

عنوان مقالات

تخصیص بهینه مخازن ذخیره سطحی با استفاده از روش سلسله مراتب فازی (مطالعه موردی: سد مخزنی شهرچای ارومیه).....	۷۲۳
الهام رضایی - مجید منتصری - حسین رضایی	
مقایسه روش‌های کشت مستقیم و نشانی برنج تحت روش‌های مختلف آبیاری.....	۷۷۹
علیرضا کیانی - محمدرضا یزدانی - محمدتقی فیض بخش	
بررسی کارایی شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) به منظور ارزیابی بلندمدت تأثیرات انتقال آب بین حوضه‌ای با کمک روش‌های ناپارامتری و GIS (مطالعه موردی آبخوان یزد- اردکان).....	۷۹۱
حسین سروی صدرآباد- اصغر زارع چاهوکی	
توسعه روش روندیابی هیدرولیکی معکوس سیل در خشک‌رودها با در نظر گرفتن میزان نفوذ یا نشت.....	۸۰۵
علی اصغر خسروی - عاطفه پرورش ریزی - رضا براتی	
تأثیر سرباره مس مواد آلی بر شاخص‌های فیزیولوژیک کمبود آهن گیاه سورگوم (<i>Sorghum bicolor</i>).....	۸۲۳
الهام میرپاریزی - مجتبی بارانی مطلق - سید علیرضا موحدی نائینی - رضا قربانی نصرآبادی - سمیه بختیاری	
تأثیر نانو ذرات نقره بر فعالیت میکروبی و جمعیت باکتریایی یک خاک آهکی با استفاده از qPCR.....	۸۴۳
سکینه بالنده - امیر لکزیان - علی جوادمنش	
روش برآورد رطوبت خاک با استفاده از تکنیک سنجش از دور توسط ماهواره Landsat.....	۸۶۱
سید فرشید موسوی‌زاده - حسین انصاری - علیرضا فریدحسینی	
کاربرد سطح فاز زمین ریخت در افزایش خلوص واحدهای نقشه خاک در رودیکرد ژئودپولوژی.....	۸۷۳
فاطمه ابراهیمی میمند - حسن رمضانپور - نفیسه یغمائیان - کامران افتخاری	
تحلیل هواشناختی بارش‌های سیل آسا و فراگیر در جنوب شرق ایران.....	۸۹۱
مازیار محمدی - مهتری اکبری	
پیش‌نگری تغییرات قلمروی کشت خرماي گنطار و حلاوی در ایران در قرن بیست و یکم.....	۹۰۹
سیده مریم افضلی - جواد خوشحال دستجردی - عزیز تراهی	

Contents

Optimal Allocation of Surface Storage Tanks Using Fuzzy Hierarchy Method (Case Study: Shahrchay Storage Dam in Urmia).....	778
E. Rezaei - M. Montaseri - H. Rezaei	
Comparison of Rice Direct Seeding and Transplanting Methods under Different Irrigation Methods.....	790
A.R. Kiani - M.R. Yazdani - M.T. Feyzbakhsh	
Study of the Efficiency of Groundwater Quality Index to Evaluate the Long-term Effects of Inter-Basin Water Transfer Using Non-Parametric Methods and GIS (Case Study Yazd-Ardakan Aquifer).....	804
H. Sarvi Sadrabad - A. Zare Chahouki	
Development of Reverse Hydraulic Flood Routing Method in Ephemeral Rivers Considering Infiltration Rate.....	822
A.A. Khosravi - A. Parvaresh Rizi - R. Barati	
Effects of Copper Slag and Organic Matters on Physiological Indices of Iron Deficiency in Sorghum (<i>Sorghum bicolor</i>).....	841
E. Mirparizi - M. Barani Motlagh- S.A. Movahedi Naeini- R. Ghorbani Nasrabadi- S. Bakhtiary	
Effects of Silver Nanoparticles on Soil Microbial Activity and Bacterial Populations in a Calcareous Soil Using qPCR.....	859
S. Balandeh - A. Lakzian- A. Javadmanesh	
Soil Moisture Estimation Method Using Remote Sensing Technique by Landsat Satellite.....	872
S.F. Mousavizadeh - H. Ansari- A. Faridhosseini	
Increasing the Homogeneity of Soil Map Units Using the Level of Landform Phase in the Geopedologic Approach.....	890
F. Ebrahimi Meymand - H. Ramezanzpour- N. Yaghmaeian- K. Eftekhari	
Climatological Analysis of Extreme and Widespread Precipitations in Southeast of Iran.....	907
M. Moahmmadi -M. Akbary	
Predicting Changes in Cultivation of Gantar and Halawi Dates in Iran in the 21st Century.....	922
S.M. Afzali - J. Khoshhal Dastjerdi- A. Torahi	

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 35 شماره 6 بهمن - اسفند سال 1400

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

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولیزاده

استاد - تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

سر دبیر:

امیر فتوت

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیئت تحریریه:

اوستان، شاهین

استاد - علوم خاک (دانشگاه تبریز)

بذرافشان، جواد

دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)

تقوئیان، صالح

استادیار - آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، امریکا)

خراسانی، رضا

دانشیار - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

خرمالی، فرهاد

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

علیزاده، امین

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

فتوت، امیر

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

قدیری، حسین

استاد - خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)

لکزیان، امیر

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

لیاقت، عبدالمجید

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)

مساعدی، ابوالفضل

استاد - آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

موسوی بایگی، محمد

استاد - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

ناشر: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

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

پست الکترونیکی: jswa3@um.ac.ir

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

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

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

مندرجات

- 763 تخصیص بهینه مخازن ذخیره سطحی با استفاده از روش سلسله مراتب فازی (مطالعه موردی: سد مخزنی شهرچای ارومیه)
الهام رضایی - مجید منتصری - حسین رضایی
- 779 مقایسه روش‌های کشت مستقیم و نشائی برنج تحت روش‌های مختلف آبیاری
علیرضا کیانی - محمدرضا یزدانی - محمدتقی فیض بخش
- 791 بررسی کارایی شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) به منظور ارزیابی بلندمدت تأثیرات انتقال آب بین حوضه‌ای با کمک روش‌های ناپارامتری و GIS (مطالعه موردی آبخوان یزد - اردکان)
حسین سروی صدرآباد - اصغر زارع چاهوکی
- 805 توسعه روش روندیابی هیدرولیکی معکوس سیل در خشک‌رودها با درنظر گرفتن میزان نفوذ یا نشت
علی اصغر خسروی - عاطفه پرورش ریزی - رضا براتی
- 823 تأثیر سرباره مس مواد آلی بر شاخص‌های فیزیولوژیک کمبود آهن گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor*)
الهام میرپاریزی - مجتبی بارانی مطلق - سید علیرضا موحدی نائینی - رضا قربانی نصرآبادی - سمیه بختیاری
- 843 تأثیر نانو ذرات نقره بر فعالیت میکروبی و جمعیت باکتریایی یک خاک آهکی با استفاده از qPCR
سکینه بالنده - امیر لکزیان - علی جوادمنش
- 861 روش برآورد رطوبت خاک با استفاده از تکنیک سنجش از دور توسط ماهواره Landsat
سید فرشید موسوی‌زاده - حسین انصاری - علیرضا فریدحسینی
- 873 کاربرد سطح فاز زمین‌ریخت در افزایش خلوص واحدهای نقشه خاک در رودیکرد ژئودولوژی
فاطمه ابراهیمی میمند - حسن رمضانپور - نفیسه یغمائیان - کامران افتخاری
- 891 تحلیل هواشناختی بارش‌های سیل آسا و فراگیر در جنوب شرق ایران
مازیار محمدی - مه‌ری اکبری
- 909 پیش‌نگری تغییرات قلمروی کشت خرماي گنطار و حلاوی در ایران در قرن بیست و یکم
سیده مریم افضلی - جواد خوشحال دستجردی - عزیز تراهی

مقاله پژوهشی

تخصیص بهینه مخازن ذخیره سطحی با استفاده از روش سلسله مراتب فازی

(مطالعه موردی: سد مخزنی شهرچای ارومیه)

الهام رضایی^۱ - مجید منتصری^{۲*} - حسین رضایی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱

چکیده

اولویت‌بندی تخصیص بهینه آب مخازن ذخیره جریان سطحی برای مصارف مختلف (شرب، کشاورزی، صنعت، محیط‌زیست و ...) در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران به دلیل دامنه تغییرات و عدم قطعیت بالای جریان‌های ورودی به مخزن و وقوع خشکسالی‌های متناوب از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. بدین منظور روش سلسله مراتب فازی (FAHP) به‌عنوان یک روش فرمول‌بندی مناسب در اولویت‌بندی تخصیص آب در سیستم منابع آبی پیشنهاد و استفاده می‌شود. لذا در این مطالعه اولویت‌بندی تخصیص آب برای مصارف مختلف سد مخزنی شهرچای واقع در بالادست کلان‌شهر ارومیه، در یک مطالعه میدانی و با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی انجام پذیرفته است. این مطالعه میدانی بر اساس پرسش‌نامه از متخصصان و صاحب‌نظران صنعت آب منطقه بوده و مدل تصمیم‌گیری بر اساس داده‌های میدانی در یک فرآیند سلسله مراتبی فازی به ازای عوامل مؤثر کمی و کیفی توسعه یافته است. در فرایند مذکور، سه معیار اصلی اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی و چهار زیرمعیار درآمد، سطح زیر کشت، اشتغال‌زایی و جمعیت برای شش گزینه از آب‌بران کشاورزی، شرب، نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه، تغذیه آب زیرزمینی، صنعت و تفریحی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که معیار اقتصادی با وزن ۰/۴۷ نسبت به دو معیار اصلی دیگر بیشترین اهمیت را دارد. افزون بر آن تخصیص آب به بخش شرب شهری با وزن ۰/۳۳ در اولویت اول، کشاورزی، دریاچه ارومیه، صنعت، آب زیرزمینی و تفریحی به ترتیب در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. نتایج مذکور نشان از وابستگی شدید اقتصاد منطقه به توسعه صنعت کشاورزی و تولیدات آن بوده و تأمین آب شرب و کشاورزی و همچنین دریاچه ارومیه به ترتیب جهت تأمین آسایش، نیاز اصلی فعالیت‌های اقتصادی و حفظ اکوسیستم منطقه دارای اولویت اصلی در برنامه‌ریزی و مدیریت سد شهرچای ارومیه هستند.

واژه‌های کلیدی: تخصیص آب، سلسله مراتب، فازی، شهرچای، FAHP

مقدمه

دارای اولویت بالایی است (۱۸). سیستم مخازن ذخیره جریان سطحی (سدها) با اهداف مختلفی مانند تأمین تقاضا، کنترل سیلاب، تولید انرژی، حفظ محیط‌زیست و ... احداث می‌شوند و در اغلب مواقع یکی از منابع اصلی تأمین آب برای مصارف مختلف مانند شرب، کشاورزی، صنعت، نیاز زیست‌محیطی، تفریح و گردشگری و غیره در نقاط مختلف دنیا است (۱۶). لذا توسعه الگوی بهینه بهره‌برداری و اولویت‌بندی تخصیص در مخازن ذخیره خصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران با عدم قطعیت بالای جریان‌های ورودی به مخزن و وقوع خشکسالی‌های متناوب از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در این راستا روش سلسله مراتبی فازی به‌عنوان یک تکنیک با قابلیت لازم در اولویت‌بندی تخصیص پیشنهاد شده است (۲۰).

محدودیت منابع آب تجدید پذیر، توسعه زندگی شهری و افزایش تقاضا آب برای مصارف مختلف از یک‌سو و استفاده بی‌رویه و اختلافات عدیده بهره‌برداران از این منابع از سوی دیگر، توسعه پایدار سیستم‌های منابع آب و اولویت‌بندی تخصیص مصارف مختلف را اجتناب‌ناپذیر نموده است (۱۳). بدین منظور استفاده از روش‌های "تصمیم‌گیری گروهی" و "چندمعیاره" جهت پاسداری از حقوق تمام بهره‌برداران در اولویت‌بندی تخصیص آب از منابع آب مشترک

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب و استادان گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

(* - نویسنده مسئول: Email: m.montaseri@urmia.ac.ir

DOI: 10.22067/JSW.2021.68472.1018

سیلاب رودخانه توسعه دادند. در این مطالعه سیستم رودخانه به سه زیر سیستم با اهداف کنترل سیلاب خاص تقسیم و در نهایت، عملکرد مدل توسعه یافته با سه سیلاب تاریخی مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفت. روش تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی و کاربرد آن در مدیریت و کنترل سیل به کمک مخازن تأخیری توسط فو (۹) مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه معیارهای کمی هر جایگزین توسط اعداد فازی مثلثی و وزن هر معیار با اصطلاحات توصیفی تعریف شده و رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس درجه عضویت فازی و بدون نیاز به مقایسه اعداد فازی تعیین شده است. نتایج بیانگر مؤثر و انعطاف‌پذیر بودن روش پیشنهادی در مدیریت و کنترل سیلاب بود. لولی و همکاران (۱۹) با استفاده از یک روش FAHP^۲ به ارزیابی آسیب‌پذیری اکوسیستم و محیط زیست نواحی اطراف سد مخزنی دنجیانگو (DRA) در چین پرداختند. این مطالعه نشان داد که روش پیشنهادی یک روش مؤثر برای ارزیابی آسیب‌پذیری زیست‌محیطی بوده و نتایج آن انعکاس دقیق و واقعی از آسیب‌پذیری محیط‌زیست محدوده مطالعاتی را بیان می‌کند. قاسمی و همکاران (۱۱) به بررسی کاربرد روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در تعیین گزینه بهینه نمک‌زدایی از آب‌های لب‌شور پرداختند. گزینه‌های نمک‌زدایی مورد بررسی در این تحقیق شامل اسمز معکوس، الکترودیالیز، تقطیر ناگهانی، تقطیر چند مرحله‌ای، تراکم بخار و تبادل یونی بود. نتایج دلالت بر آن داشت که فرآیند الکترودیالیز وزن نهایی ۰/۲۵۵ مناسب‌ترین فرآیند نمک‌زدایی از آب‌های لب‌شور زیرزمینی برای منطقه مورد مطالعه است. تحلیل حساسیت فرآیند تصمیم‌گیری نیز نشان داد که مدل ارائه شده، در مقابل جابه‌جایی وزن معیارها از حساسیت پایینی برخوردار است. نادر و همکاران (۲۱) به بررسی تخصیص آب سد مهاباد پرداخته و در آن به منظور تعیین اولویت تخصیص آب و تأمین اهداف مذکور، از ترکیب روش‌های سلسله مراتبی فازی و برنامه‌ریزی آرمانی استفاده کردند. ساختار سلسله مراتبی دارای ۳ معیار و ۶ زیر معیار برای ۵ گزینه، به منظور تعیین اولویت تخصیص آب سد به گزینه‌های استفاده‌کننده طراحی شده بود و در نهایت گزینه تأمین آب بخش کشاورزی با وزن نهایی ۰/۳۶ نسبت به دیگر گزینه‌ها از ارجحیت بیشتری برخوردار بود. افزون بر این، الگوی کشت بهینه نشان داد که سطح زیر کشت گندم در تمامی اولویت‌ها بایستی از بیشترین مقدار برخوردار باشد. طالبی و همکاران (۲۹) در اولویت‌بندی تخصیص آب سد مخزنی سندنجد با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) به این نتیجه رسیدند که معیار اقتصادی با وزن جزئی ۰/۳۵۱ نسبت به دو معیار اجتماعی و محیط‌زیست بیشترین اهمیت را دارد. شهرکی و همکاران (۲۸) به بررسی

روش سلسله مراتبی AHP^۱ دربرگیرنده مجموعه‌ای از قضاوت‌ها و ارزش‌گذاری به یک شیوه منطقی است، به طوری که از یک طرف وابسته به تصورات شخصی در طرح‌ریزی سلسله مراتبی یک مسئله است و از طرف دیگر با منطق، درک و تجزیه برای تصمیم‌گیری و قضاوت نهایی مرتبط می‌شود (۱۴). از طرف دیگر سیستم‌های فازی، سیستم‌هایی مبتنی بر دانش و قواعد هستند و از مشخصه‌های آن‌ها توانایی تقسیم‌بندی اطلاعات می‌باشد و به علت بالا بودن قدرت تبیین بیشتر نسبت به یک عدد، در علوم مختلف از آن‌ها به منظور تصمیم‌گیری استفاده می‌شود (۲۴). با وجود مزایای بسیار AHP، به‌کارگیری این روش دارای محدودیت‌های زیر است: ۱) این روش اساساً در کاربردهای تصمیم‌گیری Crisp (غیر فازی) قابل استفاده است؛ ۲) مقیاس نامتعادل قضاوت را مورد بررسی قرار می‌دهد؛ ۳) عدم اطمینان‌های موجود در قضاوت‌های فردی را در نظر نمی‌گیرد؛ ۴) قضاوت‌های ذهنی، انتخاب و عملکرد تصمیم‌گیران تأثیر بسیار زیادی در نتایج آن دارد. به طوری که ارزیابی‌های افراد از شاخص‌های کیفی اغلب ذهنی و غیردقیق است. بنابراین AHP متعارف و کلاسیک، در دستیابی دقیق نیازمندی‌های تصمیم‌گیران ناکافی و ناکارآمد به نظر می‌رسد و قادر به انعکاس کامل تفکر بشری نیست (۳۱). به منظور مدل‌سازی این نوع از عدم اطمینان‌ها در ترجیحات افراد بشر، تئوری مجموعه‌های فازی با مقایسه‌های زوجی در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی ترکیب می‌شود. به این ترتیب درک دقیق‌تری از فرآیند تصمیم‌گیری ارائه شده حاصل می‌شود (۲۶). به منظور استفاده از مزایای هر دو روش فازی و AHP، همچنین غلبه بر نقاط ضعف آن‌ها، لارهون و پیدریز در سال ۱۹۸۳ اولین بار اصول منطق فازی را در تحلیل سلسله مراتبی بکار بردند (۱۷). روش‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی در سه دهه اخیر برای سیاست‌گذاری و مدیریت بهینه در سیستم‌های مختلف منابع آب در نقاط مختلف دنیا بکار گرفته شده که ذیلاً به مواردی در راستای این مطالعه اشاره شده است.

ساسیکمار و موجودمدار (۲۵) یک مدل چند هدفه فازی را برای مدیریت کیفی رودخانه‌ها در هند را پیشنهاد نمودند. در تحقیق ایشان، اهداف کیفی سازمان‌های مسئول حفاظت کیفی رودخانه و تخلیه‌کننده‌های آلاینده‌های مختلف به رودخانه به صورت فازی در نظر گرفته شد. نتایج مطالعه نشان داد که مدل چند هدفه فازی انعطاف‌پذیری لازم را برای سازمان حفاظت کیفی و تخلیه‌کننده‌های آلاینده‌ها فراهم کرده تا خواسته‌های خود را به طور مستقل مشخص کنند. چونتین (۸) بر اساس ویژگی‌های سیلاب‌های رودخانه یانگتسه و تئوری مجموعه‌های فازی، یک مدل بهینه فازی را برای مدیریت

پرداختند. در این مطالعه از ۱۰ پارامتر برای معیارهای تصمیم‌گیری استفاده گردید. مقادیر آن‌ها با استفاده از AHP و FAHP محاسبه و بر اساس تأثیر مقدار هر پارامتر بر روی لایه پهنه‌بندی، تمام لایه‌های پهنه‌بندی در دو لایه نهایی در GIS ادغام شدند. مقایسه‌ها نشان می‌دهد لایه نهایی FAHP نسبت به لایه نهایی AHP بیشتر با واقعیت مطابقت دارد. عباسی نیا و همکاران (۱) برای اولویت‌بندی اضطراری در صنعت پتروشیمی از رویکرد فرآیند تحلیل سلسله مراتب فازی - تاپسیس استفاده کردند. در این مطالعه رویکرد موارد اضطراری در صنعت پتروشیمی از جمله ذخیره انرژی در مواد شیمیایی، نشت هیدروژن در قسمت سیلندر و نشت شدیدی گاز در توربین‌های نیروگاهی با اولویت بالا مورد شناسایی قرار گرفته و بایستی در برنامه‌ریزی و مدیریت صنعت مذکور جهت کنترل شرایط و جلوگیری از بروز بحران مورد توجه قرار گیرد.

رودخانه شهرچای به دلیل قرار داشتن در مرکز سیاست‌گذاری و مدیریت صنعت آب استان آذربایجان غربی و از طرف دیگر با داشتن سد مخزنی چندمنظوره جهت تأمین آب شرب شهر ارومیه، آب کشاورزی بخشی از دشت وسیع ارومیه، حقایبه دریاچه ارومیه، نیاز محیط‌زیستی پایین‌دست و گردشگری (محل سد و مسیر رودخانه در داخل شهر ارومیه)، تفریحات آبی (ساحل دریاچه ارومیه و دریاچه‌های کوچک مسیر رودخانه در داخل شهر)، آب صنعت (صنایع تبدیلی محصولات کشاورزی) و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی دارای اهمیت بسیار بالایی بوده و به‌عنوان یک رودخانه شاخص از جنبه برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب‌های سطحی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه محسوب می‌شود. لذا در این پژوهش در راستای یک سیاست‌گذاری و مدیریت پایدار و استفاده بهینه از آب رودخانه شهرچای، اولویت‌بندی تخصیص آب رودخانه مذکور بین مصارف مختلف شرب، کشاورزی، صنعت، تفریحی، زیست‌محیطی و دریاچه ارومیه با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی (FAHP) و بر اساس یک مطالعه میدانی از کارشناسان و پژوهشگران صنعت آب در سازمان‌ها و مراکز مختلف استان آذربایجان غربی (جهاد کشاورزی، آب منطقه‌ای، دانشگاه ارومیه، محیط زیست و ستاد احیای دریاچه ارومیه) انجام پذیرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

حوضه آبریز رودخانه شهرچای در غرب دریاچه ارومیه و در استان آذربایجان غربی واقع شده است. مساحت حوضه آبریز رودخانه شهرچای در محل سد مخزنی ۳۹۶ کیلومتر مربع، حداقل ارتفاع حوضه ۱۲۷۸ (تخلیه به دریاچه) و حداکثر ارتفاع آن ۳۵۷۶ متر می‌باشد. رودخانه شهرچای از دو شاخه بنام‌های کاسه‌لو و میرسه

رویکردهای مدیریتی بهره‌برداری منابع آب منطقه سیستان با استفاده از تحلیل سلسله مراتب فازی پرداخت در این مطالعه از تکنیک تحلیل سلسله مراتبی فازی جهت تعیین اولویت منابع آب منطقه سیستان با رویکردهای مدیریتی اقتصادی، اجتماعی، فنی و زیست‌محیطی استفاده شده است. نتایج نشان داد بر اساس سه رویکرد اقتصادی، اجتماعی و فنی، بخش کشاورزی با بیشترین وزن، در اولویت اول قرار گرفته است. در رویکرد زیست‌محیطی، بخش محیط‌زیست (تالاب هامون) به‌عنوان گزینه برتر و کشاورزی و شرب در اولویت دوم و سوم قرار گرفت. با توجه به قرار گرفتن بخش کشاورزی در اولویت اول در سه رویکرد مدیریتی مسئولان به این بخش توجه ویژه‌ای دارند. بهمنی‌پور و همکاران (۶) به بررسی کاربرد روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در مدیریت یکپارچه منابع آب شهرستان نیریز پرداخته و نتایج نشان دادند که از بین معیارهای اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فنی، معیار اجتماعی بیشترین تأثیر را در فرآیند ارزیابی دارد و در میان راهکارهای تدوین شده، تغییر کاربری آب در رتبه نخست و بعد از آن کاهش تخلیه آب زیرزمینی در رتبه دوم قرار گرفت. آذرین‌وند و همکاران (۵) به بررسی مدیریت آب و محیط‌زیست در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتب فازی (FAHP) پرداخته، بر اساس اولویت‌بندی نهایی، مدیریت منابع انسانی و ارتقا مشارکت ذینفعان نسبت به سایر گزینه‌های استراتژیک برتر بوده است. امید و همکاران (۲۲) ارزیابی بهره‌وری آب در یک شبکه آبیاری در ایران با استفاده از روش‌های سلسله مراتبی (AHP) و شبکه عصبی (ANP) و مقایسه آن با روش‌های سلسله مراتب فازی (FAHP) و شبکه عصبی فازی (FANP) پرداختند. نتایج نشان داد بهره‌وری اقتصادی فیزیکی آب و بهره‌وری کل فاکتورها به‌عنوان مناسب‌ترین عوامل بهره‌وری آب و عملکرد است، در حالی که آب‌وهوا و قیمت آب مهم‌ترین عوامل مؤثر بر بهره‌وری آب بودند. عثمان و همکاران (۲۳) به شناسایی عوامل اصلی مؤثر در عدم تعادل جریان‌های حمل‌ونقل در بندرهای کوچک در مقیاس بزرگ در مالزی با رتبه‌بندی همه عوامل ممکن با استفاده از روش تصمیم‌گیری سیستماتیک معروف به FAHP پرداختند. نتایج نشان داد که "عوامل اقتصادی" عامل اصلی این عدم تعادل در بنادر کوچک مالزی می‌باشد. شاهر و همکاران (۲۷) به بررسی مدیریت تلفات آب در سیستم‌های آبرسانی با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداختند. در این بررسی روش سلسله مراتبی AHP با روش سلسله مراتب فازی FAHP مورد مقایسه قرار گرفت و تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که رتبه‌بندی استراتژی‌ها نسبت به وزن معیارهای با اهمیت بالاتر حساس است و توانایی FAHP برای مقابله با مسائل پیچیده در مدیریت اتلاف آب بیشتر می‌باشد. خاشی و همکاران (۱۵) به بررسی دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP و FAHP برای تعیین مناطق مناسب برای برداشت آب آشامیدنی

ارومیه (۴ عدد پرسشنامه). پرسشنامه‌های مذکور جهت وزن‌دهی معیارها و گزینه‌ها شامل ۳ معیار، ۴ زیرمعیار و ۶ گزینه مورد استفاده قرار گرفته و میزان اهمیت آن‌ها به صورت ۹ گزینه بیانی مطابق جدول (۱) توصیف شده است.

