): 230-236.
- 15- Sethi S., Datta A., Gupta B.L., and Gupta S. 2013. Optimization of cellulase production from bacteria isolated from soil. *ISRN Biotechnology*, 2013:985685.
- 16- Singhanian R.R., Adsul M., Pandey A., and Patel A.K. 2017. Cellulases In: S. Dubey et al. (ed.) *Current developments in biotechnology and bioengineering*. Elsevier, London.
- 17- Wang CY., Hsieh YR., Ng CC., Chan H., Lin HT., Tzeng WS., and Shyu YT. 2009. Purification and characterization of a novel halostable cellulase from *Salinivibrio* sp. strain NTU-05. *Enzyme and Microbial Technology* 44: 373-9.
- 18- Ye M., Sun L., Yang R., Wang Z., and Qi K. 2017. The optimization of fermentation conditions for producing cellulase of *Bacillus amyloliquefaciens* and its application to goose feed. *Royal Society Open Science* 4(10): 171012.



Detection of Endoglucanase Gene in Cellulose Degrading Bacteria Screened from Forest Soils of Mazandaran, Iran

E. Ghadiri¹- N.S. Naghavi^{2*}- K. Ghaedi³

Received: 02-01-2019

Accepted: 27-01-2020

Introduction: Cellulase enzymes are the second largest group of the enzymes with many industrial applications such as in textile industries, production of detergents, animal and human food processing, paper industries and biofuel production. Many microorganisms are capable for production cellulases, but only a small number of them produce significant amounts of this enzyme. The main sources of cellulases production are microorganisms including fungi and bacteria. Among the cellulose degrading aerobic and anaerobic bacteria, most of the studies have been done on *Cellulomonas* spp. and *Clostridium* spp., respectively. Also *Bacillus* spp. has been used for production of cellulase in a homologous manner. Expression of cellulases in some bacterial genera such as *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Ralstonia* and *Zymomonas*, as well as some yeast species such as *Saccharomyces cerevisiae* and some fungal genera such as *Aspergillus* and *Trichoderma* has been reported too. Low levels of cellulase production has always been a major concern that leads to researches for finding of highly active microorganisms strains and employing biological technologies for identification of their enzyme coding genes suitable for probable transformation other organisms. The purpose of this study was the screening of the cellulose degrading bacteria in Mazandaran forest soils and detection of the enzyme coding gene in the isolate with the highest cellulase activity.

Materials and Methods: In order to isolate cellulase producing bacteria, soil samples were obtained from different regions of Mazandaran province forests including Nanoacla (A), Siaocla (B), Someesara (C), Namakabroud (D), Noor (E), Izadshahr (F), Sisanghan (G) and Sehezar (H) forests. Cellulase producing isolates were selected on carboxymethyl cellulose agar using congo red dye and the amount of their endoglucanase activities was measured by assessment of released glucose using dinitrosalicylic acid reagent. Each micromole of released glucose in 1 ml of enzyme solution per minute was considered as an enzyme activity unit (U/min.ml). Identification of bacterial species was performed by amplification and sequencing of a 1500 bp length fragment in 16S rDNA by using 1492R and 27F universal primers. Enzyme production by the selected isolates was also detected in different growth conditions. In order to investigate the effect of carbon source concentration, the amounts of 2-10 g/L of carboxymethyl cellulose were added to bacterial growth culture media. The effect of growth pH values in the range of 4 to 10 and sodium chloride at concentrations of 0 to 10 g/L were studied on endoglucanase production by the selected isolates in carboxymethyl cellulose media. Then the endoglucanase coding sequences in different strains of the bacterial sp. with the highest endoglucanase activity were investigated in Gen Bank and the primers were designed based on the obtained data for the gene amplification.

Results and Discussion: The results of heterotrophic bacteria counting showed the highest number at station B (Siakla forest). Subsequently, station A (Nanocla forest) and station G (Sisangan forest) had the highest number of heterotrophic bacteria, respectively. From the eight selected forest stations, eight top cellulase producing isolates were selected in carboxy methyl cellulose broth medium. The highest endoglucanase activities were belonged to the isolates A2 (1.92 U/min.ml), B2 (1.65 U/min.ml), and H3 (1.51 U/min.ml), respectively. The amplification of the 16SrRNA gene resulted in the formation of a 1500 bp band after electrophoresis in agarose gel electrophoresis. Sequencing results of the purified PCR products showed that B2 and A2 isolates belonged to *Bacillus subtilis* with 99% similarity. H3 isolate also belonged to *Bacillus cereus* with 99% similarity. In other studies in the forest soils of Iran for isolation of cellulase producing bacteria, *Bacillus* had been one of the most active cellulase enzyme producers. The present study showed that Noor forests are among the best places to isolate bacterial cellulase-producing strains. PCR amplification protocol was

1 and 2- M.Sc. in Microbiology and Assistant Professor, Department of Microbiology, Falavarjan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: naghavi@iaufala.ac.ir)

3- Professor, Department of Cell and Molecular Biology and Microbiology, Faculty of Biological Science and Technology, University of Isfahan, Isfahan, Iran

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.77293

designed and the total sequence of endoglucanase with 1072 bp length was amplified. Molecular evaluation of endoglucanase gene in *Bacillus subtilis* (B2) showed 77% similarity to the endoglucanase gene (*elgS*) in *Bacillus subtilis* subsp. *subtilis*. Since the strain B2 had the highest production of endoglucanase among the isolated bacteria, it was attempted to enhance the production of the enzyme using this strain by changing the growth conditions. The isolate B2 was able to grow at different concentrations of carboxymethyl cellulose as a carbon source, but the highest endoglucanase activity was observed at the concentration of 8 g/L with a significant difference compared to other concentrations. The pH equal to 7 and the absence of sodium chloride salt was also led to significant highest endoglucanase production by this isolate.

Conclusion: The *endoglucanase* gene obtained in this study was reported for the first time with a new sequence. The enzyme showed more sustainable activity than other aerobic bacterial endoglucanases which had previously been studied. This sequence can be introduced into high expressional bacterial strains and used to produce high amounts of endoglucanase for bio-energy industries applications.

Keywords: *Bacillus subtilis*, *Endoglucanase* gene, Soil bacteria



توزیع مکانی جیوه در خاک‌های اطراف کارخانه سیمان کرمان

مریم یوسفی فرد^۱ - اعظم جعفری^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۷

چکیده

خاک‌ها به دلیل دریافت رسوبات، شاخص‌های معتبری از پدیده آلودگی هستند. اطلاعات کمی در زمینه توزیع جیوه در خاک‌های مناطق صنعتی بویژه در ایران موجود است. به منظور بررسی توزیع مکانی جیوه و همچنین وسعت آلودگی جیوه در خاک، مطالعه‌ای در خاک‌های اطراف کارخانه سیمان کرمان طراحی و اجرا گردید. تعداد ۱۰۳ نمونه خاک سطحی جمع‌آوری و غلظت کل جیوه خاک تعیین گردید. شاخص‌های ارزیابی میزان آلودگی، محاسبه و نقشه‌های پراکنش مکانی جیوه تهیه شد. همچنین نقش فاکتورهای محیطی در توزیع جیوه بررسی گردید. غلظت کل جیوه در خاک در محدوده ۶/۷ تا ۳۴۱ میکروگرم در کیلوگرم با میانگین ۱۶۴/۱ میکروگرم در کیلوگرم به دست آمد. مقایسه مقادیر این عنصر با میانگین جهانی آن در خاک‌ها نشان می‌دهد فعالیت‌های صنعتی در منطقه باعث افزایش غلظت جیوه در خاک شده است. نتایج حاصل از شاخص زمین انباشتگی نمونه‌های خاک نشان داد که خاک‌های مورد مطالعه از نظر آلودگی جیوه در محدوده غیرآلوده تا آلودگی متوسط و براساس فاکتور آلودگی، سطوح آلودگی کم تا آلودگی قابل ملاحظه جیوه مشخص گردید. نقشه توزیع مکانی غلظت کل جیوه نشان می‌دهد بیشترین غلظت جیوه در اطراف کارخانه و به سمت جنوب و جنوب شرقی منطقه مشاهده می‌شود. غلظت‌های بالای جیوه در مناطق کم ارتفاع و کم شیب روی شیب جنوبی منطقه مشاهده می‌شود. نتایج نشان داد هر چند غلظت این آلاینده در منطقه مورد مطالعه حاد نمی‌باشد ولی با توجه به نزدیک بودن منطقه صنعتی به محل مسکونی، برنامه‌ریزی جهت کنترل انتشار این فلز و آلاینده‌های دیگر باید مورد توجه جدی قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: شاخص آلودگی، غلظت جیوه، کارخانه سیمان، متغیرهای محیطی

مقدمه

ایجاد اختلال در محیط زیست می‌باشد که به دلیل غیر قابل تجزیه بودن و اثرات مضر بر موجودات زنده در غلظت‌های کم با اهمیت شناخته شده‌اند (۱۰). حضور فلزات سنگین در خاک در مرحله اول به نوع و جنس مواد مادری خاک بستگی دارد، چرا که خاک از مواد مادری زیرین خود تشکیل می‌شود. بنابراین خاک در حال تشکیل، عمده عناصر خود را از مواد مادری به ارث می‌برد مگر اینکه در طی زمان فرایندی یا فعالیتی نامتعارف اتفاق افتد. فعالیت‌های انسانی از جمله فعالیت‌هایی هستند که باعث تغییر روند یک فرایند طبیعی در خاک می‌شوند، از جمله منجر به افزایش بیش از حد غلظت فلزات سنگین در طبیعت می‌شوند. از بین فلزات سنگین، جیوه (Hg) از سمی‌ترین عناصر منتشر شده توسط فعالیت‌های صنعتی است که می‌تواند تأثیرات منفی بر سیستم عصبی و مجاری تنفسی در انسان و حیات وحش داشته باشد. جیوه به اشکال عنصری، فلزی و آلی در طبیعت یافت می‌شود که در هر سه شکل سمی می‌باشد (۱).

انتشار جیوه به اتمسفر هم در اثر فرایندهای طبیعی و هم در اثر فعالیت‌های انسانی اتفاق می‌افتد. انتشار جیوه در اثر فعالیت‌های انسانی به دلیل تبخیر جیوه در اثر استفاده از جیوه فلزی و ترکیبات حاوی جیوه در فرایندهای گرمایی و احتراق است. قسمت عمده انتشار

آلودگی صنعتی از علل عمده تخریب محیط زیست است. در حال حاضر مطالعات متعدد نشان می‌دهند که مناطق مجاور با فعالیت‌های صنعتی با آلودگی قابل توجه هوا، خاک و آب مواجه شده‌اند (۷). مسائلی از قبیل آلودگی خاک، کاهش کیفیت خاک و اراضی طی چند دهه اخیر تبدیل به تهدیدات جدی برای جوامع بشری شده‌اند. این خطرات زیست محیطی و کاهش امنیت غذایی سبب نیاز بیش از پیش به شناخت خاک شده است. یکی از مهمترین خصوصیات خاک، غلظت فلزات سنگین است که از اهمیت زیادی به ویژه از نظر تأثیر بر سلامت موجودات زنده برخوردار است. فلزات سنگین یکی از عوامل

۱- استادیار، گروه مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- استادیار بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: a.jafari@uk.ac.ir

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.79689

اطلاعات کمی در زمینه توزیع جیوه در خاک‌های مناطق صنعتی بویژه در ایران موجود است. مطالعه حاضر، با هدف بررسی توزیع مکانی جیوه و همچنین وسعت آلودگی جیوه در خاک‌های اطراف کارخانه سیمان کرمان طراحی و اجرا گردید.

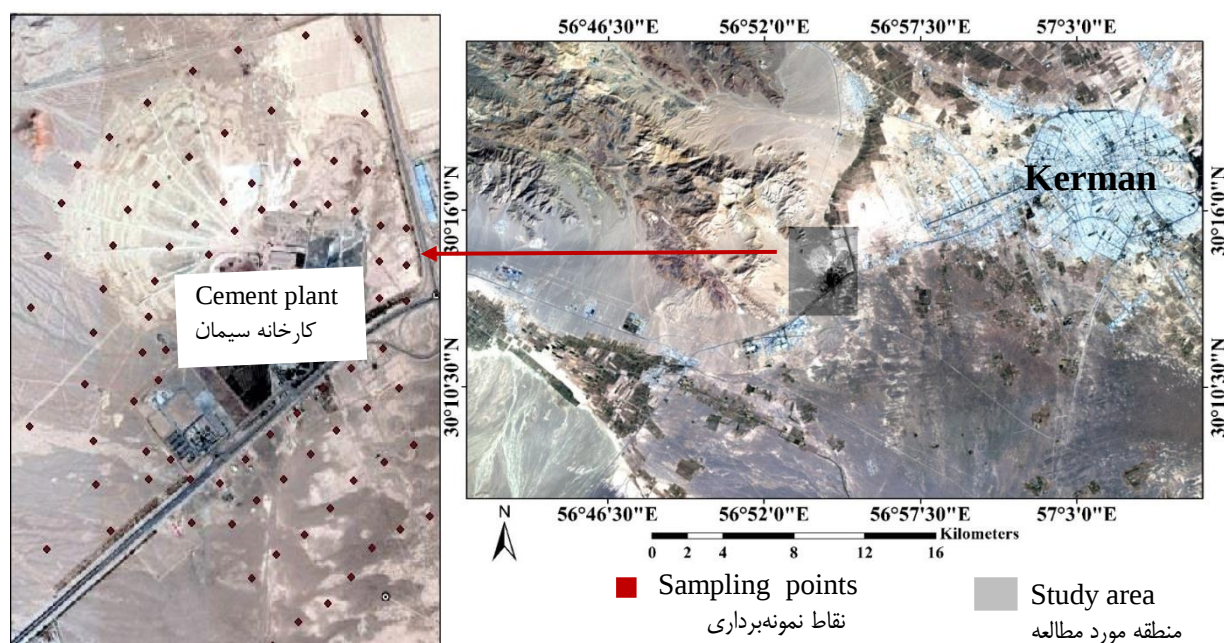
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، محدوده کارخانه سیمان کرمان با عرض‌های جغرافیای $30^{\circ}12'38''/45''$ و $30^{\circ}15'36''/25''$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $56^{\circ}52'43''/49''$ و $56^{\circ}55'41''/27''$ شرقی در جنوب شرق ایران و در ۳۲ کیلومتری بزرگراه کرمان-رفسنجان قرار دارد (۴۰ کیلومتری شمال غرب کرمان). این کارخانه در سال ۱۳۸۱ با ظرفیت تولید ۳۳۰۰ تن کلینکر در روز (معادل یک میلیون تن در سال) با هدف تولید سیمان تأسیس شده است. این کارخانه مساحتی حدود ۸۲ هکتار را به خود اختصاص داده است و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۷۵۴ متر است (شکل ۱).

میانگین دمای سالانه شهر کرمان $17/4$ درجه سانتی‌گراد و حداقل و حداکثر دما در شبانه‌روز به ترتیب $12/8$ - و $40/8$ درجه سانتی‌گراد است. همچنین متوسط بارندگی سالیانه ۱۵۳ میلی‌متر گزارش شده است.

جیوه از فرایندهای احتراق سوخت‌های فسیلی و فرایندهای پخت سنگ معدن در صنایع آهن، فولاد و تولید سیمان است (۹). منبع اصلی انتشار جیوه به اتمسفر احتراق سوخت است که منجر به ورود ۲۶ تن جیوه به اتمسفر می‌شود. فرایندهای احتراق زغال سنگ مسئول رهاسازی تقریباً ۶۰ درصد از کل جیوه منتشر شده به اتمسفر هستند. مقدار انتشار جیوه از منابع دیگر از جمله فرایند تولید سیمان و استفاده از لامپ‌های فلورسنت، به ترتیب ۱۷ و $6/5$ درصد از کل جیوه را شامل می‌شود (۱۴). ماده اصلی سیمان، سنگ آهک درشت‌دانه است. به ازاء هر تن سیمان، $1/25$ تن سنگ آهک، $0/23$ تن رس، $0/4$ تن سنگ سیلیس و $0/3$ تن سرباره با هم مخلوط و خشک می‌شوند، سپس در یک کوره سیمان حرارت داده می‌شوند ($1400-1500$ درجه سانتی‌گراد) (۳). با فرض اینکه مقدار میانگین جیوه در سنگ آهک $0/16$ میکروگرم بر گرم باشد و کل آن به اتمسفر انتشار یابد، مقدار جیوه رها شده به اتمسفر در جهان تقریباً 140 تن بر ایگر یا $345/94$ تن بر هکتار است (۹). آلودگی جیوه در اصل به دلیل فعالیت‌های انسانی است. ۶۰ تا ۹۰ درصد جیوه کل در برخی مناطق صنعتی به دلیل انتشار جیوه در اثر فعالیت‌های انسان است. در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۵، انتشار جیوه در اثر فعالیت‌های انسان از تقریباً ۳۰ درصد انتشار کل جهانی تا ۵۶ درصد افزایش یافت. کونکو و همکاران (۵) در مطالعه‌ای در اکراین، میانگین غلظت جیوه را در نمونه‌های خاک تهیه شده از زمین بازی و فضاهای عمومی در فاصله ۱۲ کیلومتری از مرکز صنعتی، ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش کردند.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

Figure 1- Study area and sampling points

از هر نمونه خاک، مقدار ۰/۵ گرم توزین و بعد از هضم با اسیدنیتریک (۱۳ و ۱۷)، غلظت کل جیوه با دستگاه جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی (GFAA) (۶) تعیین شد.

شاخص‌های زیست‌محیطی

شاخص زمین‌انباشتگی

یکی از شاخص‌های مفید برای مطالعه وضعیت تجمع عناصر سنگین در خاک، استفاده از شاخص ژئوشیمیایی مولر می‌باشد که اساس آن بر فرمول (۱) استوار است (۱۵):

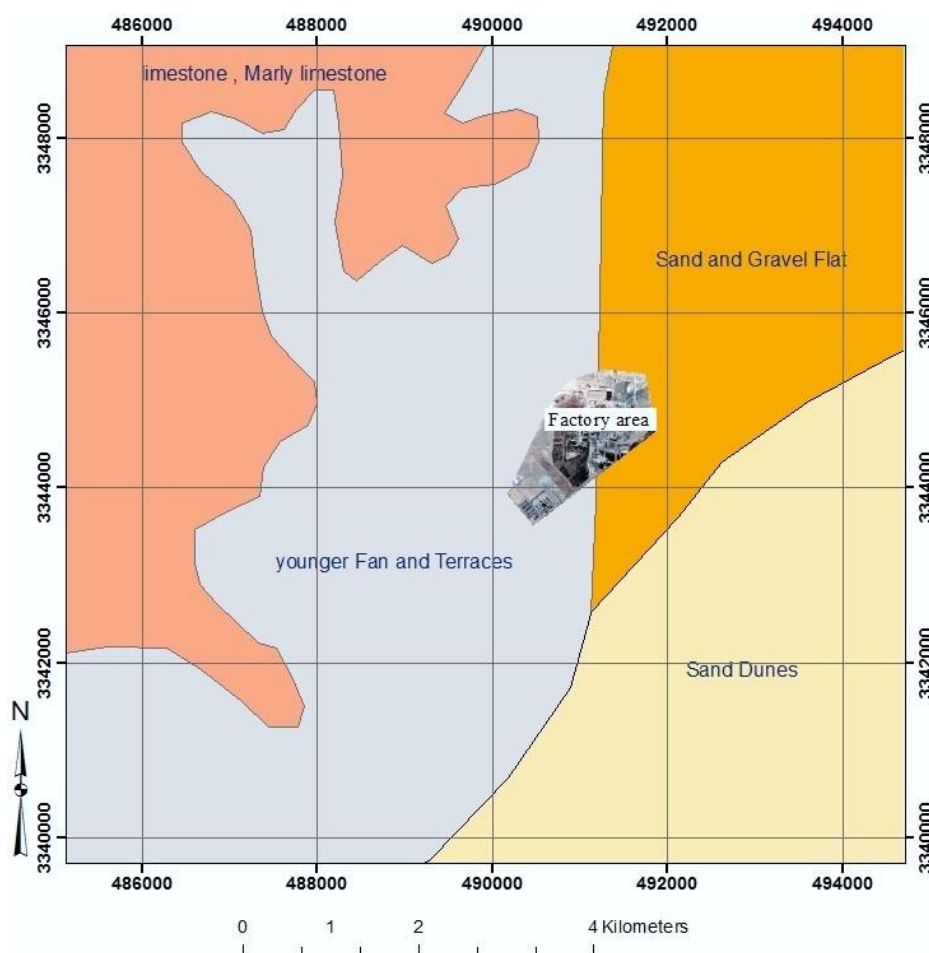
$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 B_n} \right) \quad (1)$$

در این رابطه، I_{geo} شاخص تجمع و با شاخص شدت آلودگی در خاک، $\log_2$ لگاریتم در پایه دو، C_n غلظت آلاینده موردنظر در نمونه خاک، B_n غلظت زمینه یا مرجع عنصر مورد نظر و ضریب ۱/۵، ضریب تصحیح تأثیر لیئوژنیک مقدار غلظت زمینه می‌باشد.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه عمدتاً شامل سنگ آهک و مواد آبرفتی سخت نشده است (شکل ۲). کاربری اراضی شامل مرتع (۴۹/۱۰ درصد)، رخنمون سنگی (۸/۱۴ درصد)، مسکونی (۱/۳۹ درصد)، کشاورزی (۲/۷۵ درصد) و مابقی کاربری صنعتی می‌باشد.

نمونه‌برداری خاک و اندازه‌گیری برخی خصوصیات خاک

تعداد ۱۰۳ نمونه خاک سطحی از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری به صورت آشیانه‌ای از اطراف کارخانه سیمان جمع‌آوری شد. بعد از هوا خشک کردن نمونه‌ها در دمای محیط، نمونه‌ها از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند و نمونه‌های خاک برای انجام برخی از آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی از جمله بافت خاک، pH و شوری خاک به آزمایشگاه منتقل شده و به شرح زیر اندازه‌گیری شدند: pH نمونه‌های خاک در گل اشباع به وسیله pH متر، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع به وسیله هدایت سنج و بافت خاک به روش هیدرومتر اندازه‌گیری شد.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه
Figure 2- Geology map of the Study area

جدول ۱- کلاس‌های شاخص تجمع (Igeo)

Table 1- The Igeo classes

کلاس Igeo	مقدار Igeo	کلاس آلودگی خاک
Igeo classes	Igeo amount	Soil pollution class
1	≤0	غیر آلوده (Clean)
2	1-2	غیر آلوده تا آلودگی متوسط (Clean to medium pollution)
3	2-3	آلودگی متوسط (Medium pollution)
4	3-4	آلودگی متوسط تا آلودگی زیاد (Medium to high pollution)
5	4-5	آلودگی زیاد (High pollution)
6	5-6	آلودگی زیاد تا بسیار زیاد (High to very high pollution)
7	>6	آلودگی بسیار زیاد (Very high pollution)

است. غلظت کل جیوه در خاک در محدوده ۶/۷ تا ۳۴۱ میکروگرم در کیلوگرم با میانگین ۱۶۴/۱ میکروگرم در کیلوگرم به دست آمد.

جیوه به طور طبیعی در غلظت‌های بسیار کم در خاک وجود دارد. غلظت این عنصر در خاک‌های سراسر جهان در محدوده بین ۰/۰۱ و ۰/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم است (۱). میانگین غلظت جیوه در پوسته زمین، ۸۰ میکروگرم در کیلوگرم گزارش شده است (۱۹). مقایسه مقادیر این عنصر در منطقه مورد مطالعه با مقادیر آن در پوسته زمین و میانگین جهانی آن در خاک‌ها نشان می‌دهد فعالیت‌های صنعتی در منطقه باعث افزایش غلظت جیوه در خاک شده است. در واقع غلظت جیوه بالاتر از مقادیر پوسته زمین نشان دهنده شروع آلودگی در اثر فعالیت‌های مختلف صنعتی است.

سلگی و همکاران (۱۸) در بررسی میزان آلودگی جیوه در خاک شهرک‌های صنعتی اراک، غلظت جیوه کل را در محدوده ۶۸/۴۳ تا ۱۳۷/۰۳ میکروگرم در کیلوگرم با میانگین ۱۰۲/۰۷ میکروگرم در کیلوگرم گزارش کردند.

لیو و همکاران (۱۱) میانگین غلظت جیوه در خاک‌های منطقه صنعتی بیجینگ چین را ۴/۸۵ میلی‌گرم در کیلوگرم تعیین و گزارش کردند که ۱۰۰ درصد نمونه‌های خاک غلظتی بیش از غلظت قابل قبول یا حد آستانه جیوه (۰/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) را دارا هستند.

پس از محاسبه شاخص ژئوشیمیایی مولر، برای طبقه‌بندی کیفیت خاک می‌توان از جداول استاندارد شاخص فوق استفاده نمود (جدول ۱) (۱۲).

ارزیابی پتانسیل آلودگی خاک با استفاده از فاکتور آلودگی

جهت تعیین پتانسیل آلودگی خاک به عناصر سنگین از فاکتور آلودگی استفاده می‌گردد. براساس این فاکتور می‌توان مقدار عناصر را نسبت به مقدار طبیعی خود سنجید و میزان آلودگی خاک را تعیین کرد. این فاکتور از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$CF = \frac{C_n}{B_n} \quad (2)$$

در رابطه فوق، CF فاکتور آلودگی، C_n غلظت عنصر در نمونه آلوده و B_n غلظت همان عنصر در نمونه استاندارد، پوسته زمین و یا غلظت زمینه طبیعی منطقه می‌باشد. خاک‌ها براساس فاکتور آلودگی مطابق با جدول ۲ به هفت کلاس تقسیم می‌شوند.

نتایج و بحث

غلظت کل جیوه در خاک‌های سطحی

نتایج مربوط به آنالیز آماری غلظت کل جیوه در خاک‌های سطحی اطراف کارخانه سیمان کرمان در جدول ۳ نشان داده شده

جدول ۲- کلاس‌های مقادیر فاکتور آلودگی (۹)

Table 2- The classification levels of contamination factor (9)

مقدار فاکتور	درجه آلودگی
(CF)	Degree of pollution
0	غیر آلوده (Clean)
1	غیر آلوده تا آلودگی متوسط (Clean to medium pollution)
2	آلودگی متوسط (Medium pollution)
3	آلودگی متوسط تا قوی (Medium to high pollution)
4	آلودگی قوی (High pollution)
5	آلودگی قوی تا خیلی قوی (High to very high pollution)
6	آلودگی خیلی قوی (Very high pollution)

جدول ۳- خلاصه نتایج آماری غلظت کل جیوه (میکروگرم در کیلوگرم) در خاک سطحی اطراف کارخانه سیمان کرمان

Table 3- Descriptive statistics of total concentration of Mercury (ppb) in surface soils around the Kerman cement plant

Element	N	Minimum	Maximum	Mean	Coeff. Variation (CV)	Skewness	Kurtosis
Hg	103	6.700	340.963	164.061	0.549	0.165	-1.084

جدول ۵- شاخص زمین انباشتگی و فاکتور آلودگی

Table 5- Geo-accumulation index and contamination factor

	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean
شاخص زمین‌انباشتگی Geo-accumulation index (I_{geo})	-4.16	1.51	0.15
فاکتور آلودگی Contamination factor (CF)	0.08	4.26	2.05

نتایج حاصل از شاخص زمین انباشتگی نمونه‌های خاک نشان داد که خاک‌های مورد مطالعه از نظر آلودگی جیوه در محدوده غیرآلوده تا آلودگی متوسط قرار دارند. به عبارت دیگر، شروع آلودگی را در برخی مناطق شاهد هستیم. مقادیر بسیار کمی برای شاخص زمین انباشتگی در مطالعه سلگی و همکاران (۱۸) به دست آمد که نشان از عدم آلودگی و یا آلودگی کم خاک‌های مورد مطالعه داشت. سطوح آلودگی کم ($CF < 1$) تا آلودگی قابل ملاحظه ($3.00 \leq CF < 6.00$) جیوه براساس فاکتور آلودگی مشاهده گردید. نتایج پیشنهاد می‌کند منابع آنتروپوژنیک، غلظت عنصر جیوه در خاک را کنترل می‌کنند. میانگین فاکتور آلودگی بزرگتر از یک ($CF > 1$) نشان‌دهنده این است که خاک‌های این منطقه دچار آلودگی جیوه شدند.

توزیع مکانی جیوه در منطقه مورد مطالعه

نقشه توزیع مکانی غلظت کل جیوه در شکل ۳ ارائه شده است. حداقل مقدار غلظت جیوه ۷ و حداکثر ۳۴۱ میکروگرم در کیلوگرم می‌باشد. بیشترین غلظت جیوه خاک بین ۲۰۰ تا ۳۴۱ میکروگرم در کیلوگرم می‌باشد که در اطراف کارخانه و به سمت جنوب شرقی منطقه مشاهده می‌شود. به عبارتی، بالاترین غلظت جیوه در اطراف کارخانه مشاهده گردید و با دور شدن از آن کاهش می‌یابد (شکل ۴). بنابراین، وسعت پراکندگی و گستردگی غلظت بالای جیوه در اطراف کارخانه و جنوب شرقی کارخانه می‌باشد.

انتشار جیوه در محیط زیست مربوط به فرایندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی می‌باشد. انتشار جیوه در اثر فعالیت‌های انسانی عمدتاً در اثر احتراق سوخت‌های فسیلی، فرایندهای پردازش سنگ معدن آهن، صنعت فولاد و کارخانه‌های سیمان است (۹). در کارخانه های سیمان، سنگ آهک جزء اصلی سیمان است. در مورد غلظت

ضریب تغییرات غلظت جیوه در خاک ۵۵ درصد به دست آمد که برطبق تقسیم‌بندی پیشنهاد شده توسط ویل‌دینگ و همکاران (۲۰) تغییرپذیری بالایی ($CV \geq 35\%$) را نشان می‌دهد. ضریب تغییرپذیری بالا، توزیع ناهمگن و غیریکنواخت ویژگی را نشان می‌دهد. بر این اساس، غلظت بالای عنصر جیوه در برخی موقعیت‌های منطقه وجود دارد. به عبارت دیگر، خاک در برخی مناطق تحت تأثیر فاکتورهای بیرونی^۱ آلوده شده است. مطالعه بوسکه و همکاران (۴) در رسوبات پایینی و خاک شهر پوزنان لهستان به منظور بررسی توزیع مکانی جیوه صورت گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که توزیع جیوه در نمونه‌های آب و رسوبات پایین جمع‌آوری شده از مکان‌های مختلف در پوزنان، نسبتاً یکنواخت است. برخلاف رسوبات و آب غلظت جیوه در نمونه‌های خاک تغییرپذیری بیشتری نشان داد.

براساس استانداردهای پاکسازی خاک برای جیوه در خاک‌های مورد استفاده برای اهداف صنعتی در برخی کشورها (جدول ۴)، همه نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه دارای غلظت جیوه بسیار کمتر از مقادیر استاندارد دارند. به عبارت دیگر اگر چه فعالیت کارخانه سیمان باعث افزایش غلظت جیوه در خاک شده است، اما می‌تواند به فعالیت صنعتی خود ادامه دهد، منتهی باید برنامه‌ریزی جهت کنترل انتشار این فلز و آلاینده‌های دیگر را مورد توجه جدی قرار دهد.

جدول ۴- استانداردهای پاکسازی خاک برای جیوه برای کاربری

صنعتی در کشورهای مختلف (۱۶)

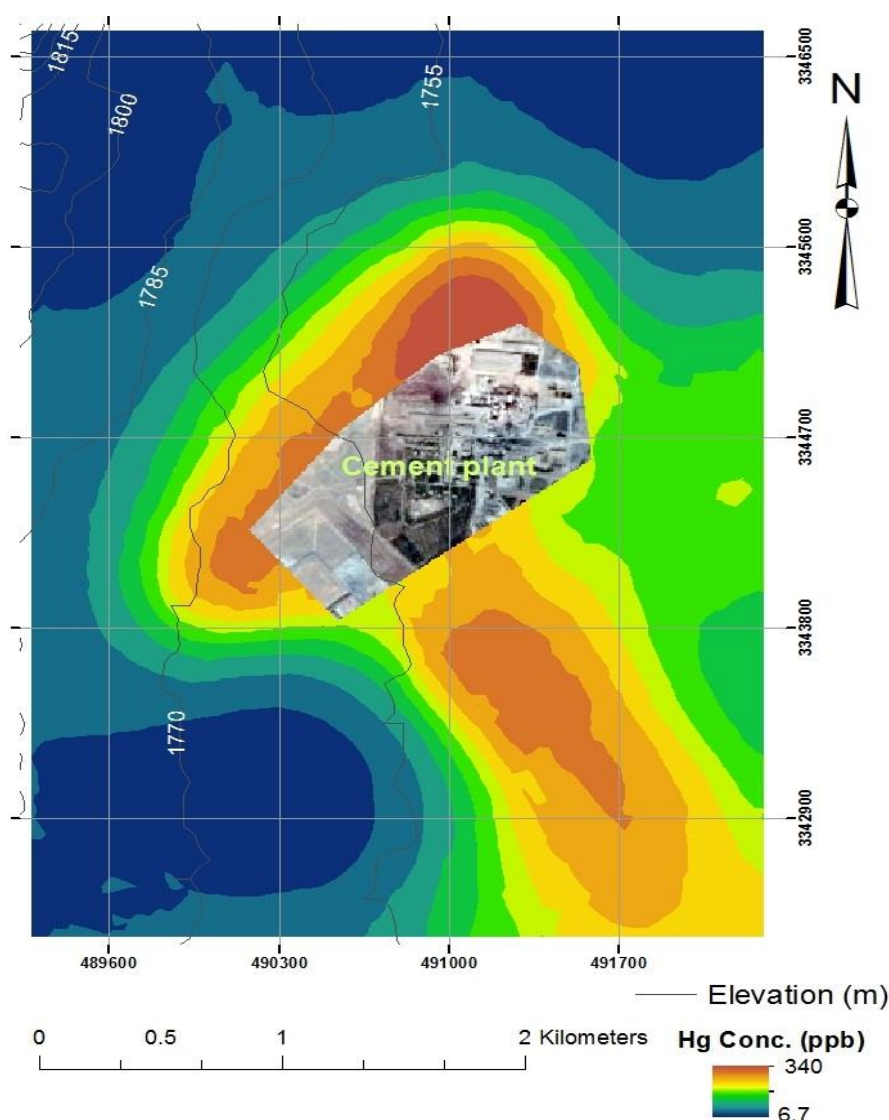
Table 4- Overview of the soil cleanup standards for Hg (mg/kg) for industrial land use in various countries (16)

کشور Country	کاربری صنعتی Industrial land
Belgium	30
Germany	80
France	600
Sweden	7
Great Britain	480
Canada	50
USA	310

شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور آلودگی برای نمونه‌های خاک مورد مطالعه محاسبه و نتایج در جدول ۵ ارائه شده است. برای غلظت زمینه از متوسط جهانی پوسته زمین (۸۰ میکروگرم در کیلوگرم) استفاده گردید (۱۹).

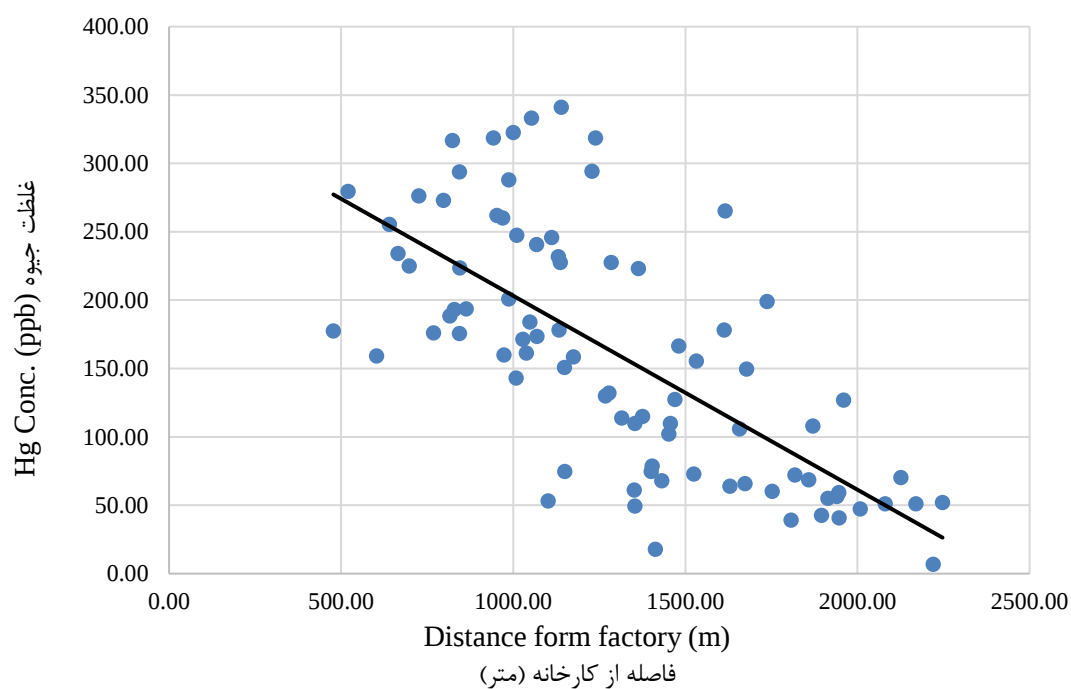
یابد و در حدود ۲۰ میکروگرم در کیلوگرم (یعنی ۰/۰۲ میکروگرم در گرم) است. بنابراین غلظت آن در محدوده غلظت‌های ارائه شده در گزارش‌های مربوطه می‌باشد. این درحالی است که غلظت جیوه در اطراف کارخانه و در قسمت جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه افزایش یافته و به مقدار ۲۰۰ تا ۳۴۰ میکروگرم در کیلوگرم (۰/۲ تا ۰/۳۴ میکروگرم در گرم) می‌رسد. احتمالاً فعالیت‌های کارخانه باعث تجمع و افزایش غلظت جیوه و در نهایت آلودگی خاک‌های منطقه شده است. همانطور که نتایج حاصل از شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور آلودگی، احتمال آلودگی را در برخی نقاط منطقه مورد مطالعه نشان داد.

جیوه در سنگ آهک، گزارش‌های متعددی وجود دارد که غلظت آن از ۰/۰۱ (۴) تا ۰/۱۶ میکروگرم در گرم (۲) تغییر می‌کند. باید توجه کرد این مقادیر مربوط به غلظت جیوه در سنگ آهک به عنوان ماده مادری خاک می‌باشد. میانگین مقدار جیوه در خاک‌های سطحی اطراف کارخانه سیمان کرمان از ۷ تا ۳۴۱ میکروگرم در کیلوگرم تغییر می‌کند (جدول ۱). براساس نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (شکل ۲)، مواد مادری سنگ آهک در قسمت شمال غربی منطقه وجود دارد که در واقع ماده اصلی مورد استفاده برای تهیه سیمان در کارخانه سیمان کرمان است. همچنین طبق نقشه مکانی توزیع عنصر جیوه (شکل ۳)، غلظت این عنصر به سمت مواد مادری کاهش می‌-



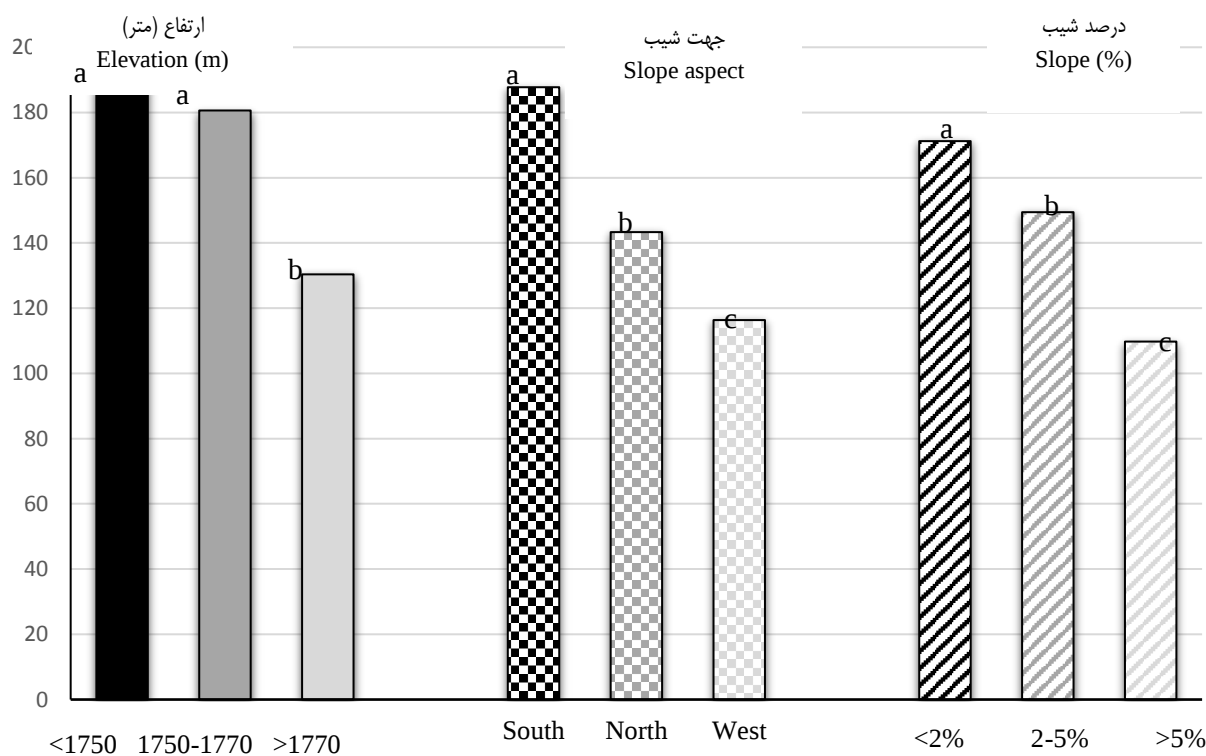
شکل ۳- نقشه توزیع مکانی غلظت کل جیوه در خاک سطحی اطراف کارخانه سیمان کرمان

Figure 3- Spatial distribution map of Hg total concentration in the surface soils around Kerman cement plant



شکل ۴- تغییر غلظت جیوه با فاصله از کارخانه سیمان

Figure 4- Variation of Hg concentration as a function of distance from the Cement factory



شکل ۵- توزیع غلظت جیوه تحت تاثیر فاکتورهای محیطی

(حروف متفاوت بر روی میانگین‌ها، نشان دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد آماری می‌باشد).

Figure 5- Distribution of Hg concentration under environmental factors
(Differential letters on the mean show a significant difference in 5% level).

پراکنش مکانی جیوه (شکل ۳)، شاید بتوان نتیجه گرفت که علاوه بر فعالیت کارخانه که باعث آلودگی خاک اطراف کارخانه شده، پارامترهای محیطی به توزیع جهت‌دار این آلودگی کمک کردند.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان داد که خاک‌ها در محدوده کارخانه سیمان کرمان به جیوه آلوده شدند. مقادیر جیوه در خاک منطقه مورد مطالعه از مقدار زمینه و مقادیر میانگین جهانی بالاتر است که تأییدکننده نقش فعالیت‌های انسانی در آلوده ساختن این منطقه می‌باشد. همچنین براساس شاخص زمین انباشتگی درجه آلودگی خاک توسط این عنصر در همه نمونه‌ها در حد خاک‌های غیرآلوده تا متوسط تشخیص داده شد و بر اساس فاکتور آلودگی، سطوح آلودگی کم ($CF < 1$) تا آلودگی قابل ملاحظه ($3.00 \leq CF < 6.00$) مشاهده گردید. توزیع مکانی جیوه نشان می‌دهد غلظت جیوه در اطراف کارخانه دارای مقادیر بالایی است و با فاصله از کارخانه کاهش می‌یابد. اگرچه آلودگی جیوه در منطقه مورد مطالعه شدید نیست، خاک‌های سطحی به مدیریت زیست‌محیطی دقیقی نیاز دارند چرا که تجمع جیوه غالباً به عمق ۸۰ سانتی‌متری خاک محدود می‌شود. بهتر است با انجام تحقیقات بیشتر، اطلاعات بیشتری در مورد غلظت این آلاینده در محیط زیست منطقه و الگوی پراکندگی آنها در اجزای مختلف محیط زیست و به خصوص در افرادی که به طور مستقیم تحت تأثیر قرار دارند را به دست آوریم.

آنچه که مورد توجه است دامنه گسترش و توزیع جیوه در منطقه است که دارای غلظت بالایی در جنوب شرقی منطقه، یعنی در قسمت پایین دست کارخانه می‌باشد. به نظر می‌رسد احتمالاً فاکتورهای محیطی از جمله توپوگرافی منطقه در توزیع آن تأثیر داشته باشد.

توزیع غلظت جیوه خاک تحت تأثیر شیب، ارتفاع و جهت‌های شیب مختلف بررسی و آنالیز گردید و در شکل ۴ نمایش داده شده است. غلظت‌های بالایی جیوه در ارتفاعات و شیب‌های کمتر و در جهت جغرافیایی جنوب مشاهده گردید. درصد شیب جنوبی و جنوب شرقی منطقه کمتر از شیب شمالی و غربی است و منطقه کم ارتفاع این قسمت، مستعد دریافت رسوب است. دو آن و همکاران (۸) نقش متغیرهای محیطی را در توزیع مکانی عناصر کروم، نیکل، مس، رویو سرب را در حوزه ابخیز رودخانه آپر رد (Upper Red) در جنوب غربی چین بررسی کردند. این محققین غلظت‌های بالایی عناصر مذکور را در مناطق کم ارتفاع و کم‌شیب گزارش کردند و نتیجه گرفتند غلظت فلزات سنگین در خاک سطحی توسط فاکتورهای توپوگرافی و خاک کنترل می‌شود.

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده، غلظت‌های بالایی جیوه در اطراف کارخانه و حوزه گسترش آن به سمت جنوب و جنوب شرقی است، جایی که شیب و ارتفاع منطقه هم کاهش پیدا می‌کند. این نتایج با شکل ۴ همخوانی دارد که غلظت‌های بیشتر جیوه در شیب کمتر از ۲ درصد، ارتفاع کمتر از ۱۷۵۰ متر و در جهت جغرافیایی جنوبی مشاهده گردید.

با در نظر گرفتن اطلاعات محیطی منطقه مورد مطالعه و نقشه

منابع

- 1- Adriano D.C. 1986. Trace Elements in the Terrestrial Environment. New York: Springer-Verlag; 533p.
- 2- Airey D. 1982. Contributions from coal and industrial materials to mercury in air, rainwater and snow. Science of Total Environment 25: 19-40.
- 3- Bahuiyan M.A.H., Parvez L., Islam M.A., Dampare S.B., and Suzuki S. 2010. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. Journal of Hazardous Materials 173(1-3): 384-392.
- 4- Boszke L., and Kowalski A. 2006. Spatial Distribution of Mercury in Bottom Sediments and Soils from Poznań, Poland. Polish. Journal of Environment Studies 15(2): 211-18.
- 5- Conko K.M., Landa E.R., Kolker A., Kozlov K., Gibb H.J., Centeno J.A., and B.S Panov Y.B. 2013. Arsenic and mercury in the soils of an industrial city in the Donets basin, Ukraine. Soil and Sediment Contamination 22: 574-93.
- 6- Crock J.G. 1999. Mercury. p. 769-792. In A.L. Page et al. (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 3. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 7- De Bartolomeo A., Poletti L., Sanchini G., Sebastiani B., and Morozzi G. 2004. Relationship among parameters of lake polluted sediments evaluated by multivariate statistical analysis. Chemosphere 55(10): 1323-29.
- 8- Duan X., Zhang G., Rong L., Fang H., He D., and Feng D. 2015. Spatial distribution and environmental factors of catchment-scale soil heavy metal contamination in the dry-hot valley of Upper Red River in southwestern China. Catena 135: 59-69.
- 9- Fukuzaki N., Tamura R., Hirano Y., and Mizushima Y. 1986. Mercury emission from a cement factory and its influence on the environment. Atmospheric Environment 20(12): 2291-2299.
- 10- Kheirabadi H. 2011. Investigation of the origin of heavy elements in soil and their risk assessment on human health in surface soils of Hamadan province. Thesis Master of Science in Soil Science, Faculty of Agriculture,

- Isfahan University of Technology.
- 11- Luo W., Yonglong L., Bin W., Xiaojuan T., Guang W., Yajuan S., Tieyu W., and John P.G. 2009. Distribution and sources of mercury in soils from former industrialized urban areas of Beijing, China. *Environmental Monitoring and Assessment* 158: 507-571.
- 12- Meza-Montenegro M.M., Gandolfi A.J., Santana-Alcanter M.E., Klimecki W.T., Aguilar-Apodaca M.G., Rio-Salas R.D., O-Villanueva M.D.L., Gomez-Alvarez A., Mendivil-Quijada H., Valencia H., and Meza-Figueroa D. 2012. Metals in residential soils and cumulative risk assessment in Yaqui and Mayo agricultural valleys, northern Mexico. *Science of the Total Environment* 433: 472-481.
- 13- Mizanur Rahman G.M., and Skip Kingston H.M. 2005. Development of a microwave-assisted extraction method and isotopic validation of mercury species in soils and sediments. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 20: 183-191.
- 14- Mniszek W. 1996. Emission of mercury to the atmosphere from industrial sources in Poland. *Environmental Monitoring and Assessment* 41: 291.
- 15- Muller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal* 2: 108-118.
- 16- Provoost J., Cornelis C., and Swartjes F. 2006. Comparison of soil clean-up between countries: Why do they differ? *Journal of Soils standards for trace elements and Sediments* 6: 173-181.
- 17- Sergio A., Covarrubias S.A., Armando Flores de la Torre J., Maldonado Vega M., Francisco Javier Avelar Gonzalez F.J., and Cabriaes J.J.P. 2018. Spatial Variability of Heavy Metals in Soils and Sediments of "La Zacatecana" Lagoon, Mexico. *Applied and Environmental Soil Science* ID 9612412, 8 pages.
- 18- Solgi E., Esmaili Sari A., and Riyahi Bakhtiari A. 2013. Evaluation of mercury contamination in soils of industrial estates of Arak city. *Journal of Health in the Field* 1(2): 22-28.
- 19- Taylor S.R., and McLennan S.M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Review Geophysics* 33: 165-241.
- 20- Wilding L., Drees L.R., and Nordt L.C. 2001. Spatial variability: enhancing the mean estimate of organic and inorganic carbon in a sampling unit. p. 69-85. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A., (ed.), *Assessment Methods for Soil Carbon*, CRC/Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

Spatial Distribution of Mercury Contamination in Soils around of Kerman Cement Plant

M. Yousefifard¹- A. Jafari^{2*}

Received: 15-04-2019

Accepted: 28-12-2019

Introduction: In recent decades, industrial and technological advancements have led to the gradual increase of heavy metal concentrations. As such, this phenomenon of heavy metals being present in the environment at high concentrations causes deleterious effects on various terrestrial creatures and human beings. Mercury (Hg) is one of the most toxic elements and can cause renal and neurotoxicity to humans and wildlife. It has been identified as a priority toxic substance in many countries. It is, however, rare to find information on Hg in soils from industrialized areas of Iran in literature. In order to ascertain the distribution of Hg, as well as the extent of contamination with Hg, and to provide policymakers with remediation measures for the affected soils, a study of surface soils was conducted in areas around of Kerman cement plant.

Materials and Methods: Soil samples were collected from the depth of 0 to 20 cm. 103 samples were taken and analyzed. Mercury concentration in soil samples were determined by atomic adsorption method coupled Graphite furnace. Statistical analysis and indices calculation were performed by SPSS and EXCEL, respectively, and distribution maps were prepared by kriging method in ArcGIS software. For evaluating pollution, Geoaccumulation index, enrichment factor and contamination factor were also calculated and interpreted.

Results and Discussion: The mercury concentration in soil samples ranged from 6.70 to 340.96 $\mu\text{g}/\text{kg}$, with a mean value of 164.06 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Mercury is naturally present in very low concentrations in the soil. The concentration of this element in soils ranges from 0.01 to 0.5 mg/kg around the world. The average Hg concentration in the earth crust is reported to be 80 $\mu\text{g}/\text{kg}$. In soils of the study area, the Hg concentration was higher than most of the reported values for soils worldwide and earth crust. This indicates that industrial activities have increased the concentration of mercury in the soil. In fact, the concentration of mercury more than the amount of earth crust indicates the onset of contamination due to various anthropogenic activities. The coefficient of variation of mercury concentration in the soil was 55%, which shows a high variability ($\text{CV} \geq 35\%$) according to the classification proposed by Wilding et al. (19). The high variability coefficient shows the heterogeneous and non-uniform distribution of the property. Therefore, there is a high concentration of mercury in some areas of the study region. In other words, soil was affected by external factors in some areas. Based on the cleaning standards of soil for mercury in soils used for industrial purposes in some countries, all soil samples in the studied area have a much lower concentration of mercury than standard values. In other words, although the activity of the cement plant has increased the concentration of mercury in the soil, it can continue its industrial activity. The plant's managers should, however, take a close look at the release of this metal and other pollutant. According to the results derived from Igeo, Hg was graded as unpolluted to moderately polluted. Low levels of contamination ($\text{CF} < 1$) to significant contamination ($3.00 \leq \text{CF} < 6.00$) of mercury were observed based on the contamination factor. The results suggest that anthropogenic sources control the concentration of mercury in the soil. The average contamination factor more than one ($\text{CF} > 1$) indicates that the soils of this region have been exposed to mercury contamination. Spatial distribution map indicates that the highest concentration of mercury in the soil is between 200 and 341 $\mu\text{g}/\text{kg}$, which was observed around the factory and south-east of the region. Release of mercury in the environment is related to natural processes and human activities. Mercury release due to human activities is mainly due to combustion of fossil fuels, iron ore processing, steel industry and cement plants. Considering the high concentrations of mercury in the southeastern part of the region, the lower

1- Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering and Technology, Payame Noor University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(*- Corresponding Author Email: a.jafari@uk.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.79689

part of the plant, it seems that environmental factors such as the topography of the area may affect its distribution. The high concentrations of Hg were observed at low elevations, on the south side, and over the areas with relatively low slope gradients.

Conclusion: The results demonstrated that the concentration of Hg was higher than most of the reported values for soils worldwide and earth crust. This indicates that industrial activities have increased the concentration of mercury in the soil. According to the results derived from Igeo, Hg was graded as unpolluted to moderately polluted. In addition, the level of contamination was identified to be low to high, based on the contamination factor (CF). The spatial distribution map of the total concentration of mercury shows that the highest concentration of mercury was observed around the factory and to the south and southeast of the region. The high concentrations of this metal were at low elevations and on the south side of the catchment and in areas with relatively low slope gradients. It is concluded that although the concentration of this pollutant is not critical in the study area, due to the close proximity of the industrial area to the residential area, planning to control the release of this metal and other pollutants should be seriously considered.

Keywords: Cement factory, Environment variables, Hg concentration, Pollution index

تأثیر حذف ماده آلی بر شاخص‌های پسماند فسفر در خاک‌های آهکی

معصومه مهدی‌زاده^۱ - عادل ریحانی‌تبار^{۲*} - شاهین اوستان^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۳۰

چکیده

جذب و واجذب از فرایندهای مهم اثرگذار بر شیمی فسفر در خاک‌ها می‌باشند. این تحقیق به منظور بررسی تأثیر حذف ماده آلی خاک با محلول هیپوکلریت سدیم بر شاخص‌های پسماند فسفر در ۱۲ نمونه خاک آهکی ایران با ویژگی‌های متفاوت انجام گرفت. برای این منظور ۴ گرم از نمونه‌های خاک در لوله‌های سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد و پس از افزودن ۴۰ میلی‌لیتر محلول هیپوکلریت سدیم (NaOCl) ۶ درصد حجمی در pH برابر ۸، به مدت ۶ ساعت در دمای اتاق قرار داده شد. سپس سوسپانسیون سانتریفیوژ شده و محلول زلال رویی دور ریخته شد. بلافاصله ۴۰ میلی‌لیتر از محلول هیپوکلریت سدیم ۶ درصد اضافه و سوسپانسیون دوباره به مدت ۶ ساعت در دمای اتاق قرار داده شد. این چرخه اکسایش ۳ بار ادامه یافت. بعد از حذف ماده آلی، به منظور شست و شوی محلول هیپوکلریت سدیم اضافی، به بقایای خاک تیمار شده از مراحل فوق ۴۰ میلی‌لیتر محلول زمینه کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار افزوده و سوسپانسیون تکان داده شد و پس از سانتریفیوژ محلول زلال رویی دور ریخته شد و این چرخه ۳ بار ادامه یافت. پس از انجام مراحل فوق، خاک‌ها هوا خشک گردیدند. همدمای جذب فسفر در خاک‌ها با به تعادل رساندن خاک‌ها با محلول‌هایی با غلظت‌های متفاوت فسفر (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم فسفر بر لیتر) از منبع منو کلسیم فسفات و در محلول زمینه ۰/۰۱ مولار کلرید کلسیم به دست آمد. به منظور توصیف همدمای جذب و واجذب در خاک‌ها از مدل فروندلیچ استفاده شد. بر طبق نتایج حاصله در همه خاک‌ها پدیده پسماند مشاهده و جذب فسفر بعد از حذف ماده آلی برگشت‌ناپذیر شد. متوسط مقادیر فسفر واجذب‌شده در خاک‌ها بعد از حذف ماده آلی ۴۰ درصد کاهش یافت. نتایج نشان داد که مقادیر شاخص چهارم پسماند که از ضریب توزیع (K_d) محاسبه شده بود با درصد رس ($r=0.69, p<0.05$) و کربنات کلسیم فعال ($r=0.7, p<0.05$) همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت. بر طبق نتایج به دست آمده از بین هفت شاخص پسماند، شاخص چهارم (HI_4) می‌تواند به عنوان شاخص برتر معرفی شود.

واژه‌های کلیدی: اکسایش، جذب، واجذب، همدمای هیپوکلریت سدیم

مقدمه

غلظت فسفر در محلول خاک و در نتیجه قابلیت استفاده از آن برای گیاه ارتباط نزدیکی با فرایندهای جذب سطحی به وسیله اجزای خاک دارد. این ارتباط را می‌توان به وسیله همدمای جذب توصیف کرد (۴۱). واجذب فرآیندی به مراتب دشوارتر از جذب است و معمولاً همه آنچه جذب سطحی می‌شود آزاد نمی‌گردد. به عبارت دیگر به نظر می‌رسد که این قبیل واکنش‌ها غیرقابل برگشت هستند. چنین برگشت‌ناپذیری ظاهری معمولاً تحت عنوان پسماند^۴ نامیده می‌شود

(۴۳). عوامل متعددی مانند تغییرات شیمیایی در ساختمان کانی‌ها، نحوه آرایش فضایی اتم‌ها، فرایندهای نامتعادل، تورم مواد جذب‌کننده، تغییرات در استحکام بلورها، تثبیت غیرقابل برگشت مولکول‌های جذب‌شده در منافذ ریز و تخمین زمان تعادل کمتر از مقدار واقعی منجر به پدیده پسماند می‌شوند (۴۷). هوانگ و همکاران (۱۸) گزارش کردند که پدیده پسماند در مورد ترکیبات آلی آب‌گریز، در نتیجه به دام افتادن مولکول‌های جذب‌شده در منافذ متوسط و ریز کانی‌های موجود در داخل خاکدانه‌های خاک و غیریکنواختی منافذ می‌باشد. پخشیدگی کم این ترکیبات آلی از ساختار منافذ متوسط یا ریز موجود در کانی‌های خاک به خارج از این ساختار، می‌تواند پدیده پسماند را ایجاد نماید (۹). از شاخص‌های متعددی برای کمی کردن پدیده پسماند استفاده می‌شود و این شاخص‌ها بر اساس یکی از موارد زیر طبقه‌بندی می‌شوند (جدول ۱) (۳۹).

(۱) مقدار ماده جذب‌شده (mol.kg^{-1}) q.

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری شیمی و حاصلخیزی خاک، دانشیار و استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
(*)- نویسنده مسئول:
(Email: areyhai@tabrizu.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.80192

4- Hysteresis

(۲) توان معادله فروندلیچ N .
 (۳) ضریب توزیع ظاهری $K_d (L.Kg^{-1})$.
 (۴) سطح بین همدمای جذب و واجذب و
 (۵) شیب همدمای واجذب نسبت به همدمای جذب.
 با این وجود استفاده از این شاخص‌ها با محدودیت‌های زیر مواجه هستند (۳۹):
 الف) متکی بودن به یک مدل همدمای خاص (به‌طور معمول مدل فروندلیچ)، ب) وابسته بودن به نسبت خاک به محلول یا رقت استفاده شده در همدمای واجذب، پ) استفاده از فرض‌های نامعتبر مانند خطی بودن رابطه بین یک نقطه جذب و نقطه واجذب متناظر آن، و ت) معمولاً این شاخص‌ها مناسب همدمای واجذب تک‌مرحله‌ای بوده و برای واجذب چندمرحله‌ای مناسب نیستند.

جدول ۱- شاخص‌های پسماند (HI) مورد استفاده در این تحقیق

Table 1- Hysteresis indices (HI) used in this study

شماره شاخص (Index No)	شاخص مبتنی بر: Index based on	معادله Equation	فهرست علائم و اختصارات Nomenclature	مراجع References
1	غلظت جذب‌شده Adsorbed concentration	$HI_1 = \frac{\text{Max}(q_{\text{desorb}} - q_{\text{sorb}})}{q_{\text{sorb}}}$	$\text{Max}(q_{\text{desorb}} - q_{\text{sorb}})$: حداکثر اختلاف بین منحنی‌های جذب و واجذب Maximum difference between the sorption and desorption branch.	(۲۷)
2		$HI_2 = \frac{q_{\text{desorb}} - q_{\text{sorb}}}{q_{\text{sorb}}}$	$q_{\text{sorb}}, q_{\text{desorb}}$: غلظت جذب‌شده و واجذب شده در آزمایش‌های جذب و واجذب. Adsorbed and desorbed concentrations for sorption and desorption experiments.	(۱۷)
3	توان فروندلیچ Freundlich exponent	$HI_3 = \frac{N^{\text{sorb}}}{N^{\text{desorb}}}$	$N^{\text{sorb}}, N^{\text{desorb}}$: توان فروندلیچ Freundlich exponent.	(۶)
4	ضریب توزیع ظاهری Apparent distribution coefficient	$HI_4 = \frac{\sum_i^m 1k_d^i - k_d^{i-1}}{m}$	$K_d (L.kg^{-1})$: ضریب توزیع ظاهری وابسته به غلظت concentration-dependent apparent distribution coefficient; m: تعداد مراحل واجذب total number of desorption step	(۲۴)
5	سطح بین شاخه‌های جذب و واجذب Area between sorption/desorption branch of the isotherm	$HI_5 = 100 \frac{A^{\text{desorb}} - A^{\text{sorb}}}{A^{\text{sorb}}}$	$A^{\text{sorb}}, A^{\text{desorb}}$: مساحت زیر همدمای جذب و واجذب areas under the sorption and desorption branch of the isotherm.	(۵۲)
6	شیب Slope	$HI_6 = \frac{f'_{\text{sorb}}(c) - f'_{\text{desorb}}(c)}{f'_{\text{sorb}}(c)}$	$f'_{\text{sorb}}(c), f'_{\text{desorb}}(c)$: مشتق اول تابع توصیف‌کننده منحنی جذب و واجذب first derivatives of the functions describing the adsorption and desorption branches of the isotherm.	(۵)
7	توان فروندلیچ Freundlich exponent	$HI_7 = 1 - \frac{N^{\text{desorb}}}{N^{\text{sorb}}}$		(۳۹)

را کاهش و غلظت فسفر را در محلول خاک افزایش داد، زیرا مواد آلی و اسیدهای آلی حاصل از تجزیه آن، سطوح کربنات کلسیم را

واریندرپال و همکاران (۴۹) گزارش کردند که مواد آلی، جذب فسفر، حداکثر ظرفیت بافری و انرژی پیوندی فسفر به اجزای خاک

رویی دور ریخته شد. بلافاصله ۴۰ میلی‌لیتر از محلول هیپوکلریت سدیم ۶ درصد اضافه شد و سوسپانسیون دوباره به مدت ۶ ساعت در دمای اتاق قرار داده شد. این چرخه اکسایش ۳ بار ادامه یافت. بعد از حذف ماده آلی، به‌منظور شست و شوی محلول هیپوکلریت سدیم اضافی، به بقایای خاک تیمار شده از مراحل فوق ۴۰ میلی‌لیتر محلول زمینه کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار افزوده و سوسپانسیون تکان داده شد و پس از سانتریفیوژ محلول زلال رویی دور ریخته شد و این چرخه ۳ بار ادامه یافت. پس از انجام مراحل فوق، خاک‌ها هوا خشک گردیدند (۴۲). برای انجام آزمایش جذب فسفر، ۲ گرم خاک (قبل و بعد از حذف ماده آلی) در داخل لوله‌های سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد. به هر یک از لوله‌ها ۲۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۰۱ مولار کلرید کلسیم حاوی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم فسفر بر لیتر از منبع منو کلسیم فسفات $[Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O]$ خالص اضافه گردید (دامنه غلظت اولیه فسفر از پیش آزمایش‌های انجام شده تعیین شد). برای کاهش فعالیت میکروبی به هر لوله‌ی سانتریفیوژ دو قطره تولوئن اضافه گردید (۳۸). لوله‌های سانتریفیوژ تا رسیدن به حالت تعادل (۴۸ ساعت، تعیین شده در پیش آزمایش) در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در شیکر انکوباتور تکان داده شدند. سپس در ۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ و به‌منظور حصول اطمینان از زلال بودن محلول رویی از کاغذ صافی واتمن ۴۱ عبور داده و غلظت فسفر در این محلول‌ها، به روش آبی (اسید آسکوربیک) و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Spectronic 100, Shimadzu, Japan) و در طول موج ۷۳۰ نانومتر تعیین گردید (۳۸). تفاوت بین غلظت فسفر محلول اولیه و نهایی برابر با مقدار فسفر جذب‌شده به‌وسیله خاک در نظر گرفته شد. آزمایش‌های جذب در ادامه آزمایش جذب در بالاترین غلظت اولیه فسفر انجام گرفت. به این ترتیب که ۱۵ میلی‌لیتر از محلول زلال رویی برداشت شد و ۱۵ میلی‌لیتر محلول کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار اضافه گردید. سپس لوله‌ها تا رسیدن به زمان تعادل و جذب فسفر (۲۴ ساعت، حاصل از پیش آزمایش‌های جذب)، در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در شیکر انکوباتور تکان داده شدند. پس از آن به مدت ۵ دقیقه در ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ و ۱۵ میلی‌لیتر از محلول زلال رویی برداشته شده و مجدداً ۱۵ میلی‌لیتر از محلول ۰/۰۱ مولار کلرید کلسیم به لوله‌ها افزوده شد و مراحل فوق تا ۹ مرحله ادامه یافت (۲). در نهایت غلظت فسفر به روش مورفی و ریلی (۳۱) و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۷۳۰ نانومتر تعیین گردید. مقدار فسفر اندازه‌گیری شده در این محلول‌ها به‌عنوان مقدار فسفر و جذب‌شده از خاک در نظر گرفته شد. در این تحقیق مقدار نگهداشت فسفر از رابطه زیر محاسبه شده است (۳۸):

$$P_{ret} = (P_{sorb} - P_{desorb}) \quad (1)$$

اشغال و از تشکیل رسوب هیدروکسی آپاتیت جلوگیری می‌کنند (۲۰). روش‌های متعددی برای حذف ماده آلی خاک وجود دارد که می‌توان به استفاده از آب اکسیژنه (H_2O_2) (۴۵) و هیپوکلریت سدیم (NaOCl) (۳۰) اشاره کرد. در خاک‌های غنی از کانی‌های بلورین استفاده از محلول NaOCl (۶ درصد حجمی) در pH برابر ۸ (دمای اتاق، ۳ بار تکرار) کمتر از ۳ درصد آلومینیوم و سیلیسیم قابل استخراج با سترات دی‌تیونات را حل کرد؛ درحالی‌که تأثیری بر انحلال آهن نداشت (۴۲). این یافته‌ها نشان داد که اکسیدهای بلورین و سیلیکات‌ها تحت تأثیر تیمار NaOCl قرار نمی‌گیرند. بررسی منابع نشان می‌دهد که NaOCl در حذف مواد آلی مؤثرتر از H_2O_2 می‌باشد. این موضوع به‌ویژه در خاک‌های آهکی به دلیل تشکیل اگزالات کلسیم مقاوم در برابر اکسایش با H_2O_2 حائز اهمیت است.

باوجود اینکه پژوهش‌های متعددی در مورد جذب فسفر در خاک‌های آهکی ایران انجام شده است، ولی اطلاعات منتشر شده در مورد کمی کردن پدیده پسماند و تأثیر ماده آلی بر شاخص‌های پسماند فسفر در خاک‌های آهکی ایران وجود ندارد. لذا این پژوهش با هدف اندازه‌گیری شاخص‌های پسماند فسفر، تأثیر حذف ماده آلی بر شاخص‌های مذکور و بررسی ارتباط شاخص‌های پسماند با ویژگی‌های خاک انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، چندین نمونه مرکب خاک آهکی (صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) جمع‌آوری شد. نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نظیر بافت خاک به روش هیدرومتری ۴ زمانه (۱۲)، pH در نسبت ۱:۲ آب:خاک (۴۶)، کربن آلی خاک به روش اکسایش تر (۳۳)، درصد کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (۱)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در نسبت ۱:۲ آب:خاک (۳۷)، فسفر قابل استفاده با محلول بی‌کربنات سدیم (۳۴) و کربنات کلسیم فعال (ACCE) به روش اگزالات آمونیوم (۲۵) اندازه‌گیری شدند. پس از اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، ۱۲ نمونه خاک آهکی با دامنه مناسب ویژگی‌ها برای ادامه تحقیق انتخاب شدند (جدول ۲). ماده آلی خاک‌ها با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم (۶ درصد حجمی، pH=۸، دمای اتاق) حذف شد. برای این منظور ۴ گرم از نمونه‌های خاک در لوله‌های سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد و پس از افزودن ۴۰ میلی‌لیتر محلول هیپوکلریت سدیم (NaOCl) ۶ درصد حجمی در pH برابر ۸، به مدت ۶ ساعت در دمای اتاق قرار داده شد. سپس سوسپانسیون به مدت ۵ دقیقه در ۱۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شده و محلول زلال

تغییرات از تقسیم انحراف معیار بر میانگین محاسبه شد که بزرگ بودن این ضریب نشان دهنده فاصله اعداد در خاک‌های مورد استفاده می‌باشد. ۱۲ خاک انتخاب شده از تنوع خوبی در درصد شن و رس، درصد ماده آلی، کربنات کلسیم معادل فعال و فسفر قابل جذب برخوردار بودند.

اکسایش مواد آلی خاک‌ها با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم (NaOCl)

کارایی حذف مواد آلی خاک‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود محلول هیپوکلریت سدیم توانست به‌طور میانگین ۹۰ درصد مواد آلی را در خاک‌های مورد مطالعه حذف کند و در هیچ کدام از خاک‌ها این حذف به ۱۰۰ درصد نرسید. کارایی حذف ماده آلی با محلول هیپوکلریت سدیم به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها بستگی دارد. میکوتا و همکاران (۳۰) عواملی از قبیل کمیت و ماهیت کربنات‌ها، ترکیبات آلی مقاوم و محافظت مواد آلی توسط سطوح ذرات خاک را مسئول حذف ناقص کربن آلی از خاک‌ها بیان کردند.

که در آن P_{ret} : مقدار فسفر نگهداشت شده، P_{sorb} : مقدار فسفر جذب‌شده و P_{desorb} : مقدار فسفر واجذب‌شده که به واحد میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بودند. برای تعیین ویژگی‌های نگهداشت فسفر از مدل فروندلیچ استفاده گردید. شکل ریاضی معادله فروندلیچ به‌صورت زیر می‌باشد.

$$q = K_f c^{1/n} \quad (2)$$

که در آن q مقدار ماده جذب یا واجذب شونده در واحد وزن جذب‌کننده (میلی‌گرم فسفر بر هر کیلوگرم خاک)، c غلظت تعادلی جذب یا واجذب شونده (میلی‌گرم بر لیتر)، K_f و n دو ثابت تجربی می‌باشند. از نرم‌افزار DataFit 9.0.59 (1995-2008) برای برازش غیرخطی فروندلیچ به داده‌های جذب (۷) و از آزمون t جفت شده برای مقایسه میانگین شاخص‌های پسماند استفاده شد. ضرایب همبستگی با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ محاسبه و نمودارها در نرم‌افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ۱۲ خاک مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است. در این پژوهش ضریب

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه
Table 2- Some physical and chemical characteristics of 12 used soils in this study

شماره خاک Soil No.	OM	Sand	Silt	Clay	CCE	ACCE*	pH**	EC:1:2 dS.m ⁻¹	Olsen - P (mg/kg) (soil)
1	2.75	24.55	34.45	41.00	16.20	5.88	7.95	4.04	19.48
2	0.27	61.12	22.02	16.86	18.45	3.63	8.38	1.86	4.89
3	0.96	67.06	15.59	17.35	8.75	2.94	7.63	2.47	9.70
4	0.96	48.02	26.50	25.48	7.00	1.47	7.65	2.70	9.17
5	3.17	44.45	26.66	28.89	23.50	1.47	8.06	1.34	11.84
6	0.37	61.96	25.64	12.39	30.00	2.94	8.34	1.58	5.65
7	1.18	20.55	37.63	41.82	25.50	3.68	8.05	1.79	8.02
8	2.81	19.18	41.25	39.57	35.00	10.78	8.05	1.94	6.49
9	2.37	53.47	29.72	16.80	27.00	2.45	8.35	2.25	9.85
10	1.96	27.95	32.88	39.17	33.00	9.31	7.77	1.07	7.26
11	1.58	49.17	25.69	25.14	31.50	6.13	8.25	1.51	3.67
12	3.29	18.61	43.24	38.15	17.14	8.58	8.15	2.71	11.23
میانگین Mean	1.81	41.34	30.11	28.55	22.75	4.94	8.05	2.11	8.94
ضریب تغییرات *(CV%)	61.04	44.01	26.88	38.66	40.78	64.04	3.25	38.14	46.60

OM، CCE، ACCE به ترتیب غلظت ماده آلی، کربنات کلسیم معادل و کربنات کلسیم معادل فعال می‌باشند. * در عصاره ۱ به ۲ خاک و آب

OM, CCE, ACCE are organic matter, CaCO₃-eq, and active CaCO₃-eq concentration, respectively. * Coefficient of variation (CV) was calculated by dividing the standard deviation to mean.

جدول ۳- کارایی حذف ماده آلی با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم در خاک‌های مورد مطالعه

Table 3- Efficiency of organic matter removal with sodium hypochlorite (NaOCl) solution in the studied soils

شماره خاک Soil No.	ماده آلی (%) Organic matter (%)		کارایی حذف (%) Removal efficiency (%)
	قبل از حذف ماده آلی Before SOM removal	بعد از حذف ماده آلی After SOM removal	
1	2.75	0.27	90.18
2	0.27	0.05	81.48
3	0.96	0.05	94.79
4	0.96	0.08	91.66
5	3.17	0.09	97.16
6	0.37	0.05	86.48
7	1.18	0.12	89.83
8	2.81	0.37	86.83
9	2.37	0.12	94.93
10	1.96	0.13	93.36
11	1.58	0.11	93.03
12	3.29	0.30	90.88
میانگین Mean	1.81	0.11	90.88

افزایش غلظت تعادلی فسفر، اختلاف بیشتری در میزان جذب در نمونه‌های خاک دیده شد که می‌توان آن را به تفاوت در حداکثر میزان جذب سطحی و یا تفاوت در انرژی جذب نسبت داد. این نتیجه با یافته مرزادوری و همکاران (۲۸) برای جذب بور مطابقت می‌کند. این محققان ضمن حذف ماده آلی سه خاک با استفاده از هیپوکلریت سدیم، گزارش کردند که میزان جذب عنصر بور افزایش یافت. آنان دلیل این امر را افزایش میزان آهن و آلومینیوم استخراج شده توسط بافر اگزالات بعد از حذف ماده آلی عنوان و در نهایت چنین نتیجه گیری کردند که قسمتی از اکسیدهای آهن و آلومینیوم و شاید سایر اجزای خاک توسط ماده آلی پوشانده و یا آمیخته شده و بعد از حذف ماده آلی فعال می‌شوند.

پرزو و و همکاران (۳۵) با حذف ماده آلی توسط پراکسید هیدروژن در خاک گزارش کردند که جذب عناصر کم مصرف مس و روی توسط خاک کاهش یافت. توانایی آنیون‌های آلی در کاهش جذب فسفات بستگی به ساختار مولکولی و pH دارد. اکسالات و سترات می‌توانند مشابه فسفات جذب سطوح شوند و اثر مثبت مواد آلی بر کاهش جذب فسفر هم از این طریق است (۱۳). هاولین و همکاران (۱۵) گزارش کردند که مواد آلی با ایجاد پوشش محافظ در سطح ذرات سزکوبی اکسید ظرفیت تثبیت کنندگی این ذرات را کاهش می‌دهند.

در این مطالعه همدمای نگهداشت در همه خاک‌ها به دلیل وجود پدیده پسماند، بر همدمای جذب منطبق نشد. محققان به دلیل وجود پسماند بر این اعتقادند که ظرفیت بافری خاک مربوط به همدماهای نگهداشت معتبرتر از همدماهای جذب است (۱۱). مک‌گچان و لوئیس

کایسر و گوگنبرگر (۲۱) گزارش کردند گروه‌های عاملی موجود در مواد آلی از طریق اتصال چنددندانه به سطوح کانی‌های خاک در مقابل تخریب شیمیایی محافظت می‌شوند. فیلیپو و همکاران (۱۰) گزارش کردند که کانی‌های رسی از مواد آلی در برابر تخریب محافظت می‌کنند. گزارش شده است که هیپوکلریت سدیم ترجیحاً مواد آلی لبایل را حذف می‌کند بدون اینکه تأثیر قابل توجهی بر مواد معدنی بلورین گذارد (۵۱). اینگرید و همکاران (۱۹) گزارش کردند که استفاده از هیپوکلریت سدیم به منظور اکسایش مواد آلی، ۱۹ تا ۶۲ درصد از کربن موجود در خاک را حذف کرد و کارایی حذف به‌طور متوسط ۴۱ درصد بود. زیمرمن و همکاران (۵۱) گزارش کردند که استفاده از هیپوکلریت سدیم ۶ درصد در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس ۶۳ تا ۹۱ درصد کربن موجود در بخش رس و سیلت خاک را حذف کرد. مرزادوری و همکاران (۲۸) کارایی حذف کربن آلی با استفاده از هیپوکلریت سدیم ۷ درصد در دمای ۸۰ درجه سلسیوس را ۸۸-۹۴ درصد گزارش کردند. به‌طور کلی کارایی حذف ماده آلی با محلول هیپوکلریت سدیم به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها بستگی دارد.

همدمای جذب و نگهداشت فسفر در خاک‌های مورد مطالعه

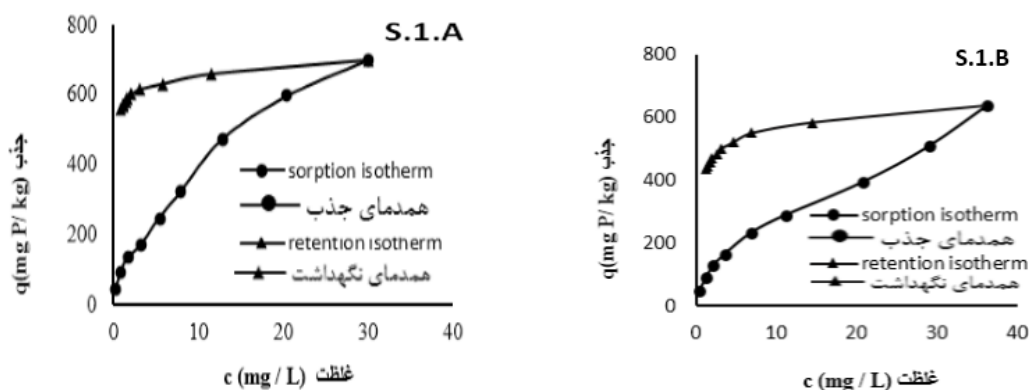
نمودار جذب و نگهداشت فسفر در مقابل غلظت تعادلی (قبل و بعد از حذف ماده آلی) به‌عنوان نمونه در شکل ۱ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، جذب فسفر توسط خاک‌های مورد مطالعه بعد از حذف ماده آلی افزایش یافت. در غلظت‌های پایین روند جذب سطحی در نمونه‌های خاک تقریباً مشابه بود ولی با

بعد از پر شدن مکان‌های جذبی پراثری بخش عمده‌ای از عنصر بر روی مکان‌های جذب کم انرژی جذب می‌شود که به آسانی قابل آزاد شدن خواهد بود (۳۲).

برازش مدل فروندلیچ به داده‌های جذب فسفر

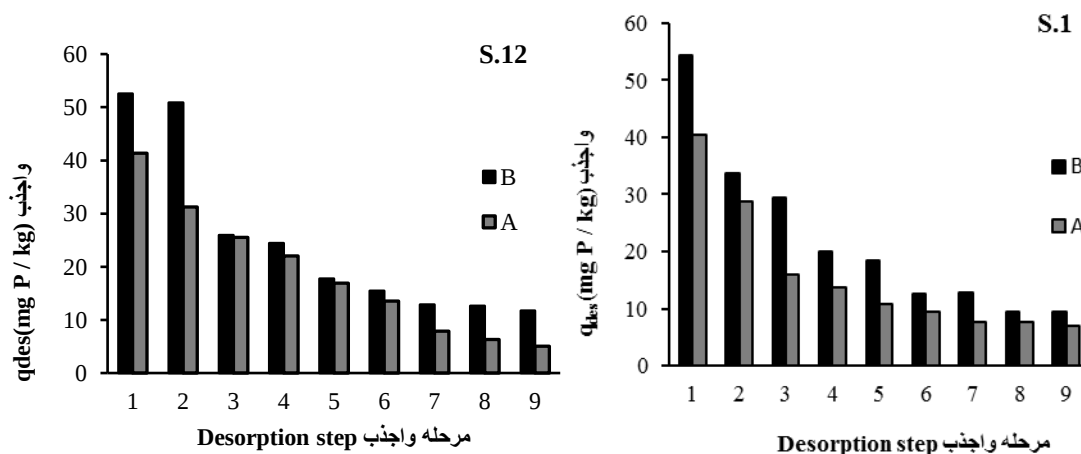
معادله فروندلیچ به دلیل ماهیت تجربی و لگاریتمی در اکثر موارد توصیف قابل قبولی از داده‌های جذب فسفر داشته و در این مطالعه مدل جذب فروندلیچ به خوبی ارتباط فسفر محلول و فسفر جذب شده را توصیف می‌کند.

(۲۹) گزارش کردند که واکنش‌های واجذب، کند و برگشت‌ناپذیر هستند. وگا و همکاران (۵۰) بیان کردند که واکنش‌های جذب و واجذب اغلب به‌طور کامل برگشت‌پذیر نمی‌باشند که به‌عنوان پدیده پسماند شناخته می‌شود. در پژوهش حاضر نیز بعد از حذف ماده آلی واجذب فسفر در خاک‌های مورد مطالعه کاهش یافت (شکل ۱ و جدول ۴). هاولین و همکاران (۱۴) گزارش کردند که مواد آلی با ایجاد پوشش محافظ در سطح ذرات سزکوبی اکسید ظرفیت تثبیت‌کنندگی این ذرات را کاهش می‌دهد. به‌طور کلی بخش کمی از مکان‌های جذب در سطوح کانی‌ها پراثری هستند. در غلظت‌های اولیه، ابتدا این مکان‌ها شروع به جذب می‌کنند و آزادسازی عنصر جذب‌شده از این مکان‌های پراثری کم می‌باشد. درحالی‌که در غلظت‌های زیاد



شکل ۱- همدمای جذب و نگهداشت فسفر در خاک ۱، قبل (B) و بعد (A) از حذف ماده آلی

Figure 1- P sorption and retention isotherm in soil 1, before (B) and after (A) organic matter removal



شکل ۲- مقادیر فسفر واجذبی در هر مرحله از فرآیند واجذب در دو خاک مورد مطالعه، قبل (B) و بعد (A) از حذف ماده آلی

Figure 2- P desorption concentration in each stage of the desorption process in two studied soils, before (B) and after (A) removal of organic matter

جدول ۴- درصد واجذب فسفر در خاک‌های مورد مطالعه قبل و بعد از حذف ماده آلی

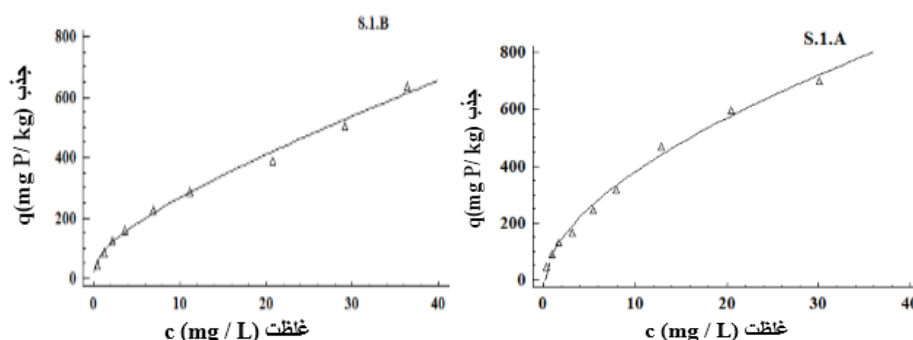
Table 4- Percentage of P desorption in studied soils before and after the removal of organic matter		
شماره خاک	قبل از حذف ماده آلی (%)	بعد از حذف ماده آلی (%)
Soil No.	Before SOM removal (%)	After SOM removal (%)
	Desorption	Desorption
1	31.4	20.1
2	64.1	61.4
3	32.6	21.6
4	49	31
5	45.6	27.2
6	34.9	26.2
7	44.4	36.8
8	43.4	29.7
9	38.5	28.1
10	29.7	16.6
11	35.5	23.8
12	37	24.8
میانگین	40.5	28.9
Mean		

از حذف ماده آلی حدود ۴۸ درصد افزایش نشان داد ولی این افزایش برای ضریب n فروندلیچ تنها حدود ۱۳ درصد بود. این نتایج با نتایج بارو (۳) مطابقت دارد.

برآزش مدل فروندلیچ به داده‌های نگهداشت فسفر

مطابق شکل ۴ و جدول ۶، مدل فروندلیچ به دلیل ضریب تبیین (r^2) مناسب توصیف قابل قبولی از داده‌های نگهداشت فسفر داشت. پارامتر n این معادله در خاک‌های مورد مطالعه قبل از حذف ماده آلی در دامنه ۳/۱ تا ۱۱/۴ با متوسط ۷/۲ بود. بعد از حذف ماده آلی پارامتر n در دامنه ۵/۰ تا ۱۸/۷ با متوسط ۱۲/۵ محاسبه شد. ضریب K در معادله فروندلیچ در دامنه ۱۴۷/۱ تا ۵۰۲/۱ با متوسط ۳۱۵/۸ لیتر بر کیلوگرم به دست آمد. ضریب K_F بعد از حذف ماده آلی در دامنه ۱۶۸/۹ تا ۶۶۰/۶ با متوسط ۴۳۰/۸ لیتر بر کیلوگرم به دست آمد.