تحلیل سلسله مراتبی فازی FAHP

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی منعکس‌کننده رفتار طبیعی و تفکر انسانی بوده و دارای یک مبنای تئوریک قوی و بر اساس اصول بدیهی بنا شده است. این روش احساسات و منطق افراد را در رابطه با موضوعات مورد نظر منعکس نموده و سپس قضاوت‌های مختلف افراد را در قالب نتیجه‌ای با هم ترکیب می‌نماید که با انتظارات درونی افراد همخوانی دارد. در حالی که قضاوت‌های ذهنی از دیدگاه ریاضی دقیق نبوده و امکان ابهام و عدم قطعیت در نتایج را به وجود می‌آورد. لذا روش تحلیل سلسله مراتبی فازی جهت رفع یا حل محدودیت مذکور در بررسی مسائل سلسله مراتبی توسعه یافته است (۱۰). در این شرایط، تصمیم‌گیرندگان معمولاً قضاوت خود را در قالب یک بازه به جای یک ارزش ثابت انجام می‌دهند که بسیار مطمئن‌تر است و همچنین تصمیم‌گیرنده قادر نیست ترجیحات صریحی در خاصیت فازی فرآیند مقایسه داشته باشد (۱۰).

تشکیل یافته است. دشت تحت پوشش رودخانه شهرچای (دشت ارومیه) در موقعیت $37^{\circ} 30'$ تا $36^{\circ} 37'$ عرض شمالی قرار گرفته است و از غرب به روستای بند و ارتفاعات آن، از شرق به دریاچه ارومیه، از شمال به اراضی آبخور روضه‌چای و از جنوب به اراضی آبخور رودخانه باراندوزچای محدود می‌باشد. رودخانه شهرچای دائمی بوده و از ارتفاعات مرزی ایران و ترکیه بنام کوه شهیدان سرچشمه می‌گیرد و بعد از امتداد یافتن در جهت غرب به شرق از شهر ارومیه گذشته و وارد دشت ارومیه گردیده و سرانجام در پایین دست ناحیه کشتیبان به دریاچه ارومیه تخلیه می‌گردد (شکل ۱). احداث سد شهرچای بر روی این رودخانه در بالادست شهر ارومیه و گذر رودخانه از میانه شهر ارومیه، بحث نیاز زیست‌محیطی رودخانه و دریاچه ارومیه، اولویت تخصیص آب در این رودخانه را جهت برنامه‌ریزی پایدار یا درازمدت به صورت جدی مطرح نموده است (۳). داده‌ها این تحقیق بر اساس یک مطالعه میدانی پرسشنامه‌ای از متخصصین و کارشناسان و پژوهشگران صنعت آب منطقه گردآوری و تعیین شده که کلاً شامل ۴۰ پرسشنامه با تفکیک سازمانی زیر است: سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان غربی (۱۰ عدد پرسشنامه) - شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان غربی (۱۰ عدد پرسشنامه) - دانشکده‌های کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه ارومیه (۱۰ عدد پرسشنامه) - اداره کل حفاظت محیط زیست آذربایجان غربی (۶ عدد پرسشنامه) - دفتر استانی ستاد احیای دریاچه



شکل ۱- نمای کلی رودخانه شهرچای
Figure 1- General view of Shahrchay river

جدول ۱- طیف فازی و عبارت کلامی متناظر

Table 1- Fuzzy range and corresponding verbal expression

عدد فازی Fuzzy number	عبارات کلامی Verbal expressions
(1.00 , 1.00 , 1.00)	ترجیح برابر (Equal preference)
(1.00 , 1.50 , 1.50)	ترجیح کم تا متوسط (Low to medium preference)
(1.00 , 2.00 , 2.00)	ترجیح متوسط (Medium preference)
(3.00 , 3.50 , 4.00)	ترجیح متوسط تا زیاد (Medium to high preference)
(3.00 , 4.00 , 4.50)	ترجیح زیاد (High preference)
(3.00 , 4.50 , 5.00)	ترجیح زیاد تا خیلی زیاد (High preference to very high)
(5.00 , 5.50 , 6.00)	ترجیح خیلی زیاد (Too much preference)
(5.00 , 6.00 , 7.00)	ترجیح خیلی زیاد تا کاملاً زیاد (Preference is very high to quite high)
(5.00 , 7.00 , 9.00)	ترجیح کاملاً زیاد (Quite a lot of preference)

$$A_{n \times n} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن \tilde{a}_{ij} ($\tilde{a}_{ii} = 1, \tilde{a}_{ij} \neq 0, \tilde{a}_{ji} = 1/\tilde{a}_{ij}$) اهمیت نسبی اولویت i نسبت به اولویت j می‌باشد. میانگین حسابی نظرات تصمیم‌گیرندگان از رابطه ۲ بدست می‌آید:

$$\tilde{a}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K \tilde{a}_{ij}^k}{K}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

که در رابطه فوق K تعداد تصمیم‌گیرندگان می‌باشد (۴).

گام ۴ - محاسبه مجموع عناصر سطر:

$$\tilde{M}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

گام ۵- مقدار ترکیبی فازی \tilde{S}_i نسبت به i امین معیار (نرمالیز کردن) با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود (۷ و ۲۷).

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right)^{-1} \quad (4)$$

که در آن \otimes به معنی ضرب گسترده دو عدد فازی است و هر یک از اعداد فازی به دست آمده، نشان‌دهنده وزن نسبی یک معیار (یا گزینه) نسبت به یک معیار دیگر می‌باشد. در این رابطه M_{gi}^j اعداد فازی مثلثی ماتریس مقایسه‌های زوجی هستند. g بیانگر شماره سطر مقایسه زوجی $A_{n \times n}$ خواهد بود (۲، ۷ و ۳۰).

تحلیل توسعه‌ای یکی از ساده‌ترین و متداول‌ترین روش‌های تحلیل چندمعیاره فازی بوده که مبتنی بر استفاده از اعداد فازی مثلثی و مقایسه‌های زوجی است و توسط چانگ در سال ۱۹۹۲ توسعه یافته است. در این روش پس از تشکیل سلسله مراتب تصمیم‌گیری، با توجه به میزان اهمیت هر معیار یا گزینه یک عدد فازی مثلثی به آن اختصاص می‌یابد و ماتریس‌های مقایسه زوجی برای هر سطح از سلسله مراتب ایجاد می‌شود. عدد فازی مثلثی نوع خاصی از اعداد فازی است که با استفاده از سه تایی مرتب (l, m, u) تعریف می‌گردد. در هر عدد فازی، l حد پایین، m مقدار میانی، u حد بالایی است (۷). مراحل مختلف روش توسعه چانگ به صورت ذیل است:

گام ۱- ترسیم درخت سلسله مراتبی: در هر تحلیل چندمعیاره رسم نمودار سلسله مراتبی (درخت تصمیم) یکی از گام‌های اساسی اولیه است. در این مرحله ساختار سلسله مراتب تصمیم با استفاده از سطوح هدف، معیار و گزینه ترسیم می‌شود (۷، ۴).

گام ۲- تعریف اعداد فازی به منظور انجام مقایسه‌های زوجی: در این مرحله لازم است اعداد فازی را برای انجام مقایسه‌های زوجی تعریف کرد تا خبرگان طبق آن نسبت به ارائه پاسخ‌های خود اقدام نمایند (۷).

گام ۳- تشکیل ماتریس مقایسات زوجی: با استفاده از نظر تصمیم‌گیرنده، ماتریس مقایسات با بهره‌گیری از اعداد فازی مثلثی بر اساس میانگین حسابی نظرات چندین تصمیم‌گیرنده مطابق رابطه ۱ تشکیل می‌شود. اگر n اولویت وجود داشته باشد، اندازه ماتریس مقایسه زوجی $A_{n \times n}$ خواهد بود (۲، ۷ و ۳۰).

می‌باشد. برای مقایسه M1 و M2 محاسبه هر دو مقدار $V(\tilde{M}_2 \geq \tilde{M}_1)$ و $V(\tilde{M}_1 \geq \tilde{M}_2)$ ضروری است (۷ و ۲۷).

گام ۷- درجه احتمال بزرگ‌تر بودن یک عدد فازی محدب (M) از K عدد فازی محدب دیگر $(M_i : i = 1, 2, \dots, k)$ به صورت زیر تفکیک می‌شود (۷ و ۲۲):

$$d'(A) = V(M \geq M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_k) \\ = V[(M \geq M_1) \text{ and } (M \geq M_2) \text{ and } \dots \text{ and } (M \geq M_k)] \quad (11)$$

گام ۸- با نرمال کردن بردار وزن‌ها، وزن‌های غیر فازی به دست می‌آیند (۷ و ۲۷).

$$w = \left[\frac{d'(A_1)}{\sum_{i=1}^n d'(A_i)} \cdot \frac{d'(A_2)}{\sum_{i=1}^n d'(A_i)} \cdot \dots \cdot \frac{d'(A_n)}{\sum_{i=1}^n d'(A_i)} \right]^T \quad (12)$$

در این رابطه A_i بیانگر معیار یا گزینه i ام از جدول ماتریس مقایسات زوجی فازی می‌باشد. به این ترتیب با استفاده از رابطه ۱۲ وزن نهایی گزینه‌ها به دست می‌آید. با تکرار این فرآیند، اوزان معیار و زیرمعیارها نیز به دست می‌آیند.

گام ۹- ترکیب اوزان: با ترکیب وزن‌های گزینه و معیارها، وزن‌های نهایی به دست می‌آید.

لازم به یادآوری است که سازگاری ماتریس‌های مقایسه زوجی در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یکی از مهم‌ترین موضوعاتی است که بایستی همواره در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ شود. گاگوس و بوچر (۱۹۹۸) روشی را برای محاسبه درجه سازگاری ماتریس‌های مقایسه‌های زوجی فازی ارائه نموده‌اند (۱۲). در این روش به منظور بررسی سازگاری، لازم است از هر ماتریس مقایسه زوجی \tilde{A}_{nm} ، دو ماتریس مجزا A^g و A^m تشکیل شود. ماتریس A^m از مقادیر میانی ترجیحات هر خبره (مقادیر میانی اعداد فازی مثلثی)، $A^m = [a_{ijm}]$ حاصل می‌گردد. ماتریس دوم A^g ، نیز از میانگین هندسی حد بالا و حد پایین اعداد فازی مثلثی ایجاد می‌شود:

و i و j به ترتیب، نشان‌دهنده گزینه‌ها و شاخص‌ها هستند. مقادیر $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ و $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ در رابطه ۴ به صورت زیر محاسبه می‌شود (۷ و ۲۷):

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left(\sum_{j=1}^m u_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m l_j \right) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left(\sum_{i=1}^n u_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n l_i \right) \quad (6)$$

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (7)$$

در این صورت رابطه ۴ به ترتیب زیر به دست می‌آید (۷ و ۲۷):

$$\tilde{S}_i = \left(\frac{u_i}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{l_i}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (8)$$

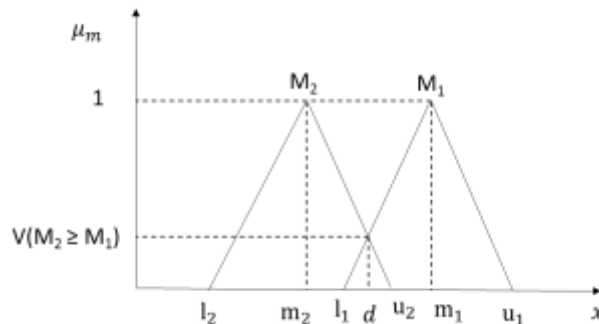
گام ۶- تعیین درجه احتمال بزرگ‌تر بودن: چنانچه \tilde{M}_1 و \tilde{M}_2 دو عدد فازی مثلثی باشند درجه بزرگ‌تر بودن عدد مثلثی فازی $\tilde{M}_2 = (l_2, m_2, u_2)$ نسبت به عدد مثلثی فازی $\tilde{M}_1 = (l_1, m_1, u_1)$ با استفاده از رابطه ۹ تعریف می‌شود (۷ و ۲۷).

$$V(\tilde{M}_2 \geq \tilde{M}_1) = \text{sub}_{y \geq x} [\min(\mu_{\tilde{M}_1}(x) \cdot \mu_{\tilde{M}_2}(y))] \quad (9)$$

که در آن x و y ارزش توابع عضویت هر معیار روی محور تابع فازی به شمار می‌روند. $\mu_{\tilde{M}_k}$ درجه عضویت عدد فازی \tilde{M}_k می‌باشد (k تعداد اعداد فازی محدب). بنابراین رابطه (۹) این گونه بازنویسی می‌شود (۷ و ۲۷):

$$V(\tilde{M}_2 \geq \tilde{M}_1) = \text{hgt}(\tilde{M}_1 \cap \tilde{M}_2) = \mu_{M_2}(d) \\ = \begin{cases} 1 & m_2 > m_1 \\ 0 & l_1 > u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (10)$$

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد، d مختصات بالاترین نقطه (hgt) در منطقه اشتراک و برخورد دو تابع عضویت $\mu_{\tilde{M}_1}$ و $\mu_{\tilde{M}_2}$



شکل ۲- درجه امکان $V(M_2 \geq M_1)$

Figure 2- Possibility degree

تجدیدنظر نماید و در صورتی که تنها CR^g یا CR^m بیشتر از ۰/۱ بود، تصمیم‌گیرنده تجدیدنظر در مقادیر میانی (حدود) قضاوت‌های فازی را انجام می‌دهد (۱۲).

جدول ۲- شاخص‌های تصادفی (RI)
Table 2- Random Indicators (RI)

اندازه ماتریس (Matrix size)	RI^m	RI^g
1	0	0
2	0	0
3	0.49	0.18
4	0.79	0.26
5	1.03	0.36
6	1.20	0.38
7	1.29	0.41
8	1.34	0.42
9	1.38	0.43
10	1.41	0.46
11	1.42	0.45
12	1.45	0.48
13	1.46	0.47
14	1.49	0.48
15	1.50	0.48

مدل توسعه داده شده در این مطالعه مطابق مراحل زیر انجام پذیرفته است. در مرحله اول ساختار مسئله با تعیین اولویت تخصیص آب بهره‌برداران، معیارها، زیرمعیارها و سایر عوامل تعیین گردید و سپس سلسله مراتب تصمیم‌گیری بر مبنای ساختمان مسئله (هدف، معیارها، زیرمعیارها، عوامل و گزینه‌ها به ترتیب در سطح اول تا پنجم) تعریف شد. نمودار ساختار سلسله مراتبی اولویت تخصیص سد شهرچای در شکل ۳ ارائه شده است. در ساختار اولویت‌بندی مذکور، هدف در سطح اول یعنی تخصیص بهینه یا مناسب آب سد مخزنی شهرچای برای بهره‌برداران مختلف تعیین شده و در سطح دوم، سه معیار اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به‌عنوان معیارهای اصلی منظور شده است. در سطح سوم، "سطح زیر کشت منطقه و درآمد ناخالص" و "اشتغال‌زایی و جمعیت" به ترتیب به‌عنوان زیرمعیارهای دو معیار اقتصادی و اجتماعی در نظر گرفته شده است. بهره‌برداران اصلی یعنی بخش‌های کشاورزی، شرب شهری، تفریحی و گردشگری، صنعت، نیاز محیط‌زیستی دریاچه ارومیه و آب زیرزمینی سطح چهارم (گزینه‌ها) ساختار مسئله تشکیل داده است. در مرحله بعد بر اساس داده‌های میدانی یا پرسشنامه‌ها معیارها، زیرمعیارها و عوامل به‌صورت دوه‌دو با استفاده از مقایسه‌های زبانی و فازی پیشنهادی در جدول ۱، مورد مقایسه قرار گرفتند و اولویت مصرف آب نسبت به هر معیار یا زیرمعیار یا عامل به ازای اعداد مثلثی فازی تعیین و رتبه وزنی‌ها هرکدام آن‌ها با استفاده از روش توسعه‌ای چانگ برآورد گردید. در مرحله سوم رتبه‌بندی نهایی

$$A^g = \sqrt{a_{iju} \cdot a_{ijl}} \quad (13)$$

که در آن a_{ijl} حد پایین عدد اولویت معیار i ام در مقابل معیار j ام، a_{ijm} حد وسط عدد اولویت معیار i ام در مقابل معیار j ام، a_{iju} حد بالای عدد اولویت معیار i ام در مقابل معیار j ام می‌باشد. برای یافتن نرخ سازگاری، بردار وزن هر یک از این دو ماتریس باید محاسبه شود. از آنجا که این ماتریس‌ها شامل داده‌های عددی (غیر فازی) هستند، می‌توان از روش ساعتی برای محاسبه بردار وزن آن‌ها استفاده نمود. لذا بردارهای اوزان، W^g و W^m از روابط ذیل به دست می‌آیند:

$$w^m = (w_i^m) \quad \text{where} \quad w_i^m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ijm}}{\sum_{i=1}^n a_{ijm}} \quad (14)$$

$$w^g = (w_i^g) \quad \text{where} \quad w_i^g = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\sqrt{a_{iju} \cdot a_{ijl}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{a_{iju} \cdot a_{ijl}}} \quad (15)$$

که در این روابط n بعد ماتریس است. بزرگ‌ترین مقدار ویژه (λ_{max}) برای هر کدام از ماتریس‌ها از روابط ذیل محاسبه می‌شود:

$$\lambda_{max}^m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ijm} \frac{w_j^m}{w_i^m} \quad (16)$$

$$\lambda_{max}^g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sqrt{a_{iju} \cdot a_{ijl}} \frac{w_j^g}{w_i^g} \quad (17)$$

طبق روش ساعتی، شاخص سازگاری (CI) که انحراف از سازگاری کامل را نشان می‌دهد، به ترتیب ذیل محاسبه می‌گردد (۱۲) و (۲۲):

$$CI^m = \frac{(\lambda_{max}^m - n)}{(n - 1)} \quad (18)$$

$$CI^g = \frac{(\lambda_{max}^g - n)}{(n - 1)} \quad (19)$$

در این روابط CI^m شاخص سازگاری مقادیر میانی اعداد فازی مثلثی و CI^g شاخص سازگاری حد بالا و پایین اعداد فازی مثلثی می‌باشد. با محاسبه نرخ ناسازگاری (CR) برای دو ماتریس بر اساس روابط زیر آن‌ها را با آستانه ۰/۱ مقایسه می‌کنیم:

$$CR^m = \frac{CI^m}{RI^m} \quad (20)$$

$$CR^g = \frac{CI^g}{RI^g} \quad (21)$$

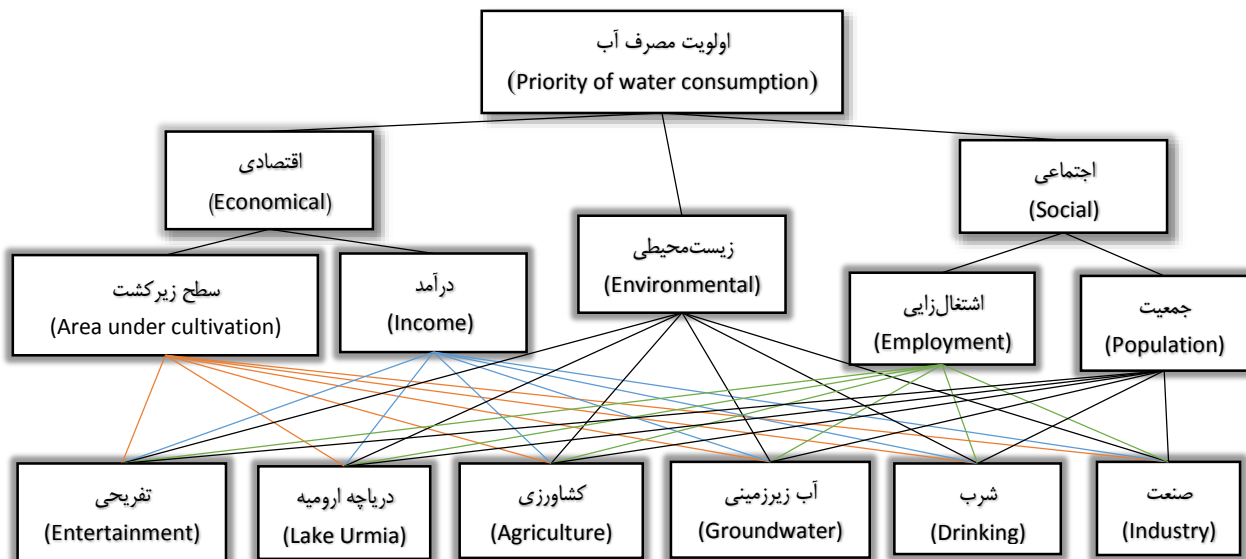
در این روابط RI^m شاخص نسبت یک ماتریس تصادفی مقادیر میانی اعداد فازی مثلثی و RI^g شاخص نسبت یک ماتریس تصادفی حد بالا و پایین اعداد فازی مثلثی می‌باشد، که با استفاده از اطلاعات ارائه شده در جدول ۲ به دست می‌آید. شاخص‌های تصادفی CR^m و CR^g توسط گاگوس و بوچر در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است. در صورتی که هر دو نرخ ناسازگاری هر ماتریس مقایسه زوجی کمتر از ۰/۱ بودند، ماتریس فازی سازگار است. در صورتی که هر دو بیشتر از ۰/۱ بودند، از تصمیم‌گیرنده تقاضا می‌شود تا در اولویت‌های ارائه شده

زوجی حاصل به ترتیب برابر ۰/۰۱۹ و ۰/۰۱۳ (کمتر از ۰/۱) به دست آمده که نشان دهنده سازگاری قضاوت یا نظر شرکت کنندگان بوده و استفاده از داده‌های میدانی را در ادامه فرآیند تحلیل بالمانع نموده است. جدول ۴ نیز مقادیر برآوردی درجه ارجحیت یا ارزش جزئی و وزن‌های غیر فازی یا نهایی سه معیار اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیست را بر اساس روابط ۱۰ تا ۱۲ نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که معیار اقتصادی با بیشترین وزن نهایی یعنی ۰/۴۷ و با اختلاف قابل توجهی از دو معیار دیگر نقش اصلی و ویژه در اولویت‌بندی مصرف آب در محدوده مطالعاتی داشته و معیار محیط‌زیست نیز با وزن نهایی بیش از دو برابر معیار اجتماعی در رتبه بعدی قرار گرفته است.

اولویت تخصیص آب بر اساس وزن نهایی معیارها یا اولویت‌ها در مرحله قبل تعیین و گزینه برتر مشخص شده است. ضمناً در انتها یک آنالیز حساسیت تغییر وزن معیارها و فرآیند تصمیم‌گیری در مسئله انجام پذیرفته است.

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج مراحل مختلف تحلیل سلسله مراتبی فازی اولویت‌بندی تخصیص آب سد مخزنی شهرچای مطابق ۹ گام روش حل ارائه شده است. جدول ۳ مقادیر ماتریس مقایسه زوجی و مقادیر برآوردی میانگین حسابی، مجموع عناصر و ترکیب فازی (نرمالیزه شده) بر اساس داده میدانی و روابط ۱ الی ۴ را نشان می‌دهد. ضمناً مقادیر حداکثر نرخ ناسازگاری CR^g و CR^m ماتریس‌های مقایسه



شکل ۳- ساختار سلسله مراتبی به منظور اولویت‌بندی تخصیص آب بهره‌برداران یا مصرف‌کنندگان سد شهرچای

Figure 3- Hierarchical structure in order to prioritize the allocation of water to users or consumers of Shahrchai Dam

جدول ۳- ماتریس مقایسه‌های دوجه‌دوی معیارها

Table 3- Pairwise comparison matrix of criteria

	اقتصادی Economical	اجتماعی Social	زیست محیطی Environmental	مجموع Total	نرمالیزه شده Normalized
اقتصادی (Economical)	(1.00,1.00,1.00)	(1.00,2.00,2.00)	(1.00,1.50,1.50)	(3.00,4.50,4.5)	(0.26,0.44,0.59)
اجتماعی (Social)	(0.50,0.50,1.00)	(1.00,1.00,1.00)	(0.50,0.50,1.00)	(2.00,2.00,3.00)	(0.17,0.19,0.39)
زیست محیطی (Environmental)	(0.67,0.67,1.00)	(1.00,2.00,2.00)	(1.00,1.00,1.00)	(2.67,3.67,4.00)	(0.23,0.36,0.52)
مجموع (Total)				(7.67,10.67,11.50)	

جدول ۴- محاسبه درجه ارجحیت زیرمعیارها نسبت به اولویت مصرف آب

Table 4- Calculating preference degree of sub-criteria relative to water consumption priority

	اقتصادی Economical	اجتماعی Social	زیست‌محیطی Environmental	درجه بزرگ‌تری نهایی Greater degree of finality	اوزان نرمالیزه شده Normalized weights
اقتصادی (Economical)	-	1.00	1.00	1.00	0.47
اجتماعی (Social)	0.35	-	0.49	0.35	0.16
زیست‌محیطی (Environmental)	0.76	1.00	-	0.76	0.36
مجموع (Total)				2.11	1.00

ماتریس مقایسه زوجی (جدول ۵، ۶ و ۸) نرخ ناسازگاری تمام زیرمعیارها و گزینه‌ها کمتر از ۰/۱ بوده که نشان از سازگاری داده‌های میدانی برای تکمیل فرایند اولویت‌بندی مصارف آب سد مخزنی شهرچای است. وزن جزئی هر یک از گزینه‌ها برای هر یک از زیرمعیارها در جدول ۹ ارائه شده است.