شکل ۳ برآزش معادله فروندلیچ به داده‌های جذبی فسفر در خاک شماره ۱ را قبل (B) و بعد (A) از حذف ماده آلی نشان می‌دهد. میانگین پارامترهای برآورد شده برای معادله فروندلیچ در جدول ۵ ارائه شده است. پارامتر n که تقریباً نشان دهنده شدت جذب است، قبل از حذف ماده آلی در دامنه ۱/۳۲ تا ۱/۹۶ با متوسط مقدار ۱/۶۳ بود. بیشترین مقدار n در خاک ۱۱ و کمترین مقدار آن در خاک ۳ بود. ضریب K فروندلیچ نشان دهنده میزان جذب در غلظت تعادلی فسفر بوده و تا حدودی ماهیت فیزیکی دارد (۲۲). قبل از حذف ماده آلی در دامنه ۱۷/۰۲ تا ۸۸/۷۲ با متوسط ۵۶/۳۲ لیتر بر کیلوگرم بود. بیشترین مقدار این ضریب در خاک ۱۰ با بیشترین کربنات کلسیم معادل و کمترین آن در خاک ۶ با درصد شن بالا بود. بعد از حذف ماده آلی پارامتر n در دامنه ۱/۴۶ تا ۲/۰۸ با متوسط مقدار ۱/۸۵ تغییر کرد. ضریب K بعد از حذف ماده آلی در دامنه ۲۶/۹۶ تا ۱۳۰/۵۵ با متوسط ۸۳/۳۹ لیتر بر کیلوگرم به دست آمد. ضریب K فروندلیچ بعد

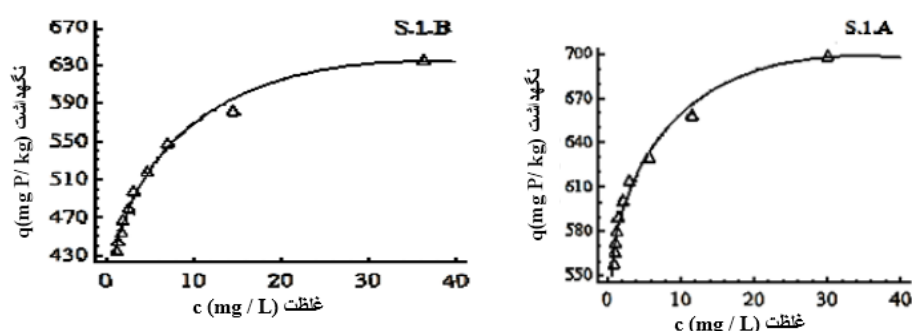


شکل ۳- برآزش معادله فروندلیچ به داده‌های جذبی فسفر در خاک شماره ۱ قبل (B) و بعد (A) از حذف ماده آلی

Figure 3- Freundlich equation fitting to the P sorption data in the soil 1, before (B) and after (A) removal of organic matter

جدول ۵- مقادیر ضرایب معادله فروندلیچ برای جذب فسفر توسط خاک‌های مورد مطالعه قبل (B) و بعد (A) از حذف ماده آلی
Table 5- Freundlich sorption isotherm coefficients in used soils, before (B) and after (A) removal of organic matter

	$K_F (L.kg^{-1})$			n_F			R^2		
	B	A	(+) %	B	A	(+) %	B	A	(+) %
کمترین Min	17.02	26.96	+ 17.82	1.32	1.46	+ 2.04	0.92	0.94	+ 17.82
بیشترین Max	88.72	130.55	+ 154.40	1.96	2.08	+ 37.87	0.97	0.99	+ 154.40
میانگین Mean	56.32	83.39	+ 48.06	1.63	1.85	+ 13.49	0.95	0.96	+ 1.06



شکل ۴- برازش مدل فروندلیچ به داده‌های نگهداشت فسفر در خاک شماره ۱ قبل (B) و بعد (A) از حذف ماده آلی
Figure 4- Freundlich equation fitting to the P retention data in the soil 1, before (B) and after (A) removal of organic matter

جدول ۶- ثابت‌های مدل فروندلیچ برازش یافته به داده‌های نگهداشت فسفر قبل (B) و بعد (A) از حذف ماده آلی
Table 6- Freundlich equation fitting to the P retention data, before (B) and after (A) removal of organic matter

	$K_F (L.kg^{-1})$			n_F			R^2		
	B	A	(+) %	B	A	(+) %	B	A	(+) %
کمترین Min	147.1	168.9	+ 15	3.1	5.0	+ 19	0.70	0.87	+24.46
بیشترین Max	502.1	660.6	+ 95	11.4	18.7	+ 171	0.98	0.99	+1.02
میانگین Mean	315.8	430.8	+ 36	7.2	12.5	+ 74	0.95	0.96	+1.02

نتیجه با یافته خدري و همکاران (۲۳) برای جذب پتاسیم مطابقت دارد.

محاسبه شاخص‌های پسماند

شاخص ۱:

HI_1 بر اساس مقدار ماده جذب‌شده در شاخه‌های جذب و واجذب

بر طبق رابطه ۳ محاسبه شد (۲۷):

$$HI_1 = \frac{\text{Max}(q_{\text{desorb}} - q_{\text{sorb}})}{q_{\text{sorb}}} \quad (3)$$

بعد از حذف مواد آلی ضریب K محاسبه شده از داده‌های نگهداشت فسفر حدود ۳۶ درصد افزایش نشان داد و این افزایش برای ضریب n فروندلیچ حدود ۷۴ درصد بود و لذا تغییرات n بیشتر از K_F بود. میانگین ثابت K_F این معادله برای همدمای واجذب بیش از ۵ برابر همدمای جذب بود که حاکی از برگشت‌پذیری کم فسفر جذب شده است. همچنین میانگین ثابت n فروندلیچ برای همدمای واجذب حدود یک ششم همدمای جذب بود که می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر فسفر جذب‌شده بر افزایش ناهمگنی سطح جذب کننده باشد. این

شاخص پسماند برای قبل از حذف ماده آلی برابر ۳/۵۳ بوده و بیشترین و کمترین آن به ترتیب برابر ۷/۰۸ و ۱/۲۱ بود که به ترتیب در خاک شماره ۳ با مقادیر شن بیشتر (۶۷ درصد) و خاک شماره ۲ با مقادیر کمتر مواد آلی (۲۷/۰ درصد) مشاهده شد. میانگین شاخص پسماند برای حالت بعد از حذف ماده آلی برابر ۵/۹ بود که ۸۵ درصد افزایش را نشان داد و بیشترین و کمترین آن به ترتیب برابر ۱۱/۸ و ۱/۹۴ بودند که به ترتیب در خاک‌های ۳ و ۲ مشاهده شدند.

شاخص ۲:

HI₂ بر مبنای مقدار ماده جذب شده به شکل زیر قابل محاسبه است (۱۷ و ۳۶):

$$HI_2 = \frac{q_{desorb} - q_{sorb}}{q_{sorb}} \quad (6)$$

در این رابطه فقط از یک مرحله واجذب (اولین مرحله) برای به دست آوردن میزان پسماند استفاده می‌شود. در صورتی که این شاخص صفر و یا منفی باشد پسماند وجود ندارد (۱۷). از این معادله به منظور حذف تأثیر غیرخطی بودن همدمای بر پسماند استفاده می‌شود (۱۲). هوانگ و همکاران (۱۷) گزارش کردند غیرخطی بودن همدمای جذب و واجذب وقوع پدیده پسماند را تشدید می‌کند. در جدول ۸ مقادیر شاخص پسماند دوم (HI₂) به دست آمده از رابطه (۶) در حالت قبل و بعد از حذف ماده آلی برای خاک‌های مورد مطالعه ارائه شده است. بیشترین و کمترین مقدار آن به ترتیب برابر ۷/۶۵ و ۲/۴۷ بود که به ترتیب در خاک‌های شماره ۳ و ۲ مشاهده شد. میانگین شاخص پسماند برای حالت قبل از حذف ماده آلی برابر ۵/۳۹ بود. بیشترین و کمترین این شاخص بعد از حذف ماده آلی به ترتیب برابر ۱۱/۰۹ و ۲/۵۶ بود که به ترتیب در خاک‌های شماره ۱۰ با مقدار ماده آلی بیشتر و خاک شماره ۲ با مقدار ماده آلی کمتر مشاهده شد.

که در آن q_{sorb} : مقدار فسفر جذب شده و q_{des} : مقدار فسفر واجذب شده که به واحد میلی گرم بر کیلوگرم خاک می‌باشند. ما و همکاران (۲۷) حداکثر اختلاف موجود در همدمای جذب و واجذب را در یک غلظت معین با استفاده از رابطه ۴ محاسبه کردند:

$$c' = \left[\frac{K_{desorb} N_{desorb}}{K_{sorb} N_{sorb}} \right]^{\frac{1}{N_{sorb} N_{desorb}}} \quad (4)$$

که در آن K و N به ترتیب ثابت تجربی و توان معادله فروندلیچ می‌باشد. با ورود رابطه دوم در رابطه اول شاخص پسماند به صورت رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$HI_1 = \left[\frac{N_{sorb}}{N_{desorb}} - 1 \right] \quad (5)$$

از رابطه (۵) محققان مختلف (۴۸ و ۴۴) برای کمی کردن پسماند استفاده کرده‌اند. ما و همکاران (۲۷) گزارش کردند که شاخص پسماند محاسبه شده از رابطه (۵) با افزایش زمان انکوباسیون به طور خطی ($r^2=0.92$) افزایش یافت؛ درحالی که غلظت‌های اولیه استفاده شده در همدمای جذب تأثیر معنی داری بر شاخص پسماند نداشتند. این محققان نشان دادند که این شاخص به شدت به زمان تعادل وابسته است. به دلیل مطالعه زمان تعادل جذب و واجذب فسفر و به تعادل رسیدن جذب فسفر در ۴۸ ساعت احتمالاً پسماند مشاهده شده در این تحقیق از نوع حقیقی بوده و احتمال وقوع پسماند غیرحقیقی ناچیز می‌باشد. پسماند غیرحقیقی یا ظاهری به طور عمده ناشی از به تعادل نرسیدن واکنش‌های واجذب به دلیل کندی سرعت برای رسیدن به تعادل حقیقی است (۳۹)؛ زیرا واکنش در جهت برگشت نیاز به انرژی فعال سازی بیشتری دارد (۵۰). در جدول ۷ مقادیر شاخص پسماند اول (HI₁) به دست آمده از رابطه (۵) در حالت قبل و بعد از حذف ماده آلی برای خاک‌های مورد مطالعه ارائه شده است. میانگین

جدول ۷- مقادیر شاخص پسماند اول (HI₁) برای خاک‌های مورد مطالعه
Table 7- The value of first hysteresis index (HI₁) for the studied soils

	شاخص پسماند (HI)		
	قبل از حذف ماده آلی Before SOM	بعد از حذف ماده آلی After SOM removal	% افزایش Increase (%)
کمترین Min.	1.21	1.94	+ 7.2
بیشترین Max.	7.08	11.80	+ 281.5
میانگین Mean	3.53**	5.90**	+ 67.1

**، اختلاف معنی دار با آزمون t در سطح ۱ درصد

** The significant difference using t-test at $p < 0.01$

جدول ۸- مقادیر شاخص پسماند دوم (HI₂) برای خاک‌های مورد مطالعهTable 8- Second hysteresis index values (HI₂) for the studied soils

	شاخص پسماند (HI)		
	قبل از حذف ماده آلی Before SOM	بعد از حذف ماده آلی After SOM removal	% افزایش Increase (%)
کمترین Min.	2.47	2.56	+ 3.1
بیشترین Max.	7.65	11.09	+ 148.8
میانگین Mean	5.39**	7.66**	+ 42.2

* * ، اختلاف معنی‌دار با آزمون t در سطح ۱ درصد

* * The significant difference using t-test at p< 0.01

شاخص ۳:

HI₃ بر مبنای توان معادله فروندلیچ از رابطه ۷ محاسبه می‌شود

(۶):

$$HI_3 = \frac{N^{sorb}}{N^{desorb}} \quad (7)$$

در جدول ۹ مقادیر شاخص پسماند سوم (HI₃) به دست آمده از رابطه (۷) ارائه شده است. در این شاخص N^{sorb} و N^{desorb} به ترتیب توان معادله فروندلیچ برای همدمای جذب و واجذب هستند. اگر $N^{sorb} = N^{desorb}$ باشد پسماند وجود ندارد و اگر $N^{desorb} / N^{sorb} > 1$ پسماند مثبت و اگر $N^{desorb} / N^{sorb} < 1$ پسماند منفی خواهد بود. در ۱۲ خاک آهکی مورد مطالعه میانگین شاخص پسماند قبل از حذف ماده آلی ۴/۵۳ بود و بیشترین و کمترین مقدار آن به ترتیب برابر ۸/۰۸ و ۲/۲۱ بود که به ترتیب در خاک‌های شماره ۳ و ۲ مشاهده شدند. میانگین شاخص پسماند برای حالت بعد از حذف ماده آلی نیز برابر

۶/۸۹ بود که نسبت به حالت قبل از حذف ماده آلی ۵۲ درصد افزایش یافت. افزایش مقدار میانگین به دست آمده از این شاخص بعد از حذف ماده آلی نشان‌دهنده کاهش آزادسازی فسفر جذب‌شده از کانی هاست. احتمالاً بعد از حذف ماده آلی، فسفر به شدت جذب سطوح کانی‌ها شده و پارامتر N^{sorb} صورت کسر معادله که نشان‌دهنده شدت جذب فسفر می‌باشد بعد از حذف ماده آلی افزایش یافته و در نتیجه منجر به افزایش این شاخص پسماند شده است. بیشترین و کمترین این شاخص بعد از حذف ماده آلی به ترتیب برابر ۱۲/۸۰ و ۲/۹۴ بود که به ترتیب در خاک‌های شماره ۳ و ۲ مشاهده شدند. شیروانی و همکاران (۴۰) مقادیر این شاخص پسماند را برای جذب کادمیم در پالیگورسکیت، سیپولیت و کلسیت به ترتیب ۴/۲، ۲۲/۹ و ۱۳/۴ گزارش نمودند.

جدول ۹- مقادیر شاخص پسماند سوم (HI₃) برای خاک‌های مورد مطالعهTable 9- Third hysteresis index values (HI₃) for the studied soils

	شاخص پسماند (HI)		
	قبل از حذف ماده آلی Before SOM	بعد از حذف ماده آلی After SOM removal	% افزایش Increase (%)
کمترین Min.	2.21	2.94	+ 6.02
بیشترین Max.	8.08	12.80	+ 157.3
میانگین Mean	4.53**	6.89**	+ 52

* * ، اختلاف معنی‌دار با آزمون t در سطح ۱ درصد

* * The significant using t-test at p< 0.01

شاخص ۴:

HI₄ با استفاده از ضریب توزیع ظاهری شاخه‌های جذب و واجذب از رابطه ۸ قابل محاسبه است (۲۴):

$$HI_4 = \frac{\sum_i^m 1k_d^i - k_d^{i-1}}{m} \quad (8)$$

انرژی پیوندی بیشتر، ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و گروه‌های عاملی با واکنش‌پذیری زیاد دارد که نشان می‌دهد جذب شیمیایی به‌عنوان یک مکانیسم اصلی پیوندی با مواد آلی در رس درشت بوده، درحالی‌که در بخش رس ریز جذب فیزیکی مکانیسم غالب است. در این تحقیق نیز تیمار کردن خاک‌ها با هیپوکلریت سدیم منجر به افزایش شاخص پسماند محاسبه شده از طریق ضریب توزیع شد و بیشترین افزایش ۱۵۷ درصد بود. بر طبق نتایج لارد و همکاران (۲۴) و به دلیل آهکی بودن خاک‌های مورد مطالعه این نتایج قابل انتظار بود. احتمالاً مواد آلی موجود در رس درشت به دلیل واکنش‌پذیری بالا با کاتیون‌های کلسیم موجود در محلول باعث کاهش فعالیت این یون در محلول و کاهش رسوب فسفات کلسیم می‌شود ولی بعد از تیمار کردن خاک‌ها با هیپوکلریت سدیم، ماده آلی حذف و فعالیت یون کلسیم در محلول افزایش و منجر به واکنش با فسفر می‌شود.

شاخص ۵:

HI₅ با استفاده از سطح بین شاخه‌های جذب و واجذب از رابطه ۹ محاسبه شد (۵۲):

$$HI_5 = 100 \frac{A^{\text{desorb}} - A^{\text{sorb}}}{A^{\text{sorb}}} \quad (9)$$

در این شاخص A^{sorb} و A^{desorb} به ترتیب مساحت زیر نمودار همدمای جذب و واجذب هستند. میانگین شاخص پسماند پنجم قبل از حذف ماده آلی برابر ۳۷/۶۵ و کمترین و بیشترین آن نیز به ترتیب برابر ۲۴/۴۲ و ۵۷/۱۳ به دست آمدند (جدول ۱۱). میانگین شاخص پسماند بعد از حذف ماده آلی ۴۲/۹۴ محاسبه شد که نسبت به وضعیت قبل از حذف ماده آلی ۱۴/۰ درصد افزایش نشان داد و کمترین و بیشترین مقدار نیز به ترتیب برابر ۳۳/۱۱ و ۵۹/۹۴ بودند که به ترتیب در خاک‌های ۸ و ۳ مشاهده شدند. زو و سلیم (۵۲) از این شاخص برای محاسبه پسماند استفاده و گزارش کردند که مقدار واجذب به غلظت اولیه بستگی داشت.

در جدول ۱۰ مقادیر شاخص پسماند چهارم (HI₄) به دست آمده از رابطه (۸) در حالت قبل و بعد از حذف ماده آلی برای خاک‌های مورد مطالعه ارائه شده است. میانگین شاخص پسماند برای قبل از حذف ماده آلی برابر ۱۲۵/۸۹ بوده و بیشترین و کمترین آن برابر ۳۳۸/۶۲ و ۲۵/۶۵ بود که به ترتیب در خاک‌های شماره ۱۰ و ۲ مشاهده شدند. میانگین شاخص پسماند برای حالت بعد از حذف ماده آلی برابر ۲۶۱/۴۱ بود که حدود دو برابر افزایش پسماند را نشان داد. این نتایج نشان می‌دهند که مواد آلی نقش مهمی در انرژی جذب فسفر در خاک‌های آهکی کشور ما دارند. بیشترین و کمترین این شاخص برابر ۷۶۷/۵۲ و ۳۳/۸۸ بود که به ترتیب در خاک شماره ۱۰ با مقدار رس نسبتاً زیاد (۳۹ درصد) و خاک شماره ۲ با مقدار ماده آلی کم (۰/۲۷ درصد) مشاهده شد. در این تحقیق میانگین ضرایب توزیع محاسبه شده از همدمای واجذب بزرگ‌تر از همدمای جذب بود که نشان می‌دهد تمایل سطوح خاک برای جذب فسفر در جهت واجذب بیشتر بوده و دلیل این امر به دلایل وقوع پدیده پسماند برمی‌گردد (اعداد مربوطه به دلیل محدودیت در تعداد صفحات مقاله ارائه نشده‌اند) (۸). لارد و همکاران (۲۴) گزارش کردند که تیمار کردن رس خاک با پراکسید هیدروژن مقادیر ضریب توزیع (K_d) را در بخش درشت (۲-۰/۲)، متوسط (۰/۲-۰/۰۲) و ریز (>۰/۰۲) رس خاک برحسب میکرومتر به ترتیب ۶۲، ۲۰ و ۱۸ درصد کاهش داد که نشان می‌دهد مقدار قابل توجهی از پسماند همدمای جذب و واجذب به مواد آلی موجود در بخش درشت رس و مقدار کم آن به بخش متوسط و ریز رس مرتبط است. این محققان گزارش کردند که مواد آلی موجود در رس درشت نسبت به مواد آلی موجود در بخش متوسط و ریز،

جدول ۱۰- مقادیر شاخص پسماند چهارم (HI₄) برای خاک‌های مورد مطالعهTable 10- Fourth hysteresis index values (HI₄) for the studied soils

	شاخص پسماند (HI)		
	قبل از حذف ماده آلی Before SOM	بعد از حذف ماده آلی After SOM removal	% افزایش Increase (%)
کمترین Min.	25.6	33.8	+ 32.1
بیشترین Max.	338.6	767.5	+ 181.9
میانگین Mean	125.9**	261.4**	+ 107.6

* *، اختلاف معنی‌دار با آزمون t در سطح ۱ درصد

* * The Significant difference using t-test at p < 0.01

جدول ۱۱- مقادیر شاخص پسماند پنجم (HI₅) برای خاک‌های مورد مطالعهTable 11- Fifth hysteresis index values (HI₅) for the studied soils

	شاخص پسماند (HI)		
	قبل از حذف ماده آلی Before SOM	بعد از حذف ماده آلی After SOM removal	% افزایش Increase (%)
کمترین Min.	24.42	33.11	24.42
بیشترین Max.	57.13	59.94	57.13
میانگین Mean	37.65**	42.94**	14.05**

**، اختلاف معنی‌دار با آزمون t در سطح ۱ درصد

** The significant difference using t-test at p< 0.01

جدول ۱۲- مقادیر شاخص پسماند ششم (HI₆) برای خاک‌های مورد مطالعهTable 12- Sixth hysteresis index values (HI₆) for the studied soils

	شاخص پسماند (HI)		
	قبل از حذف ماده آلی Before SOM	بعد از حذف ماده آلی After SOM removal	% افزایش Increase (%)
کمترین Min.	0.52	0.67	+ 1.1
بیشترین Max.	0.95	1.00	+ 53.8
میانگین Mean	0.74*	0.83*	+ 12.1

**، اختلاف معنی‌دار با آزمون t در سطح ۱ درصد

** The Significant difference using t-test at p< 0.01

شاخص ۶

HI₆ با استفاده از شیب همدمای جذب و واجذب میزان پسماند

را از رابطه زیر برآورد می‌شود (۵):

$$HI_6 = \frac{f'_{sorb}(c) - f'_{desorb}(c)}{f'_{sorb}(c)} \quad (10)$$

در این شاخص $f'_{sorb}(c)$ و $f'_{desorb}(c)$ به ترتیب مشتق تابع جذب و واجذب هست. در این پژوهش بیشترین و کمترین مقدار پسماند ششم (HI₆) به ترتیب برابر ۰/۹۵ و ۰/۵۲ برای قبل از حذف ماده آلی بود (جدول ۱۲). میانگین شاخص پسماند برای قبل از حذف ماده آلی برابر ۰/۷۴ بود. بیشترین و کمترین این شاخص بعد از حذف ماده آلی به ترتیب برابر ۱ و ۰/۶۷ بودند. میانگین شاخص پسماند برای حالت بعد از حذف ماده آلی ۰/۸۳ به دست آمد که نسبت به قبل از حذف ماده آلی ۱۲/۱ درصد بیشتر بود. بریدا و همکاران (۵) از این شاخص برای کمی کردن پدیده پسماند در مطالعه جذب بنزن توسط ذرات زغال سنگ استفاده و گزارش کردند که پسماند موجود به علت فرآیندهای تخریبی، اثرات کلوئیدی و سرعت پخشیدگی نبوده بلکه به دلیل تغییر شکل برگشت ناپذیر منافذ به علت انبساط و انقباض بود.

این محققان گزارش کردند که دلایل پدیده پسماند مشاهده شده به شرح زیر است: (۱) ورود مواد جذب شده در طی مرحله جذب به داخل جاذب به گونه‌ای که هیچ گونه تماس ترمودینامیکی با محلول نداشته باشد، (۲) انبساط برگشت ناپذیر منافذ و (۳) انقباض منافذ در طول مرحله واجذب و به دام افتادن ماده جذب شده در داخل ساختار فرو پاشیده^۱.

شاخص ۷

HI₇ با استفاده از توان معادله فروندلیچ در شاخه‌های جذب و واجذب میزان پسماند را از رابطه زیر برآورد می‌کند (۳۹):

$$HI_7 = 1 - \frac{N^{desorb}}{N^{sorb}} \quad (11)$$

در جدول ۱۳ مقادیر شاخص پسماند هفتم (HI₇) به دست آمده از رابطه (۱۱) در حالت قبل و بعد از حذف ماده آلی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین شاخص پسماند برای قبل از حذف ماده آلی ۰/۷۳ بود و بیشترین و کمترین مقدار آن نیز به ترتیب برابر ۰/۸۷ و ۰/۵۵ بودند.

جدول ۱۳- مقادیر شاخص پسماند هفتم (HI₇) برای خاک‌های مورد مطالعه
Table 13- Seventh hysteresis index values (HI₇) for the studied soils

	شاخص پسماند (HI)		
	قبل از حذف ماده آلی Before SOM	بعد از حذف ماده آلی After SOM removal	% افزایش Increase (%)
کمترین Min.	0.55	0.66	+ 1.2
بیشترین Max.	0.87	0.92	+ 67.3
میانگین Mean	0.73**	0.83**	+ 13.7

**، اختلاف معنی‌دار با آزمون t در سطح ۱ درصد

** The Significant difference using t-test at $p < 0.01$

کلسیم معادل در افزایش جذب و کاهش قابلیت دسترسی فسفر در این خاک‌ها می‌باشد. همچنین شاخص پسماند چهارم با $K_{f\text{desorb}}$ ($r = 0.9, p < 0.01$) و $K_{f\text{desorb}}$ ($r = 0.77, p < 0.01$) همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت که نشان می‌دهد با افزایش انرژی پیوندی در همدمای جذب و واجذب به دلیل برهمکنش قوی بین ماده جذب‌شونده و سطح جاذب مقدار واجذب کاهش یافته و در نتیجه باعث افزایش این شاخص پسماند می‌شود. این شاخص پسماند با مقدار ماده آلی همبستگی معنی‌دار نشان نداد. این احتمال وجود دارد که رقابت فسفر با ماده آلی برای جذب شدن به مکان‌های جذبی بیشتر به ماهیت ماده آلی بستگی دارد. هیو و همکاران (۱۶) گزارش کردند که کاهش مقادیر جذب فسفر در حضور اسیدهای آلی مختلف می‌تواند به نوع اسید مرتبط باشد. در نوع اول، سیترات و ملات که به‌طور قابل ملاحظه‌ای مقدار جذب فسفر را کاهش می‌دهند. اما نوع دوم، مانند تارترات، بنزوات و استات هیچ تأثیر واضحی بر جذب فسفات نداشتند. این امر نشان می‌دهد که توانایی اسیدهای آلی برای کاهش جذب فسفر به تعداد گروه عاملی کربوکسیلیک موجود در هر مولکول اسید آلی وابسته است. ترتیب کاهش مقدار فسفر جذب‌شده در حضور اسیدهای مختلف از توالی تری کربوکسیلیک اسیدها < دی کربوکسیلیک اسیدها < منو کربوکسیلیک اسیدها پیروی می‌کند (۱۱). این موضوع شاید نشان دهد خاکی که مقدار پسماند بیشتری داشته احتمالاً مقدار اسید آلی از توالی تری کربوکسیلیک آن بیشتر بوده که بعد از حذف ماده آلی فسفر به‌شدت جذب سطوح خاک شده و مقدار واجذب آن کم و در نتیجه شاخص پسماند آن زیاد شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که همدمای نگهداشت فسفر در خاک‌های مورد مطالعه به دلیل وجود پدیده پسماند، بر همدمای جذب منطبق نشد. معادله غیرخطی فروندلیچ به داده‌های جذب و واجذب

میانگین شاخص پسماند برای حالت بعد از حذف ماده آلی ۰/۸۳ به دست آمد که ۱۳/۷ درصد افزایش یافت. همچنین بیشترین و کمترین آن نیز به ترتیب برابر ۰/۹۲ و ۰/۶۶ بودند که به ترتیب در خاک‌های ۳ و ۲ با مقدار شن نسبتاً زیاد به دست آمدند. سندر و همکاران (۲۹) گزارش کردند که این شاخص یک ابزار مفید برای کمی کردن پسماند بوده و به درک مکانیسم‌های پسماند جذبی کمک می‌کند و در صورتی که پسماند به علت تشکیل یک وضعیت کم‌ثبات^۱ باشد پسماند محاسبه شده از این شاخص انرژی آزاد مولار جذبی را در این وضعیت اندازه‌گیری می‌کند. مطالعات آینده می‌تواند بر تأثیر تغییرات سیستماتیک ویژگی‌های جذب شونده و جاذب و همچنین تأثیر غلظت جذب شونده بر پسماند محاسبه شده از این شاخص تمرکز نماید.

همبستگی شاخص‌های پسماند با ویژگی‌های خاک

ضرایب همبستگی بین ویژگی‌های خاک و پارامترهای معادله فروندلیچ در برازش به داده‌های جذب و واجذب با شاخص‌های پسماند در جدول ۱۴ نشان داده شده است. در منابع معمولاً هر یک از شاخص‌های پسماند که بیشترین همبستگی معنی‌دار را با ویژگی‌های خاک و پارامترهای معادله فروندلیچ نشان دهد به عنوان بهترین شاخص برای کمی کردن پدیده پسماند معرفی شده‌اند. به عنوان مثال سندر و همکاران (۳۹) پسماند هفتم را در مطالعه جذب و واجذب دی کلرو بنزن به عنوان شاخص برتر معرفی کردند. اما در این پژوهش شاخص پسماند چهارم محاسبه شده از رابطه (۸) همبستگی مثبت معنی‌داری را با درصد رس ($r = 0.69, p < 0.05$) و کربنات کلسیم معادل فعال ($p < 0.05, 0.7$) نشان داد. اگرچه روابط آماری علت و معلولی نیستند ولی این امر بیانگر نقش احتمالی بافت خاک و کربنات

به افزایش مقادیر شاخص پسماند بعد از حذف ماده آلی، مصرف مواد آلی و یا حداقل جلوگیری از کاهش آن می‌تواند سبب افزایش کارایی مصرف فسفر شود.

سپاسگزاری

هزینه این پژوهش از محل گرنت شماره ۸۱۰ معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تبریز تأمین شده که بدینوسیله از دانشگاه تبریز تشکر می‌شود.

برآزش خوبی نشان داد. حذف مواد آلی خاک‌ها سبب افزایش تمام شاخص‌های پسماند شد. از بین شاخص‌های پسماند مورد استفاده، شاخص چهارم به دلیل اینکه نزدیک‌ترین همبستگی را با ویژگی‌های خاک نشان داد به‌عنوان شاخص برتر معرفی شد. شاخص پنجم پسماند با $K_{f\text{desorb}}$ و $K_{f\text{isorb}}$ همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت. از این موضوع چنین نتیجه‌گیری شد که پس از حذف ماده آلی به دلیل برهمکنش قوی بین ماده جذب‌شونده و سطح جاذب، انرژی پیوند مکان‌های جذب افزایش یافته و مقدار و جذب کاهش در نتیجه این شاخص پسماند افزایش یافت. درنهایت پیش‌بینی می‌شود که با توجه

جدول ۱۴- همبستگی پیرسون بین برخی ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه با شاخص‌های پسماند (قبل از حذف ماده آلی)

Table 14- Pearson correlation between calculated hysteresis indices and characteristics of studied soils (Before removal of organic matter)

ویژگی‌های خاک	رس	شن	کربنات کلسیم معادل فعال	$K_{f\text{isorb}}$	$K_{f\text{desorb}}$
Soil characteristics	Clay	Sand	ACCE		
HI ₄	0.69*	- 0.61*	0.7*	0.77**	0.9**

*** و * اختلاف معنی‌دار با آزمون t در سطح ۱ و ۵ درصد

***, * The Significant difference using t-test at $p < 0.01$ and $p < 0.05$

منابع

- Allison L.E., and Moodie C.D. 1965. Carbonates. In: Black, C. A. (ED). Methods of Soil Analysis. Pares, ASA: Madison, WI. 1379-1396.
- Angeluz O., Pierre B., Enrique B., and Laura O. 2008. Sorption and desorption of organophosphate pesticides, parathion and cadusafos, on tropical agricultural soils. Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag/ EDP Sciences/ INRA 28: 231-238.
- Barrow N.J., Bowden J.W., Posner A.M., and Quirk J.P. 1980. Describing the effects of electrolyte on adsorption of phosphate by a variable charge surface. Australian Journal of Soil Research 18: 395-404.
- Berkowitz B., Dror I., and Yaron B. 2009. Contaminant Geochemistry: Interactions and transport in the subsurface environment. Springer, Berlin, Germany, Pp: 120-123. ISBN 978-3-540-74381-1.
- Braida W.J., Pignatello J.J., Lu Y., Ravikovitch P.I., Neimark A.V., and Xing B. 2003. Sorption hysteresis of benzene in charcoal particles. Environment Science Technology 37: 409-4170.
- Celis R., Carnejo H., Hermosin M.C., and Koskinen W.C. 1997. Sorption – desorption of atrazine and simazine by model soil colloidal components. Soil Science Society of America Journal 61: 436-443.
- Datafit version 9.0.59. (1995-2008). Oakdal engineering.
- Essington M.E. 2004. Soil and Water chemistry: an Integrative Approach. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Farrell J., and Reinhard M. 1994. Desorption of halogenated organics from model solids, sediments, and soils under unsaturated conditions: 2. Kinetics. Environmental. Science and Technology 28: 63-72.
- Filippo F., Markus E., Paolo Ch., Giacomo S., Wilfried H., and Evelyne D. 2008. Comparison of different methods of obtaining a resilient organic matter fraction in Alpine soils. Geoderma 145: 355-369.
- Fox R.L. 1981. External phosphorus requirements of crops. In M. Stelly(ed) Chemistry in the Soil Environment. SSSA. Madison, WI. p.223-239.
- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. Pp.383-412. In: A. Klute (ed). Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd ed. ASA, SSSA. Madison, WI. USA: 201-214.
- Guppy C.N., Menzies N.W., Moody P.W., and Blamey F. 2005. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. Australian Journal of Soil Research 43: 189-202.
- Havlin J.L., Tisdale S.L., Nelson W.L., and Beaton J.D. 2004. Soil Fertility and Fertilizers. An introduction to nutrient management. 5th ed. Macmillan Publishing Company New York, Inc.750p.
- Havlin J.L., Tisdale S.L., Nelson W.L., and Beaton J.D. 2002. Soil Fertility and Fertilizers. An introduction to nutrient management 4th ed. Macmillan Publishing Company New York, Inc.750p.
- Hu H.Q., He J.Z., Li X.Y., and Liu F. 2001. Effect of several organic acids on phosphate adsorption by variable charge soils of central China. Environmental International Journal 26: 353-358.
- Huang W., Yu H., and Weber W.J. 1998. Hysteresis in the sorption and desorption of hydrophobic organic

- contaminants by soils and sediments. 1. A comparative analysis of experimental protocols. *Journal of Contaminant Hydrology* 31: 215-225.
- 18- Huang W.L., Schlautman M.A., and Weber W.J. 1996. A distributed reactivity model for sorption by soils and sediments. 5. The influence of near-surface characteristics in mineral domain. *Environmental Science and Technology* 30: 2993-3000.
- 19- Ingrid K., Thomsen. Sander B., Lars S., Jensen Be., and Christensen T. 2009. Assessing soil carbon lability by near-infrared spectroscopy and NaOCl oxidation. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 2170-2177.
- 20- Inskeep W.P., and Silvertooth J.C. 1998. Inhibition of hydroxyapatite precipitation in the presence of fulvic, humic and tannic acids. *Soil Science Society of America Journal* 52: 941-946.
- 21- Kaiser K., and Guggenberger G. 2003. Mineral surfaces and soil organic matter. *European Journal of Soil Science* 54: 219-236.
- 22- Karimian N., and Moafpourian G.R. 1999. Zinc adsorption characteristics of selected calcareous soils of Iran and their relationship with soil properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 30: 1721-1731.
- 23- Khedri E., Oustan Sh., and Reyhanitabar A. 2016. Hysteresis Indices of Potassium Sorption-Desorption Isotherms in Some Soils of East Azarbaijan Province, Iran. *Iranian Journal of Soil Research (Formerly Soil and Water Science)* 30: 427-442. (In Persian with English abstract)
- 24- Laird D.A., Yen P.Y., Koskinen W.C., Steinheimer T.R., and Dowdy R.H. 1994. Sorption of atrazine on soil clay components. *Environment Science Technology* 28: 1054-1061.
- 25- Leoppert R.h., and Suarez L. 1996. Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy Madison.WI.
- 26- Leytem A.B., and Westermann D.T. 2003. Phosphate sorption by Pacific Northwest calcareous soils. *Journal of Soil Science* 168: 368-375.
- 27- Ma L., Southwick L.M., Willis G.H., and Selim H.M. 1993. Hysteretic characteristics of atrazine adsorption-desorption by a sharkey soil. *Weed Science Society of America* 41: 627-633.
- 28- Marzadori C., Vittori Antisari L., Ciavatta C., and Sequi P. 1991. Soil organic matter influence on adsorption and desorption of boron. *Soil Science Society of America Journal* 55: 1582-1585.
- 29- Mc Gechan, M.B., and Lewis, D.R. 2002. Sorption of phosphorus by soil, part 1: Principles, equations, and models. *Biosystems Engineering* 82: 1-24.
- 30- Mikutta R., Kleber M., Kaiser K., and John R. 2005. Review: Organic matter removal from soils using hydrogen peroxide, sodium hypochlorite, and disodium peroxodisulfate. *Soil Science Society of America Journal* 69: 120-135.
- 31- Murphy J., and Riley H.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27: 31-36.
- 32- Mustafa G., Kookana R.S., and Singh B. 2006. Desorption of cadmium from goethite: Effect of pH, temperature and aging. *Chemosphere* 64: 856-865.
- 33- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. P. 539-580 .Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Methods, 2nd ed. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA. Madison, USA.
- 34- Olsen S.R., and Sommer L.E. 1982. Phosphorus. In: Klute, A. (Ed). Methods of Soil Analysis: Chemical and microbiological properties, part2. 2nd Ed. Agronomy Monograph. No. 9. ASA and SSSA , Madison WI, pages 403-430.
- 35- Perez-Novo C., Pateiro M., Osorio F., Novoa-Munoz J.C., Lopez-Periago E., and Arias-Estevéz M. 2008. Influence of organic matter removal on competitive and noncompetitive adsorption of copper and zinc in acid soils. *Journal of Colloid and Interface Science* 322: 33-40.
- 36- Ran Y.B., Rao P.S.C., and Fu J. 2004. Importance of adsorption (hole-filling) mechanism for hydrophobic organic contaminants on an aquifer kerogen isolate. *Environmental Science Technology* 38: 4340-4348.
- 37- Rhoades J.D. 1996. Salinity. Electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D.L. Methods of soil analysis. part3. Chemical methods. (Ed). SSSA. Madison WI. 417-435.
- 38- Sakadevan K., and Bavor H.J. 1998. Phosphate adsorption characteristics of soils, slages and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. *Water Resource* 32: 393-399.
- 39- Sander M., Lu Y., and Pignatello J.J. 2005. A thermodynamically based method to quantify true sorption hysteresis. *Journal of Environmental Quality* 34: 1063-1072.
- 40- Shirvani M., Kalbasi M., Shariatmadari H., Nourbakhah F., and Najafi B. 2006. Sorption-desorption of cadmium in aqueous palygorskite, sepiolite, and calcite suspensions: Isotherm hysteresis. *Chemosphere* 65: 2178-2184.
- 41- Shirvani M., and Shariatmadari H. 2002. Application of sorption isotherms for determining the phosphorus buffering indices and the standard P requirement of some calcareous soils in esfahan. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science* 6: 121-130. (In Persian with English abstract)
- 42- Siregar A., Kleber M., Mikutta R., and John R. 2004. Sodium hypochlorite oxidation reduces soil organic matter concentrations without affecting inorganic soil constituents. *European Journal of Soil Science* 56: 481-490.

- 43- Sparks D.L. 1995. Environmental Soil Chemistry, Academic Press, San Diego.
- 44- Swanson R.A., and Dutt G.R. 1973. Chemical and physical processes that affect atrazine and distribution in soil systems. Soil Science Society of America Proceeding 37: 872-876.
- 45- Theng B.K.G., Ristori G.G., Santi C.A., and Percival H.J. 1999. An improved method for determining the specific surface areas of topsoils with varied organic matter content, texture and clay mineral composition. European Journal of Soil Science 50: 309-316.
- 46- Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L. (Ed), Methods of Soil Analysis, Chemical Methods. SSSA.Madison, Wisconsin, PP: 475-483.
- 47- Tvardovski A.V., Fomkin A.A., Tarasevich Y.Ui., and Zhukova A.I. 1997. Hysteresis phenomena in the study of sorptive deformation of sorbents. Journal of Colloid and Interface Science 191: 117-119.
- 48- Van Genuchten M.T., Wierenga P.J., and O'Connor G.A. 1977. Mass transfer studies in sorbing porous media: III. Experimental evaluation with 2,4,5-T. Soil Science Society of America Journal 41: 278-285.
- 49- Varinderpal S., Dhillon N.S., and Brar B.S. 2006. Influence of long-term use of fertilizers and farmyard manure on the adsorption-desorption behavior and bioavailability of phosphorus in soils. Nutrient Cycling Agro Ecosystems 75: 67-78.
- 50- Vega F.A., Covelo E.F., and Andrade M.L. 2009. Hysteresis in the individual and competitive sorption of cadmium, copper, and lead by various soil horizons. Journal of Colloid and Interface Science 331: 312-317.
- 51- Zemmerman M., Leifeld J., Abiven S., Schmidt M.W.I., and Fuhrer J. 2007. Sodium hypochlorite separates an older soil organic matter fraction than acid hydrolysis. Geoderma 139: 171-179.
- 52- Zhu H., and Selim HM. 2000. Hysteretic behavior of metolachlor adsorption-desorption in soils. Soil Science 165:632-645.



Effect of Organic Matter Removal on Phosphorus Hysteresis Indices (HI) in Calcareous Soils

M. Mahdizadeh¹ - A. Reyhanitabar^{2*} - Sh. Oustan³

Received: 29-04-2019

Accepted: 20-01-2020

Introduction: Sorption and desorption are important processes that influence phosphorus (P) chemistry in soil. Desorption is a process more complex than sorption and usually not all that is adsorbed is desorbed. This indicates that adsorption and desorption mechanisms are not similar and it seems that such reactions are irreversible. Such irreversibility is usually called hysteresis. Major factors such as chemical changes in the structure of minerals, non-equivalent processes, inflation of adsorbent material, changes in the strength of crystals, irreversible fixation of adsorbed molecules in fine pores and equilibrium time less than its true value lead to hysteresis phenomenon. The concentration of phosphate in soil solution and thus its availability for plant are closely related to sorption processes by soil components. This relationship can be explicated by sorption isotherms. Soil organic matter (SOM) especially in arid and semiarid regions is one of the important indices of soil quality and plays important role in phosphate chemistry and fertility. Organic matter could decrease P sorption, maximum buffering capacity, and bonding energy and could increase P concentration in calcareous soils solution. Organic matter and organic acids resulted from its decomposition may coat calcium carbonate surfaces and prevent the formation of apatite precipitation. There are several methods to remove soil organic matter including using hydrogen peroxide and sodium hypochlorite solutions. It has been reported that H_2O_2 is penetrated into the interlayer spaces of phlogopite and vermiculite through exchange with water and cations and decomposes into H_2O and O_2 . Therefore, this study was conducted to quantify the hysteresis indices, to investigate the effect of organic matter removal on phosphorus (P) hysteresis indices and to evaluate the relationship between hysteresis indices and soil characteristics and selection of index with the close correlation.

Materials and Methods: This study was carried out to obtain soil organic matter (SOM) removal with sodium hypochlorite solution (NaOCl, pH=8) effects on P hysteresis indices in 12 calcareous soils of Iran with different characteristics. For experiment of P sorption, 2 gr of soil subsamples was placed in separate 50 mL centrifuge tubes, to which were added 20 ml of monocalcium phosphate containing 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80 and 100 mg P L⁻¹, which had been prepared in 0.01 M CaCl₂ solution as background. Centrifuge tubes were shaken in a shaker incubator for 48-hour period to reach an equilibrium. Then, they were centrifuged at 4000 rpm for 5 minutes. The supernatant was filtered through a filter paper and the P concentration of filtrates determined using a spectrophotometer. The difference between initial and final P concentrations was assumed to be the amount of P adsorbed by the soil. Desorption experiments were assumed at the end of sorption experiments at the highest initial concentration of P with 0.01 M CaCl₂ solution. The tubes were shaken to reach phosphate desorption equilibrium time (24 hours) at 25 °C in incubator shaker. Then, it was centrifuged for 5 minutes at 4000 rpm and 15 ml of the supernatant solution was pipetted and then 15 ml of solution of 0.01 M CaCl₂ was added to tubes and the above steps continued to 9 steps. Freundlich model was used to describe the sorption – desorption isotherms data. DataFit 9.0.59 software (1995-2008) was used for nonlinear fitting of Freundlich to sorption data.

Results and Discussion: According to the results, P sorption and desorption data showed hysteresis which indicates adsorption and desorption mechanisms are not the same. As expected, nonlinear Freundlich equation showed a best fit ($R^2=0.96$) to the data. The mean value of desorbed P in studied soils after SOM removal was decreased by 40%, so it was concluded that P sorption was more irreversible. In NaOCl treated soils, the mean values of seven studied hysteresis indices (HI) increased. Regression analysis indicated that the fourth hysteresis index, obtained from the distribution coefficient (K_d), had close relation with clay ($r = 0.69$, $p < 0.05$) and active calcium carbonate ($r = 0.7$, $p < 0.05$) concentration. Moreover, this hysteresis index showed significant ($p < 0.01$)

1, 2 and 3- Ph.D. Student, Associate Professor and Professor, Department of Soil Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: areyhani@tabrizu.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.80192

positive correlation with K_{fsorb} and $K_{fdesorb}$, which suggests that increasing bonding energy in sorption and desorption isotherms decreased desorption amount due to the strong interaction between adsorbed P and absorbent surface, increasing this hysteresis index.

Conclusion: It was concluded that among seven used hysteresis indices, HI_4 can be introduced as the best index for the studied calcareous soils. It is predicted that using organic matter or preventing its reduction in arid and semi-arid calcareous soils may increase the efficiency of P fertilizer, given an increase in hysteresis index after the removal of the organic matter.

Keywords: Desorption, Hypochlorite, Isotherm, Oxidation, Sorption



وضعیت ماده آلی خاک در توده‌های جنگلی ارسباران

حسین رضائی^{۱*} - علی اصغر جعفرزاده^۲ - احمد علیجانپور^۳ - فرزین شهبازی^۴ - خلیل ولیزاده کامران^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶

چکیده

با توجه به نقش‌های مهم ماده آلی خاک در اکوسیستم، ضروری است که وضعیت آن در شرایط مختلف محیطی مورد بررسی قرار گیرد. بر این اساس مطالعه حاضر در زیر حوضه کلیبرچای سفلی از جنگل‌های ارسباران با مطالعه پنج خاکرخ شاهد در بخش‌های محیطی متمایز شده بر مبنای توزیع تیپ‌های جنگلی در امتداد یک نیمرخ ارتفاعی انجام شد. ضمن تجزیه‌های مرسوم خاک، شناسایی نوع آن و مطالعه وضعیت ماده آلی، به‌عنوان هدف اصلی تحقیق، با بررسی مقدار ماده آلی خاک، توان ترسیب کربن آلی آن و مطالعه میکرومرفولوژیک شکل‌های بقایای آلی تکمیل گردید. نتایج بیان‌گر تغییر نوع خاک از انتی‌سول، اینسپتی‌سول و آلفی‌سول به مالی‌سول با کاهش ارتفاع بود. در روندی مشابه، همگام با افزایش تکامل خاک میزان ترسیب کربن آلی آن نیز افزایش یافت اما مقدار ماده آلی روندی عکس به دلیل نوع فرایندهای دخیل در تجزیه بقایا در نواحی مختلف نشان داد. با توجه به امکان روی دادن انواع فرایندهای فیزیکی و بیوشیمیایی تحت شرایط مختلف محیطی، در نواحی مرتفع شکل‌های دست‌نخورده بقایای آلی به‌عنوان شکل غالب شناخته شدند اما با کاهش ارتفاع غالبیت در اختیار شکل‌های کاملاً تجزیه شده بود. در محدوده و مقیاس مورد مطالعه عامل ارتفاع با توجه به اثرات مستقیم و غیرمستقیم خود به‌عنوان اصلی‌ترین فاکتور محیطی کنترل‌کننده وضعیت ماده آلی خاک تشخیص داده شد. در نهایت نتیجه شد با توجه به ارتباط بین نوع خاک، مقدار ماده آلی، توان ترسیب کربن آلی خاک و شکل‌های بقایای آلی می‌توان از شناسایی خاک‌ها و توزیع آن‌ها در مدیریت منطقه‌ای کربن آلی خاک نیز استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: ارسباران، بقایای آلی، ترسیب کربن، رده خاک، نیمرخ ارتفاعی

مقدمه

عموماً نقشی مهم در پایداری اکوسیستم‌ها داشته و به همین دلیل بررسی جنبه‌های مختلف آن یکی از ضرورت‌ها و پایه‌های اصلی در مطالعات کیفیت خاک، چرخه کربن و تغییرات اقلیم است (۲۱، ۳۸ و ۶۰).

بر اساس یافته‌های ینی (۳۲) فاکتورهای خاک‌سازی منجر به شرایط محیطی متنوعی می‌شوند که مقدار، محتوا، نوع، نقش و تحولات ماده آلی خاک را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند و در این بین توپوگرافی و پوشش گیاهی از اصلی‌ترین فاکتورهای مؤثر در تغییرات ماده آلی می‌باشند (۸، ۴۰ و ۶۳) که در این تحقیق نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله عوامل متعددی که تغییرات ماده آلی خاک را در کنترل دارند پوشش گیاهی و بقایای ناشی از آن است که به عنوان منبع اصلی ماده آلی خاک نقش مستقیمی در ترکیب و تحولات آن دارند (۴۳ و ۴۵)، چنانچه تحقیقات پیشین ارتباط نوع پوشش گیاهی با شاخص‌های مختلف ماده آلی خاک را نشان داده‌اند (۴۶، ۴۷ و ۶۲). اجزای توپوگرافی شامل ارتفاع، جهت و شیب از طریق تأثیر بر فرایندهای خاک‌سازی نقش مستقیمی در مقدار و تکامل ماده آلی خاک دارند (۱۴، ۲۴ و ۵۸). همچنین توپوگرافی نقش غیرمستقیمی با

ماده آلی یکی از بخش‌های مهم خاک است که شامل بقایای بافتی گیاهی و جانوری، اجزا تجزیه نشده تا جزئی تجزیه شده آنان و ریزجانداران مرده می‌باشد (۶۱). بخش آلی خاک ضمن دارا بودن نقش‌های مثبت اکولوژیکی همچون حفظ رطوبت خاک، تأمین عناصر غذایی، حمایت فیزیکی از گیاهان، فیلتر کردن مواد سمی مصنوعی و آلاینده‌های طبیعی با تأثیر بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و مرفولوژیکی نقش‌های متنوعی در انواع فرایندهای خاک‌سازی و میزان تکامل خاک دارد (۱۳ و ۳۳)؛ بنابراین ماده آلی

۱، ۲ و ۴- به ترتیب استادیار، استاد و دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(*) نویسنده مسئول: Email: hosseinrezaei@tabrizu.ac.ir

۳- دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه

۵- دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.80633

تحولات ماده آلی خاک که توسط روش‌های معمول بیوشیمیایی کشف نشده بیش‌ازپیش مورد توجه قرار گیرد. براساس نقش‌های مهم ماده آلی خاک در طبیعت، هدف اصلی این تحقیق ارزیابی مقدار ماده آلی، میزان ترسیب کربن آلی و تحولات ماده آلی خاک در بخش‌های مختلف محیطی با انواع تیپ‌های جنگلی در امتداد نیم‌رخ ارتفاعی می‌باشد.

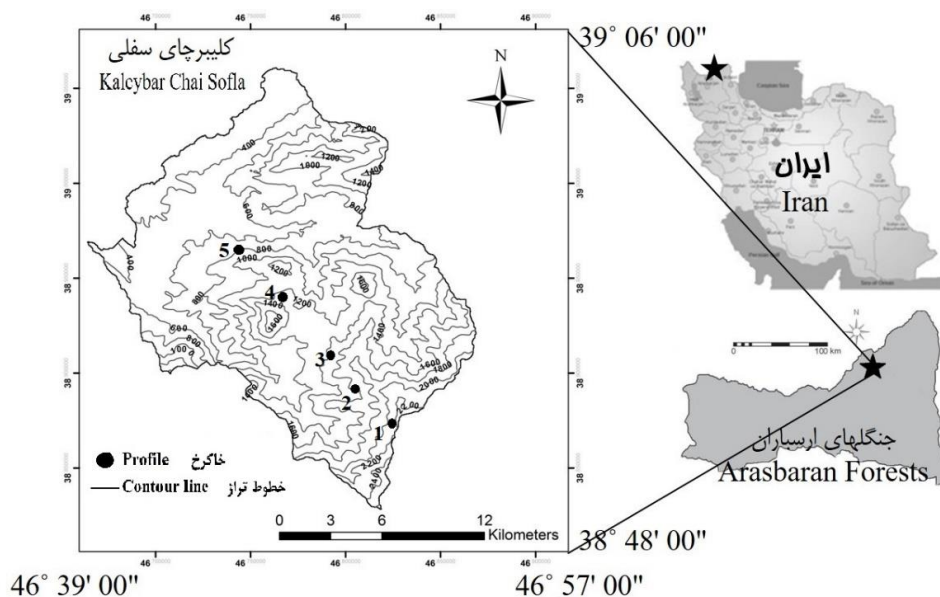
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و مطالعات صحرایی

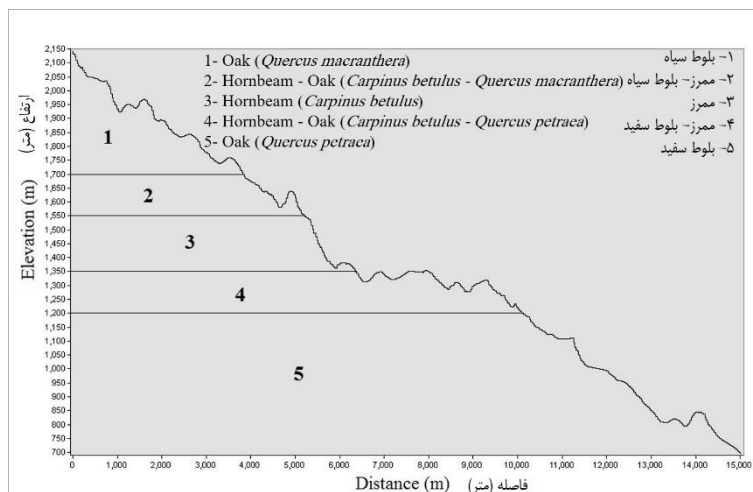
جنگل‌های ارسباران در شمال غرب ایران با دارا بودن گونه‌های گیاهی منحصربه‌فرد و شرایط اکولوژیک خاص و بکر به‌عنوان یکی از ذخیره‌گاه‌های زیست‌کره جهان شناخته شده (۵۹)، که این امر موجب انجام مطالعه حاضر در زیر حوضه کلیبرچای سفلی از جنگل‌های ارسباران شد (شکل ۱). تکامل زمین‌شناسی منطقه طی دوران سوم صورت گرفته و شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین-رسوبی می‌باشد (۱۷). اقلیم منطقه با دارا بودن متوسط بارش و دمای سالیانه به ترتیب ۴۰۷/۱۳ میلی‌متر و ۱۲/۵۴ درجه سانتی‌گراد، نیم‌مرطوب معتدل بوده و رژیم رطوبتی و حرارتی خاک منطقه نیز به‌ترتیب زریک و مزیک است (۳ و ۳۰). درختان بلوط، ممرز، افرا، گردو، زغال‌اخته، سیاه‌تلو و انار گونه‌های چوبی معمول منطقه هستند که تحت تیپ‌ها و توده‌های اصلی درختان بلوط و ممرز طبق پراکنش ارتفاعی خاص حضور دارند.

کنترل توزیع مکانی پوشش گیاهی در تحولات ماده آلی در اکوسیستم‌های طبیعی دارد (۲۱). براساس مطالب فوق و تحقیقات پیشین در مورد تشکیل خاک، شرایط محیطی مختلف (فاکتورهای خاک‌سازی) منجر به تشکیل انواع خاک‌ها با محتوای مختلفی از ماده آلی می‌شوند؛ بنابراین چنین به‌نظر می‌رسد که مطالعه بخش آلی در انواع خاک‌ها به‌عنوان نتیجه عمل شرایط محیطی ارتباط بین خصوصیات ماده آلی خاک با شرایط محیط را نیز نشان خواهد داد.

میکرومرفولوژی به‌عنوان یکی از شاخه‌های علوم خاک مکمل مطالعات پیدایش، طبقه‌بندی و مدیریت خاک (۴۸ و ۵۶) می‌تواند جهت ارزیابی بهتر وضعیت ماده آلی خاک در کنار مطالعات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به‌کار رود که اولین گام‌ها در این خصوص در دهه ۱۹۷۰ میلادی برداشته شد (۱ و ۲). بررسی میکرومرفولوژیکی ماده آلی خاک تأثیر شرایط و فاکتورهای محیطی بر تکامل خاک را که در فرآیندهای خاک‌سازی اخیر روی داده نشان می‌دهد (۳۶). این روش با قابلیت‌های خود این امکان را می‌دهد که تمامی شکل‌های قابل رؤیت ماده آلی در خاک در هر مرحله‌ای از پیدایش و تغییر شکل مورد بررسی قرار گیرد (۴۱). هرچند تاکنون تحقیقات محدود میکرومرفولوژیک مستقیم و محض در خصوص تحولات ماده آلی خاک با استفاده از این روش صورت گرفته اما بررسی منابع بیان می‌کند که نمودهای مرتبط به ماده آلی یکی از اصلی‌ترین شاخص‌ها برای تشریح و تفسیر صور مختلف در بررسی میکرومرفولوژیک خاک هستند (۴، ۳۴، ۴۷ و ۶۷). لذا با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد مطالعات میکرومرفولوژیک و توجه کم به آن جهت بررسی ماده آلی خاک، این روش بایستی برای روشن شدن جنبه‌های جدیدی از



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Geographic position of study area



شکل ۲- الگوی جداسازی بخش‌های محیطی براساس پراکنش تیپ‌های جنگلی در امتداد نیمرخ ارتفاعی منطقه مورد مطالعه
Figure 2- Separation pattern of environmental parts based on forest types along altitudinal profile in study area

رابطه ۱

میزان ترسیب کربن آلی خاک (Ton ha^{-1}) = کربن آلی خاک (%)
 $\times$ جرم مخصوص ظاهری (g cm^{-3}) $\times$ عمق خاک (m) $\times 100$
 به منظور تکمیل بررسی‌ها از آنجایی که خاک سطحی دارای حداکثر مقدار ماده آلی با انواع شکل‌ها بوده و نیز متأثرترین لایه خاک از شرایط محیطی است، تجزیه واریانس ماده آلی خاک سطحی نیز براساس طرح کاملاً تصادفی طی ۵ تکرار در شرایط مختلف محیطی با استفاده از نرم‌افزار Spss نسخه ۱۸ انجام و مقایسه میانگین‌ها با روش دانکن صورت گرفت.

از آنجایی که تشریح اجزای آلی در برش‌های نازک خاک اثر شرایط اکولوژیک محیط بر روی تجزیه بقایای آلی و تحولات ماده آلی خاک را نشان می‌دهد (۱۲ و ۵۷)، بررسی کیفی وضعیت ماده آلی خاک با استفاده از مطالعات میکرومرفولوژیک انجام شد که بدین منظور جهت تهیه برش‌های نازک، نمونه‌های خاک دست‌نخورده تهیه شده توسط جعبه‌های کوبیانا پس از هوا خشک شدن، تلقیح، سفت و سابیده شدند (۴۲). برش‌های نازک تهیه شده تحت دو نور پلاریزه ساده و متقاطع با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان بر اساس نظام واژگان استاندارد (۱۲، ۵۶ و ۵۷) تشریح و مطالعه شدند.

نتایج و بحث

خصوصیات کلی و طبقه‌بندی خاک‌های مطالعه شده

نتایج حاصل از بررسی کلی خصوصیات خاک‌های شاهد مطالعه شده در پنج بخش محیطی نشان داد که افق‌های سطحی دارای رنگ تیره بوده و با افزایش عمق از تیرگی آن‌ها کاسته می‌شود. ساختمان غالب در افق‌های سطحی‌تر از نوع کروی است که در افق‌های زیرین به مکعبی و در پایین‌ترین افق به حالت فاقد ساختمان تبدیل می‌شود.

پس از عملیات جنگل گردشی اولیه و برآورد شرایط محیطی، منطقه براساس تیپ و توده‌های جنگلی که دارای توزیع ارتفاعی بودند به پنج بخش محیطی تقسیم و مطالعه در امتداد یک نیمرخ ارتفاعی صورت گرفت (شکل ۲). به منظور نمونه‌برداری، خاک‌های شاهد در هر بخش براساس روش استاندارد حفر و تشریح شده و نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده از هر افق خاک جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و میکرومرفولوژیکی تهیه شدند (۵۰). شایان ذکر است تفسیر نتایج براساس شماره‌های پنج‌گانه بخش‌های محیطی یا شماره خاک‌های شاهد معادل آن صورت گرفت.

مطالعات آزمایشگاهی و تفسیر داده‌ها

در این مرحله پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، توزیع اندازه ذرات و بافت به روش هیدرومتر، جرم مخصوص ظاهری با استفاده از استوانه‌های فلزی، شوری و اسیدیته با کاربرد Ec سنج و pH متر، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور و ماده آلی خاک‌ها به روش تر سوزانی اندازه گیری شدند (۵۳).

شناسایی و رده‌بندی خاک‌های مطالعه شده با استفاده از نتایج مطالعات مرفولوژیکی و تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها براساس کلید رده‌بندی خاک آمریکایی (۵۴) تا سطح خانواده صورت گرفت.

میزان ترسیب کربن آلی خاک با استفاده از نتایج تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی طبق روش اوریندلک و والی (۲۲) برای هر افق با استفاده از رابطه ۱ تعیین و سپس میانگین وزنی آن براساس ضخامت افق‌ها جهت تعیین میزان ترسیب کربن آلی هر خاک‌ها در بخش‌های مختلف محیطی به کار رفت.

با آرچلیک در خاکرخ ۴ تکامل نسبی این خاکرخ نسبت به خاکرخ ۳ را نشان می‌دهد. شناسایی مالی‌سول‌ها در پایین‌ترین بخش از منطقه مورد مطالعه به‌واسطه رؤیت شواهد افق مشخصه‌های مالیک و آرچلیک در خاکرخ ۵ (بلوط سفید) بیان می‌کند که در کنار فرآیندهای خاک‌سازی روی داده در بخش‌های مرتفع‌تر، تحولات ماده آلی از طریق فرآیندهایی همچون تجمع بقایای آلی، هوموسی شدن و ملانیزه شدن از اصلی‌ترین فرآیندهای دخیل در توسعه و تکامل بیشتر این خاک‌ها نسبت به سایر نواحی هستند (۱۳ و ۵۴).

بررسی وضعیت ماده آلی در خاک‌های مطالعه شده

بررسی هدف اصلی مطالعه که تحلیل وضعیت ماده آلی خاک‌های جنگلی با شرایط محیطی متفاوت بود، روندی مشابه با تنوع خاک‌ها در شرایط مختلف برای ماده آلی خاک نشان داد. به دلیل اهمیت تأثیرپذیری مقدار ماده آلی خاک سطحی از شرایط محیطی، تجزیه واریانس آن در خاک سطحی بخش‌های مختلف انجام و نتایج همچون یافته‌های فلاحتکار و همکاران (۲۳) نشان‌گر مقادیر متفاوت معنی‌داری از ماده آلی در بخش‌های مختلف به دلیل تأثیرپذیری از شرایط محیطی بود (جدول ۲). حداکثر مقدار متوسط ماده آلی در بخش ۲ دیده شد که تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد با سایر بخش‌ها داشت. هر چند بخش‌های ۱ و ۳ دارای مقادیر متفاوتی از ماده آلی در خاک سطحی بودند اما تجزیه‌های آماری اختلاف معنی‌داری در مقایسه این دو بخش در سطح احتمال یک درصد نشان نداد. مشابه همین وضعیت برای خاک سطحی بخش‌های ۴ با ۵ نیز وجود داشت اما مقایسات آماری حکایت از معنی‌دار بودن اختلاف آماری بین بخش‌های ۱ و ۳ با ۴ و ۵ داشت (شکل ۳).

در مطالعات صحرایی مشاهده شد که به دلایل اکولوژیکی رشد درختان با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد و از آنجایی که پوشش گیاهی منبع اصلی ماده آلی خاک است انتظار بر این بود که ماده آلی در بخش‌های فوقانی کاهش یابد (۱۰، ۱۶ و ۲۷)، اما نتایج همچون مطالعات هانس‌والد و ویتاکر (۲۹)، ویلکه و همکاران (۶۶) و لاهوتی و همکاران (۳۷) وضعیت معکوسی را نشان داد.

خاک‌های مطالعه شده دارای اسیدیته خنثی و وضعیت غیر شور می‌باشند. با کاهش ارتفاع ذرات اولیه خاک ریزتر شده و بافت آن سنگین‌تر شده است. هرچند مقادیر متفاوتی از آهک در تمام خاکرخ‌ها دیده می‌شود اما خاکرخ‌های بخش‌های کم ارتفاع دارای حداکثر مقدار آن می‌باشند. حضور حجم بالای بقایای گیاهی در اکوسیستم جنگلی موجب شده تا خاک‌های منطقه دارای مقادیر بالای کربن آلی باشند. حداکثر مقدار کربن آلی در افق‌های سطحی خاکرخ‌ها است که با افزایش عمق از مقدار آن کاسته می‌شود اما به دلیل توانایی‌های متفاوت انواع خاک‌های مطالعه شده در نگهداری و تجزیه مواد آلی، شیب تغییرات عمقی آن در بخش‌های مختلف متفاوت است. جرم مخصوص ظاهری و ظرفیت تبادل کاتیونی خصوصیتی از خاک هستند که عمدتاً تحت تأثیر بافت و ماده آلی می‌باشند لذا تغییرات و توزیع مقدار آن‌ها در هر خاکرخ متأثر از دو فاکتور یاد شده است و به دلیل پیچیدگی‌های ارتباط بین فاکتورهای مذکور نمی‌توان روند خاصی را برای تغییرات این دو ویژگی از خاک بیان نمود.

جمع‌بندی مطالعات ژنتیکی خاک، در انطباق با اصل ینی (۳۲) مبنی بر تأثیرپذیری خصوصیات و تکامل خاک از شرایط محیطی، نشان داد که خاک‌های متفاوتی در بخش‌های مختلف منطقه حضور دارند که براساس شواهد ناشی از روی دادن انواع فرآیندهای خاک‌سازی، توپوگرافی و پوشش گیاهی را می‌توان به‌عنوان مهم‌ترین فاکتورهای محیطی دخیل در این امر دانست (جدول ۱).

براساس یافته‌های تحقیق، خاک‌های جوان در ارتفاعات حضور دارند و با کاهش ارتفاع، تکامل خاک‌ها افزایش می‌یابد. علت چنین وضعیتی امکان روی دادن انواع فرآیندهای خاک‌سازی در شرایط مختلف محیطی است. عدم مشاهده افق مشخصه خاص در خاکرخ ۱ (بلوط سیاه) و تنها افق مشخصه کمبیک در خاکرخ ۲ (ممرز-بلوط سیاه)، روی دادن فرآیندهای خاک‌سازی ساده‌ای همچون هوازدگی، تشکیل ساختمان و تجمع بقایای آلی در بخش‌های ۱ و ۲ را تأیید می‌کنند که منجر به تشکیل انتی‌سول و اینسپتی‌سول به‌ترتیب در بخش‌های مذکور شده‌اند. مشاهده شواهد انتقال رس و پوشش‌های ناشی از آن در خاکرخ‌های ۳ (ممرز) و ۴ (ممرز-بلوط سفید) و به‌تبع آن شناسایی افق مشخصه آرچلیک حکایت از تشکیل آلفی‌سول‌ها در بخش‌های ۳ و ۴ دارد. همچنین مشاهده افق مشخصه کلسیک همراه

جدول ۱- رده‌بندی خاک‌های بخش‌های محیطی مطالعه شده

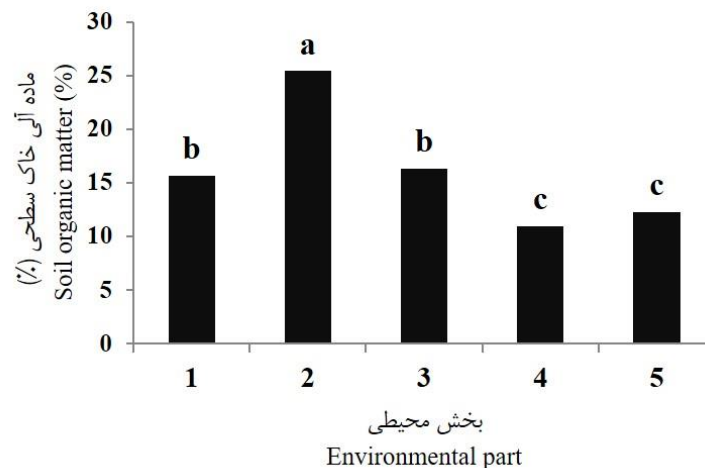
Table 1- Soils classification of studied environmental parts

بخش محیطی	خاکرخ شاهد	خانواده خاک (سیستم آمریکایی ۲۰۱۴)
Environmental parts	Control Profile	Soil family (S.T. 2014)
1	1	Loamy, mixed, superactive, nonacid, mesic Lithic Xerorthents.
2	2	Fine loamy, mixed, superactive, mesic Typic Haploxerepts.
3	3	Fine, mixed, active, mesic Typic Haploxeralfs.
4	4	Fine, mixed, active, mesic Calcic Haploxeralfs.
5	5	Fine, mixed, active, mesic Typic Argixerolls.

جدول ۲- تجزیه واریانس ماده آلی خاک سطحی در بخش‌های محیطی مختلف

Table 2- Variance analyses of surface soil organic matter in different environmental parts

منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آزمون F	معنی‌داری
	df	Sum of squares	Mean square	F	Sig.
بخش محیطی	4	640.97	160.24	221.2	*0.000
خطا	20	14.48	0.72		
Error					

* معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد ($p < 0.01$).

شکل ۳- مقایسه میانگین مقدار ماده آلی خاک سطحی در بخش‌های محیطی به روش دانکن در سطح احتمال ۱٪

Figure 3- Mean comparison of surface soil organic matter (%) in environmental parts (By Duncan's Multiple Range Test, $p < 0.01$)

جدول ۳- میزان ترسیب کربن آلی خاک در بخش‌های محیطی

Table 3- Soil organic carbon stocks in environmental parts

بخش محیطی	1	2	3	4	5
Environmental parts					
میزان ترسیب کربن آلی خاک (تن بر هکتار)	64.33	89.24	101	101.3	274.8
Soil organic carbon stocks ($t \cdot ha^{-1}$)					

این وضعیت در مقایسه با خاک‌های تشکیل شده در بخش‌های مختلف منطقه اشاره دارد به ارتباط مقدار ترسیب کربن آلی خاک با نوع خاک به‌عنوان یکی از برآیندهای شرایط محیطی که در تحقیقات پیشین نیز بدان اشاره شده است (۱۹، ۲۸، ۶۲ و ۶۵). با توجه به افزایش مقدار ترسیب کربن آلی خاک از انتی‌سول، اینسپتی‌سول و آلفی‌سول به مال‌سول در منطقه می‌توان نتیجه گرفت که تکامل خاک، به‌ویژه تکامل‌های ناشی از فرآیندهای خاک‌سازی مرتبط با ماده آلی، منجر به افزایش مقدار ترسیب کربن آلی خاک می‌گردد چرا که در خاک‌های متکامل، تمامی افق‌های موجود محتوای ماده آلی زیادی دارند درحالی‌که در خاک‌های نابالغ تنها تجمعی از بقایای آلی عموماً در افق‌های سطحی روی داده است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت و تحولات ماده آلی خاک در کنار مقدار آن برای

که علت را می‌توان در اثرگذاری شرایط محیطی به‌خصوص هر بخش بر روی تحولات ماده آلی خاک همچون کاسته شدن از سرعت فرآیندهای شیمیایی و کند شدن تجزیه میکروبی در نواحی مرتفع به دلیل سرد و مرطوب شدن ریزاقليم دانست. با توجه به اهمیت خاک و پوشش گیاهی در محتوای ماده آلی خاک، نوع و وضعیت آن‌ها، سرعت ورود و کیفیت ماده آلی خاک را کنترل می‌کنند (۳۱ و ۵۲)، لذا حضور انواع خاک‌ها و تیپ‌های جنگلی با شرایط ویژه در بخش‌های مختلف مقادیر متفاوت ماده آلی در منطقه را توجیه می‌کنند.

بررسی میزان ترسیب کربن آلی خاک در منطقه نشان داد که بخش‌های مختلف دارای مقادیر متفاوتی از آن بوده به‌نحوی که روند افزایشی مقدار ترسیب کربن آلی خاک با کاهش ارتفاع در امتداد نیمرخ ارتفاعی منطقه دیده می‌شود (جدول ۳).

بررسی مقدار ترسیب کربن آلی خاک بایستی مدنظر قرار گیرد. از این رو چنین به نظر می‌رسد که بین نوع خاک و میزان ترسیب کربن آلی آن و نیز بین ماده آلی خاک و تکامل خاک همبستگی بالایی وجود دارد (۵ و ۶) به طوری که خاک‌های تکامل یافته نسبت به تکامل نیافته توانایی بالایی در حفظ ماده آلی دارند (۱۴). بر این اساس ویدوجویچ و همکاران (۶۲) میزان ترسیب کربن آلی خاک را با توجه به نقشه خاک‌های صربستان تهیه و نظریات فوق را تأیید نمودند.

اگرچه نوع خاک و فرایندهای تشکیل آن پیش‌تر به عنوان نتیجه و برآیند شرایط محیطی توجیه کننده مقادیر متفاوت ترسیب کربن آلی خاک در بخش‌های مختلف بود، اما نباید نقش پوشش گیاهی، که یکی از اجزای محیط است، به عنوان منبع ماده آلی خاک را فراموش کرد. بقایای پوشش گیاهی با مقادیر، منبع، نوع و درجه هوادیدگی متفاوت پیامدهای مختلفی بر نوع، شکل، مقدار تجمعات و درجه تجزیه بقایای آلی در خاک دارد (۱۲، ۴۵ و ۴۷)؛ بنابراین در نتیجه‌ای مشابه با دیجوکیک و همکاران (۲۰) و گرونبورگ و همکاران (۲۸) سرنوشت متفاوتی از بقایای آلی در انواع شرایط محیطی متشکل از منشأ (نوع تیپ جنگلی) و خاک محل تحولات، دیده می‌شود.

مطالعه برش‌های نازک خاک تهیه شده از بخش‌های مختلف به موازات نتایج حاصل از بررسی‌های صحرایی و تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، خواص میکرومرفولوژیکی متفاوتی برای خاک‌های توسعه یافته در نواحی مختلف نشان داد. از آنجایی که اکثر خصوصیات میکرومرفولوژیکی تحت تأثیر ماده آلی خاک قرار می‌گیرند و بررسی ماده آلی خاک هدف اصلی این مطالعه بود، ترکیبات آلی به دقت تحت مطالعه میکروسکوپی قرار گرفتند. مشاهدات بیان کردند که شکل‌های مختلفی از بقایای آلی در هر بخش بسته به شرایط محیطی غالب هستند.

در مطالعه برش‌های نازک خاک تمامی بخش‌های محیطی، بقایای سالم اندام‌های گیاهی از قبیل برگ، ریشه، ساقه، پوست و غیره مشاهده شدند به نحوی که نسبت آن‌ها به انواع تجزیه شده با افزایش عمق در هر بخش کاهش می‌یافت (شکل ۴- الف، ب، پ، ت، ث، ج). رؤیت این نموده‌های سالم از بقایای آلی دلالت بر تخریب فیزیکی و مکانیکی بقایای آلی دارد که منجر به تجمع مقدار زیادی از آن‌ها تحت عنوان قطعات آلی و شکل‌های فیبری شده است (۲۵ و ۳۹). مقایسه نسبی میزان نوع سالم بقایای آلی با تجزیه شده در بخش‌های مختلف نشان داد که بخش‌های ۱ و ۲ دارای بقایای دست‌نخورده و سالم بیشتری نسبت به سایر بخش‌ها بوده و نموده‌های بارز میکرومرفولوژیک چندان که حاصل تحولات بقایای آلی باشد علی‌رغم مقدار بالای ماده آلی در این بخش‌ها دیده نمی‌شود. بر این اساس نتیجه می‌شود که به موازات محدودیت‌های تکامل خاک، تخریب مکانیکی فرآیند غالب تجزیه در بخش‌های مرتفع بوده و قطعات آلی فرم غالب ماده آلی خاک در این بخش‌ها هستند. چنین به نظر می‌رسد که شرایط اقلیمی سخت و توسعه یافتگی کم خاک در بخش‌های مرتفع (۱ و ۲) محدودکننده‌ترین فاکتورها در تجزیه بقایای

آلی در این بخش‌ها می‌باشند. مشاهده الگوی پراکنش ارتباطی پورفیریک همراه با درجه هوادیدگی کم قطعات سنگی در برش‌های نازک خاک مربوط به این بخش‌ها، ضمن تأیید عدم مخلوط شدن مناسب قطعات آلی با بخش معدنی خاک در مقایسه با شکل‌های فاسد شده بقایای آلی، تأیید کننده شرایط محیطی نامناسب برای تحولات بخش آلی خاک است (۴۴). از سویی مشاهده نموده‌های مرتبط با فضولات جانوری^۱ و فرایندهای شیمیایی هر چند به مقدار جزئی در برش‌های نازک خاک بخش ۲ حکایت از بهبود نسبی شرایط تحول ماده آلی بخش ۲ نسبت به ۱، هر چند به مقدار جزئی، همچون تکامل خاک دارد؛ بنابراین با توجه به شرایط موجود در بخش‌های ۱ و ۲ انتظار بر این است که مقدار ماده آلی خاک در بخش ۲ نسبت به ۱ در نتیجه تجزیه و تحولات بیشتر بقایای آلی کمتر باشد، لیکن نتایج تجزیه‌های شیمیایی و مقایسه آماری مقدار ماده آلی بخش‌های مختلف که پیش‌تر بحث شد در تناقض با این امر است. این شرایط استثنا می‌تواند توسط اثر نوع تیپ جنگل بر تکامل و تحول ماده آلی خاک تفسیر شود. هر چند چنین به نظر می‌رسد در بخش ۲ شرایط محیطی برای تجزیه بقایای آلی نسبت به بخش ۱ قدری مناسب‌تر است اما تیپ جنگلی آمیخته با تراکم و تنوع بیشتر منجر به ریزش مقدار زیاد بقایای آلی با منشأ متفاوت شده که نیاز به تنوع زیادی از فرایندهای شیمیایی و فعالیت‌های بیولوژیکی تجزیه‌گر در مقایسه با تیپ خالص بخش ۱ دارد که این شرایط در این بخش مهیا نیست (۱۸، ۴۹، ۵۱ و ۶۴). مشاهده بقایای آلی با درجه تجزیه متوسط در شکل‌های مختلف بیان می‌کند که در بخش‌های محیطی مربوط به این نموده‌ها در کنار تخریب مکانیکی فرایندهای تجزیه شیمیایی و بیولوژیکی نیز روی داده است (شکل ۴- چ، ح، خ، د، ذ). جهش بزرگ در تغییر میزان بقایای آلی از سالم به متوسط تجزیه شده در مشاهدات میکروسکوپی بخش ۳ دلالت بر شروع جدی تجزیه بیوشیمیایی بقایای آلی از این بخش دارد که شواهد پوشش‌های آلی ناشی از تجزیه ریشه‌های مرده و نیز بقایای جانوران خاکزی در کانال‌ها مؤید این امر می‌باشند (۷ و ۹). مشاهده الگوی پراکنش ارتباطی انولیک و چیتونیک در برش‌های نازک خاک بخش ۳ نیز بیان‌گر وجود شرایط مساعد برای تجزیه بقایای آلی و روی دادن انواع فرایندهای تجزیه می‌باشد (۵۵). به طور کلی مشاهده همه شکل‌های بقایای آلی با فراوانی نسبتاً یکسان در بخش ۳ بیان‌گر سرعت متوسط تجزیه بقایای آلی در آن است.

فرم غالب ترکیبات آلی در بخش‌های کم ارتفاع (۴ و ۵) انواع مختلفی از بقایای خوب تجزیه شده از قبیل بقایای آلی ریز بی‌شکل^۲، منقوطة‌ها و رنگدانه آلی است که مقادیر و شکل‌های متفاوتی با بخش‌های محیطی مرتفع نشان می‌دهد (شکل ۴- ر، ز). هر چند

1- Excrement pedofeatures

2- Amorphous organic fine material

آلی اتفاق می‌افتد و نمودهای فضولات جانوری^۱ مرتبط‌ترین مورد به حضور آن‌ها می‌باشند که شکل‌های تازه و تجزیه شده این نمودها با مقادیر متفاوت در برش‌های نازک خاک بخش‌های محیطی مختلف به‌واسطه حضور بقایای آلی دیده می‌شود (شکل ۴- ژ، س، ش). این نمودها خود می‌توانند در تشریح وضعیت ماده آلی خاک در شرایط محیطی مختلف به کار روند که در مواردی در بحث‌های پیش‌تر مورد استفاده قرار گرفتند، لیکن در بررسی کلی آن‌ها مشخص شد که مقدارشان در تمامی خاک‌رخ‌ها با افزایش عمق کاهش می‌یابند. همچنین مقایسه بخش‌های محیطی مختلف در این خصوص بیان‌گر روند افزایشی نمودهای فضولات جانوری از بخش‌های مرتفع به نواحی کم ارتفاع است و این تغییرات در تطابق با تغییرات نسبت بین انواع سالم و کهنه بقایای آلی در بخش‌های مختلف است و اشاره به نقش جانداران خاک‌زی در تجزیه بقایای آلی طی فرآیندهای بیولوژیکی دارد.

نتیجه‌گیری

در محدوده و مقیاس مورد مطالعه، ارتفاع به‌عنوان یکی از عوامل اصلی کنترل‌کننده شرایط محیطی با اثر بر ریزاقلیم ناشی از توپوگرافی و پیامدهای آن بر توزیع تیپ‌های جنگلی، فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک موجبات به وجود آمدن بخش‌های محیطی متنوعی را فراهم نموده که در آن‌ها بقایای آلی سرنوشت متفاوتی دارند.

بهبود شرایط محیطی با کاهش ارتفاع، به‌دلیل افزایش تنوع و سرعت فرآیندهای خاک‌سازی، منجر به توسعه و تکامل خاک و به موازات آن تحولات بیشتر ماده آلی خاک شده است. مقدار ماده آلی خاک، توان ترسیب کربن آلی آن و شکل‌های بقایای آلی متنوع در شرایط محیطی مختلف بیان‌گر تأثیر شرایط محیطی بر توزیع بخش آلی خاک است که در این بین با توجه به هم‌خوانی تنوع خاک با وضعیت ماده آلی آن در بخش‌های مختلف، نوع خاک به‌عنوان برآیند اثر فاکتورهای محیطی می‌تواند یک راهنمای مناسب برای تحلیل وضعیت بخش آلی خاک‌های نواحی مختلف باشد؛ بنابراین توصیه بر استفاده از نقشه خاک برای مدیریت ماده آلی خاک در نواحی مشابه است که نقشه ماده آلی آن تهیه نشده است.

بخش‌های ۳ و ۴ دارای رده خاک یکسانی هستند اما شرایط ماده آلی در این دو بخش متفاوت است. با وجود تیپ جنگلی آمیخته متراکم در بخش ۴، از غیبت افق O و حضور افق A در سطح خاک، چنین استنباط می‌شود که سرعت تجزیه بقایای آلی در این بخش بیش از بخش‌های مرتفع‌تر است. مطالعه برش‌های نازک خاک بخش ۴ کاهش نمودهای خاک‌ساختی مرتبط با آبشویی و تجمع رس را به عنوان فرآیند اصلی خاک‌ساز این بخش نشان داد، درحالی‌که نمودهای خاک‌ساختی مرتبط با بخش آلی در آن افزایش یافته‌اند. این شواهد نشان از روی دادن فرآیندهای هوموسی شدن، ملانیزه شدن و معدنی شدن با شدت مناسب به‌واسطه شرایط بهینه محیطی برای روی دادن انواع فرآیندهای تجزیه بقایای آلی در کنار فرآیندهای روی داده در بخش‌های مرتفع دارد؛ بنابراین نتیجه می‌شود در این بخش سرعت تجزیه بقایای آلی بیش از میزان ورودی آن است. به‌علاوه شناسایی شکل‌های تجزیه شده بقایای آلی همچون مواد ریز بی‌شکل، پوشش‌های آلی و ساپریک همراه با حالت‌های انولیک و چیتونیک به عنوان الگوی پراکنش ارتباطی غالب و حفراتی به‌شکل غالب کانال، وگ و منافذ بسته شرایط بهینه تجزیه بقایای آلی در این بخش نسبت به بخش‌های مرتفع‌تر را تأیید می‌کنند (۲۵ و ۵۵). همچنین مشاهدات میکروسکوپی نمودهای فضولات جانوری سالم و کهنه بیشتر در بخش ۴ نسبت به بخش‌های مرتفع‌تر بیان‌گر شرایط محیطی مناسب از قبیل رطوبت، دما و منبع غذایی برای زیست توده میکروبی و فعالیت جانداران خاک‌زی است که منجر به بالا رفتن شدت فرآیندهای بیولوژیک مرتبط با تحولات ماده آلی و مشاهده شکل‌های کاملاً تجزیه شده بقایای آلی در این بخش شده است (۱۱، ۱۵ و ۳۵).

تشریح برش‌های نازک خاک پایین‌ترین بخش منطقه غالبیت خصوصیات میکرومرفولوژیک خاک‌های مالی‌سول از جمله ریزساختار خوب توسعه یافته، بی‌فابریک تفکیک نشده و الگوی پراکنش ارتباطی انولیک و چیتونیک را نشان می‌دهد که همه شواهد مذکور حاصل حضور مواد آلی خوب تجزیه شده و آمیخته شدن آن‌ها با مواد خاک معدنی است (۱۶). مقایسه میزان و کیفیت شواهد بقایای آلی در بخش‌های ۴ و ۵، علی‌رغم وجود فرآیندهای مشترک تجزیه بقایای آلی در این بخش‌ها، شدت بالای آن‌ها در بخش ۵ را نشان می‌دهد. همچنین مقدار بالا و کیفیت تازه نمودهای فضولات جانوری علاوه بر اشاره به جمعیت بالای ارگانسیم‌های خاک در این بخش، نشان از تنوع بالای آنها دارد که این امر خود در تجزیه و تحول بقایای آلی نقش مثبت دارد؛ بنابراین با توجه به موارد ذکر شده بهترین شرایط محیطی برای حداکثر سرعت تجزیه و تحولات بقایای آلی در بخش ۵ در کل منطقه دیده می‌شود.