وزن نهایی هر یک از گزینه‌ها که حاصل ترکیب خطی وزن‌های نسبی گزینه، زیرمعیارها و معیارها به دست آمده، به ترتیب سه اولویت اول تخصیص آب سد مخزنی شهرچای را شرب، کشاورزی و محیط‌زیست تعیین نموده (شکل ۴) که در راستای تأکید بر پایه‌های اصلی یک توسعه پایدار (زندگی، تولید و محیط‌زیست) در منطقه مطالعاتی است.

مراحل محاسبات فوق جهت وزن‌دهی و تعیین وزن نهایی معیارهای سه‌گانه مسئله، برای زیرمعیارها (سطح زیر کشت، درآمد، اشتغال‌زایی و جمعیت) و گزینه‌های (تفریحی، حقایبه دریاچه ارومیه، کشاورزی، آب زیرزمینی، شرب و صنعت) مسئله نیز انجام گرفته و نتایج آن یعنی ماتریس مقایسه زوجی و نرمالیزه شده برای زیرمعیارهای اقتصادی و اجتماعی به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. بر اساس نتایج، اولویت‌بندی زیرمعیارها (جدول ۷) بیانگر رتبه اول کسب درآمد یا بازده اقتصادی در تخصیص آب منطقه مطالعاتی است. لازم به ذکر است که وزن‌های قطعی غیر فازی یا نهایی زیرمعیارها از حاصل ضرب وزن نهایی جزئی آن‌ها در وزن نهایی معیارها حاصل شده است. ماتریس مقایسه زوجی گزینه‌های هر یک از زیرمعیارها در جدول ۸ ارائه شده است. بر اساس نتایج

جدول ۵- میانگین مقایسه‌های زوجی زیرمعیارها

Table 5- Average of couple comparisons of sub-criteria

اقتصادی (Economical)	درآمد Income	سطح زیر کشت Area under cultivation	مجموع Total	نرمالیزه شده Normalized weights
درآمد (Income)	(1.00,1.00,1.00)	(1.00,1.50,1.50)	(2.00,2.50,2.50)	(0.44,0.60,0.68)
سطح زیر کشت (Area under cultivation)	(0.67,0.67,1.00)	(1.00,1.00,1.00)	(1.67,1.67,2.00)	(0.37,0.40,0.55)
مجموع (Total)			(3.67,4.17,4.50)	

جدول ۶- میانگین مقایسه‌های زوجی زیرمعیارها

Table 6- Average of couple comparisons of sub-criteria

اجتماعی Social	جمعیت Population	اشتغال‌زایی Employment	مجموع Total	نرمالیزه شده Normalized weights
جمعیت (Population)	(1.00,1.00,1.00)	(0.50,0.50,1.00)	(1.50,1.50,2.00)	(0.30,0.33,0.57)
اشتغال‌زایی (Employment)	(1.00,2.00,2.00)	(1.00,1.00,1.00)	(2.00,3.00,3.00)	(0.40,0.67,0.87)
مجموع (Total)			(3.50,4.50,5.00)	

جدول ۷- وزن جزئی یا نرمالیز شده و وزن نهایی هر زیرمعیار

Table 7- Partial or normalized weight and final weight of each sub-criterion

معیار Criterion	اجتماعی Social		اقتصادی Economical	
	جمعیت (Population)	اشتغال‌زایی (Employment)	درآمد (Income)	سطح زیر کشت (Area under cultivation)
وزن جزئی (Partial weight)	0.254	0.746	0.749	0.251
وزن قطعی (Definite weight)	0.042	0.123	0.355	0.119

جدول ۸- میانگین مقایسه‌های زوجی گزینه‌ها

Table 8- Average of couple comparisons of options

زیست‌محیطی Environmental	کشاورزی Agriculture	آب زیرزمینی Groundwater	صنعت Industry	دریاچه ارومیه Lake Urmia	شرب Drinking	تفریحی Entertainment
کشاورزی (Agriculture)	(1.00,1.00,1.00)	(1.00,1.50,1.50)	(1.00,2.00,2.00)	(0.25,0.29,0.33)	(0.25,0.29,0.33)	(0.67,0.67,1.00)
آب زیرزمینی (Groundwater)	(0.67,0.67,1.00)	(1.00,1.00,1.00)	(1.00,1.50,1.50)	(0.50,0.50,1.00)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,2.00,2.00)
صنعت (Industry)	(0.50,0.50,1.00)	(0.67,0.67,1.00)	(1.00,1.00,1.00)	(0.25,0.29,0.33)	(0.25,0.29,0.33)	(0.50,0.50,1.00)
دریاچه ارومیه (Lake Urmia)	(3.00,3.50,4.00)	(1.00,2.00,2.00)	(3.00,4.00,4.50)	(1.00,1.00,1.00)	(1.00,2.00,2.00)	(3.00,3.50,4.00)
شرب (Drinking)	(3.00,3.50,4.00)	(3.00,3.50,4.00)	(3.00,4.00,4.50)	(0.50,0.50,1.00)	(1.00,1.00,1.00)	(3.00,3.50,4.00)
تفریحی (Entertainment)	(1.00,1.50,1.50)	(0.50,0.50,1.00)	(1.00,2.00,2.00)	(0.25,0.29,0.33)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,1.00,1.00)
		سازگار (Compatible)	CR ^s =0.081	CR ^m =0.046		

درآمد Income	کشاورزی Agriculture	آب زیرزمینی Groundwater	صنعت Industry	دریاچه ارومیه Lake Urmia	شرب Drinking	تفریحی Entertainment
کشاورزی (Agriculture)	(1.00,1.00,1.00)	(3.00,3.50,4.00)	(1.00,2.00,2.00)	(3.00,3.50,4.00)	(1.00,2.00,2.00)	(3.00,3.50,4.00)
آب زیرزمینی (Groundwater)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,1.00,1.00)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,2.00,2.00)	(0.50,0.50,1.00)	(1.00,1.50,1.50)
صنعت (Industry)	(0.50,0.50,1.00)	(3.00,3.50,4.00)	(1.00,1.00,1.00)	(3.00,3.50,4.00)	(1.00,2.00,2.00)	(3.00,3.50,4.00)
دریاچه ارومیه (Lake Urmia)	(0.25,0.29,0.33)	(0.50,0.50,1.00)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,1.00,1.00)	(0.25,0.29,0.33)	(0.50,0.50,1.00)
شرب (Drinking)	(0.50,0.50,1.00)	(1.00,2.00,2.00)	(0.50,0.50,1.00)	(3.00,3.50,4.00)	(1.00,1.00,1.00)	(3.00,3.50,4.00)
تفریحی (Entertainment)	(0.25,0.29,0.33)	(0.67,0.67,1.00)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,2.00,2.00)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,1.00,1.00)
		سازگار (Compatible)	CR ^s =0.045	CR ^m =0.032		

سطح زیر کشت Area under cultivation	کشاورزی Agriculture	آب زیرزمینی Groundwater	صنعت Industry	دریاچه ارومیه Lake Urmia	شرب Drinking	تفریحی Entertainment
کشاورزی (Agriculture)	(1.00,1.00,1.00)	(1.00,2.00,2.00)	(1.00,2.00,2.00)	(1.00,2.00,2.00)	(1.00,2.00,2.00)	(3.00,3.50,4.00)
آب زیرزمینی (Groundwater)	(0.50,0.50,1.00)	(1.00,1.00,1.00)	(1.00,2.00,2.00)	(0.50,0.50,1.00)	(0.50,0.50,1.00)	(3.00,3.50,4.00)
صنعت (Industry)	(0.50,0.50,1.00)	(0.50,0.50,1.00)	(1.00,1.00,1.00)	(0.50,0.50,1.00)	(0.50,0.50,1.00)	(3.00,3.50,4.00)
دریاچه ارومیه (Lake Urmia)	(0.50,0.50,1.00)	(1.00,2.00,2.00)	(1.00,2.00,2.00)	(1.00,1.00,1.00)	(1.00,2.00,2.00)	(3.00,3.50,4.00)
شرب (Drinking)	(0.50,0.50,1.00)	(1.00,2.00,2.00)	(1.00,2.00,2.00)	(0.50,0.50,1.00)	(1.00,1.00,1.00)	(3.00,3.50,4.00)
تفریحی (Entertainment)	(0.25,0.29,0.33)	(0.25,0.29,0.33)	(0.25,0.29,0.33)	(0.25,0.29,0.33)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,1.00,1.00)
(Compatible) سازگار، $CR^s = 0.035$ $CR^m = 0.046$						

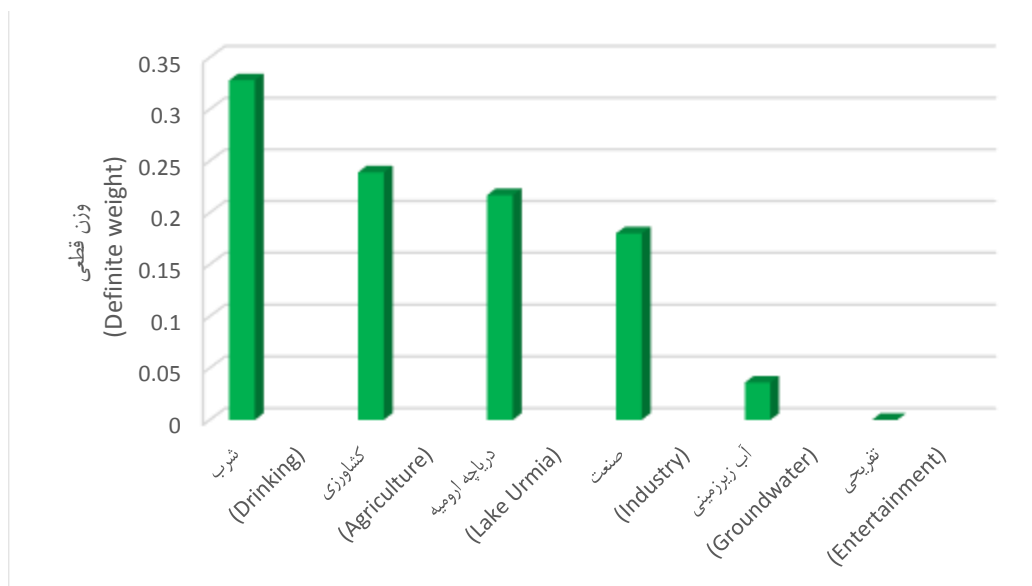
جمعیت Population	کشاورزی Agriculture	آب زیرزمینی Groundwater	صنعت Industry	دریاچه ارومیه Lake Urmia	شرب Drinking	تفریحی Entertainment
کشاورزی (Agriculture)	(1.00,1.00,1.00)	(0.22,0.25,0.33)	(3.00,3.50,4.00)	(0.50,0.50,1.00)	(0.50,0.50,1.00)	(3.00,3.50,4.00)
آب زیرزمینی (Groundwater)	(3.00,3.50,4.00)	(1.00,1.00,1.00)	(3.00,4.00,4.50)	(1.00,2.00,2.00)	(1.00,2.00,2.00)	(3.00,4.00,4.50)
صنعت (Industry)	(0.25,0.29,0.33)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,1.00,1.00)	(0.25,0.29,0.33)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,2.00,2.00)
دریاچه ارومیه (Lake Urmia)	(1.00,2.00,2.00)	(0.50,0.50,1.00)	(3.00,3.50,4.00)	(1.00,1.00,1.00)	(0.50,0.50,1.00)	(3.00,3.50,4.00)
شرب (Drinking)	(1.00,2.00,2.00)	(0.50,0.50,1.00)	(3.00,3.50,4.00)	(1.00,2.00,2.00)	(1.00,1.00,1.00)	(3.00,3.50,4.00)
تفریحی (Entertainment)	(0.25,0.29,0.33)	(0.22,0.25,0.33)	(0.50,0.50,1.00)	(0.25,0.29,0.33)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,1.00,1.00)
(Compatible) سازگار، $CR^s = 0.083$ $CR^m = 0.049$						

اشتغال زایی Employment	کشاورزی Agriculture	آب زیرزمینی Groundwater	صنعت Industry	دریاچه ارومیه Lake Urmia	شرب Drinking	تفریحی Entertainment
کشاورزی (Agriculture)	(1.00,1.00,1.00)	(3.00,3.5,4.00)	(1.00,2.00,2.00)	(3.00,3.50,4.00)	(1.00,2.00,2.00)	(3.00,3.50,4.00)
آب زیرزمینی (Groundwater)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,1.00,1.00)	(0.50,0.50,1.00)	(0.67,0.67,1.00)	(0.50,0.50,1.00)	(1.00,1.50,1.50)
صنعت (Industry)	(0.50,0.50,1.00)	(1.00,2.00,2.00)	(1.00,1.00,1.00)	(3.00,3.50,4.00)	(1.00,2.00,2.00)	(3.00,3.50,4.00)
دریاچه ارومیه (Lake Urmia)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,1.50,1.50)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,1.00,1.00)	(0.25,0.29,0.33)	(0.50,0.50,1.00)
شرب (Drinking)	(0.50,0.50,1.00)	(1.00,2.00,2.00)	(0.50,0.50,1.00)	(3.00,3.50,4.00)	(1.00,1.00,1.00)	(3.00,3.50,4.00)
تفریحی (Entertainment)	(0.25,0.29,0.33)	(0.67,0.67,1.00)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,2.00,2.00)	(0.25,0.29,0.33)	(1.00,1.00,1.00)
(Compatible) سازگار، $CR^s = 0.047$ $CR^m = 0.088$						

جدول ۹- وزن جزئی هر آلترناتیو نسبت به زیرمعیار مربوطه

Table 9- The partial weight of each alternative relative to the relevant sub-criterion

زیرمعیار Under the criteria	سطح زیر کشت Area under cultivation	درآمد Income	اشتغال‌زایی Employment	جمعیت Population	زیست‌محیطی Environmental
کشاورزی (Agriculture)	0.275	0.412	0.44	0.138	0
آب زیرزمینی (Groundwater)	0.162	0	0	0.406	0
صنعت (Industry)	0.127	0.356	0.31	0	0
دریاچه ارومیه (Lake Urmia)	0.237	0	0	0.205	0.50
شرب (Drinking)	0.199	0.232	0.25	0.252	0.50
تفریحی (Entertainment)	0	0	0	0	0



شکل ۴- وزن نهایی گزینه‌های نسبت به کلیه معیارها، زیرمعیار

Figure 4- Final weight of options for all criteria, sub-criteria

نتیجه‌گیری

اقتصادی در اولویت بالایی قرار دارد، لذا می‌توان به نتیجه‌گیری کلی در خصوص معیارها در نگرش‌های اقتصادی و مسائل مرتبط با آن اهمیت زیادی داد. روند وزن‌دهی برای هر زیرمعیار به همین ترتیب تکرار شد و اهمیت هر کدام، برای گزینه‌های مربوطه به دست آمد. وزن‌های نهایی هر گزینه نیز با ضرب وزن جزئی هر زیرمعیار در معیار مربوطه به دست آمد. نتایج کلی نشان داد که گزینه بخش شرب با بیشترین وزن در اولویت اول و در اولویت‌های بعدی بخش کشاورزی و دریاچه ارومیه قرار گرفتند. یکی از اهداف احداث سد شهرچای مربوط به تأمین آب شرب و کشاورزی بوده است. بخش شرب یک عامل حیاتی برای بقای یک جامعه می‌باشد و به دلیل اینکه آب شرب شهرستان ارومیه از طریق سد شهرچای تأمین می‌گردد، بنابراین

در مقاله حاضر یک مدل تصمیم‌گیری مبتنی بر رویکرد فازی برای رتبه‌بندی گزینه‌های مختلف استفاده‌کننده از آب سد شهرچای ارائه شده است. برای این منظور، در ابتدا با استفاده از نظر کارشناسان و محققین، جمع‌بندی نتایج پرسشنامه‌ای، معیارها و زیرمعیارها و گزینه‌های مهم در تخصیص آب سد شهرچای تعیین شد. در ادامه با استفاده از تحلیل توسعه‌ای چانگ، گزینه‌های مختلف بر اساس معیارها، زیرمعیارها و عوامل مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج محاسبات انجام شده، معیار اقتصادی با بیشترین وزن در اولویت اول قرار گرفت. از نظر علمی به دلیل اینکه پرسشنامه‌ها به افراد متخصص و دارای مسئولیت سازمانی ارائه شده بود، معیار

اهمیت بخش دریاچه ارومیه نسبت به صنعت بوده و بالاتر قرار گرفتن آن، نشان از توجه کارشناسان به بحران خشک شدن دریاچه ارومیه دارد. تغذیه آب زیرزمینی معمولاً از طریق رودخانه و اراضی کشاورزی صورت می‌گیرد، چون شرب و کشاورزی نسبت به تغذیه آب زیرزمینی از اولویت بالاتری برخوردار هستند، به نظر می‌رسد متخصصین در پرسشنامه‌ها با اطلاع از اینکه جریان آب در رودخانه و در شبکه کشاورزی باعث تغذیه آب زیرزمینی می‌شود، اهمیت کمتری برای این گزینه نسبت به سایر گزینه‌ها در نظر گرفته‌اند. با توجه به موارد ذکر شده فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی می‌تواند به‌عنوان ابزاری مناسب در نظام‌مند کردن تصمیم‌گیری‌های کلان در مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گیرد.

تخصیص آب به این بخش باید در اولویت نخست قرار گیرد. بخش کشاورزی نیز با اهمیتی کمتر در اولویت دوم قرار گرفت. عرضه آب به این بخش به‌طور مستقیم به اقتصاد بخش کشاورزی و به‌طور غیر مستقیم به کل اقتصاد منطقه اثری معنی‌دار دارد، که بیانگر اهمیت بخش کشاورزی در اقتصاد و شرایط زیستی منطقه و تخصیص آب به این بخش می‌باشد. با مقایسه فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در حوضه آبریز شهرچای، بیشترین فعالیت در منطقه، کشاورزی بوده و صنعت در اولویت پایین‌تری قرار دارد که نتایج سلسله مراتبی نیز بیان‌کننده این موضوع می‌باشد. به دلیل اینکه رودخانه شهرچای یکی از تأمین‌کننده‌های حبابه دریاچه ارومیه می‌باشد تخصیص آب به این بخش باعث بهبود شرایط دریاچه و به‌تبع آن بهبود شرایط زیست-محیطی و اقتصادی و اجتماعی منطقه می‌باشد. نتایج نیز حاکی از

منابع

- 1- Abbassinia M., Kalatpour O., Motamedzade M., Soltanian A., and Mohammadfam I. 2020. A fuzzy analytic hierarchy process-TOPSIS framework for prioritizing emergency in a petrochemical industry. *Archives of Trauma Research* 9(1): 35-40.
- 2- Abdul Rahman N.S.F., Ismail A., Othman M.K., Mohd Roslin R.A., and Lun Y.H.V. 2018. Decision making technique for analysing performance of Malaysian secondary ports. *International Journal of Shipping and Transport Logistics* 10(4): 468-496.
- 3- Amini Shadbad SA. The zoning of flood in the river using the hydraulic model. Master's thesis, University of Urmia. 2008. (In Persian with English abstract)
- 4- Ayhan M.B. 2013. A fuzzy AHP Approach for supplier selection problem. *International Journal of Managing Value and Supply Chains* 4(3): 11-23.
- 5- Azarnivand A., Hashemi-Madani FS., and Banihabib ME. 2015. Extended fuzzy analytic hierarchy process approach in water and environmental management. *Environment Earth Science* 73: 13-26.
- 6- Bahmanpouri S., and Soltani GH. 2019. Application of fuzzy hierarchical analysis method in integrated water resources management Neyriz city. *Journal of Agricultural Economics Research* 10(4): 105-124. (In Persian with English abstract)
- 7- Chang D.Y. 1992. *Extent Analysis and Synthetic Decision, Optimization Techniques and Applications*, World Scientific, Singapore, 1-352.
- 8- Chuntian C. 1999. Fuzzy optimal model for the flood control system of the upper and middle reaches of the Yangtze River. *Journal Hydrological Sciences* 44(4): 573-582.
- 9- Fu G. 2006. A fuzzy optimization method for multicriteria decision making: an application to reservoir flood control operation. *Journal Expert Systems with Applications* 34(1): 145-149.
- 10- Ertugrul I., and Karakasoglu N. 2009. Performance evaluation of Turkish cement firms with fuzzy an alytic hierarchy process and TOPSIS methods. *Expert Systems with Applications* 36: 702-715.
- 11- Ghasemi A., and Danesh Sh. 2012. Fuzzy hierarchical analysis method for determining the optimal choice desalination of brackish water. *Journal of Water and Soil* 26(4): 999-1009. (In Persian with English abstract)
- 12- Gogus O., Boucher T. 1998. Strong transitivity, rationality and weak monotonicity in fuzzy pairwise comparisons. *Fuzzy Sets and Systems* 94(1): 133-144.
- 13- Karamooz M. 2005. Planning and utilization and allocation of water quality and quantity management with an emphasis on conflict resolution. *Applied Research Projects, Water Resources Management, Technical Assistance and Research*, 210. (In Persian)
- 14- Khashei-siuki A., Ghahraman B., and Kouchakzadeh, M. 2011. Evaluation of potential water harvesting aquifer using fuzzy AHP. *J. of Water Research*, 9 (5): 171-180.
- 15- Khashei-Siuki A., Keshavarz A., and Sharifan H. 2020. Comparison of AHP and FAHP methods in determining suitable areas for drinking water harvesting in Birjand aquifer Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 10.
- 16- Husseini Farazmand M. 2000. Mathematical Modeling utilization of water resources in Karkheh. Master thesis, School of Management, University of Tarbiat Modarres.
- 17- Laarhoven P.J.M., and Pedrycz W. 1983. A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems* 11: 229-241.

- 18- López-Moreno J.I., Begueria S., and Garcia-Ruiz J.M. 2002. Influence of the Yesa Reservoir on floods of the Aragon River Central Spanish Pyrenees. *Journal Hydrology and Earth System Sciences* 6(4): 753-762.
- 19- Lu L., Zhi-Hua Shi., Wei Y., Dun Z., Sai Leung N., G., Chong-Fa, C., and A-Lin L. 2009. A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco-environmental vulnerability assessment for the danjiangkou reservoir area. *China, Ecological Odelling* 220: 3439-3447.
- 20- Mei X., Rosso R., Huang GL., and Nie GS. 1989. Application of analytical hierarchy process to water resources policy and management in Beijing. *China. Proceedings of the Baltimore Symposium* 73-85.
- 21- Nader H., Sabouhi M., and Mohammad A. 2013. Optimal allocation of water from the incorporation of multi-purpose dam of Mahabad using fuzzy hierarchical analysis and planning. *Journal of Soil and Water* 22(4): 1-3. (In Persian with English abstract)
- 22- Omidil F., and Homae M. 2016. Using different numerical schemes for assessing water productivity. *2ndWorld Irrigation Forum (WIF2)*.
- 23- Othman M., Shaiful Fitri N., Rahman A., Ismail A., and Saharuddin A. 2019. Factors contributing to the imbalances of cargo flows in Malaysia large-scale minor ports using a fuzzy analytical hierarchy process(FAHP) approach. *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 36(3): 113-126.
- 24- Rohollahi A.R. 2011. Estimate the unconfined aquifer hydrodynamic optimal detetion method using genetic algorithm. M.Sc. hesis, Department of Water Engineering. Faculty of Agriculture, University of Birjand, 185. (In Persian with English abstract)
- 25- Sasikumar K., and Mujumdar P.P. 1998. Fuzzy optimization model for water quality management of a river system. *Journal Water Resources Planning and Management* 124(2): 79-80.
- 26- Sepand S., Chitsazan M., Ragzan K., and Mirzai Y. 2005. Use of remote sensing and GIS to determine potential water Lale plain. *Geomatics Conference in Tehran, Tehran University, Tehran.* (In Persian) De Bruijn KM. 2005. Resilience and flood risk management; A systems approach aplied to lowland rivers, 216 pp
- 27- Shaher H., and Daniela F. 2019. Comparison of several decision making techniques. *International Journal of Information Technology & Decision Making* 18(05): 1551-1578.
- 28- Shahraki A., Shahraki J., and Hashemi Monfared A. 2016. Investigating the management approaches of water resources exploitation in the region (FAHP) 9(21): 73-98. (In Persian with English abstract)
- 29- Talebi E. 2013. Prioritization of Gheslagh Dam Water Allocation Using Analysis Fuzzy Hierarchy (FAHP). Master Thesis in Civil Engineering majoring University, Maragheh Branch. (In Persian with English abstract)
- 30- Zadeh L.A. 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8(3): 199-249.
- 31- Zebardast A.2001. Application of analytical hierarchy process (AHP) in urban and regional planning program. *Fine Arts Journal* 10: 13-21.