جانداران خاک‌زی عموماً در جاهایی حضور می‌یابند که تجمع مواد



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی از ماده آلی در بخش‌های محیطی مختلف: الف- بقایای آلی سالم پوست (افق A خاکرخ ۱، نور PPL)، ب- بقایای دست‌نخورده از هیف‌های قارچی (افق Bw1 خاکرخ ۲، نور PPL)، پ- بقایای آلی سالم بافت برگ (افق A خاکرخ ۲، نور PPL)، ت- بقایای آلی سالم ساقه (افق A1 خاکرخ ۳، نور PPL)، ث- بقایای آلی سالم سوزنچه‌ها (افق A1 خاکرخ ۴، نور XPL)، ج- بقایای آلی سالم ریشه (افق Bt2 خاکرخ ۵، نور PPL) چ- بقایای آلی متوسط تجزیه شده همراه با نمودهای فضولات جانوری (افق A خاکرخ ۲، نور PPL) ح- مقطع عرضی هوادیده بخش درونی قطعه آلی (افق A1 خاکرخ ۳، نور PPL)، خ- بقایای متوسط تجزیه شده برگ‌ها (افق A1 خاکرخ ۴، نور PPL) د- بقایای متوسط تجزیه شده توسط ارگانیسم‌های خاکزی و نمودهای فضولات جانوری ناشی از آن‌ها (افق A2 خاکرخ ۳، نور PPL)، ذ- بافت متوسط تجزیه شده (افق A2 خاکرخ ۴، نور PPL)، ر- رنگدانه آلی (افق A2 خاکرخ ۴، نور PPL)، ز- ماده آلی خوب تجزیه شده (افق Bt1 خاکرخ ۵، نور PPL)، ژ- نمودهای فضولات جانوری (افق A خاکرخ ۳، نور PPL)، س- نمودهای فضولات جانوری (افق A2 خاکرخ ۴، نور PPL)، ش- نمودهای فضولات جانوری تازه (افق A خاکرخ ۵، نور PPL)

Figure 4- Thin section micrographs of soil organic matter in different environmental parts; A- whole organ residues of bark (P1-A by PPL), B- intact mass of interlaced hypha (P2-Bw1 by PPL), C- intact tissue residues of leaves (P2-A by PPL), D- whole organ residues of stem (P3-A1 by PPL), E- whole organ residues of needles (P4-A1 by XPL), F- whole organ residues of root (P5-Bt2 by PPL), G- moderate decomposed residues with black excrement (P2-A by PPL) H- cross section of inner alteration of organ fragment (P3-A1 by PPL), I- moderate decomposed leaves (P4-A1 by PPL), J- moderate decomposed organ by organisms activity and their excrement (P3-A2 by PPL), K- moderate decomposed tissue (P4-A2 by PPL), L- black organic pigment (P4-A2 by PPL), M- well decomposed organic matter (P5-Bt1 by PPL), N- excrement pedofeature (P3-A by PPL), O- excrement pedofeature (P4-A2 by PPL), P- fresh excrement pedofeature (P5-A by PPL)

- 1- Babel U. 1975. Micromorphology in soil organic matter. p. 369-473. In J.E. Gieseking (ed.) *Soil Components*, 1: Organic Components. Springer, New York.
- 2- Bal L. 1973. Micromorphological Analysis of Soils: Lower Levels in the Organization of Organic Soil Materials. Soil survey paper, Soil Survey Institute, Wageningen.
- 3- Banaei M.H. 1998. Soil Moisture and Temperature Regime Map of Iran. Soil and Water Research Institute, Ministry of Agriculture, Iran. (In Persian)
- 4- Bardy M., Fritsch E., Derenne S., Allard T., do Nascimento N.R., and Bueno G.T. 2008. Micromorphology and spectroscopic characteristics of organic matter in waterlogged podzols of the upper Amazon basin. *Geoderma* 145(3-4): 222-230.
- 5- Batz N., Verrecchia E.P., and Lane S.N. 2015. Organic matter processing and soil evolution in a braided river system. *Catena* 126: 86-97.
- 6- Belic M., Manojlovic M., Nesic L., Cric V., Vasin J., Benka P., and Seremesic S. 2013. Pedo-ecological significance of soil organic carbon stock in south-eastern Pannonian basin. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 8(1): 171-178.
- 7- Binet F., and Curmi P. 1992. Structural effects of *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta: Lumbricidae) on the soil-organic matter system: Micromorphological observations and autoradiographs. *Soil Biology and Biochemistry* 24: 1519-1523.
- 8- Binkley D., and Fisher R.F. 2013. *Ecology and Management of Forest Soil*. John Wiley and Sons, New York.
- 9- Blazejewski G.A., Stolt M.H., Gold A.J., and Groffman P.M. 2005. Macro-and micromorphology of subsurface carbon in riparian zone soils. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1320-1329.
- 10- Bot A., and Benites J. 2005. The importance of soil organic matter (Key to drought-resistant soil and sustained food and production). FAO soils bulletin 80. Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome.
- 11- Brussaard L. 1994. Interrelationships between biological activities, soil properties and soil management. p. 309-329. In I. Szabolcs and D.J. Greenland, (ed.) *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. CABI, London, UK.
- 12- Bullock P., Fedoroff N., Jongerius A., Stoops G., and Tursina T. 1985. *Handbook for Thin Section Description*. Waine Research, England.
- 13- Buol S.W., Southard R.J., Graham R.C., and McDaniel P.A. 2011. *Soil Genesis and Classification*. Wiley, Oxford, UK.
- 14- Catoni M., D'Amico M.E., Zanini E., and Bonifacio E. 2016. Effect of pedogenic processes and formation factors on organic matter stabilization in alpine forest soils. *Geoderma* 263(1): 151-160.
- 15- Chernikov V.A. 2000. *Soil Biotic Complex as a Basis of Rangeland Ecosystems*. Koloc, Moscow.
- 16- Coomes D.A., and Allen R.B. 2007. Effects of size, competition and altitude on tree growth. *Journal of Ecology* 95: 1084-1097.
- 17- Darvishzadeh A. 1991. *Geology of Iran*. Amir Kabir, Tehran. (In Persian)
- 18- De Deyn G.B., Cornelissen J.H.C., and Bardgett R.D. 2008. Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. *Ecology Letters* 11: 516-531.
- 19- Dinca L.C., Sparchez Gh., Dinca M., and Blujdea V.N.B. 2012. Organic carbon concentrations and stocks in Romanian mineral forest soils. *Annals of Forest Research* 55(2): 229-241.
- 20- Djukic I., Zehetner, F., Tatzber, M., and Gerzabek M.H. 2010. Soil organic-matter stocks and characteristics along an Alpine elevation gradient. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173: 30-38.
- 21- Drewnik M. 2006. The effect of environmental conditions on the decomposition rate of cellulose in mountain soils. *Geoderma* 132: 116-130.
- 22- Evrendilek F., and Wali M.K. 2001. Modeling long-term C dynamics in croplands in the context of climate change: a case study from Ohio. *Environmental Modelling and Software* 16(4): 361-75.
- 23- Falahatkar S., Hosseini S.M., Ayoubi Sh., and Salman Mahiny A. 2013. The impact of primary terrain attributes and land cover/use on soil organic carbon density in a region of northern Iran. *Journal of Water and Soil* 27(5): 963-972. (In Persian with English abstract)
- 24- Fernandez-Romero M.L., Lozano-Garcia B., and Parras-Alcantara L. 2014. Topography and land-use change effects on the soil organic carbon stock of forest soils in Mediterranean natural areas. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 195(1): 1-9.
- 25- Fox C.A. 1985. Micromorphological characterization of Histosols. p. 85-104. In L.A. Douglas et al. (ed.) *Soil Micromorphology and Soil Classification*. SSSA, Madison, WI.
- 26- Gerasimova M., and Lebedeva-Verba M. 2010. Topsoils-Mollic, Takyric and Yermic Horizons. p. 351-368. In G. Stoops et al. (ed.) *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Elsevier's Science and Technology, Oxford, UK.
- 27- Grieve I.C., Proctor J., and Cousins S.A. 1990. Soil variation with altitude on Volcan Barva, Costa Rica. *Catena* 17: 525-534.

- 28- Gruneberg E., Ziche D., and Wellbrock N. 2014. Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany. *Global Change Biology* 20: 2644-2662.
- 29- Hanswalt R.B., and Whittaker R.H. 1976. Altitudinally coordinated patterns of soils and vegetation in the San Jacinto Mountains, California. *Soil Science* 121(2): 114- 124.
- 30- IRIMO. 2016. Country Climate Analysis. In: Islamic Republic of Iran Meteorological Organization, Tabriz center. Data sheet.
- 31- Jastrow J.D., and Miller R.M. 1997. Soil aggregate stabili-zation and carbon sequestration: Feedbacks through organomineral associations. p. 207-223. In R. Lal, et al. (ed) *Soil Processes and the Carbon Ccycle*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- 32- Jenny H. 2011. *Factors of Soil Formation-A System of Quantitative Pedology*. Dover, New York.
- 33- Jones A., Montanarella L., and Jones R. 2005. *Soil Atlas of Europe*. European Commission, Institute for Environment and Sustainability.
- 34- Kodesova R., Kodes V., Zigovam A., and Simunek J. 2006. Impact of plants roots and soil organisms on soil micromorphology and hydraulic properties. *Biologia* 19: 339-343.
- 35- Kooistra M.J., and Pulleman M.M. 2010. Features related to faunal activity. p. 397-417. In G. Stoops et al. (ed.) *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Elsevier's Science and Technology, Oxford, UK.
- 36- Kovda I., Morab C.I., and Wilding L.P. 2006. Stable isotope compositions of pedogenic carbonates and soil organic matter in a temperate climate Vertisol with gilgai, southern Russia. *Geoderma* 136(1-2): 423-435.
- 37- Lahooti P., Emadi S.M., Bahmanyar M.A., and Ghajar Sepanlou M. 2019. Soil organic carbon mapping by geostatistics and artificial neural network methods (Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province). *Journal of Water and Soil* 32(6): 1135-1148. (In Persian with English abstract)
- 38- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627.
- 39- Levesque M.P., and Diné H, 1982. Some morphological and chemical aspects of peats applied to the characterization of Histosols. *Soil Science* 133: 324-332.
- 40- Longbottom T.L., Townsend-Small A., Owena L.A., and Muraria M.K. 2014. Climatic and topographic controls on soil organic matter storage and dynamics in the Indian Himalaya: Potential carbon cycle-climate change feedbacks. *Catena* 119: 125-135.
- 41- Mourik J.V., and Blok S. 2008. Physical fraction and cryo-coube analysis of mormoder humus. p. 199-210. In S. Kapur, A. Mermut, and G. Stoops (eds). *New Trends in Soil Micromorphology*. Springer, Berlin.
- 42- Murphy C.P. 1986. *Thin Section Preparation of Soils and Sediments*. A and B Academic, Berkhamsted.
- 43- Nierop K.G.J., Lagen B.V., and Buurman P. 2001. Composition of plant tissues and soil organic matter in the first stages of a vegetation succession. *Geoderma* 100(1-2): 1-24.
- 44- Osman Kh.T. 2013. *Forest Soils: Properties and Management*. Springer Science and Business Media, Switzerland.
- 45- Quideau S.A., Chadwick O.A., Benesi A., Graham R.C., and Anderson M.A. 2001. Adirect link between forest vegetation type and soil organic matter composition. *Geoderma* 104(1-2) :41-60.
- 46- Rahimi Ashjerdi M.R., and Ayoubi Sh. 2013. Impacts of land-use change and slope positions on some soil properties and magnetic susceptibility in Ferydunshahr district, Isfahan province. *Journal of Water and Soil* 27(5): 882-895 (in Persian with English abstract).
- 47- Rezaei H., Jafarzadeh A.A., Aliasgharzad N., and Alipoor L. 2015. Soil quality investigation based on biological and micromorphological traits under different land uses. *Carpethian Journal of Earth and Environmental Sciences* 10(1): 241-254.
- 48- Ringrose-Voase A.J., and Humphreys G.S. 1994. *Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis*. Elsevier Science, New York.
- 49- Scheu S., Albers D., Alpei J., Buryr R., Klages U., Migge S., Platner C., and Salamon J.A. 2003. The soil fauna community in pure and mixed stands of beech and spruce of different age: trophic structure and structuring forces. *Oikos* 101(2): 225-238.
- 50- Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C., and Soil Survey Staff. 2012. *Field Book for Describing and Sampling Soils*. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- 51- Schua K., Wende S., Wagner S., and Feger K.H. 2015. Soil chemical and microbial properties in a mixed stand of spruce and birch in the Ore Mountains (Germany), A case study. *Forests* 6: 1949-1965.
- 52- Shang S., Jiang P., Chang S.X., Song Z., Liu J., and Sun L. 2014. Soil organic carbon in particle size and density fractionations under four forest vegetation-land use types in subtropical China. *Forests* 5: 1391-1408.
- 53- Soil and Water Research Institute. 2008. *Laboratory Analysis Instructions of Water and Soil Samples*. No. 467. Ministry of Agriculture, Iran. (In Persian)
- 54- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy (12th)*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- 55- Stolt M.H., and Lindbo D.L. 2010. Soil organic matter. p. 369-396. In G. Stoops et al. (ed.) *Interpretation of*

- Micromorphological Features of Soils and Regoliths. Elsevier's Science and Technology, Oxford, UK.
- 56- Stoops G. 2003. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolit Thin Section. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- 57- Stoops G., Marcelino V., and Mees F. 2010. Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. Elsevier's Science and Technology, Oxford, UK.
- 58- Sun W., Zhu H., and Guo Sh. 2015. Soil organic carbon as a function of land use and topography on the Loess Plateau of China. *Ecological Engineering* 83: 249-257.
- 59- UNESCO. 1977. Arasbaran wildlife refuge and protected area is recognized as part of the international network of biosphere reserves. Available at <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/ecological-sciences/biosphere-reserves/asia-and-the-pacific/islandic-republic-of-iran/arasbaran>. (Visited 15 March 2015).
- 60- United States Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS). 1996. Soil Quality Information Sheet, Soil Quality Indicators: Organic matter. Natural Resources Conservation Service.
- 61- United States Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS). 2006. Soils Fundamental Concepts. Natural Resources Conservation Service.
- 62- Vidojevic D., Manojlovic M., Dordevic A., Nesic L., and Dimic B. 2015. Organic carbon stocks in the soils of Serbia. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 10(4): 75-83.
- 63- Wagai R., Mayer L.M., Kitayama K., and Knicker H. 2008. Climate and parent material controls on organic matter storage in surface soils: A three-pool, density-separation approach. *Geoderma* 147: 23-33.
- 64- Wang Q.K., and Wang S.L. 2007. Soil organic matter under different forest types in Southern China. *Geoderma* 142: 349-356.
- 65- Wiesmeier M., Sporlein P., Geuss U., Hangen E., Haug S., Reischl A., Schilling B., Lutzow M., and Kogel-Knabner I. 2012. Soil organic carbon stocks in southeast Germany (Bavaria) as affected by land use, soil type and sampling depth. *Global Change Biology* 18: 2233-2245.
- 66- Wilcke W., Oelmann Y., Schmitt A., Valarezo C., Zech W., and Homeier J. 2008. Soil properties and tree growth along an altitudinal transect in Ecuadorian tropical montane forest. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171: 220-230.
- 67- Wilson C.A., Cloy J.M., Graham M.C., and Hamlet L.E. 2013. A microanalytical study of iron, aluminum and organic matter relationships in soils with contrasting hydrological regimes. *Geoderma* 202-203: 71-81.



Soil Organic Matter Condition in Forest Stands of Arasbaran

H. Rezaei^{1*} - A.A. Jafarzadeh² - A. Alijanpour³ - F. Shahbazi⁴ - Kh. Valizadeh Kamran⁵

Received: 10-06-2019

Accepted: 27-11-2019

Introduction: According to important ecological roles of soil organic matter in stabilizing ecosystems, it is essential to consider soil organic carbon condition for managements of worldwide problems such as soil quality, carbon cycle and climate change. Also, organic matter is one of the main component of soil which have vital impress on its evolution. Therefore, assessing soil organic matter fate in various environmental conditions and its relation with environmental factors will be useful for management decisions. Determining soil organic carbon content, stocks and forms by the physico-chemical and micromorphological studies may respond to the question about soil organic matter evolution from the different point of views. Based on mentioned reasons, our research work focused on soil organic matter content, stocks and forms under various environmental condition of the forest ecosystem to find new aspects of its relation with environmental factors.

Material and Methods: This research work was carried out in Arasbaran forest, northwest of Iran, which recognized as a part of the international network of biosphere reserves and has unique species of plants with special ecological properties. Sampling was carried out in a Kaleybar Chai Sofla sub-basin as a part of Arasbaran forest with eastern longitude of 46° 39' to 46° 52' and northern latitude of 38° 52' to 39° 04'. Based on the Amberje climate classification, the climate of the region is semi-humid and moderate. The soil moisture and temperature regimes are Xeric and Mesic, respectively. Hornbeam (*Carpinus betulus*) and Oak (*Quercus petraea* and *Quercus macranthera*) were identified as the main woody species in this area and volcano-sedimentary rocks were the geological structure. Primary site surveying showed 5 forest stand types such as Oak (*Quercus macranthera*), Hornbeam-Oak (*Carpinus betulus-Quercus macranthera*), Hornbeam (*Carpinus betulus*), Hornbeam-Oak (*Carpinus betulus-Quercus petraea*), Oak (*Quercus petraea*) along altitudinal transects, that used as environmental parts with different conditions. In each environmental part, a soil profile was described and sampling was done for physical, chemical and micromorphological analysis. After preparing soil samples in the laboratory, soil physico-chemical routine analyses were carried out by standard methods and then the studied soils were classified on the basis of 12th edition of soil taxonomy. To achieve the main aim of the study, various aspects of soil organic matter evolution were assessed. Soil organic matter content was determined according to the Walkley-Black wet oxidation method and using alteration factor $f = 1.724$ recommended by USDA. Variance analysis and means compare of soil organic matter content in surface horizons of different environmental parts were performed by using the SPSS software package and Duncan's multiple range test, respectively. Soil organic carbon stocks were calculated for each soil horizon and weighted average based on profile depth was used to calculate this index for each soil profile. The prepared thin section for micromorphological study was examined under both plane-polarized light (PPL) and cross-polarized light (XPL) using a polarized microscope and explained based on standard terminology to identify various forms of soil organic matter all over the study area.

Results and Discussion: Results revealed increasing of soil evolution with decreasing of elevation. *Entisols*, *Inceptisols*, *Alfisols* and *Mollisols* with different families were the soil observed along altitudinal transects by decreasing elevation. According to the obtained results, environmental effects caused different soil organic matter content and evolution with various soil organic carbon stocks in each part. Improvement of environmental condition by decreasing elevation resulted in more evolution of soil organic matter, dominant of decomposed forms of organic matter and rise of soil organic carbon stocks from the highest part to the lowest one. Soil

1, 2 and 4- Assistant Professor, Professor and Associate Professor, Soil Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: hosseinrezaei@tabrizu.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

5- Associate Professor, Remote Sensing and GIS Department, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.80633

organic matter content in soil surface increased by elevation, although the main source of soil organic matter have better condition in lower parts due to ecological reasons. This inverse statue can be explained by special environmental conditions causing limited organic remnants decomposition in the highest parts. In the same trend with soil evolution, soil organic carbon stocks increased by decreasing of elevation. This trend refers to the relation of mentioned index ability with various soil-forming processes. Micromorphological study showed that organic intact remnants were the dominant forms in upper parts which changed to well-decomposed forms in the lowest parts. This observation revealed the occurrence of mechanical decomposition processes of organic remnants in high elevation while biochemical ones happen in the lower parts. Also, this distribution of soil organic matter decomposition processes can explain soil organic carbon content and stocks all over the study area.

Conclusion: Elevation was identified as an important environmental factor controlling soil organic matter in the studied scale. Generally, results confirm the same trend for soil organic matter evolution and soil organic carbon stocks with soil development, especially in pedogenesis processes in relation to organic matter. Thus, it can be recommended to use soil map for management of soil organic matter under various environmental conditions in large-scale studies.

Keywords: Altitudinal transect, Arasbaran, Carbon stock, Organic remnants, Soil order



پیامد باکتری‌های باسیلوس در آزادسازی فسفر از پسماند جامد کارخانه روغن‌کشی در یک خاک آهکی

الهه هاشم‌پور^۱ - محمدباقر فرهنگي^{۲*} - نسرین قربان‌زاده^۳ - محمود فاضلی سنگانی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۹

چکیده

پسماندها دارای مواد آلی بالا و عناصر غذایی از جمله فسفر هستند. این پژوهش با هدف بررسی فسفر قابل دسترس خاک پس از افزودن پسماند جامد کارخانه روغن‌کشی به خاک انجام شد. باکتری باسیلوس بومی با توان انحلال فسفر جداسازی شد. خاک با سطوح مختلف پسماند (۲ و ۴ درصد) مخلوط شد و باکتری‌های باسیلوس بومی و باسیلوس پرسیکوس (10^6) یاخته در گرم مخلوط) به آنها مایه‌زنی شد. سطوح صفر پسماند و مایه‌زنی نشده با باکتری هم به عنوان تیمارهای شاهد در آزمایش گنجانده شد. خاک‌ها در دمای آزمایشگاه و رطوبت 0.7 FC به مدت ۶ ماه انکوباسیون شده و در زمان‌های صفر، ۲، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶، ۸۶، ۱۱۶، ۱۴۶ و ۱۷۶ روز از آنها نمونه‌برداری شد. ویژگی‌هایی مانند pH، کربن آلی (OC)، تنفس پایه میکروبی (BR)، فسفر قابل دسترس (P_{ava}) و فعالیت آنزیم فسفاتاز در خاک‌ها اندازه‌گیری شد. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل و در سه تکرار انجام شد. پیامد پسماند، باکتری، زمان و برهم‌کنش آن‌ها بر بیشتر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده معنی‌دار بود ($p < 0.05$). پسماند سبب افزایش OC، P_{ava} و BR شد و pH را کاهش داد. مایه‌زنی خاک با باکتری‌ها سبب کاهش OC، P_{ava} و BR شد. بالاترین مقدار P_{ava} در خاک‌های دارای ۴٪ پسماند مایه‌زنی نشده با باکتری‌ها (142.7 mg Kg^{-1}) به دست آمد اما در بین خاک‌های دارای ۲٪ پسماند، خاک مایه‌زنی شده با باکتری باسیلوس بومی، P_{ava} بالاتری داشت. در کل، کاربرد پسماند جامد کارخانه روغن‌کشی سبب بهبود ویژگی‌های زیستی خاک و افزایش فسفر قابل دسترس شد.

واژگان کلیدی: آنزیم فسفاتاز، باکتری‌های حل‌کننده فسفر، تنفس میکروبی، کربن آلی

مقدمه

فسفر آلی خاک از مواد آلی ناهمگنی تشکیل شده است و شکل‌های مختلف آن پیامدهای متفاوتی بر حاصلخیزی و کیفیت خاک دارند (۱۲). رهاسازی فسفر از بقایای آلی، تبادل فسفر جذب شده با اکسی‌آنیون‌ها، کمپلکس شدن کلسیم و افزایش حلالیت فسفات‌های کلسیم، دینامیک فسفر در خاک‌های آهکی تیمار شده با پسماندهای آلی را تحت تأثیر قرار داده و از این راه سبب افزایش قابلیت دسترسی فسفر در خاک می‌شوند (۳۵).

ترکیبی از عوامل محیطی و زیستی در سرعت معدنی‌شدن فسفر آلی در خاک نقش دارند. ریزجانداران خاک عامل اصلی در فروزینی بقایای آلی هستند. به دیگر سخن، یکی از روش‌های تامین فسفر مورد نیاز گیاهان بهره‌گیری از توان زیستی خاک و استفاده از ریزجانداران حل‌کننده فسفر است (۱۸). استفاده از باکتری‌های حل‌کننده فسفر برای افزایش فراهمی زیستی عناصر معدنی خاک، تثبیت زیستی نیتروژن، فروزینی ترکیب‌های آلی پیچیده و کنترل بیماری‌های گیاهی نظر پژوهش‌گران را به خود جلب کرده است (۳۲). سویه‌هایی

فسفر یکی از عناصر غذایی پرمصرف برای رشد و نمو گیاهان است. کمبود فسفر به طور گسترده در بسیاری از مناطق دنیا به ویژه زمین‌های خشک و نیمه‌خشک به دلیل مقادیر بالای کربنات کلسیم گزارش شده است (۲۴). در واقع در بیشتر خاک‌های کشاورزی در پی کاربرد پیوسته کودهای شیمیایی، ذخیره‌ی فسفر وجود دارد، اما تثبیت شدن و رسوب آن سبب کمبود فسفر در فاز محلول شده و رشد گیاهان محدود می‌شود (۱۹). فسفر آلی نقش مهمی در تغذیه گیاهان به ویژه در خاک‌های آهکی با توان تثبیت بالای فسفر دارد.

۱، ۲، ۳ و ۴ - به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان
(Email: M.farhangi@guilan.ac.ir)
(*) - نویسنده مسئول
DOI: 10.22067/jsw.v34i1.80353

شده است.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی خاک و پسماند

یک نمونه خاک مرتعی (عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری) از منطقه لوشان واقع در استان گیلان نمونه‌برداری شد. خاک به آزمایشگاه منتقل و پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت، pH و قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی، کربنات‌های کلسیم معادل، فسفر قابل دسترس و فسفر کل (۹) اندازه‌گیری شد.

پسماند جامد از کارخانه روغن‌کشی زیتون گنجه رودبار واقع در استان گیلان تهیه شد و پس از انتقال به آزمایشگاه، خشک کردن و کوبیدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. در این کارخانه بیشتر تصفیه روغن زیتون انجام می‌شود نه روغن‌گیری و پسماند از حوضچه تصفیه کارخانه تهیه شد. ویژگی‌های پسماند شامل کربن به روش سوختن در کوره (۲۲)، فسفر کل، کربنات‌های کلسیم معادل، قابلیت هدایت الکتریکی و pH (در سوسپانسیون ۱ به ۱۰) اندازه‌گیری شد (۹).

جداسازی باسیلوس حل‌کننده فسفر از خاک

جداسازی باکتری باسیلوس در آزمایشگاه بیولوژی خاک دانشگاه گیلان انجام شد. برای این کار از همان خاک مرتعی سوسپانسیونی در آب مقطر سترون تهیه شد و به مدت ۲۰ دقیقه در بن ماری با دمای ۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفت. با این کار ریخت رویشی باکتری‌ها از بین رفته و تنها اسپورها زنده می‌مانند. از این سوسپانسیون پس از خنک شدن در محیط کشت نوترینت آگار، کشت به صورت پخش در پلیت انجام شد. چند نمونه از باکتری‌های رشد کرده در سطح پتری با ویژگی تیپیک کلنی باسیلوس به روش خطی جداسازی شدند و با آزمایش‌هایی مانند رنگ‌آمیزی گرم، اسپور، آزمون کاتالاز و تحرک (۱۷) باسیلوس بودن آنها تأیید شد.

برای سنجش توان حل‌کنندگی فسفر، ۲۰ میکرولیتر از سوسپانسیون باسیلوس‌های جدا شده با روش قطره‌گذاری در محیط جامد اسپریر^۴ (شامل ۱۰ گرم گلوکز، ۵/۰ گرم عصاره مخمر، ۱/۰ گرم CaCl_2 ، ۲۵/۰ گرم $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ، ۲/۵ گرم تری کلسیم فسفات $(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2)$ و ۱۵ گرم آگار در یک لیتر) کشت داده شدند. پلیت‌ها به مدت ۷ روز در دمای ۲۸ درجه سلسیوس انکوباسیون شدند. قطر منطقه شفاف (هاله) احاطه شده اطراف کلونی‌ها و همچنین قطر

از جنس باسیلوس^۱، سودوموناس^۲ و ریزوبیوم^۳ از مهم‌ترین حل‌کنندگان فسفر هستند (۴).

باکتری‌های حل‌کننده فسفر قابلیت دسترسی فسفر را از راه تراوش اسیدهای آلی و تولید آنزیم‌های فسفاتاز افزایش می‌دهند، که به ترتیب سبب انحلال فسفر معدنی و معدنی شدن فسفر آلی شده و تغذیه فسفوری گیاه بهبود می‌یابد (۱۲). باکتری‌های باسیلوس به دلیل توانایی تولید آنزیم‌هایی مانند پروتاز، آمیلاز و فسفاتاز، در فروزینگی مواد آلی در خاک کارآمد بوده و نقش بسیار مهمی در چرخه‌های بیوشیمیایی دارند (۳۰). این باکتری‌ها چون توان ساخت اندواسپور دارند در برابر تنش‌های محیطی پایدار بوده و شرایط نامساعد را تحمل می‌کنند، بنابراین در سیستم‌های کشاورزی بسیار مهم‌اند (۱۱).

افزایش مصرف کودهای شیمیایی فسفر در چند سال گذشته، نه تنها عملکرد محصولات کشاورزی را چندان افزایش نداده، بلکه در مواردی سبب برهم خوردن تعادل عناصر غذایی و کاهش محصول نیز شده است. با آشکار شدن پیامدهای نامناسب استفاده بی‌رویه از این کودها، گرایش به کاربرد کودهای آلی و روش‌های زیستی بیشتر شده است (۱۰). ضمن این که توجه به کشاورزی پایدار و راه کارهای زیستی برای کاهش آلودگی‌های زیست محیطی در این زمینه نقش برجسته‌ای داشته است (۳۴). در این راستا استفاده از بقایای آلی دارای فسفر مانند پسماندها و باکتری‌های حل‌کننده فسفر راه‌گشا هستند.

کاربرد پسماند جامد کارخانه‌های روغن‌خواری، افزون بر کمک به دفع این فراورده فرعی در صنعت تولید روغن، می‌تواند سبب بازگشت عناصر غذایی خارج شده از خاک در فرایند کشاورزی شود (۲۰). اصلاح خاک با پسماندهای کارخانه روغن‌کشی در دوره‌های کوتاه و میان مدت سبب افزایش کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس خاک و افزایش پایداری خاک‌دانه‌های آن می‌شود (۲۵). پسماندهای جامد کارخانه روغن‌کشی معمولاً اسیدی بوده و دارای کربن و پتاسیم زیاد، کلسیم، منیزیم و آهن قابل توجه و مقدار فسفر و نیتروژن متوسط می‌باشند (۸). بنابراین این پژوهش با فرض این که پسماند جامد کارخانه روغن‌کشی دارای مواد آلی و فسفر قابل توجه است و ورود آن به خاک موجب تحریک رشد میکروبی و آزاد کردن فسفر آن می‌شود و با هدف: ۱- بررسی سطح فسفر قابل دسترس در خاک پس از افزودن پسماند جامد مایه‌زنی شده با باکتری‌های باسیلوس به خاک و ۲- مقایسه توانایی باکتری باسیلوس بومی خاک با باکتری باسیلوس پرسیکوس در آزادسازی فسفر انجام

- 1- *Bacillus*
- 2- *Pseudomonas*
- 3- *Rhizobium*

نتایج و بحث

در جدول ۱ ویژگی‌های خاک و پسماند مورد مطالعه آمده است. خاک مورد استفاده در این پژوهش دارای بافت لوم، pH کمی قلیایی، فسفر قابل دسترس متوسط و کربن آلی کم بود. ضمن این که کربنات کلسیم معادل خاک بالا بود که امکان تثبیت فسفر در خاک را افزایش می‌دهد. پسماند به کار رفته در این پژوهش نیز دارای مقادیری قابل توجه از کربن آلی و فسفر کل بود و امکان استفاده از آن در کشاورزی طبق استاندارد محیط‌زیست برای استفاده از پسماندها و پساب‌ها وجود دارد (۷). در پژوهش‌ها (۸) گزارش شده که pH پسماندها معمولاً اسیدی است. اما از آنجا که پسماند استفاده شده در این پژوهش پسماند ناشی از حوضچه تصفیه روغن بود، بنابراین ممکن است به دلیل فرایندهای تصفیه روغن زیتون pH آن بالاتر از ۷ شده باشد.

در جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس پیامد سطوح پسماند، باکتری و زمان انکوباسیون بر ویژگی‌های خاک آمده است. پیامد پسماند، باکتری، زمان و برهم‌کنش آنها بر pH، تنفس پایه و کربن آلی معنی دار بود ($p < 0.01$). اما پیامد پسماند بر فعالیت آنزیم فسفاتاز و پیامد باکتری بر غلظت فسفر قابل دسترس معنی‌دار نبود ($p > 0.05$).

پیامد برهم‌کنش پسماند در باکتری بر ویژگی‌های مورد مطالعه

مقایسه میانگین پیامد برهم‌کنش سطوح مختلف پسماند در باکتری بر pH، تنفس پایه میکروبی، کربن آلی و فسفر قابل دسترس خاک در شکل ۱ نشان داده شده است.

pH

در شکل ۱-الف دو روند مشخص در تغییرات pH دیده می‌شود: نخست این که افزودن پسماند به خاک موجب کاهش pH آن شده است و دوم این که باکتری باسیلوس بومی جدا شده از خاک در مقایسه با باکتری باسیلوس پرسیکوس در هر ۳ سطح پسماند را بیشتر کاهش داده است که البته تفاوت pH در خاک دارای این دو باکتری، تنها در خاک بدون پسماند چشم‌گیر بود ($p < 0.05$). شارما و همکاران (۳۰) گزارش کردند که باکتری‌های حل‌کننده فسفر از طریق تولید و فروزینگی انواع اسیدهای آلی، pH خاک را کاهش می‌دهند و از این راه سبب افزایش دسترسی به این عنصر می‌شوند.

تنفس پایه میکروبی و کربن آلی

بالاترین مقدار میانگین تنفس پایه میکروبی در تیمارهای دارای ۴٪ پسماند بود که نسبت به تیمارهای دارای ۲٪ پسماند ۱/۲۴ برابر و نسبت به تیمارهای بدون پسماند ۱/۷۳ برابر افزایش یافته بود (شکل ۱-ب).

کلونی پس از ۲، ۴ و ۷ روز در سه تکرار اندازه‌گیری شد. شاخص انحلال فسفر^۱ (PSI) به عنوان نسبت قطر هاله (mm) به قطر کلونی (mm) محاسبه شد (۱۷) و باکتری که دارای بالاترین نسبت بود برای ادامه آزمایش انتخاب شد. باکتری شاخص باسیلوس^۲ نیز از گروه زیست‌شناسی دانشگاه گیلان تهیه شد و توان حل‌کنندگی فسفر آن نیز سنجیده شد.

آزمایش انکوباسیون خاک

برای هر تیمار مقدار ۶۰۰ گرم خاک در یک سینی با سطوح مختلف پسماند (صفر، ۲ و ۴ درصد) به طور کامل مخلوط شد. پس از آماده شدن مخلوط خاک-پسماند، غلظت مشخصی (10^6 سلول در هر گرم مخلوط) از زادمایه‌ی باکتری‌ها (باسیلوس بومی جدا شده از خاک و باسیلوس پرسیکوس) در حدود ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر سترون به مخلوط‌ها مایه‌زنی شد. سپس رطوبت مخلوط‌ها به حدود ۷۰ درصد گنجایش زراعی خاک رسانده شد. پس از آن مخلوط‌ها در ظروف پلاستیکی ریخته شده و در دمای آزمایشگاه (حدود ۲۵ درجه سلسیوس) به مدت ۶ ماه انکوباسیون شدند. در طول دوره انکوباسیون تلاش شد تا رطوبت آمیخته‌ها با روش وزنی در حدود ۷۰ درصد گنجایش زراعی حفظ شود. در زمان‌های صفر، ۲، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶، ۸۶، ۱۱۶، ۱۴۶ و ۱۷۶ روز از مخلوط‌ها نمونه‌برداری شد. در نمونه‌ها pH، کربن آلی و غلظت فسفر قابل جذب به روش بیان شده در بالا و تنفس پایه میکروبی (۳) و فعالیت آنزیم فسفاتاز به روش رنگ سنجی و به کمک سوپسترای پارانیتروفنل فسفات (۳۳) اندازه‌گیری شد.

آنالیز آماری

آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل و در سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل پسماند جامد در سه سطح (صفر، ۲ و ۴ درصد)، مایه‌زنی با باسیلوس در سه سطح (بدون مایه زنی، مایه‌زنی با باسیلوس بومی و مایه‌زنی شده با باسیلوس پرسیکوس) و زمان نمونه‌برداری در ۱۱ سطح (صفر، ۲، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶، ۸۶، ۱۱۶، ۱۴۶ و ۱۷۶ روز) بودند. داده‌ها با نرم‌افزار SAS 9.4 آنالیز شدند و مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد. برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

1- Phosphorus Solubilizing Index

2- *Bacillus persicus*

جدول ۱- برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک و پسماند جامد مورد مطالعه

Table 1- Some chemical characteristics of the studied soil and solid waste

اسیدیته pH	قابلیت هدایت الکتریکی Electrical conductivity (EC)	کربنات‌های کلسیم معادل Calcium carbonates equivalent	کربن آلی Organic carbon	فسفر کل Total phosphorus	فسفر قابل دسترس Available phosphorus
-	dS.m ⁻¹	g.100g ⁻¹	g.100g ⁻¹	mg.Kg ⁻¹	mg.Kg ⁻¹
7.80	0.2	36	0.6	0.11	14.6
7.70	1.34	23.3	37	1.55	-

جدول ۲- تجزیه واریانس پیامد سطوح پسماند، باکتری و زمان انکوباسیون بر ویژگی‌های خاک

Table 2- Analysis of variance for soil properties as affected by waste (W), bacteria (B) and incubation time (T)

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی Degree of freedom	اسیدیته pH	کربن آلی Organic carbon	فسفر Phosphorus	تنفس پایه Basal respiration	فسفاتاز Phosphatase
پسماند (Waste)	2	2.89**	88.09**	238725**	0.947**	0.88 ^{ns}
باکتری (Bacteria)	2	0.13**	0.50**	548.78 ^{ns}	0.039*	3.24**
زمان (Time)	10	1.51**	11.66**	40078.14**	0.217**	103.82**
پسماند × باکتری (Waste×Bacteria)	4	0.05**	0.33**	2344.32*	0.028*	2.53**
پسماند × زمان (Waste×Time)	20	0.05**	0.74**	8893.37**	0.074**	1.57**
باکتری × زمان (Bacteria×Time)	20	0.06**	0.42**	1294.19**	0.033**	0.94**
پسماند × باکتری × زمان (Waste×Bacteria×Time)	40	0.02**	0.20**	1017.01**	0.019**	1.06**
خطا (Error)	198	0.01	0.10	198.39	0.010	0.39

اعداد نشان‌دار شده با * و ** به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار هستند و ^{ns} بیانگر معنی‌دار نبودن در سطح احتمال ۵ درصد است

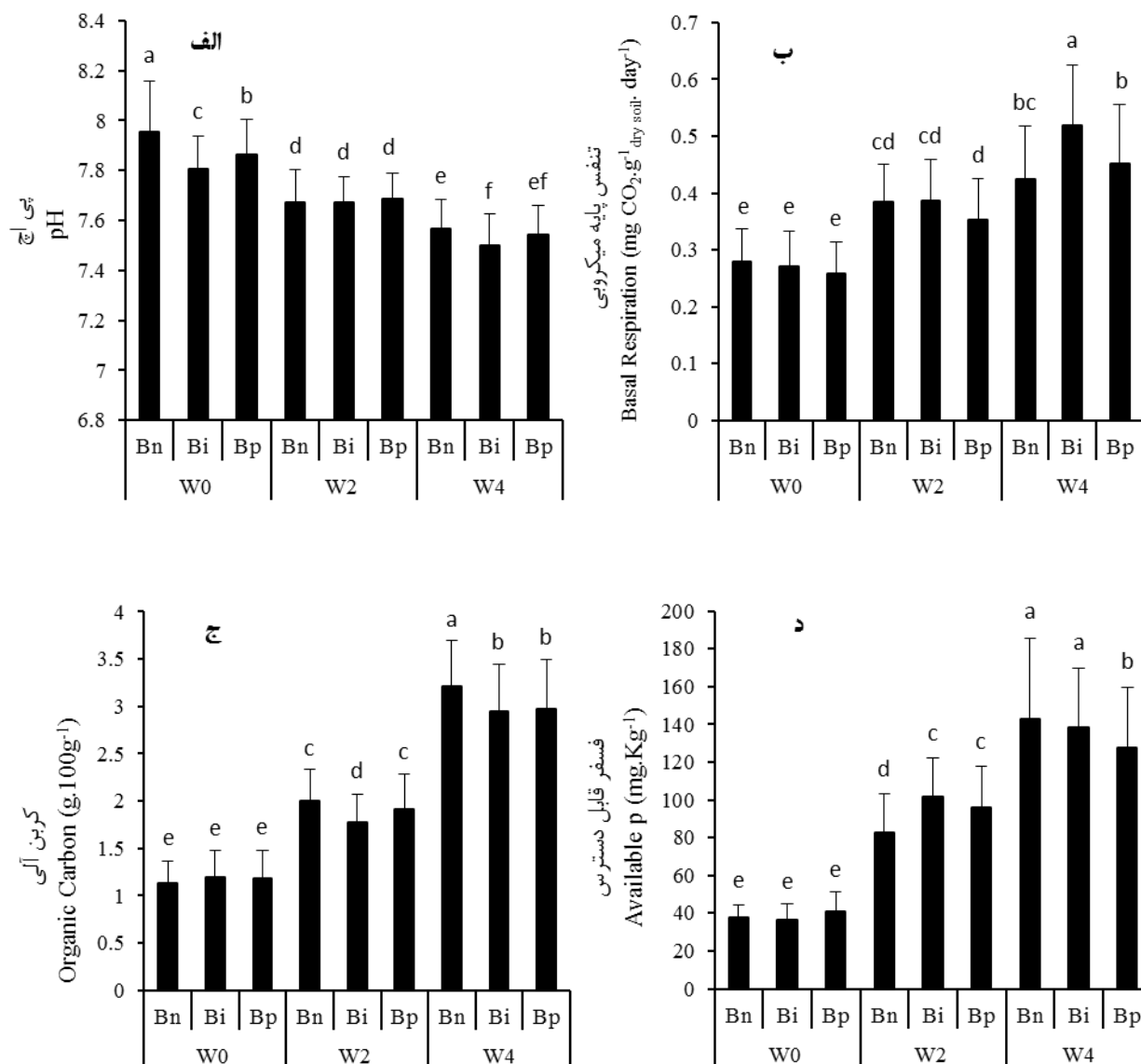
Values marked by * and ** are significant at 5% and 1% probability levels, respectively, and values marked by ^{ns}, are not significant at 5% probability level.

کربن زیست توده میکروبی وجود دارد.

در شکل ۱-ج مقایسه میانگین پیامد بر هم‌کنش سطوح مختلف پسماند در باکتری بر کربن آلی خاک نشان داده شده است. با افزایش درصد پسماند از صفر به ۴ درصد، کربن آلی خاک افزایش یافته است که این امر ناشی از مقدار بالای ماده آلی پسماند است. بالاترین مقدار کربن آلی در تیمار با پسماند ۴ درصد و بدون باکتری (۳/۲۱) بود که با تیمارهای دارای باسیلوس بومی (۲/۹۵) و باسیلوس پرسیکوس (۲/۹۶) تفاوت آماری چشم‌گیری داشت ($p < 0.05$). اگرچه تفاوت کربن آلی در این دو تیمار با یکدیگر چشم‌گیر نبود ($P > 0.05$). کمترین مقدار کربن آلی نیز در تیمار بدون باکتری و بدون پسماند (۱/۱۳) دیده شد در حالی که بین ۳ سطح باکتری در تیمار بدون پسماند تفاوت چشم‌گیری وجود نداشت ($P > 0.05$).

کم‌ترین مقدار تنفس هم در تیمار بدون پسماند مایه‌زنی شده با باکتری باسیلوس پرسیکوس بود که با سایر تیمارهای بدون پسماند تفاوت آماری چشم‌گیری نداشت ($P > 0.05$).

نتیجه به دست آمده در این پژوهش با یافته‌های مکی و همکاران (۲۱) هم‌سو است. آنها گزارش کردند که افزودن پسماندهای آلی سبب افزایش فعالیت تنفسی خاک می‌شود. سی‌یرا و همکاران (۳۱) افزایش میانگین تنفس پایه در خاک‌ها را پس از افزودن پساب کارخانه زیتون گزارش نمودند و علت آن را افزایش فعالیت و رشد ریزجانداران میکروبی بومی و همچنین توانایی ریزجانداران در استفاده و فروزینی ترکیب‌های آلی قابل دسترس مختلف پساب گزارش کردند. کریستن و همکاران (۱۴) نیز تغییرات ماده آلی خاک را در ارتباط با دی‌اکسیدکربن اندازه‌گیری نمودند و مشخص شد که رابطه‌ی مثبت چشم‌گیری بین افزایش ماده آلی و بالا رفتن تنفس خاک و



شکل ۱- پیامد برهم‌کنش سطوح مختلف پسماند در باکتری بر (الف pH و ب) تنفس پایه میکروبی، (ج) کربن آلی و (د) فسفر قابل دسترس خاک. W0، W2، و W4 به ترتیب بیانگر سطوح صفر، ۲ و ۴ درصد پسماند و Bn، Bi، و Bp به ترتیب بیانگر خاک مایه‌زنی نشده، و مایه زنی شده با باسیلوس بومی و باسیلوس پرسیکوس است. حروف متفاوت در روی ستون‌ها در هر شکل نشان دهنده بودن تفاوت آماری معنی‌دار در سطح ۵٪ است. نوارهای خطا انحراف از معیار می‌باشند (n=3).

Figure 1- Effect of solid waste and bacteria interactions on A) pH, B) basal microbial respiration, C) organic carbon and D) available phosphorus in soil

W0, W2, and W4 denote 0, 2 and 4% solid waste levels respectively, and Bn, Bi, and Bp denote uninoculated soil and soil inoculated with native *Bacillus* sp. and *Bacillus persicus* respectively. In each figure, different letters on columns indicate significant differences at $p < 0.05$ and error bars are deviations from the criteria (n=3).

مواد آنتی میکروبی توسط باسیلوس‌ها به ویژه مواد ضد قارچی، دامنه فعالیت قارچ‌ها کم شده و در پی آن تجزیه ماده آلی توسط قارچ‌ها که هتروتروف‌های توان‌مندی هستند، کم شده است. تولید آنتی‌بیوتیک توسط باکتری‌های مفید افزایشده رشد گیاهان مانند باسیلوس‌ها و سودوموناس‌ها و حتی کنترل بیماری‌های گیاهی توسط آنها از دیرباز توسط پژوهش‌گران زیادی شناسایی شده است (۱۵، ۶). در سوی دیگر، باکتری‌ها افزون بر تولید آنتی‌بیوتیک با تولید سیدروفور هم

به نظر می‌رسد افزودن پسماند به خاک سبب تحریک جامعه میکروبی خاک شده است و با افزایش تجزیه پسماند مواد آلی خاک افزایش یافته است. مکی و همکاران (۲۱) نیز گزارش کردند که افزودن پسماندهای آلی به طور قابل ملاحظه‌ای محتوای ماده آلی خاک را افزایش می‌دهد. اما مایه‌زنی باسیلوس‌ها به خاک در هر سطح پسماند سبب کاهش کربن آلی خاک شد. به نظر می‌رسد مایه‌زنی خاک با باسیلوس سبب آریبی جامعه میکروبی شده و باتوجه به تراوش

در خاک دارای پسماند ۴٪ و بدون مایه‌زنی باکتری و همین خاک که با *باسیلوس* بومی مایه‌زنی شده هم می‌تواند تاییدی بر توانمندتر بودن باکتری‌های بومی در فروزینگی بقایای آلی افزوده شده به خاک باشد. به هر روی، در خاک دارای ۲ و ۴ درصد پسماند، میانگین مقدار فسفر قابل دسترس به ترتیب حدود ۲/۴ و ۳/۵ برابر خاک شاهد بود.

رگنی و همکاران (۲۳) پیامد مثبت کاربرد ضایعات جامد کارخانه روغن‌کشی زیتون بر فعالیت رویشی و بازدهی میوه زیتون را وابسته به معدنی شدن آن و در نتیجه آزادسازی مواد غذایی مانند پتاسیم، فسفر، کلسیم، منیزیم و آهن دانستند. ریزجانداران خاک‌زی با استفاده از منابع کربنی ترکیب‌های آلی دارای فسفر، موجب معدنی شدن فسفر آلی می‌شوند (۲۷).

اگرچه فعالیت آنزیم فسفاتاز خاک نقش مهمی را در معدنی شدن فسفر آلی بازی می‌کند اما در این پژوهش تیمارها تاثیر زیادی بر فعالیت این آنزیم نداشتند. یعنی این که تفاوت بین تیمارها در مقدار آنزیم فسفاتاز معنی‌دار نبود. به هر روی، بیشترین مقدار فعالیت آنزیم فسفاتاز ($16/21 \text{ mg PNP.g Soil}^{-1}\text{h}^{-1}$) در تیمار با پسماند صفر و مایه‌زنی شده با باکتری *باسیلوس* پرسیکوس به دست آمد و کمترین مقدار فعالیت این آنزیم ($15/36 \text{ mg PNP.g Soil}^{-1}\text{h}^{-1}$) در تیمار بدون باکتری و بدون پسماند (شاهد) دیده شد. در نتیجه می‌شود گفت باکتری‌های حل‌کننده فسفات نقش مهمی در تغذیه فسفر خاک با افزایش میزان دسترسی گیاهان از طریق آزادسازی از منابع آلی و معدنی فسفر خاک توسط فرآیندهای انحلال و معدنی شدن دارند (۱۳).

پیامد برهم‌کنش باکتری‌ها در زمان بر ویژگی‌های مورد مطالعه

تنفس پایه میکروبی و کربن آلی

در شکل ۲ پیامد برهم‌کنش باکتری‌های مورد مطالعه در زمان‌های مختلف بر مقدار تنفس پایه و کربن آلی نشان داده شده است. مقایسه میانگین پیامد باکتری در زمان بر کربن آلی خاک نوسان زیادی نداشت. نمودارها در هر سه تیمار زنگوله‌ای شکل بود و بالاترین مقدار کربن در هر سه تیمار در روز ۲۸ به دست آمد و تا ماه دوم (روز ۵۶) ادامه یافت. کمترین مقدار کربن خاک هم در روز ۱۴۶ تیمار با باکتری *باسیلوس* بومی به دست آمد. بالاترین مقدار تنفس پایه خاک در روز ۱۱۶ و در تیمار مایه‌زنی شده با باکتری *باسیلوس* بومی دیده شد که با روز ۷ همان سطح باکتری و تیمار شاهد و روز ۱۱۶ تیمار مایه‌زنی شده با باکتری *باسیلوس* پرسیکوس تفاوت آماری چشم‌گیری نداشت ($P>0/05$). در نتیجه می‌توان گفت که بین سطوح باکتری در روند تنفس پایه میکروبی تفاوتی وجود ندارد.

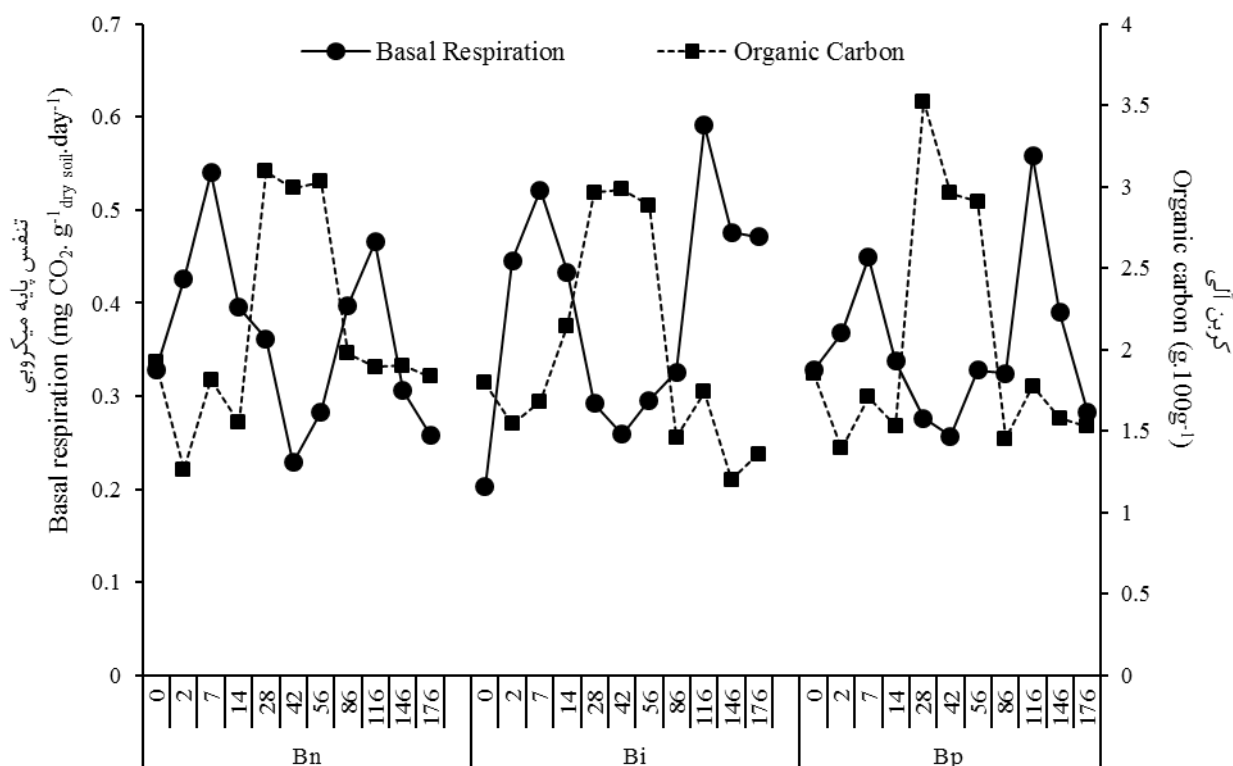
سبب جلوگیری از رشد قارچ‌ها می‌شوند که گفته شده این سازوکار در بازاریاری رشد قارچ از تولید آنتی‌بیوتیک هم نیرومندتر است. چاکرابورتی و همکاران (۵) تولید سیدروفور توسط *باسیلوس* مگاتریوم را عامل کنترل بیماری‌های قارچی در ریشه گیاه چای معرفی کردند.

فسفر قابل دسترس و فسفاتاز

در شکل ۱-۲ مقایسه میانگین پیامد برهم‌کنش سطوح مختلف پسماند و باکتری بر فسفر قابل دسترس خاک نشان داده شده است. با افزایش سطح پسماند جامد، مقدار فسفر قابل دسترس خاک افزایش معنی‌داری یافت به طوری که بیشترین مقدار فسفر خاک مربوط به تیمار دارای پسماند ۴ درصد و بدون مایه‌زنی باکتری بود که تفاوت آماری چشم‌گیری با تیمار دارای *باسیلوس* بومی خاک نداشت ($P>0/05$). با افزایش درصد پسماند از صفر به ۴ مقدار فسفر قابل دسترس افزایش یافت که این امر می‌تواند ناشی از مقدار بالای فسفر موجود در پسماند باشد.

با بررسی پیامد باکتری‌ها در هر سطح پسماند دیده شد که در خاک بدون پسماند باکتری *باسیلوس* پرسیکوس در رهاسازی فسفر کارآمد بوده، اگر چه اندازه‌ی فسفری که این باکتری آزاد کرده در مقایسه با *باسیلوس* بومی جدا شده از خاک و خاک مایه‌زنی نشده با باکتری (شاهد) تفاوت آماری چشم‌گیری نداشته است. در خاک بدون پسماند بیشتر فسفر قابل دسترس اندازه‌گیری شده از منابع معدنی فراهم شده است و از آن‌جا که زیستگاه اصلی باکتری *باسیلوس* پرسیکوس آب‌های شور الیگوتروف^۱ است، انتظار می‌رود که در تغذیه از منابع معدنی فسفات کارآمد بوده و در شرایط طبیعی سخت (کم بودن غذا) موفق‌تر باشد. با افزایش سطح پسماند از صفر به ۲٪، *باسیلوس* بومی جدا شده از خاک کارآمدتر بود، اگرچه فسفر آزاد شده توسط آن تفاوت آماری چشم‌گیری با فسفر آزاد شده توسط *باسیلوس* پرسیکوس نداشته است ($P>0/05$). این یافته سازگاری باکتری‌های بومی خاک به استفاده از مواد آلی در شرایط افزودن بقایای آلی به خاک را نشان می‌دهد که معمولاً در خاک‌های با شرایط مناسب مقدار بقایای آلی خاک پیرامون همین ۲٪ است که در این پژوهش از پسماند تامین شده است. با افزایش سطح پسماند از ۲ به ۴ درصد، که تا حدی در خاک‌ها غیرعادی است، هر دو باکتری از دامنه رقابت خارج شده و خاکی که در آن باکتری مایه‌زنی نشده و تعادل شمار ریزجانداران آن به هم نخورده و احتمالاً قارچ‌ها کنترل‌کننده هستند، در رهاسازی فسفر کارآمدتر بوده است. این امر اهمیت همکاری باکتری‌ها در فروزینگی بقایای آلی را نشان می‌دهد که در منابع به آن مکرر اشاره شده است (۲۹ و ۳۶). چشم‌گیر نبودن تفاوت مقدار فسفر

1- Oligotrophic



شکل ۲- مقایسه میانگین پیامد برهم‌کنش باکتری در زمان (روز) بر تنفس پایه میکروبی و کربن آلی خاک

Bn, Bi, و Bp به ترتیب بیانگر خاک مایه‌زنی نشده، و مایه‌زنی شده با باسیلوس بومی و باسیلوس پرسیکوس است.

Figure 2- Effect of bacteria and time interactions on microbial basal respiration and organic carbon in soil
Bn, Bi, and Bp denote uninoculated soil and soil inoculated with native *Bacillus* sp. and *Bacillus persicus* respectively.

تأثیر قرار گرفته است. به هر روی، میانگین فسفر آزاد شده از خاک در ۶ ماه انکوباسیون در خاک مایه‌زنی شده با باکتری باسیلوس بومی بیشتر از باسیلوس پرسیکوس و آن هم بیشتر از خاک شاهد بود. بالاترین مقدار فعالیت آنزیم فسفاتاز مربوط به روز ۱۴ خاک شاهد بود هر چند که با بسیاری از تیمارها تفاوت چشم‌گیری نداشت ($P > 0.05$). در واقع بودن فسفاتازها در خاک که فسفر را از فاز آلی به شکل محلول درمی‌آورند، شاخصی از حاصل‌خیزی خاک است (۲).

پیامد برهم‌کنش سطوح پسماند در زمان بر ویژگی‌های مورد مطالعه

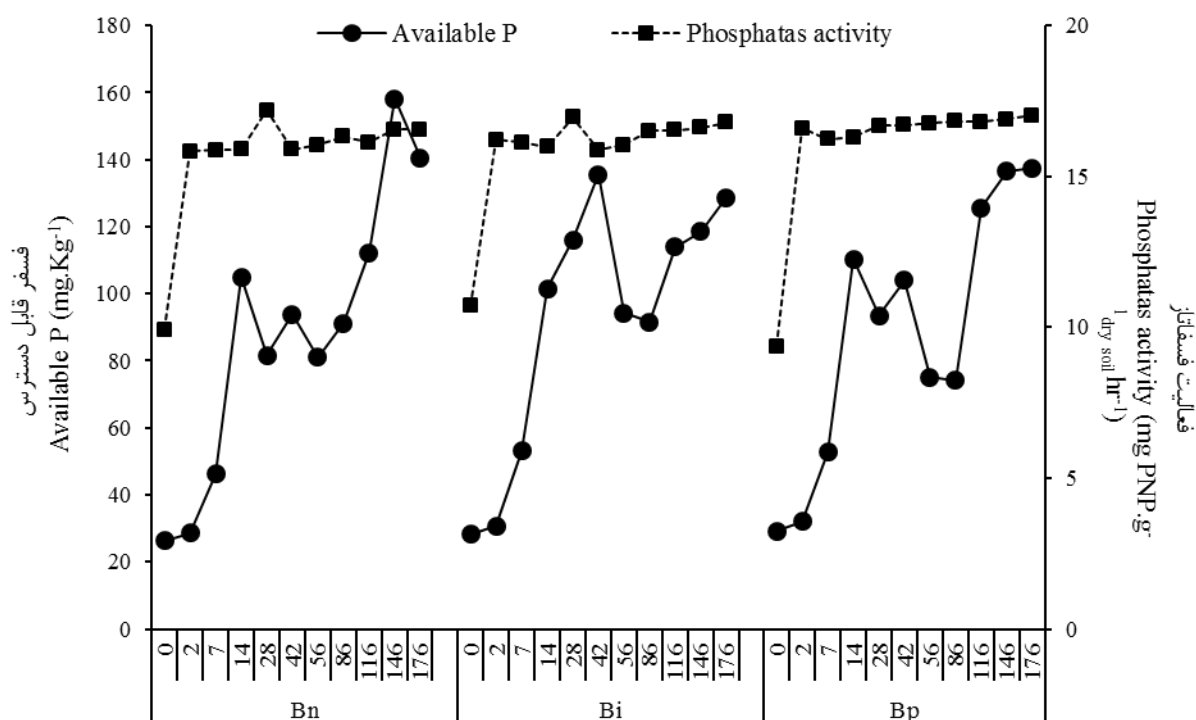
تنفس پایه میکروبی و کربن آلی

در شکل ۴ پیامد برهم‌کنش سطوح پسماند در زمان‌های مختلف بر مقدار تنفس پایه و کربن آلی نشان داده شده است. روند تغییرات کربن آلی خاک با گذشت زمان نوسان زیادی نداشت به طوری که نمودارها در هر سه تیمار زنگوله‌ای شکل بودند و بالاترین مقدار کربن در هر سه تیمار در روز ۲۸ به دست آمد (که برای تیمار ۴٪ با تفاوت آماری چشم‌گیر از همه بالاتر بود).

کمترین مقدار تنفس پایه نیز مربوط به روز صفر تیمار مایه‌زنی شده با باسیلوس بومی بود که بازهم با بسیاری از تیمارها تفاوت آماری چشم‌گیری نداشت ($P > 0.05$). به طور کلی میانگین تنفس میکروبی تیمارها به ترتیب در خاک شاهد، مایه‌زنی شده با باسیلوس بومی و پرسیکوس، ۰/۳۶، ۰/۳۹ و ۰/۳۵ میلی‌گرم دی اکسید کربن در گرم خاک خشک در روز بود.

فسفر قابل دسترس و فسفاتاز

در شکل ۳ پیامد برهم‌کنش باکتری‌های مورد مطالعه در زمان‌های مختلف بر مقدار فسفر قابل دسترس و فعالیت آنزیم فسفاتاز نشان داده شده است. بیشترین مقدار فسفر خاک در روز ۱۴۶ تیمار بدون مایه‌زنی باکتری و کمترین مقدار آن نیز در روز صفر همین تیمار به دست آمد که با روزهای صفر و ۲ دو تیمار دیگر تفاوت آماری چشم‌گیری نداشت ($P > 0.05$). در تیمار شاهد رهاسازی فسفر از منابع آلی و معدنی بیشتر تحت تأثیر قارچ‌ها بوده و روند افزایشی داشته است. احتمالاً مایه‌زنی خاک با باکتری‌ها سبب آریبی در جامعه میکروبی و کاهش جمعیت قارچ‌ها شده و روند آزادسازی فسفر تحت



شکل ۳- مقایسه میانگین پیامد برهم‌کنش باکتری در زمان (روز) بر مقدار فسفر قابل دسترس و فعالیت آنزیم فسفاتاز خاک

Bn, Bi و Bp به ترتیب بیانگر خاک مایه‌زنی نشده، و مایه‌زنی شده با *باسیلوس بومی* و *باسیلوس پرسیکوس* است.

Figure 3- Effect of bacteria and time interactions on available phosphorus and phosphatase activity in soil
Bn, Bi, and Bp denote un-inoculated soil and soil inoculated with native *Bacillus* sp. and *Bacillus persicus* respectively.

در این رابطه اجمعی و همکاران (۱) بیان داشتند رابطه خطی مثبت میان تنفس میکروبی با ماده آلی خاک وجود دارد. کریستن و همکاران (۱۴) نیز تغییرات ماده آلی خاک را در ارتباط با دی اکسیدکربن اندازه‌گیری نمودند و مشخص شد که رابطه‌ی مثبت چشم‌گیری بین افزایش ماده آلی و بالا رفتن تنفس خاک وجود دارد.

فسفر قابل دسترس و فسفاتاز

در شکل ۵ پیامد برهم‌کنش سطوح پسماند در زمان‌های مختلف بر مقدار فسفر قابل دسترس و فعالیت آنزیم فسفاتاز نشان داده شده است. مقدار فسفر خاک در تیمارهای صفر و ۴ درصد پسماند تا روز ۱۴ انکوباسیون و در تیمار ۲٪ پسماند تا روز ۴۲ روند افزایشی داشته و پس از آن دچار نوسان شده است. به طوری که در خاک بدون پسماند در ماه‌های ۵ و ۶ نمونه‌برداری افت کرده است. بنابراین، می‌توان گفت دلیل اصلی افزایش فسفر خاک، فسفر قابل استفاده موجود در پسماند و همچنین معدنی شدن فسفر آلی آن در مدت زمان انکوباسیون است. فعالیت آنزیم فسفاتاز نمایه‌ای از رهاسازی فسفر آلی است. با توجه به نمودار مشخص است که با گذشت ۴۸ ساعت از

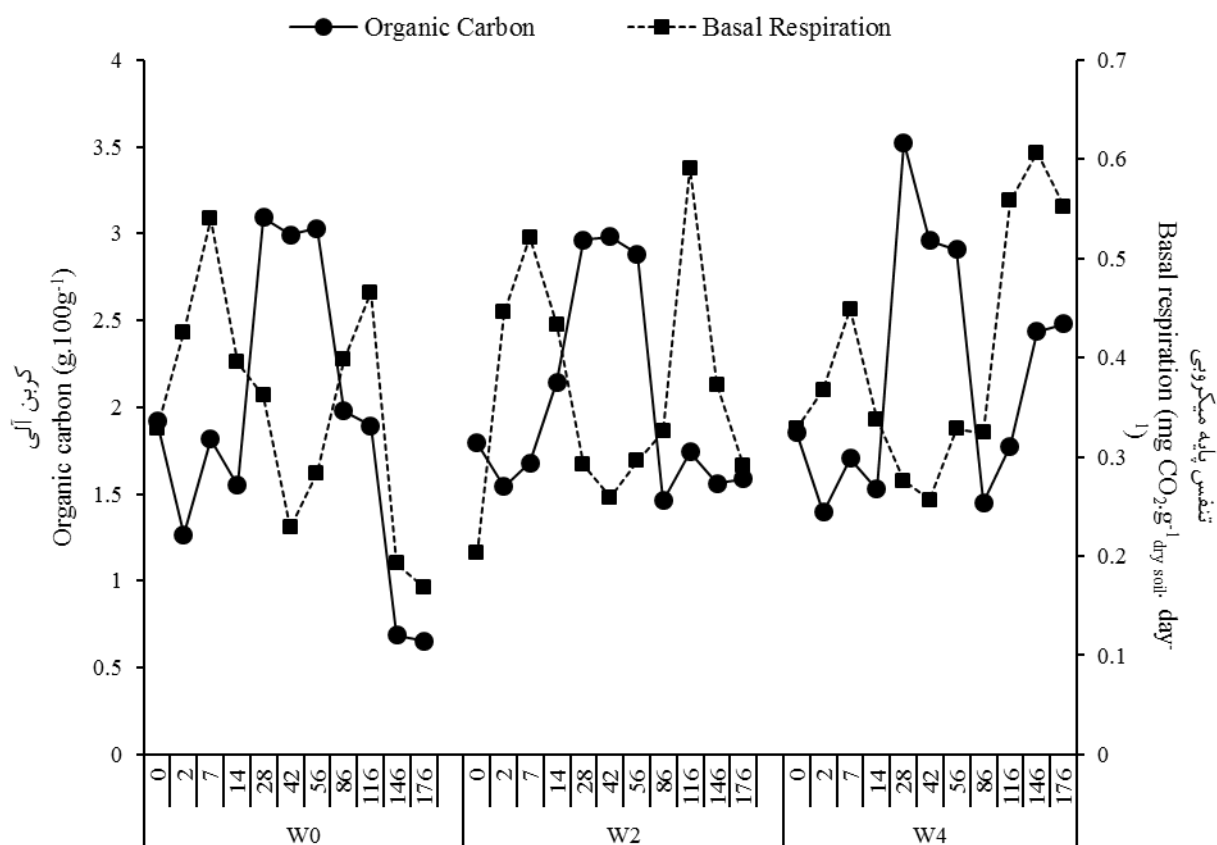
یعنی این که بالاترین اندازه‌ی فروزینگی پسماند و رهاسازی کربن آن در ماه اول بوده است. سادی و همکاران (۲۶) نیز گزارش کردند که بیشترین مقدار فروزینگی در پسماند زیتون افزوده شده به خاک و از دست رفتن دی‌اکسید کربن در ۸ روز اول رخ داده و شدت فروزینگی تابعی از فعالیت میکروبی و رطوبت خاک بوده است. کربن آلی خاک در طول ماه دوم انکوباسیون هم در همان محدوده‌ی مقدار کربن به دست آمده در ماه اول و بالا بود. پس از آن کربن آلی خاک هم‌زمان با افزایش تنفس کاهش یافته است. مقایسه این نمودار با روند تنفس ناشی از افزودن پسماند در طول زمان به خوبی بیانگر این رخدادهاست. روند تغییرات تنفس اندازه‌گیری شده در طول زمان انکوباسیون نیز بیانگر این است که ۴۸ ساعت پس از افزودن پسماند به خاک، تنفس پایه افزایش چشم‌گیر یافته است که نشان از شوک اولیه ورود منبع کربن به خاک و بهینه بودن شرایط خاک از نظر رطوبت و دما است. این روند می‌تواند با مصرف مواد ساده تجزیه شونده‌ی پسماند توسط ریزجانداران فرصت‌طلب در ماه اول انکوباسیون و در ادامه با فروزینگی پسماند توسط باکتری *باسیلوس* با شدت تجزیه پایین توجیه شود.

فسفر قابل دسترس و آنزیم فسفاتاز قلیایی شد. در روند آزادسازی فسفر با زمان دیده شد که خاک‌های دارای پسماند ۴٪ و مایه‌زنی شده با باسیلوس بومی بالاترین شیب آزادسازی را در بین خاک‌های نظیر خود داشتند. بنابراین از پسماند جامد کارخانه روغن‌کشی می‌توان در بهبود شرایط زیستی خاک و افزایش سطح عناصر غذایی آن استفاده کرد. پسماند با دارا بودن کربن آلی به عنوان منبع کربن و انرژی می‌تواند برای فعالیت ریزجانداران خاک استفاده شود و شرایط زیستی خاک را بهبود بخشد. ضمن این‌که پسماند افزون بر این‌که خود دارای عناصر غذایی مانند فسفر است، می‌تواند با پایین آوردن pH و افزایش فعالیت ریزجانداران خاک سبب فراهم شدن فسفر تثبیت شده در خاک‌های آهکی شود. اگرچه در این راستا به پژوهش‌های بیشتر با حضور گیاهان نیاز است.

انکوباسیون فعالیت فسفاتاز در خاک افزایش چشم‌گیر پیدا کرده و پس از آن هم کم و بیش روند افزایشی داشته است. اما شیب این افزایش در خاک دارای پسماند ۴٪ بیشتر است. به طوری‌که بیشترین مقدار فعالیت آنزیم فسفاتاز در روز ۱۷۶ تیمار دارای پسماند ۴ درصد به دست آمد. کورتف و همکاران (۱۶) گزارش کردند که افزودن پسماندهای گیاهی به خاک می‌تواند موجب افزایش فعالیت آنزیمی در خاک شود که نتایج این پژوهش نیز با آن هم‌سو است.

نتیجه‌گیری

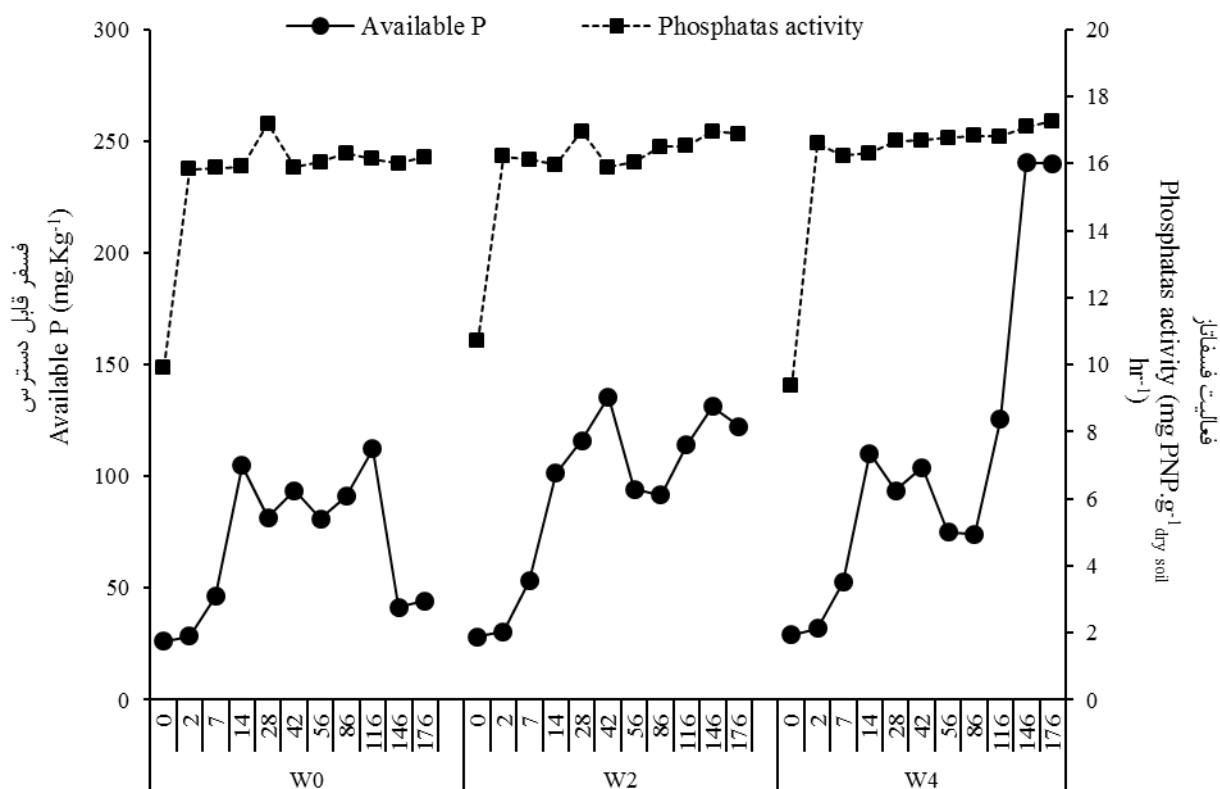
در این پژوهش پیامد افزودن پسماند کارخانه روغن‌کشی بر یک خاک لوم آهکی در حضور باکتری‌های باسیلوس بررسی شد. افزودن پسماند و مایه‌زنی باسیلوس‌ها به خاک سبب کاهش pH، افزایش



شکل ۴- مقایسه میانگین پیامد برهم‌کنش پسماند در زمان (روز) بر تنفس پایه میکروبی و کربن آلی خاک

W0، W2، W4 به ترتیب بیانگر سطوح صفر، ۲ و ۴ درصد پسماند است.

Figure 4- Effect of solid waste and time interactions on basal microbial respiration and organic carbon in soil
W0, W2, and W4 denote 0, 2 and 4% solid waste levels respectively.



شکل ۵- مقایسه میانگین پیامد برهم‌کنش پسماند در زمان (روز) بر مقدار فسفر قابل دسترس و فعالیت آنزیم فسفاتاز خاک W0, W2, W4 به ترتیب بیانگر سطوح صفر، ۲ و ۴ درصد پسماند است.

Figure 5- Effect of waste and time interactions on available phosphorus and phosphatase activity in soil
W0, W2, and W4 denote 0, 2 and 4% solid waste levels, respectively.

منابع

- 1- Ajami M., Khormali F., Ayoubi Sh., and Amoozadeh Omrani R. 2006. Changes in soil quality attributes by conversion of land use on a loess hillslope in Golestan Province, Iran. 1th international soil meeting (ISM) on soil sustaining life on earth, Managing Soil and Technology, 501-504.
- 2- Alvarez M., Huygens D., Diaz L.M., Villanueva C.A., Heyser W., and Boeckx P. 2012. The spatial distribution of acid phosphatase activity in ectomycorrhizal tissue depend on soil fertility and morphotype, and relates to host plant phosphorus uptake. Plant, Cell and Environment 35: 126-135.
- 3- Anderson T.H., and Domsch K.H. 1993. The metabolic quotient from CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. Soil Biology and Biochemistry 25: 393-395.
- 4- Bloemberg G.V., Lugtenberg B.J.J. 2001. Effect of seed bacterization with fluorescent *Pseudomonas* on growth promotion of Jute in Terai zone of west Bengal, India. International Journal of current Microbiology and Applid Scienes 4: 343-350.
- 5- Chakarborty U., Chakraborty B.N., and Basnet M. 2006. Plant growth promotion and induction of resistance in *Camellia chninesis* by *Bacillus megatarium*. Journal of Basic Microbiology 46(3): 186-195.
- 6- Choudhary D.K., and Johri B.N. 2009. Interactions of *Bacillus spp.* and plants-with special reference to induced systemic resistance (ISR). Microbiological Research 164: 493-513.
- 7- Environmental regulations for reuse and recycling of waste water, 1389. Bulten No 535, Deputy Director of Strategic Control, Ministry of Energy, Iran. (In Persian)
- 8- Gomez-Munoz B., Hatch D.J., Bol R., and García-Ruiz R. 2012. The compost of olive mill pomace: from a waste to a resource – environmental benefits of its application in olive oil groves. Chapter 20.
- 9- Gregorich E.G. and Carter M.R., 2007. Soil Sampling and Methods of Analysis. CRC press.
- 10- Hammond J.P., Broadley M.R., and White P.J. 2004. Genetic responses to phosphorus deficiency. Annals of

- Botany 94: 323-332.
- 11- Henkin T.M. 2016. Classic spotlight: bacterial endospore resistance, structure, and genetics. *Journal of Bacteriology* 198(14): 1904.
- 12- Khan A., Jilani G., Akhtar M.S., Saqlan Naqvi S.M., and Rasheed M. 2009. Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production. *Agricultural Biology Science* 1(11): 48-58.
- 13- Khosro M. 2012. Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production, *Resources and Environment* 2(1): 80-85.
- 14- Kirsten S.H., Donald R.Z., Kelly K.M., and Julie D.J. 2011. Changes in forest soil organic matter pools after a decade of elevated CO₂ and O₃. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(7): 1518-1527.
- 15- Kloepper J.W., Ryu C. M., and Zhang S. 2004. Induce systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* spp. *Phytopathology* 94: 1259-1266.
- 16- Kourtev P.S., Ehrenfeld J.G., and Huang W.Z. 2002. Enzyme activities during litter decomposition of two exotic and two native plant species in hardwood forests of New Jersey. *Soil Biology and Biochemistry* 34: 1207-1218.
- 17- Leboffe M.J., and Pierce B.E. 2012. *Microbiology: Laboratory Theory and Application*, Morton Publishing Company.
- 18- Loveland P., and Webb J. 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a Review. *Soil and Tillage Research* 70: 1-18.
- 19- Marhual N.P., Pradhan N., Mohanta N.C., Sukla L.B., and Mishra B.K. 2011. Dephosphatization of LD slag by phosphorus solubilizing bacteria, *International Biodeterioration and Biodegradation* 65: 404-409.
- 20- Marin L., and Fernandez-Escobar R. 1997. Optimization of nitrogen fertilization in olive orchards. In: Val, J., Montanes, L., Monge, E., (Eds.), *Proceedings of the Third International Symposium on Mineral Nutrition of Deciduous Fruit Trees*, Zaragoza, Spain, 411-414.
- 21- Mekki A., Arous F., Aloui F., and Sayadi S. 2013. Disposal of agro-industrials wastes as soil amendments. *American Journal of Environmental Science* 9(6): 458-469.
- 22- Navaro A.F., Cegarra J., Roig A., and Garcia D. 1993. Relationship between organic matter and carbon contents of organic wastes. *Bioresource Technology* 44(33): 203-207.
- 23- Regni L., Nasini L., Ilarioni L., Brunori A., Massaccesi L., Agnelli A., and Proietti P. 2017. Long term amendment with fresh and composted solid olive mill waste on olive grove affects carbon sequestration by pruning, fruits, and soil. *Front Plant Science* 7: 2042.
- 24- Rodriguez H., and Fraga R. 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances* 17: 319-339.
- 25- Roldan A., Salinas G.J.R., Alguacil M.M., Diaz E., and Caravaca F. 2005. Soil enzyme activities suggest advantages of conservation tillage practices in sorghum cultivation under subtropical conditions. *Geoderma* 129: 178-185.
- 26- Saadi I., Laor Y., Raviv M., and Medina S. 2007. Land spreading of olive mill wastewater: effects on soil microbial activity and potential phytotoxicity. *Chemosphere* 66(1): 75-83.
- 27- Sankaralingam S., Harinathan B., Shankar T., Prabhu D., and Peer M. 2014. Effect of phosphate solubilizing bacteria on growth and development of *Sesbania grandiflora* and *Moringa oleifera*. *Sciences Agriculture* 3(2): 88-96.
- 28- Shahab S., and Ahmed N., and Khan N.S. 2009. Indole acetic acid production and enhanced plant growth promotion by indigenous PSBs. *African Journal of Agricultural Research* 4(11): 1312-1316.
- 29- Sharma K., Dak G., Agarwal A., Bhatnagar M., and Sharma R. 2007. Effect of phosphate solubilizing bacteria on the germination of *Cicer arietinum* seeds and seedling growth. *Journal of Herbal Medicine and Toxicology* 1(1): 61-63.
- 30- Sharma R.K., Arawal M., and Marshalla F.M. 2006. Heavy metal contamination in vegetables grown in wastewater irrigated areas of Varanasi, India. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 77: 312-318.
- 31- Sierra J., Fontaine S., and Desfontaines L. 2001. Factors controlling N mineralization, nitrification and nitrogen losses in an Oxisol amended with sewage sludge. *Soil Research* 39: 519-534.
- 32- Sturz A.V., and Christie B.R. 2003. Beneficial microbial allelopathies in the root zone: the management of soil quality and plant disease with rhizobacteria. *Soil and Tillage Research* 72: 107-123.
- 33- Tabatabai M.A. 1982. Soil enzymes, *Methods of Soil Analysis*. Part 2. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, 539-579.
- 34- Vessey J.K. 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil* 255: 571-586.
- 35- Violante A., and Pigna M. 2002. Competitive sorption of arsenate and phosphate on different clay minerals and soils. *Soil Science Society of American Journal* 66: 1788-1796.
- 36- Williams M.A., Myrold D.D., and Bottomley P.J. 2006. Carbon flow from ¹³C-labeled straw and root residues into the phospholipid fatty acids of a soil microbial community under field conditions. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 759-768.



The Effect of *Bacillus* Bacteria on Phosphorus Release from Oil Refinery Plant-solid Waste in a Calcareous Soil

E. Hashempour¹- M.B. Farhangi^{2*}- N. Ghorbanzadeh³- M. Fazeli Sangani⁴

Received: 10-06-2019

Accepted: 30-11-2019

Introduction: Due to the increasing development of edible oil processing industries, large amounts of wastewater and solid wastes (SW) are inevitable in these industries. Organic wastes can be used as soil conditioners in agriculture due to the high content of organic matter and nutrient loads. Phosphorus solubilizing bacteria including *Bacillus* spp., *Pseudomonads* and *Rhizobium* spp. can release phosphorus from insoluble organic and mineral sources in soil. Most soils in the semi-arid regions, including southern parts of Guilan province, have low organic matter content and do not support plant cultivation due to the low fertility and instability of soils. Hence, industrial wastes can be applied as a suitable and low-cost source of organic materials and nutrients in these soils. As phosphorus is one of the most important essential nutrients in plant nutrition which is also present in oil refinery solid wastes and P solubilizing bacteria can release phosphorus from the organic phase of the wastes and make it available in the soil solution, this study aimed to investigate the available phosphorus (P_{ava}) content of soil after simultaneous addition of olive refinery-solid wastes and P solubilizing *Bacillus* spp.

Materials and Methods: the solid waste obtained from Ganje Rudbar oil refinery plant (located in Rudbar, Guilan province) and a soil sample was collected from a surface layer (0-30 cm) of a pasture, located in Lowshan area (Guilan province). A native strain of *Bacillus* sp. was isolated from the sampled soil based on its P-solubilizing ability in Sperber medium. An indicator strain, *Bacillus persicus* was also included in the experiments. P-solubilizing ability of the indicator strain was also evaluated in Sperber medium. The experiment was conducted in a completely randomized design based on factorial arrangement and three replications. Factors included three levels of solid waste (0, 2 and 4%), three levels of inoculated bacteria (no bacteria, native *Bacillus* sp. and *Bacillus persicus*) and eleven sampling times (0, 2, 7, 14, 28, 42, 56, 86, 116, 146, and 176 days). Different levels of solid waste were added to the soil, inoculated with bacteria (10^6 cell/g), and incubated at laboratory condition ($\sim 25^\circ\text{C}$) for six months. The moisture content of the soil mixtures fixed around 0.7 FC and kept constant during the incubation period. Sampling was done at desired times. The pH, organic carbon (OC), soil Basal Respiration (BR), available phosphorus concentration (P_{ava}), and phosphatase enzyme activity were measured in soil samples. Data analysis and means comparison were done by Duncans' test using SAS software package.

Results and Discussion: The studied soil was loam in texture, and had slightly alkaline pH, moderate P_{ava} , and low OC content. The studied solid waste contained considerable OC and total P load. The effect of solid waste (SW), bacteria, sampling time and their interactions were significant on most of the measured characteristics ($p < 0.05$). SW application decreased soil pH and mixtures inoculated with native *Bacillus* sp. had lower pH values compared to those inoculated with *Bacillus persicus*, probably due to the greater effect of *Bacillus* spp. on SW decomposition compared with *B. persicus*. The highest average BR was attained in mixtures contained 4% SW which was 1.24 and 1.73 times greater than that in mixtures contained 2 and 0% SW, respectively. While the effect of SW on soil BR was obvious, bacteria inoculation had different impact on soil organic material decomposition and the lowest BR was measured in soil (0% SW) inoculated with *Bacillus persicus*. OC content of mixtures increased with SW application. The highest OC level ($3.21 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$) was obtained in uninoculated mixture contained 4% SW, which was significantly greater than OC levels in mixtures inoculated with bacteria ($p < 0.05$). The lowest OC level ($3.21 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$) was observed in uninoculated soil (0% SW). SW application significantly increased P_{ava} . The greatest P_{ava} concentration ($142.77 \text{ mg Kg}^{-1}$) was attained in uninoculated mixture contained 4% SW which was not significantly different from P_{ava} concentration in 4%

1, 2, 3 and 4 -Former M.Sc. Student and Assistant Professors of Soil Science and Engineering, College of Agricultural Science, University of Guilan, respectively.

(*- Corresponding Author Email: M.farhangi@guilan.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.80353

SW-mixture inoculated with native *Bacillus* sp. ($P > 0.05$). In control treatments (0% SW), *Bacillus persicus* was efficient in P release from soil native organic carbon and/or phosphate minerals. However, among the soils contained 2% SW, those inoculated with native *Bacillus* sp. had the highest P_{ava} concentration. The average P_{ava} concentration in the 4% SW-mixtures was $136.33 \text{ mg Kg}^{-1}$ which was 3.5 times greater than that in control treatment (0% SW). Although soil P_{ava} was related to phosphatase enzyme, this enzyme activity was not affected by treatments. In the P-releasing trend, it was found that 4% SW-mixtures had the highest P_{ava} concentration after 6 months of incubation, and bacteria inoculation made the P-release trend to be flatter compared to control.

Conclusion: The application of oil refinery plant-solid waste improved the basal respiration of the studied soil and increased available phosphorus concentration. The comparison of applied solid waste levels showed that the inoculation of soil with *Bacillus* bacteria had a positive effect on available phosphorus concentration only at 2% solid waste level.

Keywords: Microbial respiration, Organic carbon, Phosphatase, Phosphate solubilizing bacteria



جداسازی باکتری‌های کارا در رسوب زیستی کربنات کلسیم (MICP) و ارزیابی توانایی آنها در کنترل فرسایش بادی خاک‌های شور اطراف دریاچه ارومیه

مریم معین فر^۱ - میرحسن رسولی صدقیانی^۲ - محسن برین^{۳*} - فرخ اسدزاده^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶

چکیده

در این پژوهش، به منظور شناسایی و جداسازی باکتری‌های بومی با توانایی رسوب زیستی کربنات کلسیم (MICP)، ۲۵ نمونه خاک از جنوب استان آذربایجان غربی جمع‌آوری شدند. بعد از مراحل غربالگری اولیه باکتری‌ها، پنج باکتری بومی با توانایی بالای هیدرولیز اوره و همچنین مقاوم به شوری جداسازی شد. جهت بررسی کنترل فرسایش بادی آزمونی به صورت فاکتوریل در قابل طرح کاملاً تصادفی در دو فاکتور و سه تکرار که فاکتور اول در هشت سطح (شامل پنج باکتری جداسازی شده (U3، U8، U16، U35، U40) و باسیلوس پاسته‌وری (شاهد مثبت)، تیمار بدون باکتری و بدون عامل سیمانی (به صورت موهومی) و تیمار بدون باکتری و دارای عامل سیمانی و فاکتور دوم شامل غلظت‌های مختلف محلول کلرید کلسیم به همراه اوره در سه سطح (۰/۱، ۰/۵ و ۱ مولار) ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که جدایه‌های U3 و U16 دارای بیشترین مقدار هیدرولیز اوره و از نظر تحمل به شوری U16 دارای کمترین مقدار و U3 بیشترین تحمل به شوری بود. نتایج حاصل از آزمون تونل باد نشان داد که آستانه فرسایش بادی در نمونه‌های شاهد منفی در حدود ۹/۴ m/s و برای نمونه‌های MICP (رسوب میکروبی کربنات کلسیم) بسیار بالاتر از سرعت دستگاه تونل باد (۲۵ متر بر ثانیه) بود. حداکثر میزان مقاومت فروری در نمونه تیمار شده با جدایه U3 و سطح یک مولار کلرید کلسیم ۱۳/۵ MPa و نمونه‌های شاهد منفی و دارای مواد سیمانی به ترتیب ۰/۹۷ و ۰/۹۷ بدست آمد. چنین استنباط می‌شود که می‌توان از فرایند MICP و باکتری‌های بومی توانمند در این پدیده برای کاهش فرسایش بادی استفاده نمود. که فاکتور اول در هشت سطح (شامل پنج باکتری جداسازی شده (U3، U8، U16، U35، U40)، باسیلوس پاسته‌وری (به عنوان شاهد مثبت که از مرکز کلکسیون میکروبی ایران تهیه گردید)، تیمار بدون باکتری و بدون عامل سیمانی (شاهد منفی) و تیمار بدون باکتری و دارای عامل سیمانی) و فاکتور دوم در سه سطح شامل غلظت‌های مختلف محلول کلرور کلسیم به همراه اوره (۰/۱، ۰/۵ و ۱ مولار) مورد ارزیابی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: باکتری تولید کننده اوره‌آز، سیمانی کننده بیولوژیکی، فرسایش بادی، مقاومت فروری

مقدمه

ایران به دلیل پایین بودن محتوای رطوبتی، خاک‌ها در معرض فرسایش بادی بوده و اثرات مخرب فرسایش بادی جوامع ساکن شهر و روستا در مناطق مختلف ایران را مورد تهدید قرار می‌دهد (۵ و ۲۹). بررسی ویژگی‌های اقلیمی، خاک‌شناسی، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و پوشش گیاهی در محدوده‌ی جغرافیایی کشور نشان می‌دهد که مجموع سطوح بیابانی برابر ۹۰۷۲۹۳ کیلومتر مربع است که این مقدار ۵۵ درصد از مساحت کل ایران را دربرمی‌گیرد (۱۲). توجه به مساحت سطوح بیابانی و همچنین مشاهدات بصری اهمیت توجه به پدیده‌ی فرسایش بادی و جستجوی راهکارهای مناسب در راستای مهار آن در کشور ما را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد.

مرور منابع نشان می‌دهد که تاکنون راهکارهای متعددی برای کنترل فرسایش بادی در مناطق مختلف ارائه شده است، که پایه‌ی اصلی این راهکارها بر مبنای استفاده از روش‌های زراعی به شکل

فرسایش بادی از مشکلات مهم زیست‌محیطی در مقیاس جهانی است که نمود آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک آشکار بوده و آثار سوء بسیاری مانند تشکیل طوفان‌های گرد و غبار، حرکت شن‌های روان، کاهش حاصلخیزی خاک‌ها از طریق تخلیه ذرات و همچنین مشکلات مربوط به افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و شیوع بیماری‌ها را در پی دارد. در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک مانند

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، استاد، استادیار و دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه
(*) - نویسنده مسئول:

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

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.69069

تولید آنزیم اوره‌از) اهمیت ویژه‌ای داشته و مقدار آنزیم تولید شده می‌تواند سرعت و مقدار تشکیل رسوب زیستی را تحت تأثیر قرار دهد. سونگ (۲۱) براساس تحقیقات انجام شده بیان داشته است که، میکروارگانیسم‌های متعددی شامل (*Bacillus pasteurii*) و *Bacillus planococcaceae*, *Sporosarcina pasteurii* و *Clostridium* در فرایند رسوب زیستی کربنات کلسیم می‌توانند نقش داشته باشند. به‌رغم مطالعات بسیار صورت گرفته در رابطه با روش رسوب میکروبی کربنات کلسیم، تاکنون کمتر به استفاده از پتانسیل باکتری‌های بومی خاک برای انجام این روش پرداخته شده است. استفاده از میکروارگانیسم‌های مفید خاکزی که توان تولید اوره‌از را داشته باشند، در عین حال که می‌توانند فرایند رسوب زیستی کربنات کلسیم را بهبود بخشند، برای محیط زیست نیز سودمند بوده کمترین بار منفی زیست‌محیطی را بر اکوسیستم وارد می‌نمایند. از سوی دیگر باکتری‌های بومی خاک به دلیل سازگاری بهتر با محیط کارایی بیشتری نیز خواهند داشت (۲۴ و ۲۵).

در سال‌های اخیر با تشدید فرایند خشکی دریاچه ارومیه و پیدایش عرصه‌های بیابانی در بستر این دریاچه، کانون‌های متعدد گرد و غبار در جای جای استان آذربایجان غربی به وجود آمده‌اند که توجه به این مناطق و مهار فرسایش بادی در آن‌ها امری ضروری است. در این پژوهش تلاش شده تا کارایی روش رسوب میکروبی کربنات کلسیم در کاهش فرسایش بادی و افزایش مقاومت خاک با کاربرد باکتری‌های بومی جدا شده از خاک منطقه مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک

به منظور جداسازی باکتری‌های تجزیه‌کننده اوره، ۲۵ نمونه خاک از استان آذربایجان غربی با کاربری‌های مختلف شامل خاک‌های ماسه‌ای ریزدانه، لوم سیلتی اطراف دریاچه ارومیه، خاک‌های کشاورزی، خاک‌های مستعد به فرسایش بادی و خاک‌های شور برداشت شده و به آزمایشگاه بیولوژی واقع در گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه انتقال داده شدند. نمونه‌ها تا زمان انجام آزمایش‌ها در دمای ۴- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

غنی‌سازی میکروبی و جداسازی و خالص‌سازی

باکتری‌های تولیدکننده اوره‌از

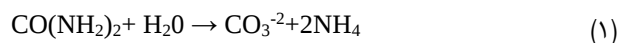
برای افزایش تعداد باکتری‌های اوره‌آزی نمونه‌های خاک، از محلول غنی‌سازی که شامل ۱۰ گرم بر لیتر عصاره‌ی مخمر، ۱ گرم بر لیتر پپتون، ۱۳/۶ گرم بر لیتر استات سدیم، ۱ گرم بر لیتر سدیم کلرید بود، استفاده شد. بعد از استریل کردن محیط، یک گرم از نمونه

افزایش پوشش گیاهی و همچنین افزودن بقایای زاعی به خاک، ایجاد موانع مکانیکی در مقابل جریان باد و در نتیجه کاهش قدرت فرسایشی آن و در نهایت تثبیت لایه‌ی سطحی خاک با استفاده از انواع تثبیت‌کننده‌های شیمیایی و مواد پلیمری مختلف است (۳، ۷، ۱۰، ۱۳، ۲۲ و ۲۳).

روش‌های اشاره شده به‌رغم کارایی در مهار فرسایش بادی، خالی از اشکال نبوده و معایبی نیز به همراه دارند و یا اینکه در بسیاری از مناطق قابل اجرا نیستند. برای نمونه استفاده از روش‌های زراعی به دلیل نبود آب کافی در سطح وسیعی از اراضی مستعد فرسایش بادی قابل اجرا نیستند (۲۷). روش‌های مکانیکی و احداث بادشکن نیز به دلیل هزینه‌های اقتصادی بسیار بالا فقط به صورت موردی و در مقیاس کوچک برای حفاظت از محصولات و یا صنایع بسیار ارزشمند، مقرون به صرفه هستند (۲۰). در رابطه با استفاده از تثبیت‌کننده‌های شیمیایی نیز بایستی اشاره کرد که این تثبیت‌کننده‌ها در بیشتر موارد آثار سوء زیست‌محیطی نیز دارند که استفاده از آن‌ها را محدود می‌نماید که در این رابطه می‌توان به طور مشخص به آثار زیست‌محیطی مالچ‌های نفتی اشاره نمود (۱۵ و ۱۶).

در بین روش‌های مختلف کنترل فرسایش بادی، استفاده از روش‌هایی که بتوانند مقاومت لایه سطحی خاک را در مقابل جریان باد افزایش داده و مانع از حرکت ذرات خاک شوند، اهمیت ویژه‌ای داشته و عامل کلیدی در کنترل فرسایش بادی است. نکته مهم در این زمینه استفاده از روش‌هایی است که همزمان با افزایش مقاومت برشی لایه‌ی سطحی خاک، آثار زیست‌محیطی کمی نیز داشته باشند. در سال‌های اخیر یک فناوری بیولوژیکی سبز و سازگار با محیط زیست با نام رسوب میکروبی کربنات کلسیم به منظور به‌سازی خاک و افزایش مقاومت برشی آن پیشنهاد شده است. در این روش به‌سازی خاک از باکتری‌ها در جهت رسوب کربنات کلسیم و کاهش فرسایش بادی در خاک استفاده می‌شود (۱۴).

در فرایند رسوب زیستی کربنات کلسیم، سلول‌های باکتریایی با استفاده از تولید آنزیم اوره‌از به عنوان کاتالیزور، یون‌های کربنات و آمونیوم را از منبع اوره آزاد می‌نمایند. یون‌های کربنات تولید شده در محیط در حضور یک منبع کلسیم به آسانی به کربنات کلسیم تبدیل شده و در بین ذرات خاک رسوب می‌نمایند این رسوب کربنات کلسیم همچون سیمانی طبیعی ذرات خاک را به هم متصل نموده و مقاومت برشی و استحکام آن را افزایش می‌دهند. این فرایند به صورت خلاصه طی دو واکنش زیر قابل نمایش است (۲، ۱۱ و ۲۶).



در این روش وجود باکتری‌های هیدرولیز کننده اوره (از طریق

تعیین منحنی رشد سویه‌های برتر

برای تهیه منحنی رشد، کشت شبانه‌ای از جدایه‌های برتر از نظر فعالیت اوره‌آزی تهیه و به مقدار یک درصد در محیط کشت مایع مغذی (رفرنس محیط گذاشته شود)، افزوده و روی شیکرانکوباتور با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد گرماگذاری شد. سپس رشد باکتری (کدورت) با قرائت جذب نور در طول موج ۶۰۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر به صورت هر ساعت یک بار برای ۲۴ ساعت مورد سنجش قرار گرفت.

بررسی تأثیر سویه‌های باکتریایی در کاهش میزان فرسایش بادی (آزمون تونل باد)

جهت بررسی تأثیر سویه‌های باکتریایی در کاهش میزان فرسایش بادی، میزان مقاومت‌فروری و نیز انتخاب جدایه‌های مناسب باکتری، آزمونی بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور، که فاکتور اول در هشت سطح (شامل پنج باکتری جداسازی شده (U3, U8, U16, U35, U40)، باسیلوس پاسته‌وری (به‌عنوان شاهد مثبت که از مرکز کلکسیون میکروبی ایران تهیه گردید)، تیمار بدون باکتری و بدون عامل سیمانی (به‌صورت موهومی) و تیمار بدون باکتری و دارای عامل سیمانی و فاکتور دوم در سه سطح شامل غلظت‌های مختلف محلول کلرورکلسیم به همراه اوره (۱/۵، ۰/۵ و ۱ مولار) مورد ارزیابی قرار گرفت.

پس از جداسازی باکتری‌ها به منظور آزمون تأثیر MICP بر افزایش مقاومت فروری خاک در برابر فرسایش بادی، یک نمونه خاک شنی و کاملاً فرسایش‌پذیر از اطراف دریاچه ارومیه و محل کانون‌های گرد و غبار تهیه شد و در ادامه پژوهش بررسی‌ها با استفاده از این نمونه صورت گرفت. نمونه مورد نظر در سینی‌های مخصوص به ابعاد ۳۰×۲۰×۵ سانتی‌متر ریخته شد و سطح آن بطور کامل صاف و یکنواخت گردید. پس از برآورد، چگالی ظاهری به میزان ۱/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و همچنین، متناسب با تخلخل (۵۴/۰) نمونه‌های ماسه درون سینی آماده‌سازی و سپس محلول‌پاشی صورت گرفت (شکل ۲). حجم محلول سیمان‌کننده و سوسپانسیون باکتری برابر با حجم تخلخل بود، به‌طوری که بتواند آن‌را کاملاً اشباع کند. نحوه تزریق بصورت $\frac{1}{4}$ محلول باکتری + $\frac{1}{4}$ محلول سیمان‌تاسیون + نیم ساعت استراحت + $\frac{1}{4}$ محلول باکتری + $\frac{1}{4}$ محلول سیمان‌تاسیون بود.

در کف ظرف نمونه چند سوراخ به‌منظور زهکش تعبیه شد و یک کاغذ صافی به‌منظور فیلتر در داخل آن قرار می‌گیرد. شایان ذکر است در دو تیمار شاهد منفی (دارای محلول باکتری و بدون محلول سیمانی‌کننده) و تیمار بدون باکتری و دارای مواد سیمانی‌کننده تزریق به همان روال ذکر شده صورت گرفت ولی به ترتیب محلول

خاک را داخل ارلن مایر محتوی ۵۰ میلی‌لیتر از محیط مذکور اضافه و داخل شیکرانوباتور در دمای ۲۸ درجه سلسیوس و سرعت تکان دادن ۱۲۰ rpm (دور بر دقیقه) به مدت ۳۶ ساعت انکوبه شد.

بعد از مرحله‌ی غنی‌سازی، برای جداسازی و خالص‌سازی باکتری‌های بومی اوره‌آزی اقدام به تهیه سری رقت از نمونه‌ها شد و از رقت‌های مناسب (10^{-2} تا 10^{-4}) به میزان ۱۰۰ میکرولیتر بر روی محیط‌کشت جامد اختصاصی انتقال داده شد. محیط‌کشت اختصاصی شامل ۵ گرم بر لیتر پپتون، ۳ گرم بر لیتر بیف‌اکسترکت، ۳ گرم بر لیتر سدیم کلرید، ۲۰ گرم بر لیتر آگار و ۲٪ اوره می‌باشد (۲). پلیت‌ها در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد انکوبه شدند. پس از گذشت ۲۴ ساعت کلونی‌های با ویژگی متفاوت از نظر مورفولوژی و تغییر رنگ محیط جدا شده و در محیط‌کشت اختصاصی کشت داده شدند. در طی کشت‌های متوالی به روش کشت خطی، ۴۴ تک کلونی جداسازی و خالص‌سازی گردیدند.

انتخاب سویه‌های برتر

با توجه به اهمیت ترشح آنزیم اوره‌آز توسط باکتری در پدیده MICP^۱، میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز با اندازه‌گیری میزان هیدرولیز اوره ارزیابی می‌شود. بدین منظور برای انتخاب مناسبترین جدایه از محیط کشت مایع استفاده شد. ابتدا باکتری‌های مورد نظر روی محیط کشت جامد نوترینت آگار کشت داده شدند، سپس از تک کلنی برای مایه‌زنی محیط مایع شامل ترکیبات ۲۰ گرم بر لیتر عصاره مخمر، ۱۰ گرم بر لیتر کلرید آمونیوم، ۲۰ گرم بر لیتر مایع مغذی و ۰/۰۲۴ گرم بر لیتر کلریدنیکل با pH ۸/۵ می‌باشد استفاده شد. محیط کشت در دمای ۲۸ درجه سلسیوس با دور ۲۰۰ rpm به مدت ۱۲ ساعت انکوبه شد. سپس ۱ میلی‌لیتر از محلول سوسپانسیون باکتری به ۹ میلی‌لیتر محلول اوره ۱۱/۱ مولار افزوده شده و هدایت الکتریکی آن بعد از گذشت ۵ دقیقه قرائت شده و فعالیت اوره‌آزی با رابطه (معادله ۱) زیر محاسبه گردید (۱۱ و ۲۸).

$$11/1 \times \text{هدایت الکتریکی (dSm}^{-1}) = \text{فعالیت اوره‌آزی (mM urea min}^{-1})$$

آزمون بیوشیمیایی سویه‌های برتر

آزمون‌های بیوشیمیایی مانند آزمایش‌های رنگ‌آمیزی گرم، متحرک بودن باکتری، آزمون اکسیداسیون یا تخمیر گلوکز (O/F)، آزمون استفاده از سیتрат، آزمون هیدرولیز نشاسته، آزمون کاتالاز، آزمون تحمل به شوری و آزمون فلورسانس بودن باکتری‌ها بر جدایه‌های برتر مورد بررسی قرار گرفت.

1- Microbial induced calcite precipitation (MICP)

مدت ۵ دقیقه در معرض جریان باد قرار گرفت. کاهش جرم نمونه پس از جریان باد به عنوان مقدار خاک فرسایش یافته در نظر گرفته شد (۲).

نتایج و بحث

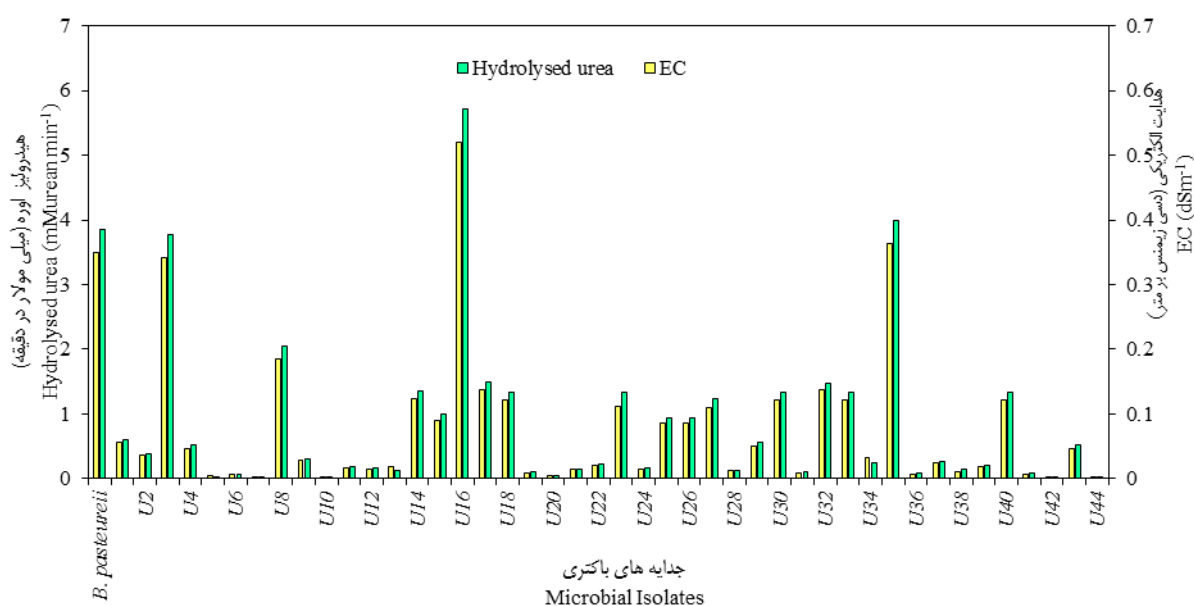
غربالگری، جداسازی و انتخاب سویه برتر اوره‌آزی

در این پژوهش از ۲۵ نمونه خاک مورد مطالعه ۴۴ جدایه باکتری جداسازی و غربالگری شد (شکل ۱). از بین جدایه‌های مختلف، ۵ جدایه باکتری (U3، U8، U16، U35، U40) دارای حداکثر توان فعالیت آنزیم اوره‌آزی بودند (جدول ۱). در بین باکتری‌های مختلف جدایه U16 دارای پتانسیل اوره‌آزی بالاتری (۵/۷۱۸۹ میلی‌مول اوره بر دقیقه) نسبت به باسیلوس پاسته‌اوری (شاهد مثبت) بود (شکل ۱). جدایه U40 با وجود اینکه از نظر هیدرولیز اوره با برخی از جدایه‌ها مانند (U14، U17، U18، U32، U33) تقریباً یکسان بود اما به دلیل اینکه از خاک‌های مستعد به فرسایش بادی جداسازی شده بود، مورد آزمون قرار گرفته است. هرچه مقدار فعالیت باکتری بالاتر باشد رسوب در زمان کمتری تشکیل می‌شود و به عبارتی دیگر به محض ترکیب مواد واکنش دهنده عمل رسوبگذاری آغاز می‌شود (۶، ۸ و ۲۸).

پاشی با همان حجم به جای محلول سیمانی کننده در تیمار شاهد منفی و در تیمار بعدی به جای محلول باکتریایی به همان نسبت از آب استریل استفاده شد. و سپس به منظور خشک شدن نمونه، سینی‌ها در هوای آزاد قرار گرفتند (۲۱).

مقاومت فروروی لایه‌ی سطحی خاک به عنوان یک شاخص ساده از مقاومت در برابر فرسایش بادی محسوب می‌شود. به منظور بررسی اثر MICP بر روی مقاومت فروروی نمونه‌ها از دستگاه ریزفروسنج اتوماتیک مدل MP11 استفاده شد. این دستگاه دارای یک میله کوچک با نوک مخروطی است که مقدار فشار لازم برای فرورفتن میله مذکور در نمونه را ثبت می‌کند. مقاومت فروروی نمونه‌ها در سه نقطه از سطح هر نمونه تعیین شده، و به منظور مقایسه میانگین از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

به منظور بررسی اثر فرایند MICP در افزایش مقاومت نمونه‌ها در مقابل فرسایش بادی از دستگاه تونل باد استفاده و سرعت آستانه باد برای حرکت ذرات خاک تعیین گردید. تونل باد مورد استفاده در این فرایند از نوع تونل باد مدار باز دمنده بوده که دارای حداکثر سرعت ۲۵ متر بر ثانیه و با طول ۴ متر بود. اتاق آزمون، دیفیوزر، نازل، اتاق آرامش و فن از جمله اجزای اصلی تونل باد بودند. در این آزمایش سینی‌های حاوی نمونه‌های درون دستگاه تونل باد قرار داده شد و به



شکل ۱- باکتری‌های غربال شده بر اساس هیدرولیز اوره (mMurea.min⁻¹) و هدایت الکتریکی (dS.m⁻¹)

U1 الی U44 جدایه‌های باکتریایی می باشند

Figure 1- Screened bacteria in terms of urea hydrolysis (mMurea.min⁻¹) and electrical conductive (dS.m⁻¹) U1 until U44 are bacteria isolation.

جدول ۱- باکتری‌هایی با توانایی بالای هیدرولیز اوره (انتخاب شده از شکل ۱)

Table 1- Highly ability bacteria in terms of urea hydrolysis (selected from Figure 1)

	<i>B. pasteurii</i>	U3	U8	U16	U35	U40
هدایت الکتریکی EC(dS.m ⁻¹)	0.3505	0.342	0.1857	0.520	0.3634	0.122
هیدرولیز اوره (mM urea.min ⁻¹)	3.855	3.763	2.043	5.719	3.997	1.342

U3, U8, U16, U35 و U40 جدایه‌های باکتری با توانایی بالای هیدرولیز اوره

U3, U8, U16, U35 and U40 bacteria isolation with highly ability in urea hydrolysis

آزمون بیوشیمیایی جدایه‌های برتر

پس از غربالگری اولیه، برخی صفات بیوشیمیایی جدایه‌های برتر مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به اینکه خاک‌های حاشیه دریاچه که در اثر خشکی دریاچه در معرض فرسایش بادی قرار دارند، اغلب شور هستند، بنابراین باکتری‌ها از منظر تحمل به شوری در چهار سطح (۱/۵، ۳، ۶ و ۱۰ درصد) مورد ارزیابی قرار گرفتند. این جدایه‌ها

توانایی تحمل به شوری بالا (۵۰ dS.m⁻¹) را داشتند. جدایه (U3) نسبت به بقیه جدایه‌ها (حتی باسیلوس پاسته‌اوری)، تحمل به شوری بالایی (115 dS.m⁻¹) داشته است (تا ۱۰٪) که می‌توان از این جدایه در مناطق مستعد به فرسایش بادی و همچنین شور استفاده نمود (جدول ۲).

جدول ۲- آزمون‌های بیوشیمیایی جدایه‌های باکتری

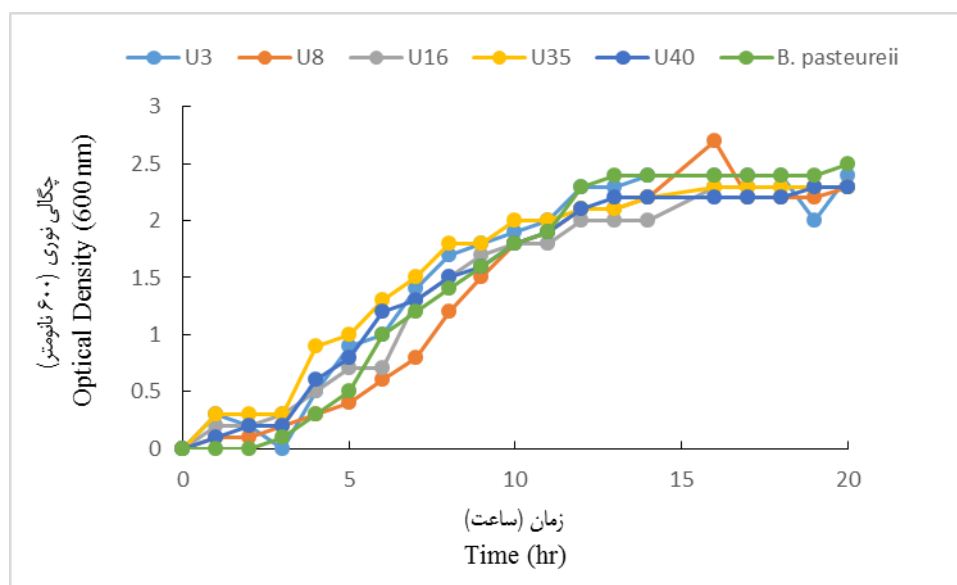
Table 2- Biochemical Tests of isolated bacteria

آزمون‌ها Tests		<i>B. pasteurii</i>	U3	U8	U16	U35	U40
آزمون تحمل به شوری Salt tolerance test	1/5%	+	+	+	+	+	+
	3%	+	+	+	+	+	+
	6%	+	+	+	-	+	-
	10%	-	+	-	-	-	-
آزمون سیتрат Citrate test		+	-	+	+	+	+
آزمون هیدرولیز نشاسته Starch hydrolysis test		-	-	-	-	-	-
رنگ‌آمیزی گرم Gram staining		+	-	+	+	+	+
آزمون اکسیداسیون یا تخمیر (O/F) test	O/F بدون پارافین Without parafilm	سبز Green	زرد Yellow	زرد Yellow	سبز Green	زرد Yellow	آبی Blue
	O/F با پارافین With parafilm	آبی Blue	سبز Green	سبز Green	سبز Green	زرد Yellow	آبی Blue
آزمون کاتالاز Catalase test		+	+	+	+	+	+
آزمون فلورسانس Fluorescence test		-	-	-	-	-	-

منحنی رشد جدایه‌های برتر

منحنی رشد جدایه‌های باکتری‌های مورد بررسی نشان داد (شکل ۲) که بیشترین میزان فعالیت و جمعیت میکروبی در بازه‌ی زمانی ۱۳-۱۶ ساعت است که بیانگر بهترین زمان مورد استفاده از محلول باکتریایی در فرآیند MICP می‌باشد. نکته قابل توجه در این امر این است که افزایش فعالیت آنزیم اوره‌آزی وابسته به حضور خود آنزیم و در حقیقت وابسته به وجود باکتری در محیط است. منحنی رشد باکتری نشان می‌دهد که رشد و فعالیت باکتری در چه بازه‌ی زمانی حداکثر، در چه زمانی حداقل و در چه بازه‌ای وارد فاز مرگ می‌شود که با توجه به این اطلاعات می‌توان مشخص کرد که در چه بازه‌ی زمانی فعالیت آنزیم اوره‌آز در حداکثر مقدار خود قرار می‌گیرد (۱).

آزمون سیترات نشان داد که همه‌ی جدایه‌ها بجز (U3) توانایی تجزیه سیترات را داشته و با قلیایی کردن محیط کشت در حضور معرف BTB، محیط کشت از رنگ سبز به رنگ آبی تغییر کرد. بررسی آزمون نشاسته گویای آن بود که در هیچ یک از موارد هاله‌ای کدر در اطراف جدایه‌ها مشاهده نشد. نتایج حاصل رنگ‌آمیزی گرم نشان داد که همه جدایه‌ها بجز جدایه (U3)، گرم مثبت بوده با مشاهده جدایه‌ها در زیر میکروسکوپ، تمام جدایه‌ها به شکل باسیل بودند. آزمون کاتالاز نشان می‌دهد که تمامی جدایه‌ها هوازای بودند. نتایج حاصل از فلورسانس بودن جدایه‌ها نشان داد که بعد از کشت باکتری در محیط King B و قرار دادن در نور لامپ UV هیچ تغییر رنگ مشاهده نشد و بیانگر عدم وجود خاصیت فلورسانس در جدایه‌ها می‌باشند (جدول ۲) (۱۹).



شکل ۲- منحنی رشد جدایه‌های میکروبی
Figure 2- Growth curve of microbial isolates

داده شده است. خاک مورد استفاده دارای بافت شن، غیر شور (۱/۶۸ دسی‌زیمنس بر متر)، pH حدود خنثی و با مقدار کربن آلی (۰/۴۳ درصد) کم بود.

بررسی مقاومت فروروی و آزمون فرسایش بادی
برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بستر مورد استفاده در بررسی مقاومت فروروی و آزمون فرسایش بادی در جدول ۳ نشان

جدول ۳- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بستر مورد استفاده

Table 3- Some physical and chemical peroperties of the studied soil

بافت خاک Soil texture	pH	هدایت الکتریکی EC	تخلخل Prosity	رس Clay	سیلیت Silt	شن Sand
		(dS.m ⁻¹)	%	%	%	%
شنی Sandy	7.1	1.68	54	0	0	100

الف) مقاومت فروروی

شیمیایی را کاتالیز کنند و در نتیجه مواد معدنی را رسوب داده و خصوصیات مکانیکی خاک را دچار تغییر سازند ولی در غیر این صورت با افزایش عمق، میزان مقاومت و نیز درصد کربنات کلسیم تشکیل شده کاهش می‌یابند. همچنین نتایج نشان داد که دو محلول باکتری با اوره و کربنات کلسیم در کنار هم تأثیر چشمگیری در افزایش مقاومت و کاهش فرسایش بادی داشتند. همچنین افزایش مقاومت ناشی از به‌سازی زیستی تنها به مقدار کلسیت تشکیل شده بستگی ندارد بلکه محل تشکیل رسوب، تعداد پیوندها و سایر متابولیت‌های آزاد شده در اثر فعالیت باکتری نیز مؤثرند (۱۷).

ب) فرسایش بادی

نتایج مربوط به مقدار خاک فرسایش یافته در تیمارهای مختلف و همچنین در سرعت‌های مختلف باد حاصل از تونل باد نشان داد (شکل ۳) که با افزایش سرعت باد از ۱ تا ۹ متر بر ثانیه، میزان فرسایش بادی در همه نمونه یکسان و صفر بوده است اما با افزایش سرعت باد از ۹/۴ متر بر ثانیه، در نمونه شاهد (بدون باکتری و بدون عامل سیمانی) فرسایش بادی اتفاق افتاد و باد با این سرعت توانست ذرات ماسه را حرکت دهد پس می‌توان نتیجه گرفت که حد آستانه فرسایش بادی برای این تیمار ۹/۴ متر بر ثانیه بود.

نتایج حاصل از مقاومت فروروی نشان داد (جدول ۴) که اثر اصلی تیمار میکروبی و غلظت کلرید کلسیم و اثر متقابل آنها بر مقاومت به فروروی در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. در همه سطوح استفاده از دو محلول باکتری و عامل سیمانی تأثیر معنی‌داری در افزایش مقاومت فروروی نسبت به شاهد داشتند (جدول ۵). افزایش مقاومت فروروی در نمونه حاوی MICP می‌تواند به دلیل تشکیل رسوب کربنات کلسیم در لایه سطحی خاک باشد (۹). مقاومت فروروی در تیمار شاهد (بدون باکتری و بدون محلول سیمانتاسیون) بطور میانگین ۰/۰۰۱ مگاپاسکال و همچنین در تیمار (بدون باکتری ولی دارای محلول عامل سیمانی) بطور میانگین ۰/۹۷ مگاپاسکال در غلظت ۰/۱ مولار برآورد شد. همچنین در غلظت ۰/۱ مولار جدایه U8 بیشترین مقاومت را داشته که مناسب برای خاک‌هایی با شوری کم می‌باشد. در غلظت ۰/۵ مولار جدایه U40 دارای بهترین عملکرد و مقاومت به فروروی (۱۳/۲۴ مگاپاسکال) و در غلظت‌های ۱ مولار جدایه U3، بهترین پاسخ را داشت (۱۳/۵۶ مگاپاسکال) که می‌توان یک جدایه مناسب برای خاک‌های مناطق شور به‌ویژه مناطق اطراف دریاچه ارومیه در نظر گرفت. زمانی که مواد غذایی مناسب برای میکروارگانیسم‌ها فراهم باشد می‌توانند در زیرسطح، واکنش‌های

جدول ۴- تجزیه واریانس مقاومت فروروی

Table 4- Analysis of variance of soil penetration resistance

منبع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square
مقاومت فروروی Penetration resistance		
(a) Microbial treatment تیمار میکروب	7	175.37**
(b) Concentration غلظت	2	37.62**
a×b	14	15.36**
Error اشتباه	48	0.21

ns و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

ns and **, non- significant and significant at 1% probability levels

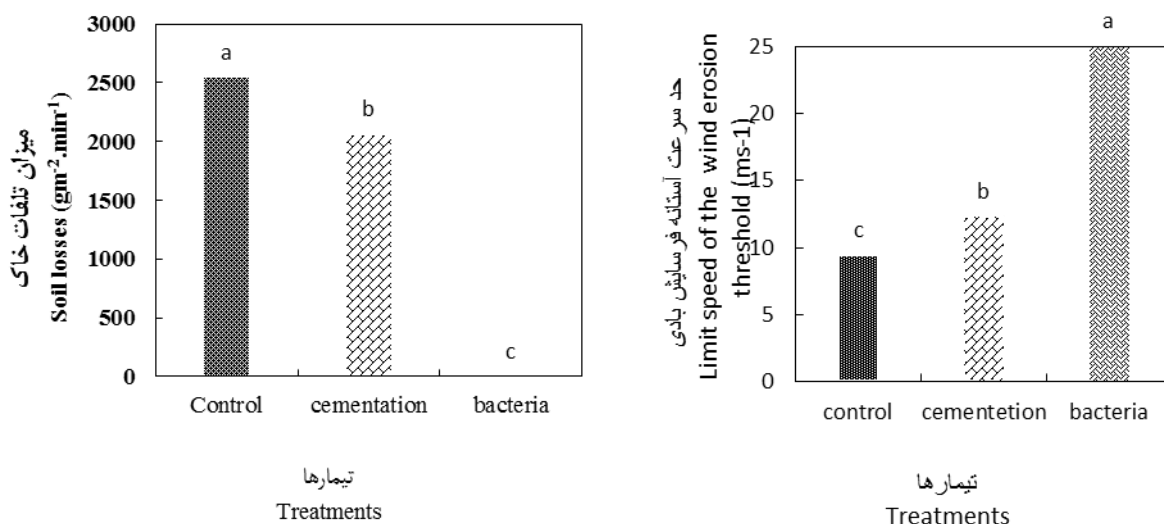
جدول ۵- نتایج حاصل از مقاومت فروروی (بر حسب مگاپاسکال) در ۵ سانتی‌متری از سطح خاک

Table 5- The results of soil penetration resistance at 5 cm of soil depth

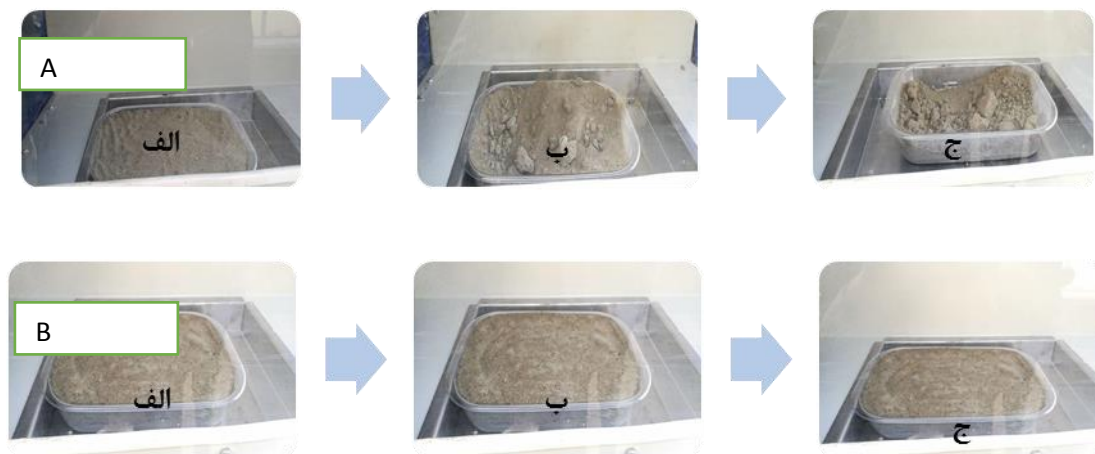
باکتری Bacteria	سطوح مختلف کلرید کلسیم به همراه اوره (مولار) Different levels of calcium chloride and urea (molar)		
	0.1	0.5	1
<i>B. pasteurii</i>	7.29 ^f	9.03 ^e	6.27g
U3	9.08e	10.26cd	13.56a
U8	12.94a	10.7bcd	6.04g
U16	4.63h	5.83g	1.21ij
U35	6.56fg	10.84bc	1.87i
U40	9.99d	13.24a	11.16b
Control	0.0001k	0.0001k	0.0001k
Cementation agent	0.97j	1.13ij	0.0001k

تیمار بدون باکتری اما با محلول عامل سیمانی به ترتیب ۲۵۴۲ و ۲۰۵۷ گرم بر متر مربع در دقیقه بدست آمد. این در حالی است که در نمونه‌های MICP، پس از انجام آزمون تونل باد، میزان تلفات خاک برابر صفر گرم بر متر مربع در دقیقه بود (شکل ۴). پس می‌توان بیان داشت که سرعت آستانه فرسایش بادی برای نمونه‌های MICP بالاتر از حداکثر سرعت تونل باد (۲۵ متر بر ثانیه) می‌باشد (۸ و ۹).

همچنین تیمار بدون باکتری اما با محلول عامل سیمانی، با افزایش سرعت باد از ۱۲/۳ متر بر ثانیه، فرسایش بادی شروع شد و باد با این سرعت توانست ذرات ماسه را حرکت دهد پس می‌توان نتیجه گرفت که حد آستانه فرسایش بادی برای این تیمار ۱۲/۳ متر بر ثانیه بود (شکل ۳). میزان ذرات ماسه از دست رفته در اثر فرسایش بادی در نمونه شاهد (بدون باکتری و بدون محلول سیمانی‌کننده) و



شکل ۳- حد سرعت آستانه فرسایش بادی (ms^{-1}) و میزان تلفات خاک ($\text{gm}^{-2}.\text{min}^{-1}$) در سطوح مختلف تیمار میکروبی
Figure 3- Limit speed of the wind erosion threshold (ms^{-1}) and Soil losses ($\text{gm}^{-2}.\text{min}^{-1}$) at different levels of microbial treatments



شکل ۴- نتایج حاصل از تونل باد؛ A: نمونه شاهد، B: نمونه MICP،
الف: سرعت باد ms^{-1} ، ب: سرعت باد $9/4 \text{ ms}^{-1}$ (باد آهسته)، ج: سرعت باد 25 ms^{-1} (باد شدید)

Figure 4- Result of the wind tunnel; A: control samples, B: MICP samples, a: wind speed (0 ms^{-1}), b: wind speed ($9/4 \text{ ms}^{-1}$), c: wind speed (25 ms^{-1})

نتیجه‌گیری

طبق نتایج بدست آمده، تفاوت در مقدار فرسایش بین تیمارهای شاهد (بدون باکتری و بدون محلول عامل سیمانی)، تیمار بدون باکتری ولی با محلول عامل سیمانی و تیمارهای MICP (حضور باکتری و محلول سیمانی کننده) ارتباط مستقیمی با حضور محلول باکتری در خاک دارد. به‌طوری‌که مقدار فرسایش خاک در تیمار MICP در سرعت باد ۲۵ متر در ثانیه به صفر رسید که این نشان دهنده تأثیر بسیار چشمگیر MICP در کنترل فرسایش بادی به‌ویژه در سرعت‌های بالای باد دارد در حالیکه جغفری شالکوهی و همکاران (۱۳۹۴)، که از مواد پلیمری (نظیر پلیمر امولسیون سلولوزی) برای تثبیت ریزدانه‌ها برای مقابله با فرسایش بادی استفاده کرده بودند، میزان فرسایش خاک به‌طور میانگین ۱۵۲ گرم بر متر در دقیقه گزارش شد. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده، اعمال تیمارهای MICP در سطح خاک علاوه بر اینکه مقاومت آن را در برابر تنش برشی جریان باد افزایش داده، مقاومت خاک در مقابل نیروی فروری را نیز بالا برده است. افزایش مقاومت فروری تیمارهای MICP می

منابع

- 1- Alhour M.T. 2013. Isolation, Characterization and Application of Calcite Producing Bacteria from Urea Rich Soils. The Master thesis of science in biotechnology. Islamic University – Gaza.
- 2- Al-Thawadi S.M. 2008. High Strength In-situ Biocementation of Soil by Calcite Precipitating Locally Isolated Ureolytic Bacteria. Ph.D thesis for Biological Sciences & Biotechnology, Faculty of Murdoch University, Perth, Western Australia. (In Persian with English abstract)
- 3- Cornelis W.M., and Gabriels D. 2005. Optimal windbreak design for wind-erosion control. Journal of Arid Environments 61(2): 315-332.
- 4- DeJong J.T., Mortensen B.M., Martinez B.C., and Nelson D.C. 2010. Bio-mediated soil improvement. Ecological Engineering 36: 197-210.
- 5- Ekhtesasi M.R., and Sepehr A. 2009. Investigation of wind erosion process for estimation, prevention, and control of DSS in Yazd-Ardakan plain. Environmental Monitoring and Assessment 159: 267-280.
- 6- Goudie A.S. 2009. Dust storms: recent developments. Journal of Environmental Management 90: 89-94.
- 7- Azimzadeh H., and Fotouhi F. 2014. The study on the effects of desert pavement on wind erodibility (Case study: Yazd- Ardakan plain). Iranian Journal of Rangeland and Desert Research 20(4): 695-705. (In Persian)
- 8- Hoshmand A. 2012. Laboratory evaluation of effective factors on bacterial deposition of calcium carbonat in sand. The theses of sahand industrial University. Faculty of civil Engineering.
- 9- Kahani M., Kalantari F., Bazzazzadeh R., and Mirzaii B. 2012. Biological calcium carbonate sedimentation in sandy soils and its effect on increasing soil resistance. Journal of Environmental Science and Engineering 52: 11-19. (In Persian with English abstract).
- 10- Li J., Okin G.S., Alvarez L., and Epstein H. 2007. Quantitative effects of vegetation cover on wind erosion and soil nutrient loss in a desert grassland of southern New Mexico, USA. Biogeochemistry 85(3): 317-332.
- 11- Maleki Kakler M., Ebrahimi S., Asadzadeh F., and Emami Tabrizi M. 2016. Evaluation efficiency of carbonate for stabilization of sandy soils. Iran Water and soils Research. 47(2): 407-415. (In Persian with English abstract)
- 12- Khosroshahi M., Abtahi M., Kashki M.T., Lotfinasab S., Dargahian F., and Ebrahimi Z. 2017. Determining deserts domain of Iran aspect of natural environmental factors. Iranian Journal of Rangeland and Desert Research 24(2): 404-417. (In Persian)
- 13- Ekhtesasi M.R., and Hazirei F. 2015. Effects of cement mulch combinations on sand dunes fixation. Journal of Rangeand Watershed Management 68(4): 739-750. (In Persian)

تواند به دلیل فعالیت جدایه‌های باکتری، فعل و انفعالات شیمیایی و تشکیل رسوب کربنات کلسیم در بین حفرات خاک باشد که سبب ایجاد یک لایه سخت شده است. همچنین مقاومت به‌دست آمده با استفاده از باکتری‌های جداسازی شده، بیانگر این مطلب است که میکروارگانیسم‌های ناشناخته بسیاری وجود دارند که می‌توانند سیمانته‌شدن زیستی به واسطه رسوب میکروبی کربنات کلسیم را هر چه بهتر و مقاوم‌تر حتی نسبت به باسیلوس پاسته‌آوری انجام دهند و احتمالاً با توجه به بومی بودن، استقرارپذیری بهتری خواهند داشت این در حالی است که کاهانی و همکاران (۱۳۹۱)، که از باکتری باسیلوس پاسته‌آوری به‌منظور به‌سازی زیستی کربنات کلسیم استفاده استفاده کرده بود، که از طریق تزریق تک فازی محلول‌های باکتری و سیمانتاسیون و بعد از گذشت ۲۸ روز میزان مقاومت فروری نمونه‌ها ۸۰۰ کیلو پاسکال گزارش کردند (کاهانی و همکاران، ۱۳۹۱). همچنین میزان مقاومت فروری در نمونه‌های MICP که توسط ملکی کالکر و همکاران (۱۳۹۴) صورت گرفته است، برابر با ۵۶ کیلو پاسکال گزارش شد.

- 14- Mortensen B.M., and DeJong J.T. 2011. Strength and stiffness of MICP treated sand subjected to various stress paths. In *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*. (pp. 4012-4020).
- 15- Movahedan M., Abbasi N., and Keramati M. 2012. Wind erosion control of soils using polymeric materials. *Eurasian Journal of Soil Science* 1(2): 81-86.
- 16- Nordstrom K.F., and Hotta S. 2004. Wind erosion from cropland in the USA: a review of problems, solutions and prospects. *Geoderma* 121(3-4): 157-167.
- 17- Rezaei Banafsheh M., Zeraei I., and Zanganeh S. 2013. Study the effects of dust storms on human life and the environment. *First National Geography Conference, Tehran*. page 76-86. (In Persian with English abstract)
- 18- Shafabakhsh K., and Ebrahimi S. 2009. Guide for fixing pavement layers and roads. *Transportation Research Institute publication*. Second edition.
- 19- Sharifi M. 1994. Interpretation and principles of biochemical tests in medical bacteriology. first edition. *Tabriz publication*.
- 20- Skidmore E.L., and Hagen L.J. 1977. Reducing wind erosion with barriers. *Transactions of the ASAE*, 20(5): 911-0915.
- 21- Song H.W. 2007. Corrosion monitoring of reinforced concrete structures-A review. *International Journal of Electrochem. Science* 2: 1-27.
- 22- Tibke G. 1988. Basic principles of wind erosion control. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 22: 103-122.
- 23- Toure A.A., Rajot J.L., Garba Z., Marticorena B., Petit C., and Sebag D. 2011. Impact of very low crop residues cover on wind erosion in the Sahel. *Catena* 85(3): 205-214.
- 24- Van Paassen L.A., Harkes M.P., Van Zwieten G.A., Van der Zon W.H., Van der Star W.R.L., and Van Loosdrecht M.C.M. 2009. Scale up of BioGrout: a biological ground reinforcement method. *Proceedings of the 17th International conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Alexandria, Egypt*, Pp: 2328-2333.
- 25- Van Paassen L.A., Daza C.M., Staal M., Sorokin D.Y., Van der Zon W., and Van Loosdrecht M.C.M. 2009. Potential soil reinforcement by biological denitrification. *Ecological Engineering* In Press, Corrected Proof.
- 26- Whiffin V.S. 2004. Microbial CaCO₃ Precipitation for the production of Biocement. Ph.D thesis for Biological Sciences & Biotechnology, Faculty of Murdoch University, Perth, Western Australia.
- 27- Young D.L., and Schillinger W.F. 2012. Wheat farmers adopt the undercutter fallow method to reduce wind erosion and sustain profitability. *Soil and Tillage Research* 124: 240-244.
- 28- Yua J.J., Smithson S.L., Thomasa P.W., Kirklandb T.N., and Cola G.T. 1997. Isolation and characterization of the urease gene (URE) from the pathogenic fungus *Coccidioides immitis*. *Gene* 198: 387-391.
- 29- Zamani S., and Mahmoodabadi M. 2013. Effect of particle-size distribution on wind erosion rate and soil erodibility. *Archives of Agronomy and Soil Science* 59(12): 1743-1753.



Isolation of Efficient Bacteria in Microbial-induced Calcite Precipitation and Evaluation of their Ability in Control of Windy Erosion of Saline Soils around Urmia Lake

M. Moinfar¹- M.H. Rasouli-Sadaghiani²- M. Barin^{3*}- F Asadzadeh⁴

Received: 08-07-2019

Accepted: 27-11-2019

Introduction: Dust is one of the most important destructive phenomena in the world, that annually causing damage to human health and the environment. This issue ranks after two major challenges of climate change and water scarcity as the third most important challenge facing the world in the 21st century that is considered. Microbial-induced calcite precipitation (MICP) is a relatively green and sustainable soil improvement technique. It utilizes biochemical process that exists naturally in soil to improve engineering properties of soils. The calcite precipitation process is uplifted by the mean of injecting higher concentration of urease positive bacteria and reagents into the soil. In this process, the enzyme present in the bacteria hydrolyzes the urea in the environment and through reacting with the calcium ion, leads in the deposition of calcium carbonate. The main objective of this study is isolation native ureolytic bacteria from different soil of around Urmia Lake and then, the evaluation their efficiency in the MICP for stabilization of sandy soils and reduce windy erosion.

Materials and Methods: In order to isolate ureolytic bacteria, 25 soil samples were taken from different land use in West Azarbaijan province, Iran. To increase the number of ureolytic bacteria in soil samples were used from the enrichment solution and then ureolytic bacteria were isolated and purified. These isolates were subjected to various biochemical tests, as well as the growth curve and urease activity were determined. In order to investigate the potential for soil improvement, a factorial experiment was conducted based on a completely randomized design with two factors including microbial treatment in eight levels (including five isolated bacteria (U3, U8, U16, U35 and U40) and *Bacillus pasteurii* (as control Positive), non-bacterial and non-cementation (as control negative) and non-microbial but with cementation solution treatments) and another factor including different concentrations of calcium chloride solution with urea at three levels (0.1, 0.5 and 1 molar), in three replications. After injection of cementation solution and bacterial solution to soil, penetration resistance and windy erosion rates in sandy soil were assessed

Results and Discussion: In study, overall 45 isolates of the bacteria were isolated and purified. Among of 44 isolates, five bacterial isolates (U3, U8, U16, U35 and U40) had the highest urease activity. The growth curve of bacterial isolates showed that the highest urease activity and microbial population were in the time period of 13 to 16 hours after microbial culture, which it is represents the best time use bacterial solution in the MICP process. According to the results of soil improvement tests, the amount of soil erosion in the MICP treatment at a wind speed of 25 m/s was zero and the rate of penetration resistance was averaged over 13 MPa, which has a very impressive impact on MICP in controlling wind erosion, especially at high speeds of wind. The results showed that U3 and U16 isolates had the highest amount of urea hydrolysis and also U16 and U3 had the lowest and the highest tolerance to salinity, respectively. The results of the wind tunnel showed that the wind erosion threshold in negative control samples (non-bacterial and non-cementation) were 9.4 m/s and for MICP samples (including five isolated bacteria and *Bacillus pasteurii*) were much higher than the wind tunnel speed in the wind tunnel machine in Urmia university (25 m/s). The maximum penetration resistance (13.5 MPa) was obtained in the sample treated with U3 isolate and 1 molar calcium chloride, but negative control treatments (non-bacterial and non-cementation) as well non-microbial but with cementation solution treatments were 0 and 97.0 MPa, respectively.

Conclusion: The amount of soil wind erosion was zero in MICP treatment with the wind tunnel speed 25 m/s that indicates very important effects MICP to control wind erosion of sandy soils to compare control treatments (non-bacterial and non-cementation and non-microbial but with cementation solution) in high wind speeds. The application of MICP treatment in the soil, in addition to increasing its wind erosion resistance, also increased penetration resistance in the soil. Increasing the penetration resistance of MICP treatments (including five

1, 2, 3 and 4- Gratuated M.Sc., Professor, Assistant Professor and Associate Professor Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran, respectively.

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

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.69069

isolated and *Bacillus pasteurii*) can be due to the activity of bacterial isolates, chemical interactions, and the formation of calcium carbonate precipitation into soil cavities, which causes to form a hard layer in soil. Also, obtained resistance by using isolated bacteria indicates that there are many unknown microorganisms that can carry out MICP better than *Bacillus pasteurii* and probably they will be better compatible and establish because they are native.

Keywords: Biological cementation, Penetration resistance, Ureolytic bacteria, Windy erosion



اثر برخی تنظیم کننده‌های رشد و سورفکتانت بر گیاه گلرنگ در خاک آلوده به کروم

سمیرا کشاورز^۱ - رضا قاسمی فسائی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶

چکیده

کاربرد تنظیم کننده‌های رشد و سورفکتانت می‌تواند روش مؤثری برای مقابله با تنش‌هایی مانند آلودگی فلزات سنگین باشد. به منظور بررسی اثر تنظیم کننده‌های رشد و سورفکتانت بر رشد و غلظت عناصر و شاخص‌های گیاه‌پالایی در گیاه گلرنگ، آزمایشی گلخانه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی و به صورت فاکتوریل 4×3 شامل سه سطح سورفکتانت (شاهد، $2/5$ و 5 میلی‌مول در کیلوگرم) و چهار سطح تنظیم کننده رشد گیاه (شاهد، جیبرلیک اسید، ایندول استیک اسید و بنزیل آمینوپورین) با سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد اضافه کردن سورفکتانت و تنظیم کننده‌های رشد باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی، ضریب تجمع زیستی، شاخص جذب، غلظت و جذب کروم در اندام هوایی شدند. افزودن سورفکتانت باعث کاهش غلظت و جذب آهن در گیاه تنظیم کننده‌های رشد شد، اما در حضور تنظیم کننده‌های رشد گیاهی غلظت آهن افزایش می‌یابد. کاربرد 5 میلی‌مول بر کیلوگرم سورفکتانت میانگین غلظت منگنز، مس و روی را کاهش داد. درحالی‌که اضافه کردن $2/5$ میلی‌مول بر کیلوگرم سورفکتانت غلظت فلزات را افزایش داد. اگرچه افزودن 5 میلی‌مول بر کیلوگرم سورفکتانت وزن خشک را افزایش می‌دهد اما اثر مطلوبی روی افزایش غلظت عناصر در گیاه ندارد. بنظر می‌رسد که استفاده از تنظیم کننده‌های رشد گیاه مقاومت گیاه را به سمیت کروم افزایش می‌دهد که احتمالاً از طریق افزایش جذب عناصر است. با توجه به نتایج استفاده از سورفکتانت به همراه تنظیم کننده‌های رشد گیاه می‌تواند علاوه بر افزایش توانایی گلرنگ در مقابله با سمیت کروم، گیاه‌پالایی را نیز افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: ایندول استیک اسید، بنزیل آمینوپورین، توپین ۸۰، جیبرلیک اسید، عناصر کم مصرف

مقدمه

افزایش آلودگی‌های آلی و غیر آلی خاک می‌شود (۱۶). در ایران علاوه بر استفاده از کروم در صنعت، این فلز سنگین در سازندهای فایولیتی وجود دارد و منابع آب و خاک منطقه را آلوده می‌کند، و به دنبال آن سلامت انسان و محیط زیست را با خطر مواجه می‌کند. کروم یکی از مهم‌ترین فلزات سنگین است که در طبیعت با ظرفیت های $(+6-1)$ دیده می‌شود و خطر سمیت آن نیز اصولاً به وضعیت اکسیدی آن بستگی دارد (۱۰). به عنوان مثال Cr^{+3} به عنوان یک عنصر ضروری برای متابولیسم گلوکز و لیپید و به عنوان یک کوفاکتور برای افزایش فعالیت انسولین است (۲)، اما Cr^{+6} با حلالیت بیشتر از Cr^{+3} ، فلزی سرطان‌زا است و موجب بافت مردگی، برونشیت، آسم و درماتیت در انسان می‌شود (۱۵). کروم حتی در غلظت‌های پایین نیز خطرناک است و گیاهان را با کاهش جوانه‌زنی، بذری، کاهش رشد ریشه و ساقه، و کاهش تولید ماده خشک مواجه می‌کند (۱۸). این اختلالات در رشد گیاه ممکن است ناشی از اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیک طبیعی مثل فتوسنتز، نسبت آب، عناصر غذایی، و فعالیت‌های آنزیمی توسط Cr^{+6} باشد (۳۲). خاک تمایل زیادی به ارتباط و تشکیل کمپلکس با فلزات سنگین

با افزایش جمعیت کره زمین آلودگی‌های ایجاد شده توسط انسان نیز زیاده‌تر می‌شود. یکی از آلودگی‌های خطرناک محیط زیست آلودگی خاک توسط فلزات سنگین است. فلزات سنگین به گروهی از فلزات (۵۳ عنصر) با جرم مخصوص بیش از پنج گرم بر سانتی‌متر مکعب اطلاق می‌شود. برخی فلزات سنگین مانند آهن، منگنز، روی، مس، کبالت و مولیبدن برای رشد موجودات زنده ضروری هستند و برخی همچون نیکل در سیستم آنزیمی برخی موجودات زنده نقش دارند. در این میان فلزاتی همچون سرب، کادمیوم، اورانیم، تالیم، کروم، نقره و جیوه سمی می‌باشند (۱). فلز سنگین کروم در صنایع فولاد، نساجی، رنگ‌سازی، صیقل و همچنین به عنوان کاتالیزور در کارخانه‌ها استفاده می‌شوند (۴). آبیاری مداوم گیاهان با آب‌های آلوده صنعت باعث

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

(*)- نویسنده مسئول:

(Email: ghasemif@gmail.com)

DOI: 10.22067/jsw.v34i2.81521

و کاهش حلالیت آنها دارد، به منظور از بین بردن این محدودیت و افزایش دسترسی فلزات سنگین استفاده از تیمارهای شیمیایی امیدوار کننده است (۸). اخیراً محققان زیادی کارایی سورفکتانت‌ها را در حذف ترکیبات آلی و فلزات سنگین مورد مطالعه قرار داده‌اند. سورفکتانت‌ها معمولاً ترکیبات آلی هستند که دارای گروه‌های هیدروفوبیک (آبگریز) و گروه‌های هیدروفیلیک (آبدوست) هستند که باعث افزایش حلالیت فلزات سنگین در محلول آبی و تسهیل جذب آنها به ترکیبات آبگریز می‌شود. سورفکتانت‌ها بر اساس نوع بار گروه‌های عامل تقسیم بندی می‌شوند. سورفکتانت‌های غیر یونی در قسمت سر خود بی‌بار هستند، اگر بار منفی باشد سورفکتانت آنیونی و اگر مثبت بود سورفکتانت کاتیونی و گاهی قسمت سر دارای هر دو بار مثبت و منفی است که به آن آمفوتریک می‌گویند (۲۷). استفاده از سورفکتانت می‌تواند جذب فلز روی سطح خاک را کاهش داده و موجب تحرک بیشتر آنها شود (۲۳). اما استفاده از سورفکتانت‌های کاتیونی به علت جذب توسط بار منفی ذرات خاک مناسب نیست. سورفکتانت‌ها جذب فلزات از خاک را بهبود می‌بخشند (۵) پس می‌توانند به منظور گیاه پالایی مورد استفاده قرار گیرند. بنظر می‌رسد که فلزات سنگین عمدتاً از طریق ترکیب با پراکسیدهای مرتبط با سورفکتانت و تبادل یونی از خاک حذف می‌شوند (۳۶). بررسی پالایش مس کادمیوم و سرب از خاک با استفاده از سدیم دو دسیل سولفات آنیونی، سدیم دی اکتیل سولفو سوکسینات آنیونی و تریتیون غیر آنیونی نشان داد که سدیم دو دسیل سولفات مؤثرترین سورفکتانت در برطرف کردن آلودگی فلزات بود و پالایش مس، کادمیوم و سرب را به ترتیب ۵/۵، ۲۸/۸ و ۲۹/۱ برابر افزایش داد (۲۹). توین ۸۰ یک سورفکتانت غیر یونی است که برای افزایش حلالیت ترکیبات آلی استفاده می‌شود. این سورفکتانت به علت پتانسیل حلالیت بالا، قیمت نسبتاً ارزان و قطبیت مناسب است (۱۳). بررسی اثر گیاه پالایی به همراه سورفکتانت در شرایط مختلف و تعیین سطح بهینه آن برای گیاه پالایی حائز اهمیت است (۷).

امروزه محلول‌پاشی برگی عناصر غذایی، آمینو اسیدها، اسید هیومیک، اسید فولویک، عصاره جلبک‌های دریایی و تنظیم کننده‌های رشد گیاهی مثل جیبرلیک اسید، ایندول استیک اسید و بنزیل آمینوپورین با اهداف مختلفی همچون افزایش محصول، کاهش مواد شیمیایی مضر و افزایش مقاومت گیاه در تنش‌های شوری، خشکی و فلزات سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرند. تنظیم کننده‌های رشد گیاهی که در حال حاضر در دنیا دارای کاربردهای عملی متعدد و مهم در کشاورزی هستند شامل اکسین‌ها، سایتوکینین‌ها، جیبرلین‌ها، آبسزیک اسید، براسینواستروئیدها و جاسمونات‌ها هستند (۲۴). این مواد دارای طیف وسیعی از اثرات بر گیاهان هستند و فعالیت آنها بستگی به غلظت مورد استفاده و عوامل محیطی دارد (۱۲). این ترکیبات به عنوان فرستنده‌های شیمیایی برای تنظیم فرآیندهای

فیزیولوژیکی طبیعی گیاهان، باعث افزایش پایداری گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیر زیستی و کاهش اثر سمیت فلزات سنگین بر روی گیاهان می‌شوند (۲۰). کاربرد بیولوژیک تنظیم کننده‌های رشد گیاهی می‌تواند سمیت کروم در گیاهان را تعدیل کند که احتمالاً به وسیله حفظ تعادل هورمونی گیاهان تحت تنش فلزات سنگین است (۱۹). جیبرلیک اسید یکی از مهم‌ترین تنظیم کننده‌های رشد است که پاسخ گیاهان را به تنش‌های بیرونی محیطی تنظیم کرده و تعدادی از ژن‌های تحریک کننده تنش را کنترل می‌کند (۲۸). جیبرلیک اسید تنش کروم را با بهبود سطح آنتی اکسیدان‌ها و پایداری فعالیت آنزیمی برای جذب نیتروژن باعث افزایش رشد گیاه می‌شود. بنابراین ممکن است کاربرد خارجی جیبرلیک اسید باعث تنظیم تعادل هورمونی داخلی گیاهان در وضعیت تنش کروم شود و به دنبال آن باعث بهبود رشد و عملکرد گیاه مورد نظر شود (۳۲). فراوانترین اکسین طبیعی ایندول استیک اسید است. ایندول استیک اسید طویل شدن سلول گیاهی، آغاز ریزش جانبی و رشد و نمو گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۶). بنزیل آمینوپورین جزو سایتوکینین‌ها بوده که به عنوان مفیدترین و مؤثرترین سایتوکینین جهت تکثیر شناخته شده و می‌تواند غالبیت انتهایی را کاهش و باعث جلوگیری از افزایش انتهایی روی جوانه‌های جانبی و تحریک تکثیر شاخساره‌های جانبی از این جوانه‌ها شود (۹). با برگ‌پاشی تنظیم کننده‌های رشد مانند ایندول استیک اسید، بنزیل آمینوپورین و سالیسیلیک اسید، جذب سرب توسط گیاه ذرت به طور معنی‌داری افزایش یافت (۳۳). اضافه کردن تنظیم کننده‌های رشد یکی از روش‌هایی است که باعث افزایش کارایی گیاه پالایی گیاهان و افزایش تحمل گیاه به تنش می‌شوند (۱۶). به طور کلی ممکن است استفاده از تنظیم کننده‌های رشد در گیاه پالایی کروم نیز مؤثر باشند.

در میان روش‌های بیولوژیکی گیاه پالایی یک روش مؤثر سازگار با محیط زیست است که اساس آن استفاده از انرژی خورشیدی است. در سال‌های اخیر استفاده از گیاه پالایی به همراه سایر افزودنی‌ها (مواد) مورد توجه محققان قرار گرفته است (۱۷). گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) یک گیاه اقتصادی است که در قدیم از گل آن به عنوان یک منبع رنگ برای رنگ‌آمیزی غذا و پارچه استفاده می‌شده است. بعدها از آن به عنوان روغن خوراکی، غذای حیوانات مانند پرندگان، استفاده‌های دارویی و سوخت‌های زیستی مورد استفاده قرار گرفته است (۳۵). مطالعات نشان می‌دهد که سطح آستانه آسیب گیاه گلرنگ در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین ۶۰ میلی گرم در کیلوگرم است و برای کاشت آن در خاک آلوده به فلزات سنگین باید اقدامات کنترلی مناسب همچون استفاده از اصلاح کننده ها انجام شود (۲۱). این مطالعه عمدتاً بر دو نوع از اصلاح کننده‌ها تمرکز دارد تنظیم کننده‌های رشد و سورفکتانت توین ۸۰. این مطالعه در درجه اول پتانسیل گیاه پالایی گلرنگ در خاک آلوده به

کروم مورد بررسی قرار می‌دهد و در درجه دوم اثرات سورفکتانت، تنظیم کننده‌های گیاهی و استفاده همزمان تنظیم کننده‌های رشد و سورفکتانت را مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها

جهت انجام این پژوهش از لایه ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر خاک از سری دانشکده کوی اساتید واقع در استان فارس منطقه باجگاه با عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۴۴ دقیقه و ۵۰ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۴ دقیقه و ۱۰ ثانیه شرقی با نام علمی Fine, mixed, calcareous, mesic, Typic calcixerep تهیه شد. خاک هوا خشک شده و از الک دو میلی‌متر عبور داده شد و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن اندازه‌گیری شد. بافت خاک با روش هیدرومتر (۱۱)، مقدار پهاش در خمیر اشباع به وسیله پهاش متر، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع به وسیله هدایت‌سنج الکتریکی (۳۱)، ماده آلی به روش اکسایش با بی‌کرومات پتاسیم و تیتراژ کردن با فروسولفات آمونیوم (۳۰)، غلظت آهن، روی، مس و منگنز به روش عصاره‌گیری با دی تی پی ۱ (۲۵) اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی و به صورت فاکتوریل 4×3 شامل سه سطح سورفکتانت (شاهد، $2/5$ میلی‌مول در کیلوگرم و 5 میلی‌مول در کیلوگرم) و چهار سطح تنظیم کننده رشد (شاهد، جیبرلیک اسید، ایندول استیک اسید و بنزیل آمینوپورین) با سه تکرار و تعداد نهایی ۳۶ گلدان انجام شد. سورفکتانت غیر یونی توین ۸۰ (Polyethylene glycol sorbitan monooleate) با فرمول

شیمیایی $C_{64}H_{124}O_{26}$ و وزن ملکولی ۱۳۱۰ گرم بر مول تهیه شد (۳). پس از اعمال تیمار سورفکتانت یک کیلوگرم خاک عبور یافته از الک دو میلی‌متر در هر کدام از گلدان‌ها ریخته شد و به منظور جبران کمبود احتمالی برخی عناصر غذایی بر اساس نتایج آزمون خاک اضافه شدند، بدین صورت که 50 میلی‌گرم نیتروژن در کیلوگرم خاک از منبع اوره 46 درصد، 10 میلی‌گرم منگنز در کیلوگرم خاک از منبع سولفات منگنز، 5 میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک از منبع سولفات روی، $2/5$ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک آهن از منبع سکستین آهن 6 درصد و $2/5$ میلی‌گرم در کیلوگرم مس از منبع سولفات مس به خاک اضافه شد. کل گلدان‌ها در سطح 5 میلی‌گرم در کیلوگرم با کروم آلوده شدند و به مدت یک ماه انکوباسیون شدند. در طول زمان انکوباسیون نمونه‌های خاک با آب مقطر استریل در حد ظرفیت مزرعه نگهداری شد. بذره‌های گلرنگ از رقم گلدشت (*Carthamus tinctorius* L.) پس از ضدعفونی با هیپوکلرید سدیم 10 درصد، سه بار با آب مقطر شست و شو داده شد و برای کاشت آماده گردید. در هر گلدان پنج بذر گلرنگ کاشته شد. گلدان‌ها در گلخانه با شدت روشنایی 10000 لوکس و $14:10$ ساعت دوره روشنایی و دمای $15-28$ درجه سلسیوس نگهداری شدند و روزانه با آب مقطر در حدود ظرفیت مزرعه با وزن کردن هر گلدان و افزودن آب مقطر آبیاری شدند. تیمار تنظیم کننده‌های رشد به صورت محلول‌پاشی در سه مرحله 20 ، 30 و 40 روز با غلظت یک میلی‌مولار پس از کاشت اعمال شدند.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 1- Some physical and chemical characteristics of the used soil

ویژگی	مقدار/تعریف
Property	Amount/definition
کلاس بافت	لوم رسی شنی
Soil textural class	Sandy clay loam
اسیدیته	7.6
pH	
قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع (دسی‌زیمنس بر متر)	2.15
EC (ds.m ⁻¹)	
ماده آلی	1.3
Organic matter	
آهن قابل عصاره‌گیری بادی تی پی ۱ (میلی‌گرم در کیلوگرم)	5.1
DTPA extractable Fe (mg.kg ⁻¹)	
روی قابل عصاره‌گیری بادی تی پی ۱ (میلی‌گرم در کیلوگرم)	1.3
DTPA extractable Zn (mg.kg ⁻¹)	
مس قابل عصاره‌گیری بادی تی پی ۱ (میلی‌گرم در کیلوگرم)	0.6
DTPA extractable Cu (mg.kg ⁻¹)	
منگنز قابل عصاره‌گیری بادی تی پی ۱ (میلی‌گرم در کیلوگرم)	3
DTPA extractable Mn (mg.kg ⁻¹)	

۶۰ روز پس از کاشت گیاهان از محل طوقه برداشت شدند و اندام هوایی با آب مقطر شسته شدند و در آون با دمای ۶۵ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند و آسیاب شدند. غلظت کروم، آهن، روی، مس و منگنز در اندام هوایی به روش خاکستر خشک با اسید کلریدریک دو نرمال و با دستگاه جذب اتمی مدل (Shimadzu AA-670) اندازه گیری شد.

داده‌ها با نرم افزار آماری SAS 9.4 تجزیه و تحلیل و مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت.

برای محاسبه ضریب تجمع زیستی^۱ (BAC) از رابطه ۱ استفاده شد. شاخص جذب^۲ (UI) نیز از حاصلضرب ضریب ماده خشک در غلظت عنصر در اندام هوایی (میلی گرم در کیلوگرم) به دست آمد (رابطه ۲). ضریب ماده خشک از تقسیم وزن خشک گیاه به حداکثر وزن خشک به دست آمده در آزمایش محاسبه گردید (رابطه ۳) (۳۴).

$$(1) \text{ غلظت کروم در گیاه (میلی گرم در کیلوگرم) } / \text{ غلظت کروم در خاک (میلی گرم در کیلوگرم) } = \text{ ضریب تجمع زیستی}$$

$$(2) \text{ وزن خشک گیاه } / \text{ حداکثر وزن خشک گیاه } = \text{ ضریب ماده خشک}$$

$$(3) \text{ غلظت کروم در گیاه } \times \text{ ضریب ماده خشک } = \text{ شاخص جذب}$$

نتایج و بحث

وزن خشک اندام هوایی

از نظر آماری سطوح سورفکتانت، تنظیم کننده‌های رشد و اثر متقابل آنها در سطح یک درصد بر وزن خشک اندام هوایی اثر معنی دار دارند (جدول ۲). در این آزمایش یک تیمار شاهد بدون آلودگی کروم وجود داشت که با توجه به وزن خشک آن (۶/۳ گرم در گلدان) آلودگی کروم باعث کاهش رشد وزن خشک شده است. به طور کلی کروم در خاک آلوده به علت الکترونگاتیوی بالا با افزایش نفوذپذیری غشاء باعث تخریب اندام‌های سلولی، پروتئین و نوکلئیک اسید می‌شود. از دیگر اثرات کروم در گیاه می‌توان به کاهش هدایت مواد تولیدی، محتوای کلروفیل، فعالیت فتوسنتزی و سرعت تعرق اشاره کرد که کاهش رشد گیاه را به دنبال دارد (۲۲). گرچه در تیمارهای بدون تنظیم کننده رشد سورفکتانت اثر معنی‌داری بر وزن خشک اندام هوایی ندارد اما استفاده توام سورفکتانت و تنظیم کننده‌های رشد باعث بهبود وضعیت عملکرد می‌شود بدین صورت که استفاده از سطح

۵ میلی مول بر کیلوگرم سورفکتانت در تمامی تیمارهای همراه با تنظیم کننده‌های رشد وزن خشک را نسبت به شاهد هر کدام به صورت معنی‌داری افزایش داد (جدول ۳). طبق گزارشات سورفکتانت توپین ۸۰ اثر سمیت بر گیاه ذرت و یونجه نداشته است (۳ و ۷). از اثرات توپین ۸۰ که موجب افزایش رشد می‌شود می‌توان به افزایش دسترسی کربن برای ریزجانداران و یا افزایش نفوذپذیری ریشه و جذب بیشتر عناصر غذایی از خاک اشاره کرد (۱۳). یکی از اثرات آلودگی فلزات سنگین به هم ریختن تعادل هورمون‌های گیاهی است، پس اضافه کردن تنظیم کننده‌های گیاهی به طور مصنوعی می‌تواند راهکار خوبی برای جلوگیری از اثرات منفی فلزات سنگین باشد. طبق مشاهدات نیز اضافه کردن تنظیم کننده‌های رشد افزایش رشد گیاه را موجب شدند. بیشترین افزایش عملکرد مربوط به برگ‌پاشی جیبرلیک اسید است که باعث افزایش ۳/۸۶ برابری میانگین وزن خشک نسبت به شاهد شده است. جیبرلیک اسید با اثراتی همچون افزایش کل محتوای پروتئین، محتوای کل نیتروژن، جذب آمونیوم، فعالیت نیترات رداکتاز و دی هیدرو آسکوربات باعث افزایش رشد گیاه در آلودگی کروم می‌شود (۱۹). همانطور که در جدول مشخص است، اضافه کردن سورفکتانت به تنهایی افزایشی در وزن خشک ایجاد نکرده است. در گزارش آگنلو و همکاران در سال ۲۰۱۶ نیز توپین ۸۰ به تنهایی با افزایش نفوذپذیری ریشه منجر به اعمال سمیت در گیاه و به دنبال آن اثر منفی بر رشد گیاه می‌شود (۳)؛ اما می‌توان با استفاده توام سورفکتانت و تنظیم کننده‌های رشد شرایط را برای رشد گیاه مناسب کرد.

غلظت و جذب کروم اندام هوایی

با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) سورفکتانت، تنظیم کننده‌های رشد و اثر متقابل آنها در سطح یک درصد اثر معنی‌دار بر غلظت و جذب کروم در گیاه دارند. طبق گزارش اصلیلان و همکاران (۷) اضافه کردن سطوح سورفکتانت تا سطح چهار میلی مول بر کیلوگرم موجب افزایش غلظت و جذب سرب در اندام هوایی و ریشه شد. در پژوهش حاضر نیز اضافه کردن سطوح سورفکتانت باعث افزایش معنی‌دار غلظت و جذب کروم شد (جدول ۴). با اضافه کردن سطح پنج میلی مول در کیلوگرم سورفکتانت نسبت به سطح پایین‌تر آن افزایش معنی‌داری در غلظت کروم مشاهده نشد اما باعث افزایش معنی‌دار جذب کروم شد که به علت افزایش وزن حاصل از اضافه کردن ۵ میلی مول بر کیلوگرم سورفکتانت است (جدول ۳). اضافه کردن تنظیم کننده‌های رشد باعث افزایش معنی‌دار میانگین غلظت و جذب کروم اندام هوایی شدند. از بین تنظیم کننده‌های رشد برگ پاشی ایندول استیک اسید میانگین غلظت و جذب کروم را به ترتیب ۱/۵ و ۷/۶ برابر کرد. شفیق و همکاران (۳۳) نیز گزارش کردند که

1- Biological Accumulation Coefficient

2- Uptake Index

برگ‌پاشی برخی تنظیم کننده‌های رشد همچون سالیسیلیک اسید باعث افزایش جذب سرب اندام هوایی شد. در گیاه آفتابگردان نیز برگ‌پاشی سیتوکینین علاوه بر افزایش رشد گیاه غلظت فلز سنگین اندام هوایی را به طور معنی‌داری افزایش داد (۳۷).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر سورفکتانت، تنظیم کننده‌های رشد و اثر متقابل آنها بر برخی خصوصیات اندازه‌گیری شده
Table 2- Results of ANOVA of effect of surfactant, plant growth regulators and interactions on some measured parameters

منابع تغییرات Source of changes درجه آزادی Degree of freedom	سورفکتانت Surfactant	تنظیم کننده‌های رشد Growth regulators	سورفکتانت* تنظیم کننده‌های رشد Surfactant* Growth regulators	خطا Error
	2	3	6	24
وزن خشک Dry matter	45.3**	10.9**	6.43**	0.301
غلظت کروم Cr concentration	180**	85.4**	70.8**	11.5
جذب کروم Cr uptake	22475**	5347**	3108**	265
غلظت آهن Fe concentration	17284348**	1049134**	850020**	179612
ضریب تجمع زیستی Biological accumulation coefficient	7.21**	3.42**	2.83**	0.459
شاخص جذب کروم Cr uptake index	493**	117**	68.2**	5.82
جذب آهن Fe uptake	57138	11816020**	4010539	2072669
غلظت منگنز Mn concentration	856*	689*	849**	170
جذب منگنز Mn uptake	127634**	57820**	32304**	2155
غلظت مس Cu concentration	3489**	500*	948**	144
جذب مس Cu uptake	7426**	6427**	1911	865
غلظت روی Zn concentration	18465**	347	639	288
جذب روی Zn uptake	8917**	9359**	3163*	1069

** معنادار در سطح ۱ درصد، * معنادار در سطح ۵ درصد

**Significant at 1%, *Significant at 5%

جدول ۳- اثر سطوح سورفکتانت و تنظیم کننده‌های رشد بر وزن خشک اندام هوایی (گرم در گلدان)

Table 3- Influence of surfactant levels and plant growth regulators on shoot dry weight (g.pot⁻¹)

سورفکتانت (میلی مول در کیلوگرم) Surfactant (mmol.kg ⁻¹)	شاهد Control	جیبرلیک اسید Gibberellic acid	ایندول استیک اسید Indole acetic acid	بنزیل آمینوپورین Benzyl amino purine	میانگین Mean
0	0.717cd	0.750cd	0.883cd	0.883cd	0.808C
2.5	0.550d	1.88c	1.35cd	1.42cd	1.30B
5	0.557d	6.28a	6.53a	4.18b	4.39A
میانگین Mean	0.611C	2.97A	2.92A	2.16B	

در هر ستون و ردیف اعدادی که دارای حروف مشابهی هستند از نظر آماری در آزمون دانکن معنی‌دار نیستند.

Means followed by the same letter are not significantly different by Duncan's multiple range test.

جدول ۴- اثر سطوح سورفکتانت و تنظیم کننده‌های رشد بر غلظت (میلی گرم در کیلوگرم) و جذب کروم (میکروگرم در گلدان) اندام هوایی

Table 4- Influence of surfactant levels and plant growth regulators on shoot's Chromium concentration (mg.kg^{-1}) and uptake ($\mu\text{g.pot}^{-1}$)

میانگین Mean	بنزیل آمینوپورین Benzyl amino purine	ایندول استیک اسید Indole acetic acid	جیبرلیک اسید Gibberellic acid	شاهد Control	سورفکتانت (میلی مول در کیلوگرم) Surfactant (mmol.kg^{-1})
13.6B	9.5c	20.6ab	14.2bc	9.9c	0
21.1A	24.1a	18.9ab	20.5ab	20.9ab	2.5
18.8A	24.9a	21.6a	19.6ab	9.4c	5
				میانگین Mean	
	19.5A	20.3A	18.1A	13.4B	
10.9C	8.17c	17.4c	10.6c	7.33c	0
27.2B	33.5c	25.5c	37.6c	12.0c	2.5
96.2A	100b	143a	122ab	5.17c	5
				میانگین Mean	
	47.3A	61.9A	56.9A	8.1B	

در هر ستون و ردیف اعدادی که دارای حروف مشابهی هستند از نظر آماری در آزمون دانکن معنی دار نیستند.

Means followed by the same letter are not significantly different by Duncan,s multiple range test.

شاخص جذب کروم در گیاه شدند و کمترین شاخص جذب مربوط به گیاه بدون برگ‌پاشی تنظیم کننده رشد و کاربرد خاکی پنج میلی‌مول سورفکتانت است. شاخص جذب نشان دهنده پتانسیل حذف فلز سنگین از خاک است با توجه به جدول ۵ تنظیم کننده‌های رشد و سطوح سورفکتانت باعث افزایش معنی‌دار میانگین شاخص جذب کروم نسبت به میانگین شاهد شده است. صلی و حاج عباسی نیز گزارش کردند در آلودگی سرب و روی به ترتیب استفاده از دی اتیلن تری آمین پنتا استیک اسید (DTPA) و کود کمپوست شده باعث افزایش شاخص جذب فلز سنگین در گیاهان آفتابگردان و کلزا می شود (۳۴).

ضریب تجمع زیستی (BAC) و شاخص جذب (UI) کروم

طبق نتایج تجزیه واریانس سورفکتانت، تنظیم کننده‌های رشد و اثر متقابل آنها در سطح یک درصد بر ضریب تجمع زیستی و شاخص جذب کروم اثر معنی‌دار دارند (جدول ۲). مطابق جدول ۵ به ترتیب اضافه کردن سطح ۲/۵ و ۵ میلی‌مول بر کیلوگرم سورفکتانت باعث افزایش معنی‌دار به ترتیب ۵۵ و ۳۹ درصدی میانگین ضریب تجمع زیستی شده است. همچنین با اضافه کردن تنظیم کننده‌های رشد ضریب تجمع زیستی نسبت به میانگین شاهد افزایش معنی‌داری مشاهده شده است. برگ‌پاشی تنظیم کننده رشد ایندول استیک اسید و کاربرد خاکی پنج میلی‌مول سورفکتانت در کیلوگرم باعث بیشترین

جدول ۵- اثر سطوح سورفکتانت و تنظیم کننده‌های رشد بر ضریب تجمع زیستی و شاخص جذب کروم

Table 5- Influence of surfactant levels and plant growth regulators on Chromium's biological accumulation coefficient and uptake index

میانگین Mean	بنزیل آمینوپورین Benzyl amino purine	ایندول استیک اسید Indole acetic acid	جیبرلیک اسید Gibberellic acid	شاهد Control	سورفکتانت (میلی مول در کیلوگرم) Surfactant (mmol.kg^{-1})
2.71B	1.89c	4.11ab	2.85bc	2.00c	0
4.22A	4.82a	3.78ab	4.10ab	4.18ab	2.5
3.77A	4.97a	4.31a	3.91ab	1.88c	5
				میانگین Mean	
	3.90A	4.07A	3.62A	2.69B	
1.61C	1.21c	2.58c	1.57c	1.09c	0
4.02B	4.97c	3.78c	5.57c	1.77c	2.5
13.71A	14.80b	21.2a	18.1ab	0.77c	5
				میانگین Mean	
	7.00A	9.18A	8.43A	1.21B	

در هر ستون و ردیف اعدادی که دارای حروف مشابهی هستند از نظر آماری در آزمون دانکن معنی دار نیستند.

Means followed by the same letter are not significantly different by Duncan,s multiple range test.

غلظت و جذب آهن اندام هوایی

یکی از خطرات خاک‌های آلوده به کروم دخالت در جذب و انتقال عناصر غذایی ضروری مثل آهن منگنز، فسفر، مس و روی است (۲۶). طبق جدول ۲ سورفکتانت در سطح یک درصد بر غلظت آهن اندام هوایی مؤثر است اما تأثیر معنی‌داری بر جذب آهن اندام هوایی نداشت. استفاده از سورفکتانت باعث کاهش معنی‌دار غلظت آهن اندام هوایی شد. اصلیلان و همکاران (۷) نیز گزارش کردند اضافه کردن سورفکتانت اثر معنی‌داری بر جذب هیچکدام از عناصر کم مصرف نداشت و حتی در برخی تیمارها باعث کاهش این عناصر شد. با توجه به جدول ۴ سورفکتانت باعث افزایش غلظت کروم شده و ممکن است در جذب و انتقال آهن دخالت کرده و باعث کاهش غلظت آهن در اندام هوایی شود (جدول ۶). تنظیم کننده‌های رشد اثر معنی‌دار بر غلظت و جذب آهن اندام هوایی دارند (جدول ۲). هر سه تنظیم کننده رشد مورد استفاده باعث افزایش معنی‌دار غلظت و جذب آهن اندام هوایی شدند. به عنوان مثال بنزیل آمینو پورین باعث افزایش ۶۰ درصدی میانگین غلظت آهن اندام هوایی نسبت به میانگین شاهد شده است (جدول ۶). بیشترین جذب آهن مربوط به تیمار ۲/۵ میلی مول بر کیلوگرم سورفکتانت به همراه برگ‌پاشی جیبرلیک اسید است و کمترین جذب آهن را تیمار ۵ میلی‌مول در کیلوگرم سورفکتانت بدون برگ‌پاشی تنظیم کننده رشد را به خود اختصاص داده است. ممکن است تنظیم کننده‌های رشد بتوانند اثر سوء کاهش غلظت عناصر کم مصرف در اثر استفاده از سورفکتانت را کاهش دهند.

غلظت و جذب منگنز اندام هوایی

مطابق جدول ۲ سورفکتانت و تنظیم کننده‌های رشد در سطح پنج درصد و اثر متقابل آنها در سطح یک درصد بر غلظت منگنز اندام هوایی تأثیرگذار هستند. بیشترین غلظت منگنز مربوط به تیمار ۲/۵ میلی‌مول در کیلوگرم سورفکتانت با برگ‌پاشی جیبرلیک اسید است. به‌طور کلی برگ‌پاشی جیبرلیک اسید باعث افزایش ۴۴ درصدی میانگین غلظت منگنز اندام هوایی نسبت به شاهد می‌شود. طبق جدول ۷ استفاده از ۲/۵ میلی‌مول در کیلوگرم سورفکتانت باعث افزایش میانگین غلظت منگنز می‌شود اما غلظت ۵ میلی‌مول آن اثر سوء بر غلظت منگنز اندام هوایی دارد و موجب کاهش معنی‌دار ۱۹ درصدی میانگین غلظت منگنز نسبت به میانگین شاهد می‌شود. مطابق جدول تجزیه واریانس سورفکتانت، تنظیم کننده‌های رشد و اثر متقابل آنها در سطح یک درصد بر جذب منگنز اثر دارند (جدول ۲). با افزایش سطح سورفکتانت مورد استفاده جذب منگنز نیز افزایش می‌یابد، افزایش در سطح ۵ میلی‌مول سورفکتانت ممکن است در اثر افزایش وزن خشک ناشی از استفاده سورفکتانت باشد چون میانگین غلظت منگنز در این سطح کاهش یافته است. استفاده از تنظیم کننده‌های رشد باعث افزایش میانگین جذب منگنز شده‌اند و بیشترین افزایش مربوط به استفاده از جیبرلیک اسید است که موجب افزایش ۴/۷ برابری نسبت به میانگین شاهد شده است. طبق جدول ۷ در تیمارهای بدون سورفکتانت استفاده از جیبرلیک نه تنها باعث افزایش جذب منگنز نشد بلکه آن را کاهش داد.