Optimal Allocation of Surface Storage Tanks Using Fuzzy Hierarchy Method (Case Study: Shahrchay Storage Dam in Urmia)

E. Rezaei¹- M. Montaseri^{2*}- H. Rezaei³

Received: 23-02-2021

Accepted: 22-11-2021

Introduction: Prioritization of optimal water allocation of surface flow storage dams for different applications (drinking, agriculture, industry, environment, etc.) in arid and semi-arid regions such as Iran due to the range of changes, high flow uncertainty Reservoir inlets, and the occurrence of intermittent droughts are of great importance. For this purpose, the Fuzzy Hierarchy Process (FAHP) is proposed and used as a suitable formulation method in prioritizing water allocation in the water resources system. Therefore, in this study, prioritization of water allocation for different purposes of Shahrchai reservoir dam located upstream of Urmia metropolis has been done in a field study using fuzzy hierarchical method.

Materials and Methods: A fuzzy hierarchical process based on quantitative and qualitative effective factors has been developed. In the first stage, the problem structure was designed by determining the priority of water allocation of users, criteria, sub-criteria, and other factors. Then the decision-making hierarchy based on the problem structure (purpose, criteria, sub-criteria, factors, and options in the first to fifth levels, respectively) was defined. In the mentioned prioritization structure, the goal was determined at the first level, ie the optimal or appropriate allocation of Shahrchay reservoir dam water for different operators, and at the second level, three economic, social and environmental criteria were considered as the main criteria. At the third level, "cultivation area and gross income" and "employment and population" were considered as sub-criteria of two economic and social criteria, respectively. The main beneficiaries, namely agriculture, urban drinking, recreation and tourism, industry, environmental needs of Lake Urmia and groundwater fourth level (options) have formed the problem structure. At the next step, based on the field data or questionnaires, criteria, sub-criteria, and factors were compared in pairs using the proposed linguistic and fuzzy comparisons, and the priority of water consumption over each criterion or sub-criterion or factor were compared based on fuzzy triangular numbers. The weights were determined and ranked each using the Chang development method. At the third stage of the final ranking, the priority of water allocation was determined based on the final weight of criteria or priorities at the previous stage and the superior option was determined. Finally, a sensitivity analysis of the weight change of the criteria and the decision-making process of the problem has been performed.

Results and Discussion: A decision model based on a fuzzy approach is presented to rank the different options using Shahrchay dam water. For this purpose, firstly, using the opinions of experts and researchers, the results of a questionnaire, criteria and sub-criteria and important options in allocating water to Shahrchai Dam were determined. Secondly, using Chang's development analysis, different options were evaluated based on the mentioned criteria, sub-criteria, and factors. From a scientific point of view, because the questionnaires were presented to experts, the economic criterion is a high priority, so it is possible to attach great importance to the general conclusion about the criteria in economic attitudes and related issues. In addition, the allocation of water to the urban drinking sector with a weight of 0.33 was as the top priority, agriculture, Lake Urmia, industry, groundwater, and recreation were in the next priorities, respectively. Therefore, economic criteria and drinking water supply were recognized as the main objectives of planning and managing water resources in the metropolis of Urmia. The drinking sector is a vital factor for the survival of a community and because the drinking water of Urmia city is supplied through Shahrchai dam, so the allocation of water to this sector should be considered as the top priority. The agricultural sector was also given the second priority with less importance. The supply of water to this sector has a significant direct effect on the economy of the agricultural sector and indirectly on the entire economy of the region, which indicates the importance of the agricultural sector in the economy, living conditions of the region and the allocation of water to this sector. Comparing agricultural and industrial activities in Shahrchai catchment area, the most activity in the region is agriculture and industry is in a lower priority,

1, 2 and 3- M.Sc. in Water Resources Engineering and Professors, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, respectively.

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

DOI: 10.22067/JSW.2021.68472.1018

which is also shown by the hierarchical results. Since Shahrchai River is one of the suppliers of water to Lake Urmia, the allocation of water to this section improves the condition of the lake and, consequently, it improves the environmental, economic, and social conditions of the region. The results also indicate the importance of Lake Urmia in relation to industry and its higher status indicates the attention of officials to the drying crisis of the Lake Urmia.

Keywords: FAHP; Fuzzy; Shahrchay Dam; Water allocation

مقاله پژوهشی

مقایسه روش‌های کشت مستقیم و نشائی برنج تحت روش‌های مختلف آبیاری

علیرضا کیانی^{۱*} - محمدرضا یزدانی^۲ - محمدتقی فیض بخش^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۶

چکیده

چهار روش آبیاری (غرقاب دائم، تناوبی، بارانی، تیپ) و سه روش کشت (مستقیم بذر و مستقیم نشاء بر بستر غیرپادل یا بدون گلخراپی و نشائی سنتی) از نظر عملکرد، مصرف آب و بهره‌وری آب برنج در قالب طرح کرت‌های نواری بر اساس طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به مدت دو سال زراعی (۱۳۹۸ و ۱۳۹۹) در گرگان بررسی شدند. مقایسه عملکردهای برنج نشان داد که بالاترین عملکرد (۸۲۰۶ کیلوگرم در هکتار) مربوط به کشت نشائی سنتی با روش آبیاری غرقابی بود و در بقیه روش‌های آبیاری اختلاف معنی‌داری بین عملکردها مشاهده نشد. در کشت نشائی، با تغییر آبیاری سنتی به آبیاری بارانی، متناوب و آبیاری قطره‌ای به ترتیب عملکرد در حدود ۱۴، ۹ و ۱۱ درصد کاهش داشت. بالاترین مصرف آب مربوط به روش آبیاری غرقابی در کشت مستقیم بذر (۱۲۴۹۰ متر مکعب در هکتار) و کشت نشائی (۱۱۹۶۷ متر مکعب در هکتار) بود. با تغییر شیوه آبیاری از غرقاب به قطره‌ای در کشت سنتی نشاء در زمین پادل شده، اگرچه عملکرد در حدود ۱۱ درصد کاهش یافت ولی در مقابل مصرف آب در حدود ۳۹ درصد کاهش و در نتیجه بهره‌وری آب در حدود ۲۲ درصد افزایش داشت. با تبدیل کشت سنتی نشاء و روش آبیاری غرقابی به کشت مستقیم نشاء و روش آبیاری قطره‌ای عملکرد در حدود ۲۴ درصد و مقدار آب در حدود ۴۵ درصد کاهش یافت و بهره‌وری آب در این حالت به ۰/۹ کیلوگرم در متر مکعب رسید که در شرایط حاضر به عنوان بهترین گزینه برای حفظ توأم منابع آبی و تولید انتخاب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری سنتی، آبیاری متناوب، آبیاری نوین، برنج، گرگان

مقدمه

رشد روز افزون کشت برنج در استان گلستان به دلیل توجیه اقتصادی کوتاه مدت آن برای بهره‌برداران، یکی از مشکلات اساسی بخش کشاورزی استان طی سال‌های اخیر است. درآمد نسبتاً مناسب این محصول نسبت به گیاهان دیگر از یک طرف و مالکیت خصوصی منابع آب‌های زیرزمینی از طرف دیگر عوامل اصلی ترغیب کشاورزان به کشت این گیاه پرمصرف آب می‌باشد. هم‌اکنون گزارش‌ها حکایت از استحصال و اختصاص سالانه بیش از ۵۰ درصد از منابع آب زیرزمینی منطقه برای کشت شالی دارد (۸). به طور کلی اطلاعات میدانی و مشاهده‌ای حکایت از این مطلب دارد که سطح زیرکشت شالی در استان روندی افزایشی دارد. در چند دهه گذشته سیاستگذاران بخش کشاورزی در صدد محدودسازی و ممنوعیت کشت برنج در

کشور به‌جز استان‌های گیلان و مازندران بودند. مبنای تحلیل کارشناسی که منجر به اتخاذ تصمیم اشاره شده بود، مصرف زیاد آب، کاهش سطح سفره‌های آب زیرزمینی و ناپایداری منابع آبی در دراز مدت بود. راهبرد تدوین شده به دلیل تأمین نکردن منافع کشاورزان در کوتاه‌مدت از نظر عملی در بین بهره‌برداران کارکرد موثر را نداشت زیرا درآمد حاصل از کشت برنج در استان گلستان برای کشاورزان مطلوب بود. گواه این ادعا افزایش سطح زیرکشت اراضی شالی‌کاری از سال ۱۳۷۳ تاکنون به میزان ۱۵۰۰ هکتار در هر سال بود (۸).

در روش سنتی تولید برنج مقدار قابل توجهی از آب آبیاری قبل از کشت نشاء در زمین اصلی به سبب آماده‌سازی بستر کاشت (گل خرابی) مصرف شده ضمن آن که طی دوره رشد نیز گیاه درون آب قرار داشته، که این موضوع موجب تبخیر سطحی آب و تلفات نفوذ

۳- استادیار بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تات، گرگان، ایران

DOI: 10.22067/JSW.2021.69302.1036

۱- استاد بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تات، گرگان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: Akiani71@Yahoo.com)

۲- استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تات، رشت، ایران

هیبنینگ و همکاران (۳) تاثیر مالچ و مدیریت‌های مختلف آبیاری روی مقدار تولید و آب مصرفی برنج را مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش کردند که بیشترین عملکرد (۸۴۴۶ کیلوگرم در هکتار) مربوط به کشت رایج برنج و کمترین کاهش عملکرد مربوط به تیمار آبیاری قطره‌ای (با استفاده از مالچ) به مقدار ۵۲ - ۳۱ درصد و بیشترین کاهش عملکرد مربوط به تیمار آبیاری شیاری (بدون استفاده از مالچ) به مقدار ۷۴ الی ۷۵ درصد بود. بالاترین بهره‌وری آب (۰/۵۲ کیلوگرم بر متر مکعب) مربوط به تیمار آبیاری قطره‌ای (با استفاده از مالچ) بود که ۲/۱۲ - ۱/۵۲ مرتبه بیشتر از کشت رایج و ۱/۸۹ - ۱/۳۵ مرتبه بیشتر از تیمار آبیاری شیاری (با استفاده از مالچ) بود. بررسی انجام شده در روش آبیاری قطره‌ای برنج در مقایسه با روش غرقابی نشان داده است که عملکرد دانه برنج در روش آبیاری قطره‌ای با کشت سنتی در حدود ۸/۵ درصد بیشتر از کشت مستقیم بذر و ۱۱ درصد کمتر از آبیاری غرقابی با نشاپادل بود. نتایج این آزمایش نشان داد، آبیاری قطره‌ای در مقایسه با آبیاری غرقابی برنج با اندکی کاهش عملکرد، موجب کاهش ۷۸ درصد آب ورودی شده است (۱۷).

رامالو و همکاران (۱۸) بر اساس پژوهشی که روی امکان استفاده از آبیاری قطره‌ای با مصرف مقادیر مختلف آب و کود نیتروژن روی رقم هوازی در کشور هند انجام دادند گزارش نمودند که با افزایش آب مصرفی از ۱۰۰ درصد تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A به ۱۵۰ و ۲۰۰ درصد مقدار عملکرد رشد صعودی داشته و به ترتیب از ۲۹۵۴ کیلوگرم در هکتار به ۳۶۶۱ و ۳۶۹۲ کیلوگرم در هکتار رسید. همچنین با افزایش مقدار مصرف نیتروژن تا ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار مقدار عملکرد افزایش و سپس با مصرف بیشتر از آن مقدار عملکرد سیر نزولی پیدا نمود. بیشترین بهره‌وری آب مربوط به تیمار آب مصرفی ۱۰۰ درصد تبخیر از تشتک تبخیر به مقدار ۰/۴۹ کیلوگرم بر متر مکعب بود.

در دهه‌های گذشته کشت برنج هوازی در مقایسه با روش مرسوم گل‌خرابی، در بین کشاورزان، به دلیل وجود علف‌های هرز فراوان و هزینه بالای کنترل آن، رایج نبوده (۲۱) و ارقام هوازی برنج با هدف جایگزینی با ارقام کم محصول توسعه داده شدند (۱۵). لیکن با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در تولید علف‌کش‌ها در سال‌های اخیر، سیستم هوازی کشت برنج هم اکنون در نواحی کم‌آب که نیازمند پمپاژ آب از چاه هستند، نواحی دلتایی که تأمین آب آن‌ها با تأخیر همراه است و مزارع مرتفع همراه با آبیاری تکمیلی استفاده می‌شود (۲۱). بیان شده که سیستم هوازی در مقایسه با سیستم مرسوم گل‌خرابی، ۳۰ تا ۵۱ درصد آب کمتری برای تهیه زمین بسته به نوع خاک نیاز داشته، بهره‌وری آب را ۳۲ تا ۸۸ درصد بیشتر نموده، ۵۰ درصد نیروی انسانی کمتری نیاز داشته (۳۰) و تا ۵۰ درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده است (۳۱). ارزیابی عملکرد برنج تحت سه روش آبیاری قطره‌ای، بارانی و غرقابی نشان داد که عملکرد

عمقی می‌گردد. امروزه از روش کشت مستقیم برنج در بستر خشک (خشکه کاری) یا بستر مرطوب نیز جهت تولید برنج استفاده می‌شود. در این روش برنج در زمین به صورت بذر کاشته شده و دیگر نیاز به غرقاب نمودن دائمی زمین نیست. انتظار می‌رود که این روش نسبت به روش سنتی مصرف آب کمتری داشته باشد. کیانی (۷) با استفاده از اطلاعات هواشناسی سال‌های ۹۷ و ۹۸ و همچنین اطلاعات طولانی مدت بر مبنای دو ایستگاه سینوپتیک گرگان و گنبد و اطلاعات منطقه‌ای آب مورد نیاز برنج را از رابطه پنمن-مانیتث برآورد نمود. در این بررسی نیاز آبی خالص برنج در کشت تابستانه بر مبنای ایستگاه هواشناسی گرگان در سال‌های ۹۷، ۹۸ و طولانی مدت به ترتیب برای ۷۲۰، ۷۰۰ و ۶۶۰ میلی‌متر و بر مبنای ایستگاه هواشناسی گنبد برابر با ۸۰۰، ۷۸۸ و ۶۹۰ میلی‌متر و در کشت بهاره برای گرگان به ترتیب ۷۲۰، ۶۷۰ و ۶۰۰ میلی‌متر و به همین ترتیب برای گنبد برابر ۷۷۵، ۷۰۰ و ۶۸۰ میلی‌متر برآورد شد.

دلیل گسترش کشت مستقیم برنج در کشورهای گوناگون متفاوت بیان شده که بر اساس مشکلات موجود آن‌ها در کشت مرسوم برنج بوده است. به عنوان مثال مشکلات اصلی در کشت سنتی برنج در کشورهای جنوب شرق آسیا نظیر بنگلادش، تایلند، مالزی، فیلیپین و کامبوج کاهش نیروی انسانی در فصل گل‌خرابی و کاشت سنتی برنج، افزایش دستمزد کارگران و کمبود آب، گزارش شده است (۹). به طور کلی تغییرات اقلیم، کمبود آب، کاهش دسترسی به نیروی کارگری، کاهش سطح ایستابی، افزایش جمعیت، بالا رفتن هزینه کارگری و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای (۱۳) از جمله دلایلی هستند که کشاورزان را متقاعد به تمرکز بر شروع کشت مستقیم برنج به عنوان یک سیستم با کارایی بهتر آب-نیروی کارگری-انرژی می‌نمایند (۱۵)، ۲۰ و ۲۸). با توجه به مشکل کم‌آبی به ویژه در کشت برنج فن‌آوری صرفه‌جو در مصرف آب نظیر، آبیاری متناوب بصورت خشک و مرطوب کردن (۱۱ و ۲۷)، سیستم فشرده کشت برنج (۲۶)، کشت مستقیم برنج هوازی (۲)، به منظور جایگزینی با سیستم مرسوم (گل‌خرابی) پیشنهاد شد (۹).

ارزیابی آبیاری بارانی برنج در تعدادی از استان‌های برنج خیز کشور نظیر گیلان، خوزستان و فارس صورت گرفته است. نتایج این ارزیابی‌ها که بر روی ارقام مختلف صورت گرفته است، نشان داد که با تغییر سیستم آبیاری از غرقاب به بارانی میزان مصرف آب از ۲۰ تا ۳۴ درصد کاهش پیدا کرده ولیکن این موضوع منجر به کاهش ۳۰ درصدی عملکرد دانه شد (۵). کشت مستقیم بذر برنج در مقایسه با کشت رایج نیاز به نهاده‌های کمتری دارد و در نتیجه موجب صرفه‌جویی در آب و نیروی کار، زودرسی محصول، هزینه تولید پایین می‌شود. کشت مستقیم برنج همچنین شرایط مناسب فیزیکی خاک برای محصولات کشت بعدی و انتشار کمتر گاز متان را فراهم می‌کند. (۶)

شیوه کشت و کار برنج در داخل کشور و همچنین تجربیات جهانی کشت برنج به این باور رسیده‌اند که "برنج لزوماً گیاهی که باید در شرایط غرقاب رشد کند نیست" در نتیجه برای این تغییر نگرش باید برنامه‌های عملیاتی تدوین نمود. یکی از راه‌حل‌های عملیاتی برون رفت از این چالش بزرگ "توسعه کشت مستقیم برنج به جای کشت مرسوم" است. همزمان لازم است روش‌های مختلف کاهش مصرف آب در دستور کار قرار گیرد. به همین دلیل این پژوهش با هدف بررسی تغییرات عملکرد و بهره‌وری آب در روش‌های مختلف کشت و آبیاری برنج به اجرا در آمد.

مواد و روش‌ها

محل و تیمارهای آزمایشی

این تحقیق در ایستگاه تحقیقات کشاورزی عراقی محله گرگان روی برنج طی دو سال زراعی ۹۸ و ۹۹ اجرا شد. این ایستگاه در ۵ کیلومتری شمال گرگان با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی واقع شده است. ارتفاع از سطح دریا ۵ متر و متوسط درجه حرارت سالانه ۱۷ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالیانه ۴۵۰ میلی‌متر است. در این تحقیق دو عامل روش‌های آبیاری و شیوه‌های کشت برنج از نظر مصرف آب، عملکرد و بهره‌وری آب در قالب طرح آزمایشی کرت‌های نواری به ابعاد ۸ در ۶ متر بر اساس طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار مورد بررسی قرار گرفتند. فاکتور روش آبیاری گیاه برنج (رقم فجر) در ۴ سطح (به عنوان فاکتور اصلی) شامل: ۱- آبیاری بارانی (I₁)، ۲- آبیاری غرقابی دائم (I₂)، ۳- آبیاری غرقابی تناوبی (I₃)، ۴- آبیاری قطره‌ای نواری (I₄) و فاکتور فرعی روش کشت در سه سطح، شامل: ۱- کشت مستقیم بذر یا خشکه کاری (C₁)، ۲- کشت نشاء بدون گلخراپی، (C₂) و ۳- کشت نشائی با گلخراپی، سنتی زارعین (C₃).

برنامه‌ریزی آبیاری و کاشت

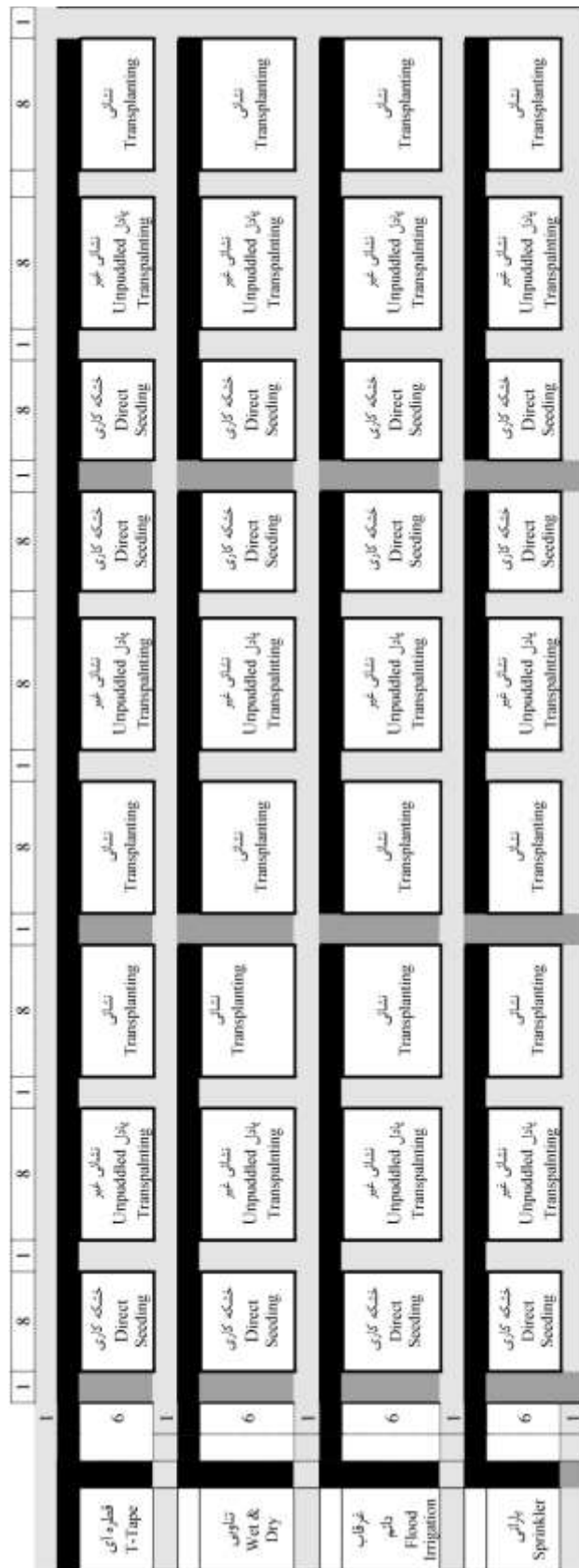
برنامه آبیاری در روش آبیاری سنتی غرقاب دایم حفظ ارتفاع آب در حدود ۳ تا ۵ سانتی‌متر و در روش آبیاری تناوبی برای دوره‌های مرطوب حفظ ارتفاع آب در حدود ۳ تا ۵ سانتی‌متر و تکرار آبیاری بعدی با بروز ترک موئین یا افت آب به ارتفاع صفر انجام شد. نیاز آبی خالص در روش‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای براساس ارتفاع تبخیر از تشت تبخیر مستقر در محل آزمایش و با در نظر گرفتن راندمان آبیاری به ترتیب برابر ۷۵ و ۹۰ درصد برآورد شد. در ورودی هر تیمار یک شیرفلکه و یک کنتور حجمی برای کنترل حجم آب ورودی به کرت‌ها استفاده شده است.

دانه برنج در روش آبیاری قطره‌ای (۶۹۵۰ کیلوگرم در هکتار) در مقایسه با آبیاری غرقابی (۶۲۲۵ کیلوگرم در هکتار) افزایش داشته و کمترین عملکرد محصول مربوط به روش آبیاری بارانی (۴۸۰۰ کیلوگرم در هکتار) بود. همچنین، در این بررسی بهره‌وری آب در آبیاری قطره‌ای، بارانی و غرقابی به ترتیب برابر با ۱/۷، ۱/۲ و ۱/۰۶ کیلوگرم در هر متر مکعب به دست آمد (۱).

کلیه نتایج تحقیقات بر تاثیر روش آبیاری بر کاهش مصرف آب تاکید داشته لیکن تاثیر آن بر عملکرد به صورت افزایش، عدم اختلاف یا کاهش گزارش شده است. گرچه با وجود عدم اختلاف از نظر عملکرد یا حتی کاهش عملکرد تعدادی از مقالات بر کارایی اقتصادی روش خشکه کاری برنج تاکید نموده‌اند. بطور کلی نتایج بررسی‌های انجام شده توسط محققین مختلف نشان داد که عملکرد برنج در کشت مستقیم بذر برنج به طور قابل توجهی پایین تر از کشت نشاپادل برنج بوده است. با این حال، میزان کاهش عملکرد بسته به روش‌های مدیریتی، نوع خاک و شرایط آب و هوایی متغیر بوده و مدیریت علف‌های هرز و آب بیشترین تاثیر را بر عملکرد داشتند (۲۹). سینگ و همکاران (۲۵) نشان دادند که کشت برنج در زمین پادل شده باعث افزایش عملکرد دانه بین ۰/۷ تا ۱ تن در هکتار و عملکرد کاه برنج بین ۱/۷-۰/۸ تن در هکتار شد.

سیدهو و همکاران (۲۳) با بررسی ۹ مزرعه کشاورزان در ایالت پنجاب هندوستان دو سیستم کشت نشائی و مستقیم را مقایسه نمودند و نشان دادند که علت تفاوت عملکرد افزایش تعداد پنجه بوده در سیستم گل خرابی بود. میانگین بازگشت درآمد خالص در کشت گل خرابی بیشتر ولی نسبت فایده به هزینه در سیستم کشت مستقیم بیشتر بود. نارش و همکاران (۱۴) در آزمایشی تفاوت شیوه‌های کشت مستقیم و مرسوم برنج را مقایسه نمودند. نتایج نشان داده است که، عملکرد ارقام در روش‌های مختلف کشت معنی‌دار و عملکرد کشت مرسوم بیشتر از عملکرد کشت مستقیم بود. سینگ (۲۴) نشان داد که تغییر سیستم کاشت به خشکه کاری می‌تواند ۲۵ درصد کاهش مصرف آب در مقایسه با روش گل خرابی داشته باشد، ضمن آن که ۱۳۰۰۰ روپیه در هکتار نیز صرفه‌جویی نموده است. از نظر نیروی انسانی نیز کشت مستقیم در مقایسه با کشت مرسوم گل خرابی منجر به کاهش ۱۱ تا ۶۶ درصدی نیروی انسانی (۱۰ و ۱۹) شده ضمن آن که این روش منجر به بهبود شرایط زراعی زمین به دلیل حذف عملیات گل خرابی نیز می‌گردد.