جدول ۶- اثر سطوح سورفکتانت و تنظیم کننده‌های رشد بر غلظت (میلی گرم در کیلوگرم) و جذب آهن (میکروگرم در گلدان) اندام هوایی
Table 6- Influence of surfactant levels and plant growth regulators on shoot's Iron concentration (mg.kg⁻¹) and uptake (µg.pot⁻¹)

میانگین Mean	بنزیل آمینوپورین Benzyl amino purine	ایندول استیک اسید Indole acetic acid	جیبرلیک اسید Gibberellic acid	شاهد Control	سورفکتانت (میلی مول در کیلوگرم) Surfactant (mmol.kg ⁻¹)
2974A	3961a	3171b	2702bc	2062cd	0
1848B	1606de	1660d	2552bc	1574de	2.5
575C	918ef	532f	456f	395f	5
	2161A	1788A	1903A	1344B	میانگین Mean
2427A	3532a-c	2710a-d	2002b-d	1465b-d	0
2513A	2253b-d	1944b-d	5027a	827cd	2.5
2564A	3793ab	3391a-c	2870a-d	200d	5
	3193A	2682A	3300A	831B	میانگین Mean

در هر ستون و ردیف اعدادی که دارای حروف مشابهی هستند از نظر آماری در آزمون دانکن معنی‌دار نیستند.

Means followed by the same letter are not significantly different by Duncan,s multiple range test.

اما برگ‌پاشی جیبرلیک اسید و ایندول استیک در تیمارهای دارای ۲/۵ و ۵ میلی‌مول سورفکتانت به ترتیب باعث افزایش معنی‌دار غلظت و جذب منگنز در اندام هوایی شده‌اند. در این آزمایش استفاده از سورفکتانت به همراه تنظیم‌کننده‌های رشد (خصوصاً جیبرلیک اسید) در افزایش غلظت و جذب منگنز می‌تواند کارا تر عمل کند.

غلظت و جذب مس اندام هوایی

مطابق جدول ۲ سورفکتانت و اثر متقابل سورفکتانت و تنظیم‌کننده‌های رشد در سطح یک درصد و تنظیم‌کننده‌های رشد در سطح پنج درصد بر غلظت مس تأثیرگذاراند. استفاده از سطوح ۲/۵ و ۵ میلی‌مول بر کیلوگرم سورفکتانت در تیمارهای بدون تنظیم‌کننده

رشد باعث افزایش معنی‌دار غلظت مس در اندام هوایی نسبت به شاهد شده است (جدول ۸). نتایج تجزیه واریانس جذب مس نشان داد سورفکتانت و تنظیم‌کننده‌های رشد اثر معنی‌دار در سطح یک درصد بر جذب مس دارد. به طوری که اضافه کردن سورفکتانت و تنظیم‌کننده‌های رشد موجب افزایش معنی‌دار جذب مس شده‌اند (جدول ۲). برگ‌پاشی گیاه با بنزیل آمینوپورین باعث افزایش معنی‌دار جذب مس اندام هوایی مربوط به تیمار ۵ میلی‌مول بر کیلوگرم سورفکتانت به همراه برگ‌پاشی بنزیل آمینوپورین است و نسبت به شاهد جذب مس را ۱,۲۹ برابر افزایش داده است (جدول ۸).

جدول ۷- اثر سطوح سورفکتانت و تنظیم‌کننده‌های رشد بر غلظت (میلی گرم در کیلوگرم) و جذب منگنز (میکروگرم در گلدان) اندام هوایی

Table 7- Influence of surfactant levels and plant growth regulators on shoot's Manganese concentration (mg.kg^{-1}) and uptake ($\mu\text{g.pot}^{-1}$)

سورفکتانت (میلی مول در کیلوگرم)	شاهد	جیبرلیک اسید	ایندول استیک اسید	بنزیل آمینوپورین	میانگین
Surfactant (mmol.kg^{-1})	Control	Gibberellic acid	Indole acetic acid	Benzyl amino purine	Mean
غلظت منگنز (میلی گرم در کیلوگرم)	74.3ab	48.7b-d	58.3b-d	69.6ab	62.7A
	2.5	63.5bc	91.4a	41.9cd	66.5A
	5	41.2cd	69.9ab	34.4d	50.3B
Mn concentration (mg.kg^{-1})	48.6AB	70.0A	61.2AB	48.6B	
میانگین					
Mean					
جذب منگنز (میکروگرم در گلدان)	51.9cd	36.0d	47.3d	58.5cd	48.4C
	2.5	35.0d	93.7b-d	57.6cd	89.2B
	5	25.5d	370a	142bc	244A
Mn uptake ($\mu\text{g.pot}^{-1}$)	37.5C	214A	170A	86.0B	
میانگین					
Mean					

در هر ستون و ردیف اعدادی که دارای حروف مشابهی هستند از نظر آماری در آزمون دانکن معنی‌دار نیستند.

Means followed by the same letter are not significantly different by Duncan,s multiple range test.

جدول ۸- اثر سطوح سورفکتانت و تنظیم‌کننده‌های رشد بر غلظت (میلی گرم در کیلوگرم) و جذب مس (میکروگرم در گلدان) اندام هوایی

Table 8- Influence of surfactant levels and plant growth regulators on shoot's Copper concentration (mg.kg^{-1}) and uptake ($\mu\text{g.pot}^{-1}$)

سورفکتانت (میلی مول در کیلوگرم)	شاهد	جیبرلیک اسید	ایندول استیک اسید	بنزیل آمینوپورین	میانگین
Surfactant (mmol.kg^{-1})	Control	Gibberellic acid	Indole acetic acid	Benzyl amino purine	Mean
غلظت مس (میلی گرم در کیلوگرم)	32.6b	31.9b	62.6a	69.1a	49.1B
	2.5	60.2a	63.1a	62.3a	62.8A
	5	55.6a	12.0b	33.4b	28.9C
Cu concentration (mg.kg^{-1})	49.5AB	37.2B	45.9ab	55.0A	
میانگین					
Mean					
جذب مس (میکروگرم در گلدان)	26.5cd	23.6d	53.4b-d	58.0b-d	40.4B
	2.5	34.8b-d	85.3a-d	88.1a-c	83.3A
	5	32.0b-d	78.6a-d	133a	83.6A
Cu uptake ($\mu\text{g.pot}^{-1}$)	31.1B	79.8A	72.4A	93.1A	
میانگین					
Mean					

در هر ستون و ردیف اعدادی که دارای حروف مشابهی هستند از نظر آماری در آزمون دانکن معنی‌دار نیستند.

Means followed by the same letter are not significantly different by Duncan,s multiple range test.

روی و سرب افزایش پیدا کرد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج با استفاده از سورفکتانت و تنظیم کننده‌های رشد بخصوص جیبرلیک اسید می‌توان اثرات مثبت در گیاه ایجاد کرد. کاربرد این تیمارها، با بالا بردن جذب کروم، ضریب تجمع زیستی و شاخص جذب موجب افزایش گیاه پالایی و تحمل گیاه به سمیت کروم شود. به این صورت که با افزایش غلظت سورفکتانت و اضافه کردن تنظیم کننده‌های رشد بخصوص جیبرلیک اسید و ایندول استیک اسید وزن خشک اندام هوایی به صورت معنی‌داری افزایش پیدا کرد. استفاده از هر دو سطح سورفکتانت موجب افزایش غلظت و جذب کروم اندام هوایی شد اما سطح ۲/۵ و ۵ میلی‌مول بر کیلوگرم سورفکتانت اختلاف معنی‌داری در غلظت کروم اندام هوایی نداشتند. از اثرات اضافه کردن تنظیم کننده‌های رشد و سورفکتانت می‌توان به افزایش ضریب تجمع زیستی کروم اشاره کرد که نمایانگر اثر مثبت اصلاح کننده‌ها بر گیاه پالایی کروم است. استفاده از سورفکتانت در تیمارهای بدون برگ‌پاشی تنظیم کننده‌های رشد، باعث افزایش معنی‌دار غلظت مس در اندام هوایی گردید. استفاده از سطح ۵ میلی‌مول بر کیلوگرم سورفکتانت باعث کاهش معنی‌دار غلظت منگنز و روی در اندام هوایی نسبت به میانگین شاهد و سطح ۲/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم سورفکتانت شد. در خصوص عنصر آهن با اضافه کردن سورفکتانت غلظت آهن کاهش پیدا کرد اما با اضافه کردن تنظیم کننده‌های رشد این کاهش را می‌توان جبران کرد.

افزایش تجمع فلزات در قست‌های هوایی گیاه یک مکانیسم دفاعی در برابر تنش‌ها است که باعث افزایش مقاومت گیاه به تنش‌ها (مثل فلزات سنگین) می‌شود، از سوی دیگر با افزایش جذب عناصر غذایی سرعت تعرق نیز زیاد می‌شود و به دنبال آن جذب و انتقال آلاینده‌ها افزایش پیدا می‌کند که موجب کاهش خطر آبخوایی آلاینده‌ها و افزایش کارایی گیاه پالایی خواهد شد (۳۷).

غلظت و جذب روی اندام هوایی

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها سورفکتانت در سطح یک درصد بر غلظت و جذب روی مؤثر است. اما تنظیم کننده‌های رشد فقط اثر معنی‌دار بر جذب روی دارد (جدول ۲). با اضافه کردن ۲/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم سورفکتانت جذب و غلظت روی به بیشترین مقدار می‌رسد اما اضافه کردن ۵ میلی‌مول بر کیلوگرم سورفکتانت غلظت و جذب روی به ترتیب ۷۱ و ۳۲ درصد کاهش می‌یابد (جدول ۹). به طور کلی باید در اضافه کردن سطوح سورفکتانت دقت کرد زیرا غلظت بالاتر از حد بحرانی سورفکتانت‌های غیر یونی باعث آسیب به فسفولیپیدهای غشا سلولی شده و ممکن است در جذب اختلال ایجاد کند (۱۴). برگ‌پاشی هیچ کدام از تنظیم کننده‌های رشد موجب تغییر در غلظت روی نشدند، اما همه آنها باعث افزایش جذب روی شدند که به علت افزایش وزن خشک در اثر برگ‌پاشی تنظیم کننده‌های رشد است. با اضافه کردن جیبرلیک اسید و بنزیل آمینو پورین در سطح ۲/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم سورفکتانت جذب روی به طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد. تاسی و همکاران (۳۷) نیز گزارش کردند با اضافه کردن جیبرلیک اسید یا سیتوکینین به همراه EDTA تجمع

جدول ۹- اثر سطوح سورفکتانت و تنظیم کننده‌های رشد بر غلظت (میلی گرم در کیلوگرم) و جذب روی (میکروگرم در گلدان) اندام هوایی
Table 9- Influence of surfactant levels and plant growth regulators on shoot's Zinc concentration (mg.kg⁻¹) and uptake (μg.pot⁻¹)

میانگین Mean	بنزیل آمینوپورین Benzyl amino purine	ایندول استیک اسید Indole acetic acid	جیبرلیک اسید Gibberellic acid	شاهد Control	سورفکتانت (میلی مول در کیلوگرم) Surfactant (mmol.kg ⁻¹)
94.8A	102a	88.2ab	95.2a	94.9a	0
96.8A	107a	88.3ab	106a	84.9ab	2.5
27.9B	19.2c	17.0c	18.9c	56.8b	5
	76.1A	64.5A	73.5A	78.8A	میانگین Mean
75.3B	89.9b-e	73.4c-e	69.1c-e	68.6c-e	0
126A	151ab	116b-d	190a	48.6de	2.5
84.7B	77.0c-e	111b-d	118bc	32.6e	5
	106A	100A	125A	49.9B	میانگین Mean

در هر ستون و ردیف اعدادی که دارای حروف مشابهی هستند از نظر آماری در آزمون دانکن معنی‌دار نیستند.

Means followed by the same letter are not significantly different by Duncan's multiple range test.

گلرنگ در آلودگی کروم داشت. با استفاده از تنظیم کننده‌های رشد وزن خشک اندام هوایی، غلظت آهن و جذب کروم، آهن، منگنز، مس و روی افزایش یافت. بنابراین با ایجاد تعادل هورمونی با برگ‌پاشی تنظیم کننده‌های رشد می‌توان تحمل گیاه گلرنگ به تنش فلز سنگین کروم و پتانسیل گیاه پالایی را افزایش داد.

به طور کلی اضافه کردن سورفکتانت تغییری در جذب آهن ایجاد نکرد اما باعث افزایش جذب منگنز، مس و روی شد. افزایش جذب عناصر غذایی به عنوان یک مکانیسم دفاعی باعث افزایش مقاومت گیاه به تنش فلز سنگین کروم و کارایی گیاه پالایی خواهد شد. اگرچه سورفکتانت اثر مثبت بر تنش فلز سنگین کروم دارد اما استفاده همزمان سورفکتانت و تنظیم کننده‌های رشد اثر بهتری بر گیاه

منابع

- 1- Adriano D.C. 2001. Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals, 2nd. In.: Springer-Verlag, New York.
- 2- Afshan S., Ali S., Bharwana S.A., Rizwan M., Farid M., Abbas F., Ibrahim M., Mehmood M.A., and Abbasi G.H. 2015. Citric acid enhances the phytoextraction of chromium, plant growth, and photosynthesis by alleviating the oxidative damages in *Brassica napus* L. Environmental Science and Pollution Research 22: 11679-116789.
- 3- Agnello A.C., Huguenot D., Van Hullebusch E.D., and Esposito G. 2016. Citric acid-and Tween80-assisted phytoremediation of a co-contaminated soil: alfalfa (*Medicago sativa* L.) performance and remediation potential. Environmental Science and Pollution Research International 23: 9215-9226.
- 4- Akram N.A., Ashraf M., and Al-Qurainy F. 2012. Aminolevulinic acid-induced changes in some key physiological attributes and activities of antioxidant enzymes in sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants under saline regimes. Scientia Horticulturae 142: 143-148.
- 5- Almeida C.M.R., Dias A.C., Mucha A.P., Bordalo A.A., and Vasconcelos M.T.S. 2009. Influence of surfactants on the Cu phytoremediation potential of a salt marsh plant. Chemosphere 75: 135-140.
- 6- Alvarez R., Nissen S.J., and Sutter E.G. 1989. Relationship between indole-3-acetic acid levels in apple (*Malus pumila* Mill) rootstocks cultured in vitro and adventitious root formation in the presence of indole-3-butyric acid. Plant Physiology 89: 439-443.
- 7- Asilian E., Ghasemi-Fasaei R., Ronaghi A., Sepehri M., and Niazi A. 2018. Effects of microbial inoculations and surfactant levels on biologically-and chemically-assisted phytoremediation of lead-contaminated soil by maize (*Zea Mays* L.). Chemistry and Ecology 34: 964-977.
- 8- Babaeian E., Homae M., and Rahnamaie R. 2016. Chelate-enhanced phytoextraction and phytostabilization of lead-contaminated soils by carrot (*Daucus carota*). Archives of Agronomy and Soil Science 62: 339-358.
- 9- Bohidar S., Thirunavoukkarasu M., and Rao T.V. 2008. Effect of Plant Growth Regulators on in vitro micropropagation of "Garden Rue" (*Ruta graveolens* L.). International Journal of Integrative Biology 3: 36-43.
- 10- Boonyapookana B., Upatham E.S., Kruatrachue M., Pokethitiyook P., and Singhakaew S. 2002. Phytoaccumulation and phytotoxicity of cadmium and chromium in duckweed *Wolffia globosa*. International Journal of Phytoremediation 4: 87-100.
- 11- Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. Agronomy Journal 54: 464-465.
- 12- Cabello-Conejo M.I., Centofanti T., Kidd P.S., Prieto-Fernández Á., and Chaney R.L. 2013. Evaluation of plant growth regulators to increase nickel phytoextraction by *Alyssum* species. International Journal of Phytoremediation 15: 365-375.
- 13- Cheng M., Zeng G., Huang D., Yang C., Lai C., Zhang C., and Liu Y. 2017. Advantages and challenges of Tween 80 surfactant-enhanced technologies for the remediation of soils contaminated with hydrophobic organic compounds. Chemical Engineering Journal 314: 98-113.
- 14- Cserháti T. 1995. Alkyl ethoxylated and alkylphenol ethoxylated nonionic surfactants: interaction with bioactive compounds and biological effects. Environmental Health Perspectives 103: 358-364.
- 15- Farid M., Ali S., Rizwan M., Ali Q., Abbas F., Bukhari S.A.H., Saeed R., and Wu L. 2017. Citric acid assisted phytoextraction of chromium by sunflower; morpho-physiological and biochemical alterations in plants. Ecotoxicology and Environmental Safety 145: 90-102.
- 16- Farid M., Ali S., Rizwan M., Ali Q., Saeed R., Nasir T., Abbasi G.H., Rehmani M.I.A., Ata-Ul-Karim S.T., Bukhari S.A.H., and Ahmad T. 2018. Phyto-management of chromium contaminated soils through sunflower under exogenously applied 5-aminolevulinic acid. Ecotoxicology and Environmental Safety 151: 255-265.
- 17- Farooq M.A., Ali S., Hameed A., Bharwana S.A., Rizwan M., Ishaque W., Farid M., Mahmood K., and Iqbal Z. 2016. Cadmium stress in cotton seedlings: physiological, photosynthesis and oxidative damages alleviated by glycinebetaine. South African Journal of Botany 104: 61-68.
- 18- Fozia A., Muhammad A.Z., Muhammad A., and Zafar M.K. 2008. Effect of chromium on growth attributes in

- sunflower (*Helianthus annuus* L.). Journal of Environmental Sciences 20: 1475-1480.
- 19- Gangwar S., Singh V.P., Srivastava P.K., and Maurya J.N. 2011. Modification of chromium (VI) phytotoxicity by exogenous gibberellic acid application in *Pisum sativum* (L.) seedlings. Acta Physiologiae Plantarum 33: 1385-1397.
- 20- Halter L., Habegger R., and Schnitzler W.H. 2000. Gibberellic acid on artichokes (*Cynara scolymus* L.) cultivated in Germany to promote earliness and to increase productivity. In IV International Congress on Artichoke 681: 75-82.
- 21- Houshm A., and Moraghebi F. 2011. Effect of mixed cadmium, copper, nickel and zinc on seed germination and seedling growth of safflower. African Journal of Agricultural Research 6: 1463-1468.
- 22- Kaszycki P., Gabryś H., Appenroth K.-J., Jaglarz A., Sedziwy S., Walczak T., and Koloczek H. 2005. Exogenously applied sulphate as a tool to investigate transport and reduction of chromate in the duckweed *Spirodela polyrrhiza*. Plant, Cell and Environment 28(2): 260-268.
- 23- Kotb M.S. 2017. Effect of surfactant on adsorption and mobility of lead and cadmium in soils. Egypt Journal of Soil Science 57: 155-165.
- 24- Krantev A., Yordanova R., Janda T., Szalai G., and Popova L. 2008. Treatment with salicylic acid decreases the effect of cadmium on photosynthesis in maize plants. Journal of Plant Physiology 165: 920-931.
- 25- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society of America Journal 42(3): 421-428.
- 26- Liu D., Zou J., Wang M., and Jiang W. 2008. Hexavalent chromium uptake and its effects on mineral uptake, antioxidant defence system and photosynthesis in *Amaranthus viridis* L. Bioresource Technology 99: 2628-2636.
- 27- Mouton J., Mercier G., and Blais J.F. 2009. Amphoteric surfactants for PAH and lead polluted-soil treatment using flotation. Water, Air, and Soil Pollution 197: 381-393.
- 28- Naqvi S.S.M. 1999. Plant hormones and stress phenomena. Handbook of plant and crop stress, pp.709-730.
- 29- Ramamurthy A.S., Vo D., Li X.J., and Qu J. 2008. Surfactant-enhanced removal of Cu (II) and Zn (II) from a contaminated sandy soil. Water, Air, and Soil Pollution 190: 197-207.
- 30- Nelson D., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties (methodsofsoilan2): 539-579.
- 31- Rhoades J. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. Methods of Soil Analysis Part 3- Chemical Methods (methodsofsoilan3): 417-435.
- 32- Saleem M., Asghar H.N., Khan M.Y., and Zahir Z.A. 2015. Gibberellic acid in combination with pressmud enhances the growth of sunflower and stabilizes chromium (VI)-contaminated soil. Environmental Science and Pollution Research 22: 10610-10617.
- 33- Shafigh M., Ghasemi-Fasaei R., and Ronaghi A. 2016. Influence of plant growth regulators and humic acid on the phytoremediation of lead by maize in a Pb-polluted calcareous soil. Archives of Agronomy and Soil Science 62: 1733-1740.
- 34- Solhi M., and Hajabbasi M.A. 2005. Heavy metals extraction potential of sunflower (*Helianthus annuus*) and canola (*Brassica napus*). Caspian Journal of Environmental Sciences 3: 35-42.
- 35- Sujatha M., Geetha A., Sivakumar P., and Palanisamy N. 2008, November. Biotechnological interventions for genetic improvement of safflower. In Proceedings of the 7th international safflower conference (pp. 3-6).
- 36- Swarnkar V., Agrawal N., and Tomar R. 2012. Sorption of chromate and arsenate by surfactant modified erionite (E-SMZ). Journal of Dispersion Science and Technology 33: 919-927.
- 37- Tassi E., Pouget J., Petruzzelli G., and Barbafieri M. 2008. The effects of exogenous plant growth regulators in the phytoextraction of heavy metals. Chemosphere 71: 66-73.



The Effect of some Plant Growth Regulators and Surfactant on Safflower in Chromium Contaminated Soil

S. Keshavarz¹- R. Ghasemi-Fasaei^{2*}

Received: 08-07-2019

Accepted: 05-02-2020

Introduction: Chromium (Cr) is one of the toxic metals widely used in leather tanning, alloy preparation, electroplating, drilling mud, refractory steel and catalytic manufacture. Besides the toxicity of chromium to human, it also disturbs the soil ecology and plant growth due to its toxic nature even at low concentration. Phytoremediation is effective and can be viewed as a relatively low cost, solar energy driven process for the management of contaminated soils. However the heavy metal toxicity adversely affects the plant growth and development. We can use some chemical compounds to increase plant resistance to heavy metal and increase the efficiency of phytoremediation. These days, foliar application of plant growth regulators such as Gibberelic acid, Indole acetic acid and Benzyl amino purine are considered for various purposes such as enhancing plant growth and resistance to salinity, drought and heavy metals. Exogenous application of phytohormones can modulate the toxicity of Cr on plants most probably by maintaining hormonal balance of plant under metal stress. Surfactants effectively enhance metal ion transfer to aqueous and hence increase their availability. Assessing surfactant assisted phytoremediation is important in order to ascertain the extent of its effectiveness under different conditions and to find its optimum level for metal phytoremediation. The application of plant growth regulators and surfactants can be an effective way to cope with stresses such as heavy metal contamination. The objectives of this study were to determine the effects of the growth hormones Gibberelic acid, Benzyl amino purine and Indole acetic acid alone and combined with surfactant on plant growth, concentration and uptake of Cr, Fe, Mn, Cu and Zn and some phytoremediation factor for Cr.

Material and Methods: The soil was air-dried and grounded to pass through a 2-mm sieve then was analyzed to determine various soil physico-chemical properties using standard methods. A greenhouse experiment was conducted in a completely randomized design with a factorial arrangement of 3×4 including three levels of surfactant (control, 2.5 and 5 mmol kg⁻¹ soil) and four levels of plant growth regulators (control, Gibberellic acid, Indole acetic acid and Benzyl amino purine). All soils were contaminated by 5 mg/kg chromium and incubated for 1 month. During incubation, the soil samples were maintained at field capacity by distilled water. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seeds were disinfested with 10% sodium hypochlorite, washed three times with distilled water and planted in the pots. Growth regulators were sprayed at three stages of 30, 20 and 40 days after planting at concentration of 1 mM. The plants were kept in the standard condition of greenhouse and the soil moisture content was maintained at field capacity by distilled water. Sixty days after planting, the plants were harvested and washed with distilled water, and then dried in oven at 65 Celsius until they reached a constant weight. Afterwards, the over-dried plant samples were grounded. Then dry ashing and extracting with 2 normal hydrochloric acid, the concentration of Cr, Fe, Zn, Cu and Mn in shoot was determined by atomic absorption (Shimadzu AA-670). The analysis of variance (ANOVA) was performed using a completely randomized design. Significantly different treatment means were separated using Duncan test ($P < 0.05$). Biological accumulation coefficient (BAC) and uptake index (UI) were calculated with a specific formula.

Results and Discussion: The results showed that addition of surfactant and growth regulators caused a significant increase in shoot dry weight, biological accumulation coefficient, uptake index and chromium concentration and uptake. Addition of surfactant reduced the concentration and uptake of iron in the absence of growth regulators, but in the presence of plant growth regulators, application of tween 80 increased iron concentrations. Application of 5 mmol kg⁻¹ of surfactant decreased mean concentration of manganese, copper and zinc. While addition of 2.5 mmol kg⁻¹ of surfactant increased metals concentrations. Although addition of 5 mmol kg⁻¹ surfactant increased dry weight, it did not have a satisfied effect on increasing the concentration of the

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, respectively.

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

DOI: 10.22067/jsw.v34i2.81521

elements in the plant. Plant growth regulators increased uptake of elements which is a protective mechanism against stresses.

Conclusion: It appears that using plant growth regulators increased the resistance of the plant to chromium toxicity probably through increasing absorption of the elements such as Fe, Mn, Cu and Zn. According to the results, application of tween 80 along with plant growth regulators could increase safflower capability to cope with chromium toxicity.

Keywords: Benzyl amino purine, Indole acetic acid, Gibberellic acid; Micro nutrient, Tween 80

مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری کربن آلی در کاربری‌های مختلف خاک‌های آهکی استان لرستان

هانیه سپه‌وند^۱ - محمد فیضیان^{۲*} - رضا میرزایی تالارپشتی^۳ - تورستن مولر^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۰

چکیده

آگاهی از تغییرات کربن آلی خاک (SOC) یکی از مؤلفه‌های اصلی در ارزیابی کیفیت خاک است. با توجه به ماهیت کربناتی بسیاری از خاک‌های ایران، انتخاب روش مناسب اندازه‌گیری کربن آلی خاک ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این پژوهش، مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری مقدار کربن خاک‌های آهکی در کاربری‌های مختلف بود. به این منظور از منطقه رازان واقع در استان لرستان، چهار کاربری جنگل، مرتع، کشاورزی دیم و کشاورزی آبی انتخاب و از هر کاربری ۱۰ نمونه برداشته شد. جهت اندازه‌گیری مقدار کربن آلی و معدنی در خاک‌ها از روش ارائه شده توسط دارمشتات (۲۰۱۶) استفاده شد. روش‌های والکلی-بلک (WB) و LOI برای اندازه‌گیری مقادیر کربن آلی انتخاب و نتایج آن‌ها با روش احتراق خشک به عنوان یک روش استاندارد مقایسه گردید. نتایج نشان داد که در مقایسه بین کاربری‌ها، کاربری جنگل بیشترین مقدار کربن و نیتروژن آلی و کمترین مقدار کربن غیر آلی را دارا بود. مقادیر SOC به دست آمده به روش WB و LOI و مقایسه آن‌ها با روش احتراق خشک، نشان داد که روش WB نتایج نزدیک‌تری را با روش احتراق خشک داشته است. این مطالعه وجود همبستگی قوی ما بین SOC_{WB} ، SOC_{CN} و SOC_{LOI} را با کاربرد دمای $350^{\circ}C$ به مدت ۱۶ ساعت در خاک‌های آهکی استان لرستان را نشان داد. در این مطالعه همچنین استفاده از روش ترکیبی سوزاندن و آنالیز با دستگاه CN، به عنوان یک جایگزین مناسب برای تیمار با اسید در خاک‌های آهکی، معرفی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خاک‌های آهکی، روش احتراق خشک، روش LOI، روش والکلی بلک

مقدمه

اندازه‌گیری مقدار کربن ذخیره شده در خاک برای اطلاع از چرخه کربن در اکوسیستم‌های خاکی با اهمیت است. به طور کلی مقدار کربن آلی ذخیره شده در خاک بیش از دو برابر مقدار کربن موجود در اتمسفر می‌باشد (۲۲). افزایش نگرانی‌ها در زمینه گرمایش جهانی و تغییر اقلیم موجب شده است که به خاک و قابلیت آن در ترسیب کربن در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای شود (۲۸). کلاهچی و همکاران (۱۶) ترسیب کربن را به عنوان بخشی از

چرخه کربن، برای تشریح تبادل کربن میان اتمسفر، اقیانوس، زیست کره خشکی و رسوبات زمین‌شناسی به کار برده و این واژه را به ذخیره پایا یا به عبارتی طولانی‌مدت کربن در اکوسیستم‌های زمینی، زیرزمینی و اقیانوس‌ها که منجر به کاهش یا تعدیل دی‌اکسید کربن اتمسفری می‌شود، اطلاق نمودند. در همین راستا، مطالعات نشان داده است که می‌توان با عملیات مدیریتی مناسب مقدار قابل توجهی کربن در مخازن گیاهی و خاک ذخیره و میزان اثرات منفی ناشی از افزایش غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری را کاهش داد (۲۶ و ۲۱). ترسیب کربن در خاک نه تنها در کاهش میزان گازهای گلخانه‌ای مؤثر است بلکه در حفظ و افزایش کیفیت خاک مفید است. تغییر کاربری زمین به همراه عملیات زراعی نامناسب میزان ذخایر کربن آلی خاک‌ها را دستخوش تغییر نموده و به نوبه خود چرخه جهانی آن را نیز متأثر ساخته است؛ بنابراین، ارزیابی ذخایر کربن خاک در کاربری‌های مختلف برای شناخت پویایی کربن در مقیاس‌های مختلف بسیار ضروری می‌باشد. در بسیاری خاک‌ها، کربن آلی بخش اصلی کربن در خاک را تشکیل می‌دهد، در حالی که در خاک‌های مناطق خشک و نیمه

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی سابق دکتری شیمی و حاصلخیزی خاک و دانشیار گروه

علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: feizian.m@lu.ac.ir)

۳- استادیار، عضو هیأت علمی پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴- پروفیسور، عضو هیأت علمی دپارتمان تغذیه گیاهان زراعی، دانشگاه هوهنهام، اشتوتگارد، آلمان

مواد و روش‌ها

نمونه‌ها از خاک‌های آهکی منطقه رازان واقع در استان لرستان جمع‌آوری شدند. اساس انتخاب محل نمونه‌برداری بر وجود چند کاربری مختلف در یک منطقه استوار بود. شکل ۱ محل نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. چهار کاربری جنگل، مرتع، کشاورزی دیم و کشاورزی آبی در منطقه رازان وجود داشت که از هر کاربری ۱۰ نمونه برداشته شد. برای نشان دادن کامل ویژگی‌های کاربری مورد نظر، هر کاربری به قطعات یکنواختی تقسیم شدند. نمونه‌برداری به صورت نقطه‌ای انجام گرفت. از هر قطعه یکنواخت تعداد ۱۵ تا ۲۰ نمونه از خاک سطحی (۰ تا ۳۰ سانتی‌متر)، هر کدام به وزن تقریبی یک کیلوگرم برداشته و سپس این نمونه‌ها را کاملاً با هم مخلوط نموده و نمونه یک کیلوگرمی از آن به عنوان نمونه خاک آن قطعه از هر کاربری، به آزمایشگاه ارسال شد. در مجموع ۴۰ نمونه برداشت شد. نمونه‌ها هوا خشک و سپس خرد و الک شده و برای تجزیه‌های بعدی نگهداری شدند.

آنالیز شیمیایی

بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری بویکوس (H ۱۵۱) قرائت شد. غلظت‌های کربن (TC) و نیتروژن کل (TN) در همه نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه تجزیه کننده چندمنظوره کربن و نیتروژن (روش احتراق خشک) (۴) اندازه‌گیری و قرائت شدند. روش‌های والکلی-بلک (WB) (۱۹) و LOI (۲۰) برای اندازه‌گیری مقادیر کربن آلی انتخاب و نتایج آن‌ها با روش احتراق خشک به عنوان یک روش استاندارد مقایسه گردید.

روش احتراق خشک

جهت اندازه‌گیری محتویات کربن آلی و معدنی در خاک‌ها از روش ارائه شده توسط دارمشتات (۴) (ارائه شده توسط انجمن تحقیقات کشاورزی آلمان) استفاده شد. به این منظور نمونه‌های خاک در دمای ۳۲ درجه سانتی‌گراد در طول شب نگهداری شدند. در ابتدا کربن کل (TC) نمونه‌ها با دستگاه اندازه‌گیری کربن و نیتروژن قرائت شد. برای اندازه‌گیری کربن معدنی، به مقدار ۱۰ گرم از هر خاک توزین و در بوته چینی ریخته و در کوره تا دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت حرارت داده شد. بدین ترتیب مقدار کربن معدنی کل (TIC) در نمونه‌ها با روش ایزو ۱۰۶۹۴ (۱۲) و با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری کربن و نیتروژن (Vario-EL III elemental analyser^۳) قرائت شدند. کربن آلی (SOC) متعاقباً از تفاضل کربن کل خاک (TC) و کربن معدنی کل (TIC) محاسبه شد.

خشک، کربن معدنی نیز در خاک شایان توجه است (۹). در مناطق خشک و به ویژه در خاک‌های جنوب و جنوب غرب ایران، کلسیت (CaCO_3) و دولومیت (Ca Mg, CO_3) کانی‌های غالب بخش معدنی خاک را تشکیل می‌دهند. در نتیجه اندازه‌گیری هر دو منبع کربن آلی (SOC) و معدنی (SIC) برای اطلاع از چرخه کربن در این خاک‌ها ضروری به نظر می‌رسد (۱۴ و ۲۲).

از روش‌های معمول اندازه‌گیری کربن آلی خاک روش احتراق خشک با دستگاه تجزیه کننده چندمنظوره CN و روش اکسیداسیون شیمیایی مانند روش والکلی-بلک هستند (۳۰). روش احتراق خشک به عنوان یک روش ساده و دقیق معرفی شده است. اما ایراداتی همچون هزینه بالا و مشکلات استفاده از اسید برای حذف کربنات در خاک‌های آهکی نیز بر این روش وارد است (۵). استفاده از اسید ممکن است منجر به از دست رفتن مواد آلی خاک شود و فرسایش دستگاه را هم به دنبال دارد (۵). روش والکلی-بلک نیز به عنوان یک روش استاندارد برای تخمین مواد آلی خاک بسیار معمول مطرح است و یکی از مهمترین مزایای این روش در مقایسه با روش احتراق خشک، هزینه پایین اجرای آن است (۲۰). با این وجود این روش مقادیر بازیافت متفاوتی را برای مواد آلی خاک ارائه می‌دهد (۸ و ۷) و به دلیل استفاده از دی کرومات پتاسیم ممکن است موجب ایجاد سمیت کروم برای انسان و محیط زیست شود.

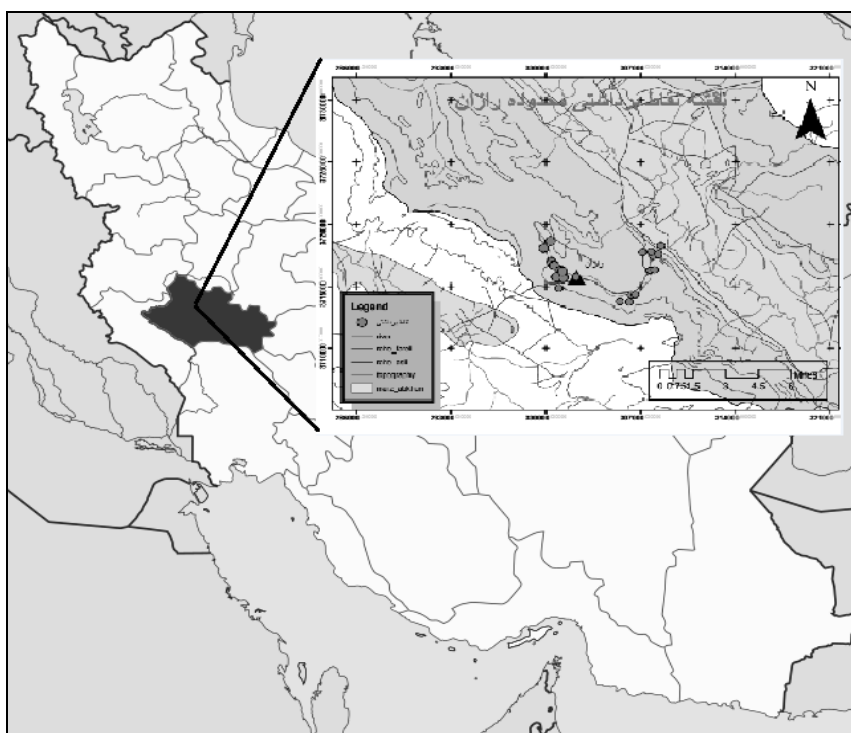
یکی دیگر از روش‌هایی که به طور گسترده‌ای برای تخمین SOC به کار می‌رود، روش LOI^۱ است. با وجود اینکه هیچ روش استاندارد برای دما و زمان حرارت دادن وجود ندارد، درجات حرارت مختلفی از ۱۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت تا ۱۷ ساعت ارائه شده است و روابط متغیری نیز بین SOC_{LOI} و SOC به دست آمده با روش‌های دیگر (روش والکلی-بلک یا آنالیز با دستگاه تجزیه کننده چند منظوره کربن و نیتروژن^۲) وجود دارد (۳۲، ۲۹ و ۲۷). از سوی دیگر فاکتور اصلی که روش LOI را تحت تأثیر قرار می‌دهد، دما و رابطه آن با مواد آلی خاک است (۲۵). بنابراین، در این روش انتخاب دمای به حد کافی بالا برای حذف مواد آلی خاک و به حد کافی پایین برای جلوگیری از اکسید شدن کربنات‌ها و دهیدروکسیله شدن ذرات رس، بسیار حائز اهمیت است. مطالعات بسیاری گزارش کردند که دمای 350°C به مدت ۱۶-۱۷ ساعت می‌تواند یک تخمین دقیق از SOC را در بسیاری خاک‌ها ارائه دهد (۳۲ و ۲۳).

این مطالعه به منظور مقایسه چند روش برای تخمین ذخایر کربن موجود در خاک‌های آهکی منطقه رازان واقع در استان لرستان انجام گرفت.

1- Loss-on-ignition

2- Multi C/N analyser

3- Elementar, Hanau, Germany



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محل نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Geographic location of sampling in the studied region

زیر به دست آمد.

$1000 \times \text{وزن اولیه} / (\text{وزن ثانویه} - \text{وزن اولیه}) = \text{SOC}_{\text{Loi}} (\text{g kg}^{-1})$
آنالیز داده‌ها در مطالعه حاضر در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. تعداد کل ۴۰ نمونه از چهار کاربری متفاوت مورد استفاده قرار گرفت و دو تکرار در انجام آزمایشات لحاظ شد. مطالعات آماری شامل تعیین ضرایب همبستگی اسپیرمن و آنالیز واریانس در سطح پنج درصد برای بررسی اثر کاربری اراضی بر میزان کربن خاک با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۷ انجام گرفت.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار پی‌اچ خاک‌ها تا ۷/۹، بافت غالب خاک‌ها clay-loam مشاهده شد (جدول ۱). نتایج آنالیز برخی ویژگی‌های نمونه‌های خاک در کاربری‌های متفاوت در جدول ۱ آورده شده است. بیشترین مقدار کربن کل (TC) و کربن معدنی کل (TIC) (به ترتیب ۷/۱۴ و ۴/۴۱ درصد) در کاربری کشاورزی آبی به دست آمد. بیشترین مقدار کربن آلی و نیتروژن و کمترین مقدار کربن معدنی، در کاربری جنگل به دست آمد (جدول ۱). اختلاف بین مقادیر کربن و نیتروژن به دست آمده در کاربری‌ها از نظر آماری معنی‌دار بودند (جدول ۲). لتز و همکاران (۱۷) میزان ذخیره کربن آلی را در اراضی جنگلی، گراسلند و اراضی کشاورزی در بلژیک را به ترتیب

روش والکلی-بلک

در این مطالعه برای اندازه‌گیری کربن آلی روش والکلی-بلک با اندکی اصلاحات مورد استفاده قرار گرفت (۱۹). بدین صورت که خاک با اسیدسولفوریک غلیظ مخلوط و سپس با ۵ میلی‌لیتر بی‌کرومات پتاسیم ۰/۵ مولار ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ترکیب و به مدت ۵ دقیقه در دمای ۱۵۰-۱۶۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. مخلوط پس از سرد شدن با آب دی‌یونیزه به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. برای مشاهده بهتر تغییر رنگ مخلوط از فیلتر عبور داده و سپس با سولفات آهن ۰/۲۵ مولار تیترو شد. کربن آلی از تفاضل سولفات آهن استفاده شده برای نمونه خاک و شاهد به دست آمد.

روش LOI (Loss-on-ignition)

روش ارائه شده توسط نلسون و سامر (۲۰) برای اندازه‌گیری کربن آلی معرفی شد. ۵ گرم از نمونه‌های خاک به بوتله‌های چینی که از قبل حرارت داده شده و وزن شده بودند منتقل و در دمای 105°C به مدت یک شب نگهداری شدند. وزن دقیق نمونه و بوتله چینی پس از سرد شدن ثبت و به عنوان وزن اولیه در نظر گرفته شد. در مرحله بعد نمونه در کوره تا دمای 350°C به مدت ۱۶ ساعت نگهداری و مجدداً وزن آن‌ها پس از سرد شدن به عنوان وزن ثانویه ثبت شد. مواد آلی خاک با محاسبه وزن از دست رفته در دو دمای ۱۰۵ و 350°C درجه سانتی‌گراد به عنوان وزن‌های اولیه و ثانویه و استفاده از فرمول

آلی غنی از نیتروژن می‌باشد که به واسطه لاشه‌ریزی به خاک اضافه می‌شود. مواد آلی که منجر به افزایش محتوی مواد مغذی خاک گشته، از جمعیت میکروارگانیسم‌های غنی‌کننده نیتروژن خاک حمایت کرده و در نتیجه باعث افزایش مقدار این مشخصه در خاک این عرصه می‌گردد (۱۱). خطیر پاشا و همکاران (۱۳) نتیجه مشابهی را در خصوص وجود نیتروژن بیشتر در خاک‌های جنگلی در مقایسه با کشاورزی گزارش کردند. کیانی و همکاران (۱۵) با مطالعه خاک‌های استان گلستان مشاهده کردند که نیتروژن بر اثر تبدیل جنگل به اراضی کشاورزی، به‌طور تقریبی به مقدار یک سوم کاهش یافته است. این پژوهشگران بیان کردند که به نظر می‌رسد تجزیه ریشه و جذب توسط گیاهان، تأثیر به‌سزایی بر میزان نیتروژن کل در خاک دارد.

۶/۶، ۶/۴ و ۳/۶ کیلوگرم در متر مربع گزارش نمودند. وانگ و همکاران (۳۳)، ژونگ و زو (۳۴)، فانگ و همکاران (۱۰) در تحقیقات خود نشان دادند که میزان SOC در کاربری جنگل و مرتع بیشتر از اراضی کشاورزی است و علت آن را تبدیل پوشش طبیعی به اراضی کشاورزی و تأثیر شخم در نرخ تجزیه مواد آلی بیان نمودند. خطیرپاشا و همکاران (۱۳) در بررسی خاک‌های شهرستان قائمشهر، کمترین مقدار کربنات کلسیم را در کاربری جنگل و بیشترین مقدار را در کاربری کشاورزی گزارش کردند.

ایوبی و همکاران (۲) و سیلیک (۶) پایین بودن کربنات کلسیم معادل در کاربری جنگل نسبت به زراعی را به انتقال عمقی کربنات کلسیم معادل و تشکیل کربنات ثانویه در کاربری جنگلی نسبت دادند. زیاد بودن میزان نیتروژن کل در توده جنگلی در ارتباط با مقدار مواد

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در خاک‌های مورد مطالعه

Table 1- Some of physical and chemical soil properties in the studied soils

ویژگی خاک Soil properties	جنگل Forest	مرتع Range	کشاورزی دیم Dry farming	کشاورزی آبی Irrigated farming
اسیدیته (pH)	7.17	7.95	7.09	7.24
بافت خاک (Texture)	Clay loam	Loam	Clay loam	Clay loam
کربنات کلسیم معادل (CaCO ₃ %)	9.37	23.25	32.75	32.65
کربن کل (TC) %	4.09	4.50	4.18	7.14
نیتروژن کل (TN) %	0.44	0.20	0.11	0.29
کربن معدنی کل (TIC) %	1.64	2.70	3.60	4.41
کربن آلی کل (TOC) %	3.05	1.80	0.94	2.73

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس ذخایر کربن خاک بین کاربری‌های مختلف

Table 2- The results of analysis of variances of Carbon pools between different land uses

ویژگی خاک Soil properties	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	درجه آزادی (DF)	F محاسباتی	معنی‌داری (Sig)
کربن کل (TC)	42.22	14.07	1	14.8	0.00*
کربن معدنی کل (TIC)	9.15	3.05	1	4.75	0.004*
کربن آلی کل (TOC)	55.15	18.38	1	361.47	0.00*
نیتروژن کل (TN)	0.55	0.18	1	4.78	0.004*

* اختلاف در سطح ۵ درصد معنی‌دار است.

* significantly differences at 0.05 level.

جدول ۳- میانگین درصد کربن آلی به دست آمده در کاربری‌های مختلف با استفاده از روش والکلی-بلک (SOC_{WB})، LOI (SOC_{LOI}) و دستگاه اندازه‌گیری کربن و نیتروژن (SOC_{CN})

Table 3- Mean organic carbon contents in different land uses measured by Walkley-Black (SOC_{WB}), LOI (SOC_{LOI}) and CN analysis (SOC_{CN}) methods

	جنگل Forest	مرتع Range	کشاورزی دیم Dry farming	کشاورزی آبی Irrigated farming
SOC _{WB}	2.30 ^a	1.27 ^b	0.83 ^c	2.12 ^{ab}
SOC _{LOI}	4.52 ^a	1.98 ^b	0.52 ^c	2.65 ^{ab}
SOC _{CN}	2.54 ^a	1.80 ^b	0.93 ^c	2.72 ^a

اعداد با حروف مشترک در هر ردیف دارای اختلاف معنی‌دار (P<0.05) نمی‌باشند.

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

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر کاربری اراضی بر کربن آلی (SOC) به دست آمده به روش‌های مختلف

Table 4- Analysis of variance of land use on Carbon pools measured by different methods

معنی‌داری (Sig)	F محاسباتی	درجه آزادی (DF)	میانگین مربعات (MS)	مجموع مربعات (SS)
0.00*	40.11	1	8.11	24.34
0.00*	50.07	1	6.54	19.63
0.00*	159.6	1	17.05	51.17

* اختلاف در سطح ۵ درصد معنی‌دار است.

* significantly differences at 0.05 level

انجام گرفت. نتایج نشان داد که این ترکیب آزمایشات می‌تواند به عنوان یک روش مناسب برای تخمین کربن آلی (TOC) و معدنی کل (TIC) در خاک‌های آهکی معرفی شود. روش‌های معمول دیگر اغلب شامل یک مرحله حذف کربنات‌های خاک به وسیله اسید هستند که ممکن است اکسید شدن مواد آلی را به همراه داشته باشد و همچنین موجب فرسایش دستگاه می‌شود (۵).

در جدول ۵ نتایج ضرایب همبستگی بین کربن آلی به دست آمده به روش‌های مختلف و خصوصیات خاک آورده شده است. نتایج این مطالعه وجود همبستگی قوی ما بین SOC_{WB} ، SOC_{LOI} و SOC_{CN} با کاربرد دمای $350^{\circ}C$ به مدت ۱۶ ساعت در خاک‌های آهکی استان لرستان را نشان داد. بین مقادیر کربن و نیتروژن کل، رس و سیلت با SOC ضرایب همبستگی مثبت در دامنه $0/11$ تا $0/92$ وجود دارد. همچنین بین TIC و مقادیر شن نمونه‌ها با SOC به دست آمده به همه روش‌ها، همبستگی منفی مشاهده شد که می‌تواند نشان‌دهنده این موضوع باشد که مقدار کربن آلی در بخش مقاوم خاک در مقایسه با کربن معدنی پایینتر است. نتایج حاصل از روش‌های والکلی-بلک و LOI همبستگی قوی با روش احتراق خشک نشان دادند. هرچند مطالعاتی همبستگی خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده کربن آلی به روش LOI در دمای $375^{\circ}C$ به مدت ۱۷ ساعت و روش احتراق خشک را در برخی گروه‌های خاک گزارش کردند (۳۲، ۱۸ و ۳). مقادیر SOC بالای به دست آمده برای کاربری‌های جنگل و مرتع به روش LOI، می‌تواند به دلیل کاهش وزن به دلیل سوزاندن موادی به غیر از مواد آلی خاک باشد. یکی از انتقاداتی که به این روش وارد است این است که در روش LOI ممکن است آب ساختمانی و کربنات‌ها خارج شود و به عنوان کربن آلی در نظر گرفته شود (۲۹). این اتلاف وزن غیر آلی خاک، به‌ویژه در خاک‌های دارای مواد آلی پایین و رس بالا، می‌تواند به‌طور معنی‌داری تخمین SOC را تحت تأثیر قرار دهد. در خاک‌های دارای مواد آلی کم، دهیدروکسیله شدن رس‌ها بسیار محتمل است (۱). در نتیجه در استفاده از روش LOI، انتخاب درجه حرارت مناسب می‌تواند تأثیر بسیاری در نتایج به دست آمده داشته باشد.

در جدول ۳ مقادیر کربن آلی خاک (SOC) اندازه‌گیری شده به روش‌های والکلی-بلک (WB)، LOI و دستگاه اندازه‌گیری کربن و نیتروژن (CN) ارائه شده است. نتایج تجزیه واریانس نیز در در جدول ۴ آورده شده که حاکی از وجود اختلاف معنی‌دار بین کاربری‌های مختلف است. در خصوص تأثیر کاربری اراضی، این نتیجه مشاهده شد که روش احتراق خشک، اختلاف معنی‌داری را بین مقادیر SOC به دست آمده در کاربری‌های جنگل و کشت آبی نشان نداد.

بیشترین مقدار SOC ($4/52\%$) در کاربری جنگل و کمترین مقدار آن ($0/52\%$) در کشاورزی دیم هر دو با استفاده از روش LOI به دست آمد. در روش WB، مقادیر SOC در دامنه $0/8$ تا $2/3$ ، در روش LOI $0/52$ تا $4/52$ و در روش احتراق خشک $0/93$ تا $2/72$ متغیر بود. کشاورزی دیم، کمترین مقادیر کربن آلی به دست آمده به روش‌های مختلف را نشان داد. نتایج مقایسه روش‌های مختلف برای اندازه‌گیری کربن آلی خاک در این مطالعه نشان داد که روش والکلی-بلک همراه با حرارت دادن مستقیم با آنالیز با دستگاه CN در خاک‌های آهکی استان لرستان، همبستگی خوبی را ارائه داد. با مقایسه بین مقادیر SOC به دست آمده به روش WB و LOI و مقایسه آن‌ها با روش احتراق خشک به عنوان یک روش استاندارد، آشکار شد که روش WB نتایج نزدیک‌تری را با روش احتراق خشک نشان داده است. ونگ و همکاران (۳۱) در بررسی خاک‌های آهکی شمال غرب چین، در مقایسه سه روش والکلی-بلک، LOI و احتراق خشک، روش والکلی-بلک را به عنوان یک روش دقیق برای اندازه‌گیری کربن آلی گزارش کردند. همچنین آن‌ها روش LOI با استفاده از دمای $375^{\circ}C$ به مدت ۱۷ ساعت را برای تخمین دقیق کربن آلی و ادامه سوزاندن در دمای $800^{\circ}C$ به مدت ۱۲ ساعت را برای تخمین کربن غیرآلی مناسب گزارش کردند. اگرچه در برخی مطالعات، گزارش شده است که کاربرد روش والکلی-بلک در خاک‌های دارای مواد آلی پایین، ممکن است مقادیر کربن آلی خاک را بیشتر از مقدار واقعی تخمین بزند (۷). این امر ممکن است به دلیل واکنش $K_2Cr_2O_7$ با تشکیلات غیرآلی خاک باشد (۲۵). در این مطالعه برای اولین بار ترکیبی از سوزاندن در دمای $500^{\circ}C$ با آنالیز با دستگاه CN در مورد خاک‌های آهکی استان لرستان که حاوی کلسیت و دولومیت بودند،

جدول ۵- ضرایب همبستگی اسپیرمن بین ویژگی‌های خاک و کربن آلی (SOC) به دست آمده به روش‌های مختلف
 Table 5- Spearman correlation between soil properties and organic carbon obtained by different methods

	SOC _{WB}	SOC _{CN}	SOC _{LOI}	TIC کربن معدنی کل	TN نیترژن کل	TC کربن کل	Clay رس	Silt سیلت
SOC _{CN}	0.88**							
SOC _{LOI}	0.86**	0.73**						
TIC (کربن معدنی کل)	-0.08	-0.16	-0.30					
TN (نیترژن کل)	0.76**	0.92**	0.74**	0.06				
TC (کربن کل)	0.33	0.30	0.11	0.85**	0.45			
Clay (رس)	0.43	0.46	0.51*	-0.09	0.51*	0.1		
Silt (سیلت)	0.47	0.52*	0.31	0.1	0.48	0.35	-0.32	
Sand (شن)	0.69**	-0.85	-0.66*	0.009**	-0.84	-0.40	-0.39	-0.71**

** و * به ترتیب در سطح $0.01 < \leq 0.05$ معنی‌دار می‌باشد.

*and** significant at 0.05 level and 0.01 level.

نتیجه‌گیری

حساسیت‌هایی در مورد عدم تداخل اندازه‌گیری کربن آلی و معدنی وجود دارد. بنابراین این مطالعه استفاده از روش ترکیبی سوزاندن و آنالیز با دستگاه CN را به عنوان یک جایگزین مناسب برای تیمار با اسید در خاک‌های آهکی، معرفی می‌کند. روش LOI در دماهای مختلف نیز می‌تواند به عنوان یک روش ارزان و ساده برای اندازه‌گیری کربن آلی و معدنی خاک‌های آهکی مورد آزمایش قرار گیرد.

با توجه به هزینه بالای آنالیز با دستگاه CN، دو روش والکلی- بلک و LOI، می‌توانند روش‌های مناسبی برای اندازه‌گیری کربن آلی خاک در مناطق خشک باشند. روش LOI می‌تواند به عنوان یک روش ساده و ارزان، برای اندازه‌گیری TIC نیز در خاک‌ها مورد مطالعه قرار گیرد. ولی با توجه به ماهیت کربناتی این خاک‌ها،

منابع

- 1- Abella S., and Zimmer B. 2007. Estimating organic carbon from loss-on-ignition in northern Arizona forest soils. Soil Science Society of America Journal 71: 545-550.
- 2- Ayoubi S., Khormali F., Sahrawat K.L., and Rodrigues de Lima A.C. 2011. Assessing Impacts of Land Use Change on Soil Quality Indicators in a Loessial Soil in Golestan Province, Iran. Agricultural Science and Technology 13: 727-742. (In Persian)
- 3- Beaudoin A. 2003. A comparison of two methods for estimating the organic content of sediments. Journal of Paleolimnology 29: 387-390.
- 4- Boden VDLUFA-Verlag, Darmstadt. 2016. Determination of organic carbon by combustion and gas analysis. In: Handbook of Agricultural Methods of Experimental and Investigation (VDLUFA-Methodenbuch) (In German).
- 5- Byers S.C., Mills E.L., and Stewart P.L. 1978. A comparison of methods of determining organic carbon in marine sediments, with suggestions for a standard method. Hydrobiologia 58: 43-47.
- 6- Celik I. 2005. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. Soil and Tillage Research 83: 270-277.
- 7- Conyers M.K., Poile G.J., Oates A.A., Waters D., and Chan K.Y. 2011. Comparison of three carbon determination methods on naturally occurring substrates and the implication for the quantification of 'soil carbon'. Soil Research 49: 27-33.
- 8- De Vos B., Lettens S., Muys B., and Deckers J.A. 2007. Walkley-Black analysis of forest soil organic carbon: recovery, limitations and uncertainty. Soil Use and Management 23: 221-229.
- 9- Eswaran H., Reich P.F., Kimble J.M., Beinroth F.H., Padmanabhan E. et al. 2000. Global carbon stocks. In: R L, Kimble JM, Eswaran H, Stewart BA, editors. Global climate change and pedogenic carbonates. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 15-27.
- 10- Fang X., Xue Z., Li B., and An S. 2012. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a

- small watershed of the Loess Plateau, China. *Catena* 88: 6-13.
- 11- Hajabbasi M.A., Jalalian A., and Karimzadeh H.R. 1997. Deforestation effects on soil physical and chemical properties, Lordegan, Iran. *Plant Soil* 190: 301-308.
- 12- ISO 10694. 1995. Soil quality. Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis). International Organization for Standardization. Geneva.
- 13- Khatirpasha N., Hojjati S.M., Pourmajidiyan M.R., and Asadiyan M. 2018. Impact of land use change on physical, chemical and biological soil properties in the Qalek forest-Ghaemshahr city. *Water and Soil Conservation* 24: 211-225. (In Persian with English abstract)
- 14- Khormeli F., Abtahi A. and Stoops G. 2006. Micromorphology of Calcitic Features in Highly Calcareous Soils of Fars Province, Southern Iran. *Catena* 132: 31-46.
- 15- Kiyani F., Jalalian A., Pashaii A., and Khademi H.Y. 2006. Effect of Deforestation, degraded lands Murat on loess soil quality indicators in Golestan Province. *Journal of Soil and Water Sciences, Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 11: 453-463. (In Persian)
- 16- Kolahchi N., Zahedi Amiri GH., and Khorasani N. 2008. Carbon sequestration in shrubs, perennial grasses and soil in closed range (Heidare) of Hamedan. *Pajouhesh and Sazandegi* 80: 18 -25. (In Persian with English abstract)
- 17- Lettens S., Van Orshoven J., van Wesemael B., De Vos B., and Muys B. 2005. Stocks and fluxes of soil organic carbon for landscape units in Belgium derived from heterogeneous data sets for 1990 and 2000. *Geoderma* 127: 11-23.
- 18- McKeague J. 1976. Manual of soil sampling and methods of analysis. Land Resource Research Inst., Res. Br. Agriculture Canada, Ottawa, Canada.
- 19- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Page, AL, editor. *Methods of soil analyses. Chemical and microbiological properties*. Madison (WI): ASA Monograph, P: 539-579.
- 20- Nelson D.W., Sommers L.E., Sparks D., Page A., Helmke P. et al., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis Part 3- Chemical Methods*, 961-1010.
- 21- Niu X., and Duiker S. 2006. Carbon sequestration potential by afforestation of marginal agricultural land in the Midwestern U.S. *Forest Ecology and Management* 223: 415-427.
- 22- Owliaie H.R., Abtahi A., and Heck R.J. 2006. Pedogenesis and Clay Mineralogical Investigation of Soils Formed on Gypsiferous and Calcareous Materials, on a Transect, Southwestern Iran. *Geoderma* 134: 62-81.
- 23- Pribyl D.W. 2010. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma* 156: 75-83.
- 24- Schimel D., Enting I.G., Heimann M., Wigley T. M. L., Raynaud D., Alves D., and Siegenthaler U. 1995. CO₂ and the carbon cycle. In: *Climate Change. 1994. Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of IPCC IS92 Emission Scenarios*. Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Bruce, J., Lee, H., Callander, B. A., Haites, E., Harris, N and Maskell, K (eds). Cambridge University Press. Cambridge. England. pp: 35-71.
- 25- Sleutel S., De Neve S., Singier B., and Hofman G. 2007. Quantification of organic carbon in soils: A comparison of methodologies and assessment of the carbon content of organic matter. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38: 2647-2657.
- 26- Sperow M., Eve M., and Paustian K. 2003. Potential soil C sequestration on U.S. agricultural soils. *Climate Change* 57: 319-339.
- 27- Szava-Kovats R. 2009. Re-analysis of the Relationship between Organic Carbon and Loss-on-Ignition in Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 40: 2712-2724.
- 28- Varamesh S., Hosseini S.M., Abdi N., and Akbarinia M. 2010. Increment of soil carbon sequestration due to forestation and its relation with some physical and chemical factors of soil. *Iranian Journal of Forest* 2: 25-35. (In Persian with English abstract)
- 29- Walkley A. 1974. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils- effect of variations in digestion conditions and inorganic soil constituents. *Soil Science* 63: 251-264.
- 30- 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: 29-38.
- 31- Wang X., Wang J., and Zhang J. 2012. Comparisons of three methods for organic and inorganic carbon in calcareous soils of Northwestern China. *PLOS ONE* 7:1-6.
- 32- Wang X.J., and Smethurst P.J. 1996. Herbert A M. Relationships between three measures of organic matter or carbon in soils of eucalypt plantations in Tasmania. *Australian Journal of Soil Research* 34: 545-553.
- 33- Wang Y.Q., Zhang X.C., Zhang J.L., and Li S.J. 2009. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed on the Loess Plateau. *Pedosphere* 19: 486-495.
- 34- Zhong B., and Xu Y.J. 2009. Topographic Effects on Soil Organic Carbon in Louisiana Watersheds. *Environmental Management* 43: 664-672.



Comparison of Different Methods for the Determination of Organic Carbon in Calcareous Soils under Different Land Uses of Lorestan Province

H. Sepahvand¹- M. Feizian^{2*}- R. Mirzaeitalarposhti³- T. Mueller⁴

Received: 02-09-2019

Accepted: 11-11-2019

Introduction: Nowadays, because of climate change, there is a great interest in carbon cycle. In most of the soils, the main part of carbon is held as soil organic carbon (SOC) whereas, in soils of the arid and semiarid regions, inorganic carbon, primarily carbonate, is the majority of carbon in the soils. The major minerals found in the soils of arid regions of Iran are calcite (CaCO_3) and dolomite (Ca Mg, CO_3) which mainly exist in the soils of the southern and southwestern Iran. Thus, quantifying both SOC and soil inorganic carbon (SIC) is essential to know the way of occurrence of the carbon cycle in the soils. The aim of this study was to compare different methods for the determination of organic carbon in calcareous soils under different land uses of Lorestan province.

Materials and Methods: The study area is located in the Polhoro region of Khorram Abad district, Lorestan Province in western Iran. The sampling area spanned sides of the Polhoro region, which has various land uses, including forest land, cropland, and grassland. Dry and irrigated farming were between cultivated lands. In each land uses, a study plot was chosen. At each sampling point, five subsamples were taken at a depth of 0–30 cm (root zone) and mixed to form a composite sample including one central point and four other points by the distance of 15 m in the four cardinal directions. A total of 40 soil samples were taken across an agroecological region in southwest Iran. The soils had a clay-loam and sandy-clay-loam texture classes and pH above 7. Representative samples were analyzed for SOC and SIC measurements by different procedures. The procedures were included the modified traditional Walkley-Black method (WB) for SOC, Loss-on-Ignition (LOI) Procedure given by Nelson and Sommers (1982) for SOC, and CN analyzer (Vario-EL III) for SOC and SIC. The method presented by Boden, VDLUFA-Verlag, Darmstadt (2016) was chosen for organic carbon and carbonate measurement. This method was used as a reference method to compare results of different methods.

Results and Discussion: In the present study, the soil samples of forest land showed the highest values for TOC and TN, but lowest values for TIC. The measured SOC concentration by WB, LOI and CN analysis methods in the top soil varied among land uses. The highest C concentration (4.52%) was observed in the forest land while the lowest concentration (0.52%) was for dry farming land both by the use LOI method. SOC values varied from 0.8 to 2.3 in modified WB, 0.52 to 4.52 in LOI and 0.93 to 2.72 in CN analysis methods between different land uses. The differences in C concentrations between rangeland, forest, irrigated and dry farming lands were statistically significant and showed the following order for the WB and LOI methods: forest land > irrigated farming > rangeland > dry farming. As expected, C concentrations of LOI and WB were highest in the forest, intermediate in irrigated farming and rangeland and lowest in the dry farming. The relative content of SOC_{LOI} differed significantly across forest and irrigated farming land uses while the difference was not significant in the other two methods. A significant difference also observed in the SOC of forest and irrigated farming with dry and range lands obtained by all three methods. The results of the correlation between the bulk soil and SOC in different methods from the Spearman correlation analysis showed that there was a positive correlation between the TN, TC, clay, and silt of the bulk soil with SOC in the separated methods with the correlation coefficient ranging from 0.1 to 0.92. Conversely, the negative correlation was found between TIC and sand content of the bulk soil with the SOC in the different methods. It can be concluded that calcareous nature of these soils could be one of the reasons for low organic carbon in this research. By comparison between the SOC values measured by WB and LOI methods with CN analysis as a reference method, the WB method

1 and 2 - Ph.D. Former Student and Associate Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Lorestan University, Khorram Abad, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: feizian.m@lu.ac.ir)

3- Assistant Professor, Environmental Science Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

4 - Institute of Crop Science, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.82568

showed the results were more near to CN analysis than LOI. The high SOC_{LOI} values for the forest and range land in this research may be related to weight loss from some non-SOM. The results of this study demonstrate that the CN method with combination of dry combustion is a potent method for the accurate estimation of SIC and SOC in calcareous soils. The common approach often involves pretreatment with acid to remove carbonate, which may cause remove organic matter in soil samples and also erosion the instrument. Thus, the combustion method could be a good substitute for acid treatment of soil samples.

Conclusion: Three methods were applied for determinations of SOC concentrations in calcareous soils of Polhoro region and the results were compared. There was a wide range of values in soil properties, but in general, TIC was more than SOC. The results show that the Walkley-Black method with external heating can provide precise estimation for soil organic carbon for these soils. This study illustrates that the WB and LOI technique could be comparable with the CN analysis method and regarded as potent methods to produce accurate results for estimating of organic carbon in arid soils. The results supported the elemental analysis as a precise method to the estimation of SOC and TIC in calcareous soils. Further study is suggested for testing TIC by LOI approach on a wider range of arid and semi-arid soils.

Keywords: Calcareous soils, Dry combustion, Organic carbon, Walkley-Black method



برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و درختی

یاسر استواری^۱ - سید علی اکبر موسوی^{۲*} - حسن مظفری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴

چکیده

برای انجام فعالیتهای حفاظتی در برابر فرسایش خاک دانستن میزان حد قابل تحمل هدررفت خاک بسیار ضروری است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف تعیین میزان حد قابل تحمل هدررفت خاک به روش ضخامت و بر اساس معادله پراکندگی اسکیدمور و توسعه توابع انتقالی رگرسیونی در برآورد این ویژگی در حوضه بالادست سد درودزن انجام شد. برای این منظور تعداد ۶۰ نیمرخ خاک با دستگاه بیل مکانیکی حفر و علاوه بر اندازه‌گیری عمق خاک، برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی (۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) نیز در آزمایشگاه و صحرای اندازه‌گیری شد. از روش رگرسیونی خطی چندگانه و رگرسیون درختی برای توسعه توابع انتقالی استفاده شد. نتایج نشان داد مقدار حد قابل تحمل هدررفت خاک با استفاده از روش اسکیدمور با میانگین ۱/۰۴ تن در هکتار در سال از حداقل ۰/۲۹ تا حداکثر ۲/۲۵ تن در هکتار در سال متغیر بود. ماده آلی خاک با داشتن بیشترین ضریب استاندارد شده ($Beta=0/64$) و بیش‌ترین همبستگی ($-0/77$) با حد قابل تحمل هدررفت خاک مهم‌ترین ویژگی در برآورد این شاخص خاک بود. بر اساس آماره‌های ارزیابی، روش رگرسیون درختی با میانگین برآوردی حد قابل تحمل هدررفت خاک ۱/۰۸ تن در هکتار در سال و داشتن ضریب تعیین بالاتر در هر دو مجموعه داده واسنجی ($R^2=0/96$) و اعتبارسنجی ($R^2=0/78$) و مقدار خطای کمتر در داده واسنجی (۰/۲۶ تن در هکتار در سال $RMSE=$) و اعتبارسنجی (۰/۱۳ تن در هکتار در سال $RMSE=$) کارایی بیش‌تری در مقایسه با روش رگرسیونی چندگانه با میانگین برآوردی حد قابل تحمل ۱/۱۳ تن در هکتار در سال داشت.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی، خاک‌های آهکی، رگرسیون چندگانه، روش اسکیدمور، فرسایش‌پذیری خاک

مقدمه

خاک سطحی بدون کاهش میزان تولید محصول در نظر گرفتند. در حال حاضر روش‌های مبتنی بر ضخامت خاک بر اساس قابلیت آن‌ها در برآورد میزان حد قابل تحمل هدررفت خاک بیش‌تر استفاده می‌شود. در تابع ریاضی مبتنی بر ضخامت خاک توسعه یافته توسط اسکیدمور^۶ (۲۶)، حد قابل تحمل هدررفت خاک بر اساس عمق فعلی خاک، کم‌ترین و بیش‌ترین عمق مناسب خاک برای رشد پایدار محصولات زراعی و حد بالای مقدار فرسایش قابل تحمل در تطابق با محیط برآورد می‌شود (۸).

اخیراً تعیین حد قابل تحمل هدررفت خاک مورد توجه پژوهشگران در دنیا قرار گرفته است. به عنوان نمونه، روزائف (۲۲) با در نظر گرفتن نفوذپذیری خاک، اندازه خاک‌دانه‌ها و ماده آلی روشی را در برآورد مقاومت خاک به فرسایش ارائه کرد. این روش به‌طور موفقیت‌آمیزی در استپ‌های جنگلی شمال روسیه به‌کار گرفته شد. ژینگوو و همکاران (۳۳) دو عامل ضخامت خاک و فرسایش‌پذیری خاک را به‌عنوان معنی‌دارترین عامل‌های مؤثر بر حد قابل تحمل هدررفت خاک معرفی نمودند. چاندل و هادا (۵) به ارزیابی حد قابل

فرسایش خاک^۴ از مسائل بسیار مهم و خطری جدی برای امنیت غذایی و در نتیجه حیات بشر به‌شمار می‌رود (۱۹، ۲۱ و ۲۵). اهمیت پدیده فرسایش زمانی مشخص می‌شود که مقدار فرسایش خاک با مقدار حد قابل تحمل آن مقایسه شود. حد قابل تحمل فرسایش خاک^۵ (T-value) شاخصی برای قضاوت در مورد پتانسیل خطر فرسایش خاک و کاهش تولید محصولات کشاورزی است. در واقع حد قابل تحمل هدررفت خاک میزان پتانسیل خطر فرسایش خاک، کاهش بهره‌وری و تولید از دست رفته و معیار نهایی از مهار فرسایش خاک و تخریب اراضی است (۲۳ و ۳۲). از نظر ریاضی، استمی و اسمیت (۲۷) حد قابل تحمل هدررفت خاک (T) را میزانی از تغییر

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب پژوهشگر پسادکتری، دانشیار و دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
(Email: aamousavi@gmail.com)
(*)- نویسنده مسئول:

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.82129

4- Soil erosion

5- Tolerable soil erosion

6- Skidmore

هدایت آبی اشباع ارزیابی و مقایسه کردند. نتایج آنان نشان داد که روش رگرسیون درختی تخمین‌های واقعی و دقیق‌تری ارائه می‌کند. استواری و همکاران (۱۶) و استواری و همکاران (۱۷) از این دو روش به‌ترتیب برای برآورد فرسایش‌پذیری خاک و ظرفیت تبادل کاتیونی استفاده کردند.

شهرستان مرودشت در نزدیکی مرکز استان فارس یکی از مناطق بسیار مهم در زمینه تأمین محصولات راهبردی کشاورزی مانند گندم، ذرت و چغندر قند در سطح کشور است. در این شهرستان سد مخزنی درودزن در منطقه کامفیروز بر روی رودخانه کر احداث شده که تأمین‌کننده ۲۸ درصد آب شرب شهر شیراز و ۷۰ درصد آب شرب شهرستان مرودشت و هزاران هکتار از اراضی کشاورزی پایین‌دست است. با توجه به این‌که در جنوب ایران (از جمله در مرودشت و حوضه آبخیز درودزن)، تاکنون مطالعه‌ای برای تعیین حد قابل تحمل هدررفت خاک به‌عنوان اولین گام در مطالعات فرسایش خاک انجام نشده است، لذا هدف از این پژوهش (۱) تعیین حد قابل تحمل هدررفت خاک در بخش کامفیروز شهرستان مرودشت که منطقه‌ای بسیار مهم از نظر کشاورزی و تولید برنج و زیر حوضه اصلی متصل به دریاچه سد درودزن است؛ و (۲) توسعه توابع انتقالی برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک با استفاده از ویژگی‌های زودیاقت خاک و به کمک روش رگرسیونی خطی چندگانه و رگرسیون درختی است.

مواد و روش‌ها

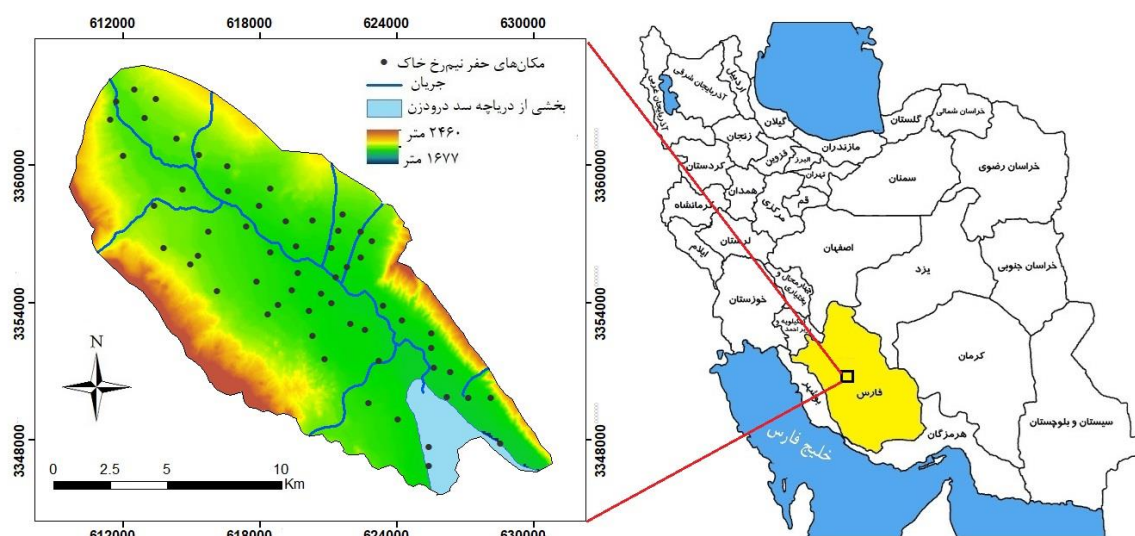
منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز کامفیروز با مساحت ۴۲۲ کیلومتر مربع در منطقه نیمه‌خشک و با میانگین بارش سالانه ۴۴۳ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۴ درجه سانتی‌گراد از زیر حوضه‌های سد درودزن و یکی از بخش‌های پنج‌گانه شهرستان مرودشت در استان فارس بین عرض‌های جغرافیایی $30^{\circ}20'30''$ و $52^{\circ}10'01''$ و طول‌های جغرافیایی $30^{\circ}14'03''$ تا $30^{\circ}15'24''$ قرار دارد (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه قسمت مسطح حوضه با مساحت ۱۲۰/۵ کیلومتر مربع با داشتن خاک حاصل‌خیز تحت کشاورزی بوده و به دریاچه سد درودزن متصل است (شکل ۱). به دلیل فعالیت‌های کشاورزی (از جمله کشت‌های جو و گندم دیم در اراضی شیب‌دار مجاور) در منطقه مورد مطالعه و کشت محصول برنج، سالانه مقدار زیادی از خاک فرسوده شده و حجم زیادی از رسوبات به‌طور مستقیم و پس از پیمودن مسیر بسیار کوتاهی وارد دریاچه سد درودزن می‌شوند. سد مخزنی درودزن با هسته رسی و با حجم ذخیره ۹۹۳ میلیون متر مکعب بر روی رودخانه کر احداث شده که علاوه بر نیاز کشاورزی و صنعت، بخش اعظم آب شرب مورد نیاز شهرستان‌های شیراز و مرودشت را نیز تأمین می‌کند.

تحميل هدررفت خاک در هندوستان پرداختند. در این پژوهش، دو روش میزان تشکیل خاک و روش ضخامت برای تعیین حد قابل تحمل هدررفت خاک استفاده شدند. نتایج نشان داد که روش ضخامت خاک از کارایی مناسبی برای تعیین حد قابل تحمل هدررفت خاک برخوردار است. دوآن و همکاران (۷) معادله اسکیدمور (۲۶) را با نگرش مبتنی بر حفاظت از تولید خاک در منطقه رودخانه سرخ چین اصلاح کردند. آنان سه عامل حداقل حد قابل تحمل تولید خاک، پتانسیل تولید کنونی و حد بهینه تولید خاک را به معادله اسکیدمور (۲۶) اضافه کردند. در زمینه حد قابل تحمل هدررفت خاک در ایران مطالعات محدودی انجام شده است. از جمله گوهر دوست و همکاران (۱۰) با به‌کارگیری سامانه اطلاعات جغرافیایی و معادله اسکیدمور (۲۶) حد قابل تحمل هدررفت خاک در حوضه آبخیز چهل-چای استان گلستان را بررسی و گزارش کردند بیش‌ترین مساحت منطقه (حدود ۴۳/۷ درصد) دارای حد قابل تحمل ۵/۳۷ تن در هکتار در سال و مساحتی حدود ۰/۵ درصد از منطقه دارای حد قابل تحمل ۲/۲۲ تن در هکتار در سال است. غفاری و همکاران (۸) نیز بر اساس روش‌های مبتنی بر عمق و کیفیت خاک به ارزیابی حد قابل تحمل فرسایش خاک در حوضه آبخیز حاجی قوشان استان گلستان پرداختند و گزارش کردند مقدار حد قابل تحمل فرسایش خاک به‌دست آمده با روش مبتنی بر عمق (۹/۲ تن در هکتار در سال) و کیفیت خاک (۱۰/۲ تن در هکتار در سال) بسیار به هم نزدیک می‌باشد.

از آنجائی که تعیین حد قابل تحمل خاک با استفاده از روش ضخامت خاک و معادله اسکیدمور (معادله ۱) نیازمند صرف وقت، هزینه و انرژی زیاد برای ایجاد نیم‌رخ خاک و تعیین پارامترهای مدل اسکیدمور (معادله ۱) است، لذا پژوهشگران سعی در برآورد حد قابل تحمل خاک با استفاده از توابع انتقالی و ویژگی‌های زودیاقت خاک به کمک روش‌های رگرسیونی دارند. رگرسیون خطی چندگانه به دلیل محاسبات ساده یکی از متداول‌ترین روش‌ها در توسعه توابع انتقالی خاک است. هدف این روش بررسی و مدل‌سازی رابطه‌ی بین متغیرهاست که در آن متغیر وابسته به شکل تابعی ریاضی از متغیر(های) مستقل تعریف می‌شود (۱۰).

یکی دیگر از پرکاربردترین روش‌های رگرسیونی در علوم محیطی روش رگرسیون درختی است. این روش یکی از روش‌های داده‌کاوی بر مبنای آشکار کردن ساختار داده‌ها است که مزایای ارزشمندی مانند سادگی در نتایج، عدم نیاز به نرمال بودن توزیع داده‌ها و تفسیر راحت نتایج را به همراه دارد. روش رگرسیون درختی، نقطه بهینه جداسازی متغیرهای مستقل را تعیین و آن‌ها را به گروه‌هایی که تا حد ممکن از نظر متغیر همگن باشد تفکیک می‌کند. تاکنون از روش رگرسیون خطی چندگانه و درختی در برآورد حد قابل تحمل خاک استفاده نشده است هرچند این روش‌ها در برآورد سایر ویژگی‌های خاک بکار گرفته شده‌اند. مکنزی و جکوبیر (۲۱) و دهقانی‌بانیانی و همکاران (۶) روش‌های رگرسیون درختی و رگرسیون خطی چندگانه را در تخمین



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز درودزن در استان فارس و ایران و مکان نیمرخ‌های حفر شده در منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Location of Doroudzan watershed in Fars province and Iran and locations of profiles in the studied area

بالای هدررفت (فرسایش قابل تحمل خاک)، Z ضخامت فعلی خاک، Z_1 و Z_2 به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین عمق مناسب خاک برای رشد پایدار محصولات زراعی هستند. T_1 حد پایین مقدار قابل تحمل فرسایش خاک است که در طول دوره‌ی پایه بهره‌وری برابر با میزان تشکیل خاک است. در واقع T_1 مقدار خاک هدررفته معادل با میزان تشکیل خاک است. $T_{(x,y,t)}$ برابر با T_1 زمانی است که عمق خاک در حداقل قابل تحمل خود است و سبب کاهش تولید نمی‌شود (T_2). T_2 حد بالای مقدار فرسایش قابل تحمل در تطابق با محیط است که در مدت زمان طولانی بهره‌وری را کاهش نمی‌دهد. $T_{(x,y,t)}$ برابر با T_2 زمانی است که خاک به حد کافی عمیق باشد. مقادیر بر اساس مقادیر پیشنهادی اسکیدمور (۲۶) و با مشورت کارشناس خبره کشاورزی و با در نظر داشتن نوع محصول غالب منطقه تعیین شد.

تعیین حد قابل تحمل فرسایش خاک به روش ضخامت خاک

در پژوهش حاضر، تعداد ۶۰ نیمرخ خاک با استفاده از بیل مکانیکی و کارگر حفر شد (شکل ۲). در روش مبتنی بر ضخامت خاک (۲۶)، حد قابل تحمل هدررفت خاک بر اساس عمق فعلی خاک، کم‌ترین و بیش‌ترین عمق مناسب خاک برای رشد پایدار محصولات زراعی و حد بالای مقدار فرسایش قابل تحمل در تطابق با محیط تعیین می‌شود. معادله اسکیدمور (۲۵) بر اساس عمق خاک به شرح زیر است:

$$T_{(x,y,t)} = (T_1 + T_2) / 2 - (T_2 - T_1) / 2 \cos \left[\frac{\pi(Z - Z_1)}{Z_2 - Z_1} \right] \quad (1)$$

که در آن $T_{(x,y,t)}$ حد قابل تحمل هدررفت خاک در مکان x, y و زمان t ، T_1 حد پایین هدررفت (فرسایش قابل تحمل خاک)، T_2 حد



شکل ۲- حفر نیمرخ‌های خاک با استفاده از بیل مکانیکی و اندازه‌گیری عمق نیمرخ‌های خاک
Figure 2- Drilling of soil profiles using mechanical excavator and measurement of soil profiles depth

که داده‌ای خارج از دامنه میانگین به‌اضافه و منه‌ای دو برابر انحراف معیار باشد داده مورد نظر پرت به حساب می‌آید (۳).

برای تهیه مدل‌های رگرسیونی برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک اطلاعات حاصل از ۶۰ نیم‌رخ خاک به دو قسمت تقسیم شد. یک قسمت با داشتن داده‌های ۴۲ نیم‌رخ (۷۰ درصد نیم‌رخ‌ها) برای واسنجی^۱ مدل‌ها و دیگری با داده‌های ۱۸ نیم‌رخ خاک (۳۰ درصد نیم‌رخ‌ها) برای اعتبارسنجی^۲ مدل‌های رگرسیونی استفاده شد.

از آنجائی‌که اگر بین متغیرهای مستقل در رگرسیون چندگانه رابطه خطی وجود داشته باشد به دلیل هم‌راستایی برآورد متغیرها بر مبنای مدل رگرسیون گمراه‌کننده است، لذا در ابتدا هم‌راستایی بین متغیرها با استفاده از شاخص تورم واریانس^۳ بررسی شد:

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} \quad (2)$$

که در آن VIF عامل تورم واریانس و R^2 ضریب تعیین^۴ است. مقادیر VIF بیش از پنج نشان‌دهنده وجود مسئله هم‌راستایی بین متغیرهای مستقل است (۲۹). در نهایت با استفاده از روش رگرسیون چندگانه گام به گام به جلو^۵ مدل رگرسیونی به شکل رابطه (۳) تهیه شد.

که در آن X_1 تا X_n متغیرهای ورودی (مستقل)، a_0 عرض از مبدأ خط a_1 تا a_n ضرایب رگرسیونی متغیرهای مستقل متناظر می‌باشند. در این مطالعه متغیر وابسته حد قابل تحمل هدررفت خاک و متغیرهای مستقل ویژگی‌های خاک بودند.

از همان ویژگی‌های زودیافت به کارگرفته شده در روش رگرسیون چندگانه به عنوان ورودی در روش رگرسیون درختی در برآورد حد قابل تحمل هدررفت استفاده شد. در روش رگرسیون درختی ابتدا متغیرهای مستقل (پیوسته و کیفی) به نرم‌افزار معرفی می‌شوند. سپس نرم‌افزار متغیرهای مؤثر را انتخاب و آن‌ها را بر اساس اولویت به طور متوالی به دو گره تقسیم می‌کند. بر اساس این منطق، یک ساختار شبیه درخت ایجاد می‌شود. بنابراین، در نخستین گره، ویژگی دیریافت مد نظر به کمک متغیری که بیشترین سهم را در توجیه تغییرات آن دارد به دو گره فرزندی که در واقع میانگین کلی از متغیر دیریافت است تقسیم می‌شود (۱۶ و ۱۷). برای ایجاد رگرسیون درختی از مدول رگرسیون درختی استاندارد نرم‌افزار STATISTICA 8.0 و با شرایط زیر استفاده شد: برای جلوگیری از بزرگ شدن بیش

پس از حفر نیم‌رخ‌ها با استفاده از بیل مکانیکی مؤلفه عمق فعلی خاک (Z) با استفاده از متر دستی اندازه‌گیری شد. عمق فعلی خاک از سطح زمین تا لایه محدودکننده مانند سنگ بستر و یا لایه‌های عمدتاً حاوی قلوه‌سنگ در نظر گرفته شد. در منطقه سد درودزن برنج و گندم محصولات عمده بوده و بخش وسیعی از منطقه تحت کشت این دو گیاه است، لذا برای تعیین مقادیر Z_1 و Z_2 حداقل و حداکثر عمق خاک مناسب برای این گیاهان در نظر گرفته شد. مقدار Z_1 بر اساس مقدار پیشنهادی خواجه‌پور (۱۱) و نیز مشورت با کارشناسان کشاورزی در منطقه از ۰/۲۵ تا ۰/۵ متر در نظر گرفته شد. مقدار Z_2 با توجه به حداکثر عمق نیم‌رخ خاک و مقدار پیشنهادی اسکیدمور (۲۶) و مشاوره با کارشناسان کشاورزی ۲ متر در نظر گرفته شد. برای مؤلفه‌های T_1 و T_2 نیز از مقادیر پیشنهادی اسکیدمور (۲۶) به‌ترتیب برابر ۰/۲ و ۲ میلی‌متر استفاده شد. هرچند بایستی توجه نمود که عوامل مؤثر بر فرسایش و تشکیل خاک پویا هستند و در گذر زمان و با تغییر شرایط تغییر می‌کنند بنابراین مقادیر حد قابل تحمل نیز می‌توانند بسته به شرایط تا حدودی دچار تغییر شوند که این موضوع نیز بایستی در پژوهش‌ها و به‌ویژه در تصمیم‌گیری‌ها مد نظر قرار گیرد.

علاوه بر اندازه‌گیری‌های صحرایی، از افق سطحی خاک (۰ تا ۳۰ سانتی‌متری) نمونه‌برداری انجام و برخی از ویژگی‌های خاک در آزمایشگاه به‌شرح زیر اندازه‌گیری شد: چگالی ظاهری خاک به روش کلوخه، بافت خاک به روش هیدرومتری (۲)، واکنش نمونه‌های خاک به وسیله pH متر، قابلیت هدایت الکتریکی به وسیله هدایت‌سنج الکتریکی، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با اسید کلریدریک ۲ نرمال و درصد کربن آلی خاک به روش اکسایش خشک (۲) تعیین شد. میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (MWD) در حالت مرطوب با سری الک‌های با قطر سوراخ‌های ۱، ۰/۵، ۰/۱۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر در زمان ۲ دقیقه تعیین شد. نفوذپذیری خاک بر اساس سرعت نهایی نفوذ آب در خاک با استفاده از روش استوانه دوگانه در فصل خشک سال (برای کاهش اثر رطوبت پیشین بر سرعت نفوذ) اندازه‌گیری شد.

توسعه توابع انتقالی برای برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک

قبل از تهیه توابع، آمار توصیفی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده نمونه‌های خاک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای این منظور، نرمال بودن داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شد. در این مطالعه داده‌هایی که خارج از دامنه $\pm 2\sigma$ (انحراف معیار) بودند به‌عنوان داده‌های پرت در نظر گرفته شدند (لازم به ذکر است بر اساس منحنی توزیع نرمال زمانی

1- Calibration

2- Validation

3- Variance Inflation Factor

4- Coefficient of Determination

5- Forward Stepwise Regression

آزمون t نشان داد که میانگین ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده در دو مجموعه واسنجی و اعتبارسنجی تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. سیلت با میانگین ۴۵/۲۲ درصد بیش‌ترین مقدار اجزای بافت خاک را به خود اختصاص داد. میزان کربنات کلسیم معادل با میانگین ۴۲/۸۷ درصد از حداقل ۱۵/۲۵ درصد تا ۶۵/۵۰ درصد متغیر بود که این میزان کربنات کلسیم در منطقه مورد مطالعه مشابه با خاک‌های آهکی سایر مناطق ایران است.

میانگین، حداقل و حداکثر ماده آلی خاک به ترتیب ۲/۹۳، ۱/۵۷ و ۵/۰۶ درصد است که با نتایج ارائه شده توسط استواری و همکاران (۱۷) در منطقه سیمکان استان فارس و نزدیک به منطقه مورد مطالعه با اقلیم مشابه هم‌خوانی دارد. دامنه مقدار عامل فرسایش‌پذیری خاک با میانگین ۰/۳۸ تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر^۳ از حداقل ۰/۲۹ تا حداکثر ۰/۴۴ تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر متغیر است که این مقادیر با پژوهش‌های انجام شده هم‌خوانی دارد. واعظی و همکاران (۳۱) نیز میانگین عامل فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه هشت‌رود را ۰/۳۵ تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر گزارش کردند. در مطالعه استواری و همکاران (۱۷) در خاک‌های آهکی منطقه سیمکان استان فارس مقدار فرسایش‌پذیری حاصل از کرت‌های استاندارد با میانگین ۰/۳۰ تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر از حداقل ۰/۱۵ تا حداکثر ۰/۴۴ تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر متغیر بود.

برآورد مقدار حد قابل تحمل هدررفت خاک به روش اسکیدمور

در جدول ۲ خلاصه آماری پارامترهای مدل اسکیدمور (۲۶) در برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک ارائه شده است. عمق فعلی خاک در بخش‌های بالادست حوضه آبخیز سد درودزن از حداقل ۰/۴۰ متر در حواشی و دشت‌های دامنه‌ای تا حداکثر ۱/۸۰ متر در مرکز دشت متغیر بود. حداقل و حداکثر پارامتر Z_1 (کم‌ترین عمق مناسب خاک برای رشد پایدار محصولات زراعی در منطقه مورد مطالعه) بر اساس عمق فعلی خاک به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۵۰ متر نظر گرفته شد.

حداکثر مقدار پارامتر Z_2 (بیش‌ترین عمق مناسب خاک برای رشد پایدار محصولات زراعی) در این منطقه ۲ متر (که در بیش‌تر پژوهش‌های خاکشناسی توصیه شده است) در نظر گرفته شد و مقادیر پیشنهادی اسکیدمور (۲۶) برای حداقل و حداکثر پارامترهای T_1 و T_2 در نظر گرفته شد. مقدار حد قابل تحمل هدررفت خاک با میانگین ۱/۰۴ تن در هکتار در سال از ۰/۲۹ تا ۲/۲۵ تن در هکتار در سال

از اندازه درخت رگرسیون، حداقل اندازه‌ی نمونه در هر گره ۲۸ و حداکثر تعداد گره ۳۰ تا و شرط شکستن گره‌ها بر مبنای واریانس گذاشته شد.

تجزیه و تحلیل‌های آماری شامل مقایسه میانگین‌های دو مجموعه داده واسنجی و اعتبارسنجی با آزمون t، نرمال بودن داده‌ها با آزمون کلموگروف-اسمیرنوف، همبستگی داده‌ها و ایجاد مدل‌های رگرسیونی چندگانه و درختی با استفاده از نرم‌افزار STATISTICA 8.0 انجام شد.

ارزیابی و کارایی مدل‌های برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک

چنانچه گفته شد از داده‌های ۱۸ نیم‌رخ خاک برای ارزیابی کارایی مدل‌های رگرسیونی در برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک استفاده شد. برای ارزیابی کارایی مدل‌ها از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، میانگین خطا^۱ (ME) و ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) استفاده شد (۱):

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2} \quad (3)$$

$$ME = \sum \left(\frac{P_i - O_i}{n} \right) \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (5)$$

که در آن‌ها P_i و O_i به ترتیب مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده حد قابل تحمل هدررفت خاک و n تعداد داده‌ها می‌باشند. آماره RMSE بیان‌گر میزان خطا است و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد کارایی مدل بیشتر است. آماره ME بیان‌گر وجود اریبی است و هر اندازه به صفر نزدیک‌تر باشد پیش‌بینی از اریبی کم‌تری برخوردار است (۳).

نتایج و بحث

عمده نمونه‌های خاک به چهار کلاس بافت خاک شامل کلاس‌های لوم، لوم‌رسی، سیلتی رسی لومی و رسی سیلتی تعلق دارند (شکل ۳). جدول ۱ خلاصه آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک در دو مجموعه داده واسنجی و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. نتایج

1- Mean Error

2- Root Mean Square Error

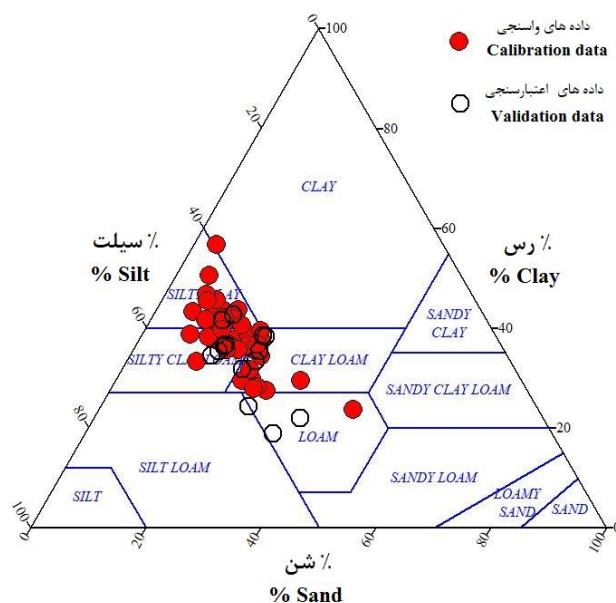
تن در هکتار در سال تعیین کردند.

تهیه مدل رگرسیونی برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک

در جدول ۳ همبستگی ویژگی‌های مختلف خاک با یکدیگر و حد قابل تحمل هدررفت خاک حاصل از روش اسکیدمور (۲۶) نشان داده شده است. اجزای رس و شن خاک به ترتیب همبستگی منفی و مثبت معنی‌دار با فرسایش‌پذیری خاک داشتند (جدول ۳). بر خلاف مطالعه حاضر، در مطالعه کارلوس و همکاران (۴) با افزایش درصد شن خاک مقدار فرسایش‌پذیری کاهش یافت ($p < 0.05$, $r = -0.38$). آنان همچنین بین مقدار درصد رس و فرسایش‌پذیری همبستگی بسیار ضعیف و غیرمعنی‌داری ($r = 0.03$) گزارش کردند. کارلوس و همکاران (۴) همچنین گزارش کردند اجزای رس به دلیل اندازه کوچک و نیز نیروی چسبندگی بین ذرات در برابر فرسایش، حساسیت کمتر و مقاومت بیشتری در برابر جدا شدن توسط عامل فرسایش‌دهنده دارند. در بین اجزای بافت خاک، سیلت ($p > 0.05$, $r = 0.04$) رابطه معنی‌داری با میزان فرسایش‌پذیری خاک و نیز حد قابل تحمل فرسایش خاک نداشت. فرسایش‌پذیری بیش‌ترین همبستگی (-0.65) را با نفوذ آب در خاک داشت. یو و همکاران (۳۴)، واعظی و همکاران (۳۱)، استواری و همکاران (۱۷) نیز همبستگی منفی معنی‌دار نفوذ آب در خاک با فرسایش‌پذیری را گزارش کردند.

متغیر است. در مطالعه گوهردوست و همکاران (۱۱) در حوضه آبخیز چهل چای استان گلستان متوسط حد قابل تحمل هدررفت خاک ۵/۶۵ تن در هکتار در سال گزارش شده که با مقدار به‌دست آمده در این مطالعه تفاوت دارد که می‌تواند به دلیل شرایط آب و هوایی متفاوت و نیز تفاوت در زمین‌شناسی منطقه، توپوگرافی و نوع خاک باشد. در پژوهش حاضر میزان بارندگی دریافتی بسیار کمتر از شمال ایران بوده و خاک‌ها نیز مقادیر زیادی کربنات کلسیم معادل در مقایسه با خاک‌های شمال ایران دارند که می‌تواند فعالیت‌های

خاکسازی و در نتیجه حد قابل تحمل خاک را تحت تأثیر قرار دهد. ژینگوو و همکاران (۳۳) نیز مقدار حد قابل تحمل هدررفت خاک برای خاک‌های سیاه مناطق پرباران شمال چین را از ۶۸ تا ۳۵۸ تن بر کیلومتر مربع (با میانگین ۱۴۱ تن در کیلومتر مربع) گزارش کردند. آنان دو عامل ضخامت خاک و حساسیت به فرسایش را به عنوان مهمترین عوامل مؤثر بر حد قابل تحمل هدررفت خاک معرفی کردند. کوزنتساو و عبدالخانوا (۱۲) رابطه‌ی اسکیدمور (۲۶) را در برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک‌های چرنوزم اصلاح و مقدار حداکثر ۱۰ تن در هکتار در سال را برای خاک‌های غیرفرسوده گزارش نمودند. آنان همچنین بیان کردند حد قابل تحمل هدررفت خاک بر اساس نوع خاک، درجه فرسایش‌پذیری و الگوی گیاهی متغیر است. غفاری و همکاران (۹) نیز میانگین حد قابل تحمل هدررفت خاک به روش عمق خاک را برای حوضه آبخیز حاجی قوشان استان گلستان ۱۰/۲



شکل ۳- توزیع اندازه ذرات نمونه‌های خاک حوضه آبخیز درودزن در استان فارس

دایره‌های تو خالی داده‌های واسنجی و دایره‌های توپر داده‌های اعتبارسنجی هستند.

Figure 3- Particles size distribution of soil samples in Doroudzan watershed in Fars province
Hallow circles are calibration data and solid circles are validation data.

جدول ۱- خلاصه آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های حوضه آبخیز درودزن در استان فارس

Table 1- Summary statistic of physical and chemical properties of Doroudzan watershed soils in Fars province

ویژگی‌های خاک Soil properties	واحد Unit	داده‌های واسنجی (n=45) Calibration data (n=45)				داده‌های اعتبارسنجی (n=15) Validation data (n=15)			
		حداقل Min.	حداکثر Max.	میانگین Mean	انحراف معیار SD	حداقل Min.	حداکثر Max.	میانگین Mean	انحراف معیار SD
پ‌هاش (pH)	-	6.65	7.91	7.39	0.27	7.05	7.86	7.38	0.220
قابلیت هدایت الکتریکی (EC)	dS m ⁻¹	0.60	4.02	1.62	3.47	0.350	6.07	2.16	1.67
کربنات کلسیم معادل (CCE)	%	15.2	65.5	42.7 ^a	7.8	23.2	66.5	40.5 ^a	9.51
میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD)	mm	0.68	2.45	1.33 ^a	0.57	0.800	1.98	1.26 ^a	0.400
نفوذپذیری (PE)	cm h ⁻¹	0.80	3.80	1.70 ^a	0.50	0.35	3.30	1.57 ^a	0.820
جرم مخصوص ظاهری (BD)	g cm ⁻³	1.47	2.22	1.79 ^a	0.19	1.34	2.02	1.42 ^a	0.200
ماده آلی (OM)	%	1.50	4.21	3.02 ^a	0.88	1.70	4.22	2.84 ^a	0.620
رس (Clay)	%	23.7	56.8	38.5 ^a	6.30	18.9	42.8	37.3 ^a	7.50
سیلت (Silt)	%	32.2	54.6	45.4 ^a	3.80	40.1	51.4	46.1 ^a	3.50
شن (Sand)	%	13.3	44.1	18.3 ^a	7.50	12.2	35.4	21.1 ^a	7.20
فرسایش‌پذیری خاک (Soil erodibility)	t ha h ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹	0.029	0.044	0.030 ^a	0.002	0.027	0.046	0.031 ^a	0.003
عمق خاک (Soil depth)	m	0.40	1.80	1.04	0.350	0.45	1.75	1.10	0.038
حد قابل تحمل هدررفت خاک (Soil loss tolerance)	ton ha ⁻¹ year ⁻¹	0.29	2.25	1.14 ^a	0.52	0.35	1.95	1.03 ^a	0.43

EC, CCE, MWD, PE, BD و OM به ترتیب قابلیت هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، سرعت نفوذ آب در خاک، چگالی ظاهری و ماده آلی خاک هستند.

EC, CCE, MWD, PE, BD and OM are electrical conductivity, calcium carbonate equivalent, mean weight diameter, water infiltration rate, bulk density and organic matter, respectively.

جدول ۲- خلاصه آماری پارامترهای مدل اسکیدمور در برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک در حوضه آبخیز درودزن در استان فارس

Table 2- Summary statistic of Skidmore model parameters in estimation of soil loss tolerance limit in Doroudzan watershed in Fars province

پارامتر Parameter	واحد Unit	میانگین Mean	حداقل Min.	حداکثر Max.	انحراف معیار SD
Z (عمق نیم‌رخ خاک) Z (soil profile depth)	m	1.00	0.40	1.80	0.41
Z ₁ (کم‌ترین عمق مناسب خاک برای رشد پایدار محصولات زراعی) Z ₁ (the lowest soil proper depth for sustainable growth of crops)	m	0.47	0.25	0.50	0.08
Z ₂ (بیش‌ترین عمق مناسب خاک برای رشد پایدار محصولات زراعی) Z ₂ (the most soil proper depth for sustainable growth of crops)	m	1.72	0.80	2.00	0.36
T ₁ (حد پایین حد قابل تحمل هدررفت خاک T _(x,y,t)) T ₁ (the low limit of soil loss tolerance limit, T _(x,y,t))	mm	0.20	0.20	0.20	0.00
T ₂ (حد بالای حد قابل تحمل هدررفت خاک T _(x,y,t)) T ₂ (the upper limit of soil loss tolerance limit, T _(x,y,t))	mm	1.85	1.10	2.00	0.26
T (حد قابل تحمل هدررفت خاک) T (soil loss tolerance limit)	mm year ⁻¹	0.14	0.029	0.225	0.05

جدول ۳- ضرایب همبستگی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های حوضه آبخیز درودزن در استان فارس

Table 3- Correlation coefficient of physical and chemical properties of Doroudzan watershed soils in Fars province

ماده آلی (OM)	کربنات کلسیم معادل (CCE)	شاخص فرسایش پذیری (K- factor)	میانگین هندسی (dg)	جرم مخصوص ظاهری (BD)	قابلیت هدایت الکتریکی (EC)	پهاش (pH)	نفوذپذیری (PE)	رس (Clay)	سیلت (Silt)	شن (Sand)	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)
شن (Sand)										0.32 *	
سیلت (Silt)									0.14	-0.48 *	
رس (Clay)									0.29	-0.88 *	0.00
نفوذپذیری (PE)								-0.20	-0.07	0.21	0.12
پهاش (pH)							0.12	-0.04	0.20	-0.06	0.34 *
قابلیت هدایت الکتریکی (EC)						-0.47 *	-0.09	-0.04	-0.18	0.12	0.11
جرم مخصوص ظاهری (BD)						0.15	0.03	0.31 *	-0.11	-0.22	0.17
میانگین هندسی (dg)						-0.29	-0.03	-0.89 *	-0.31 *	0.94 *	-0.26
شاخص فرسایش- پذیری (K- factor)						0.22	0.10	-0.65 *	0.04	0.48 *	-0.31 *
کربنات کلسیم معادل (CCE)						-0.32 *	0.08	-0.12	-0.22	0.41 *	-0.17
ماده آلی (OM)						0.24	0.32 *	-0.12	0.22	-0.17	0.41 *
حد قابل تحمل فرسایش (T)						-0.77 *	-0.16	-0.21	-0.10	0.22	-0.53 *

OM, CCE, K-factor, dg, BD, EC, PE, MWD و T به ترتیب میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، سرعت نفوذ آب در خاک، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع، چگالی ظاهری، میانگین هندسی قطر ذرات، فرسایش‌پذیری خاک، کربنات کلسیم معادل، ماده آلی و حد قابل تحمل فرسایش خاک هستند (*). معنی‌دار در سطح ۵ درصد).

IWD, PE, EC, BD, dg, K-factor, CCE, OM, and T are mean weight diameter, permeability, electrical conductivity of saturated extract, bulk density, geometric mean weight diameter, soil erodibility, calcium carbonate equivalent, organic matter, and soil loss tolerance limit, respectively (*). Significant at the probability level of 0.05).

شدن و فرسایش خاک را کاهش می‌دهد (جدول ۳). سانتز و همکاران (۲۷) و تجادا و گنزالس (۲۹) نیز اثر معنی‌دار ماده‌آلی و ذرات شن در کاهش مقدار فرسایش را گزارش کردند. ویشمایر و مانرینگ (۳۲)

بیش‌ترین همبستگی حد قابل تحمل فرسایش خاک به میزان ۰/۷۷- با ماده آلی است. ماده‌آلی با تأثیر مثبت بر خاک‌دانه‌سازی، احتمالاً مقدار نفوذپذیری خاک را افزایش و در نتیجه پتانسیل شسته

است (مقدار پارامتر β برای ماده آلی بیشتر از سایر پارامترهاست). دلیل معنی‌دار شدن ماده آلی تأثیر این ویژگی بر میزان خاک‌دانه‌سازی و در نتیجه مقاومت خاک به فرسایش است.

چنانچه در جدول ۳ نشان داده شده است ماده آلی رابطه مثبت معنی‌دار با میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها دارد. پس از ماده آلی سرعت نفوذ آب در خاک بیشترین تأثیر را در برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک دارد. حد قابل تحمل هدررفت خاک رابطه منفی به نسبت قوی با میزان فرسایش‌پذیری خاک دارد. به این مفهوم که با افزایش فرسایش‌پذیری حد قابل تحمل هدررفت خاک کاهش می‌یابد. همان گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است فرسایش‌پذیری با سرعت نفوذ آب در خاک و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها همبستگی منفی معنی‌دار دارد. به عبارتی خاک‌های با سرعت نفوذ آب در خاک زیاد و خاک‌دانه‌های پایدار، فرسایش‌پذیری کمتر و در نتیجه حد قابل تحمل هدررفت خاک بیشتری دارند. در مطالعه واعظی و همکاران (۳۱) و استواری و همکاران (۱۷) نیز سرعت نفوذ آب در خاک مهم‌ترین عامل در برآورد فرسایش‌پذیری بود. لازم به ذکر است تاکنون مطالعه‌ای در تهیه توابع انتقالی برای برآورد حد قابل تحمل فرسایش خاک در ایران انجام نشده است. در پژوهش لاریا و همکاران (۲۰۰۸) در مدل‌سازی تعیین حدقابل تحمل خاک پنج ویژگی مؤثر بر مقاومت خاک در برابر نفوذ و رشد ریشه گیاه شامل نفوذپذیری، چگالی ظاهری، فرسایش‌پذیری خاک، درصد کربن آلی و pH در نظر گرفته می‌شود. لذا pH خاک با تأثیر بر قابلیت دسترسی عناصر در خاک و اثر بر رشد ریزجانداران خاک می‌تواند بر رشد ریشه گیاه و در نتیجه بر حد قابل تحمل هدررفت خاک مؤثر باشد.

دریافتند که مقدار خاک موجود در رواناب رابطه‌ی معکوس با مقدار ماده‌آلی خاک دارد. محتوای کربنات کلسیم معادل با فرسایش‌پذیری همبستگی منفی معنی‌دار دارد (جدول ۳). کربنات کلسیم با ضرایب همبستگی $-0/35$ و $-0/32$ به ترتیب با مقدار حد قابل تحمل فرسایش و فرسایش‌پذیری خاک رابطه معنی‌دار دارد. کربنات کلسیم معادل علاوه بر افزایش مقاومت خاک به جدا شدن ذرات توسط قطرات باران و رواناب، با داشتن اثر معنی‌دار بر خاک‌دانه‌سازی مقاومت خاک را افزایش داده که در نتیجه آن حد قابل تحمل فرسایش خاک افزایش می‌یابد (۱۷ و ۲۵). بین میزان فرسایش‌پذیری خاک با میزان حد قابل تحمل هدررفت خاک رابطه معنی‌دار با ضریب همبستگی $-0/31$ وجود دارد که نشان می‌دهد با افزایش فرسایش‌پذیری خاک (حساسیت خاک به فرسایش) حد قابل تحمل هدررفت خاک کاهش می‌یابد.

روش رگرسیونی چندگانه

بر اساس آزمون t ، میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده در مجموعه داده‌های اعتبارسنجی و واسنجی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($p > 0/05$). از میان ویژگی‌های زودیافت خاک، تنها ضرایب چهار ویژگی نفوذ آب در خاک، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، pH و ماده آلی معنی‌دار شد ($p < 0/05$). مقدار شاخص تورم واریانس (VIF) برای هر چهار پارامتر کمتر از ۵ شد که نشان‌دهنده عدم هم‌راستایی بین متغیرهای ورودی است. جزئیات مدل تهیه شده در جدول ۴ و در رابطه (۷) ارائه شده است. در این جدول مشخص است که ماده آلی خاک با داشتن بیشترین ضریب استاندارد شده ($-0/64$) = Beta) مهمترین ویژگی در برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک

جدول ۴- جزئیات روش رگرسیون گام به گام به جلو در برآورد حد قابل تحمل فرسایش خاک با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک در

حوضه آبخیز سد درودزن در استان فارس

Table 4- Details of forward stepwise regression method in estimation of soil erosion tolerance limit using soil easy-measured properties Doroudzan watershed in Fars province

measured properties Boroujzen watershed in Fars province						
مدل Model	ضرایب استاندارد نشده Not standardized coefficient		ضرایب استاندارد شده Standardized coefficient		معنی‌داری Significance	شاخص تورم واریانس Variance inflation index
	B	خطای معیار SE	شاخص بتا Beta index			
مقدار ثابت Constant	6.50	16.25			0.00	
ماده آلی OM	-4.58	0.59	-0.64		0.00	2.12
پایداری خاکدانه MWD	-3.08	1.44	-0.19		0.03	1.16
نفوذ پذیری PE	-2.44	0.61	-0.33		0.00	3.35
پ‌هاش pH	-4.75	2.06	-0.19		0.03	2.25

$$T = 6.50 - 4.58 \text{ OM} - 2.44 \text{ PE} - 4.75 \text{ pH} - 3.08 \text{ MWD}$$

$$R^2 = 0.81; p < 0.01$$

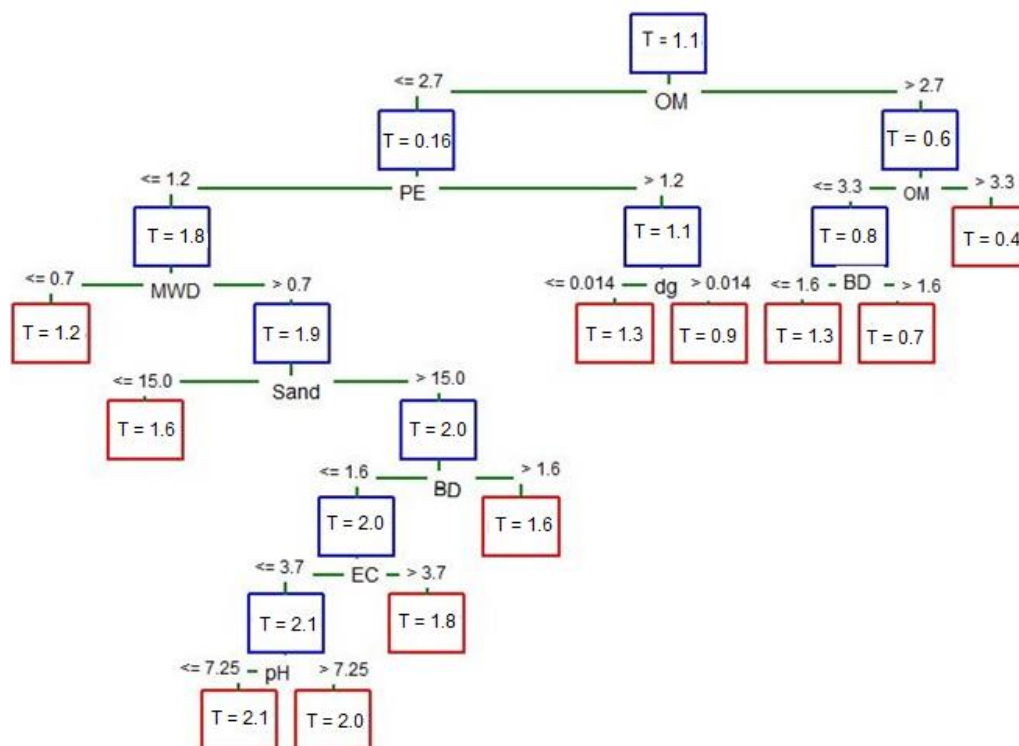
(۷)

ویژگی‌ها داشتند به دو گره فرزندی تقسیم شد. گره مادری ماده آلی به دو گره فرزندی کوچکتر-مساوی ۲/۷ درصد و بزرگتر از ۲/۷ درصد تقسیم شد. گره فرزندی سمت راست مجدد بر اساس ماده آلی به گره فرزندی تقسیم می‌شود که اهمیت و ارتباط ماده آلی با حد قابل تحمل فرسایش خاک را نشان می‌دهد. گره فرزندی سمت چپ در اولین تقسیم‌بندی بر اساس سرعت نفوذ آب در خاک به دو گره فرزندی تقسیم شده است (شکل ۴). در جدول ۴ نشان داده شده که سرعت نفوذ آب در خاک در تهیه تابع انتقالی رگرسیونی برای برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک با داشتن ضریب استاندارد شده ۰/۳۳- اهمیت ویژه‌ای دارد. با رفتن از گره‌های ابتدایی به سمت گره‌های فرزندی در پایین درخت رگرسیونی، ویژگی‌هایی ظاهر می‌شوند که اهمیت کم‌تر و همبستگی کم و غیرمعنی‌داری با حد قابل تحمل فرسایش خاک دارند. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC) اشاره کرد که در تابع تهیه شده خطی وارد نشده است.

که در آن MWD میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (میلی‌متر)، OM میزان ماده آلی (درصد)، PE سرعت نفوذ آب در خاک (سانتی‌متر بر ساعت) و T حد قابل تحمل فرسایش خاک (تن در هکتار در سال) است.

روش رگرسیون درختی

شکل ۴ نمودار درختی در برآورد حد قابل تحمل فرسایش خاک با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است اولین گره (گره مادری) بر اساس ماده آلی به دو گره فرزندی تقسیم شد. باتوجه به همبستگی قوی و معنی دار بین ماده آلی و حد قابل تحمل فرسایش خاک (۰/۷۷) این تقسیم‌بندی کاملاً منطقی و صحیح به نظر می‌رسد. در مطالعه دهقانی و همکاران (۶) و استواری و همکاران (۱۶) نیز به‌ترتیب در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع و فرسایش‌پذیری خاک گره مادری اول بر ماده آلی و سرعت نفوذ آب در خاک که بیشترین همبستگی را با این



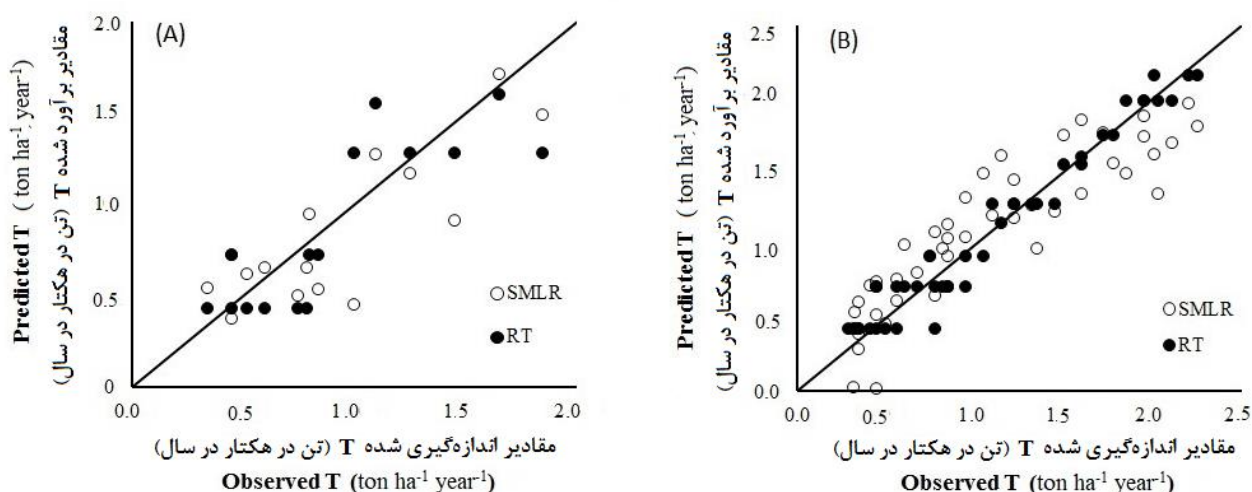
شکل ۴- نمودار درختی برآورد حد قابل تحمل فرسایش خاک در حوضه آبخیز درودزن در استان فارس (T: میانگین حد قابل تحمل هدررفت خاک (تن در هکتار در سال); OM: ماده آلی (درصد); MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (میلی‌متر); EC: قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (دسی‌زیمنس بر متر); BD: چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب))

Figure 4- Tree diagram of soil loss tolerance limit estimation in Doroudzan watershed in Fars province (T: mean of soil loss tolerance limit (ton ha⁻¹ year⁻¹); OM: organic matter (%); MWD: aggregates mean weight diameter (mm); EC: electrical conductivity in soil saturation extract (dS m⁻¹); BD: bulk density (g cm⁻³))

نشان داده شده است در هر دو مجموعه داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی روش رگرسیون درختی کارایی بسیار بیشتری در مقایسه با روش رگرسیون چندگانه دارد (پراکنش نقاط حول خطوط ۱ به ۱ در روش رگرسیون درختی کمتر از روش رگرسیون چندگانه است).

اعتبارسنجی توابع انتقالی رگرسیونی خطی و درختی

شکل ۵ نمودار ۱ به ۱ مقادیر اندازه‌گیری شده حد قابل تحمل هدررفت خاک به روش اسکیدمور (۲۵) در مقابل مقادیر برآورد شده با استفاده از روش‌های رگرسیونی خطی چندگانه گام به گام (SMLR) و رگرسیون درختی (RT) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۵



شکل ۵- نمودار ۱ به ۱ مقادیر اندازه‌گیری شده حد قابل تحمل هدررفت خاک (T) در مقابل مقادیر برآورد شده با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی چندگانه گام به گام (SMLR) و رگرسیون درختی (RT) برای دو گروه داده واسنجی (A) و اعتبارسنجی (B)

Figure 5- 1 to 1 plot of measured soil loss tolerance values (T) versus estimated values using forward stepwise multiple linear regression (SMLR) and tree regression (RT) methods for two calibration (A) and validation (B) data sets

جدول ۵- آماره‌های ارزیابی روش‌های رگرسیونی خطی چندگانه (SMLR) و رگرسیون درختی (RT) برای برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک در دو مجموعه داده واسنجی و اعتبارسنجی

Table 5- Evaluation statistics[†] of forward stepwise multiple linear regression (SMLR) and tree regression (RT) methods for estimating soil loss tolerance limit in two calibration and validation data sets

روش‌ها Methods	R ²		RMSE (t ha ⁻¹ year ⁻¹)		ME (t ha ⁻¹ year ⁻¹)	
	اعتبارسنجی Validation	واسنجی Calibration	اعتبارسنجی Validation	واسنجی Calibration	اعتبارسنجی Validation	واسنجی Calibration
SMLR	0.67	0.81	0.27	0.28	-0.086	0.00
RT	0.78	0.96	0.26	0.125	-0.055	0.00

†: RMSE و ME به ترتیب ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطا می‌باشند.

†: RMSE and ME are root mean square error and mean error respectively.

در هکتار در سال (RMSE=) و ارزیابی ناچیز از خط ۱:۱ (۰ تن در هکتار در سال (ME =) در هر دو مجموعه داده، در مقایسه با روش رگرسیون چندگانه کارایی بیشتری دارد (جدول ۵). راتولز و پاچپسکی (۱۹) و پاچپسکی و راتولز (۱۷) کارایی بیشتر روش رگرسیون درختی برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در برابر روش رگرسیون چندگانه را گزارش کردند. دهقانی و همکاران (۶) در پژوهش خود کارایی

جدول ۵ آماره‌های ارزیابی روش‌های رگرسیونی خطی چندگانه و رگرسیون درختی در برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک را نشان می‌دهد. بر اساس آماره‌های ارزیابی، روش رگرسیون درختی با داشتن ضریب تعیین بیشتر در هر دو مجموعه داده واسنجی ($R^2 = 0.96$) و اعتبارسنجی ($R^2 = 0.78$)، کم‌ترین مقدار خطا در داده واسنجی (۰/۲۵۹ تن در هکتار در سال (RMSE=) و اعتبارسنجی ۰/۱۲۵ تن

رگرسیونی تنها بر اساس چهار ویژگی سرعت نفوذ آب در خاک، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، pH و ماده آلی توسعه یافت. اثر و ارتباط ماده آلی با حد قابل تحمل هدررفت خاک در رگرسیون درختی نیز با نمایان شدن در اولین تقسیم گره مادری در درخت رگرسیون مشاهده شد. مقایسه دو روش رگرسیونی چندگانه و درختی نشان داد که روش رگرسیون درختی (با میانگین برآورد ۱/۰۸ تن در هکتار در سال) و با داشتن آماره‌های ارزیابی بهتر در مقایسه با روش رگرسیونی چندگانه (با میانگین برآورد ۱/۱۲ تن در هکتار در سال)، کارایی بیشتری در برآورد حد قابل تحمل خاک دارد.

سپاسگزاری

مقاله حاضر بخشی از طرح پسادکتری نویسنده اول آقای دکتر یاسر استواری با شماره ۹۶۰۰۷۲۰۳ تحت عنوان "تعیین حد قابل تحمل هدررفت خاک در مناطق کشاورزی بالادست سد درودزن در استان فارس" است که در صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور-ریاست جمهوری مصوب و با حمایت مالی این صندوق محترم و در بخش علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز انجام شده است. بدین وسیله نویسندگان از آن صندوق محترم و معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شیراز به سبب حمایت‌ها و فراهم آوردن امکانات لازم برای انجام طرح، صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایند.

بسیار خوب روش رگرسیون درختی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مقایسه با روش رگرسیون چندگانه را نشان دادند. استواری و همکاران (۱۵) نیز گزارش کردند روش رگرسیون درختی برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در مقایسه با روش رگرسیون چندگانه کارایی بسیار بیشتری دارد.

نتیجه‌گیری

از آنجائی که بخش عمده‌ای از منطقه مورد مطالعه تحت کاربری کشاورزی و دشت سیلابی حاصل از رودخانه کر است، خاک این منطقه از عمق مناسبی برخوردار است. عمق خاک از ۰/۴ متر در مناطق حاشیه‌ای و دامنه‌ی کوه در اطراف دشت تا حدود ۲ متر در مرکز دشت متغیر است. بر مبنای روش عمق/ضخامت خاک و معادله پیشنهادی اسکیدمور حد قابل تحمل هدررفت خاک با میانگین ۱/۰۴ تن در هکتار در سال از حداقل ۰/۲۹ تن در هکتار در سال در بخش‌های شمالی و دامنه‌ها تا تا حداکثر ۰/۲۲۵ تن در هکتار در سال دشت جنوبی دشت (نزدیک به دریاچه سد درودزن) متغیر بود. به‌طور کلی مقدار هدررفت خاک در حوضه آبخیز درودزن استان فارس بسیار کمتر از مقدار حد قابل تحمل هدررفت گزارش شده توسط فائو (۸) (یعنی ۱۲ تن در هکتار در سال) است. در این مطالعه ماده آلی خاک به دلیل داشتن بیشترین همبستگی (۰/۷۷-) با حد قابل تحمل هدررفت خاک مهم‌ترین ویژگی در برآورد این شاخص خاک انتخاب شد. مدل

منابع

- 1- Abbasi Y., Ghanbarian-Alavijeh B., Liaghat A.M., and Shorafa M. 2011. Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of saline and saline-alkali soils of Iran. *Pedosphere* 21(2): 230-237.
- 2- Ball D.F. 1964. Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. *Journal of Soil Science* 15: 84-92.
- 3- Bazargan Lari A. 2012. *Applied Statistics*. Shiraz University press, Shiraz, Iran. (in Persian)
- 4- Carlos B., Reyes J., and Magri A. 2012. Water erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research* 70(1): 159-169.
- 5- Chandel S., and Hada M.S. 2017. Assessment of soil loss tolerance. *International Journal of Farm Sciences* 7(1): 101-109.
- 6- Dehghani S., Ghorbani-Dashtaki S., and Khodaverdilu H. 2012. Comparing the Performance of Multiple Linear Regression and Regression Tree to Predict Saturated Hydraulic Conductivity and the Inverse of Macroscopic Capillary Length. *Iranian Water Research Journal* 9: 199-210.
- 7- Duan X., Shi X., Li Y., Rong L., and Fen D. 2017. A new method to calculate soil loss tolerance for sustainable soil productivity in farmland. *Agronomy for Sustainable Development* 37(2): 2-13.
- 8- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2015. *Soil erosion: the greatest challenge for sustainable soil management*. Edition, Design & Publication Leadell Pennock (University of Saskatchewan, Canada). 104 pages.
- 9- Ghafari H., Gorji M., ArabKhedri M., Rooshani Gh., and Heidari A. 2018. Evaluation of soil loss tolerance via soil productivity and quality at a watershed scale: Haji-Ghushan watershed, Golestan province. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 48: 985-994. (In Persian)
- 10- Ghorbani-Dashtaki S., and Homaei M. 2004. Using geometric mean particle diameter to derive point and continuous pedotransfer functions. In N. Whrle and M. Scheurer (Eds.). *International Conference*, 4-12 Sep. 2004. EuroSoil, Freiburg, Germany.
- 11- Gohardoust A., Saad-o-din A., Onagh M., and Najafinejad A. 2011. Application of Geographic informations

- system and Skidmore equation in determination of soil erosion limit for programming soil conservation actions in Chehel Chai- Golestan province. 1st National Conference on Modern Agricultural Science and Technologies, 10-12 Sep. 2011. Zanzan University, Zanzan, Iran. (In Persian)
- 12- Khajehpour M.R. 2014. Principles and Fundamentals of Crop Production. Jahad Daneshgahi press, Isfahan, Iran. (In Persian)
- 13- Kuznetsov M.S., and Abdulkhanova D.R. 2013. Soil loss tolerance in the central chernozemic region of the European part of Russia. *Eurasian Soil Science* 46(7): 802-809.
- 14- Lakaria B.L., Biswas H., and Mandal D. 2008. Soil loss tolerance values for different physiographic region of Central India. *Soil Use and Management* 24: 192-198.
- 15- McKenzie N.J., Jacquier D.W. 1997. Improving the Field Estimation of Saturated Hydraulic Conductivity in Soil Survey. *Aust. Journal Soil Research* 35: 803-825.
- 16- Ostovari Y., Asgari K., and Motaghian H.R. 2015. Assessment of tree and multiple linear regressions in estimation of cation exchange capacity. *Journal of Water and Soil* 29: 683-694. (In Persian)
- 17- Ostovari Y., Ghorbani-Dashtaki S., Bahrami H., Naderi M., Dematte J., and Kerry R. 2016. Modification of the USLE K factor for soil erodibility assessment on calcareous soils in Iran. *Geomorphology* 273: 385-395.
- 18- Pachepsky Y., and Rawls W.J. 2006. Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma* 131(3-4): 308-316.
- 19- Pimental D. 2006. Soil erosion: A food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability* 8: 119-137.
- 20- Rawls W.J., and Pachepsky Y. 2002. Data mining and exploration techniques, p. 21-31. In Y. Pachepsky, and M.G. Schaap (eds.). *Developments in Soil Science*. Chap. 2. Vol. 30. Development of pedotransfer functions in soil hydrology, Elsevier Science.
- 21- Refahi H.Gh. 2006. Water Erosion and Conservation. University of Tehran Press, Tehran, Iran. (In Persian)
- 22- Rusanov A.M. 2006. The integrated assessment of soil erosion resistance. *Eurasian Soil Science* 39(8): 879-884.
- 23- Sadeghi S.H.R. 2017. Soil erosion in Iran: state of the art, tendency, and solutions. *Agriculture and Forestry* 63(3): 33-37.
- 24- Sadeghi S.H.R., Moatamednia M., and Behzadfar M. 2011. Spatial and temporal variations in the rainfall erosivity factor in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology* 13: 451-464.
- 25- Santos F.L., Reis J.L., Martins O.C., Castanheira N.L., and Serralheiro R.P. 2003. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigated soils. *Biosystems Engineering* 86: 355-364.
- 26- Skidmore E.L. 1984. Soil loss tolerance. p. 87-93. In M.K. David (ed.), *Determinants of soil loss tolerance*. ASA Spec. Publication., vol. 45. ASA, Madison.
- 27- Stamey W.L., and Smith R.M. 1964. A conservation definition of erosion tolerance. *Soil Science* 97: 183-186.
- 28- Stine R. 1995. Graphical Interpretation of Variance Inflation Factors. *The American Statistician* 49(1): 53-56
- 29- Tejada M., and Gonzalez J.L. 2006. The relationships between erodibility and erosion in a soil treated with two organic amendments. *Soil and Tillage Research* 91: 186-198.
- 30- Vaezi A.R., Bahrami H.A., Sadeghi S.H.R., and Mahdian M.H. 2010. Spatial variability of soil erodibility factor (K) of the USLE in North West of Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology* 12: 241-252.
- 31- Vaezi A.R., Sadeghi S.H.R., Bahrami H.A., and Mahdian M.H. 2008. Spatial variations of runoff in a part of calcareous soils of semi-arid region in North West of Iran. *Agriculture and Natural Resources* 15: 213-225.
- 32- Wischmeier W.H., and Mannering J.V. 1969. Relation of soil properties to its erodibility. *Proceedings. Soil Science Society of America* 33: 131-137.
- 33- Xingwu D., Xie Y., Liu B., Liu G., Feng Y., and Gao X. 2012. Soil loss tolerance in the black soil region of northeast China. *Journal of Geographical Sciences* 22(4): 737-751.
- 34- Yu D.S., Shi X.Z., and Weindorf D.C. 2006. Relationship between permeability and erodibility of cultivated Acrisols and Cambisols in subtropical China. *Pedosphere* 16: 304-311.



Estimating the Soil Loss Tolerable (T-value) Using Linear and Regression Tree Methods

Y. Ostovari¹ – A.A. Moosavi^{2*} – H. Mozaffari³

Received: 02-09-2019

Accepted: 04-01-2020

Introduction: Soil erosion is one of the most important and serious threats to food security and as a consequence of human life. In order to perform soil protection activities against soil erosion, knowledge about the amount of soil loss tolerable is very important. In fact, the soil loss tolerable is the potential for soil erosion, loss of productivity and lost production, and the final criterion for controlling soil erosion and degradation of land. Soil thickness methods, particularly Skidmore equation, based on their ability to estimate the tolerable amount of soil loss have been widely used. In the mathematical function developed by Skidmore based on soil thickness, the soil loss tolerable is calculated based on the soil's current depth, the lowest and maximum soil depth for sustained growth of crops, and the upper limit of tolerable erosion in accordance with the environment. Since the determination of soil loss tolerance by soil thickness method and the Skidmore equation requires time, cost and energy, the researchers have tried to estimate the soil tolerance is supported by regression methods using pedotransfer functions and easily available soil properties. Therefore, the present study was carried out with the aims of determining the tolerable tolerance of soil loss by thickness method and the development of regression pedotransfer functions for estimating this property in the upstream of the dam.

Materials and Methods: The study is place on Kamfiruz Watershed with an area of 422 km², an average annual precipitation of 443 mm and an average annual temperature of 14 °C. It is closed to the Dorudzan Dam sub-basins and is considered as one of the five parts of Marvdasht plain in Fars province. For this work, 60 soil profiles were excavated by excavating machine. In addition to measuring the depth of soil, some physico-chemical soil properties were measured from the surface layer (0-30 cm) including; soil texture, organic matter, salinity, percentage calcium carbonate, mean weight diameter in the laboratory and filed. In order to develop regression models for estimating the tolerable soil loss, information from 60 soil profiles was divided into two data-sets. One set of the data with 42 samples (70% of whole samples) was used for developing the models and another set of the data with 18 soil samples (30% of whole samples) was used for validation. Multiple linear regression was used to develop the linear models. The same soil properties used in the multiple regression method were considered as inputs in the tree regression method to estimate the tolerable amount of loss.

Results and Discussion: The results showed that the minimum and maximum Z_1 parameters (the lowest soil depth for stable growth of crops in the study area) were considered as 0.25 and 0.51 m based on the current depth of soil. Organic matter of the soils with the highest standardized coefficient (Beta = 0.44) and the highest correlation (-0.77) with soil loss tolerance was the most important soil properties for estimating the soil loss tolerance. In the regression model, only the coefficients of four characteristics of permeability, soil aggregate stability, pH and organic matter appeared among the soil grazing characteristics and entered into the model. Based on the evaluation statistic, tree regression method with the highest determination coefficient in both calibration data sets ($R^2 = 0.96$) and validation ($R^2 = 0.78$) and the lowest error value in the validation data (RMSE= 0.29 ton ha⁻¹ year⁻¹) and validation (RMSE = 0.125 ton ha⁻¹ year⁻¹) were more efficient than the multiple regression method in estimating the tolerable soil loss.

Conclusion: Soil loss tolerance was estimated using regression methods (multiple linear regression and regression tree) in Doroudzan Watershed, Fars province. The soil loss tolerable determined using Skidmore method, was 1.04 tons per hectare per year ranging from 0.29 to 2.25 ton ha⁻¹ year⁻¹. The soils of this area are

1, 2 and 3- Postdoc Researcher, Associate Professor and Ph.D. Student, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, respectively.

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

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.82129

slightly deep and their depth varies from 0.4 m in the marginal areas in the upstream parts of the catchment area of the dam and the slope of mountain up to 2 meters in the center of the plain with agricultural lands uses. In general, the tree regression method had a better performance than linear regression method for estimating the soil loss tolerance based on the statistical indices.

Keywords: Calcareous soils, Erosion, Multiple regression, Skidmore method, Soil erodibility, Transfer functions, Tree regression

تأثیر غلظت نانوذره و اندازه ذرات ماسه بر منحنی‌های انتقال و نگهداشت نانوذرات CMC-nZVI در محیط متخلخل اشباع

امیر صابری نصر^{۱*} - محمد نخعی^۲ - محسن رضایی^۳ - سید موسی حسینی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۳۰

چکیده

فهم انتقال و نگهداشت نانوذرات آهن صفر ظرفیتی (nZVI) در محیط زیرسطحی برای طراحی سیستم‌های تصفیه و احیای در محل آب‌های زیرزمینی ضروری است. در این مطالعه از آزمایش‌های اشباع ستون ماسه برای بررسی اثرات همزمان غلظت نانوذره و اندازه ذرات ماسه بر میزان انتقال و نگهداشت نانوذرات آهن صفر ظرفیتی پوشش داده شده با کربوکسی متیل سلولز (CMC-nZVI) استفاده شد. بدین منظور، ۱۲ آزمایش با ترکیبی از ۴ غلظت متفاوت نانوذره ($C_0 = 10, 200, 3000, 10000 \text{ mg/l}$) و سه اندازه ماسه ($d = 0.35-0.5, 0.5-1, 1-2 \text{ mm}$) صورت گرفت. غلظت نانوذره آهن در محلول خروجی از ستون و همچنین بر روی ماسه‌ها اندازه‌گیری شد. سپس، منحنی‌های رخنه (BTCs) و پروفیل‌های نگهداشت رسم شدند. نتایج نشان می‌دهد که پدیده رایپنینگ و استرینینگ نقش مهمی را در کاهش انتقال نانوذرات با کاهش اندازه ماسه‌ها و افزایش غلظت، در مرحله تزریق نانوذره دارند. اما در مرحله فلاشینگ، (تزریق آب دیونیزه) نقش چاله حداقل انرژی ثانویه و نیروهای هیدرودینامیکی در انتقال موثرتر می‌شود و این عوامل سبب افزایش انتقال نانوذرات با کاهش اندازه ماسه در غلظت‌های بالای نانوذره (3000 و 10000 mg/l) می‌گردد. برخلاف نتایج بدست آمده از سوسپانسیون‌های با غلظت بالا، نتایج پروفیل‌های نگهداشت در غلظت‌های پایین (10 و 200 mg/l)، از تئوری فیلتراسیون کلئید تبعیت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: انتقال، اندازه ذرات ماسه، غلظت نانوذره، نانوذرات CMC-nZVI، نگهداشت

مقدمه

امروزه، توسعه روز افزون شهرنشینی به خاطر افزایش جمعیت و همچنین دگرگون کردن محیط زیست بر حسب نیازهای متنوع بشر مثل تخریب بی‌رویه جنگل‌ها و مراتع، دفع فاضلاب‌های شهری و صنعتی، رهاسازی آلاینده‌های مراکز صنعتی و تجاری به اتمسفر، دفع زباله‌های شهری، عفونی، سمی و رادیواکتیو، استفاده از حشره‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی کشاورزی و غیره، سبب ورود آلاینده‌های مختلفی به منابع آبی زیرزمینی شده است. اگر بر مقدار این آلاینده‌ها کنترل مناسبی صورت نگیرد، به طوری که از حد ظرفیت میرایی طبیعی منطقه غیراشباع تجاوز کند، آلودگی آب زیرزمینی رخ می‌دهد. از روش‌های مختلفی برای پاکسازی مناطق آلوده استفاده می‌شود که می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی پاکسازی در محل و خارج از محل تقسیم کرد.

یکی از روش‌های اولیه و قدیمی برای تصفیه آب‌های زیرزمینی آلوده روش پمپاژ و تصفیه است. در این روش آب‌های زیرزمینی آلوده از طریق چاه‌ها یا ترانشه‌ها به سطح زمین (خارج از محل) پمپاژ می‌شود و سپس در سطح زمین با فرآیندهایی مثل زدودن هوا، جذب کربنی، راکتورهای بیولوژیکی یا رسوب‌گذاری شیمیایی تصفیه می‌شود. اما از آنجایی که اجرای عملیات پمپاژ و تصفیه (روش خارج از

از میان آسیب‌های زیست‌محیطی، آلودگی منابع آب یکی از مهم‌ترین مواردی است که به علت توسعه بی‌رویه بشر، جهان امروز با آن دست به گریبان می‌باشد. در این بین، آب‌های زیرزمینی که مهم‌ترین قسمت منابع آب دنیا را شامل می‌شود، دارای اهمیت بیشتری است. در کشور ایران، افزایش مصرف آب، محدودیت‌های فزاینده و پرهزینه بودن توسعه منابع آب سطحی در سال‌های اخیر، منجر به فشارهای مضاعفی به منابع آب زیرزمینی شده است. در شرایط کنونی، بخش قابل ملاحظه‌ای از مصارف آب کشور، به‌خصوص در بخش شرب، توسط منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. از این رو، مدیریت بهینه این منابع از مهمترین مسائل قابل توجه در کشور ما می‌باشد.

۱ و ۲- به ترتیب دکتری و استاد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران

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

۳- دانشیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شیراز

۴- استادیار مهندسی منابع آب، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

DOI: 10.22067/v34i1.82623

محل) بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر است، استفاده از تکنولوژی‌های پاکسازی در محل در حال افزایش است. استفاده از روش پاکسازی در محل، از صفر در سال‌های ۱۹۸۶-۱۹۸۲ به ۳۱٪ در سال ۲۰۰۵ افزایش یافت. اما استفاده از روش پمپاژ و تصفیه، از حدود ۸۰٪ در سال‌های قبل از ۱۹۹۲ به ۲۰٪ در سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۰۱ کاهش یافت (۱).

از انواع روش‌های پاکسازی در محل می‌توان به سدهای واکنشی نفوذپذیر^۱، پاکسازی حرارتی، اکسیداسیون شیمیایی و پاکسازی بیولوژیکی اشاره کرد. این روش‌ها نیز اغلب نیازمند عملیات گسترده و طولانی مدتی هستند و در ضمن هزینه‌های اجرایی آن‌ها هم به شدت بالاست (۲). برای مثال در روش تجزیه بیولوژیکی درجا برای آلاینده‌های هیدروکربنی، به صورت محلی میکروارگانیسم‌ها را افزایش داده و آن‌ها را تقویت می‌کنند تا این آلاینده‌ها را به موادی بی‌ضرر مثل آب و دی اکسید کربن تجزیه کنند. اجرای عملیات تجزیه بیولوژیکی به منظور تصفیه آب به دلیل دوره طولانی مدت برای ایجاد شرایط پاکسازی بهینه و برای اینکه میکروب‌ها با آلاینده‌های نامناسب سازگار شوند، معمولاً چندین سال زمان نیاز دارد. در این روش به تزریق پی در پی اکسیژن و مواد مغذی نیاز است (۳). در سال‌های اخیر، روش جدیدی با استفاده از نانوذرات مختلف برای پاکسازی و احیای در محل آبخوان‌ها (۳، ۴، ۵ و ۶) مورد استفاده قرار گرفته است. این نانوذرات هم به عنوان یک کاهنده شیمیایی و هم به عنوان یک کاتالیزور برای کاهش آلودگی به کار رفته‌اند. استفاده از نانوذرات، به لحاظ افزایش نسبت سطح به حجم، باعث می‌شود که سرعت واکنش‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد و در پی آن راندمان حذف افزایش پیدا کند. علاوه بر این، اندازه کوچک و پوشش‌های سطحی جدید به دور نانوذرات، سبب می‌شود که نانوذرات به منافذ ریز در محیط متخلخل نفوذ کنند و در آب زیرزمینی معلق بمانند و نسبت به ذرات بزرگتر، مسافت بیشتری را طی کرده و بیشتر در محیط پراکنده شوند (۷). از نانوذرات مختلفی مانند اکسیدهای فلزی، نانوذرات آهن صفر ظرفیتی، فیبرها و نانو لوله‌های کربنی و فلورین، میسل‌ها (ذرات کلئیدی باردار آلی)، فلزات نجیب مختلف (معمولاً در نانوذرات دو فلزی)، نانوذرات مغناطیسی و دی اکسید تیتانیم برای احیای آبخوان‌ها استفاده شده است. بدون تردید، نانوذرات آهن صفر ظرفیتی از پرکاربردترین نانوذرات برای پاکسازی در محل آب‌های زیرزمینی هستند. مطالعات آزمایشگاهی گسترده نشان داده‌اند که این نانوذرات، توانایی حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها را دارند. اما با وجود کاربرد فراوان نانوذرات در پاکسازی آب زیرزمینی، رفتار این ذرات، زمانی که به محیط رها می‌شوند، هنوز ناشناخته است

(۸). از این رو، فهم نحوه حرکت، انتقال و سرنوشتشان در محیط برای طراحی سیستم پاکسازی بسیار مهم است. از سوی دیگر، نانوذراتی که برای پاکسازی استفاده نمی‌شوند نیز می‌توانند در طول فرآیندهای تولید، مصرف و دفع به صورت تصادفی وارد محیط شوند. این نانو مواد ممکن است وارد سیستم‌های آب آشامیدنی یا زمین‌های کشاورزی شده و بنابراین سلامتی بشر و اکوسیستم را به خطر بیندازد. تاثیر عوامل مختلفی نظیر اندازه نانوذرات، اندازه لخته‌های نانوذرات، شیمی سطح نانوذرات، شیمی سیال منفذی و سرعت سیال در انتقال و نگهداشت نانوذرات آهن صفر ظرفیتی در مطالعات متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است (۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲)، اما تأثیر اندازه ذرات محیط و همچنین غلظت بالای نانوذرات (معمولاً برای اهداف تصفیه در جای آب زیرزمینی، غلظت‌های g/l مورد استفاده قرار می‌گیرد) بر مکانیسم‌های انتقال و نگهداشت این نانوذرات کمتر (۱۳، ۱۴ و ۱۵) مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، انتقال محدود نانوذرات آهن بدون پوشش در محیط‌های متخلخل یکی از موانع اصلی در کاربرد گسترده آنها برای احیاء و پاکسازی در جای آب زیرزمینی است (۱۶ و ۱۷). برخی از مطالعات نشان داده‌اند که نانوذرات پایدار شده با پلیمر نیز، زمانی که در کاربردهای صحرائی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در نزدیکی نقطه تزریق باقی می‌مانند (۱۸ و ۱۹)؛ بنابراین درک مکانیسم‌های متعدد نگهداشتی که به توزیع مکانی نانوذرات پایدار شده با پلیمر در محیط متخلخل نسبت داده می‌شوند و نقش اندازه ذرات محیط در چنین نگهداشتی بسیار مهم است.

بر اساس تئوری فیلتراسیون (۲۰ و ۲۱)، اگر همه عوامل موثر بر انتقال نانوذرات ثابت نگهداشته شوند، افزایش اندازه ذرات محیط می‌تواند منجر به کاهش در بازده اتصال (α) گردد. این مسئله به دلیل سطح ویژه کمتر برای ته‌نشینی در ذرات بزرگتر می‌باشد؛ اما فنرات و همکاران (۱۳) نشان دادند که در تعلیق‌های غلیظ غلظت خروجی nZVI با کاهش در اندازه ذرات محیط افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، تعلیق‌های غلیظ nZVI تصحیح شده با پلیمر ($> 30 \text{ mg/l}$) از تئوری فیلتراسیون تخطی می‌کنند. این پدیده به اثر نیروهای هیدرودینامیک (به‌ویژه برش سیال) بر لخته شدن و جدایش لخته‌ها و اتصال و انفصال آنها نسبت داده شده بود. پس از آنها، رایچودهارای و همکاران (۱۴) اثر اندازه ذرات ماسه ($510, 775, 250 \text{ }\mu\text{m}$ و 150) و غلظت نانوذرات ($1700, 350, 85 \text{ mg/l}$) را بر انتقال و نگهداشت CMC-nZVI در ستون ماسه بررسی کردند. نتایج نشان داد که غلظت CMC-nZVI خروجی با ریزتر شدن اندازه ذرات کاهش می‌یابد. آنها چنین الگوی کاهشی را بر اساس پیوند شیمیایی CMC با nZVI توجیه کردند. این محققین اظهار داشتند که اگر CMC همزمان با سنتز نانوذرات nZVI با آن پیوند دهد (مانند پیوند بین CMC و nZVI در مطالعه خودشان) قویتر از زمانی است که این پیوند بعد از تشکیل nZVI (مانند مطالعه فنرات و همکاران) تشکیل

میلی لیتر محلول ۱ میلی مولار NaHCO_3 حل شد. سپس محلول آبکی و پلیمری به آرامی به یک بالن ۲۵۰ میلی لیتری سه دهانه اضافه شدند که در دهانه میانی آن از یک همزن مکانیکی با دور rpm ۱۰۰ استفاده شده بود. نسبت پلیمر به nZVI ۲:۱ قرار داده شد. pH محلول در بالن سه دهانه به وسیله NaOH بین ۹-۱۰ ثابت شد و محلول به مدت ۱۴۴ ساعت در شرایط دمای محیط و فاقد اکسیژن هم زده شد.

تست FT-IR تکنیکی مناسب برای آنالیز مواد در آزمایشگاه و شناسایی پوشش‌های پلیمری می‌باشد (۲۳). با مقایسه سه طیف پلیمر، نانوذره بدون پوشش و نانوذره پوشش داده شده با پلیمر می‌توان به پوشش‌دار شدن نانوذره با پلیمر اطمینان حاصل نمود. با توجه به شکل ۱ به وضوح مشخص می‌گردد که در مقایسه با طیف نانوذره بدون پوشش، طیف نانوذره پوشش‌دار شده با کربوکسی متیل سلولز (CMC) دارای باندهای جذبی در $3402, 2919, 2303, 1625, 1467, 1382$ و 1005 cm^{-1} است. وجود این باندها در طیف نانوذره پوشش‌دار شده نشان می‌دهد که پلیمر در سطح nZVI جذب شده است.

تصویر SEM^۱ نانوذرات CMC-nZVI در شکل ۲ ارائه شده است که از آن برای مشخص نمودن مورفولوژی سطحی، اندازه ذرات و اطلاعات کلی درباره ترکیب نانوذرات استفاده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، اندازه متوسط قطر نانوذرات nZVI پایدار شده در بازه ۵۰ تا ۶۰ نانومتر و ذرات به شکل خوشه‌های شیشه‌ای هستند. لخته شدن نسبی دیده شده در تصویر را نیز عمدتاً می‌توان به برهمکنش‌های مغناطیسی بین ذرات فلزی نسبت داد.

آزمایش‌های ستون

آزمایش‌ها در لوله شیشه‌ای از جنس پلگسی گلاس به طول cm ۳۰ و قطر cm ۲/۵ انجام شد. طرح پایلوت آزمایشگاهی^۲ استفاده شده در این مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. قبل از هر آزمایش، تمام تجهیزات شامل ستون ماسه، شلنگ، ظروف و ... با اسید کلریدریک و آب دیونیزه تمیز شسته شدند و برای جلوگیری از آلودگی‌های احتمالی قبل از هر آزمایش، ماسه تازه به ستون وارد شد. در تمام آزمایش‌ها سعی شد تا محیط در حد ممکن فشرده شود که بدین منظور از ارتعاش و ضربه به جداره ستون استفاده شد (۱۴). از دو توری (با منافذ $100 \mu\text{m}$) برای جلوگیری از جابجایی ماسه‌ها در دو انتهای ستون استفاده گردید.

شود. بنابراین با توجه به اثر متفاوت اندازه ذرات محیط در تحقیقات مطرح شده، به مطالعات بیشتری در این زمینه نیاز است. هدف مطالعه حاضر ارزیابی تأثیر اثرات اندازه ذرات محیط و غلظت نانوذره بر رفتار انتقال و نگهداشت نانوذرات آهن صفر ظرفیتی پایدار شده با پلیمر در محیط متخلخل است تا بتوان پیش از انجام عملیات صحرایی پرهزینه به منظور پاکسازی، به درک صحیحی از مسئله انتقال و نگهداشت این ذرات در زیرزمین رسید.

مواد و روش‌ها

محیط متخلخل

برای محیط متخلخل از ذرات کوارتز (SiO_2) استفاده شد. این ذرات از سازند کوارتزیت رأسی در شمال شهر کرج بدست آمدند و پس از خردایش، با استفاده از الک‌های مختلف به اندازه‌های بین mm ۰/۵-۱ mm و mm ۱-۲ تقسیم شدند. از آنجایی که وجود ناخالصی‌های آلی و فلزی روی بار سطحی محیط متخلخل تأثیر گذارند و موجب ته‌نشینی کلئیدها و نانوذرات روی سطح ذرات محیط و تأثیر در انتقال و نگهداشت آنها در محیط می‌شوند (۲۲)، بنابراین به منظور تحت کنترل قرار دادن آزمایش‌ها و بررسی مناسب اثرات غلظت نانوذرات و همچنین اندازه ماسه‌ها بر نحوه انتقال نانوذرات، ماسه‌ها (ذرات کوارتز) ابتدا با آب شیر چند بار شسته شدند و در ادامه ۷۲ ساعت در اسید نیتریک ۱۰٪ و ۴۸ ساعت در اسید کلریدریک ۵٪ قرار گرفتند. در نهایت ماسه‌ها چندین مرتبه با آب دیونیزه شسته شدند و به مدت ۳ ساعت با دمای ۵۵۰ درجه در آون خشک شدند. پس از این مراحل و به منظور تعیین میزان خلوص، آنالیز XRF روی ذرات ماسه صورت گرفت که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس این آزمایش مقدار SiO_2 ۹۹/۳۸ درصد تعیین گردید.

نانوذرات آهن صفر ظرفیتی و پوشش‌دار کردن آنها

در مطالعه حاضر از نانوذرات nanofer STAR محصول شرکت NANOIRON s.r.o در جمهوری چک استفاده شده است. این نانوذرات به صورت پودر سیاه رنگ بوده و به دلیل وجود پوشش سطحی anorganic، در برابر اکسیداسیون سریع پایدارند. محصول مذکور حتی با وجود پوشش سطحی، دارای واکنش‌پذیری بالایی در آب می‌باشد.

برای پوشش‌دار کردن نانوذرات nZVI ۳ گرم از محصول در ۱۰۰ میلی لیتر محلول ۱ میلی مولار NaHCO_3 ریخته شد و به مدت نیم ساعت با استفاده از High Shear Mixer در rpm ۲۰۰۰ هم زده شد تا لخته‌های موجود در حد ممکن شکسته شوند و بعد از آن به مدت یک ساعت در حمام التراسونیک قرار داده شد تا محلول آبکی همگنی با کمترین مقدار لخته و آگرگات تهیه شود. پلیمر نیز در ۵۰

1- Scanning Electron Microscopy

2- Experimental setup

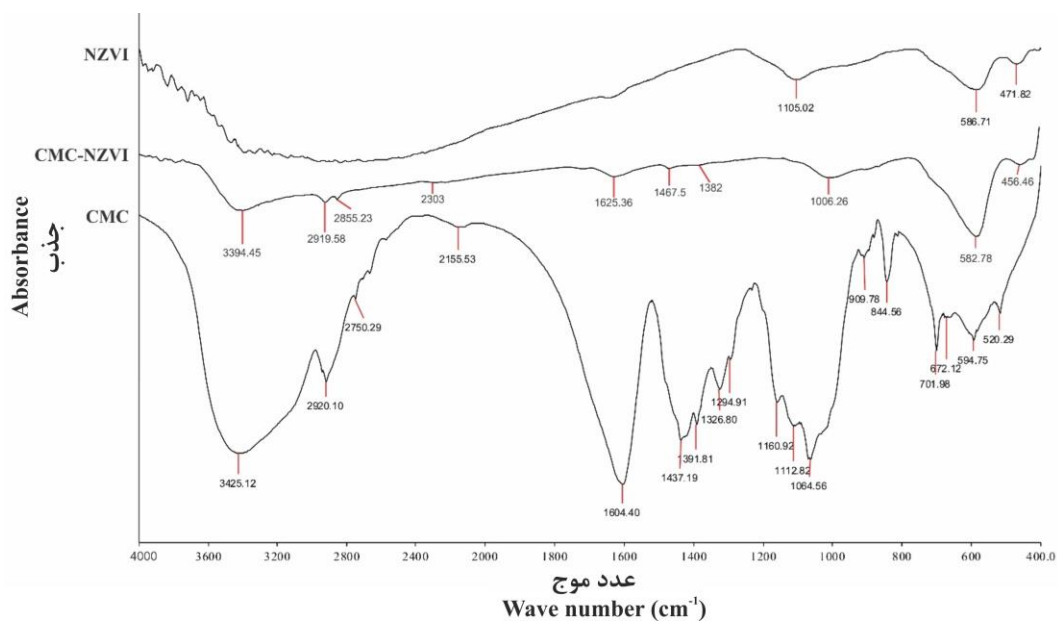
جدول ۱- آنالیز XRF از ماسه شسته شده با اسید

Table 1- The chemical composition of acid washed sand by XRF analyze

اکسیدهای اصلی Main Oxides	LOI	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cr ₂ O ₃
درصد (%) Percent (%)	0.23	99.38	0.12	<0.05	0.27	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

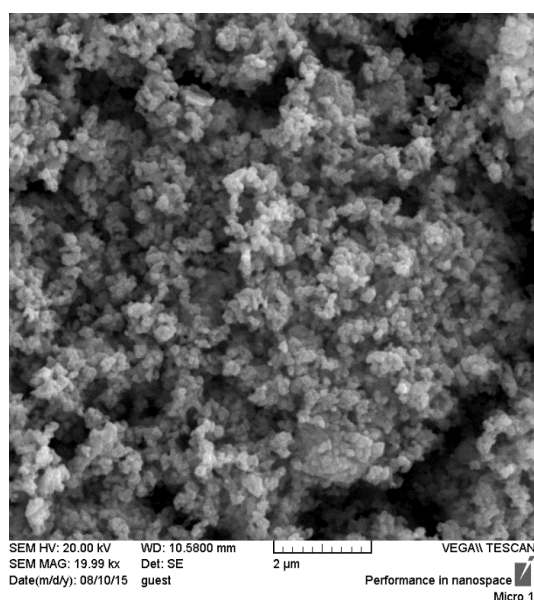
LOI: افت حرارتی

LOI: Loss of Ignition



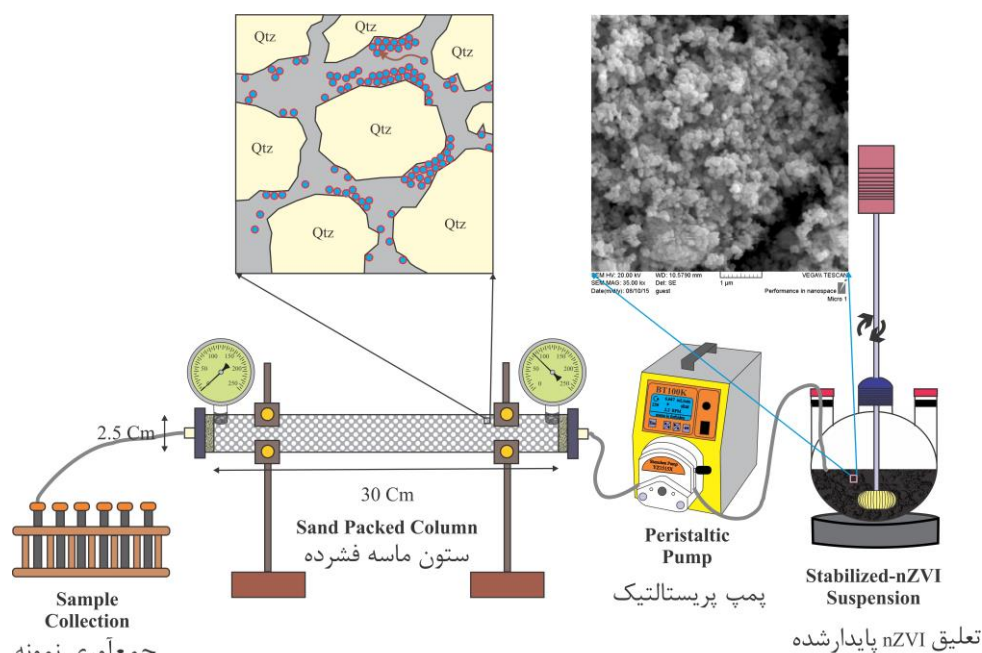
شکل ۱- طیف‌های تست FT-IR برای پلیمر، نانوذره بدون پوشش و نانوذره پوشش داده شده با پلیمر

Figure 1- FT-IR spectra of nZVI, CMC-nZVI and CMC



شکل ۲- تصویر SEM نانوذرات nZVI پوشش داده شده با CMC

Figure 2- SEM image of CMC-nZVI



شکل ۳- طرح شماتیک آزمایش‌های ستون
Figure 3- Schematic of column experiments

UV-Vis و روش فنانتروالین اندازه‌گیری شد.

تئوری فیلتراسیون کلئوئید و مکانیسم‌های انتقال و نگهداشت

تئوری فیلتراسیون کلئوئید برای آنالیز کمی رسوب ذره نسبت به مکانیسم‌های مختلف انتقال (انقطاع^۱، رسوبگذاری ثقلی^۲ و انتشار براونین^۳) به کار گرفته می‌شود. به بیانی دیگر، این تئوری موقعیت ذرات در یک محیط متخلخل را در دو مرحله متوالی نشان می‌دهد: انتقال از سیال به دانه‌های محیط و اتصال به دانه‌ها (۲۴). دو مرحله متوالی بیان شده، با بازده تماس منفرد-جمع‌کننده^۴ و بازده اتصال^۵ توصیف می‌شوند. بازده تماس منفرد-جمع‌کننده (η_0) (بدون بعد) بیان کننده فراوانی برخورد نانوذرات و ذرات محیط متخلخل است و بازده اتصال (α) (بدون بعد) هم نسبت برخورد بین نانوذرات و ذرات محیط است که منجر به اتصال می‌شود. بر اساس مطالعه برخی از محققین (۱۳، ۲۵ و ۲۶)، تئوری رایج انتقال (یعنی تئوری فیلتراسیون لایه تمیز^۶ نمی‌تواند فرآیندهایی، مثل جدا شدن لخته‌ها، انفصال، بلاکینگ و رایپینگ را که در مکانیسم‌های انتقال و نگهداشت نانوذرات و

برای تزریق محلول زمینه و سوسپانسیون نانوذرات نیز پمپ پرستالتیک (Shenzhen, China) به کار رفت. قبل از هر تزریق، سوسپانسیون به مقدار مورد نیاز رقیق شد و به مدت ۱۲۰ دقیقه در حمام التراسونیک قرار داده شد.

برای بررسی اثر غلظت نانوذره و اندازه ذرات ماسه بر انتقال و نگهداشت Polymer-nZVI، تعداد ۱۲ آزمایش با ترکیبی از ۴ غلظت نانوذره (۱۰، ۲۰۰، ۳۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ mg/l) و سه اندازه ذره ماسه (۲-۱، ۵-۰/۵ و ۵-۰/۳۵ mm) انجام گردید. در هر آزمایش حداقل ۴ برابر حجم منافذ (۴ PVs)، محلول زمینه (محلول NaHCO_3 ۴ mM) با سرعت جریان ثابت ۰/۰۰۶ m/s، ابتدا به محیط تزریق شد تا جریان به حالت پایدار برسد. سپس با استفاده از NaCl آزمایش ردیابی انجام گردید و غلظت کلر خروجی با روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد. بدنبال آزمایش ردیابی، ۴ PVs محلول زمینه و بعد از آن ۴ PVs سوسپانسیون nZVI (۲۰۰ ml) (مرحله تزریق) به ستون تزریق شد. در نهایت برای تکمیل آزمایش ۶ PVs آب دیونیزه (مرحله فلاشینگ) به ستون پمپ گردید. خروجی ستون هر دو دقیقه جمع‌آوری و غلظت آهن در آن با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis و روش فنانتروالین اندازه‌گیری شد. پس از هر آزمایش نیز ماسه‌های موجود در ستون به بخش‌های ۳ سانتی‌متری تقسیم و از ستون خارج شدند. این بخش‌ها در داخل ارلن‌های یکسانی ریخته شده و حجم ۵۰ میلی‌لیتر از آب دیونیزه و به همراه چند قطره اسید نیتریک (Ultrapure) به آنها افزوده شد. پس از انحلال کامل آهن، غلظت آهن در این نمونه‌ها نیز با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر

- 1- interception
- 2- Gravitational sedimentation
- 3- Brownian diffusion
- 4- single-collector contact efficiency
- 5- attachment efficiency
- 6- Clean bed filtration theory

کلوئیدها دخیل هستند، توجیه کنند. در این تئوری، نرخ اتصال یا تهنشینی نانوذرات روی سطح کالکتورها ثابت در نظر گرفته می‌شود. اما این فرضیه همیشه صادق نیست. با توجه به نتایج توفنجکی و الیملج (۲۵)، تحت شرایط الکترواستاتیک دافعه، یک رویکرد تهنشینی دوگانه اتفاق خواهد افتاد. آنها نتیجه گرفتند که برخی از نانوذرات دارای یک نرخ تهنشینی سریع در چاله حداقل انرژی ثانویه و برخی دیگر دارای یک نرخ تهنشینی آهسته در چاله حداقل انرژی اولیه هستند. لازم به ذکر است که چاله حداقل انرژی اولیه، سد انرژی پتانسیلی دافعه و چاله حداقل انرژی ثانویه، سه ناحیه‌ای هستند که در نمودار فاصله جدایش در برابر منحنی انرژی برهمکنشی بین نانوذرات و کالکتور (ماسه) مشخص می‌شوند (۲۷ و ۲۸). تهنشینی نانوذرات در چاله حداقل انرژی ثانویه و اولیه به ترتیب به وجود همزمان برهمکنش‌های مطلوب و نامطلوب کلوئیدی - شیمیایی نسبت داده می‌شود. تهنشینی ذرات در غیاب انرژی‌های برهمکنش دافعه، مطلوب در نظر گرفته می‌شود؛ در صورتی که تهنشینی نامطلوب به مواردی که برهمکنش‌های دافعه‌ای کلوئیدی غالب باشد برمی‌گردد (۲۵).

پایدار کننده‌هایی نظیر کربوکسی‌متیل سلولز (CMC) دافعه‌های الکترواستاتیک و استریکی فراهم می‌کنند که می‌تواند منجر به سدهای انرژی بزرگتری برای تهنشینی در چاله حداقل انرژی اولیه گردد (۲۹). در نتیجه، لخته شدن و تهنشینی تحت یک چاله حداقل انرژی ثانویه کم عمق تر اتفاق می‌افتد که با تغییر شرایط شیمیایی محیط و یا به دلیل نیروی برشی و انرژی براونین، لخته شدن و تهنشینی ذرات در معرض جدا شدن لخته‌ها و انفصال قرار دارند (۲۸ و ۲۹).

نتایج و بحث

انتقال نانوذرات

همان‌طوری که در بخش قبل بیان گردید، به منظور بررسی اثر غلظت نانوذره و اندازه ذرات ماسه بر انتقال و نگهداشت نانوذرات آهن تعداد ۱۲ آزمایش در سرعت جریان ثابت 0.006 m/s انجام شد. برای هر آزمایش، منحنی‌های رخنه به صورت غلظت آهن خروجی نرمالایز شده (C/C_0) به عنوان تابعی از حجم منافذ (PVs) (شکل ۴) رسم شدند. با توجه به شکل ۴، منحنی‌های رخنه در هیچ آزمایشی یکنواخت نیست که می‌توان آن را به حالت‌های مختلف پدیده‌های اتصال^۱ و انفصال^۲ در طول مسیر نسبت داد.

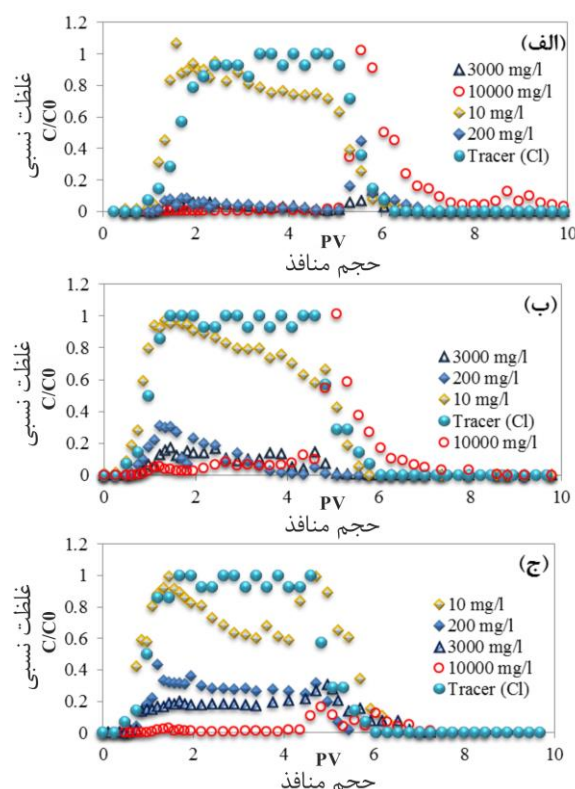
با توجه به شکل ۴، در صورتی که اندازه ذرات ماسه ثابت باشد، در زمان تزریق نانوذره (۴ PVs) با افزایش غلظت نانوذره از ۱۰

میلی گرم بر لیتر به ۱۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر، بیشینه غلظت نسبی (C/C_0) در خروجی ستون کاهش می‌یابد. بیشینه منحنی رخنه در ماسه‌های ریز ($0.5 - 0.297 \text{ mm}$) با افزایش غلظت نانوذره از ۱۰ به ۲۰۰، ۳۰۰ و ۱۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر به ترتیب از ۱ به 0.084 ، 0.055 و 0.02 می‌رسد. در ماسه‌های با اندازه متوسط ($1 - 0.5 \text{ mm}$) این غلظت بیشینه با افزایش غلظت نانوذره به ترتیب از 0.98 به 0.3 ، 0.17 و 0.08 و در ماسه‌های درشت ($2 - 1 \text{ mm}$) از 0.99 به 0.43 ، 0.19 و 0.15 کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که در طول زمان تزریق سوسپانسیون نانوذره به محیط، هرچه غلظت نانوذره افزایش یابد برخورد بین نانوذرات با یکدیگر و نانوذرات با ماسه‌ها بیشتر شده و بنابراین لخته شدن و اتصال ذرات به محیط نیز افزایش می‌یابد (۲۳) و این مسئله سبب کاهش انتقال نانوذرات در محیط متخلخل می‌گردد (۳۰). علاوه بر این، همان‌طوری که در منحنی‌ها مشاهده می‌گردد و با توجه به اعداد فوق‌الذکر، در زمان تزریق نانوذره، در صورت ثابت بودن غلظت نانوذره، با کاهش اندازه ماسه‌ها، بیشینه غلظت نسبی (C/C_0) در خروجی ستون کاهش می‌یابد. این کاهش را می‌توان به سطح ویژه بیشتر ماسه‌های ریز ($0.5 - 0.297 \text{ mm}$) نسبت به ماسه‌های درشت‌تر ($1 - 0.5 \text{ mm}$ و $2 - 1 \text{ mm}$) و احتمالاً پدیده استرینینگ^۳ نسبت داد (۱۴). با افزایش سطح ویژه، سطح در دسترس برای تهنشینی نانوذرات افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، بازده تماس منفرد-جمع‌کننده افزایش می‌یابد. پدیده استرینینگ نیز وابسته به قطر گلوبی فضای منفذی است که به نوبه خود وابسته به اندازه ماسه‌ها می‌باشد (۱۴). با ریزتر شدن ماسه‌ها، قطر گلوبی منافذ کاهش می‌یابد و لخته‌های موجود در سوسپانسیون، منافذ ورودی را مسدود می‌کنند و مانع عبور نانوذرات می‌شوند؛ در نتیجه انتقال نانوذرات کاهش می‌یابد.

نکته دیگری که در منحنی‌های رخنه ارائه شده در شکل ۴ دیده می‌شود این است که در طول زمان تزریق نانوذره، در اغلب منحنی‌ها بعد از تقریباً ۱ PVs، غلظت نسبی به بیشینه خود می‌رسد و بعد از آن به تدریج شروع به کاهش می‌کند. علت اصلی این مسئله را می‌توان به پدیده رایپنینگ^۴ نسبت داد. پدیده رایپنینگ زمانی رخ می‌دهد که انرژی برهمکنش بین ذرات به صورت جاذبه باشد. در اثر این پدیده، ذرات تهنشین شده تمایل به جذب ذرات معلق را دارند. بنابراین این پدیده منجر به افزایش تدریجی در سنتیک اتصال^۵ و در نتیجه افزایش بیشتر و بیشتر غلظت نانوذرات اتصالی می‌شود (۳۱). این پدیده در اثر افزایش تزریق نانوذره می‌تواند منافذ محیط متخلخل را به کلی مسدود کند.

3- Straining
4- Ripening
5- attachment kinetics

1- Attachment
2- Detachment



شکل ۴- منحنی‌های رخنه مشاهده شده از آزمایش‌های انتقال نانوذرات CMC-nZVI در سرعت مغذی 6×10^{-4} m/s و برای (الف) ماسه‌های ریز ($0.5/299$ mm) (ب) ماسه‌های متوسط ($1/5-0$ mm) و (ج) ماسه‌های درشت ($2-1$ mm)

Figure 4- Experimental breakthrough curves for CMC-nZVI at different concentrations (10, 200, 3000, and 10,000 mg/l) and grain sizes (350 – 500, 500 – 1000, and 1000 – 2000 μ m). Pore velocity was 0.0006 m/s

فیزیکی و شیمیایی امکان‌پذیر است. مکانیسم انفصال و برگشت‌پذیری در چنین شرایطی، در تحقیقات فرانکی و اوملیا (۲۸) و هان و اوملیا (۲۹) گزارش شده است. بنابراین زمانی که آب دیونیزه (قدرت یونی کم) به ستون وارد می‌شود، انفصال ذرات ته‌نشین شده در مرحله قبل (مرحله تزریق نانوذره) سبب ایجاد یک پیک ناگهانی در منحنی رخنه می‌گردد که این موضوع تخلخل محیط را تا حد زیادی به حالت قبل از تزریق نزدیک می‌نماید. با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل ۴، تا حدودی می‌توان گفت که ارتفاع و عرض این پیک با کاهش اندازه ذرات افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با کاهش اندازه ذرات ماسه، حجم نانوذرات رها شده از سطح ماسه‌ها افزایش می‌یابد. مورد اخیر به‌خصوص در غلظت‌های بالای سوسپانسیون (۳۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر) به وضوح قابل مشاهده است.