با توجه به رغبت کشاورزان به کشت برنج از یک طرف و مصرف بالای آب در این گیاه از طرف دیگر، بررسی شیوه‌هایی که هم معیشت کشاورزان و هم پایداری منابع پایه محفوظ بماند، از ضروریات است. ضمن اینکه مطالعات مربوط به مقایسه همزمان شیوه‌های مختلف آبیاری و شیوه‌های کشت برنج بسیار اندک و در استان گلستان علیرغم کشت سالانه در حدود ۱۰۰ هزار هکتار، وجود ندارد. با بررسی



شکل ۱- نمایش از پروژه اجرای و تیمارهای مورد بررسی (اعداد روی شکل ابعاد بر حسب متر می باشد)
 Fig 1: Project plan and treatments under considration (numbers on the figure are in meters)

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک منطقه مورد آزمایش

Table 1- Some physicochemical properties of the soil at experiment site

عمق Depth (cm)	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	کربن آلی (OC) %	پتاسیم K (ppm)	فسفر P (ppm)	آهک Lime %	ازت کل T.N. %	(pH)	ماسه Sand %	سیلت Silt %	رس Clay %	بافت خاک Texture
0-30	0.8	1.33	360	7.8	26.5	0.1	7.7	20	52	28	Si-C-L
30-60	1.1	0.82	130	4.96	28.8	0.08	7.7	16	54	30	Si-C-L

گردید. داده‌های هزینه‌ی اولیه (شامل سامانه‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای با طول عمر ۱۵ سال)، هزینه‌های تولید و منافع تیمارهای مورد بررسی از ترکیب داده‌های منابع آماری اسنادی رسمی (نشریه هزینه تولید محصولات کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی) و میدانی (داده‌های ثبت شده تیمارهای آزمایش) تهیه و برآورد شدند.

نتایج و بحث

آنالیز آماری عوامل مورد بررسی

ترکیب دو ساله آنالیز واریانس برخی از عوامل تولید شامل عملکرد دانه، وزن ساقه و برگ، شاخص برداشت، آب کاربردی و بهره‌وری آب برای دو سال آزمایش در جدول ۲ و مقایسه میانگین عوامل اشاره شده به تفکیک هر سال در جدول ۳ ارائه شده است. بطور کلی از نظر آماری تیمارهای روش آبیاری بر روی کلیه عوامل مورد بررسی و تیمار روش کشت به غیر از وزن ساقه و برگ روی عوامل دیگر معنی‌دار (در سطح احتمال ۹۹ درصد) شدند. این نتایج با نتایج نارش و همکاران (۱۴) که اعلام کردند عملکرد برنج تحت تاثیر معنی‌دار شیوه‌های کشت قرار می‌گیرند مطابقت دارد. ولی اثر متقابل عوامل دو تیمار روش آبیاری و روش کشت روی همه عوامل معنی‌دار و روش آبیاری در روش کشت در سال برای همه عوامل غیرمعنی‌دار شدند.

مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده

نتایج خلاصه شده اثرات متقابل عوامل اصلی شامل عملکرد، آب کاربردی و بهره‌وری آب بصورت جمع‌بندی و ترکیب دو سال برای انتخاب شیوه مناسب آبیاری و نوع کشت در جدول ۳ ارائه شده است. در بین کلیه تیمارها بالاترین عملکرد (۸۲۰۶ کیلوگرم در هکتار) مربوط به کشت نشائی سنتی در روش آبیاری غرقابی و بالاترین مصرف آب در همین روش آبیاری و مربوط به تیمارهای کشت مستقیم بذر (۱۲۴۹۰ متر مکعب در هکتار) و کشت نشائی (۱۱۹۶۷ متر مکعب در هکتار) است. بطور کلی عملکرد کشت مستقیم بذر در هر دو سال کمتر از دو روش دیگر به دست آمد.

در روش آبیاری قطره‌ای فواصل لوله‌ها ۵۰ سانتی‌متر، فواصل قطره‌چکانها حدود ۲۰ سانتی‌متر با دبی ۱ تا ۱/۲ لیتر در ساعت، آبیاری بصورت روزانه و در روش آبیاری بارانی از آبیاش‌های قابل تنظیم ۹۰ درجه در چهار گوشه هر کرت با دبی ۰/۱۵ لیتر بر ثانیه و آبیاری بصورت یک روز در میان انجام شد.

تاریخ بذر پاشی و نشاکاری همزمان در مزرعه انجام شد. پس از آماده شدن زمین کرت‌های نشائی با نشاء ۲۵ روزه که در خزانه آماده شده بودند (نشاء در زمین پادل شده یعنی زمینی که بعد از غرقاب کردن با تراکتور داخل آن گل‌ها را بهم می‌زنند به اصطلاح گلخراپی می‌شود برای روش سنتی، نشاء در زمین غیرپادل) و کرت‌های دیگر بوسیله بذر و مستقیم بر مبنای ۶۰ کیلوگرم در هکتار کاشته شدند. در روش کشت مستقیم بذر برنج در سال اول و دوم به ترتیب کشت در تاریخ‌های ۱۷ و ۲۱ خرداد و برداشت در تاریخ‌های ۱۶ و ۱۱ مهرماه انجام شد. در کشت‌های نشائی در سال اول و دوم به ترتیب در تاریخ‌های ۲۰ و ۲۱ خرداد کاشت و در تاریخ‌های ۲۶ و ۲۷ مهرماه برداشت انجام شد. به منظور جلوگیری از تأثیر رطوبتی تیمارها بر یکدیگر در کرت‌های مختلف، مرزهای بین تیمارها به عرض دو متر احداث و همچنین جوانب مرزها با استفاده از پلاستیک از همدیگر جدا شدند. شکل ۱ نقشه مزرعه‌ای طرح را نشان می‌دهد. برخی مشخصات فیزیکی شیمیایی نیمرخ خاک منطقه مورد آزمایش اندازه‌گیری شده و نتایج در جدول ۱ ارائه شد.

اندازه‌گیری‌ها

میزان آب مصرفی با استفاده از کنتورهای حجمی برای همه تیمارها به صورت روزانه اندازه‌گیری شد، به استناد این مقادیر و باران و عملکرد، بهره‌وری آب محاسبه شد. برخی از خصوصیات زراعی مانند وزن ساقه و برگ، شاخص برداشت، عملکرد دانه، اندازه‌گیری شد. برای عملکرد دانه، پس از رسیدن دو ردیف کناری هر کرت از هر طرف به عنوان حاشیه کنار گذاشته شده و باقی‌مانده محصول برداشت شد.

برای بررسی اقتصادی از روش‌های مرسوم در اقتصاد مهندسی برای تعیین نسبت فایده به هزینه تیمارهای مورد بررسی استفاده

جدول ۲- آنالیز واریانس مرکب بر پایه میانگین مربعات برخی صفات برنج

Table 2- Combined variance analysis of the some rice characteristics based on mean squares

منبع تغییرات Sources of avriation	متغیرها (Variables)					
	درجه آزادی degree of freedom	عملکرد دانه Yield	وزن ساقه و برگ Stem and leaf weight	شاخص برداشت Harvest index	آب کاربردی Applied water	بهره وری آب Water productivity
سال Year	1	3523640**	15097 ^{ns}	0.007**	6139043**	0.1522**
آبیاری Irrigation	3	2559551**	4851887*	0.01390**	95188044**	0.1952**
آبیاری*سال Irrigation*Year	3	493567 ^{ns}	2578630 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	80364*	0.0002 ^{ns}
خطا Error	12	224978	1310346	0.001	13626	0.0025
کشت Cultivation	2	4660782**	2666545 ^{ns}	0.1219**	10903876**	0.5157**
کشت در سال Cultivation *year	2	566925 ^{ns}	838104 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	1268939**	0.00009 ^{ns}
خطا Error	8	350598	2590755	0.0009	52238	0.0034
آبیاری × کشت Irrigation* cultivation	6	1156224*	4211095*	0.007**	3038386**	0.0106**
آبیاری*کشت*سال I*P*Y	6	137193 ^{ns}	643341 ^{ns}	0.0002 ^{ns}	43670 ^{ns}	0.0015 ^{ns}
اشتباه آزمایشی Error	24	330223	1667469	0.0007	20868	0.003
ضریب تغییرات CV		9.4	13.9	6.5	1.5	8.5

ns، * و ** به ترتیب به مفهوم غیرمعنی‌دار، معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد می‌باشند.

Ns= non significant; * and ** significant at 95% and 99% level, respectively.

بصورت بذری منجر به پتانسیل عملکرد نخواهد شد و باید کاهش عملکرد را پذیرفت یا باید فعالیت‌های دیگری مانند انتخاب رقم مناسب که دوره رشد کمتری داشته باشد انجام داد. دوم اینکه تنها با تغییر شیوه آبیاری از غرقاب به قطره‌ای در همان کشت سنتی نشاء در زمین پادل شده، اگرچه عملکرد در حدود ۱۱ درصد کاهش می‌یابد ولی در مقابل مصرف آب در حدود ۳۹ درصد کاهش و در نتیجه بهره‌وری آب در حدود ۲۲ درصد افزایش داشت. این نتایج با نتایج راجوید و همکاران (۱۷) که اعلام کردند آبیاری قطره‌ای برنج در مقایسه با آبیاری غرقابی در حدود ۷۸ درصد در آب صرفه‌جویی و با اندکی کاهش عملکرد موجب افزایش بهره‌وری آب شده است، مطابقت دارد. در تمام روش‌های آبیاری با تغییر شیوه کشت از نشائی سنتی به بذری عملکرد بطور معنی‌داری کاهش داشت. محققین بطوری که اثر تغییر شیوه آبیاری در کاهش مصرف آب به مراتب بیشتر از تغییر شیوه کشت و تغییر شیوه کشت در عملکرد برنج به مراتب بیشتر از تغییر روش آبیاری است.

متعددی نشان دادند که کشت نشائی برنج عملکرد بیشتری در مقابل کشت مستقیم دارد ضمن اینکه بیشترین مصرف آب نیز مربوط به کشت نشائی بود (۴، ۵، ۱۴ و ۲۵). عامل اصلی کاهش، تأخیر زمان کاشت در حدود یک ماه بین این تیمار و دیگر تیمارهای کشت است. گواه این ادعا ارتقاء عملکرد و بهره‌وری آب در روش کشت نشائی در زمین بدون گلخراپی است. نتایج ماهاجان و همکاران (۱۲) نشان دادند، افزایش دوره رشد برنج در مزرعه، بهره‌وری آب آبیاری کاهش می‌یابد. طولانی بودن دوره رشد منجر به افزایش تعداد آبیاری و در نتیجه کاهش کارایی استفاده از آب آبیاری می‌شود. کاهش دوره رشد در مزرعه از طریق کاهش تبخیر-تعرق و نفوذ عمقی باعث کاهش استفاده از آب آبیاری می‌شود. به‌طوری‌که بالاترین بهره‌وری آب در کشت نشائی در زمین غیرپادل و با روش آبیاری قطره‌ای در سال‌های ۹۸، ۹۹ و متوسط دو سال به ترتیب ۰/۸۹، ۰/۹۲ و ۰/۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب و بعد از آن مربوط به کشت سنتی نشاء با آبیاری قطره‌ای به ترتیب برای سال‌های ۹۸، ۹۹ و متوسط دو سال برابر با ۰/۷۸، ۰/۸۷ و ۰/۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود. این نتیجه دو پیام مشخص دارد یکی اینکه کشت تابستانه (اواخر خرداد و اوایل تیر) در منطقه

جدول ۳- اثرات متقابل روش کاشت و شیوه آبیاری در عملکرد و مصرف آب در برنج

Table 3- Interaction effects of cultivation method and irrigation method on yield and water consumption in rice

شیوه آبیاری Irrigation methods	عملکرد Yield (Kg/ha)			آب مصرفی Water consumption (m3/ha)			بهره‌وری آب Water productivity (kg/m3)		
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁	C ₂	C ₃
	I ₁	3061 f	4797 ed	7028 b	7068 h	7308 h	9243 e	0.41 e	0.63 d
I ₂	5002 d	7489 b	8206 a	12490 a	11602 c	11967b	0.39 e	0.63 d	0.67 d
I ₃	4777 ed	7216 b	7447 b	10871 d	10250 e	11019d	0.42 e	0.68 cd	0.66 d
I ₄	4298 e	6265 c	7343 b	6343 i	6572 i	8606 g	0.64 d	0.90 a	0.82 b

حروف مشابه بین اعداد به معنی عدم معنی‌داری است.

The same letters between numbers mean no significant.

۴). افزون بر این دو تیمار I₃C₃ و I₄C₂ نیز با نسبت فایده به هزینه ۶/۹ و ۶/۸ از بازده اقتصادی قابل توجه برخوردار بوده و به لحاظ این شاخص اقتصادی در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. در این تیمار اگرچه در مقایسه با دیگر تیمارها از نظر فایده به هزینه در رتبه چهارم قرار گرفته است، دو مسئله باید مورد توجه قرار گیرد. نخست هزینه‌های مترتب بر یک سامانه کامل آبیاری قطره‌ای است که تنها برای کشت برنج در نظر گرفته شده است در حالیکه کشاورزان از این سامانه برای دیگر کشت‌های منطقه هم استفاده می‌کنند. دوم اینکه مقدار آب ذخیره شده در این روش قابل توجه است بطوری‌که با توجه به کمبود منابع آبی استفاده آنرا قابل توجیه می‌کند. کمترین نسبت فایده به هزینه در تیمارهای دارای روش کشت مستقیم بذر (خشکه‌کاری) حاصل شده است. این نسبت در سه تیمار I₁C₁، I₃C₁ و I₄C₁ به ترتیب ۴/۵، ۴/۶ و ۴/۸ می‌باشد. نتایج ارزیابی اقتصادی تیمارها در سال زراعی ۱۳۹۹ حکایت از آن دارد که سه تیمار I₂C₂، I₃C₂ و I₂C₃ بیشترین نسبت فایده به هزینه به ترتیب معادل ۷/۹، ۷/۹ و ۷/۳ را به خود اختصاص دادند (جدول ۴). تفاوت نسبت منافع به هزینه برخی تیمارها در سال ۱۳۹۹ غالباً متأثر از تغییرات شدید هزینه‌ها در دو سال زراعی می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که در سال ۹۹ از نظر روش آبیاری، آبیاری‌های نوین در الویت بالا قرار نگرفتند و همچنین با توجه به هزینه زیاد مرحله گل‌خراپی، در روش‌های غرقابی (دائم و متناوب) شیوه کشت نشائی در زمین بدون گل‌خراپی در الویت بالاتر قرار گرفتند. به‌طور کلی افزایش هزینه‌های سامانه‌های نوین آبیاری و همچنین کاهش عملکرد شلتوک در کشت مستقیم بذر که در بخش‌های قبلی بحث شد، عوامل اصلی کاهش مقدار فایده به هزینه این تیمارها است. با این وجود اگرچه این تیمارهای بذری در مقایسه با تیمارهای نشائی کمتر شده‌اند ولی هزینه به فایده قابل قبولی دارند و در مقایسه با دیگر کشت‌های تابستانه هنوز در الویت اقتصادی قرار دارند.

مقدار آب کاربردی در شیوه‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای از نشاء سنتی به بذری کاهش معنی‌داری داشت ولی در روش‌های آبیاری غرقاب متناوب و دائم کشت بذری نسبت به نشاء سنتی آب بیشتری مصرف کرده است. مقایسه عملکردهای برنج در کشت نشائی سنتی، نشان می‌دهد که بالاترین عملکرد (۸۲۰۶ کیلوگرم در هکتار) مربوط به روش آبیاری غرقابی بود و در بقیه روش‌های آبیاری اختلاف معنی‌داری بین عملکردها مشاهده نشد. با تغییر آبیاری سنتی (غرقاب دائم) به آبیاری بارانی، متناوب و آبیاری قطره‌ای به ترتیب عملکرد در حدود ۱۴، ۹ و ۱۱ درصد کاهش داشت.

در شیوه آبیاری قطره‌ای با کشت نشائی سنتی در حدود ۳۳۶۰ متر مکعب در هکتار (۲۸ درصد) نسبت به روش غرقاب دائم آب کمتری مصرف شده است و در مقابل عملکرد در حدود ۸۶۳ کیلوگرم در هکتار (۱۱ درصد) کاهش داشت. به عبارت دیگر تنها با تغییر روش آبیاری از سنتی به قطره‌ای مقادیر قابل توجهی آب صرفه‌جویی خواهد شد. اما نبود انگیزه اقتصادی در کاهش مصرف آب، توصیه‌های کارشناسی در بین زارعین اثربخشی و کارکرد لازم را ندارند. در همین مقایسه از نظر کشاورز باز همان روش سنتی کشت شالی در الویت است. به دلیل اینکه ۸۶۳ کیلوگرم شالی در شرایط حاضر مبلغی در حدود ۸ میلیون تومان از درآمد زارع کم می‌شود در مقابل صرفه‌جویی ۳۳۶۰ متر مکعب آب که برای کشاورز با فرض فروش هر متر مکعب ۵۰۰ تومان، تنها در حدود ۱/۷ میلیون تومان جبران خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که با شیوه آبیاری سنتی برنج (غرقاب دائم) در صورتی‌که شیوه کشت بذر مستقیم در زمین غیرپادل باشد، بیشتر از روش سنتی آب مصرف می‌کند. بطوری‌که روش سنتی آبیاری در زمین غیرپادل و کشت مستقیم بذر بالاترین مصرف آب را بخود اختصاص داده است.

ارزیابی اقتصادی

ارزیابی اقتصادی نتایج سال زراعی ۱۳۹۸ حکایت از آن دارد که تیمارهای I₄C₃ و I₂C₃ نسبت به دیگر تیمارهای مورد بررسی دارای بیشترین نسبت فایده به هزینه (به ترتیب ۷/۴ و ۷/۱) می‌باشد (جدول

جدول ۴- نتایج ارزیابی و مقایسه اقتصادی تیمارهای کشت و آبیاری برنج

Table 4- Results of economic evaluation and comparison of rice cultivation and irrigation treatments

نسبت فایده به هزینه		تیمارها (Treatments)
Benefit/Cost		
1399	1398	
3.9	4.5	I ₁ C ₁
5.3	5.8	I ₁ C ₂
6.4	6.2	I ₁ C ₃
6.0	5.7	I ₂ C ₁
7.9	6.4	I ₂ C ₂
7.3	7.1	I ₂ C ₃
5.7	4.6	I ₃ C ₁
7.9	6.6	I ₃ C ₂
7.2	6.9	I ₃ C ₃
4.6	4.8	I ₄ C ₁
5.9	6.8	I ₄ C ₂
6.2	7.4	I ₄ C ₃

گیرد. بعد از آن بالاترین مقدار بهره‌وری مربوط به روش آبیاری قطره‌ای و کشت نشایی می باشد که بدون تغییر روش کشت و فقط با تغییر روش آبیاری انجام پذیر است.

نتیجه‌گیری

در حال حاضر کشاورزان در منطقه استان گلستان برنج را با شیوه غرقابی و بصورت نشاء در زمین پادل شده کشت می‌کنند که نتایج حکایت از مصرف زیاد آب (حدود ۱۳۰۰۰ متر مکعب در هکتار) دارد. برای کاهش مصرف آب در شیوه سنتی زارعین به استناد نتایج کارهای پژوهشی چند گام به شرح زیر باید برداشته شود:

۱- با تبدیل کشت سنتی نشاء و روش آبیاری غرقابی به کشت نشاء در زمین غیرپادل و روش آبیاری قطره‌ای عملکرد در حدود ۲۴ درصد کاهش و مقدار آب در حدود ۴۵ درصد کاهش می‌یابد و بهره‌وری آب در این حالت به ۰/۹ کیلوگرم در متر مکعب می‌رسد که در شرایط حاضر بهترین گزینه برای حفظ منابع آبی است. بنابر این سیستم آبیاری قطره‌ای با تغییر روش کشت از نشائی سنتی به روش نشائی غیر پادل بهترین تیمار می‌باشد.

۲- با تغییر شیوه آبیاری از غرقابی به قطره‌ای در کشت نشائی (بدون تغییر شیوه کشت) در حدود ۳۳۶۰ متر مکعب در هکتار (۲۸ درصد) نسبت به روش غرقاب دایم آب کمتری مصرف شده است و در مقابل عملکرد در حدود ۸۶۳ کیلوگرم در هکتار (۱۱ درصد) کاهش داشت.

۳- برای مناطقی که سیستم آبیاری بارانی موجود باشد استفاده از این روش در کشت نشائی گزینه بعدی انتخاب می‌شود.

۴- در صورتی که نتوان تغییری در سیستم آبیاری داد آبیاری متناوب در سیستم نشائی سنتی بهترین گزینه خواهد بود.

در حال حاضر کشاورزان در منطقه استان گلستان برنج را با شیوه غرقابی و بصورت نشاء در زمین پادل شده کشت می‌کنند که نتایج حکایت از مصرف زیاد آب (حدود ۱۲۵۰۰ متر مکعب در هکتار) دارد. با تغییر شیوه کشت از نشائی در زمین پادل شده که با روش آبیاری غرقابی آبیاری می‌شود، به کشت مستقیم بذری و روش آبیاری قطره‌ای، اگرچه مقدار مصرف آب در حدود ۴۸ درصد کاهش می‌یابد ولی چون عملکرد هم در همین حدود کاهش می‌یابد، کشاورزان رغبتی برای این جایگزینی نشان نمی‌دهند. در این حالت بهره‌وری آب نیز از ۰/۶۷ در روش سنتی به ۰/۶۴ کیلوگرم در متر مکعب در روش کشت مستقیم بذری با آبیاری قطره‌ای کاهش می‌یابد. اما با تغییر کشت بذری به کشت مستقیم نشائی در زمین غیرپادل و روش آبیاری قطره‌ای عملکرد به نحو مطلوبی افزایش می‌یابد و احتمال پذیرش این سناریو از طرف کشاورزان بیشتر خواهد شد. پاتل و همکاران (۱۶) نیز گزارش کردند که بهره‌وری آب برنج هوازی به‌طور قابل توجهی بیشتر از برنجی است که در شرایط غرقاب رشد کرده است. نتایج شاردا و همکاران (۲۲) بر روی کشت مستقیم بذر برنج نشان داد، آبیاری قطره‌ای باعث بیش از ۴۰٪ صرفه‌جویی در مصرف آب می‌شود و بهره‌وری آب با آبیاری قطره‌ای (۰/۸۱-۰/۸۸ کیلوگرم در متر مکعب) بالاتر از آبیاری غرقابی (۰/۴۲-۰/۵۲ کیلوگرم در متر مکعب) بود.

بدلیل اینکه با تبدیل کشت سنتی نشاء و روش آبیاری غرقابی به کشت نشاء غیر پادل و روش آبیاری قطره‌ای عملکرد در حدود ۲۴ درصد کاهش و مقدار آب در حدود ۴۵ درصد کاهش می‌یابد و بهره‌وری آب در این حالت به ۰/۹ کیلوگرم در متر مکعب می‌رسد که در شرایط حاضر بهترین گزینه برای حفظ منابع آبی بطوریکه معیشت کشاورزان نیز خدشه‌دار نمی‌شود، است. از آنجا که تغییر همزمان روش کشت و روش آبیاری ممکن است در عمل از نظر هزینه و اجرا برای کشاورزان دارای مشکلاتی باشد، باید سایر گزینه‌ها مورد توجه قرار

کشت مستقیم بذر و نشائی بدون پادل در مرحله بعدی اولویت قرار می‌گیرد. در صورتی که تغییر سیستم آبیاری مد نظر نباشد استفاده از آبیاری تناوبی با روش نشائی غیرپادل و سپس روش‌های سنتی و کشت مستقیم قرار می‌گیرد.

سیاسگزاری

نویسندگان مقاله از موسسه تحقیقات برنج کشور به خاطر حمایت مالی و از آقایان مهندس رحیم طبرسا و مهدی ادیبی به خاطر همکاری در اجرای این پژوهش قدردانی می‌نمایند.

۵- هرگاه تنها شیوه کشت از نشائی سنتی به بذری تبدیل شود ولی روش آبیاری تغییر نکند مصرف آب بیشتر و عملکرد هم حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد.

۶- با تبدیل کشت سنتی نشاء و روش آبیاری غرقابی به کشت مستقیم بذر و روش آبیاری قطره‌ای مصرف آب در حدود ۴۸ درصد و عملکرد هم در حدود ۴۵ درصد کاهش می‌یابد، این گزینه برای کشاورزان رغبتی ایجاد نمی‌کند.