نگهداشت نانوذرات

مطالعه پروفیل‌های نگهداشت نانوذرات کمک زیادی به فهم رفتار انتقال آنها و پیش‌بینی سرنوشتشان می‌کند. نگهداشت نانوذرات،

در منحنی‌های رخنه (شکل ۴)، پس از اتمام تزریق نانوذره و در لحظه ابتدایی شروع تزریق آب دیونیزه (ابتدای مرحله فلاشینگ که از 4 PVs تا 10 PVs است) یک پیک در غلظت نسبی خروجی مشاهده می‌گردد. با توجه به مطالعات اخیر (۲۶، ۳۲ و ۳۳) این پیک می‌تواند در اثر انفصال^۱ نانوذرات به دلیل کاهش قدرت یونی محلول تزریق شده به ستون ماسه اتفاق بیفتد. بر اساس این مطالعات، زمانی که سوسپانسیون نانوذره به محیط تزریق می‌گردد، در اثر قدرت یونی بالای سوسپانسیون، که ناشی از حل شدن نمک پلیمری (Na-CMC) و آزاد شدن یون Na^+ در محلول آبیکی نانوذره است، ذرات و لخته‌های نانو با اتصال ضعیفی روی سطح ماسه ته‌نشین می‌شوند و سبب کاهش تخلخل محیط می‌شوند. به بیانی دیگر، ذرات در چاله حداقل انرژی ثانویه (نیروهای DLVO) ته‌نشین می‌شوند. ته‌نشینی ذرات در چاله حداقل انرژی ثانویه برگشت‌پذیر بوده و با تغییر شرایط

نسبت دادند. برای مثال، نیروی برش محلی سیال در منافذ محیط متخلخل می‌تواند روی آگلومره شدن و شکستن آگلومره تأثیر گذارد. آنها بیان کردند که در یک سرعت ثابت، هرچه متوسط قطر ذرات محیط کوچکتر باشد، نیروی برش ظاهری در منافذ بیشتر است. این نیروی برش، شکستن آگلومره‌ها را بالا می‌برد. در نتیجه برای لایه‌های با خصوصیات جذب مشابه در قدرت یونی و سرعت منفذی ثابت، اندازه آگلومره‌های پایدار، در منافذ محیط متخلخل با اندازه ذرات ریزتر کوچکتر از منافذ با اندازه ذرات درشت‌تر است؛ زیرا، نیروی برش محلی در این منافذ بیشتر است. همچنین، هرچه اندازه آگلومره‌ها کوچکتر باشد، نانوذرات مسافت بیشتری را طی می‌کنند. بنابراین با کوچکتر شدن اندازه ذرات محیط، انتقال نانوذرات افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نیروی برش سیال می‌تواند روی رسوبگذاری و جدا شدن رسوب از ذرات محیط نیز تأثیر گذارد. زمانی که ذرات محیط متخلخل بزرگتر باشند، گشتاور کششی هیدرودینامیکی^۵ که روی آگلومره‌های رسوب کرده عمل می‌کند، کمتر است و گشتاور اتصال^۶ ناشی از چاله حداقل ثانویه (نیروهای DLVO)، توسط نیروی برش سیال بی‌تأثیر می‌شود. بنابراین، در یک اندازه آگلومره ثابت، احتمال جدا شدن رسوب از ذرات محیط، برای ذرات ریزتر بیشتر از ذرات درشت‌تر است. که این مسئله نیز نشان می‌دهد، با کوچکتر شدن اندازه ذرات محیط، انتقال نانوذرات افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، اثر اندازه ماسه‌ها و غلظت نانوذرات در انتقال و نگهداشت نانوذرات CMC-nZVI در محیط متخلخل اشباع مورد مطالعه قرار گرفت. در طول زمان تزریق نانوذره و زمان فلاشینگ رفتار انتقال و نگهداشت متفاوتی بر نانوذرات CMC-nZVI حاکم بود. در طول زمان تزریق، انتقال نانوذرات CMC-nZVI از تئوری فیلتراسیون کلئید تبعیت می‌کرد. به عبارت دیگر با کاهش اندازه ذرات ماسه، انتقال نانوذرات حتی در تعلیق‌های (سوسپانسیون‌های) غلیظ، به دلیل مکانیسم‌های مهم نگهداشت نظیر استرینینگ، رایپنینگ و ته‌نشینی در چاله حداقل انرژی ثانویه کاهش یافت. اما در طول زمان فلاشینگ (مرحله پس از تزریق نانوذره) انتقال نانوذرات از تئوری فیلتراسیون کلئید تخطی کرد. با تغییر در شرایط شیمیایی محلول ورودی در این زمان (تزریق آب دیونیزه)، حجم زیادی از نانوذرات ته‌نشین شده در مرحله قبل (تزریق نانوذره)، رها می‌شوند. این موضوع نشان می‌دهد که رها شدن نانوذرات در مرحله بعد از

پتانسیل انتقال طولانی مدت آنها را تعیین خواهد کرد، بنابراین اطلاعات این پروفیل‌ها برای تعیین مقصد نهایی نانوذرات ضروری است. به منظور بررسی نگهداشت نانوذرات، بعد از تکمیل آزمایش‌های انتقال، محیط متخلخل به بخش‌های ۳ سانتی‌متری (۱۰ بخش) تقسیم شد و سپس مقدار نانوذره باقیمانده در این بخش‌ها با اسپکتروفتومتر و روش فانتروولین تعیین گردید. در نهایت، پروفیل‌های نگهداشت به صورت درصد آهن باقیمانده در برابر فاصله از ورودی ستون رسم شد (شکل ۵). با توجه به شکل ۵، نتایج را می‌توان در دو بخش غلظت پایین سوسپانسیون (۱۰ و ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بالای سوسپانسیون (۳۰۰ و ۱۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر) بررسی نمود. در غلظت‌های پایین سوسپانسیون، در صورتی که اندازه ماسه‌ها ثابت باشد، با افزایش غلظت نانوذره مقدار نگهداشت نیز افزایش می‌یابد. در ضمن، در غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر، با کاهش اندازه ماسه‌ها، طبق تئوری فیلتراسیون کلئید نگهداشت افزایش یافته است اما در غلظت ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر روند منظمی را شاهد نبودیم. مطالعات گذشته (۱۲، ۳۴) نشان داده‌اند که مقدار لخته‌شدن و آگلومره شدن در غلظت‌های پایین (30 mg/l) ناچیز است و انتقال از تئوری فیلتراسیون کلئید تبعیت می‌کند. الیمچ و همکاران (۲۰) نیز بر اساس تئوری فیلتراسیون کلئید نشان دادند که با افزایش ذرات محیط متخلخل، به دلیل کاهش سطح ویژه برای رسوبگذاری، بازده اتصال کاهش و بنابراین نگهداشت کاهش می‌یابد.

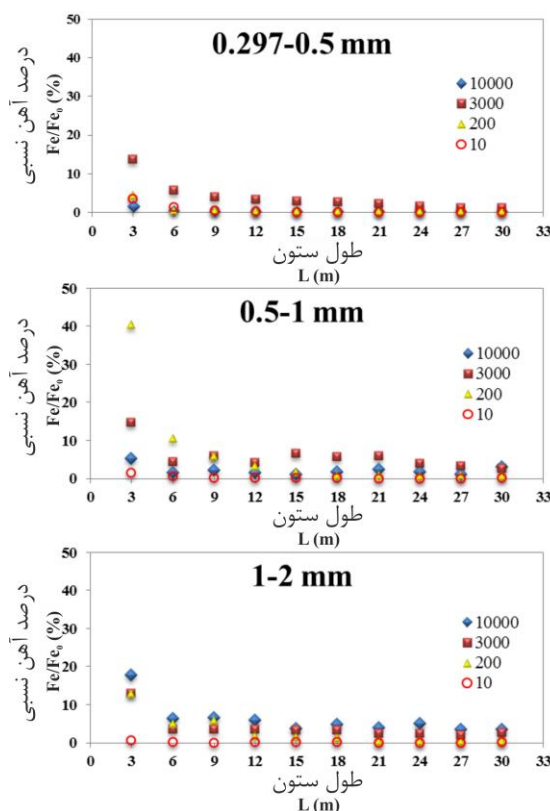
با این حال، زمانی که از غلظت بالای سوسپانسیون استفاده می‌گردد، نتایج متناقض می‌گردد. همان‌طوری که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، در یک اندازه ماسه ثابت (به غیر از ۱-۲ mm) و در غلظت بالای سوسپانسیون، با افزایش غلظت نانوذره در سوسپانسیون مقدار نگهداشت کاهش می‌یابد. به علاوه، در یک غلظت سوسپانسیون ثابت، با کاهش اندازه ماسه به‌ویژه از ماسه متوسط به ریز مقدار نگهداشت نیز کاهش پیدا می‌کند. چنین شرایطی به دو دلیل می‌تواند رخ دهد: اولی رها شدن ذرات ته‌نشین شده در چاله حداقل انرژی ثانویه به دلیل تغییر شرایط شیمیایی محلول که در ماسه‌های ریزتر بیشتر از ماسه‌های درشت‌تر است و پیش‌تر در مورد آن صحبت شد، و دومی کاهش بازده اتصال در ماسه‌های ریزتر به دلیل تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی روی نانوذرات. مطالعات فنرات و همکاران (۱۳ و ۳۵) نشان می‌دهد زمانی که از غلظت بالای نانوذره استفاده می‌شود با کاهش اندازه ذرات محیط متخلخل، بازده اتصال هم کاهش می‌یابد. آنها این مسئله را به اثر نیروهای هیدرودینامیکی روی آگلومره شدن^۱ و شکستن آگلومره^۲ و رسوبگذاری^۳ و جدا شدن^۴ رسوب از ذرات محیط

4- Detachment
5- Hydrodynamic drag torque
6- Attachment torque

1- Agglomeration
2- Disagglomeration
3- Deposition

در جای آب‌های زیرزمینی در مناطق آلوده تقلیل یابد. در نتیجه، به طور کلی و با توجه به منحنی‌های رخنه و پروفیل‌های نگهداشت نانوذرات CMC-nZVI می‌توان اظهار داشت که در استفاده از غلظت‌های بالای نانوذرات (در حد g/l) که عمدتاً برای تصفیه در جای آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند، کاهش اندازه ماسه‌ها موجب کاهش نگهداشت و در نتیجه افزایش انتقال آنها می‌گردد.

تزریق سوسپانسیون نانوذرات باید در مسائل صحرایی به شدت مورد توجه قرار گیرد. به نظر می‌رسد که اثر این پدیده، در ماسه‌های ریزتر و در غلظت بالای نانوذرات برجسته‌تر باشد، به طوری که منجر به افزایش بیشتر انتقال نانوذرات در محیط متخلخل اشباع می‌گردد. بنابراین، در طراحی یک سیستم تصفیه مبتنی بر نانوذرات CMC-nZVI، این پدیده باید مدنظر قرار گیرد تا هزینه‌های کلی تصفیه



شکل ۵- پروفیل‌های نگهداشت حاصل از آزمایش‌های انتقال نانوذرات CMC-nZVI
Figure 5- the retention profiles of CMC-nZVI column experiments

منابع

- 1- U.S. EPA. 2008. FY 2007 Superfund Annual Report. Building on Success: Protecting Human Health and the Environment. EPA 540-R-08-003. Washington, DC:U.S. Environmental Protection Agency. Available: www.epa.gov/superfund/accomp/pdfs/sf_annual_report_2007.pdf [accessed 20 October 2009].
- 2- Jiemvarangkul P. 2012. Nanoparticles for Nonaqueous-phase liquids (NAPLs) Remediation. A Dissertation presented to the graduate and research committee of Lehigh University in candidacy for the degree of Doctor of Philosophy in Environmental Engineering.
- 3- Comba S., Di Molfetta A., and Sethi R. 2011. A Comparison Between Field Applications of Nano-, Micro-, and Millimetric Zero-Valent Iron for the Remediation of Contaminated Aquifers. Water Air and Soil Pollution 215: 595–607.
- 4- Mueller N.C., Braun J., Bruns J., Černík M., Rissing P., and Rickerby Nowack B. 2012. Application of nanoscale zero valent iron (NZVI) for groundwater remediation in Europe. Environmental Science and Pollution Research 19: 550–558.
- 5- He F., Zhao D., and Paul C. 2010. Field assessment of carboxymethyl cellulose stabilized iron nanoparticles for in situ destruction of chlorinated solvents in source zones. Water Research 44: 2360–2370.
- 6- Wei Y.T., Wu S.C., Chou C.M., Che C.H., Tsai S.M., and Lien H.L. 2010. Influence of nanoscale zero-valent iron on geochemical properties of groundwater and vinyl chloride degradation: A field case study. Water Research 44: 131–

140.

- 7- Karn B., Kuiken T., and Otto M. 2009. Nanotechnology and in Situ Remediation: A Review of the Benefits and Potential Risks. *Environmental Health Perspectives* 117(12): 1823-1831.
- 8- Seymour M. 2012. Transport of Engineered Nanomaterials in Porous Media: Groundwater Remediation Application and Effects of Particle Shape. A Thesis Presented to the Faculty of the Graduate College at the University of Nebraska in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Environmental Engineering.
- 9- He F., Zhang M., Qian T., and Zhao D. 2009. Transport of carboxymethyl cellulose stabilized iron nanoparticles in porous media: Column experiments and modeling. *Journal of Colloid and Interface Science* 334: 96-102.
- 9- Shi J., Wang J., Wang W., Teng W., and Zhang W. 2019. Stabilization of nanoscale zero-valent iron in water with mesoporous carbon (nZVI-MC). *Journal of Environmental Sciences*. doi:10.1016/j.jes.2019.02.010.
- 10- Yu Z., Hu L., Lo I.M.C., 2018. Transport of the arsenic (As)-loaded nano zero-valent iron in groundwater-saturated sand columns: Roles of surface modification and As loading. *Chemosphere*. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.10.125.
- 11- Dong H., and Lo I.M.C. 2014. Transport of Surface-Modified Nano Zero-Valent Iron (SM-NZVI) in Saturated Porous Media: Effects of Surface Stabilizer Type, Subsurface Geochemistry, and Contaminant Loading. *Water Air Soil Pollut* 225: 2107.
- 12- Saleh N., Kim H.J., Phenrat T., Matyjaszewski K., Tilton R.D., and Lowry G.V. 2008. Ionic strength and composition affect the mobility of surface-modified Fe₀ nanoparticles in water-saturated sand columns. *Environmental Science & Technology* 42: 3349-3355.
- 13- Phenrat T., Kim H.J., Fagerlund F., Illangasekare T., and Lowry G.V. 2010. Empirical correlations to estimate agglomerate size and deposition during injection of a polyelectrolyte-modified Fe₀ nanoparticle at high particle concentration in saturated sand. *Journal of Contaminant Hydrology* 118: 152-164.
- 14- Raychoudhury T., Tufenkji N., and Ghoshal S. 2014. Straining of polyelectrolytestabilized nanoscale zero valent iron particles during transport through granular porous media. *Water Research* 50: 80-89.
- 15- Soares A., Ramos S., Albergaria T., and Delerue-Matos C. 2018. Green zero valent iron nanoparticles dispersion through a sandy column using different injection sequences. *Science of the Total Environment* 637-638: 935-942.
- 16- Zhu K., and Chen C. 2019. Application of nZVI and its composites into the treatment of toxic/radioactive metal ions. *Emerging Natural and Tailored Nanomaterials for Radioactive Waste Treatment and Environmental Remediation- Principles and Methodologies*, 281-330. doi:10.1016/b978-0-08-102727-1.00006-6.
- 17- Laumann S., Micic V., Lowry G.V., and Hofmann T. 2013. Carbonate minerals in porous media decrease mobility of polyacrylic acid modified zero-valent iron nanoparticles used for groundwater remediation. *Environmental Pollution* 179: 53-60.
- 18- Johnson R.L., Nurmi J.T., Johnson G.S.O., Fan D.M., Johnson R.L.O., Shi Z.Q., Salter-Blanc A.J., Tratnyek P.G., and Lowry G.V. 2013. Field-Scale transport and transformation of carboxymethylcellulose-stabilized nano zero-valent iron. *Environ. Sci. Technology* 47(3): 1573-1580.
- 19- Su C.M., Puls R.W., Krug T.A., Watling M.T., O'Hara S.K., Quinn J.W., and Ruiz N.E. 2013. Travel distance and transformation of injected emulsified zerovalent iron nanoparticles in the subsurface during two and half years. *Water Research* 47(12): 4095-4106.
- 20- Elimelech M., Gregory J., Jia X., and Williams R. 1995. *Particle Deposition and Aggregation: Measurement, Modeling, and Simulation*, Butterworth-Heinemann, Boston.
- 21- Tufenkji N., Miller G.F., Ryan J.N., Harvey R.W., and Elimelech M. 2004. Transport of cryptosporidium oocysts in porous media: role of straining and physicochemical filtration. *Environmental Science & Technology* 38: 5932-5938.
- 22- Litton G.M., and Olson T.M. 1996. Particle size effects on colloid deposition kinetics: evidence of secondary minimum deposition. *Colloids and Surfaces, A, Physicochemical and Engineering Aspects* 107: 273-283.
- 23- Wang Y., Dave R.N., and Pfeffer R. 2004. Polymer coating/encapsulation of nanoparticles using a supercritical anti-solvent process. *The Journal of Supercritical Fluids* 28: 85-99.
- 24- Elimelech M., and O'Melia C.R. 1990. Kinetics of deposition of colloidal particles in porous media. *Environmental Science & Technology* 24: 1528-1536.
- 25- Tufenkji N., and Elimelech M. 2004. Deviation from the Classical Colloid Filtration Theory in the Presence of Repulsive DLVO Interactions. *Langmuir* 20(25): 10818-10828.
- 26- Torkzaban S., Bradford S. A., Wan J., Tokunaga T., and Masoudih A. 2013. Release of Quantum Dot Nanoparticles in Porous Media: Role of Cation Exchange and Aging Time. *Environmental Science & Technology* 47: 11528-11536.
- 27- Lin D., Tian X., Wu F., and Xing B. 2010. Fate and Transport of Engineered Nanomaterials in the Environment. *Journal of Environmental Quality* 39: 1896-1908.
- 28- Franchi A., and O'Melia C.R. 2003. Effects of natural organic matter and solution chemistry on the deposition and reentrainment of colloids in porous media. *Environmental Science & Technology* 37(6): 1122-1129.

- 29- Hahn M.W., and O'Melia C.R. 2004. Deposition and reentrainment of Brownian particles in porous media under unfavorable chemical conditions: some concepts and applications. *Environmental Science & Technology* 38(1): 210-220.
- 29- Street A., Sustich R., Duncan J., Savage N., (Edts). 2014. *Nanotechnology Applications for Clean Water: Solutions for Improving Water Quality (Micro and Nano Technologies)*. Burlington: William Andrew (Elsevier Science).
- 30- Hosseini S.M., and Tosco T. 2013. Transport and retention of high concentrated nano-Fe/Cu particles through highly flow-rated packed sand column. *Water Research* 47: 326-338.
- 31- Tosco T., Papini M.P., Viggi C.C., and Sethi R. 2014. Nanoscale zerovalent iron particles for groundwater remediation: a review. *Journal of Cleaner Production* 77: 10-21.
- 32- Godinez I.G., and Darnault C.J.G. 2011. Aggregation and transport of nano-TiO₂ in saturated porous media: Effects of pH, surfactants and flow velocity. *Water Research* 45: 839-851.
- 33- Li Z., Sahle-Demessie E., Hassan A.A., Sorial G.A., 2011. Transport and deposition of CeO₂ nanoparticles in water-saturated porous media. *Water Research* 45: 4409-4418.
- 34- Saleh N. 2007. *An Assessment of Novel Polymeric Coatings to Enhance Transport and In situ Targeting of Nanoiron for Remediation of Nonaqueous*. Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- 35- Phenrat T., Kim H., Fagerlund F., Illangasekare T., Tilton R.D., and Lowry G.V. 2009. Particle size distribution, concentration, and magnetic attraction affect transport of polymer-modified Fe⁰ nanoparticles in sand columns. *Environmental Science and Technology* 43: 5079-5085.



The Effect of Particle Concentration and Sand Grain Size on Transport Breakthrough Curves and Retention Profiles of CMC-nZVI Particles in Saturated Media

A. Saberinasr^{1*}- M. Nakhaei²- M. Rezaei³- S.M. Hosseini⁴

Received: 02-09-2019

Accepted: 20-01-2020

Introduction: nZVI particles are strong reducing agents, capable of degradation and detoxification of a wide range of organic and inorganic pollutants in contaminated aquifers. Understanding the transport and retention of these nanoparticles in subsurface environments is required for treatment systems and in situ groundwater remediation. During the last decade, several studies have been conducted to investigate the effect of different physicochemical conditions on the transport and retention of nZVI in saturated porous media. This study aimed to evaluate the effect of sand grain size and nanoparticle concentration on fundamental processes governing CMC-nZVI nanoparticle transport and retention in saturated porous media.

Materials and Methods: nZVI (NANOFE STAR, NANOIRON, s.r.o. Czech Republic) was employed in this study. To prepare CMC-nZVI, nanoparticle, suspension and polymer solution was added by the relative dose of CMC to nZVI mass 1:2, in a 250-ml flask reactor. pH was fixed at 9.5 by NaOH and the solution was mixed for 144 h under ambient temperature condition at the absence of oxygen. Quartz sands with ~ 99.38% SiO₂ and 0.27 Fe₂O₃ based on XRF analysis, was used as the porous medium. The experiments were conducted using a cylindrical Plexiglas column 30 cm in length and 2.5 cm in inner diameter. In order to capture the effect of particle concentration and grain size, 12 tests were conducted with four different concentrations (C = 10, 200, 3000, 10000 mg/l) and three sizes of grain (d_c = 0.297–0.5 mm, 0.5–1 mm, 1–2 mm). In each test, ~4 PVs of nZVI suspension were introduced into the columns and to complete the test, ~6 PVs of deionized water were flushed. The column effluent was collected every 2 min and analyzed for total Fe using UV-Vis. The normalized effluent iron concentration (C/C₀) for each transport test was plotted as a function of pore volumes. The spatial distributions of retained CMC-nZVI in the sand columns were determined to right after the breakthrough experiment. The quartz sand in each column was carefully excavated in ~3 cm increments, transferred into 50 mL vials and analyzed for total Fe. The concentration of retained CMC-nZVI in all the sand columns was also plotted as a function of travel distance.

Results and Discussion: The breakthrough curves indicate that both grain size and nanoparticle concentration had a relevant impact on CMC-nZVI mobility, even if the influence of nanoparticle concentration was more evident. In all experimental conditions, the BTCs were not symmetrical, which indicates that attachment and detachment phenomena occurred in different modes. The breakthrough curves can be interpreted in two steps: injection and flushing times. The maximum relative concentration (C/C₀) decreased, during injection time, for three different grain sizes while influent concentration increased from 10 to 10,000 mg/L, which can be attributed to the increase in particle-particle interaction (aggregation) and particle-sand interaction (attachment). The breakthrough curves, after the initial increase, showed a strong decline, which is a clear indication of the ripening phenomenon. This phenomenon affected the porous medium properties such as porosity and hydraulic conductivity. Moreover, At higher influent CMC-nZVI concentration, Na⁺ ion and subsequently ionic strength increases because of higher doses of Na-CMC. As a result, aggregation and deposition will occur under a shallower secondary energy minimum well, that they are reversible. At the same nZVI concentrations, the breakthrough curve decreased by a decrease in grain size. Decreases in grain size can lead to an increase in surface area, decrease in pore throat size; and consequently, retention of nanoparticles by straining phenomena. However, another behavior was governed during the flushing time. During the flushing time, a narrow sharp increase in C/C₀ was observed called flushing peak. In this study, CMC-nZVI aggregates

1 and 2- Ph.D. and Full Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University of Tehran, Tehran, Iran, respectively.

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

3- Associate Professor, Faculty of Earth Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

4- Assistant Professor, Natural Geography Department, University of Tehran, Tehran, Iran

DOI: 10.22067/j.v34i1.82623

deposited onto surfaces of sands due to secondary energy minimum were eventually released during the flushing period of the column with DI water. The results suggest that the grain size and particle concentration can have a positive effect on this peak. The results of retention profiles demonstrate that the CMC-nZVI retention in low concentration (10 mg/L) is consistent with filtration theory; while the highly concentrated polymer-modified nZVI dispersions (especially 3000 and 10000 mg/l) contradicts filtration theory. Based on filtration theory (Elimelech et al. 1995; Tufenkji et al. 2004), if all factors affecting the transport of colloids are kept constant, grain size increase can lead to a decrease in surface area and attachment efficiency (α). The contradiction at high concentration can be explained by considering the effect of hydrodynamic forces (especially fluid shear) on agglomeration and disagglomeration and deposition and detachment. The size of stable aggregates formed in the pores of finer sands is smaller than when they are formed in the pores of larger sands because the magnitude of local shear is higher for narrower pores. This led to decreased retention in finer sand.

Conclusion: The results of this research show that during the injection time, ripening and straining phenomena are key retention mechanisms of nanoparticles by decreasing the sand size and increasing particle concentration. While during the flushing time, secondary energy minima and hydrodynamic forces play critical roles in the deposition and transport mechanisms of CMC-nZVI. At high particle concentration (3000 and 10000 mg/l), these factors can lead to an increase in nanoparticle mobility by decreasing sand size. However, the results of retention profiles were consistent with colloid filtration theory at low particle concentration (10 and 200 mg/l).

Keywords: CMC-nZVI Particles, Particle Concentration, Retention, Sand Grain Size, Transport

تشکیل و تکامل خاک‌های رخنمون شده مناطق باستانی کنارسندل و دقیانوس در شهر جیرفت، استان کرمان

الهام سلیمانی ساردو^۱ - محمد هادی فرپور^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۸

چکیده

خاک‌ها به عنوان اجزای مهمی از مکان‌های باستانی تشخیص داده می‌شوند و عموماً به عنوان نشان‌گرهای چینه‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف از این مطالعه، بررسی میکرومورفولوژی و کانی‌شناسی رس بخشی از مکان‌های باستانی دقیانوس و گورستان‌های باستانی کنارسندل (بستر قدیم و جدید هلیل‌رود) و ترکیب اطلاعات به دست آمده در زمینه خاک‌شناسی و باستان‌شناسی و نیز هم‌پوشانی مناسب اطلاعات به منظور شناخت بهتر وقایع گذشته می‌باشد. به همین منظور تعداد سه خاک‌رخ در نقاط باستانی منطقه حفر شد و پس از نمونه‌برداری از اعماق مختلف، آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی، میکرومورفولوژی و کانی‌شناسی رسی روی آنها انجام گرفت. در بررسی نتایج کانی‌شناسی رس، وجود کانی‌های کائولینیت، ایلیت، کلریت، اسمکتیت و پالی‌گورسکیت تأیید شد. نتایج میکرومورفولوژی، حضور نوعی فسیل جلبک کاروفیت که نشان‌دهنده محیط آب شیرین تا لب شور در عصر دونین تا حال حاضر می‌باشد را در خاک‌رخ دقیانوس نشان داد. همچنین بررسی مقاطع نازک، وجود بلورهای گچ عدسی شکل و به صورت صفحات درهم قفل شده در خاک‌رخ‌های کنار سندل، به‌ویژه بستر جدید هلیل‌رود و عدم وجود گچ در خاک‌رخ دقیانوس را تأیید کردند. این موضوع می‌تواند به دلیل تأثیرپذیری منطقه کنار سندل از سازندهای نئوژن و گچی بالادست و رژیم بالارونده آب زیرزمینی باشد. وجود پوشش‌های قوی رس و کلسیت در اطراف حفرات، به ترتیب نشان‌گر شرایط تکامل بالاتر در خاک‌رخ دقیانوس و بستر جدید هلیل‌رود بود. احتمالاً به دلیل تأثیرات هلیل‌رود بر بستر قدیم خود در طی زمان‌های طولانی، تکامل پایین‌تر این خاک‌رخ در منطقه مشاهده شد. نتایج رده‌بندی خاک در منطقه باستانی دقیانوس، وجود افق آرجیلیک که نشان‌دهنده بیشتر بودن رطوبت قابل دسترس در گذشته است را اثبات نمود.

واژه‌های کلیدی: آرجیلیک، باستان‌شناسی، رده‌بندی خاک، میکرومورفولوژی، هلیل‌رود

مقدمه

یافته‌اند. بنابراین وضعیت خاک‌های قدیمی ممکن است با شرایط فعلی سازگار نباشد. به عبارت دیگر، تفسیر شرایط اقلیمی وابسته به خاک‌های قدیمی باقی‌مانده با مشکلاتی همراه است؛ چرا که در طول زمان، تغییر اقلیمی رخ می‌دهد و این خاک‌ها ممکن است چندین اقلیم را تجربه کرده باشند. بنابراین، نمی‌توان به‌طور دقیق اقلیم اولیه‌ای که خاک در آن تشکیل شده را بازسازی کرد؛ همچنین، در این که کدام‌یک از دوره‌ها تأثیرگذارتر بوده است، ابهام وجود دارد (۳۵). در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که خاک‌ها، آرشپوی از اطلاعات ارزشمند می‌باشند. زمانی که این اطلاعات به‌صورت مناسب ترکیب شوند منجر به فهم بهتر پیدایش خاک‌ها، سیمای اراضی^۳ و فعالیت‌های انسان در گذشته می‌شود. این روش با بهینه کردن ارتباط بین داده‌ها و اطلاعات منفرد و کنترل آن‌ها منجر به تفسیرهای

اکثر باستان‌شناسان معتقدند که بین بقایای فرهنگی، انسانی و خاکی که این بقایا در آن یافت می‌شود، رابطه وجود دارد. عواملی از تشکیل خاک که در باستان‌شناسی مورد توجه قرار می‌گیرند به‌طور ویژه شامل استفاده از خاک‌ها به عنوان شاخص سن، تغییرات آب و هوا و اقلیم‌های گذشته می‌باشند. این مفهوم که "مدت زمانی باید بگذرد، قبل از اینکه خاک تشکیل شود"، احتمالاً یکی از جنبه‌های مهم خاک‌شناسی در باستان‌شناسی است (۲۲). در طول زمان، عوامل خاک‌ساز به‌خصوص اقلیم و پوشش گیاهی تغییر

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
(Email: farpoor@uk.ac.ir)
(*)- نویسنده مسئول

جامع‌تری می‌گردد (۲۸).

فرپور (۱۳۸۹) پژوهشی با هدف بررسی خصوصیات میکرومورفولوژی، فیزیکوشیمیایی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی گوگرد از بخش‌های رخنمون‌شده در اثر زلزله و قبلاً مرمت‌شده ارگ در مکان باستانی ارگ بم انجام داد. نتایج نشان داد که اخیراً یک خاک شور برای مرمت به کار رفته است، در حالیکه خاک غیرشور به کار رفته در ساخت خشت‌های قدیمی احتمالاً توسط سازندگان اولیه ارگ از جای دیگری به منطقه آورده شده است (۱۱).

خدابخشی و همکاران (۱۳۹۱) پژوهشی به منظور مطالعه میکرومورفولوژی خاک‌های گورستان عصر آهن در مکان باستانی مسجد کبود تبریز انجام دادند. و نتیجه گرفتند که: تفاوت در ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی، بافتی و شیمیایی افق‌های هر سه خاک رخ حفر شده وجود دارد. اثر عوامل طبیعی و غیر طبیعی، به هم خوردگی لایه‌ها را تصدیق کرد و وجود مواد مصنوع در افق‌های آن‌ها را نشان داد (۲۸). آنجلوچی (۲۰۰۳) با استفاده از بررسی‌های ژئومورفولوژی، رسوب‌شناسی و تحلیل‌های میکرومورفولوژیکی، به مطالعه زمین‌باستان‌شناسی^۱ یکی از استقرارگاه‌های صخره‌ای اسپانیا پرداخت. نتایج، مؤید ارتباط بین تغییرات اقلیمی و به موازات آن، تغییرات در فعالیت‌های انسانی بود (۴). هادیان دهکردی (۱۳۹۵) مطالعه‌ای با هدف بررسی خاکشناسی مصالح خشتی تاریخی و باستانی در مناطق مختلف ایران انجام داد. نمونه‌هایی از خشت‌های استفاده شده در محوطه‌های باستانی و بناهای تاریخی را مورد مطالعات شیمیایی (XRF)، کانی‌شناسی (XRD) و مکانیکی قرار داد. نتایج نشان داد که خاک استفاده شده در ساخت خشت‌ها از نوع رسی-ماسه‌ای و گاه همراه سیلت بوده؛ همچنین، بیشترین اجزای ریزدانه و شبه‌رسی در آنها کلریت، مسکویت و ایلیت بود (۱۸). سوردویل (۲۰۰۷) میکرومورفولوژی دو مکان مهم باستانی غار گاردن و پناهگاه صخره‌ای سنت آلبان را مورد مطالعه قرار داد. نتایج، ارتباط رسوبات را با نوسانات آب و هوایی نشان داد (۴۱).

طی مطالعه‌ای سنجری و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی شواهد میکرومورفولوژی خاک‌های قدیمی جیرفت پرداختند. نتایج حاکی از وجود پوشش‌های رسی و کلسیتی قوی روی ذرات اولیه و مؤید وجود اقلیمی با رطوبت بیشتر از زمان کنونی در زمان تشکیل خاک‌های قدیمی منطقه جیرفت بود (۳۸). افرا و همکاران (۱۳۹۵) نیز مطالعه‌ای با هدف بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های قدیمی در مناطق باستانی جیرفت انجام دادند. نتایج پژوهش ایشان مؤید وجود افق آرجلیک در منطقه و بنابراین وجود اقلیمی با رطوبت بیشتر از زمان کنونی در زمان تشکیل این خاک‌ها بود (۲). موریارتی (۲۰۰۴)

نمونه‌های گچ جمع‌آوری شده در منطقه باستانی لاتی‌رینداد دنوستروس در کشور گواتمالا را مورد بررسی قرار داد و بیان نمود با اینکه این قطعات گچی بسیار شبیه هم هستند اما از نظر ترکیب و کاربرد با هم متفاوت می‌باشند. این موضوع ممکن است به این دلیل باشد که فاکتورهای متعددی در طی فرآیندهای ساخت و ساز به‌طور معکوس با هم عمل کرده باشند (۳۳).

منطقه جیرفت دارای دو مکان باستانی متمایز دقیانوس (دوران اسلام) و کنار صندل (دوران ما قبل اسلام) می‌باشد (۳). هم‌چنین بستر قدیم و جدید مسیر رود مهم هلیل‌رود، در دو طرف منطقه کنار صندل قرار گرفته است. با توجه به اهمیت این نقاط باستانی در تاریخ و تمدن بشریت و عدم انجام تحقیقات با هدف مقایسه تکامل خاک در مکان‌های باستانی مذکور، لزوم انجام مطالعه‌ای برای بررسی تشکیل و تکامل، کانی‌شناسی و میکرومورفولوژی خاک در منطقه احساس گردید. هم‌چنین تفسیر نتایج مطالعات بخش خاک‌شناسی و مقایسه و تلفیق آن با شواهد باستان‌شناسی و تاریخی خاک‌های مناطق باستانی می‌تواند در راستای شناخت شرایط گذشته مفید باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

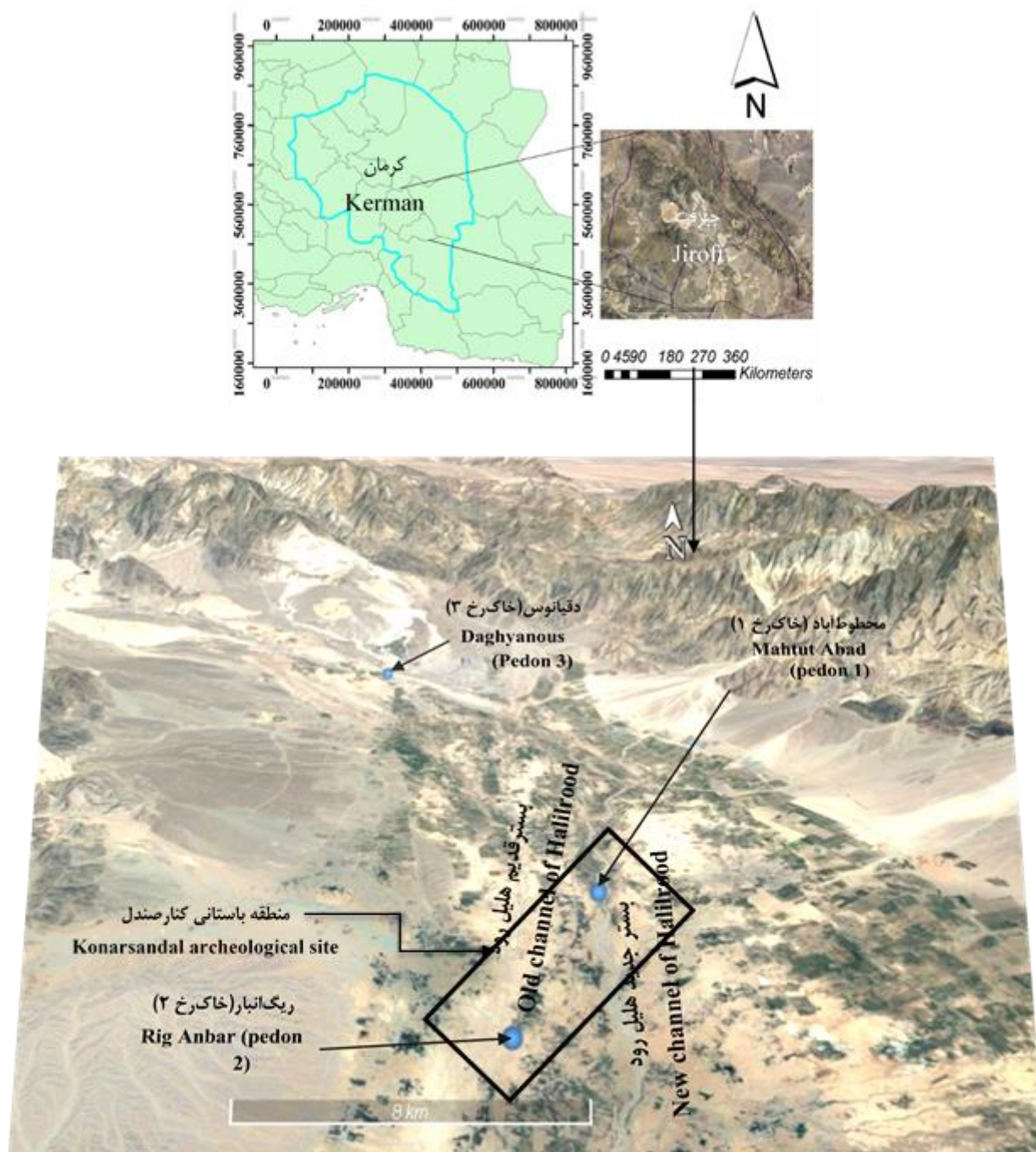
شهر جیرفت با ارتفاع تقریبی ۶۵۰ متر از سطح دریا، در جنوب شرقی استان کرمان واقع شده است. براساس اطلاعات سازمان هواشناسی برای یک دوره آماری ۱۸ ساله (از ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸) میانگین بارندگی و دمای سالیانه این منطقه به‌ترتیب ۱۷۴ میلی‌متر و ۲۵/۸ درجه سلسیوس می‌باشد (۵). رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک‌های منطقه نیز به‌ترتیب اریدیک و هایپرترمیک می‌باشند (۵). موقعیت جغرافیایی نقاط مطالعاتی در محدوده عرض جغرافیایی "۲۸° ۲۳' ۴۷" تا "۲۸° ۳۹' ۴۳" شمالی و طول جغرافیایی "۵۷° ۴۲' ۴۱" تا "۵۷° ۴۷' ۲۴" شرقی قرار دارد (شکل ۱).

از لحاظ زمین‌شناسی در شمال جیرفت، رسوبات آبرفتی، مخروط‌افکنه‌های جوان و قدیمی و تراس‌های آبرفتی (دوره کواترنری) وجود دارند. غرب دشت جیرفت به مخروط‌افکنه‌های جوان دوره کواترنر و هم‌چنین سنگ‌هایی از قبیل ماسه‌سنگ-کنگلومر (نئوژن) محدود می‌شود. شرق دشت جیرفت نیز از رسوبات کواترنر پوشانده شده و شامل تراس رودخانه‌ای و مخروط‌افکنه است. در جنوب دشت جیرفت، رسوبات آبرفتی ماسه‌سنگی و کنگلومرای نئوژن متعلق به دوره کواترنر وجود دارند و خروجی دشت جیرفت محسوب می‌شوند (۳۷).

در جیرفت اختلاف ارتفاع شدید به‌طور کامل مشهود است. از ارتفاع ۴۰۰۰ متری کوه‌های جبال‌بارز و لاله‌زار تا ۳۶۹ متری کناره‌های هامون جازموریان به چشم می‌خورد. در این منطقه، شیب

سولان تغییر می‌کند. بنابراین جازموریان از شمال به کوه‌های جبال بارز و از جنوب به کوه‌های بشاگرد محدود است و از شرق به کوه‌های مکران می‌پیوندند. دو رود بمپور در شرق و هلیل رود در غرب، این حوضه را در بر می‌گیرند (۹).

تند کوهستان‌ها در بخش شرقی مشهود می‌باشد و در بخش شمالی و غربی، شیب به‌طور نسبی ملایم است. بعد از نواحی کوهستانی شمالی و غربی، جلگه‌ها و دشت‌های وسیعی قرار دارند که ارتفاع آنها از حدود ۲۴۰۰ متر در ساردوئییه تا ۵۰۰ متر در بهادرآباد و قسمت انتهایی دشت



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی به همراه سه خاک‌رخ حفر شده در آن
Figure 1- Location of study area along with three excavated soil pedons

جدول ۱- برخی ویژگی‌های مورفولوژیکی خاک‌رخ‌های مورد مطالعه

Table 1- Some morphological properties of studied pedons

Table 1. Some morphological properties of studied pedons								
ضخامت Thickness	افق Horizon	مرز Boundary ¹	رنگ	پایداری		تجمعات Concentrations ³	ساختمان Structure ⁴	
			Color	Consistency ²				
			خشک Dry	مرطوب Moist	خشک Dry			مرطوب Moist
Pedon 1 خاک‌رخ ۱								
0-20	A	A, S	10YR 7/2	10YR 4/4	S	VFR	FDC, TOT	2, f, abk
20-40	C	A, S	10YR 5/2	10YR 3/2	L	L	FDC, TOT	sg
40-80	2B _{tn}	A, W	10YR 6/3	10YR 4/3	S	VFR	f, 1, CAM, MAT	1, m, abk
80-100	2C	A, W	10YR 6/2	10YR 3/2	S	L	F, 2, RSB, MAT	0, m, abk
100-150	3B _{tn}	A, S	10YR 6/3	10YR 4/3	S	L	f, 1, CAM, MAT	1, m, abk
150-175	3B _{k1}	C, S	10YR 6/3	10YR 4/4	SH	VFR	FDC, FDG, TOT	1, m, abk
175-200	3B _{k2}	G, S	10YR 8/1	10YR 4/6	S	VFR	FDC, FDG, TOT	1, m, pl
200-230	3B _{k3}	C, W	10YR 7/2	10YR 4/4	S	VFR	CAM, MAT	1, f, , abk
230-265	3B _{ky}	C, W	10YR 7/2	10YR 4/4	L	L	CAM, MAT	1, f, abk
Pedon 2 خاک‌رخ ۲								
0-30	Az	C, W	10YR 6/3	10YR 3/4	SH	FI	f, 1, 2, CAM, SAM, MAT	2, m, abk
30-40	B _{tn}	G, W	10YR 7/3	10YR 4/6	SH	FR	f, 1, CAM, SAM, CBM, MAT	2, m, abk
40-75	B _{w1}	G, S	10YR 6/3	10YR 3/4	SH	FR	f, 1, SAM, CAM, MAT	2, m, abk
75-105	B _{w2}	C, S	10YR 7/2	10YR 5/4	SH	FR	FDC, TOT	1, m, abk
105-135	B _{w3}	C, S	10YR 7/2	10YR 4/4	SH	FR	f, 1, SAM, MAT	2, m, abk
135-180	B _{w4}	A, S	10YR 7/2	10YR 3/4	MH	FR	FDC, TOT	2, m, pl
180-200	B _{w5}	A, W	10YR 6/3	10YR 4/4	MH	VFR	FDC, TOT	2, m, abk
200-230	B _{w6}	A, W	10YR 7/2	10YR 4/4	SH	FR	FDC, TOT	1, m, abk
230-260	B _{w7}	A, W	10YR 7/2	10YR 4/4	SH	VFR	FDC, TOT	1, m, abk
Pedon 3 خاک‌رخ ۳								
0-20	A	A, S	10YR 6/3	10YR 3/4	S	VFR	FDC, TOT	2, f, abk
20-55	B _w	A, W	10YR 7/2	10YR 3/4	MH	FR	FDC, TOT	1, m, abk
55-95	B _{t1}	C, S	10YR 6/3	10YR 3/4	MH	FR	f, 1, CBM, MAT	2, m, abk
95-130	B _{t2}	G, S	10YR 8/2	10YR 4/6	SH	VFR	f, 1, CBM, MAT	1, m, abk
130-165	B _{t3}	C, S	10YR 6/3	10YR 3/4	MH	FR	f, 1, CBM, MAT, FDS, TOT	1, m, abk
165-190	B _{tk}	C, S	10YR 6/3	10YR 3/4	SH	VFR	f, 1, CBM, MAT	2, m, abk
190-215	2B _{w1}	C, S	10YR 7/2	10YR 3/4	MH	FI	FDC, TOT	2, m, abk
215-235	2B _{w2}	C, W	10YR 7/2	10YR 4/6	MH	FR	FDC, TOT	2, m, cpr
235-260	2B _{w3}	C, S	10YR 7/3	10YR 4/6	SH	VFR	f, 1, CAM, MAT	1, m, abk
260-290	2B _k	C, S	10YR 6/3	10YR 4/4	SH	VFR	FDC, TOT	1, m, abk
290-320	2B _w	C, S	10YR 6/4	10YR 4/6	SH	VFR	FDC, TOT	2, m, pl

۱. مرز: وضوح (A-ناگهانی، C-واضح، G-تدریجی)؛ توپوگرافی: (S-صاف، W-موجی)

۲. پایداری: خشک (L-سست، S-نرم، SH-اندکی سخت، MH-سختی متوسط)؛ مرطوب (L-سست، VFR-بسیار شکننده، F-شکننده، FI-سفت)

۳. تجمعات: مقدار (f-کم)؛ اندازه (۱-کوچک، ۲-متوسط)؛ نوع (FDC-کربنات‌های ریز نامشهود، FDG-گچ ریز نامشهود، FDS-نمک‌های ریز نامشهود، -CAM توده‌های کربنات، SAM-توده‌های نمک، CBM-اجسام رسی، RSB-غلاف‌ها و پوشش‌های ریشه)؛ محل قرارگیری: (MAT-در ماتریکس (غیرتجمعی با منافذ و خاکدانه‌ها)، TOT-سراسری).

۴. ساختمان: درجه (۱-ضعیف، ۲-متوسط)؛ اندازه (f-ریز، m-متوسط)، نوع (abk-مکعبی زاویه‌دار، sg-ذرات تک‌دانه، pl-صفحه‌ای، cpr-ستونی)

1. Boundary: distinctness (A - abrupt, C - clear, G - gradual); topography (S - smooth, W- wavy)

2. Consistency: dry (L - loose, S - soft, SH - slightly hard, MH - moderately hard), moist (L - loose, VFR - very friable, FR - friable, FI - firm)

3. Concentrations: quantity (f - few); size (1 - fine, 2 - medium); kind (FDC - finely disseminated carbonates, FDG - finely disseminated gypsum, FDS - finely disseminated salts, CAM- carbonate masses, SAM - salt masses, CBM - clay bodies, RSB - root sheaths); location (MAT - in the matrix (not associated with peds/pores), TOT - throughout).

4. Structure: grade (1 - weak, 2 - moderate); size (f - fine, m - medium); type (abk - angular blocky, sg - single grain, pl - platy, cpr - Columnar).

مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی

محوطه‌های باستانی حاشیه رودخانه هلیل‌رود از مهمترین سکونت‌گاه‌های بشر محسوب می‌شوند. برپایه بررسی‌های باستان‌شناسی، حوزه فرهنگی-جغرافیایی جیرفت دست‌کم از دوران نوسنگی، بستری مناسب برای استقرارهای انسانی بوده و پس از آن، هسته‌های تمدن از آغاز شهرنشینی (تمدن کنارصندل) تا دوران اسلامی (دقیانوس) در این حوزه شکل گرفته‌اند (۳). بنابراین جهت ارتباط بین مطالعات باستان‌شناسی و خاک‌شناسی، اقدام به حفر خاک‌رخ در گورستان‌های متعلق به هزاره سوم پیش از میلاد در منطقه باستانی کنارصندل و منطقه باستانی دقیانوس گردید. در گورستان‌های باستانی کنارصندل دو خاک‌رخ، به‌ترتیب در بستر جدید هلیل‌رود (محوطه‌آباد) و بستر قدیم هلیل‌رود (ریگانبار) حفر شد که برای سهولت نوشتار به‌ترتیب به نام خاک‌رخ ۱ و ۲ و خاک‌رخ باستانی دقیانوس به نام خاک‌رخ ۳ نام‌گذاری می‌شوند (شکل ۱). سپس نمونه‌برداری از تمامی افق‌های خاک‌رخ‌های مذکور انجام گرفت. نمونه‌های هواخشک شده، کوبیده و از الک دو میلی‌متر عبور داده شد. آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی لازم شامل واکنش خاک در خمیر اشباع به کمک دستگاه پ‌هاش‌سنج مدل Jenway، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک به وسیله دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی مدل Jenway، بافت خاک به روش هیدرومتر (۶)، اندازه‌گیری گچ به روش ترسیب استون (۳۴)، اندازه‌گیری سدیم محلول از دستگاه نشر اتمی (۱۹)، اندازه‌گیری کلسیم و منیزیم محلول به روش تیتراسیون (۳۲) و کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (۳۲) انجام گردید. سپس رده‌بندی خاک منطقه بر طبق سیستم رده‌بندی خاک آمریکایی (۲۰۱۴) و سیستم طبقه‌بندی جهانی (WRB) و با توجه به نتایج آزمایشگاهی و مشاهدات صحرایی انجام گرفت (۴۰).

تعداد ۱۰ کلوخه دست‌نخورده خاک از افق‌های مختلف خاک‌رخ‌های مورد مطالعه، برای تهیه مقطع نازک و بررسی میکرومورفولوژی انتخاب شدند. به این منظور از رزین سه‌جزئی به‌منظور اشباع کردن نمونه‌های خاک استفاده گردید. نمونه‌ها پس از گذشت حدود ۱۰ روز، در شرایط هوای آزاد سخت و خشک شدند. سپس نمونه‌های اشباع‌شده برای تهیه مقطع نازک آماده گردید. به‌دلیل وجود گچ و سایر مواد انحلال‌پذیر در نمونه‌ها، از نفت برای سایش استفاده شد. در پایان، مقاطع نازک تهیه‌شده، با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مدل BK-POL-TB در دو حالت نور پلاریزان صفحه‌ای^۱ (PPL) و متقاطع^۲ (XPL) بر اساس راهنمای استوپس (۲۰۰۳) مورد بررسی قرار گرفتند و از بخش‌های مورد

نظر عکس‌برداری انجام شد (۴۴).

برای تعیین نوع کانی‌های رسی از روش‌های جکسون (۱۹۷۵) و کیتریک و هوپ (۱۹۶۳) به‌منظور حذف املاح محلول، کربنات‌ها، مواد آلی و آهن و جداسازی ذرات رس استفاده گردید (۲۳، ۳۱). افق‌های دارای پوشش رس و پرشدگی و پوشش کلسیت، برای بررسی نوع کانی‌های مختلف به آزمایشگاه کانی‌شناسی بخش علوم و مهندسی خاک دانشگاه شهرکرد ارسال گردید. بنابراین لایه‌های (۰-۳۰) و (۱۸۰-۲۰۰) سانتی‌متر در خاک‌رخ ۲ و لایه‌های (۹۵-۱۳۰) و (۲۶۰-۲۹۰) سانتی‌متر در خاک‌رخ ۳ برای این منظور انتخاب شدند. پراش پرتو ایکس نمونه‌ها تحت تیمار اشباع با منیزیم، اشباع با منیزیم و تیمار اتیلن گلیکول، اشباع با پتاسیم و اسلاید پتاسیم تیمار شده با حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس توسط دستگاه Bruker مدل Dh Advance ساخت کشور آلمان، در ولتاژ ۴۰ kv و آمپراژ ۳۰ mA مورد بررسی قرار گرفت (۱۰).

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و نحوه تشکیل و

رده‌بندی خاک

ویژگی‌های مورفولوژیکی خاک‌رخ‌های مورد مطالعه در جدول ۱ و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نیز در جدول ۲ ارائه گردید. خاک‌رخ ۱ به‌دلیل متأثر بودن از رسوبات رودخانه هلیل‌رود دارای دو خاک جوان رویی و قدیمی زیرین می‌باشد. با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۲، میزان شوری و نسبت جذب سطحی سدیم در خاک زیرین بیشتر از خاک رویی می‌باشد. بر همین اساس خاک قدیمی با بافت سنگین‌تر، توسط انقطاع از خاک جوان جدا شده است. بنابراین خاک‌رخ حفرشده در بستر جدید هلیل‌رود به‌دلیل وجود افق‌های ناتریک، کلسیک و جیپسیک، در سطح زیرگروه تیپیک ناتراآرجیدز (Typic Natrargids) و در سیستم طبقه‌بندی جهانی به‌صورت Amphialic Solonetz (Amphicutanic, Amphiloamic, Hypernatric, Ochric, Amphiraptic) نام‌گذاری می‌شود. در خاک‌رخ‌های ۱ و ۲ به‌دلیل سدیم بالا که منجر به پخشیدگی ذرات رس و انتقال آن از افق‌های رویین به زیرین گردیده است، شرایط برای تشکیل افق ناتریک مهیا شده است. سدیم از کاتیون‌های غالب در اقلیم‌های خشک می‌باشد (۲۹). خاک‌رخ ۲ در گورستان باستانی کنار صندل و بستر قدیم هلیل‌رود حفر شده است. عامل شوری و نسبت جذب سطحی سدیم بالا در لایه‌های سطحی، سبب تشکیل افق ناتریک می‌گردد. بنابراین وجود افق ناتریک و کمبیک سبب قرارگیری این خاک‌رخ در سطح زیرگروه تیپیک ناتراآرجیدز (Typic Natrargids) و به‌صورت Epihypersalic Epiabruptic (Solonetz (Epicutanic, Katoloamic, Epihypernatric) در سیستم طبقه‌بندی جهانی می‌شود.

1- Plain Polarized Light

2- Cross Polarized Light

جدول ۲- مقایسه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه
Table 2- Comparison of physical and chemical properties in studied pedons

ضخامت Thickness (cm)	افق Horizon	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	کلاس بافت ^۱ Textural class ¹	EC (dS/m)	pH	SAR (mmol L ⁻¹) ^{0.5}	گچ Gypsum (%)	کربنات کلسیم معادل CCE(%)
خاک‌رخ ۱ \ Pedon 1										
0-20	A	52	42	6	SL	5.8	7.2	13	1.1	14.5
20-40	C	90	6	4	S	5.9	7.7	8.8	0.05	7.7
40-80	2Btm	54	32	14	SL	22.4	8.6	61	2.1	11
80-100	2C	94	2	4	S	17.8	8.7	50	0.5	7.5
100-150	3Btm	40	36	24	L	21.6	8.7	58	3.2	14.7
150-175	3Bk1	54	42	4	SL	21.4	8.5	58	3.2	18.5
175-200	3Bk2	54	36	10	SL	18.5	8.2	46	3.2	18.2
200-230	3Bk3	54	38	8	SL	18.7	8.1	57	2.2	16
230-265	3Bky	50	42	8	L	17.3	8.1	46	5.2	15.7
خاک‌رخ ۲ \ Pedon 2										
0-30	Az	18	60	22	SiL	39.6	8.3	154	1.1	6.7
30-40	Btm	20	37	43	C	30.6	8.3	120	0	6.7
40-75	Bw1	26	40	34	CL	20.4	8.5	96	0	5.7
75-105	Bw2	26	46	28	L	10.1	8.7	79	0	11.2
105-135	Bw3	22	48	30	CL	4.2	9.2	33	0	10.2
135-180	Bw4	32	46	22	L	5.4	9.0	64	0	5.25
180-200	Bw5	32	46	22	L	6.5	8.7	75	0	12.5
200-230	Bw6	26	50	26	L	5.9	8.6	45	0	12.7
230-260	Bw7	28	48	24	L	7.2	8.2	41	0	11.5
خاک‌رخ ۳ \ Pedon 3										
0-20	A	56	24	20	SCL	1.2	7.4	1.3	0	3.5
20-55	Bw	56	32	12	SL	7.7	7.3	14	0	6.5
55-95	Bt1	24	40	36	CL	11.7	6.9	5.4	0	9.5
95-130	Bt2	18	40	42	C	8.9	7.0	6.7	0	12.2
130-165	Bt3	14	38	48	C	5	7.3	6.5	0	12.2
165-190	Btk	12	42	46	SiC	6.2	7.3	8.0	0	15.2
190-215	2Bw1	18	42	40	SiC	3.6	7.5	7.6	0	11.7
215-235	2Bw2	20	50	30	SiCL	2.7	7.5	5.7	0	12.5
235-260	2Bw3	26	42	32	CL	2.4	7.5	4.6	0	8.7
260-290	2Bk	20	48	32	CL	1	7.6	4.1	0	15.2
290-320	2Bw	24	48	28	CL	1	7.6	3.2	0	9.7

1. Textural classes: SL – sandy loam, S – sand, L – Loam, SiL – silt loam, C – clay, CL – clay loam, SCL – sandy clay loam, SiC – silty clay, SiCL – silty clay loam.

Endoabruptic (Paleargids) و در سیستم طبقه‌بندی جهانی Luvisols (Katocutanic, Anoloamic, Ochric) نامگذاری می‌شود.

میکرومورفولوژی خاک

در مطالعات میکرومورفولوژی خاک منطقه ذرات کلسیت، کانی‌های اکسیدی آهن‌دار، کوارتز، گچ، زیرکن و فلدسپار پلاژیوکلاز رؤیت شدند. به دیگر سخن، کلسیت، گچ، اکسیدهای آهن و پوشش‌های رسی از جمله عوارض خاکی مهم مشاهده شده در مطالعات میکرومورفولوژیکی در خاک‌های مورد مطالعه می‌باشند. مکان باستانی کنار صندل در قسمت پست دشت جیرفت و پایین دست ارتفاعات رابر و بافت قرار دارد. وجود گچ‌های عدسی شکل می‌تواند متأثر از انحلال سازندهای نئوژن بالادست و بالا بودن سطح

خاک‌رخ ۳ دارای افق آرجیلیک بوده و یک خاک قدیمی و چندتشکیلی^۱ محسوب می‌شود. این موضوع می‌تواند به دلیل وجود رطوبت قابل دسترس در اقلیم گذشته باشد. به عبارت دیگر، رطوبت قابل دسترس کافی در دوران گذشته، باعث خروج کربنات‌ها از افق‌های بالایی و به دنبال آن، انتقال رس و تشکیل افق آرجیلیک شده است. به طور کلی این خاک‌رخ دارای تنوع و خاک‌زایی است و دارای بافتی ریز و شوری و نسبت جذب سطحی سدیم پایین می‌باشد (۳۸ و ۳۹). بنابراین به دلیل مشاهده افق‌های کمبیک، آرجیلیک و کلسیک در سطح زیرگروه به صورت تیپیک پیل‌آرجیدز (Typic

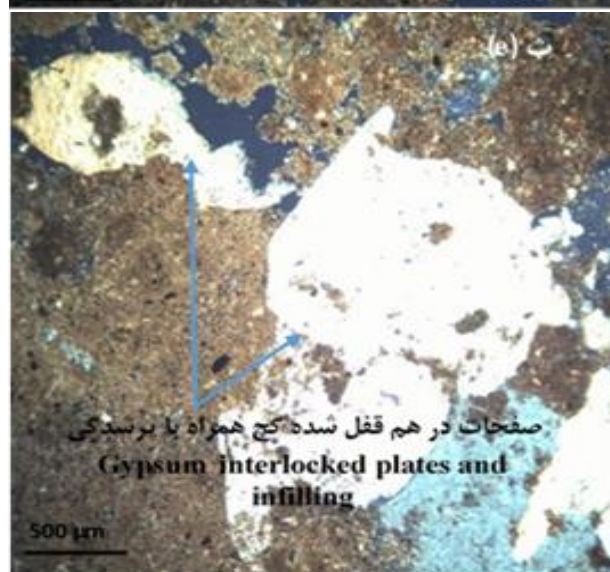
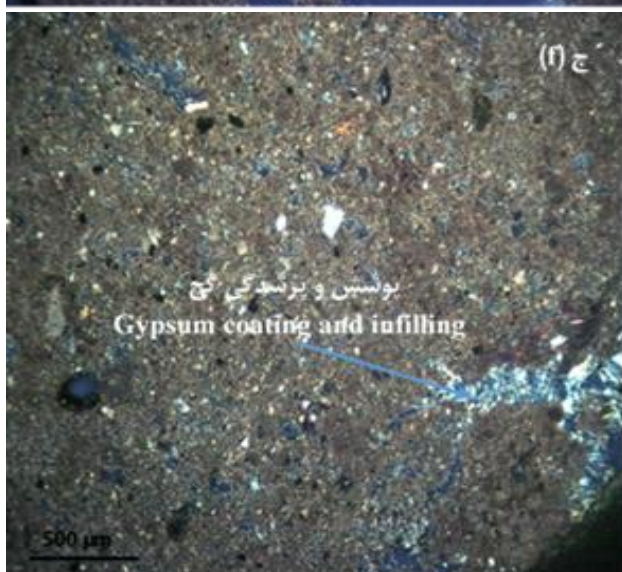
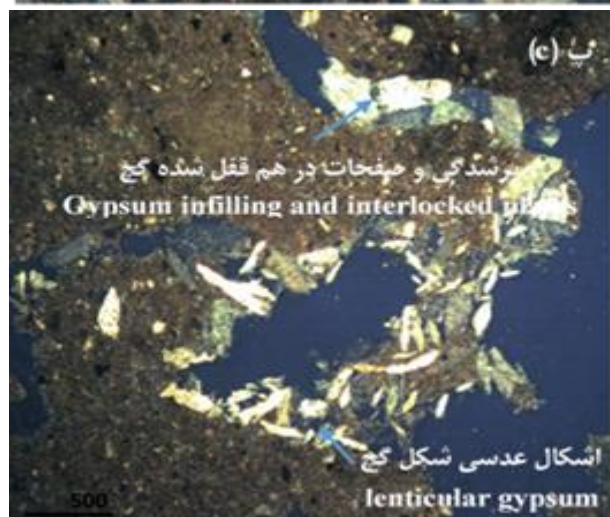
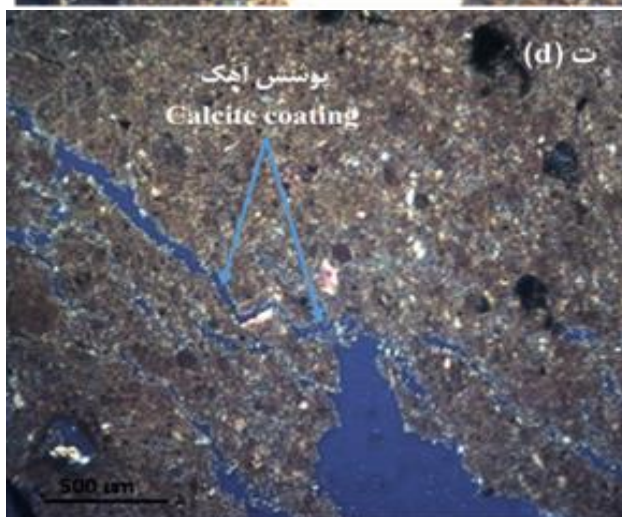
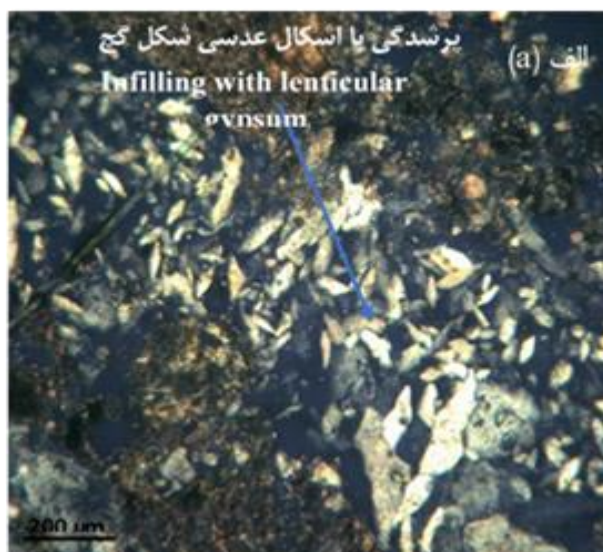
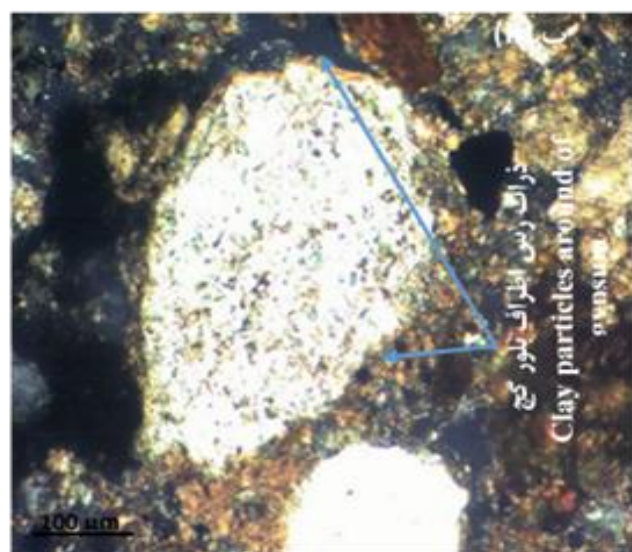
1- Polygenetic soil

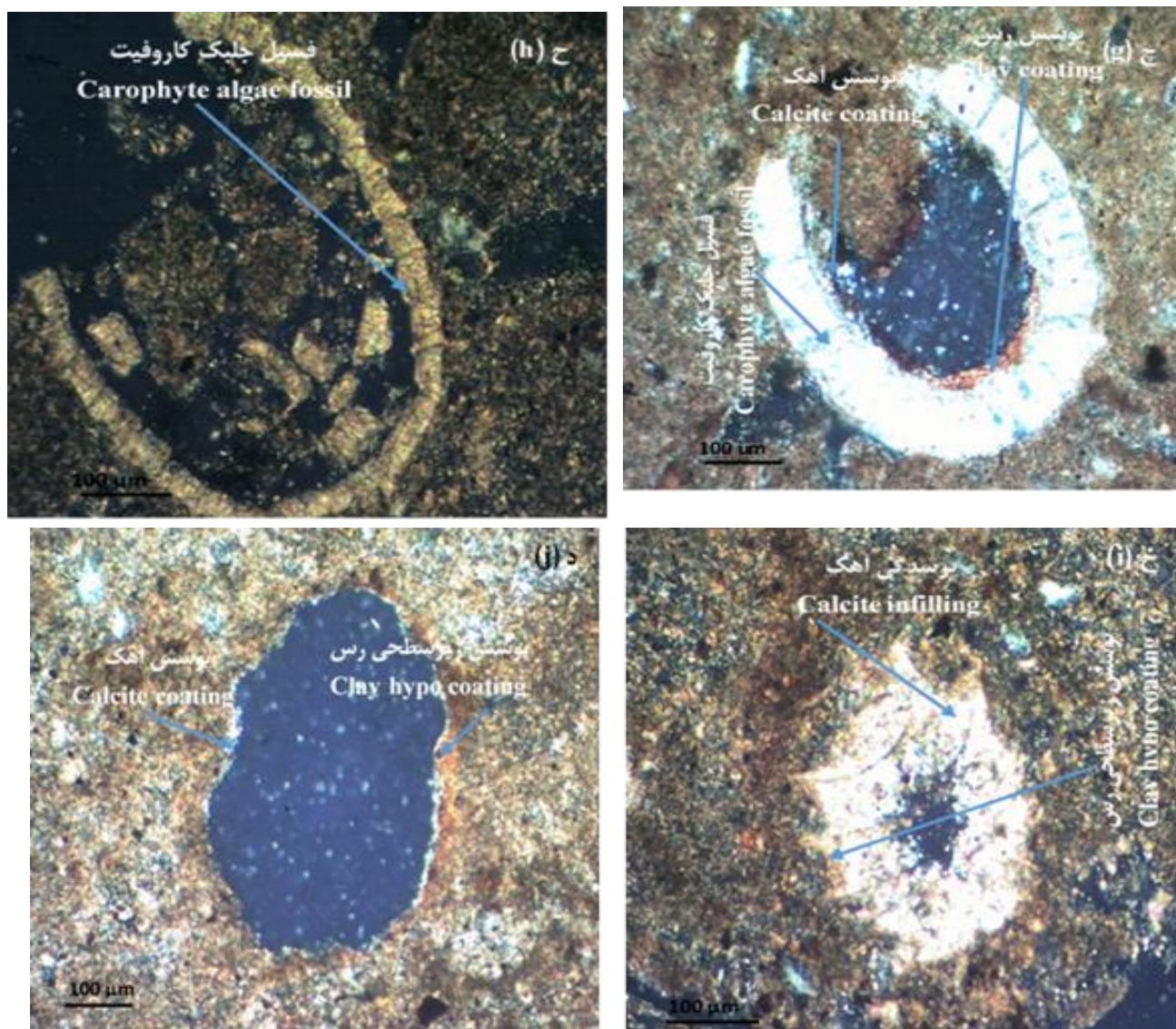
آب زیرزمینی در منطقه و در نهایت بروز خاصیت موبینگی و ظهور کانی‌های تبخیری مانند گچ باشد. به دلیل وجود سدیم بالا و بروز شرایط افق ناتریک در خاک‌های ۱ و ۲ گاهی رس به صورت پخشیده در اطراف حفرات قرار گرفته است؛ بنابراین مانع تشکیل پوشش قوی رس اطراف سطح حفرات می‌شود (۲۹). کلسیت، پرشدگی گچ و پوشش رس در قسمت حفرات خاک‌رخ ۱ مشاهده گردید. گچ در اشکال مختلف منظم عدسی شکل، صفحات درهم قفل شده و پرشدگی نیز در خاک‌رخ مذکور مشاهده شد (شکل ۲ قسمت الف، ب، پ، ت، ث). از سطح به عمق در میزان و اشکال گچ تفاوت چشم‌گیری رخ نداد. خامی و مرموت (۱۹۹۹) نیز اشکال فیبری شعاعی و صفحات درهم قفل شده گچ را در خاک‌های اصفهان مشاهده نمودند (۲۷). استوپس و پوچ (۱۹۹۴) با مطالعه اشکال میکرومورفولوژی گچ مرتبط با تکامل افق جیپسیک دریافتند که مراحل ابتدایی جیپسیفیکاسیون شامل تشکیل پوشش و در ادامه پرشدگی برخی منافذ با گچ بوده و در نهایت تجمع فشرده‌ای از بلورهای ریز و یا بلورهای درشت گچ در زمینه خاک مشاهده می‌گردد (۴۴). در خاک‌رخ ۲ گچ در میزان کم به صورت اشکال عدسی شکل وجود داشت (شکل ۲ قسمت ج). این موضوع می‌تواند به دلیل قرار گرفتن خاک‌رخ در بستر قدیم هلیل‌رود باشد. بنابراین خاک‌رخ ۲ به دلیل تأثیرپذیری طولانی مدت از هلیل‌رود، در شرایط ناپایداری و عدم تکامل نسبت به خاک‌رخ ۱ قرار گرفته است و این موضوع، سبب جلوگیری از تجمع رس و گچ قابل توجه در این قسمت شده است. بلورهای گچ عدسی شکل و نامنظم، تکامل خیلی ضعیفی که به علت بارندگی کم، تبخیر زیاد و زیادی نمک است را نشان می‌دهند (۱). ناخالصی‌هایی نظیر مقادیر زیاد کلرورسدیم به عنوان یکی از شرایط تشکیل گچ عدسی شکل محسوب می‌شود (۱۶). با توجه به شوری نسبتاً بالای خاک‌رخ‌های ۱ و ۲، وجود اشکال عدسی شکل گچ در مشاهدات توجیه می‌شود (جدول ۲). پرشدگی‌های گچ به صورت ناقص و کامل از عوارض مشاهده شده است که مربوط به آبشویی گچ ثانویه است. بسیاری از پژوهشگران دریافتند که پرشدگی‌های نمکی فضای داخل منافذ کانالی و وگی^۱ را به صورت جزئی یا کامل پر کرده‌اند و مورفولوژی و اندازه آنها تابع شکل و اندازه منافذ میزبان می‌باشد. به نظر می‌رسد که تبخیر و رسوب تدریجی نمک در این منافذ منجر به تشکیل این شکل تجمعات گردیده است (۱).

مشاهدات صحرایی و تجزیه‌های آزمایشگاهی در خاک‌رخ ۳ وجود گچ به طور مشخص را نشان نداد. در برخی از مطالعات، تفاوت شکل گچ مرتبط با تفاوت سطوح ژئومورفیک دانسته شده است (۴۶، ۲۱ و ۱۲). خاک‌رخ ۳ در منطقه باستانی دقیانوس و بر روی سطح پایدار پدیمت پوشیده از لحاظ ژئومورفیک حفر گردید؛ در حالی که

خاک‌رخ‌های کنارصندل در سطح ناپایدار حد واسط دشت آبرفتی و پدیمت قرار دارند (۳۸). پایداری این سطح دلیل تکامل بیشتر خاک و تشکیل افق آرجیلیک قوی می‌باشد که مطالعات میکرومورفولوژیکی مؤید آن است. بررسی مقاطع نازک نیز عدم وجود اشکال مختلف گچ را تأیید کرد؛ در حالی که پوشش رس و کلسیت و پرشدگی‌های کلسیت از عوارض میکرومورفولوژیکی مشخص خاک‌رخ مذکور می‌باشند (شکل ۲ قسمت خ، د). توالی مشاهده شده از پوشش رس و کلسیت می‌تواند به دلیل وجود دوره ترسالی و در نتیجه شسته شدن و تجمع رس در قسمت درونی حفرات و تجمع پوشش کلسیت بر روی پوشش رس به دنبال بروز دوره خشکسالی باشد. باتوجه به منشأ غیرتجمعی رس مشاهداتی در شکل ۲ قسمت د، تناوب دوره‌های ترسالی و خشکسالی را نمی‌توان نتیجه گرفت (شکل ۲ قسمت چ، د). خاک‌های قدیم عموماً دارای پدیده‌های میکرومورفولوژیک هستند که به نظر می‌رسد منشأ پدوژنیک داشته باشند. از مهمترین آنها می‌توان به پوشش رس اشاره کرد (۲۴). گایل و گروسمن (۱۹۶۸) و ریتالاک (۲۰۰۱) اعتقاد دارند حضور افق‌های آرجیلیک پیشرفته با پوسته‌های رسی قوی در خاک‌های مناطق خشک، وجود دوره‌های مرطوب‌تر را برای دوران گذشته این مناطق تداعی می‌کند (۱۷ و ۳۶). یکی از شواهد میکرومورفولوژی موجود در خاک‌های قدیمی مناطق خشک و نیمه‌خشک، پوشش‌های رسی روی خاکدانه‌ها و بعضاً روی ذرات شن و ذرات اولیه می‌باشد که به عنوان ابزاری مهم برای تفسیر شرایط اکولوژیکی گذشته قابل استفاده است (۲۵ و ۴۵). خرمالی و همکاران (۲۰۰۶) در بررسی پدیده رسوب اشکال مختلف کربنات کلسیم در خاک‌های آهکی جنوب ایران نتیجه گرفتند که رطوبت قابل دسترس خاک، بافت و دمای خاک، پوشش گیاهی و قابلیت دسترسی منبع کربنات کلسیم مهمترین عوامل کنترل کننده نوع و مورفولوژی عوارض کلسیتی می‌باشند. به عنوان مثال، اندازه پوشش‌ها و ندول‌های کلسیت با افزایش رطوبت از رژیم آریدیک به زیرک افزایش یافته و دوباره به سمت رژیم یوستیک کاهش می‌یابد (۳۰). بنابراین عدم مشاهده اشکال متنوع کلسیت در خاک‌های مورد مطالعه می‌تواند به دلیل مهیا نبودن شرایط مناسب تشکیل دهنده عوارض کلسیتی باشد.

هم‌چنین در بررسی میکرومورفولوژی مقاطع نازک خاک‌رخ ۳ فسیل جلبک کاروفیت مشاهده شد (شکل ۲ قسمت چ، ح). این جلبک که در محیط لب شور زندگی می‌کند از اوائل دونین تا عهد حاضر بر جای مانده است (۱۴، ۱۵ و ۴۲). محل زندگی این فسیل آب‌های کم عمق می‌باشد (۱۴ و ۱۵)، بنابراین احتمالاً این منطقه در دوران خاصی در احاطه آب‌های کم عمق و شیرین قرار داشته است. مشاهده این فسیل می‌تواند متأثر از رسوبات بالادست منطقه نیز باشد. با توجه به سالم بودن فسیل می‌توان عمر آن را به دوران کواترنری و دوره پلیستوسن نسبت داد. این موضوع می‌تواند با پایداری سطح ژئومورفیک منطقه و قدمت بالای خاک مذکور در ارتباط باشد.





شکل ۲- مقایسه نتایج تصاویر میکرومورفولوژی در حالت نور متقاطع

الف: خاک رخ ۱، افق 2Bt; ب: خاک رخ ۱، افق 3Bt; پ: خاک رخ ۱، افق 3Bk1; ت، ث: خاک رخ ۱، افق 3Bky; ج: خاک رخ ۲، افق Az; چ: خاک رخ ۳، افق Bt1; ح، خ، د: خاک رخ ۳، افق Btk

Figure 2- Comparison of micromorphology images (XPL)

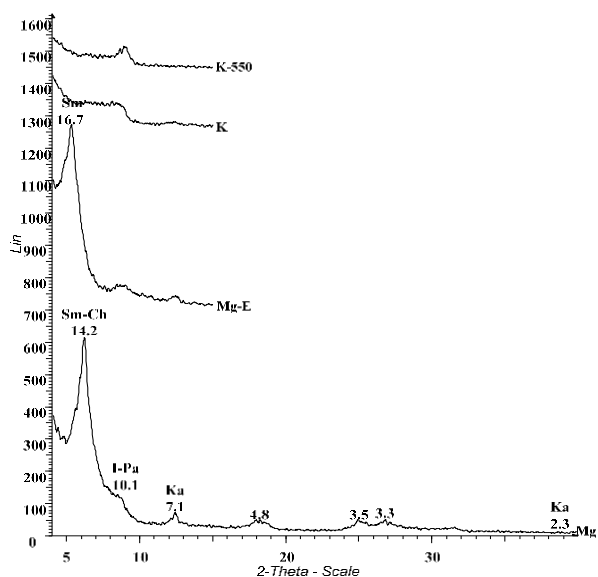
a: Pedon 1, horizon 2Bt; b: Pedon 1, horizon 3Bt; c: Pedon 1, horizon 3Bk1; d and e: Pedon 1, horizon 3Bky; f: Pedon 2, horizon Az; g: Pedon 3, horizon Bt1; h, i and j: Pedon 3, horizon Btk.

نیز اقلیم منطقه دارد. تشکیل پالی گورسکیت به صورت خاکساز از تغییر شکل کانی‌های ۲:۱ و یا نوتشکلی در مطالعات متعددی گزارش شده است. این کانی برای اولین بار در رسوبات و خاک‌های ایران توسط هندرسون و رابرتسون (۱۹۵۸) و برنت و همکاران (۱۹۷۲) گزارش شد (۲۰، ۸). هر دو منشأ خاکساز و به ارث رسیده پالی گورسکیت در خاک‌های ایران مرکزی توسط خادمی و مرموت (۱۹۹۸) و فرپور و همکاران (۲۰۰۲) گزارش شده است (۲۶ و ۱۳).

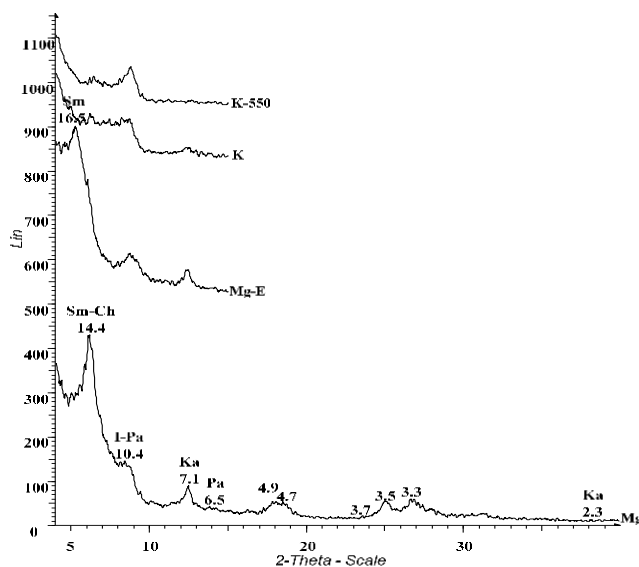
کانی‌شناسی رس خاک

نوع کانی‌های موجود در خاک اغلب بیانگر مرحله هوادیدگی خاک می‌باشند. در بررسی کانی‌شناسی منطقه، با توجه به پیک‌های چهار تیمار منیزیم، منیزیم و اتیلن گلیکول، پتاسیم در دمای معمولی و پتاسیم در حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس وجود کانی‌های رسی کائولینیت، ایلیت، کلریت، اسمکتیت و پالی گورسکیت تأیید شد (۲ و ۳۸).

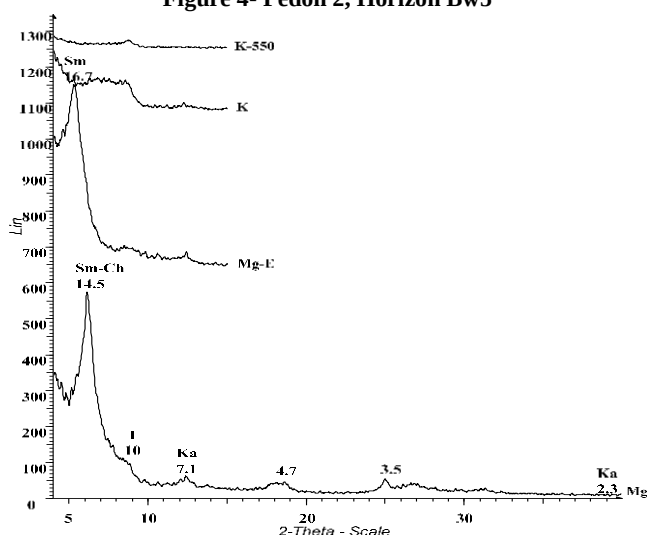
وجود پالی گورسکیت در خاک وابستگی زیادی به مواد مادری و



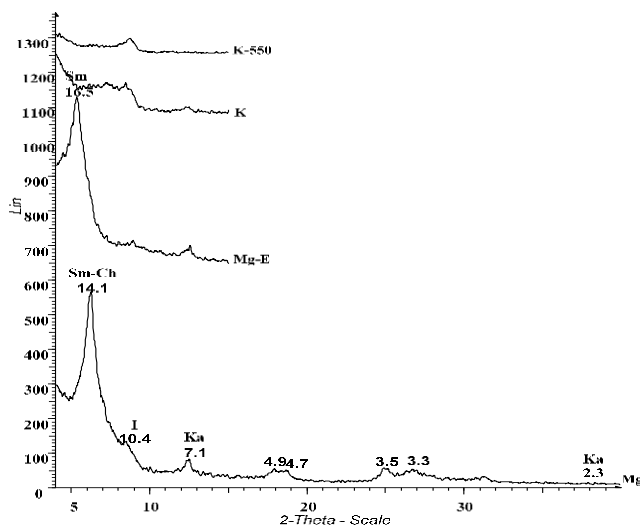
شکل ۴- خاکرخ ۲ افق Bw5
Figure 4- Pedon 2, Horizon Bw5



شکل ۳- خاکرخ ۲ افق Az
Figure 3- Pedon 2, Horizon Az



شکل ۶- خاکرخ ۳ افق 2Bk
Figure 6- Pedon 3, Horizon 2Bk



شکل ۵- خاکرخ ۳ افق Bt2
Figure 5- Pedon 3, Horizon Bt2

(Mg: اشباع با منیزیم، Mg-E: اشباع با منیزیم و اتیلن گلیکول، K: اشباع با پتاسیم، K-550: اشباع با پتاسیم در حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس).

Sm: اسمکتیت، I: ایلیت، Ka: کائولینیت، Pa: پالی گورسکیت، Ch: کلریت)

(Mg: Mg saturated, Mg-E: Mg saturated treated by Ethylene glycol, K: K saturated, K-550: K saturated heated to 550 °C.

Sm: Smectite, I: Illite, K: Kaolinite, Pa: Palygorskite, Ch: Chlorite)

در رطوبت بالا ناپایدار است و به کانی اسمکتیت تبدیل می‌شود (۳۹) (اشکال ۳ تا ۶). منشاء کانی‌های کلریت و ایلیت (کانی‌های میکایی) مواد مادری خاک می‌باشد (۳۹)؛ اگرچه شواهدی مبنی بر تشکیل پدوژنیک میکا در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز گزارش شده است بدین صورت که این امکان وجود دارد که میکا در شرایط خاصی به‌واسطه تثبیت پتاسیم در لایه‌های اسمکتیت نیز حاصل شود (۷).

وجود گچ، آب زیرزمینی شور و قلیا، کلریت^۱ و کالچ^۲ می‌تواند شرایط مناسب را برای نوتشکیلی پالی گورسکیت از محلول خاک فراهم نماید (۳۹). با توجه به وجود شرایط اقلیمی مرطوب‌تر گذشته، کانی پالی گورسکیت در خاکرخ باستانی دقیانوس مشاهده نگردید، زیرا این کانی

- 1- Calcrete
- 2- Caliche

جدول ۳- فراوانی نسبی کانی‌ها در افق‌های مورد مطالعه بر پایه XRD

Table 3- Relative abundance of minerals within horizons based on X-ray diffraction							
ضخامت	افق	کائولینیت	پالی‌گورسکیت	ایلیت	کلریت	اسمکتیت	سایر
Thickness	Horizon	Kaolinite	Palygorskite	Illite	Chlorite	Smectite	Other
0-30	Az	+	++	++	+++	++++	++
180-200	Bw5	+	+	+	+++	+++	++++
95-130	Bt2	+	-	++	++++	+++	++
260-290	2Bk	+	-	+	++++	+++	+++
+++++ >50%		++++ (30-50)%		+++ (20-30)%		++ (10-20)%	
						+ <10%	

اما نتایج آنالیزهای آزمایشگاهی و میکرومورفولوژی، تکامل ضعیف در خاک‌رخ‌های کنارصندل و تکامل قوی‌تر در منطقه باستانی دقیانوس را نشان می‌دهد. این موضوع با توجه به قرارگیری خاک‌رخ‌های ۱ و ۲ در سطح ناپایدار حدواسط دشت ابرفتی و پدیمت و خاک‌رخ ۳ در سطح پایدار پدیمت پوشیده نیز تأیید می‌گردد. وجود سطح پایدار، امکان تجمع پوشش‌های قوی رس و کلسیت در اطراف حفرات و تشکیل افق‌های آرجیلیک و کلسیک که نشان‌گر تکامل بالاتر می‌باشند را فراهم کرده است. خاک‌رخ حفرشده در بستر قدیم رودخانه هلیل‌رود، دارای شوری و نسبت جذب سطحی سدیم نسبتاً بالا در مقایسه با سایر خاک‌رخ‌ها می‌باشد. مطالعات باستان‌شناسی قدمت تاریخی بالاتر منطقه باستانی کنارصندل را نسبت به دقیانوس اثبات می‌کند. انسان در هزاره سوم قبل از میلاد در منطقه باستانی کنار صندل؛ که دارای شرایط اقلیمی، اقتصادی و فرهنگی بسیار مناسب نسبت به مناطق اطراف خود برخوردار بوده، زندگی می‌کرده است. سپس با توجه به شواهد باستان‌شناسی و تاریخی، زندگی و حیات از بخش کنارصندل به منطقه باستانی دقیانوس منتقل می‌شود؛ این موضوع می‌تواند تا حدی به قرارگیری منطقه باستانی دقیانوس در سطح پایدارتر و مهیاتر بودن شرایط زندگی و تزلزل شرایط معیشتی و زیست محیطی در کنار صندل ارتباط داشته باشد. برای دستیابی به نتایج بهتر در تعیین قدمت و شرایط اقلیمی گذشته در منطقه، انجام آنالیزهای ایزوتوپی مثل کربن، اکسیژن و نیتروژن در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

اسمکتیت موجود در خاک‌های مناطق خشک می‌تواند منشاء ارثی از مواد مادری داشته و یا حاصل فرایندهای خاکسازي باشد. کانی اسمکتیت در خاک‌های منطقه به‌صورت پدوژنیک توسط سنجرى و همکاران (۳۹) نیز گزارش شده است. به نظر می‌رسد که کانی‌های کلریت، ایلیت و کائولینیت مشاهده شده در منطقه مورد مطالعه از مواد مادری به ارث رسیده‌اند (۳۹).

براساس فراوانی نسبی کانی‌های افق‌های مورد مطالعه، با توجه به منشأ پدوژنیک اسمکتیت شدت پیک کانی مزبور در افق‌های مختلف افزایش یافته است. به دلیل وجود مقادیر کم کائولینیت و ایلیت می‌توان گفت کانی‌های موجود در این خاک‌ها از مواد مادری به ارث رسیده است (جدول ۳).

نتیجه‌گیری

با توجه به اقلیم خشک فعلی، وجود افق آرجیلیک در خاک‌رخ ۳ و مشاهده پوشش رس قوی در سطوح حفرات می‌تواند وجود اقلیمی با رطوبت قابل دسترس بیشتر از زمان کنونی برای تأمین شرایط تجمع و آبشویی رس در زمان تشکیل خاک‌های قدیمی منطقه باستانی دقیانوس را اثبات کند. نتایج حاصل نشان‌گر چندتشکیلی بودن خاک‌رخ مذکور می‌باشد. پالی‌گورسکیت، ایلیت، کلریت، کائولینیت و اسمکتیت مشاهده شده در منطقه، کانی‌های رسی اصلی خاک‌ها و رسوبات موجود در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشند. البته عدم مشاهده کانی پالی‌گورسکیت در خاک‌رخ باستانی دقیانوس باتوجه به اثبات اقلیم مرطوب‌تر حاکم بر گذشته منطقه، منطقی به نظر می‌رسد.

منابع

- 1- Abbaslou H., and Abtahi A. 2009. Mineralogy and micromorphology investigation of soils on calcareous, gypsiferous and saline material in Bakhtegan Lake margin, Fars Province. Proceedings of the 11th Iranian Soil Science Congress. Gorgan, Iran, pp. 456-457. (In Persian with English abstract)
- 2- Afra S., Broumand N., Farpour M.H., and Sanjari S. 2016. Study of physical and chemical properties of past soils in Jiroft area. 2th national conference of constant management of soil and environmental resources. (In Persian)
- 3- Amir Hajluo S. 2014. Explanation of role of ecological variables in life of Islamic city of Jiroft. Archaeological researches of Iran. 4: 7. (In Persian with English abstract)
- 4- Angelucci D. 2003. Geo archaeology and micromorphology of Abric de la Cativera (Catalonia, Spain). Catena 54:

- 573-601.
- 5- Banaie M.H. 2003. Temperature and moisture regimes maps in Iran soils. Agricultural researches and educational organization. Soil and water research institute. (In Persian)
- 6- Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agron. Journal* 54: 464-465.
- 7- Bronger A., Ensling J., Gutlich P., and Spiering H. 1988. Rubification of terra rossa in Slovakia: A Mosbaaer effect study, *Clays and Clay Minerals* 3: 269-275.
- 8- Burnet A.D., Fookes P.G., and Robertson R.H. 1972. An engineering soil at Kermanshah, Zagros mountains, Iran. *Clay Miner* 9: 329-343.
- 9- Choobak H. 2012. Crockery from the Islamic period-old city of Jiroft. *Journal of Archaeological Studies* 4(1): 83-112. (In Persian with English abstract)
- 10- Doran J.W. 2002. Soil mineralogy with environmental applications. Soil science of Ameriva, Inc. 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711 USA.
- 11- Farpoor M.H. 2010. Soil data comparison in the old vs. Restored sections of the Bam citadel archeological site in Kerman, Iran. *J. Agr. Sci. Tech.* 12: 91-98.
- 12- Farpoor M.H., Khademi H., Eghbal M.K., and Krouse H.R. 2004. Mode of gypsum deposition in southeastern Iranian soils as revealed by isotopic composition of crystallization water, Iran. *Geoderma* 121: 233-242.
- 13- Farpoor M.H., Khademi H., and Eghbal M.K. 2002. Genesis and distribution of palygorskite and associated clay minerals in Rafsanjan soils on different geomorphic surface. *Iran agric. Res.* 21: 39-60.
- 14- Ghahraman A. 1997 (a). Basic botany. Volume 2. Anatomy and morphology of reproductive organs and their function in large groups from plants of world. Classification, effect and role of plants in the environment from study of plants covers. Tehran university press (2229). 539 pages. (In Persian)
- 15- Ghahraman A. 1997 (b). Basic botany. Volume 2. Anatomy and morphology of reproductive organs and their function in large groups from plants of world. Classification, effect and role of plants in the environment from Study of plants covers. Tehran university press (2229). 492 Pages. b. (In Persian)
- 16- Ghergherechi S.H., Khormali F., Mahmoodi S., and Ayoubi S. 2009. Micromorphology of argillic horizon development in loess derived soils of humid and sub humid regions of Golestan province, Iran. *Journal of Soil and Water Research* 40: 130-138. (In Persian with English abstract)
- 17- Gile L.H., and Grossman R.B. 1968. Morphology of the argillic horizon in desert soils of southern New Mexico. *Soil Sci.* 106: 6-15.
- 18- Hadian Dehkordi M. 2016. Soil science studies in historical and archaeological raw bricks of different areas in Iran. *Science, Technology, Art Journal* 75: 86-96. (In Persian with English abstract)
- 19- Helmke P.A., and Sparks D.L. 1996. Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. p. 551-574. In D. L. Sparks et al. (ed.) *Method of Soil Analysis. Part 3.* 3th ed. American society of agronomy. Madison, WI.
- 20- Henderson S.G., and Robertson R.H. 1958. A mineralogical reconnaissance in western Iran. *Resource use* 1td, Glasgow, UK.
- 21- Herrero J., and Porta J. 2000. The terminology and the concepts of gypsum-rich soils. *Geoderma* 96: 47-61.
- 22- Holliday V.T. 1992. Soil formation, time and archaeology. *Soils in archaeology: landscape evolution and human occupation*, Smithsonian institution press, Washington, DC. Pp 101-117.
- 23- Jackson M.L. 1975. Soil chemical analysis-advanced course. University of Wisconsin college of agriculture, Department of soil science, Madison, WI.
- 24- Kemp R.A. 1998. Role of micromorphology in paleo ecological research *Quaternary inter.* 51/52: 133-141.
- 25- Kemp R.A. 1999. Soil micromorphology as a technique for reconstructing paleo environmental change. Pp: 41-71. In: Singh Vi A. S and Derbyshire (Eds). *Paleo environmental reconstruction in arid lands.* Balkema pub. Netherlands.
- 26- Khademi H., and Mermut A.R. 1998. Source of palygorskite gypsiferous aridisols and associated sediments from central Iran. *Clay Minerals* 33: 561-578.
- 27- Khademi H., and Mermut A.R. 1999. Submicroscopy and stable isotope geochemistry of carbonates and associated palygorskite in Iranian Aridisols. *European journal of soil science* 50(2): 207-216.
- 28- Khodabakhshi S., Karimian Eghbal M., and Hajbari Nobari A.R. 2012. Micromorphological investigation of iron age cemetery in Kabood mosque archaeological site Tabriz, Iran. Thesis for the degree of master of science. University of Tabriz. (In Persian with English abstract)
- 29- Khormali F., Abtahi A., Mahmoodi S., and Stoops G. 2003. Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semi-arid regions of southern Iran. *Catena* 53, 273-301.
- 30- Khormali F., Abtahi A., and Stoops G. 2006. Micromorphology of calcitic features in highly calcareous soils of Fars Province, Southern Iran. *Geoderma* 132, 31-46.
- 31- Kittrik J.A., and Hope E.W. 1963. A procedure for the particle size separation of soil for X-ray diffraction analysis. *Soil Sci. Soc.* 96: 312-325.
- 32- Lanyon L.E., and Heald W.R. 1982. Magnesium, Calcium, Strontion and Barium. P. 247-260. In: A. L. Page et

- al.(ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part II. 2nd ed., Agron. Monogar. No:9. ASA and SSSA. Madison, WI. Page
- 33- Moriarty D. 2004. Settlement archaeology at Motul de San Jose, Peten, Guatemala. Preliminary results from the 1998-2003 seasons. *Mayab* 17. Pp. 21-44.
- 34- Nelson R.E. 1982. Carbonate and Gypsum. P. 181-196. In: A. L. Page et al.(ed), *Methods of Soil Analysis*. Part II. 2nd ed., American society of agronomy. No: 9. ASA and SSSA. Madison, WI.
- 35- Nettleton W.D., Brasher B.R., Benham E.C., and Ahrens R.J. 1998. A classification system for buried paleosols. *Quaternary international* 5 1/52. 175-183.
- 36- Retallack G.J. 2001. *Soils of the past. An introduction to paleo pedology*. Unwin Hyman Pub. Boston. 404 pp.
- 37- Sahandi M.R. 1991. Geology map, 1:250000 from Kerman, Geological survey of Iran.
- 38- Sanjari S., Farpour M.H., Esfandiarpour I., and Karimian Eghbal M. 2010. Evaluation evidences from micromorphological of past soils in Jiroft area. 2Th comprehensive conference of management of water resources. Shahid Bahonar university of Kerman. (In Persian)
- 39- Sanjari S., Farpour M.H., Esfandiarpour I., and Karimian M. 2011. Micromorphology and clay mineralogy comparison of past and present soils in Jiroft area. *Journal of Water and Soil Science* 15(58): 173-185. (In Persian with English abstract)
- 40- Soil survey staff. 2014. *Keys to soil taxonomy*. USDA. NRCS.
- 41- Sordoillet D. 2007. Anthropic sediments from neolithic to iron age settlements: interpretation according to micromorphological, archaeological and archaeological data. In proceedings of the 2nd international conference on soils and archaeology. Edited by: Boschian, G. pp. 165-171.
- 42- Stewart M., and Rothwel G.W. 1993. *Paleobotany and the evolution of plants*. Cambridge university press. 512p.
- 43- Stoops G. 2003. *Guideline for the analysis and description of soil and regolith thin sections*. SSSA, Madison, WI. 182p.
- 44- Stoops G., and Poch R.M. 1994. Micromorphological classification of gypsiferous soil materials. In Ringrose-Voase, A.J. & Humphreys, G.S. (eds.), *Soil micromorphology: studies in management and genesis*. Developments in soil science, Volume 22. Elsevier, Amsterdam, 327-332.
- 45- Thompson M.L. 1986. Morphology and mineralogy of pre-Wisconsinan paleosol in Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 981-987.
- 46- Toomanian N., Jalalian A., and Eghbal M.K. 2001. Genesis of gypsum enriched soils in north-west Isfahan, Iran. *Geoderma* 99: 199-224.



Genesis and Evolution of Exhumed Soils in Konarsandal and Daqyanous Archaeological Sites, Jiroft Area, Kerman Province

E. Soleimani Sardoo¹ - M.H. Farpoor^{2*}

Received: 11-11-2019

Accepted: 28-01-2020

Introduction: Several archaeologists believe that there is a relationship between cultural residuals, human beings, and soil. Soil related factors such as age index, climate change, and paleoclimate are important in archaeology. Soils could be accounted as records of invaluable information. Appropriate compiling of these data cause better understanding of soil and landscape genesis, and human activities in the past. There are two distinguished archeological sites of Daqyanous (Islamic Era) and Konarsandal (before Islamic Era) in Jiroft area. Besides, Konarsandal site is surrounded by old and new Halilrood channels. Since no data about the comparison of soil evolution in the mentioned archeological sites were available, the present research was conducted to compare soil evolution of archaeological sites using soil classification, clay mineralogy, and micromorphology in Jiroft area.

Materials and Methods: soil samples were collected from three different archaeological sites including new channel of Halilrood (pedon 1), old channel of Halilrood (pedon 2) and, Daqyanous (pedon 3). The samples were air-dried and sieved (2 mm). Routine soil physical and chemical analyses including pH, EC, soil textural class, soluble sodium, calcium, and magnesium, and gypsum and calcite contents were performed. The studied pedons were classified using Soil Taxonomy system according to morphology, laboratorial results, and field observations. The clay minerals were determined by X-ray diffraction (XRD) method after carbonates, organic matter, and Fe were removed using Jakson (1965) and Kittrik and Hope (1963) procedures. Ten undisturbed samples were selected for micromorphology studies and thin section preparation.

Results and Discussion: Pedon 1 is affected by Halilrood River sediments, that is why an old soil together with a young soil was formed. Salinity and SAR in the old soil were higher than the upper young soil. A textural discontinuity was found between the old and the young soils. Natric, calcic, and gypsic horizons were found in pedon 1 and caused a Typic Natrargid to be formed in new Halilrood channel. Natric horizon due to high Na cation was formed in pedons 1 and 2. On the other hand, salic, natric, and cambic horizons formed a Typic Haplosalid in pedon 2 (old Halilrood channel). High salinity and SAR in the upper layers caused salic and natric horizons to be formed. Pedon 3 with argillic horizon is an old polygenetic soil. Available humidity in the past caused removal of carbonates from upper layers that followed by clay illuviation and argillic horizon formation. Salinity and SAR in this soil were low and a heavy texture was found in pedon 3. Since pedon 3 showed cambic, argillic, and calcic horizons, it was classified as Arenic Haplargids. Calcium carbonate, gypsum, Fe oxides, and clay coatings were among dominant micromorphological features observed in the studied pedons. Konarsandal archeological site is located in the lowlands of Jiroft plain downward Rabor and Baft elevations. Lenticular gypsum crystals could be attributed to the solution of upward Neogene formations and groundwater close to the surface which evaporates due to capillary. Powdery calcite, Fe-oxides, and clay coating and infilling of gypsum in pore spaces of pedon 1 were observed by micromorphological investigations. Diffused clay coating around pore spaces is explainable by high sodium content and Natric horizon formation. Lenticular, interlocked plates, and infillings of gypsum were observed in pedon 1. However, gypsum with irregular shapes and low content was investigated in pedon 2. This is due to location of this pedon in Halilrood old channel. That is why pedon 2 affected by Halilrood during long periods of time is unstable and shows less evolution compared to pedon 1. Irregular and lenticular forms of gypsum show weak soil development due to low rainfall, high evaporation, and excess salt. High NaCl is reported as a requirement for lenticular gypsum formation. This form of gypsum is supported by high salinity in pedons 1 and 2. High Na and natric horizon formation in pedons 1 and 2 caused dispersion of clay and ceased formation of clay films around pore spaces. Gypsum was not found in pedon 3

1 and 2- Ph.D. Student and Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: farpoor@uk.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.84143

during field and laboratory studies. Besides, gypsum was not observed by micromorphological observations. Clay and calcite coatings and calcite infillings were among the micromorphological features observed in pedon 3. Calcite coating on clay coating in this pedon could be attributed to the climate with more available humidity in the past followed by an arid climate. Carophyte algae fossil was only observed in pedon 3. Kaolinite, illite, chlorite, smectite, and palygorskite clay minerals were determined by X-ray diffraction. Palygorskite is highly related to the parent material and climate. Pedogenic palygorskite formation from transformation of 2:1 clay minerals and/or neoformation is reported by several studies.

Due to the impact of paleoclimate with more available humidity, palygorskite was not found in Daqyanous archeological site. It seems that higher humidity in the past did not allow palygorskite formation or transformed it into smectite. Chlorite and illite are originated from parent material. Evidences of pedogenic mica minerals in arid and semi-arid environments were also found which is due to K fixation among smectite layers. Smectite with pedogenic origin is also reported by Sanjari et al. (29) in the study area. Chlorite, illite, and kaolinite clay minerals seem to be originated from parent material in the present study.

Conclusion: Laboratories analyses and micromorphology observations clearly showed weak development in Konarsandal pedons compared to high evolution of soils in Daghyanus archaeological site. The same results were also found for unstable surfaces of pedons 1 and 2 compared to stable surface of pedon 3. The stable surface provided the accumulation of clay and calcite coatings around the cavities and the formation of argillic and calcic horizons indicating high soil development. Results of the study showed polygenetic formation in soils. Soils in old Halilrood channel show high salinity and Na adsorption ratio compared to other two pedons under study.

Keywords: Archaeology, Argillic, Classification, Halilrood, Micromorphology

اثر تغییرات اقلیمی بر رواناب و تبخیر و تعرق حوزه آبخیز مهرگرد

زهرا نوری^۱ - علی طالبی^{۲*} - بابک ابراهیمی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۲

چکیده

تغییر اقلیم اثرات قابل توجهی بر چرخه آبی دارد، به گونه‌ای که می‌تواند تهدیدی بزرگ برای سامانه‌های آبی در جهان قلمداد شود. هدف از این مطالعه بررسی اثر احتمالی تغییر متغیرهای اقلیمی بر رواناب و تبخیر و تعرق حوزه آبخیز مهرگرد است. برای این منظور با استفاده از مدل SDSM5.2 و سناریوی RCP8.5 خروجی مدل تغییر اقلیم CanESM2 ریزمقیاس‌نمایی و برای دوره ۲۰۱۷ تا ۲۰۳۰ شبیه‌سازی شد. از داده‌های روزانه حداقل و حداکثر دما در ایستگاه بروجن و بارش ایستگاه تنگ زردآلو برای دوره پایه ۱۹۸۴-۲۰۰۵ به عنوان ورودی‌های مدل اقلیمی استفاده شد. همچنین برای شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی حوزه آبخیز از مدل SWAT2012 استفاده شد. عملیات واسنجی برای دوره ۲۰۱۲-۲۰۰۴ و اعتبارسنجی برای دوره ۲۰۱۶-۲۰۱۳ با استفاده از الگوریتم SUFI-2 انجام شد. نتایج حاصل از ارزیابی مدل SDSM5.2 براساس معیارهای آماری NS ، R^2 و $RMSE$ نشان داد که مدل در شبیه‌سازی متغیر دما نسبت به بارش از دقت بالاتری برخوردار بوده است. بر این اساس برای آینده کاهش ۵۳/۴۸ درصدی بارش و افزایش ۰/۸۴ و ۳/۹۹ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای حداقل و حداکثر دما پیش‌بینی شد. ضریب نش-ساتکلیف و ضریب تعیین برای رواناب در مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۷۳ و برای مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۵۸ و ۰/۷۱ به دست آمدند. همچنین تغییر اقلیم باعث کاهش ۲۳/۸۲ درصدی رواناب، کاهش ۲۶/۰۳ درصدی تبخیر و تعرق واقعی و افزایش ۱۰/۲۰ درصدی تبخیر و تعرق پتانسیل خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: بیان آب، تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی، سناریوهای اقلیمی، مدل SWAT

مقدمه

انتقال و رطوبت خاک، رواناب بر چرخه هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارد (۳۳). استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی همراه با مدل‌های گردش عمومی (GCMS)^(۵) و یا مدل‌های آب و هوایی منطقه‌ای (RCMS)^(۶) رایج‌ترین روش برای ارزیابی تأثیرات تغییرات آب و هوایی بر جریان است (۲۵ و ۸) در مطالعات هیدرولوژی باید توجه داشت که معمولاً مساحت سلول‌های محاسباتی مدل‌های AOGCM^(۷) بزرگ‌تر از وسعت منطقه مطالعاتی است بنابراین برای استفاده از نتایج این مدل‌ها در سطح حوضه، باید خروجی‌های مدل ریزمقیاس‌نمایی شوند (۱۴). روش‌های مختلفی بدین منظور وجود دارد که روش‌های آماری از روش‌های مرسوم می‌باشد و نرم‌افزارهایی نیز در این رابطه توسعه یافته است که از جمله آن‌ها می‌توان مدل SDSM^(۸) را نام برد (۱۵). شناخت و درک مفهوم بیان آب یکی از پیش نیازهای ضروری در راستای مدیریت پایدار منابع آب در سطح حوزه‌های آبخیز است.

اقلیم کره زمین از زمان پیدایش جو بر روی این سیاره تغییر کرده، اما سرعت آن هیچ‌گاه به اندازه عصر حاضر نبوده است. از نظر پژوهش‌گران، این مقدار شدت در تغییرات اقلیمی به دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر است که غالباً منشأ انسانی دارند (۱۶). بر اساس گزارش ارزیابی پنجم (AR5) هیئت بین‌الدول تغییر آب و هوا (IPCC)^(۴)، دمای جهانی طی سال‌های ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۲ به میزان ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است و در آینده تا سال ۲۱۰۰ به میزان ۰/۳ تا ۴/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت (۱۷). تغییرات آب و هوایی از طریق تغییر در زمان، مقدار، شکل بارش، نرخ تبخیر و

۱ و ۲- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری و استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد
(Email: talebisf@yazd.ac.ir)
(*) نویسنده مسئول:

۳- دکتری ژئومورفولوژی، مدیر دفتر برنامه‌ریزی و بررسی‌های اقتصادی شرکت آب منطقه‌ای اصفهان

5- General Circulation Models

6- Regional Climate Models

7- Atmosphere Ocean General Circulation Model

8- Statistical Down Scaling Model

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.82329

4- Intergovernmental Panel on Climate Change

مهمترین عناصر بیلان آب از دیدگاه مدیریت منابع آب شامل بارش، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، جریان زیرزمینی و جریان جانبی می‌باشند. بنابراین، می‌توان اجزاء منابع آب موجود در یک سیستم را در دوره‌های زمانی مختلف، مورد مقایسه قرار داد و درجه تأثیر هر یک را در تغییرات بیلان آبی سیستم‌های هیدرولوژیکی شناسایی کرد (۳۱). امروزه برای مطالعه و برنامه‌ریزی پایدار و مؤثر در مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، از مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT)^۱ نمونه‌ای از مدل‌های هیدرولوژیک با مبنای فیزیکی است که بر اساس ویژگی‌های حوزه آبخیز و شرایط اقلیمی آن به شبیه‌سازی در مقیاس بزرگ و همچنین پایش فرایندهای مرتبط با چرخه آب می‌پردازد (۲۹). با توجه به اهمیت بحث اثر تغییر اقلیم بر منابع آب در این زمینه تحقیقات زیادی انجام شده است. زو و همکاران (۳۸) در مطالعه‌ای پاسخ هیدرولوژیکی به تغییرات آب و هوایی در حوضه رودخانه Wei چین را با استفاده از مدل SWAT و SDSM مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که میانگین رواناب سالانه در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵، ۲۱۰۰-۲۰۸۱ به ترتیب ۱۲/۴ درصد و ۴۵ درصد نسبت به دوره پایه ۱۹۶۱-۲۰۰۸ افزایش می‌یابد. ژانگ و همکاران (۳۷) در مطالعه‌ای با استفاده از دو مدل SWAT و SDSM، جریان‌های رودخانه Xin در چین را تحت تأثیر تغییرات اقلیمی ارزیابی کردند. در ادامه از GCM‌های مختلف (BCC-CSM1.1، CanESM2 و NorESM1-M) تحت سه سناریو (RCPS) استفاده کردند. بر این اساس درجه حرارت به‌طور مداوم در منطقه افزایش می‌یابد، با این حال بارش آینده بسیار پیچیده و نامطمئن است. ملک و آگاز (۲۲) در مطالعه‌ای اثر تغییر اقلیم بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه رودخانه Gumara را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT و SDSM مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده آن است که میانگین جریان سالانه در آینده به میزان ۱۷/۸ درصد افزایش می‌یابد. آبراهام و همکاران (۲) در مطالعه‌ای شرایط رواناب آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم را توسط دو مدل اقلیمی CMIP5 در دریاچه Ziway، دره ریفت اتیوپی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که حداقل و حداکثر دما تحت سناریوهای RCP8.5 و RCP4.5 افزایش می‌یابد و در مقابل بارش به شدت کاهش می‌یابد. قرمزچشمه و همکاران (۱۰) در پژوهشی تغییرات جریان تحت تأثیر اقلیم در حوضه رودخانه کن را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT و مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM مورد بررسی قرار دادند. در نهایت برای همه ایستگاه‌های مطالعاتی افزایش دمای بیشینه و کمینه به ترتیب حدود ۱/۳ و ۰/۸ درجه سانتی‌گراد و کاهش بارش پیش‌بینی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی رواناب، کاهش آن را نسبت به دوره پایه نشان

داد. اکبری و همکاران (۴) در پژوهشی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه رودخانه ارس را با استفاده از مدل SWAT و سناریوهای گزارش پنجم IPCC مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده کاهش رواناب در سال‌های بررسی شده است. گودرزی و همکاران (۱۳) در مطالعه‌ای عدم قطعیت روش‌های ریزمقیاس‌نمایی در تخمین جریان آبی حوضه آبریز قره‌سو تحت اثر تغییر اقلیم را بررسی کردند. نتایج حاکی از برتری مدل‌های CanESM2 و Hadcm3 برای هر دو متغیر بارش و دما بود. در نهایت نتایج با هدف بررسی تغییرات رواناب تحت تأثیر تغییر اقلیم به مدل هیدرولوژیکی معرفی شد. به طور کل اکثر مدل‌ها افزایش رواناب در فصل زمستان و کاهش آن در بقیه فصول نسبت به دوره پایه را پیش‌بینی می‌کنند. نظر به این‌که حوزه آبخیز مهرگرد در سال‌های گذشته در وضعیت مطلوبی به لحاظ منابع آبی قرار داشته است اما متأسفانه در چند سال اخیر به‌واسطه تغییر شرایط آب و هوایی، وضعیت هیدرولوژیکی آن دستخوش تغییراتی شده است به‌نحوی که ساکنین حوزه آبخیز مذکور را به لحاظ دسترسی به منابع آب با مشکل رو به رو کرده است. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع تغییر اقلیم و تأثیر آن بر اجزاء مختلف کره زمین به‌خصوص چرخه هیدرولوژیکی، این پژوهش در نظر دارد تا با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT و مدل اقلیمی CanESM2 که یکی از مدل‌های تغییر اقلیم جفت شده CMIP5 است تحت سناریو RCP8.5 اثر تغییر متغیرهای اقلیمی را بر رواناب و تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل حوزه آبخیز مهرگرد در آینده مورد بررسی قرار دهد. برای این منظور از مدل آماری SDSM5.2 برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی بزرگ مقیاس پایگاه NCEP^۲ استفاده شد. ضمن اینکه مدل SDSM تاکنون بیش‌تر برای ریز مقیاس‌نمایی دما و بارش در مناطق مرطوب به‌کار رفته است و در نواحی خشک و نیمه خشک کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در این حوزه آبخیز تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ای از حیث بررسی اثر تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های بیلان آب صورت نگرفته است لذا این پژوهش می‌تواند زمینه‌ای را برای مطالعات گسترده‌تر در راستای مدیریت هرچه بهتر منابع آب در حوزه آبخیز مذکور و حوزه‌های آبخیز با شرایط مشابه فراهم کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

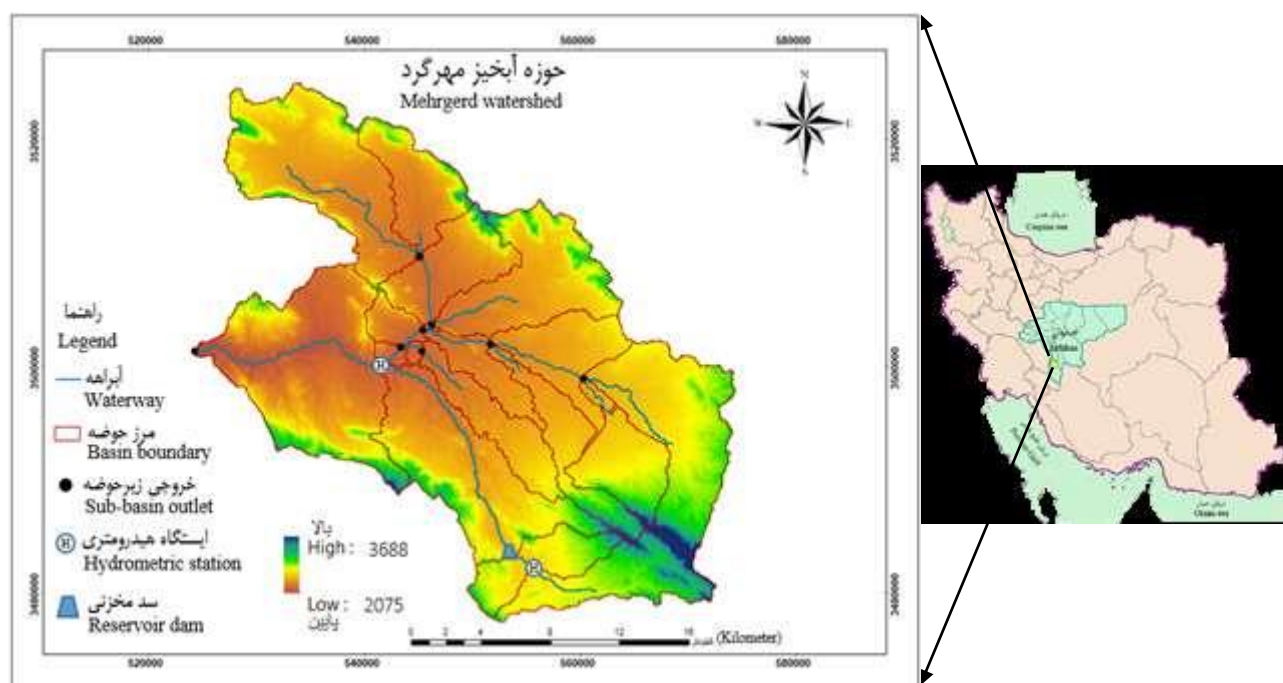
حوزه آبخیز مهرگرد به طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۷ دقیقه و ۳۶ ثانیه تا ۵۱ درجه و ۱۹ دقیقه و ۸ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی

به واسطه تغییر شرایط آب و هوایی، وضعیت هیدرولوژیکی حوزه آبخیز مهرگرد دستخوش تغییراتی شده است مدل سازی میزان و نحوه تغییرات متغیرهای اقلیمی حوزه برای دوره آتی از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین با توجه به هدف پژوهش، بازه زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۷ به عنوان آینده نزدیک مبنای بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب و تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل حوزه قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی اثر این تغییرات بر پارامترهای هیدرولوژیکی از داده های روزانه حداقل و حداکثر دما ایستگاه بروجن و بارش ایستگاه تنگ زردآلو برای دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۴ به عنوان ورودی های مدل اقلیمی استفاده شد. بر این اساس با استفاده از مدل SDSM5.2، خروجی مدل گردش عمومی CanESM2 به وسیله داده های مشاهداتی ریزمقیاس نمایی و با در نظر گرفتن سناریوی RCP8.5 برای آینده شبیه سازی شد. سپس ۲۶ متغیر اقلیمی بزرگ مقیاس از پایگاه داده NCEP در قالب یک فایل فشرده شده از طریق لینک <https://scenarios.climatiquescanada.ca/?page=pred-canesm> دانلود و به عنوان داده های ورودی به مدل اقلیمی معرفی شد. پس از انجام تکرار فرایند آنالیز از بین ۲۶ متغیر بزرگ مقیاس جو (پیش بینی کننده ها)، متغیرهایی که بیشترین همبستگی را با بارش و دمای حوزه آبخیز (پیش بینی شونده ها) داشتند انتخاب شدند. برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده عملیات واسنجی و اعتبارسنجی انجام شد.

۳۱ درجه و ۵۰ دقیقه و ۵۷ ثانیه تا ۳۱ درجه و ۲۴ دقیقه و ۱۹ ثانیه شمالی به عنوان بخشی از حوزه آبریز کارون بزرگ با وسعت ۱۲۷۵/۵۹ کیلومتر مربع، در شمالی ترین بخش شهرستان سمیرم استان اصفهان واقع شده است (شکل ۱). کمترین ارتفاع محدوده ۲۰۷۵ متر مربوط به بخش های خروجی حوزه آبخیز و بیشترین ارتفاع محدوده ۳۶۸۸ متر از سطح دریا مربوط به قسمت های شمالی می باشد. اقلیم حوزه آبخیز براساس اقلیم نمای آمبرژه نیمه خشک سرد و بر اساس روش دومارتن نیمه خشک می باشد. بارندگی متوسط دشت در این محدوده ۳۳۹ میلی متر است. همچنین متوسط بارندگی در ارتفاعات ۳۶۸ میلی متر در سال برآورد شده است (۲۴).

شبیه سازی شرایط اقلیمی آینده با استفاده از مدل CanESM2

برای شبیه سازی شرایط اقلیمی آینده حوزه آبخیز مهرگرد از مدل CanESM2 استفاده شد. این مدل از جمله مدل های گردش عمومی جو سری CMIP5 می باشد و چهارمین نسل از مدل های آب و هوایی است که توسط مرکز مدل سازی و تحلیل آب و هوای کانادا زیر نظر سازمان محیط زیست این کشور توسعه یافته است. در این مدل کل سطح زمین به صورت ۶۴×۱۲۸ سلول، شبکه بندی شده است (۶). همچنین در پژوهش حاضر برای ریزمقیاس نمایی از مدل SDSM استفاده شد. این مدل یکی از مدل های ریزمقیاس نمایی تابع انتقالی آماری به شمار می آید (۳۶). با توجه به اینکه در چند سال اخیر



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز مهرگرد در استان اصفهان و ایران
Figure 1- Location of the Mehrgerd watershed in Isfahan province and Iran

همچنین برای ارزیابی کارایی مدل از یک سری معیارهای آماری مانند NS^۱، R^۲ و RMSE^۳ استفاده شد که در روابط ۱ تا ۳ به ترتیب ارائه شده است (۲۶).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{P})^2} \quad (۱)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (۳)$$

در روابط ۱ تا ۳ O_i مقادیر مشاهده شده، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهده شده، $\bar{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و n تعداد سال‌های آماری می‌باشد.

شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی با استفاده از مدل SWAT

مدل SWAT به لحاظ مقیاس فضایی نیمه توزیعی و از نظر زمانی مدلی پیوسته است. در مدل SWAT ابتدا از روی مدل رقومی ارتفاعی (DEM^۴)، حوزه آبخیز اصلی به تعدادی زیرحوضه تقسیم می‌شود، سپس بر مبنای نقشه‌های خاک و کاربری اراضی و شیب، زیرحوضه‌ها نیز به واحدهای کوچکتری تقسیم می‌شوند، که به هر کدام از این واحدها یک واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU^۵) می‌گویند. این واحدها باید تا حد امکان از نظر هیدرولوژیکی مشابه باشند. در واقع باید در هر واحد هیدرولوژیکی ویژگی‌های خاک، توپوگرافی، پوشش و کاربری اراضی تغییرات چشمگیری نداشته

باشند. خروجی‌های مدل در هر زیر حوضه محاسبه شده برای هر واحد هیدرولوژیکی، به روش وزنی به‌دست می‌آیند (۲۸). پس از معرفی نقشه DEM با دقت ۲۰ متر که از اداره آب منطقه‌ای استان اصفهان تهیه شده بود، منطقه به ۱۸ زیرحوضه تقسیم شد. در ادامه شبکه آبراهه ترسیم و موقعیت دو ایستگاه هیدرومتری تنگ زردآلو واقع در نزدیکی خروجی حوزه آبخیز و پل بردکان در پایین دست سد و همچنین موقعیت سد مخزنی قره آقاج به مدل معرفی و مرز حوزه آبخیز تعریف شد. در مراحل بعدی، نقشه کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی غیرپارامتریک ماشین بردار پشتیبان (SVM^۶)، در محیط نرم افزار ENVI5.3 تهیه شد. بر این اساس هفت نوع کاربری اراضی برای حوزه آبخیز مهرگرد در نظر گرفته شد که شامل: کشت آبی (AGRL)، کشت دیم (WWHT)، باغ (ORCD)، سطوح آبی (WATR)، مرتع (RNGE)، اراضی سنگلاخی (ROCK)، اراضی شهری (URBN) و خاک با دو طبقه به کمک کدهایی به مدل معرفی شد. به دلیل عدم وجود نقشه خاک حوضه مورد نظر از نقشه خاک جهانی موجود در سایت مدل SWAT به نشانی <https://swat.tamu.edu> استفاده شد. همچنین نقشه شیب حوضه بر اساس روش SCS به چهار طبقه تقسیم شد. در نهایت از تلفیق این سه لایه، نقشه واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) به دست آمدند. همچنین حد آستانه برای کاربری اراضی ۱۰ درصد، خاک ۱۰ درصد و شیب ۵ درصد در نظر گرفته شد. بر این اساس ۵۴ واحد پاسخ هیدرولوژیکی برای کل حوضه به‌دست آمد. با استفاده از این حدود آستانه برای خاک و کاربری اراضی، مناطقی که خاک و کاربری اراضی در آن‌ها کمتر از حد آستانه تعریف شده است توسط یک روش میانگین‌گیری وزنی به خاک و کاربری اراضی که بیشترین مساحت را در آن حوضه دارند تبدیل می‌شوند. بعد از آن که از صحت داده‌های ورودی به مدل اطمینان حاصل شد نوبت معرفی اطلاعات اقلیمی به مدل است. در همین راستا به مراجعه به سازمان هواشناسی کل کشور، اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده مدل SWAT برای بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ بر مبنای سال تأسیس و موجود بودن داده‌ها تهیه شد (جدول ۱). بر این اساس بارش روزانه، حداقل و حداکثر دما، سرعت باد، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی ایستگاه‌های موجود در منطقه برای بازه زمانی مذکور در قالب فرمت TXT. وارد مدل شد. همچنین اطلاعات دو ایستگاه سینوپتیک شهرضا و بروجن به فایل wgen. user موجود در پایگاه داده مدل معرفی شد. هدف از انجام این مرحله استفاده از مولد داده اقلیمی (WGEN^۷) برای بازسازی داده‌های مفقود می‌باشد.

6- Support Vector Machine
7- Weather Generator

1- Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient
2- Coefficient of Determination
3- Root Mean Square Error
4- Digital Elevation Model
5- Hydrologic Response Unit

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در مدل SWAT

Table 1- The characteristics of the stations used in the SWAT model

ردیف Row	نام ایستگاه Station name	نوع ایستگاه Station type	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع ایستگاه (متر) Station height (meter)	نام سازمان Organization name
1	سمیرم Semirom	سینوپتیک Synoptic	51°-34'	31°-25'	2470	هواشناسی Meteorology
2	شهرضا Shahreza	سینوپتیک Synoptic	51°-50'	31°-59'	1845	هواشناسی Meteorology
3	بروجن Borujen	سینوپتیک Synoptic	51°-18'	31°-57'	2197	هواشناسی Meteorology
4	لردگان Lordegan	سینوپتیک Synoptic	50°-49'	31°-31'	1580	هواشناسی Meteorology
5	اسفرجان Esfarjan	بارانسنجی Rain gauge	51°-55'	31°-40'	2270	هواشناسی Meteorology
6	تنگ سحری Tange sahari	بارانسنجی Rain gauge	51°-40'	31°-03'	2130	وزارت نیرو Ministry of Power
7	مهرگرد Mehrgerd	تبخیرسنجی Evaporation gauge	51°-31'	31°-34'	2230	وزارت نیرو Ministry of Power
8	حنا Hana	تبخیرسنجی Evaporation gauge	51°-44'	31°-12'	2310	وزارت نیرو Ministry of Power
9	شهید حمزوی Shahid hamzavi	کلیماتولوژی Climatology	51°-49'	31°-09'	2274	هواشناسی Meteorology
10	تنگ زردآلو Tange zardaloo	هیدرومتری Hydrometry	51°-28'	31°-39'	2270	وزارت نیرو Ministry of Power

هیدرومتری تنگ زردآلو واقع در نزدیکی خروجی حوزه آبخیز استفاده شد. در ابتدای اجرای مدل به منظور مشخص کردن پارامترهای مؤثر بر رواناب منطقه، آنالیز حساسیت با استفاده از روش هر بار یک پارامتر (OAT) برای مدل انجام شد و پارامترهای حساس برای واسنجی مدل تعیین شد. در این پژوهش تعداد داده‌های مشاهداتی در خروجی به صورت ماهانه برای رواناب در مرحله واسنجی ۱۰۸ و در مرحله اعتبارسنجی ۴۸ نمونه مورد استفاده قرار گرفت. برای واسنجی مدل ابتدا ۱۹ پارامتر که بیشترین تأثیر را در شبیه‌سازی دبی حوزه آبخیز مهرگرد داشتند انتخاب و بعد از انجام تحلیل حساسیت، ۱۰ پارامتر به عنوان تأثیرگذارترین پارامترها به مدل معرفی شدند. برای این کار از الگوریتم SUFI-2 استفاده شد.

الگوریتم SUFI-2 یک روش بهینه‌سازی معکوس است که در آن تمام منابع عدم قطعیت در دامنه معرفی شده برای هر پارامتر لحاظ می‌گردد. به نحوی که محدوده اولیه پارامترها بعد از هر بار تکرار به وسیله محدوده جدید به دست آمده توسط مدل، جایگزین شده و یک دامنه عدم قطعیت محدودتری از پارامترها به دست می‌آید. این روند تا زمانی که دو شاخص کمی‌سازی عدم قطعیت به حد مطلوب خود برسند یعنی P-Factor به یک و R-Factor به صفر میل کند ادامه پیدا می‌کند (۳۴). ولی اکثراً به دلیل خطاهای گوناگون در داده‌ها و عدم قطعیت مدل‌های مفهومی، هیچگاه این مقادیر برای دو پارامتر ذکر شده به دست نمی‌آید. بدین منظور مدل مجدداً اجرا شد تا بازه

به منظور برآورد تبخیر و تعرق از روش هارگریوز-سامانی استفاده شد. همچنین دبی ماهانه خروجی از دو خط لوله انتقال آب در حوضه و سد مخزنی قره آقاج پس از انجام محاسبات اولیه به همراه خصوصیات فیزیکی سد به مدل معرفی شد. در نهایت مدل SWAT برای اجرا آماده شد.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

منظور از واسنجی مدل، بهینه‌سازی پارامترهای تأثیرگذار مدل است به طوری که خروجی‌های شبیه‌سازی شده بتواند روند و تغییرات داده‌های مشاهداتی را در بازه مورد نظر توجیه کند. اعتبارسنجی بررسی صحت مدل واسنجی شده در بازه زمانی دیگر می‌باشد به طوری که در آن متغیرهای شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بدون تصحیح هیچ پارامتری مقایسه شوند. برنامه‌هایی به این منظور توسعه پیدا کرده‌اند که می‌تواند به طور اتوماتیک این عمل را در حوزه‌های آبخیز بسیار بزرگ انجام دهند. الگوریتم SUFI-2 در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP یکی از این برنامه‌ها می‌باشد که در منابع بسیاری از آن استفاده شده است. واسنجی و تعیین میزان عدم قطعیت، توسط معیارهایی به نام P-Factor و R-Factor بررسی می‌شود (۱). در این پژوهش با توجه به اینکه دو سال برای آموزش مدل در نظر گرفته شد بنابراین برای واسنجی مدل از بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲ و برای اعتبارسنجی از بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ مربوط به ایستگاه

مناسب برای هر پارامتر به دست آمد. به منظور ارزیابی عملکرد مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، از ضریب R^2 ، NS، P-Factor و R-Factor استفاده شد.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی اقلیم آینده با استفاده از مدل SDSM

جدول ۲- پیش بینی کننده‌های منتخب جهت ریزمقیاس‌نمایی بارش و دما

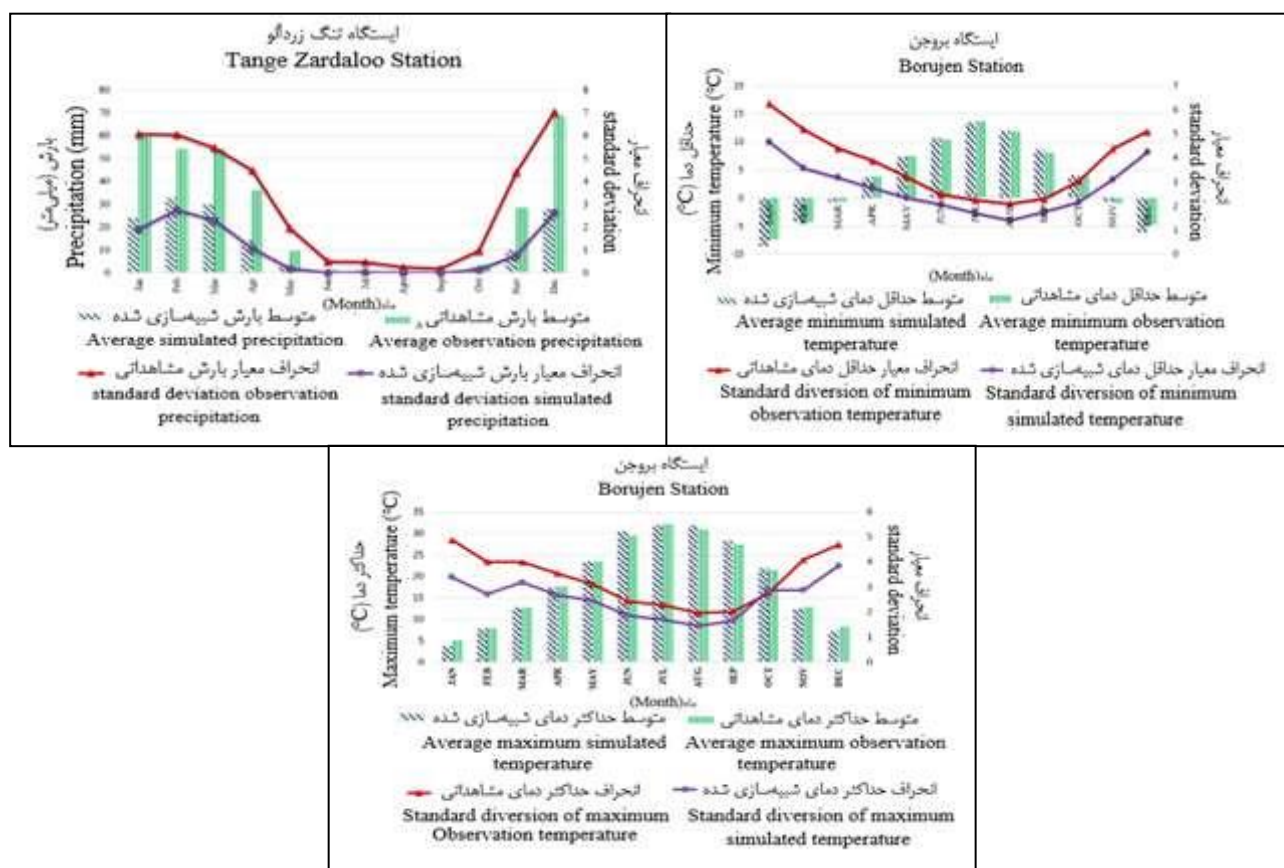
Table 2- Selection predictors for downscaling of precipitation and temperature

متغیر Variable	متغیر پیش‌بینی کننده Predictive variable	کوتاه نوشت Wrote short	مفهوم پیش‌بینی کننده Predictive concept	آماره p Statistics p	همبستگی جزئی Partial correlation
بارش Precipitation	ncepmslpgl.dat	Mslp	فشار متوسط سطح دریا Average pressure at sea level	0.01	0.1
	ncepp1_vgl.dat	p-v	باد نصف النهاری Meridional wind	0.02	0.08
	ncepp8_ugl.dat	p8-u	باد مداری تراز 850 hpa Wind orbital alignment hpa850	0.01	0.1
	ncepp8zhgl.dat	p8zh	واگرایی تراز 850 hpa Alignment divergence hpa850	0.3	0.04
	nceps500gl.dat	p500	ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز 500hpa Geopotential height alignment hpa500	0.2	0.09
حداقل دما Minimum temperature	ncepp5_ugl.dat	p5_u	باد مداری تراز 500 hpa Wind orbital alignment hpa500	0.03	0.4
	nceps500gl.dat	p500	ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز 500hpa Geopotential height alignment hpa500	0.15	0.2
	ncepp5thgl.dat	P5th	جهت باد تراز 500 hpa Wind direction alignment hpa500	0.3	0.18
	ncepp5zhgl.dat	P5zh	واگرایی تراز 500 hpa Alignment divergence hpa500	0.006	0.5
	ncepp8_ugl.dat	p8-u	باد مداری تراز 850 hpa Wind orbital alignment hpa850	0.00	0.16
	nceptempgl.dat	temp	میانگین دمای تراز 2 متر Average temperature alignment 2 meter	0.21	0.2
حداکثر دما Maximum temperature	ncepmslpgl.dat	Mslp	فشار متوسط سطح دریا Average pressure at sea level	0.00	0.3
	ncepp5_ugl.dat	p5_u	باد مداری تراز 500hpa Wind orbital alignment hpa500	0.02	0.04
	nceps500gl.dat	p500	ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز 500 hpa 500 hpa	0.13	0.2
	ncepp8_vgl.dat	p8-v	باد نصف النهاری تراز 850hpa Meridional wind alignment850hpa	0.5	0.4
	ncepshumgl.dat	shum	رطوبت نسبی Relative humidity	0.04	0.03
	nceptempgl.dat	temp	میانگین دمای تراز 2 متر Average temperatures alignment 2 meter	0.5	0.1

با انجام سعی و خطا، بهترین متغیرها برای کوچک مقیاس کردن متغیرهای دما و بارش حوزه آبخیز مهرگرد انتخاب و به مدل معرفی شد (جدول ۲). پس از بازتولید و آنالیز داده‌های تولید شده توسط مدل SDSM، برای ارزیابی توانایی مدل از معیارهای آماری مانند R^2 ، RMSE و NS استفاده شد (جدول ۳).

جدول ۳- معیارهای عملکرد مدل CanESM2 در مقایسه با مقادیر مشاهداتی

Table 3- Performance criteria for the CanESM2 model compared to observation values			
شاخص‌های آماری	بارش (میلی‌متر)	حداقل دما (درجه سانتی‌گراد)	حداکثر دما (درجه سانتی‌گراد)
Statistical indicators	Precipitation (mm)	Minimum temperature (° C)	Maximum temperature (° C)
ضریب تعیین R^2	0.92	0.99	0.99
مجذور میانگین مربعات خطا RMSE	5.81	0.16	0.21
ضریب نش-ساتکیف NS	0.39	0.99	0.99



شکل ۲- مقایسه میانگین و انحراف معیار بارش، حداقل و حداکثر دما مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی

Figure 2- Comparison of mean and standard deviation of precipitation, minimum and maximum temperature of observation and simulation values

مدل‌های منطقه‌ای نشان می‌دهد که مدل‌سازی بارش معمولاً همراه با خطا صورت می‌گیرد. همچنین مدل SDSM یک مدل رگرسیونی است. این مدل‌ها اکثراً با ایجاد روابط رگرسیونی بین متغیرهای بزرگ مقیاس و ریزمقیاس تعریف می‌شوند. برای شبیه‌سازی بارش، ریزمقیاس‌نمایی وقایع حداکثر در آینده توسط مدل‌های رگرسیونی تا حدی مشکل است (۳۵). لازم به ذکر است که حوزه آبخیز مهرگرد، کوهستانی است بنابراین بارش را به شدت تحت

با توجه به نتایج موجود در جدول‌های ۲ و ۳ مشخص شد که داده‌های درجه حرارت همبستگی بهتری با داده‌های مشاهداتی در مقایسه با داده‌های بارندگی داشته‌اند. به عبارتی تغییرپذیری دما نسبت به بارندگی کمتر است و دما یک متغیر پیوسته است که کمتر تحت تأثیر ناهنجاری‌های زمانی قرار می‌گیرد. درحالی‌که بارش تحت تأثیر عوامل مختلفی در حوضه قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، بارندگی یک متغیر گسسته است. نتایج بسیاری از مدل‌های گردش عمومی جو و

بین انحراف معیار مقادیر مدل سازی شده و مشاهداتی وجود دارد با این وجود مدل سازی دماهای حداقل و حداکثر به میزان بسیار خوبی با داده های مشاهداتی مطابقت دارد. نتایج ریزمقیاس نمایی مدل گردش عمومی جو در این حوزه آبخیز نشان دهنده کاهش ۵۳/۴۸ درصدی بارندگی و افزایش حداقل و حداکثر دما به ترتیب به میزان ۰/۸۴ و ۳/۹۹ درجه سانتی گراد در دوره شبیه سازی شده ۲۰۳۰-۲۰۱۷ نسبت به گذشته است.

شبیه سازی شرایط هیدرولوژی منطقه با استفاده از مدل SWAT

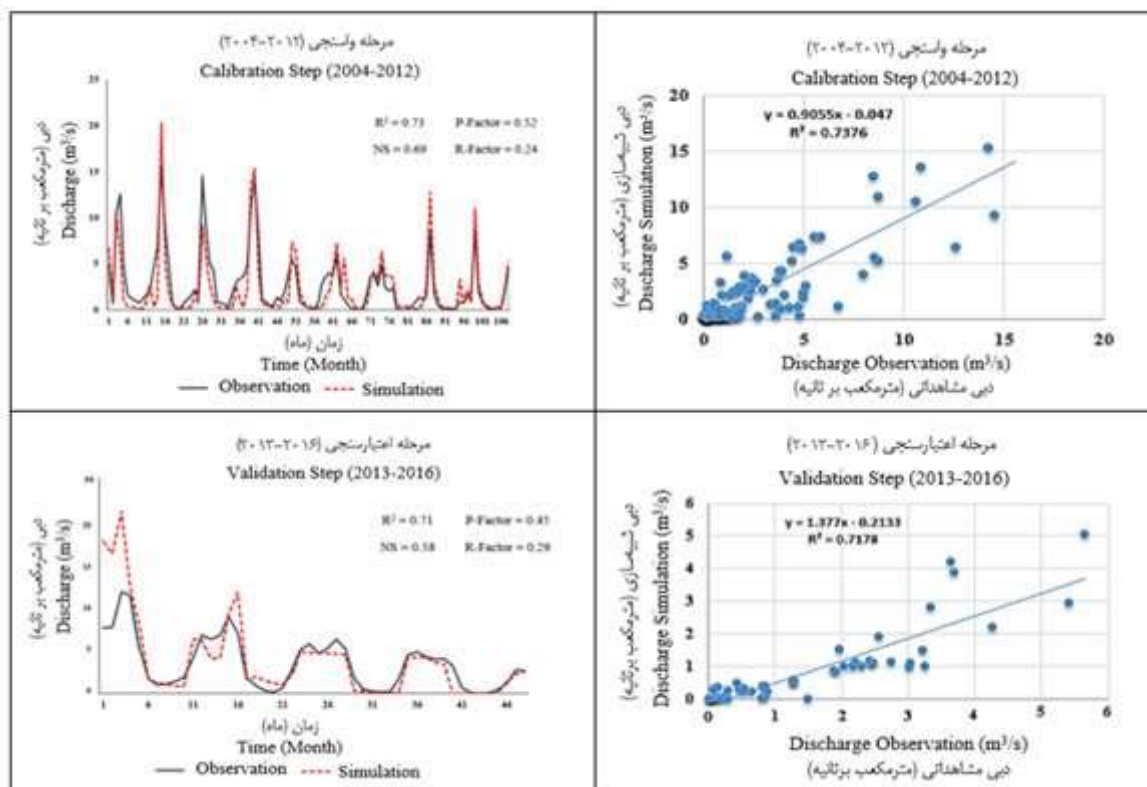
با توجه به این که ایستگاه هیدرومتری تنگ زردآلو به لحاظ کیفیت و طول دوره آماری در حد مطلوبی قرار دارد بنابراین از داده های این ایستگاه برای واسنجی و اعتبارسنجی رواناب ماهانه استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل از آنالیز حساسیت مدل، ۱۰ پارامتر به عنوان حساس ترین پارامترها شناسایی شدند. که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین نمودار همبستگی رواناب مشاهداتی و شبیه سازی شده مربوط به دوره واسنجی و اعتبارسنجی ایستگاه تنگ زردآلو در شکل ۳ ارائه شده است.

تأثیر قرار می دهد و احتمال بروز خطا را در این متغیر افزایش می دهد. به بیان دیگر مدل SDSM نسبت به شبیه سازی بارش از حساسیت بالایی برخوردار بوده لذا هر عاملی که این متغیر را تحت تأثیر قرار دهد امکان بروز خطا توسط این مدل را تشدید می کند. به همین علت شاخص آماری نش-ساتکلیف در ارتباط با بارش نسبت به حداقل و حداکثر دما پایین تر برآورد شده است. که با توجه به ماهیت مدل و شرایط توپوگرافی حوزه آبخیز این حد از اختلاف قابل قبول است. در این راستا می توان به مطالعاتی چون عساکره و اکبرزاده (۵) در ایستگاه سینوپتیک تبریز، نادری و همکاران (۲۷) در حوضه سیمره اشاره کرد. بر این اساس شاخص های آماری به دست آمده برای حوزه آبخیز مهرگرد در سطح قابل قبولی قرار دارند. در شکل ۲ به خوبی واضح است که میزان بارش شبیه سازی شده برای آینده نسبت به میزان بارش مشاهداتی به طور قابل توجهی کاهش می یابد. همچنین بیشترین اختلاف در ارتباط با انحراف معیار بارش مربوط به ماه های ژانویه و دسامبر به ترتیب به میزان ۴/۱۴ و ۴/۳۷ واحد کمتر از مقدار انحراف معیار مقادیر مشاهداتی است. در ارتباط با دما، که در برخی از ماه ها، خصوصاً در ماه های ژانویه و دسامبر درمورد دمای حداقل و در ماه های ژانویه و نوامبر در مورد دمای حداکثر، اختلاف نسبتاً کمی

جدول ۴- نتایج آنالیز حساسیت پارامترها برای دوره واسنجی (۲۰۱۲-۲۰۰۴)

Table 4- Results of sensitivity analysis of parameters for the calibration period (2004-2012)

ردیف Row	نام پارامتر Parameter name	توصیف مؤلفه Component description	t-stat	p-value	مقدار بهینه Optimum amount
1	V_CN2.mgt	شماره منحنی SCS برای شرایط رطوبتی II Curve numbers scs for humidity II	1.80	0.07	53.74
2	V_REVAPMN.gw	ضریب Revap آب زیرزمینی Revap coefficient of groundwater	-2.13	0.03	41.73
3	V_HRU_SLP.hru	متوسط تندی شیب Average slope steepness	2.76	0.01	0.60
4	r_SOL_AWC(1).sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک (۱) (mm/mm) Available water capacity of the soil (1) (mm/mm)	-3.49	0	-0.04
5	r_SOL_AWC(2).sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک (۲) (mm/mm) Available water capacity of the soil (2) (mm/mm)	-9.74	0	-0.40
6	V_GWQMN.gw	حد آستانه آب در آبخوان کم عمق Threshold shallow water aquifer	-4.10	0	257.88
7	V_ESCO.hru	فاکتور جبران تبخیر از خاک Factor to compensate for evaporation from soil	6.73	0	0.81
8	r_SOL_BD(1).sol	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی (۱) Soil bulk density in the surface layer (1)	8.92	0	0.39
9	r_SOL_BD(2).sol	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی (۲) Soil bulk density in the surface layer (1)	13.77	0	0.56
10	V_PLAPS.sub	نرخ تغییرات بارش با ارتفاع در هر زیرحوضه Changes in precipitation rates in each sub-height	70.59	0	297



شکل ۳- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رواناب ماهانه ایستگاه تنگ زردآلو با استفاده از الگوریتم SUFI-2

Figure 3- Calibration and validation results of the monthly runoff in Tange Zardaloo station using the SUFI-2 algorithm

شده است، برداشت آب با هدف تأمین آب شرب مناطق مجاور همچون شهرضا و سمیرم با استفاده از خطوط انتقال آب و احداث سد مخزنی قره‌آقاج جهت تأمین مصارف مختلف ساکنین حوزه آبخیز می‌باشد.

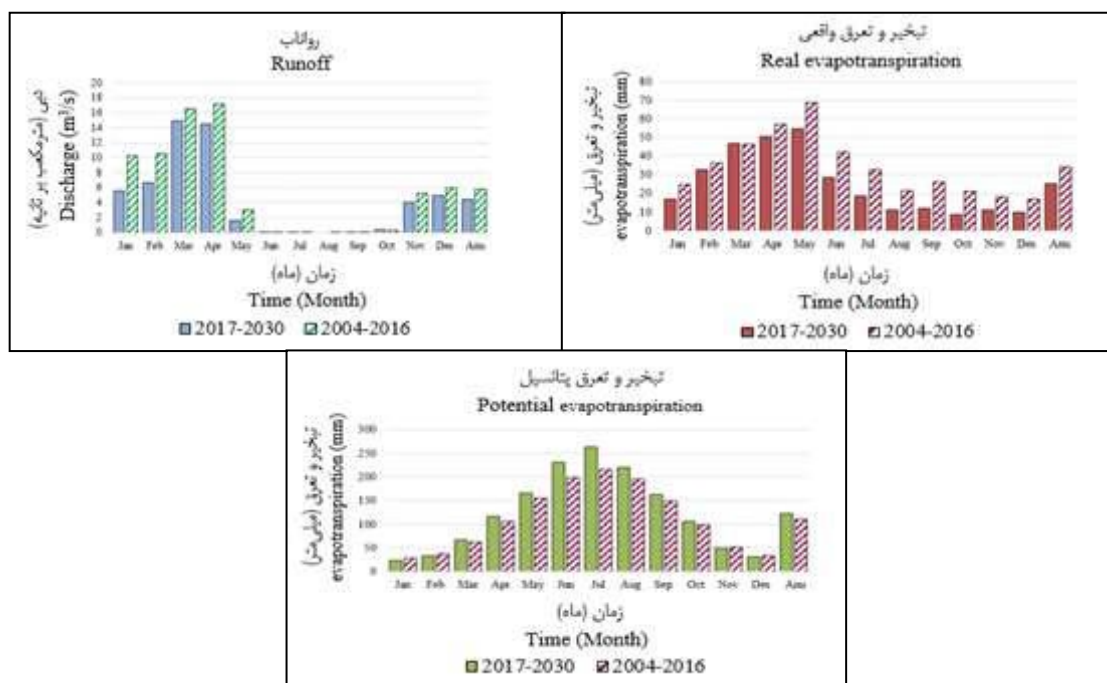
بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب و تبخیر و تعرق

با توجه به شکل ۴ نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی اقلیم برای بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۳۰ توسط مدل SDSM حاکی از کاهش بارندگی و افزایش دما در تمام ماه‌های سال در مقایسه با دوره پایه می‌باشد. بر این اساس شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز در دوره آتی و مقایسه مقادیر آن با دوره پایه بیانگر کاهش متوسط رواناب سالانه درازمدت در دوره آتی به میزان ۲۳/۸۲ درصد می‌باشد. همچنین پیک رواناب از ماه آوریل به ماه مارس منتقل شده است. در شرایط اقلیمی گذشته که رژیم غالب بارش‌های زمستانه به‌صورت برف بوده است به دلیل شرایط دمایی گذشته بیشترین میزان رواناب در اوایل فصل بهار همزمان با ذوب برف زمستانه و بارش‌های بهاری اتفاق افتاده است. درحالی‌که در آینده نزدیک هرچند بارش‌ها از نظر کمی نسبت به گذشته کاهش می‌یابد ولی به دلیل تغییر رژیم بارش‌ها، نقطه اوج رواناب از اوایل بهار به سمت اواخر زمستان منتقل می‌شود. این نتایج

با توجه به نتایج موجود در شکل ۳ شاخص R^2 ، P -Factor، NS و R -Factor برای دوره واسنجی ۰/۵۲، ۰/۲۴، ۰/۷۳ و ۰/۶۹ و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۴۵، ۰/۲۹، ۰/۷۱ و ۰/۵۸ به‌دست آمد. بنابراین درصد قابل قبولی از داده‌های مشاهداتی در باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفتند. همچنین نتایج نشان‌دهنده این است که مدل به‌صورت رضایت بخشی رواناب ماهانه حوزه آبخیز مهرگرد را شبیه‌سازی کرده است. با مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به خوبی واضح است که در بعضی از ماه‌های سال (می ۲۰۰۴ و مارس ۲۰۰۶) برای دوره واسنجی و (می ۲۰۱۳، مارس ۲۰۱۴، آوریل ۲۰۱۵ و مارس ۲۰۱۶) برای دوره اعتبارسنجی در نقاط پیک، تا حدودی همبستگی کمتری دارند. در این ارتباط می‌توان به مطالعات تولسون و شوماکر (۳۳) و چو و شیرمحمدی (۷) اشاره کرد. دلایل این مسئله عبارت است از: کوهستانی بودن و وجود سنگ آهک، آهک مارنی و آهک دولومیتی مربوط به کرتاسه زیرین که از ضخامت قابل توجهی برخوردار بوده و بخش عمده نواحی مرتفع را تشکیل می‌دهند. بخش‌هایی از جریان که مدل با اختلاف کمی نسبت به هیدروگراف مشاهداتی شبیه‌سازی کرده است، در اواخر زمستان و اوایل بهار به‌خصوص در ماه‌های (مارس، آوریل و می) اتفاق افتاده است. از عواملی که سبب افت هیدروگراف مربوط به دبی شبیه‌سازی

در فصل تابستان از میزان بارش‌ها به شدت کاسته خواهد شد به نحوی که کمترین میزان بارش مربوط به ماه‌های تیر و مرداد است. این حوزه آبخیز بر اساس تقسیم‌بندی کوپن جزء مناطق معتدل سرد با تابستان‌های گرم و خشک و در ارتفاعات جنوبی جزء مناطق معتدل سرد با تابستان‌های خنک و خشک می‌باشد. همچنین رشد پوشش گیاهی در این حوزه آبخیز از اواخر اسفند ماه شروع و در اواسط اردیبهشت به حداکثر رشد رویشی خود می‌رسد (۳، ۱۸ و ۳۰). بر این اساس بیشترین میزان تبخیر و تفرق واقعی در این حوزه آبخیز مربوط به اواخر زمستان تا اواسط بهار به‌خصوص ماه‌های فروردین و اردیبهشت می‌باشد. علت این مسئله رسیدن پوشش گیاهی به حداکثر رشد و وجود آب کافی است. در ارتباط با بحث تبخیر و تفرق پتانسیل نیز باید گفت با توجه به ارتباط تنگاتنگی که میان تبخیر و تفرق پتانسیل و دما وجود دارد بنابراین تبخیر و تفرق پتانسیل سالانه نسبت به دوره پایه به میزان ۱۰/۲۰ درصد افزایش می‌یابد. بر این اساس میزان تبخیر و تفرق پتانسیل در حوزه آبخیز مهرگرد در فصل تابستان با افزایش دما به حداکثر خود خواهد رسید. نتایج به‌دست آمده با مطالعات سیفی و همکاران (۳۲) در ایستگاه کرمان، کوهی و ثنایی نژاد (۱۹) در حوزه رودخانه ارومیه، گودرزی و همکاران (۱۲) در حوزه کرخه و لیانگ و همکاران (۲۰) در حوزه رودخانه Taoer در این باره هم‌سو بود.

با مطالعات منصوری و همکاران (۲۱) در حوضه زربینه رود، اکبری و همکاران (۴) در حوضه رودخانه ارس و امیل سوو و همکاران (۹) در حوضه Bandama مطابقت دارد. با توجه به اینکه تغییرات دمایی عامل اصلی تغییرات اقلیمی شناخته شده است، معادله‌هایی که بر پایه پارامترهای دمایی باشند، با توجه به پدیده گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی قادر به پیش‌بینی میزان تبخیر و تفرق در دوره‌های آتی خواهد بود لذا از روش هارگریوز-سامانی که روش دمایی است به دلیل نیازمند بودن به داده‌های ورودی کمتر و پاسخگو بودن به مسئله پدیده گرمایش جهانی و محدود بودن داده‌های ریزمقیاس شده در حوضه برای بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر تبخیر و تفرق استفاده شد (۱۱). بر این اساس نتایج نشان‌دهنده کاهش تبخیر و تفرق واقعی آینده ۲۰۱۷ تا ۲۰۳۰ در مقایسه با دوره پایه ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ است. به‌طورکلی نتایج نشان‌دهنده کاهش متوسط سالانه تبخیر و تفرق واقعی آینده در مقایسه با دوره پایه به میزان ۲۶/۰۳ درصد می‌باشد. این مسئله ناشی از کاهش بارش در آینده و عدم وجود آب کافی به جهت انجام مکانیسم تبخیر و تفرق واقعی می‌باشد. بنابراین با توجه به بحث افزایش دما و کاهش بارندگی برای دوره آینده و به دنبال آن کاهش رواناب سطحی و زیرسطحی این مسئله خود کاهش رطوبت خاک و در نتیجه کاهش مکانیسم تبخیر و تفرق واقعی را موجب خواهد شد. با توجه به شرایط اقلیمی حوزه آبخیز مهرگرد، بیشتر بارش‌ها در فصل زمستان به‌خصوص دی و بهمن ماه اتفاق می‌افتد و



شکل ۴- تغییرات رواناب، تبخیر و تفرق واقعی و پتانسیل تحت تأثیر تغییر اقلیم (۲۰۱۶-۲۰۰۴؛ ۲۰۳۰-۲۰۱۷)

Figure 4- Runoff variations, actual evapotranspiration and potential affected by climate change (2004-2016, 2017-2030)

نتیجه گیری

با توجه به آن که آب و مسائل مربوط به آن از جمله دغدغه‌های اصلی بشر در دوره‌های آتی به حساب می‌آید جهت مدیریت هرچه بهتر، ضرورت دارد وقوع تغییرات اقلیمی و میزان تأثیرگذاری آن بر منابع آب ارزیابی گردد. در این پژوهش سعی شد تا با استفاده از مدل اقلیمی CanESM2 و مدل هیدرولوژیکی SWAT2012 اثر تغییر متغیرهای اقلیمی در آینده بر بیلان آب حوزه آبخیز مهرگرد به‌خصوص رواناب و تبخیر و تعرق (واقعی و پتانسیل) مورد بررسی قرار گیرد.

براساس خروجی‌های مدل SDSM مشخص شد که بارش در مقایسه با دوره مشاهداتی به میزان ۵۳/۴۸ درصد کاهش و دمای حداقل و حداکثر با اختلاف کمی نسبت به دوره مشاهداتی به ترتیب به میزان ۰/۸۴ و ۳/۹۹ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از معیارهای آماری حاکی از آن است که مدل، متغیرهای اقلیمی حوضه را به خوبی شبیه‌سازی کرده است. بر این اساس ضریب R^2 ، RMSE و NS برای بارش به ترتیب معادل ۰/۹۲، ۵/۸۱ و ۰/۳۹ و برای حداقل و حداکثر دما به ترتیب معادل ۰/۹۹، ۰/۱۶، ۰/۹۹ و ۰/۹۹، ۰/۲۱، ۰/۹۹ به‌دست آمد. اگرچه ضریب نش-ساتکلیف در ارتباط با متغیر بارش در مقایسه با حداقل و حداکثر دما، پایین برآورد شده است اما با توجه به ماهیت مدل SDSM، حساسیت مدل نسبت

به بارش، اثرگذاری عوامل مختلف بر بارش همچون توپوگرافی می‌توان گفت که مقدار به‌دست آمده برای ضریب نش-ساتکلیف قابل قبول است. به بیان دیگر مدل SDSM در شبیه‌سازی بارش از دقت کمتری برخوردار است. در بخش هیدرولوژیکی معیارهای آماری R^2 ، NS، P-Factor و R-Factor برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۷۳، ۰/۶۹، ۰/۵۲ و ۰/۲۴ و برای دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۵۸، ۰/۴۵ و ۰/۲۹ به دست آمد. لازم به ذکر است که مدل SWAT بارش را با استفاده از متوسط دمای روزانه و به‌صورت باران یا برف تقسیم‌بندی می‌کند. با توجه به ساز و کار مدل در ارتباط با شبیه‌سازی رواناب ماهانه ماه‌های پس از فصل سرما که در طی آن‌ها با گرم شدن هوا، برف باریده شده در فصل سرما، ذوب می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که مدل قادر به شبیه‌سازی خوب ذوب برف در برخی از ماه‌های سال نبوده است و جریان حداکثر شبیه‌سازی شده تطابق کمتری با مقادیر مشاهداتی دارد. در ادامه با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب و تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل حوضه، اقلیم شبیه سازی شده برای آینده به مدل SWAT معرفی شد. پس از تحلیل نتایج مشخص شد که متوسط رواناب سالانه به میزان ۲۳/۸۲ درصد روند رو به کاهشی داشته است. همچنین تبخیر و تعرق واقعی به میزان ۲۶/۰۳ درصد کاهش و تبخیر و تعرق پتانسیل به میزان ۱۰/۲۰ درصد افزایش یافته است.

منابع

- 1- Abbaspour K.C. 2011. SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs Version 2: A User Manual. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 100 pp.
- 2- Abraham T., Abate B., Woldemicheal A., and Muluneh A. 2018. Impacts of Climate under CMIP5 RCP Scenario's on the Hydrology of Lake Ziway Cathment, Central Rift Valley of Ethiopia. Journal of Environment and Earth Science 8(7): 10.
- 3- Abtahi M. 2016. Investigation of vegetation dynamics of semi-stepi rangelands of Isfahan province (Case Study: Dolat Gharin Semirom). Iranian Journal of Natural Resources 69(2): 311-322. (In Persian)
- 4- Akbari F., Taheri Borujeni G., Moridi A., and Khazaee Pool A. 2018. The Effect of climate change on runoff in the Aras river basin using SWAT model 15-16 May 2018. The first national conference on water and soil assessment (SWAT) in water resources management in the country. Isfahan University of Technology, 11pp. (In Persian)
- 5- Asakoreh H., and Akbarzadeh Y. 2017. Simulation of temperature and precipitation variations in the synoptic station of Tabriz during (2010-2100) using statistical Downscaling (SDSM) and output model (CanESM2). Journal of Geography and Environmental Hazards 21: 174-153. (In Persian)
- 6- Charron I.A. 2014. Guidebook on climate scenarios: Using climate information to guide adaptation research and decisions. 94pp.
- 7- Chu T.W., and Shirmohammadi A. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland 47(4): 1057-1073.
- 8- Dlamini N.S., Kamal R., Amin M., Mohd B., Syazwan M., and Fikri A. 2017. Modeling potential impacts of climate change on streamflow using projections of the 5th assessment report for the Bernam River Basin, Malaysia. Water, 9: 22pp.
- 9- Emile Soro G., Berthe Yao A., Morton Kouame Y., and Goula B. 2017. Climate Change and Its Impacts on Water Resources in the Bandama Basin, Côte D'ivoire. Journal Hydrology 4(18): 13.
- 10- Ghermezcheshmeh B., Hajimohammadi M., and Ahmadi M. 2017. Validation of SWAT model accuracy in minimal

- flow simulation (case study: Can basin). 31 May- 1 Jun.2017. Second National Conference on Soil and Water Conservation. Iran,12pp. (In Persian)
- 11- Goodarzi M., Salahi B., and Hoseini S.A. 2015. Estimation of evapotranspiration in relation to climate change in the watershed of Lake Urmia. *Eco Hydrology* 2(2): 175-189. (In Persian)
 - 12- Goodarzi M., Hoseini M., and Parekar M. 2017. The application of quasi-quantitative statistical method to estimate the change of Karkheh basin to the dam, Iran-Watershed Management Science and Engineering 10(35): 51-64. (In Persian with English abstract)
 - 13- Goodarzi M.R., Faraji A.R., and Komasi M. 2018. Uncertainty of downscaling methods in future catchment flow under climate change effect. *Journal of Water and Soil* 31(6):1586-1575. (In Persian with English abstract)
 - 14- Hewitson B.C., and Crane R.G. 1996. Climate downscaling: techniques and application. *Journal Climat Research*. Published November 7(29): 85-95.
 - 15- IPCC. 2001. Climate Change.The Scientific Based. Contribution of Working Group 1 To The Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change, Houghton, J.T.Etc. (Eds), Cambridge University Press, Cambridge And New York; Chap.8:881 pp.
 - 16- IPCC-TGCI. 2007. General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Ads. Mass. task group on data and scenarios support for impact and climate assessment.
 - 17- IPCC. Climate Change. 2013.The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK.222pp.
 - 18- Jabbari S., Khajadini J., Jafari R., Soltani S. 2014. Investigating the changes of vegetation cover percentages using satellite images in the Semirom area. *Iranian Journal of Applied Ecology* 3(10): 27-38. (In Persian)
 - 19- Koochi V., and Sanai Nejad H. 2013 Assessment of climate change scenario based on microscopic methods for calculating evapotranspiration of Urmia region. *Journal of Irrigation and Drainage Research* 559-574. (In Persian)
 - 20- Liang L., and LijuanL Qiang L. 2010. Emporal variation of reference evapotranspiration during 1961-2005 in the Taoer river basin of Northeast China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 298-306.
 - 21- Mansuri B., Ahmadzadeh H., Masah Bavani A., Morid S., Delavar M., and Lotfi S. 2015. Investigating the effects of climate change on water resources of Zarrinehroud area using SWAT model *Water and Soil Journal Agricultural Science and Technology* 28(6): 1191-1230.
 - 22- Melke A., and Abegaz F. 2017. Impact of climate change on hydrological responses of Gumara catchment, in the Lake Tana Basin Upper Blue Nile Basin of Ethiopia. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 9(1): 8-21.
 - 23- Merritt W.S., Alila Y., Barton M., Taylor B., Cohen S., and Neilsen D. 2006. Hydrologic response to scenarios of climate change in sub watersheds of the Okanagan basin, British Columbia. *Journal of Hydrology* 326: 79-108.
 - 24- Ministry of Power. 2017. Report of water resources balance of study areas Great Karun Basin. Volume 5: Water Resources Assessment Report. Appendix 24: Water balance of the Mehrgerd Study Area (2324). Code: SR-105-39.
 - 25- Molina-Navarro E., Hallack-Alegría M., Martinez-Pérez S., Ramirez-Hernández J., Mungaray-Moctezuma A., and Sastre-Merlín A. 2015. Hydrological modeling and climate change impacts in an agricultural semiarid region. Case study: Guadalupe River basin, Mexico. *Agric. Water Manage* 175: 29-42.
 - 26- Moriasi D., Wilson B., Douglas-Mankin K., Arnold J., and Gowda P. 2012. Hydrologic and water quality models: Use, calibration, and validation. *Trans. ASABE* 55(4): 1241-1247.
 - 27- Naderi S., Goodarzi M., and Ghadami Dehno M. 2018. Effects of climate change on climate parameters in Seymare Basin. *Iran-Watershed Management Science & Engineering* 11(39): 69-76. (In Persian with English abstract)
 - 28- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., and Williams J.R. 2005. Soil and water assessment tool documentation, (user's manual). 494 pp.
 - 29- Neitsch S., and Arnold J., Kiniry J., and Williams J. 2011. Soil and water assessment tool: theoretical documentation, version 2009, Texas Water Resource Institute, USA.647pp.
 - 30- Saboohi R., Barani H., Khodaghali M., Abedi Sarvestani A., and Tahmasebi A. 2019. Nomads' indigenous knowledge and their adaptation to climate changes in Semirom city in Central Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 137: 1377-1384.
 - 31- Sathian K.K., and Shyamala P. 2009. Application of GIS integrated SWAT model for basin level water balance. *Indian Journal of Soil Conservation* 37: 100-105.
 - 32- Seifi A., Mirlotfi SM., and Riahi H. 2011. Developing a combined model of linear regression and factor analysis (mlr-pca) for evaluating reference evapotranspiration (Case Study: Kerman Station). *Journal of Water and Soil Science* 1186-1196. (In Persian with English abstract)
 - 33- Tolson B.A., and Shoemaker C.A. 2004. Watershed modeling of the canyonville basin using SWAT2000: model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the cannons ville reservoir. *school of civil and environmental engineering*. 159 pp.
 - 34- Uniyal B., Jha M.K., and Verma A.K. 2015. Parameter identification and uncertainty analysis for simulating streamflow in a river basin of Eastern India, *Hydrological Processes* 29(17): 3744-3766.

- 35- Wilby R.L., Dowson C.W., and Barrow E.M. 2002. SDSM-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, *environmental modeling & software* 17: 147-159.
- 36- Wilby R.L., and Dawson W.C. 2007. SDSM 4.2- A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, *SDSM manual version 4.2*, Environment Agency of England and Wales, 94 pp.
- 37- Zhang Y., You Q., Chen C., and Ge J. 2016. Impacts of climate change on stream flows under RCP scenarios: a case study in Xin River Basin, China. To appear in: *Atmospheric Research*, 46pp.
- 38- Zuo D., Xu Z., Zhao J., Abbaspour K., and Yang H. 2015. Response of runoff to climate change in the Wei River basin, China. *Hydrological Sciences Journal* 37-41.



Analysis of Effect of the Climate Parameters Change on Runoff and Evapotranspiration of Mehrgerd Watershed

Z. Nouri¹- A. Talebi^{2*}- B. Ebrahimi³

Received: 02-09-2019

Accepted: 12-01-2020

Introduction: In the past century, the climate has been changing on both regional and global scales over the earth. It is also expected that such changes will continue in the near future. Climate change is due to increased greenhouse gas emissions in the atmosphere. The concentration of these gases is directly related to the temperature increase. Climate change affects the hydrological cycle through changes in time, amount, the shape of precipitation, evaporation rates and transfer, soil moisture, runoff, etc. Today, the use of hydrological models have been developed to have the factors affecting the hydrological cycle in the watershed. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is an example of these models. The common method of assessing the effects of climate change on flow is using hydrological models along with general circulation models (GCMs) or regional weather models (RCMS). The purpose of this study is to investigate the effect of climate change on runoff and evapotranspiration (real and potential) of Mehrgerd Watershed using the SWAT hydrologic model and the CanESM2 climatic model.

Materials and Methods: For modeling the change rate of regional climate parameters in the future period (2017-2030) and the effect of these changes on hydrological parameters, the daily data of minimum and maximum temperature of the Borujen station and precipitation of the Tange Zardaloo station for the base period (1984-2005) were used as inputs of the CanESM2 model. Accordingly, using the model of SDSM5.2 under the scenario of RCP8.5 was performed the downscaling operation. To evaluate the efficiency of the SDSM model were used statistical criteria R^2 , RMSE, and NS. In the next step, the SWAT 2012 model was used to simulate the hydrologic conditions. After introducing the DEM map with a precision of 20 meters, the region was divided into 18 sub-basins. From the combination of land use maps, soil, and slope, 54 units of hydrological response (HRU) were obtained. Then, climatic data including precipitation, minimum and maximum temperature, relative humidity, wind speed, and solar radiation were introduced to the model. Due to the presence of the dam and the two water transfer lines in the area, physical data and discharge were calculated and introduced into the model. The calibration and validation of the model were done by Sufi-2 algorithm. The calibration process was conducted for the period 2004 to 2012 while the validation process was from 2013 to 2016. In order to evaluate the performance of the model, coefficients NS, R^2 , P-Factor and R-Factor were used. For this purpose, the model was restarted to obtain the appropriate range for each parameter. After calibrating the hydrological model was introduced the simulated climate to the SWAT model. Finally, the effect of climate change was investigated on runoff and evapotranspiration (real and potential) of Mehrgerd Watershed.

Results and Discussion: The results of the downscaling of the climatic model in this region indicate a decrease of 53.48% of precipitation and increase minimum and maximum temperatures for a future period (2017-2030), 0.84 and 3.99%, respectively. Based on the results of the sensitivity analysis of the SWAT model, 10 parameters were identified as the most sensitive parameters. In the hydrological section, the statistical criteria of R^2 , NS, P-Factor and R-Factor were obtained for the calibration period 0.73, 0.69, 0.52 and 0.24, respectively and for the validation period, 0.71, 0.58, 0.45 and 0.29, respectively. Comparing runoff simulation in the future period under the influence of climate change and comparison of its values with the base period showed a decrease of 23.82% in an annual average of runoff. Climate change will also reduce actual evapotranspiration by 26.03% and increase potential evapotranspiration by 10.20%.

1 and 2- M.Sc. Graduated and Professor in Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Yazd University, respectively.

(*- Corresponding Author Email: talebisf@yazd.ac.ir)

3- Ph.D. in Geomorphology, Head of the Planning and Economic Analysis Office, Isfahan Regional Water Company
DOI: 10.22067/jsw.v34i1.82329

Conclusion: Based on the results of the SDSM model, it was determined that the precipitation is strongly reduced in comparison with the observation period, and the minimum and maximum temperatures increase with a slight difference compared to the observation period. According to statistical criteria, the SDMS model has succeeded in simulating the parameters for the future period. Accordingly, the values of R^2 , RMSE, and NS for precipitation, were equal to 0.92, 5.81 and 0.39, respectively, and for the minimum and maximum temperatures were obtained 0.99, 0.16, 0.99 and 0.99, 0.21, 0.99, respectively. In the hydrological section, the statistical criteria were acceptable values for the calibration period and the validation. Finally, it was found that under the influence of climate change, runoff decreases. Real evapotranspiration is also declining due to a lack of available water, but potential evapotranspiration is increasing due to the close relationship with temperature.

Keywords: Climate change, Climate scenarios, Downscaling, SWAT Model, Water balance

Contents

The Effects of Partial Root Zone Drying and Growing Bed on Yield and its Components of Quinoa (cv. Titicaca)	10
S. Jamali- H. Ansari - S.M. Zeynodin	
Water, Energy, Food Nexus Approach Impact on Integrated Water Resources Management in Sefid-Rud Irrigation and Drainage Network	25
Z. Eslami - S. Janatrostami- A. Ashrafzadeh- Y. Pourmohamad	
Evaluation Different Methods of Scaling the Philip Equation	42
M.T. Poozan - M.M. Chari- P. Afrasiab	
The Effect of Land Use Changes on the Flood Hydrograph in the Kashaf-Rood River by Analyzing of SCS-CN Results	54
M. Mahmoodi - M. Honarmand- F. Naseri- S. Mohammadi	
Land Use Classification and Determining the Pattern of Changes for 0-07, using OLI Sensor's Data	71
S.B. Hosseini - A. Saremi - M.H. Noori Gheydari- H. Sedghi- A.R. Firoozfar	
Detection of Endoglucanase Gene in Cellulose Degrading Bacteria Screened from Forest Soils of Mazandaran, Iran	83
E. Ghadiri - N.S. Naghavi - K. Ghaedi	
Spatial Distribution of Mercury Contamination in Soils around of Kerman Cement Plant	95
M. Yousefifard - A. Jafari	
Effect of Organic Matter Removal on Phosphorus Hysteresis Indices (HI) in Calcareous Soils	114
M. Mahdizadeh - A. Reyhanitabar - Sh. Oustan	
Soil Organic Matter Condition in Forest Stands of Arasbaran	127
H. Rezaei - A.A. Jafarzadeh- A. Alijanpour- F. Shahbazi- Kh. Valizadeh Kamran	
The Effect of <i>Bacillus</i> Bacteria on Phosphorus Release from Oil Refinery Plant-solid Waste in a Calcareous Soil	141
E. Hashempour- M.B. Farhangi- N. Ghorbanzadeh- M. Fazeli Sangani	
Isolation of Efficient Bacteria in Microbial-induced Calcite Precipitation and Evaluation of their Ability in Control of Windy Erosion of Saline Soils around Urmia Lake	154
M. Moinfar - M.H. Rasouli-Sadaghiani- M. Barin- F Asadzadeh	
The Effect of some Plant Growth Regulators and Surfactant on Safflower in Chromium Contaminated Soil	167
S. Keshavarz - R. Ghasemi-Fasaei	
Comparison of Different Methods for the Determination of Organic Carbon in Calcareous Soils under Different Land Uses of Lorestan Province	177
H. Sepahvand- M. Feizian- R. Mirzaeitalarposhti- T. Mueller	
Estimating the Soil Loss Tolerable (T-value) Using Linear and Regression Tree Methods	193
Y. Ostovari – A.A. Moosavi – H. Mozaffari	
The Effect of Particle Concentration and Sand Grain Size on Transport Breakthrough Curves and Retention Profiles of CMC-nZVI Particles in Saturated Media	207
A. Saberinasr - M. Nakhaei- M. Rezaei- S.M. Hosseini	
Genesis and Evolution of Exhumed Soils in Konarsandal and Daqyanous Archaeological Sites, Jiroft Area, Kerman Province	223
E. Soleimani Sardoo - M.H. Farpoor	
Analysis of Effect of the Climate Parameters Change on Runoff and Evapotranspiration of Mehrgerd Watershed	239
Z. Nouri- A. Talebi- B. Ebrahimi	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 34

No. 1

2020

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
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

Printed by: Ferdowsi University of Mashhad, Press.

Address: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 511 8787430

E-Mail: jsa3@um.ac.ir

Web Site: <http://jm.um.ac.ir>

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).