۷- در صورتی که تنها کاهش مصرف آب اولویت اصلی باشد (صرف نظر از کاهش عملکرد)، بهترین تیمارها به ترتیب روش آبیاری قطره‌ای با کشت مستقیم بذر، نشائی بدون پادل و سپس نشائی سنتی می‌باشد. اگر سیستم آبیاری بارانی در مزرعه موجود باشد این گزینه در

منابع

- Bansal R., Sharma N., Soman P., Singh S., Bhardwaj A.K., Pandiaraj T., and Bhardwaj R.K. 2018. On-Farm Drip Irrigation in Rice for Higher Productivity and Profitability in Haryana, India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 7(2): 506-512.
- Bouman B. A. M., Wang H., Yang X., Zhao J. F., and Wang C.G. 2002. Aerobic rice, a new way of growing rice in water-short areas. P. 175-181. In E.D. Han Dao (ed) in Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization Conference, Beijing, China.
- He H., Ma F., Yang R., Chen, L., Jia B., Cui J., Fan H., Wang X., and Li L. 2013. Rice performance and water use efficiency under plastic mulching with drip irrigation. *Journal PLoS One* 8(12): 8310-8312.
- Cabangon R.J., and Abdullah N.B. 2002. Comparing water input and water productivity of transplanted and direct-seeded rice production systems. *Agricultural Water Management* 57: 11-31.
- Gilani A., and Rezaei M. 2001. Comparison of Sprinkler and Flood Irrigation Application for Rice Direct Seeding Cultivation in Khuzestan. *Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)*. Final report. (In Persian with English abstract)
- Kaur J., and Singh A. 2017. Direct Seeded Rice : Prospects, Problems Constraints and Researchable Issues in India, *Current Agriculture Research Journal* 5(1): 13-32.
- Kiani A.R. 2020. Determination of rice water requirement in Golestan province. *Shalazar Extension Journal* 1(2): 57-63. (In Persian with English abstract)
- Kiani A.R., and Razzaghi M.H. 2021. The effectiveness of rice direct seeding on yield and water productivity in rice fields of Golestan Province, *Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO) Technical report No: 58938*. (In Persian with English abstract)
- Kumar V., and Ladha J. K. 2011. Direct seeding of rice: recent developments and future research needs. *Adv. Agron.* 111: 297-413. doi: 10.1016/B978-0-12-387689-8.00001-1
- Kumar V., Ladha J.K., and Gathala M.K. 2009. Direct drill-seeded rice: a need of the day, in *Annual Meeting of Agronomy Society of America (Pittsburgh, PA)*. Available online at: <http://a-c-s.confex.com/crops/2009am/webprogram/Paper53386.html>
- Li Y.H. 2001. Research and practice of water-saving irrigation for rice in China. P. 135-144. In E.D. Barker B., Li Y. and Tuong T. P. in Proceedings of an International Workshop, Water-Saving Irrigation for Rice, 23-25 March 2001. Wuhan; Colombo: International Water Management Institute.
- Mahajan G., Chauhan B.S., Timsina J., Singh P.P., and Singh K. 2012. Crop performance and water- and nitrogen-use efficiencies in dry-seeded rice in response to irrigation and fertilizer amounts in northwest India. *Field Crops Research* 134: 59-70.
- Monaco F., Sali G., Ben Hassen M., Facchi A., Romani M., and Valè G. 2016. Water management options for rice cultivation in a temperate area: a multi-objective model to explore economic and water saving results. *Water* 8: 336-355. doi: 10.3390/w8080336.
- Naresh R.K., Misra A.K., and Singh S.P. 2013. Assessment of Direct Seeded and Transplanting Methods of Rice Cultivars in the Western Part of Uttar Pradesh. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Business Management* 1: 1-8.
- Nie L., Peng S., Chen M., Shah F., Huang J., and Cui K. 2012. Aerobic rice for water-saving in agriculture: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 32: 411-418. doi: 10.1007/s13593-011-0055-8.
- Patel D.P., Das A., Munda G.C., Ghosh P.K., Bordoloi S.J., and Kumar M. 2010. Evaluation of yield and

- physiological attributes of high yielding rice varieties under aerobic and flood-irrigated management practices in mid-hills ecosystem. *Agric Water Manage* 97: 1269-1276.
- 17- Rajwade Y.A., Swain D.K., and Tiwari K.N. 2014. Subsurface Drip Irrigation for Wet Season Rice Production under Climate Variability in India. Agricultural and Food Engineering Department, Indian Institute of Technology Kharagpur, Kharagpur, Medinipore (W), West Bengal, INDIA. p.p:293-300.
 - 18- Ramulu V., Praveen rao V., Uma devi M., Avil kumar K., and Radhika K. 2016. Evaluation of drip irrigation and fertigation levels in aerobic rice for higher water productivity 2nd world irrigation forum 6-8 November 2016, Chiang mai, Thailand.
 - 19- Rashid M.H., Alam M.M., Khan M.A.H., and Ladha J.K. 2009. Productivity and resource use of direct-(drum)-seeded and transplanted rice in puddled soils in rice-rice and rice-wheat ecosystem. *Field Crops Res.* 113: 274–281. doi: 10.1016/j.fcr.2009.06.004.
 - 20- Rasul G. 2016. Managing the food, water, and energy nexus for achieving the Sustainable Development Goals in South Asia. *Environ. Dev.* 18: 14–25. doi: 10.1016/j.envdev.2015.12.001.
 - 21- Sandhu N., Yadaw R.B., Chaudhary B., Prasai H., Iftekharuddaula K., Venkateshwarlu C., Annamalai A., Xangsayasane P., Battan K.R., Ram M., Cruz M.T.S., Pablico P., Maturan P.C., Raman K.A., Catolos M. and Kumar A. 2019. Evaluating the performance of rice genotypes for improving yield and adaptability under direct seeded aerobic cultivation conditions. *Front. Plant Sci.* 10:1-15. doi: 10.3389/fpls.2019.00159.
 - 22- Sharda R., Mahajan G., Siag M., Singh A., and Chauhan B.S. 2016. Performance of drip-irrigated dry-seeded rice (*Oryza sativa* L.) in South Asia. *The International Society of Paddy and Water Environment Engineering and Springer Japan*, 8 p.p
 - 23- Sidhu A.S., Kooner R., and Verma A. 2014. On-farm assessment of direct-seeded rice production system under central Punjab conditions. *Journal of Crop and Weed* 10(1): 56-60.
 - 24- Singh A. 2014. Evaluation of different methods of direct sowing of paddy. *International Journal of Agricultural Engineering* 7(1): 275-277.
 - 25- Singh S., Sharma S.N., and Prasad R. 2000. The effect of seeding and tillage methods on productivity of rice–wheat cropping system. *Soil & Tillage Research* 61(2001): 125–131.
 - 26- Stoop W., Uphoff N., and Kassam A. 2002. A review of agricultural research issues raised by the system of rice intensification (SRI) from Madagascar: opportunities for improving farming systems for resource-poor farmers. *Agric. Syst.* 71: 249–274. doi: 10.1016/S0308-521X(01)00070-1.
 - 27- Tabbal D.F., Bouman B.A.M., Bhuiyan S.I., Sibayan E.B., and Sattar M.A. 2002. On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice: case studies in the Philippines. *Agric. Water Manag* 56: 93–112. doi: 10.1016/S0378-3774(02)00007-0.
 - 28- USGS. 2016. USGS Fact Sheet. Available online at: <http://water.usgs.gov/edu/gwdepletion.html>.
 - 29- Xu L., Li X., Wang X., Xiong D., and Wang F. 2019. Comparing the Grain Yields of Direct-Seeded and Transplanted Rice: A Meta-Analysis. *Agronomy*, 14 pp.
 - 30- Wang H., Bouman B. A. M., Zhao D., Wang C., and Moya P.F. 2002. Aerobic rice in northern China: opportunities and challenges, P.143–154. In E.D. Bouman B. A. M., Hengsdijk H., Hardy B., Bindraban P. S., Tuong T. P., and Ladha J. K. (ed), in *Proceedings of the International Workshop on Water-Wise Rice Production, Water-Wise Rice Production*, 8-11 April, Los Baños: International Rice Research Institute.
 - 31- Weller S., Janz B., Jörg L., Kraus D., Racela H.S., and Wassmann R. 2016. Greenhouse gas emissions and global warming potential of traditional and diversified tropical rice rotation systems. *Glob. Change Biol.* 22: 432–448. doi: 10.1111/gcb.13099.

Comparison of Rice Direct Seeding and Transplanting Methods under Different Irrigation Methods

A.R. Kiani^{1*}- M.R. Yazdani²- M.T. Feyzbakhsh³

Received: 11-04-2021

Accepted: 28-10-2021

Introduction: In Golestan province, despite the lack of water resources, traditional rice cultivation, a crop with high water consumption, is increasing due to economic justification. This issue has become one of the main problems of the province's agricultural sector in recent years. In order to prepare the planting bed (puddled transplanting) in the traditional method of rice production, a significant amount of irrigation water is used before planting the seedlings in the main land. Moreover, the plant is in the water during the growing season, which causes high water losses by surface water evaporation and deep penetration. Rice direct seeding cultivation is a method that has been considered in the world for various reasons, including higher water productivity. Currently, reports indicate that more than 50% of groundwater resources are extracted and allocated annually for rice cultivation in the region investigated. In general, field information and observations indicate that the level of paddy cultivation is increasing in the province. In the past few decades, agricultural policymakers have sought to restrict and ban rice cultivation in the country, except in Gilan and Mazandaran provinces. The rationale behind this decision is high water consumption, declining groundwater aquifers and long-term instability of water resources. The developed strategy did not work effectively, as it did not consider the benefits of the farmers in the short run. The increasing trend in the area under paddy fields from 1995 to 1500 hectares per year shows the unsuccessfulness of this up-to-down strategy.

Materials and Methods: A field experiment was conducted to investigate the effect of rice cultivation and irrigation methods on yield, water consumption and water productivity over two rice cropping seasons (2019–2020) in northern Iran (Gorgan Agricultural Research Station). Irrigation method as the main factor in four levels (permanent flooding, intermittent as wet and dry, sprinkler, tape) and cultivation method in three levels (direct seed in dry bed, non-puddled transplanting and traditional transplanting) in the form of a strip design. The plot was based on a randomized complete block design with three replications. The applied water, yield and some yield components and water productivity were measured and calculated during the growing seasons.

Results and Discussion: The results showed that in all irrigation methods, yield was significantly reduced by changing the traditional seeding transplanting to dry seed. The amount of water applied in sprinkler and drip irrigation methods from traditional seedlings was significantly reduced as compared to direct seed seeding. Dry seed cultivation, however, consumed more water than traditional transplanting in the flood irrigation treatments (wet and dry and permanent). The highest yield (8206 kg/ha) was obtained for traditional seedling cultivation by flood irrigation, and no significant difference was observed between the yields for the other irrigation methods. In general, changing the irrigation systems had a greater effect on water consumption than changing the rice cultivation method. In addition, changing the cultivation method had a greater effect on changing the type of irrigation systems. In traditional transplanting cultivation, the yield decreased by about 14, 9 and 11%, respectively, by changing the irrigation systems from permanent flood irrigation to sprinkler, wet and dry, and drip irrigation. The highest water use was observed for flood irrigation method in direct seeding (12490 m³/ha) and direct transplanting (11967 m³/ha).

Conclusion: Currently, farmers cultivate rice by transplanting in padded land irrigated by flooding techniques in Golestan province, which results in high water consumption (about 13,000 m³/ha). By changing the irrigation method from flood irrigation to drip for traditional transplanting cultivation, water consumption decreased by about 39% and as a result water productivity increased by about 22%, albeit a 11% reduction in yield occurred. With the conversion of traditional transplanting seedling by flood irrigation to non-puddled transplanting by drip

1- Professor of Agricultural Engineering Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran

(*- Corresponding Author Email: akiani71@yahoo.com)

2- Assistant Professor, Agricultural Engineering Department, Rice Research Institute of Iran, Rasht, Iran, AERREO

3- Assistant Professor, Agronomy & Horticulture Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Gorgan, Iran, AERREO

DOI: 10.22067/JSW.2021.69302.1036

irrigation, the yield decreased by about 24% and the amount of water by about 45%, and water productivity in this case reached 0.9 kg/m³. This can be considered as the best alternative for conserving both water resources and production. If only reducing water consumption is the main priority (regardless of yield reduction), the best treatments are drip irrigation with direct seeding, non-puddled transplanting and then traditional seedling, respectively. If there is a sprinkler irrigation system in the field, this option is given priority in the direct seeding and non-puddled transplanting. If changing the irrigation system is not considered, the use of intermittent irrigation (as a wet and dry) with non-puddled transplanting, traditional methods and direct seeding are preferred, respectively.

Keywords: Direct seeding, Gorgan, New irrigation systems, Rice, Transplanting

مقاله پژوهشی

بررسی کارایی شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) به منظور ارزیابی بلندمدت تأثیرات انتقال آب بین حوضه‌ای با کمک روش‌های ناپارامتری و GIS (مطالعه موردی آبخوان یزد- اردکان)

حسین سروی صدرآباد^۱ - اصغر زارع چاهوکی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۶

چکیده

بررسی روند زمانی و تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی متأثر از انتقال آب بین حوضه‌ای در مدیریت منابع آبی نقش مهمی دارد. هدف از این پژوهش، بررسی روند زمانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با استفاده از آزمون من‌کنندال و تخمین‌گر شیب سن و بررسی تغییر مکانی کیفیت آب زیرزمینی و تأثیرات انتقال آب بین حوضه‌ای می‌باشد. بدین منظور از پارامترهای کل جامدات محلول، کلر، سولفات، سدیم، کلسیم و منیزیم مربوط به ۴۳ چاه در دوره زمانی ۱۳۷۹-۱۳۹۹ جهت بررسی روند زمانی و مکانی استفاده شد. نتایج بررسی روند زمانی نشان داد، پارامترهای سولفات، سدیم و کل جامدات محلول در بیشتر چاه‌ها روند کاهشی داشته است، اما شاخص‌های کلسیم، منیزیم و کلر دارای روند افزایشی بوده است و همه پارامترها به جز TDS، در دوره زمانی مورد بررسی بر اساس طبقه بندی سازمان بهداشت جهانی در حد مجاز قرار داشتند. نتایج رتبه‌بندی پارامترها نشان داد، TDS، کلر و منیزیم بیشترین تأثیر را بر کیفیت منابع آب زیرزمینی آبخوان داشته‌اند و همچنین پارامتر منیزیم بیشترین و TDS کمترین تغییر را در بین سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹ دارا بود. کاربرد شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) در این پژوهش نشان داد که کیفیت کلی آبخوان یزد- اردکان، حتی با توجه به افت نسبتاً زیاد آب زیرزمینی، در ابتدا و انتهای دوره زمانی مورد بررسی در رده‌ی متوسط (۸۰-۶۰) و قابل قبول قرار دارد و کاهش کیفیت در این دوره بسیار کم و قابل چشم‌پوشی است. نتایج نهایی پژوهش حاضر نشان داد، آب انتقالی با کیفیت مناسب توانسته افزایش میزان کل جامدات محلول، سولفات و سدیم را کنترل کند و موجب افزایش کلر در این مناطق شود. در انتها مشخص شد، تغییرپذیری مکانی آلاینده‌های مختلف و طیف گسترده پارامترهای اندازه‌گیری شده و به‌طور کلی توصیف کیفیت آب، امری دشوار است؛ بنابراین استفاده از شاخص‌های کیفیت آب می‌تواند شرایط کلی کیفیت آب را به‌طور خلاصه و قابل‌درک ارائه کند.

واژه‌های کلیدی: انتقال آب، شاخص کیفیت آب زیرزمینی، شیب سن، من‌کنندال، یزد- اردکان

مقدمه

برای بخش‌های شرب، کشاورزی و صنعت نقش اساسی را ایفا می‌کند. اما افزایش روزافزون آلاینده‌های شیمیایی شهری و صنعتی، شیوه‌های نوین کشاورزی و حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق بدون توجه به توان آبخوان‌ها تهدیدی جدی برای محیط‌زیست به حساب می‌آیند و سبب شدند، عدم وجود آب با کیفیت مناسب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به یک بحران جدی تبدیل شود. به طوری که متولیان امر را بر آن داشته تا انتقال آب بین حوضه‌ای جهت رفع نیاز مناطق کم آب را در اولویت کاری خود قرار دهند. اما به دلیل عدم جامع‌بینی، این امر موجب ایجاد تنش‌هایی مابین مناطق مبدأ و هدف شده که توجه بیشتر به کیفیت منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک جهت خودکفایی و نیاز کمتر به آب‌های انتقالی را بسیار حیاتی کرده است. از طرفی تقاضا برای حرکت به سمت توسعه پایدار مهمترین

آبخوان‌ها، یک ذخیره مهم آب برای کاربردهای مختلف به شمار می‌رود، به طوری که در بخش‌های زیادی از کشورمان به دلیل عدم دسترسی به آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی در تأمین آب مصرفی

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی

۲- استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کوبرشناسی، دانشگاه یزد

(* - نویسنده مسئول: Email: zare.chahouki@yazd.ac.ir

DOI: 10.22067/JSW.2021.71571.1073

همکاران (۱۹) به مطالعه تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان با استفاده از GQI پرداختند. نتیجه نشان داد، سه پارامتر مواد جامد محلول، سدیم و کلر با داشتن بیشترین ضریب رتبه‌بندی به ترتیب دارای بیشترین تاثیر در مقدار شاخص GQI و در نتیجه کیفیت آب زیرزمینی هستند. همچنین روند شاخص GQI در منطقه مورد مطالعه نزولی است و کاربری اراضی نقش بسیار زیادی در کاهش میزان کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت یزد- اردکان دارد. پارسایی و همکاران (۲۴) مطالعه‌ای جهت بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب و کشاورزی در دشت قروه در استان کردستان با استفاده از داده‌های سالانه ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۳ انجام دادند. نتایج به دست‌آمده در مورد کیفیت آب‌های زیرزمینی از نظر شرب و کشاورزی نشان داد که مساحت مناطق دارای کلاس‌های مناسب‌تر در حال کاهش و مساحت مناطق دارای کلاس‌های نامناسب در حال افزایش است. نورکی و هوشمند (۲۳) طی مطالعه‌ای به بررسی روند و الگوی توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های کیفی آب با استفاده از آزمون‌های ناپارامتری و روش‌های درون‌یابی در دشت همدان بهار پرداختند. بر اساس نتایج حاصل از مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی، روش RBF نسبت به روش‌های دیگر برتری داشت و از دقت بالا و خطای پایینی برخوردار بوده است لذا درون‌یابی با این روش صورت گرفت. در پایان مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی شاخص WQI نشان داد که در ابتدا و انتهای دوره آماری ۱۰ ساله مورد بررسی میزان شاخص در کل سطح دشت یک روند کاهشی دارد. ناصری و همکاران (۲۲) از یک رویکرد مکانی-زمانی کریجینگ برای بررسی الگوی کیفی حاکم بر تالاب بامدژ بر اساس چند شاخص کیفیت آب استفاده کرد. سبزواری و زینی‌وند (۲۶) اخیراً در دشت بروجرد- دورود با روش ناپارامتری من‌کندال و شاخص ذکر شده به بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی پرداخته و قدرت ارزیابی روش‌های ناپارامتری در روندیابی فاکتورهای کیفی را مناسب ارزیابی کردند.

همچنین گریزبونا و همکاران (۱۳)، ژنگ و همکاران (۳۵)، سان و همکاران (۲۹)، البابا و همکاران (۱۰)، ابراهیم (۱۶)، دشتی برمکی و همکاران (۷)، سبزواری و زینی‌وند (۲۵)، دوست محمدیان و همکاران (۹)، یونسی و همکاران (۳۴)، محمدی و همکاران (۲۱)، علیپور و همکاران (۲) و ترابی پوده و همکاران (۳۰) روند زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی را از روش‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. اقلیم و بارش ناچیز استان یزد و شرایط کم‌آبی و بحران آب در این استان سبب شده تا به عنوان مقصد انتقال آب بین حوضه‌ای تلقی شود. اما از طرفی بحث صنعت و اشتغال نیز در این استان رونق دارد و استانی مهاجرپذیر محسوب می‌شود. پس بررسی کیفیت آب زیرزمینی و ارزیابی تاثیرات عوامل مختلف بر آبخوان‌ها در مقیاس زمانی و مکانی مختلف امری مهم می‌باشد. برای بررسی روند زمانی و مکانی

چالش فراروی جامعه بشری در قرن بیست و یکم است. در این راستا از یک سو دسترسی به منابع آب کافی با کیفیت مطلوب را اولین شرط دستیابی به توسعه پایدار مطرح می‌کنند و از سوی دیگر، فقدان منابع آب را مهمترین عامل عدم دستیابی به توسعه پایدار و به تبع آن استقرار پایدار جمعیت می‌دانند (۲، ۱۸ و ۳۲).

اگرچه مفهوم کیفیت آب زیرزمینی واضح به نظر می‌رسد، اما چگونگی بررسی و ارزیابی آن، نیاز به برخی ترفندها دارد (۴ و ۵). ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی، مقیاسی از تناسب آن به عنوان منبع آبی برای مصارف انسانی و حیوانی، آبیاری و برای اهداف صنعتی و غیره را شامل می‌شود. بنابراین، هدف، تعریف کیفیت آب نیست، بلکه استفاده مطلوب از آب در جامعه، مورد نظر متخصصان است (۷ و ۱۱). بر این اساس استانداردهای مختلفی برای هر متغیر تعریف شده است که اگر آب از این استاندارد تجاوز کند، قبل از استفاده باید تصفیه شود (۶). سازمان بهداشت جهانی (WHO)، به عنوان یکی از سازمان‌های متولی این امر، استانداردهایی از غلظت یون‌ها در آب آشامیدنی معرفی کرده‌است. همچنین جهت اعلام و یا مقایسه کیفیت آب در مناطق مختلف، شاخص‌هایی بر اساس میزان پارامترهای کیفیت آب مطرح شده که شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) یکی از این شاخص‌هاست. این شاخص از جمله شاخص‌هایی است که بر پایه GIS استوار است و جهت بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی می‌توان از آن استفاده کرد. این شاخص توسط بایبکر و همکارانش (۴) به منظور استنباط بهتر از غلظت یون‌های اصلی از کل سطح منطقه ارائه شد.

به منظور بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی علاوه بر بررسی مکانی کیفیت آب، بررسی روند زمانی کیفیت جهت آگاهی از شرایط آبخوان‌ها و مدیریت صحیح و با برنامه نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به منظور بررسی و تحلیل روند سری زمانی، تاکنون روش‌های متعددی ارائه گردیده‌است که این روش‌ها به دو دسته پارامتری و ناپارامتری قابل تقسیم می‌باشند. روش‌های ناپارامتری از کاربرد وسیع‌تری نسبت به روش‌های پارامتری برخوردار می‌باشند. آزمون من‌کندال از روش‌های ناپارامتری می‌باشد که ابتدا توسط من (۲۰) ارائه و سپس توسط کندال (۱۷) توسعه یافت. در روش‌های ناپارامتری اساس کار بر تفاوت داده‌های مشاهداتی است به گونه‌ای که این روش‌ها مستقل از توزیع آماری سری‌های زمانی بوده و خصوصاً برای سری‌هایی که چولگی و کشیدگی زیاد دارند مناسب‌تر از روش‌های پارامتری می‌باشند. ترکیب نتایج حاصل از بررسی‌های مکانی و زمانی می‌تواند ما را در جهت مدیریت درست و آگاهی از مشکلات و مسائل پیش‌رو یاری دهد و گرایش و مسیر حرکت کیفیت منابع آب در مناطق مختلف را تعیین کند.

طی سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در خصوص کیفیت منابع آب زیرزمینی و تحلیل و تفسیر آن صورت گرفته‌است. خسروی و

می‌باشد. شکل ۱ نقشه تراز آب زیرزمینی دشت، موقعیت آبخوان و چاه‌های مورد بررسی در استان و کشور می‌باشد.

طبق نتایج دهقان و همکاران (۸) چاه‌ها در دشت یزد- اردکان بیشتر روی سازندهای آبرفتی واقع شده‌اند. همچنین سازندهای آبرفتی بیشترین تأثیر را بر آب چاه‌های دشت دارند. پس از آن سازند آهکی کرتاسه تأثیرگذاری بیشتری بر آب چاه‌ها دارد زیرا در جهت جریان آب گسترش بیشتری داشته است. پس از سازندهای ذکر شده مهمترین سازندها و سنگ‌ها در دشت مورد مطالعه می‌توان به قرمز بالایی، سلطانیه و آندوزیت اشاره کرد. ورودی آب‌های زیرزمینی به دشت، در بخش جنوبی از ارتفاعات شیرکوه و خروجی در قسمت شمالی در ابتدای حوزه سیاهکوه بوده و جهت عمومی آب زیرزمینی از جنوب به سمت شمال می‌باشد (۱). بیشترین تراز آب زیرزمینی ۱۶۸۳ متر از سطح دریا در جنوب دشت و کمترین تراز ۹۴۱ متر از سطح دریا در شمال دشت قرار دارد و از شمال به جنوب افزایش می‌یابد.

مطالعات طرح انتقال آب از زاینده‌رود به یزد از سال ۶۳ آغاز و سپس عملیات اجرایی آن از سال ۱۳۷۳ شروع گردید و بهره‌برداری از این طرح عظیم از سال ۱۳۷۹ آغاز گردید. بر همین اساس شروع دوره آماری مورد بررسی در این پژوهش از سال ۱۳۷۹ می‌باشد. با اجرای این طرح سالانه ۷۸ میلیون متر مکعب آب از زاینده‌رود انتقال می‌یابد. انتقال آب از محل آبگیر تا مخازن شحنه یزد به طول ۳۳۳ کیلومتر به صورت ترکیبی از سیستم ثقلی و پمپاژ همراه با ۱۰ مخزن ذخیره و فشارشکن ۵۰۰۰ متر مکعبی در طول مسیر و ۴ مخزن ذخیره ۲۰۰۰۰ مترمکعبی در شحنه یزد صورت می‌گیرد.

روش تحقیق

در پژوهش حاضر، بررسی روند تغییرات زمانی منابع آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان با آزمون‌های ناپارامتری من‌کنندال و تخمین‌گر شیب سن انجام گردید و جهت بررسی روند مکانی و ارزیابی و طبقه‌بندی کیفیت از طریق روش‌های درون‌یابی مناسب و شاخص کیفی منابع آب زیرزمینی (GQI) استفاده شد. با بررسی‌های انجام‌شده ۵۰ چاه شناسایی شد که دارای اطلاعات کیفی آب زیرزمینی در محدوده مورد نظر بود اما با بررسی دوره زمانی آن‌ها و همچنین بررسی نقص‌های آماری در نهایت ۴۳ چاه انتخاب گردید که دارای دوره زمانی حدوداً نزدیک به هم با اطلاعات تقریباً کامل بودند. این اطلاعات از شرکت آب منطقه‌ای استان یزد دریافت گردید و شامل یون‌های کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، کلر (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-}) و کل جامدات محلول (TDS) می‌باشد که در همه چاه‌ها دوره زمانی برابر (۱۳۷۹-۱۳۹۹) در نظر گرفته شد.

و همچنین تعیین کیفیت منابع آب زیرزمینی، روش‌ها و شاخص‌های متنوعی معرفی و توسعه داده شده است، که هر کدام از این روش‌ها از فاکتورهای مختلف، برای ارزیابی کیفیت آب بهره می‌گیرند. پژوهش‌های مرتبط نشان داد، استفاده از هر کدام از این معیارها به‌تنهایی نمی‌تواند گویای وضعیت و گرایش کیفیت منابع آب زیرزمینی باشد.

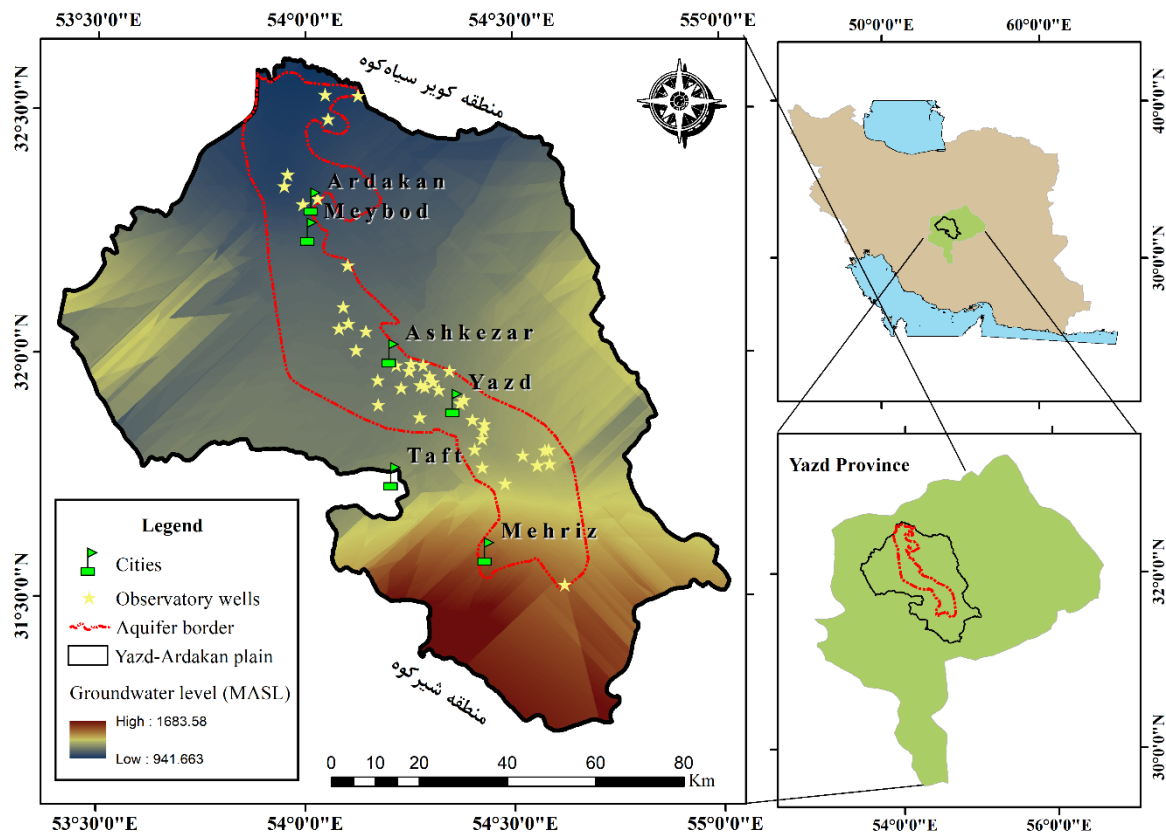
بر اساس نتایج و دهقان و همکاران (۱۳۹۹) علارغم ورود آب سرچشمه‌های زاینده‌رود در دهه ۹۰-۸۰ به دشت یزد اردکان که به عنوان آب شرب و صنعت مصرف می‌شود (اواخر اسفند ۱۳۹۷)، تراز ارتفاعی آب نسبت به دهه قبل با کاهش ۱۰۰ متری مواجه بوده است که وجود خشکسالی و برداشت بی‌رویه را می‌توان دلیل کاهش تراز ارتفاعی دانست. این کاهش تراز در ناحیه شمالی دشت که کویر سیاه‌کوه می‌باشد به ۱۰۰ متر بالغ می‌باشد. همچنین عمق برخورد به آب در چاه‌های دشت، در دو دهه نیز از شمال به جنوب در حال افزایش می‌باشد به طوری که عمق برخورد نسبت به یک دهه قبل به میزان ۱۰ متر افزایش داشته است. بیشترین میزان برخورد آب در چاه‌ها در قسمت جنوبی (اطراف شیرکوه) و کمترین مربوط به بخش شمالی (حاشیه کویر سیاه‌کوه) می‌باشد. طبق هیدروگراف آب زیرزمینی تراز دشت از ۱۱۶۶ متر در سال ۷۰ به ۱۰۴۳ متر در سال ۹۰ کاهش یافته که حاکی از بیلان منفی مداوم در دشت می‌باشد.

تاکنون پژوهشی در خصوص بررسی روند کیفیت آب زیرزمینی در دو مقیاس زمانی و مکانی در مناطق خشک ایران و بررسی ارتباط آن با انتقال آب گزارش نشده است. از این رو پژوهش حاضر، به بررسی روند تغییرات زمانی با استفاده از آزمون‌های ناپارامتری و همچنین تعیین تغییرات مکانی مشخصه‌های کیفی مختلف منابع آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان و طبقه‌بندی کیفیت کلی دشت با استفاده از شاخص GQI پرداخته است. همچنین با استفاده از مقایسه نقشه‌های سال ابتدایی و انتهایی آمار و استفاده از فرمول‌های ریاضی به تعیین میزان درصد تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی پرداخته شد، به طوری که با این تکنیک می‌توان گرایش کیفیت آب در مناطق مختلف را تعیین و از مکان‌های در خطر آگاهی کسب کرد. همچنین می‌توان با بهره‌گیری از این تکنیک‌ها از تأثیرات مثبت و منفی آب‌های انتقالی بین حوضه‌ای اطلاعات ارزشمندی کسب کرد.

مواد و روش‌ها

خصوصیات منطقه مورد مطالعه

آبخوان یزد- اردکان در وسط دشت از شمال تا جنوب کشیده شده و دارای مساحتی حدود ۲۶۱۲/۲۷ کیلومتر مربع می‌باشد که حدود ۲۲/۵ درصد از دشت یزد- اردکان را شامل می‌شود و اکثر چاه‌های مشاهداتی، برداشتی و حتی پیژومتر در محدوده آبخوان



شکل ۱- نقشه تراز آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان و موقعیت چاه‌های مشاهداتی و آبخوان این دشت در استان و کشور
Figure 1- Groundwater level map of Yazd-Ardakan plain and location of observatory wells and aquifer

$$s = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

که در آن: n تعداد مشاهدات و x_j, x_k داده‌های زام k و j ام سری‌اند. تابع علامت نیز با رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\text{sgn} = \begin{cases} +1 & \text{اگر } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{اگر } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{اگر } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

ب: محاسبه واریانس که از رابطه (۳) و (۴) به دست می‌آید:
(۳) اگر $n > 10$

$$\text{Var} = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i t_i (t_i - 1)(2t_i - 1)(2t_i + 5)}{18}$$

(۴) اگر $n < 10$

$$\text{Var} = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

که در نهایت n تعداد داده‌های مشاهده‌ای، m معرف تعداد سری‌هایی که در آن حداقل یک داده تکراری وجود داشته باشد و t

با توجه به اطلاعات موجود، اندازه‌گیری‌های کیفیت آب زیرزمینی دو بار در سال از روش حجم‌سنجی انجام شده‌است که یکی در فصل بهار و دیگری در فصل پاییز می‌باشد. در مطالعه حاضر همچنین جهت مقایسه‌ی میزان پارامترهای دشت از استاندارد سازمان بهداشت جهانی (۳۲) استفاده گردید. در زیر روش‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر توضیح داده می‌شود.

محاسبه روند زمانی از طریق روش‌های ناپارامتری

همانند سایر آزمون‌های آماری، روش روندیابی من‌کنندال نیز بر مبنای مقایسه فرض صفر و یک بوده و در نهایت در مورد پذیرش یا رد فرض صفر تصمیم‌گیری می‌نماید. فرض صفر این آزمون مبتنی بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌هاست و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد. مراحل محاسبه آماره‌های این آزمون به شرح زیر می‌باشد:
الف: محاسبه اختلاف بین تک‌تک جملات سری با همدیگر و اعمال تابع علامت و استخراج پارامتر s که از رابطه (۱) به دست می‌آید:

معرف داده‌های با ارزش یکسان می‌باشد.

ج: نهایتاً مقدار آماره Z توسط یکی از روابط زیر تعیین می‌گردد:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{اگر } S > 0 \\ 0 & \text{اگر } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{اگر } S < 0 \end{cases} \quad (۵)$$

در یک آزمون دو طرفه برای یافتن روند سری داده‌ها، فرض صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که رابطه‌ی (۶) برقرار باشد:

$$|Z| \leq Z_{\frac{\alpha}{2}} \quad (۶)$$

که در آن: α سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Z آماره‌ی توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری می‌باشد، که با توجه به دو دامنه بودن آزمون، از $\frac{\alpha}{2}$ استفاده شده‌است. در این تحقیق آزمون من‌کنندال برای سطح اطمینان ۹۹ درصد به کار گرفته شده است که مقدار $Z_{\frac{\alpha}{2}}$ برابر ۲/۶۵ می‌باشد. دلیل عدم استفاده از سطح ۹۵ درصد اطمینان، نزدیکی نتایج حاصل از دو سطح اطمینان مذکور می‌باشد.

در صورت مثبت بودن آماره‌ی روند، سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن، روند نزولی در نظر گرفته می‌شود. برای اندازه‌گیری میزان روند می‌توان شیب تخمینی β را توسط رابطه‌ای که توسط سن (۲۷) ارائه و توسط هیرش و همکاران (۱۵) توسعه یافت محاسبه کرد. این روش همانند روش من‌کنندال بر اساس مفهوم تفاوت بین مشاهدات یک سری زمانی بنا نهاده شده‌است. رابطه به صورت زیر تعریف شده‌است:

$$\beta = \frac{x_t - x_s}{t - s} \quad (۷)$$

در این رابطه: x_s و x_t به ترتیب داده‌های مشاهده‌ای در زمان t و s می‌باشد. به طوری که t یک واحد زمانی بعد از s است. با اعمال این رابطه برای هر دو جفت داده مشاهده‌ای، یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه شده به دست می‌آید که از محاسبه میانه این سری زمانی، شیب خط روند (β_{med}) حاصل می‌آید. مقدار مثبت (β_{med}) حاکی از صعودی بودن روند و مقدار منفی آن نشان‌دهنده نزولی بودن روند می‌باشد (۳۱). هردو روش مذکور با استفاده از نرم افزار XLSTAT 2019 انجام گردید. همچنین برای تحلیل روند در سطح آبخوان یزد-اردکان، مقدار بزرگی روند (β_{med}) و همچنین وجود یا عدم وجود روند به دست آمده برای هر چاه در محیط GIS ترسیم شد.

روش بهینه با توجه به RMSE کمتر و R^2 بیشتر به دست آمد. روش‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر، کریجینگ^۱، عکس فاصله (IDW)^۲، توابع شعاعی (RBF)^۳، تخمین‌گر موضعی (GPI)^۴ و تخمین‌گر عام (LPI)^۵ می‌باشد. پس از انتخاب بهترین مدل جهت درون‌یابی هر یک از فاکتورهای کیفی، اقدام به استخراج نقشه پهنه‌بندی با استفاده از داده‌های نقطه‌ای در دو سال ۱۳۷۹ و ۱۳۹۹ شد و با استفاده از شاخص کیفی آب زیرزمینی (GQI) اقدام به استخراج نقشه شاخص مذکور شد. لازم به ذکر است فاکتورهای کیفی مورد بررسی در روند زمانی و مکانی یکسان بوده است.

توسعه شاخص کیفی آب‌های زیرزمینی

شاخص کیفیت آب زیرزمینی، ترکیب داده‌های آب با کیفیت‌های مختلف در دسترس را به شکلی قابل درک در می‌آورد. این شاخص ارائه‌دهنده روشی برای مختصرسازی شرایط کلی کیفیت آب است که می‌تواند به خوبی ارائه شود و به درک این مسئله که آیا کیفیت کلی آب زیرزمینی خطری بالقوه برای استفاده‌های مختلف آب است یا خیر، کمک می‌کند. در نهایت این شاخص با استفاده از غلظت یون‌های مهم مانند (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، کلر (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-}) و کل جامدات محلول (TDS)، به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان و نشان دادن موفقیت در حفظ و بهبود و همچنین بررسی وضعیت کلی آب زیرزمینی کمک می‌کند. مراحل محاسبه این شاخص نیز به شرح زیر می‌باشد:

نقشه اولیه

غلظت اندازه‌گیری شده در هر سلول (نقشه‌های استخراجی با کمک روش‌های مناسب درون‌یابی در مرحله قبل) و غلظت استاندارد بهداشت جهانی (۳۲) را به واسطه رابطه شاخص اختلاف نرمالیزه شده (رابطه ۸) ترکیب و داده‌ها به صورت نرم جهانی^۶ استخراج شد (۴).

$$C = \bar{X} - X/\bar{X} + X \quad (۸)$$

در این رابطه: X و \bar{X} به ترتیب غلظت استاندارد سازمان بهداشت جهانی و غلظت اندازه‌گیری شده می‌باشد.

نقشه به دست آمده بیان‌گر فاکتورهای کیفی است که به عنوان نسبت بین غلظت اندازه‌گیری شده و حداکثر غلظت قابل پذیرش محاسبه شده است و محدوده‌ای بین -۱ تا ۱ را داراست.

تهیه الگوی مکانی کیفیت آب زیرزمینی

برای بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی، از روش‌های مختلف درون‌یابی (قطعی و زمین‌آمار) استفاده شد. بدین منظور، روش‌های مختلف درون‌یابی در نرم‌افزار GIS با یکدیگر مقایسه و

- 1- Kriging
- 2- Inverse Distance Weighting
- 3- Radial Basis Function
- 4- Global Polynomial interpolation
- 5- Local Polynomial interpolation
- 6- Universal norm

نقشه رتبه‌بندی

نمی‌گردد. جدول ۱ کلاس‌بندی مقادیر شاخص GQI را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

جدول ۲ آمار توصیفی پارامترهای بررسی شده در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد و غلظت‌های آستانه را بر حسب استاندارد سازمان بهداشت جهانی بیان می‌دارد.

روند زمانی

شکل ۲ نشان‌دهنده وضعیت روند مشخصه‌های کیفی هر کدام از چاه‌هایی مورد بررسی است که از طریق روش‌های من‌کندال و شیب سن در سطح ۹۹ درصد انجام شد. نتایج نشان داد، در دوره آماری مورد بررسی شاخص‌های سولفات، سدیم و کل جامدات محلول در بیشتر چاه‌ها روند کاهشی داشته اما شاخص‌های کلسیم، منیزیم و کلر، به خصوص در مناطق شمالی دشت، دارای روند افزایشی بوده‌است. علاوه بر تراکم جمعیت در مرکز دشت، مشخصه‌های کلر، کل جامدات محلول، سولفات و سدیم در این محدوده دارای روند کاهشی و یا فاقد روند می‌باشد. بر این اساس، در آبخوان یزد_اردکان تغییرات سولفات، سدیم و TDS تا حدودی مشابه و سه پارامتر کلسیم، منیزیم و کلر نیز با هم مشابه هستند که با نتیجه خسروی و همکاران (۱۸)، دشتی برمکی و همکاران (۷) و سبزواری و زینی‌وند (۲۴) تا حدودی مطابقت دارد. طبق نتیجه پژوهش‌های ذکر شده سدیم، کلر و TDS بیشترین تاثیر را در تعیین کیفیت آب زیرزمینی داشته و رویه تغییرات مشابهی دارند.

در این مرحله، غلظت شاخص‌ها به یک نقشه رتبه‌بندی با محدوده بین ۱ تا ۱۰ تبدیل می‌شود. رتبه ۱ نشان‌دهنده کمترین مقدار و رتبه ۱۰ بیشینه می‌باشد. می‌توان از تابع چند جمله‌ای زیر (رابطه ۹) با محدوده تغییرات ۱ تا ۱۰ استفاده کرد. در این معادله، C مقدار شاخص‌های کیفی برای هر سلول و r مقدار رتبه مربوط به آن می‌باشد (۴).

$$r = 0.5 \times C^2 + 4.5 \times C + 5 \quad (9)$$

برای تعیین کلی کیفیت آب از طریق رابطه زیر، پهنه‌بندی GQI ترسیم می‌گردد.

$$GQI = 100 - \left[\frac{r_1w_1 + r_2w_2 + r_3w_3 + \dots + r_6w_6}{6} \right] \quad (10)$$

در رابطه فوق r رتبه و w وزن نسبی هر یک از پارامترها می‌باشد. وزن نسبی هر پارامتر از رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$w = \text{mean } r + 2 \quad (11)$$

برای محاسبه GQI از پارامترهای مختلف میانگین وزنی گرفته می‌شود (۱۳). وزن مختص هر پارامتر، بیان‌کننده اهمیت نسبی آن پارامتر در آب زیرزمینی مربوط به مقدار رتبه‌بندی میانگین (نقشه رتبه‌بندی) آن است. پارامترهایی که تاثیر بیشتری بر کیفیت آب‌های زیرزمینی (میزان میانگین بالا) دارند، در ارزیابی کلی کیفیت آب زیرزمینی مهم‌تر هستند. در نهایت و با تقسیم حاصل ضرب رتبه هر پارامتر در وزن میانگین آن بر تعداد کل پارامترها، شاخص کیفیت آب زیرزمینی با محدوده مقدار شاخص بین ۱ تا ۱۰۰ به دست می‌آید. مقادیر نزدیک به عدد ۱۰۰ نشان‌دهنده کیفیت مطلوب و مقادیر نزدیک به یک بیان‌گر کیفیت نامطلوب است. بدین ترتیب تاثیر پارامترها به صورت انفرادی تا حد زیادی کاهش می‌یابد و محاسبه شاخص هرگز به تعداد معینی از پارامترهای شیمیایی محدود

جدول ۱- طبقه بندی کیفیت آب بر اساس شاخص GQI (۴)

Table 1- Classification of water quality based on GQI

مقدار GQI	90-100	70-90	50-70	25-50	0-25
کلاس کیفیت آب	مناسب	قابل قبول	متوسط	نامناسب	کاملاً نامطوبوع
GQI value	Suitable	Acceptable	Medium	Unsuitable	Completely Unsuitable
Water quality class					

جدول ۲- مشخصه‌های آماری کیفیت آبخوان مورد مطالعه در دوره (۱۳۹۹-۱۳۷۹)

Table 2- Statistical characteristics of the aquifer water quality in the period of (2000-2020)

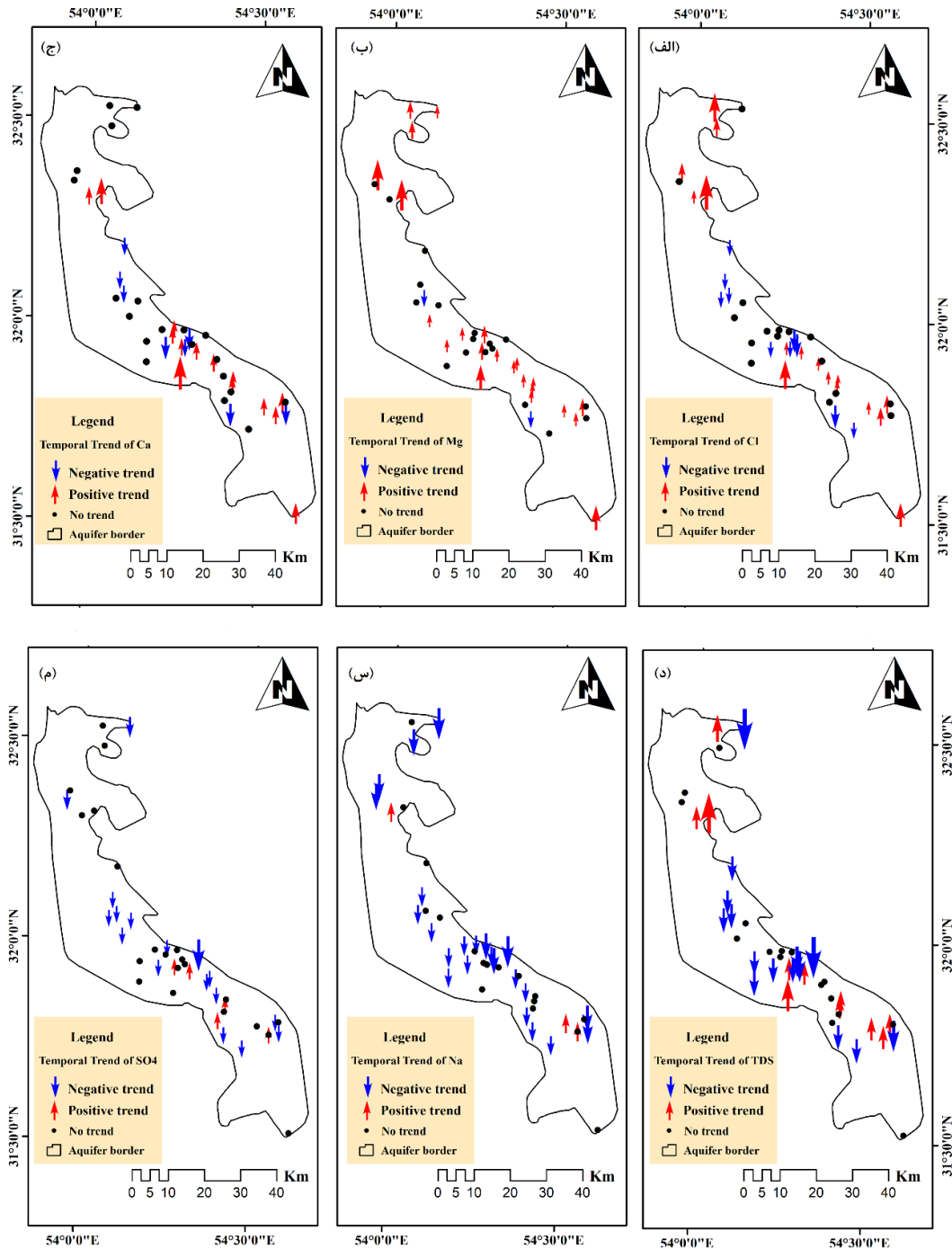
مشخصه	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	میانگین	استاندارد آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی
Characteristic	Minimum	Maximum	Standard deviation	Average	Drinking standard of the WHO
Ca ²⁺	1.36	50.7	9.23	10.43	300
Mg ²⁺	1.18	46.56	8.99	9.92	300
Na ⁺	2.61	312.72	37.8	31.03	200
Cl ⁻	2.99	117	55/68	37.03	200
So ₄ ²⁻	1.51	85.32	12.35	12.34	250
TDS	401	13924	3152.94	3187.12	600

* غلظت یون‌ها بر حسب ppm و کل مواد جامد محلول بر حسب میلی گرم بر لیتر می‌باشد.

* The concentration of ions is in ppm and the TDS is in milligrams per liter.

به این منطقه می‌باشد، که توانسته علارغم برداشتهای بیش از توان آبخوان‌ها (۸)، وضعیت پارامترهای مذکور در این محدوده را بهبود بخشد و یا آن را حفظ کند.

همچنین روند پارامترهای سولفات، سدیم و کل جامدات محلول در اکثر چاه‌های موجود در محدوده شهر یزد منفی و یا بدون روند است. دلیل این مسئله می‌توان انتقال آب بین حوضه‌ای با کیفیت بالا



شکل ۲- روند پارامترهای کیفی آب چاه‌های مورد بررسی در آبخوان یزد- اردکان، (الف): کلسیم، (ب): منیزیم، (ج): کلسیم، (د): کل جامدات محلول، (س): سدیم و (م): سولفات

Figure 2- The trend of the quality parameters of the study wells in the Yazd-Ardakan aquifer, (a):chloride, (b): magnesium, (c): calcium, (d): TDS, (s): sodium (m): sulfate

جدول ۳- مقایسه روش‌های درون‌یابی با توجه به دقت برآورد در پارامترهای کیفی آبخوان مورد مطالعه

Table 3- Comparison of the interpolation methods considering the estimation accuracy of the quality parameters of the study aquifer

کریجینگ Kriging	عکس فاصله Inverse Distance Weighting		تخمین گر موضعی Global Polynomial interpolation		تخمین گر عام Local Polynomial interpolation		توابع شعاعی Radial Basis Function			
	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE		
Ca	0.091	7.927	0.477	6.012	0.139	7.716	0.402	6.427	0.467	6.069
Mg	0.313	6.296	0.441	5.636	0.040	7.446	0.077	7.299	0.439	5.693
Na	0.581	27.424	0.346	32.347	0.274	38.089	0.357	32.084	0.375	31.688
Cl	0.640	178.398	0	181.494	0.001	181.396	0.001	181.369	0	181.469
SO4	0.566	13.122	0.325	13.546	0.165	15.065	0.276	14.546	0.336	13.436
TDS	0.527	2182.537	0.494	2258.498	0.272	2709.150	0.310	2638.080	0.489	2270.146

تغییرات مکانی

برای بررسی تغییرات مکانی مشخصه‌های کیفی، ابتدا روش‌های مختلف درون‌یابی مورد مقایسه قرار گرفت و روش مناسب بر اساس میزان خطا و پارامترهای RMSE و R² انتخاب گردید (جدول ۳). بر این اساس، جهت بررسی تغییرات مکانی مشخصه‌های سدیم، کلسیم، سولفات و کل جامدات محلول از روش کریجینگ معمولی و کلسیم و منیزیم نیز از روش عکس فاصله استفاده شد. نتایج نشان داد روش‌های قطعی جهت پهنه‌بندی مشخصه‌های کیفی آب نمی‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد و بهترین روش‌ها در این زمینه، روش‌های زمین‌آمار می‌باشد که با نتایج عیوضی و مساعدی (۱۱) و سبزواری و همکاران (۲۵) مطابقت دارد.

شکل‌های ۳ و ۴ توزیع مکانی رتبه‌بندی مشخصات کیفی آبخوان مورد مطالعه برای سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۹ را نشان می‌دهد. به طوری که کمترین مقدار رتبه با رنگ آبی و بیشترین مقدار با رنگ قهوه‌ای مشخص شده‌است. در سال ۱۳۷۹ بیشترین رتبه متعلق به کلسیم، کل جامدات محلول (TDS) و منیزیم و کمترین رتبه را کلسیم و سولفات دارا هستند. در سال ۱۳۹۹، کلسیم، کل جامدات محلول (TDS) و سدیم بالاترین و سولفات و کلسیم پایین‌ترین رتبه را دارند.

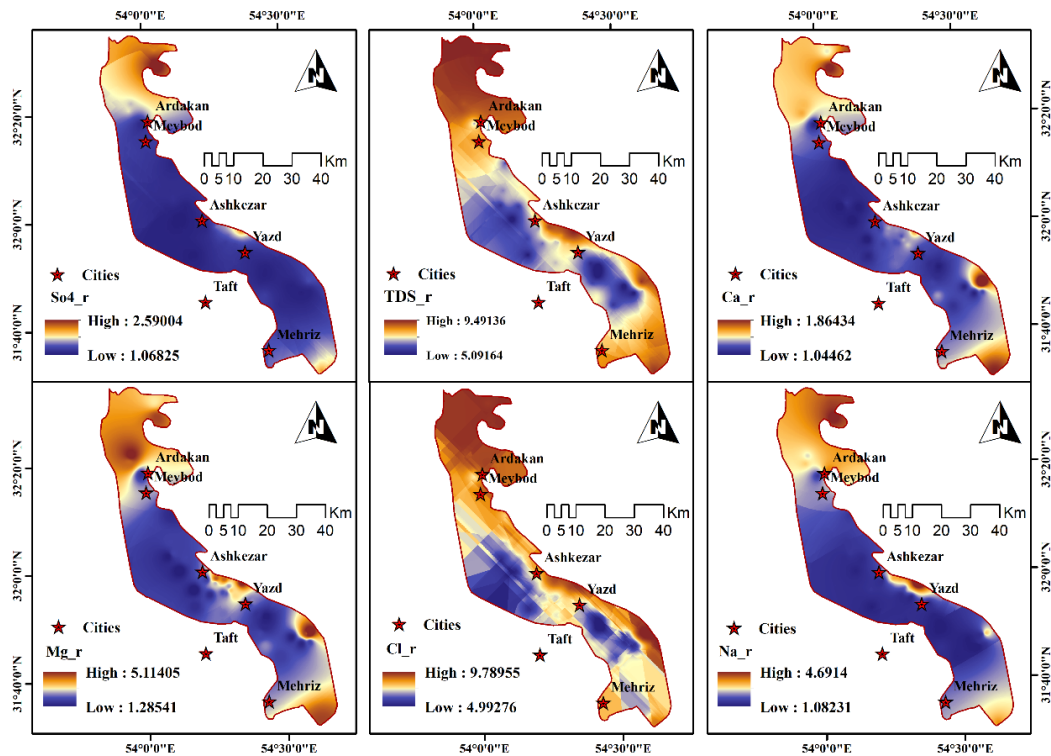
نتایج مقایسه نقشه‌های رتبه‌بندی نشان می‌دهد، به جز کلسیم و منیزیم، مابقی مشخصه‌های کیفی مورد بررسی کاهش یافته‌اند، اما این کاهش کمتر از یک واحد از رتبه‌بندی بوده‌است. در نواحی شمالی محدوده، همه پارامترها دارای بیشترین رتبه هستند در حالی که غالباً کمترین میزان رتبه پارامترها در نواحی مرکزی آبخوان قرار دارد. پارامتر TDS در انتهای دوره مورد بررسی (۱۳۹۹) نسبت به ابتدا، در قسمت‌های جنوبی و میانی به وضعیت مناسب‌تری رسیده و در محدوده شمالی تغییر قابل توجهی نداشته‌است. همچنین پارامتر مذکور کمترین تغییر را نسبت به سایرین داشته‌است. پارامتر منیزیم در جنوب و شرق محدوده مورد مطالعه کاهش یافته‌است اما در محدوده شهر یزد با شیب بسیار زیاد افزایشی بوده‌است. به طوریکه پارامتر منیزیم بیشترین تغییر را در بین سایر پارامترها داشته‌است. در رابطه با

پارامترهای دیگر سولفات و کلسیم در اکثر نقاط یا کاهش یافته و یا اینکه تغییر محسوسی را نشان نمی‌دهند. از بین پارامترهای مورد بررسی منیزیم، کلسیم و TDS بیشترین تاثیر را بر کیفیت منابع آب زیرزمینی محدوده مورد بررسی داشته‌اند و با نتیجه پژوهش آلام و همکاران (۳) که در منطقه چندل کشور هندوستان انجام شده‌است مطابقت دارد. خسروی و همکاران (۱۸) و دشتی برمکی و همکاران (۷) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که سه پارامتر کلسیم، سدیم و TDS بیشترین اثرگذاری را بر کیفیت آب زیرزمینی دارد که نتیجه پژوهش حاضر تا حدود زیادی با نتایج پژوهش‌های مذکور نیز مطابقت دارد.

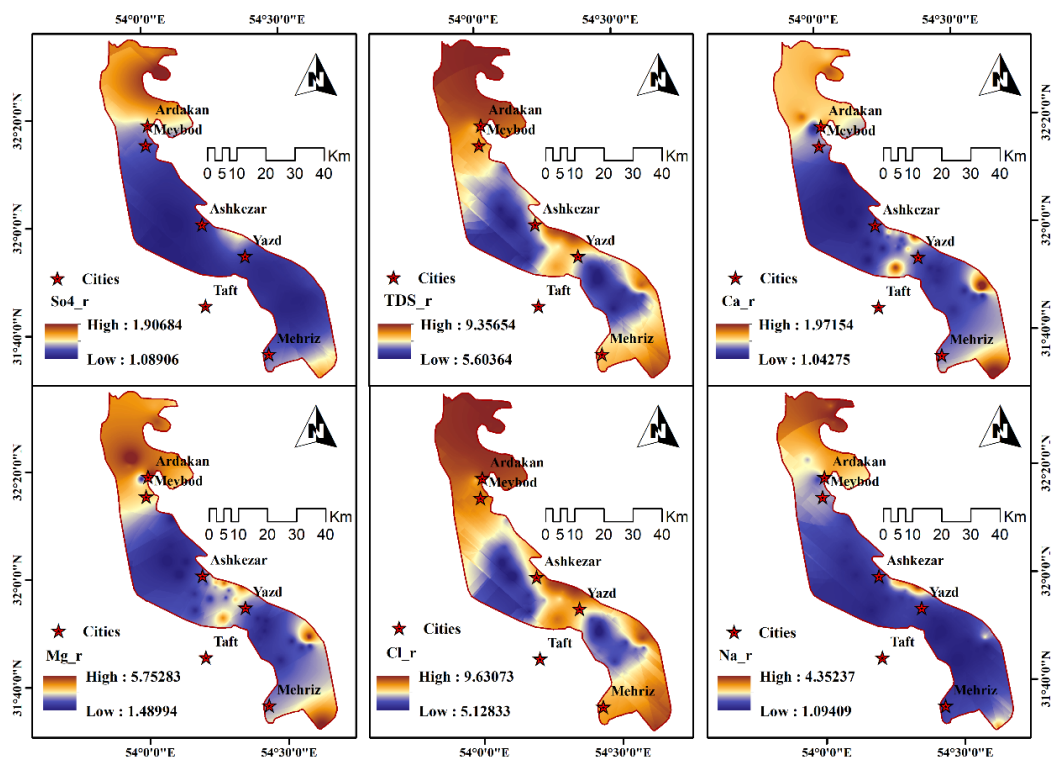
پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی

شکل ۵، نقشه پهنه‌بندی شاخص GQI مربوط به ابتدا و انتهای دوره زمانی و تغییرپذیری آن در آبخوان یزد- اردکان می‌باشد. بر اساس این نقشه و بازه تغییرات مقدار GQI، قسمتی از آبخوان در کلاس متوسط و قسمتی در کلاس قابل قبول قرار دارد. در نواحی شمالی کیفیت پایین‌تر از سایر نواحی دشت می‌باشد. دلیل این امر، وجود حداکثر غلظت پارامترهای کیفی در این نواحی از آبخوان می‌باشد. یکی از مهمترین دلایل کاهش کیفیت در شمال آبخوان مورد مطالعه می‌توان به واقع شدن این محدوده در مجاورت کویر چاه افضل اشاره کرد. با برداشت آب در بالادست جبهه آب شور کویر چاه افضل به سمت آبخوان مورد مطالعه حرکت کرده و کیفیت آب را به شدت کاهش می‌دهد.

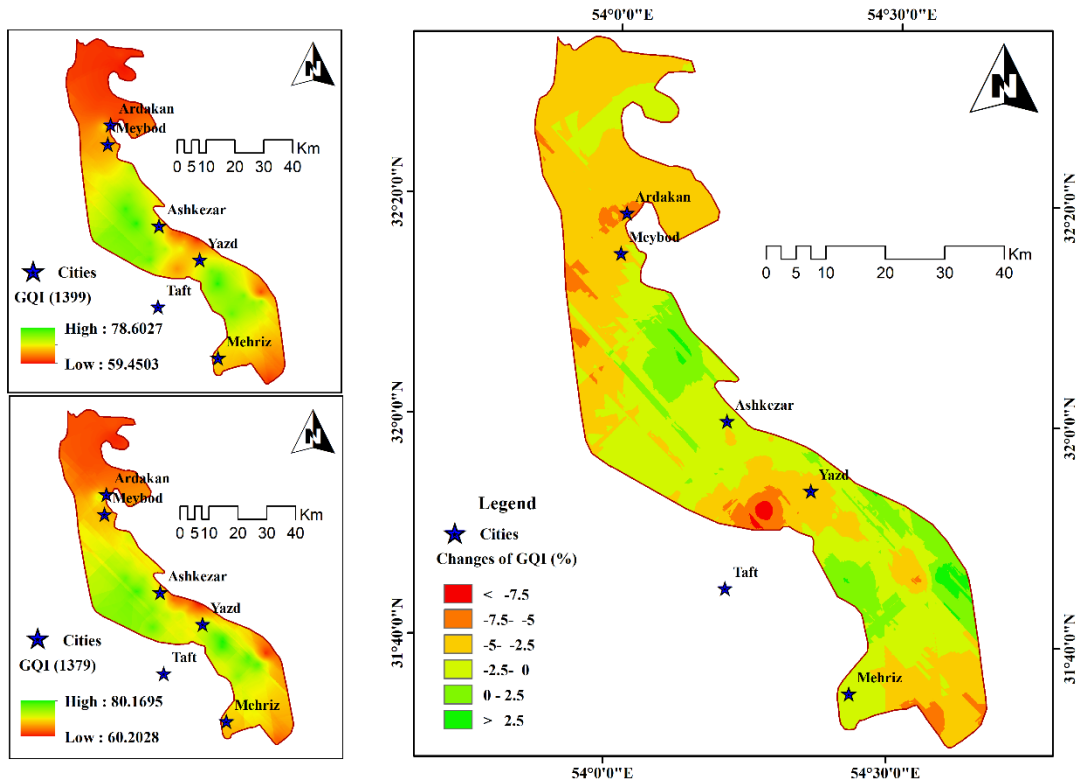
به منظور تحلیل تغییرپذیری کیفیت آب زیرزمینی، در دوره زمانی ۱۳۷۹-۱۳۹۹ با توجه به نقشه‌های GQI ابتدا (GQI_t) و انتهای دوره (GQI_{t+1}) مطالعاتی از رابطه (۱۱) استفاده شد و تغییرات کیفیت آب زیرزمینی تعیین گردید (۲۷). نتیجه نشان داد تغییرات شاخص GQI بین ۱۰- تا ۵/۵ درصد متغیر است. منفی به معنی کاهش و مثبت به معنی افزایش کیفیت منابع آب می‌باشد.



شکل ۳- توزیع مکانی رتبه‌بندی مشخصات کیفی دشت مورد مطالعه در سال ۱۳۷۹
Figure 3- Spatial distribution of qualitative characteristics of the studied plain in 2000



شکل ۴- توزیع مکانی رتبه‌بندی مشخصات کیفی دشت مورد مطالعه در سال ۱۳۹۹
Figure 4- Spatial distribution of qualitative characteristics of the studied plain in 2020



شکل ۵- پهنه‌بندی GQI و میزان تغییرات آن در دوره ۱۳۷۹-۱۳۹۹
Figure 5- GQI zoning and its changes in the period of 2000-2020

زیرزمینی در محدوده شهر یزد که دارای تراکم جمعیتی بالاتری نسبت به سایر مناطق نیز هست، نتایج روند زمانی حاکی از این است که چاه‌های موجود در این محدوده در سه پارامتر سولفات، سدیم و TDS دارای روند منفی قابل ملاحظه و یا بدون روند بودند. همچنین نقشه‌های رتبه‌بندی بیانگر تاثیر بالای پارامترهای TDS، کلر و منیزیم بر تعیین شاخص کیفی آب زیرزمینی می‌باشند، که در محدوده شهر یزد دارای روند مثبت بوده‌اند. به همین دلیل نقشه تغییرپذیری شاخص کیفیت آب زیرزمینی نتوانست روند زمانی منفی و نقشه‌های پهنه‌بندی را تایید کند. این مسئله نشان می‌دهد، استفاده از شاخص‌های کیفی می‌تواند تاثیرات پارامترها نسبت به یکدیگر را خنثی کند و نتیجه بهتر و قابل قبولی را ارائه دهد.

نتایج نهایی پژوهش حاضر نشان داد، آب انتقالی با کیفیت مناسب توانسته افزایش میزان کل جامدات محلول، سولفات و سدیم را کنترل کند و موجب افزایش کلر در این مناطق شود اما تغییرپذیری مکانی آلاینده‌های مختلف و طیف گسترده پارامترهای اندازه‌گیری شده، به‌طور کلی توصیف کیفیت آب، امری دشوار است؛ بنابراین استفاده از شاخص‌های کیفیت آب می‌توانند شرایط کلی کیفیت آب را به‌طور خلاصه و قابل درک ارائه کند.

به‌طوری‌که بیشترین تغییرات منفی کیفیت مربوط به محدوده شهر یزد، تفت، میبد، اردکان و مناطق شمالی (کویر چاه‌افضل) بوده، که این موضوع نشان‌دهنده مصرف بالای آب زیرزمینی در این ناحیه و مجاورت با چاله کویری و شور چاه افضل می‌باشد و بیشترین تغییرات مثبت کیفیت مربوط به بخش مرکزی و جنوبی آبخوان می‌باشد.

$$[(GQI_{t+1} - GQI_t) / GQI_t] \times 100 \quad (12)$$

نتیجه‌گیری

مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی در پژوهش حاضر نشان داد، روش‌های زمین‌آمار می‌تواند در پهنه‌بندی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی بهتر از روش‌های قطعی عمل کند و بهترین روش‌ها در این زمینه، روش‌های کریجینگ و عکس فاصله می‌باشد که با نتایج پژوهش‌های مورد بررسی مطابقت دارد. کاربرد شاخص کیفیت آب زیرزمینی در این پژوهش نشان داد که کیفیت کلی آبخوان یزد_اردکان در ابتدا و انتهای دوره زمانی مورد بررسی در رده‌ی متوسط و قابل قبول قرار دارد و کاهش کیفیت در این دوره وجود داشته اما بسیار کم بوده است.

همچنین در بحث تاثیر مثبت آب بین حوضه‌ای بر کیفیت آب

منابع

- 1- Abdollahi A., and Balajeh F. 2020. Potentiometric zoning of groundwater resources of Yazd-Ardakan plain. *Journal of the Geographical Engineering of Territory* 3(6): 135-149. (In Persian)
- 2- Alipour A., Rahimi J., and Azarnivand A. 2017. Groundwater Quality Analysis for Drinking and Agricultural Purposes a Prerequisite for Land Use Planning in the Arid and Semi-arid Regions of Iran. *Journal of Range and Watershed Managment* 70(2): 423-434. (In Persian with English abstract)
- 3- Alam W., Singh K.S., Gyanendra Y., Laishram R.J., and Nesa N. 2020. Hydrogeochemical assessment of groundwater quality for few habitations of Chandel District, Manipur (India). *Applied Water Science* 10: 123.
- 4- Babiker I.S., Mohamed M.A.A., and Hiyama T. 2007. Assessing groundwater quality using GIS, *Water Resources Management* 21: 699-715.
- 5- Chenini I., and Khemiri S. 2009. Evaluation of ground water quality using multiple linear regression and structural equation modeling. *International Journal of Environment Science and Technology* 6(3): 509-519.
- 6- Cordoba E., Martinez A., and Ferrer E. 2010. Water quality indicators: comparison of a probabilistic index and a general quality index, The case of the confederacionhidrografica del jucar (Spain). *Ecological Indicators* (10): 1049-1054.
- 7- DashtiBarmaki M., Rezaei M., and Saberi Nasr A. 2014. Assessment of groundwater quality index (GQI) for Lenjanat aquifer using GIS. *Journal of Engineering Geology* 8(2): 2121-2138. (In Persian with English abstract)
- 8- Dehghan A., Azizian A., Yarami N., Tazeh M., and Amirbeygi M. 2020. Investigation of the Quality and Quantity of Groundwater Resources and their Relationship with the Geological Formations (Case Study: Yazd-Ardakan Basin). *Water and Soil Science* 30(3): 75-91. (In Persian with English abstract)
- 9- Dustmohammadian A.H., Mohammady M., Amiri M., and Kianian M.K. 2021. Investigating Temporal Changes of Groundwater Quality in Semnan Plain Using Geostatistical Method, *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 14(51): 59-62. (In Persian with English abstract)
- 10- El Baba M., Kayastha P., Huysmans M., and De Smedt F. 2020. Evaluation of the Groundwater Quality Using the Water Quality Index and Geostatistical Analysis in the Dier al-Balah Governorate, Gaza Strip, Palestine. *Water* 12(1): 262.
- 11- Elamassi K.S. 2012. Assessment of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in Gaza governorate-Palestine. The Islamic University-Gaza., Faculty of Science, Master's Degree Program, Environmental science.
- 12- Eyvazi M., and Mosaedi A. 1391. Investigation of spatial pattern of precipitation in Golestan province using definite and geostatistical models. *Water and Soil* 26(1).
- 13- Grzywna A., and Bronowicka-Mielniczuk U. 2020. Spatial and Temporal Variability of Water Quality in the Bystrzyca River Basin, Poland. *Water* 12(1): 190. (In Persian with English abstract)
- 14- Hiyama T. 2010. Evaluation of groundwater vulnerability (and susta inability). 20th UNESCO. IHP training course.
- 15- Hirsch Robert M., Slack James R., and Smith Richard A. 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research* 18(1).
- 16- Ibrahim M.N. 2019. Assessing Groundwater Quality for Drinking Purpose in Jordan: Application of Water Quality Index. *Journal of Ecological Engineering* 20(3).
- 17- Kendall M.G. 1975. Rank Correlation Measures, Charles Griffin Inc. London.
- 18- Kundzewicz Z.W. 1997. Water resources for sustainable development. *Hydrological Sciences Journal* 42(4): 467-480.
- 19- Khosravi H., Heydari E., Zehtabian G., and Bazrafshan J. 2016. Analysis of spatial and temporal trends of groundwater index (GRI) (Case study: Yazd-Ardakan plain) 22(4): 711-720. (In Persian)
- 20- Mann H.B. 1945. Nonparametric Tests Against Trend, *Econometrica* 13: 245-259.
- 21- Mohammadi E., Ahmad pari H., Zolfagharan A., and Dehghan A. 2021. Investigation of quantity and quality of groundwater resources in Momenabad watershed of Semnan. *Journal of New Approaches in Basic Sciences, Technical and Engineering Research* 3(11): 47-66. (In Persian with English abstract)
- 22- Nasserli M., Monem M J., Shahverdi K., and Afsous M. 2021. Zoning of Bamdej Wetland Water Quality based on the Spatio-temporal Kriging. *Wetland Ecobiology* 2020: 12(2). (In Persian)
- 23- Nouraki A., and Hooshmand A. 2021. Evaluation of trend and spatial distribution pattern of groundwater quality using water quality indices (Case study: Hamedan-Bahar plain). *Journal of Environmental Science and Technology*. (In Persian)
- 24- Parsaie F., Mahmoodi M.A., and Egdernezhad A. 2020. Assessment of Groundwater Quality for Drinking and Agriculture in Qorveh Plain. *Wetland Ecobiology*. 2021; 12(1). (In Persian with English abstract)
- 25- Sabzevari Y., and Zeinivand H. 2020. Assessing the Trend and Quality Classification of Groundwater Resources in Boroujerd – Dorod plain. *Wetland Ecobiology* 12(3):101-116. (In Persian with English abstract)

- 26- Sabzevari Y., Nasrolahi A., and Yonesi H. 2020. Investigation of temporal-spatial variations of groundwater resources quality in Borujerd-Dorood Plain. *Irrigation and Water Engineering* 11(1): 150-167. (In Persian with English abstract)
- 27- Sen Paranab Kumar. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* 63: 1379-1389.
- 28- Smiraglia D.T., Ceccarelli S., Bajocco L., and Perini L. 2016. Linking trajectories of land change, land degradation processes and ecosystem services. *Environmental Research* 147: 590-600.
- 29- Sun X., Zhang H., Zhong M., Wang Z., Liang X., Huang T., and Huang H. 2019. Analyses on the Temporal and Spatial Characteristics of Water Quality in a Seagoing River Using Multivariate Statistical Techniques: A Case Study in the Duliujian River, China. *International Journal of Environment and Research Public Health* 16: 1020.
- 30- Torabipoudeh H., Yonesi H., and Arshia A. 2020. Evaluation of Quality Changes in the Groundwater Resources and IRWQIGC Upstream of Zayandehrood Dam. *Desert Ecosystem Engineering Journal* 24(2) :27-40. (In Persian)
- 31- Vafakhah M., BakhshiTiragani M., and Khazaei M. 2013. Analysis of Rainfall and Discharge Trend in Kashafrud Watershed. *Geography And Development Iranian Journal* 10(29): 77-90. (In Persian with English abstract)
- 32- Wang J., Xiao W., Wang H., Chai Z., Niu C., and Li W. 2013. Integrated simulation and assessment of water quantity and quality for a river under changing environmental conditions. *Chinese Science Bulletin* 58(27): 3340-3347.
- 33- WHO, World Health Organization. 2004. Guidelines for drinking-water quality, 1, 3rdedn, recommendations.WHO, Geneva,Switzerland.
- 34- YonesiH., Arshia A., Torabipoudeh H., Shahinejad B., Sayedipour M., and Vahdatpour N. 2020. Evaluating Groundwater Quality in Zayandehrood Southern Sub- Basin Aquifers, *Desert Ecosystem Engineering Journal* 9(26): 103-115. (In Persian with English abstract)
- 35- Zhang Q., Wang L., Wang H., Zhu X., and Wang L. 2020. Spatio-Temporal Variation of Groundwater Quality and Source Apportionment Using Multivariate Statistical Techniques for the Hutuo River Alluvial-Pluvial Fan, China. *International Journal of Environ and Reserch Public Health*, 17, 1055.



Study of the Efficiency of Groundwater Quality Index to Evaluate the Long-term Effects of Inter-Basin Water Transfer Using Non-Parametric Methods and GIS (Case Study Yazd-Ardakan Aquifer)

H. Sarvi Sadrabad¹- A. Zare Chahouki^{2*}

Received: 16-08-2021

Accepted: 28-10-2021

Introduction: Inter-basin water transfer affects the environment, culture and economy of donor and recipient basin. In this regard, one of the most important aspects are the positive and negative effects on the quality of groundwater in the recipient basin. Spatio-temporal changes of groundwater quality as the results of inter-basin water transfer, plays an important role in water resources management. Thus, this study attempts to investigate the temporal trends of groundwater quality parameters using Mann-Kendall test and Sen's slope estimator. In addition, spatial changes of groundwater quality and the effects of inter-basin water transfer were studied.

Materials and Methods: In this study, non-parametric methods and interpolation models were used to evaluate the spatio-temporal patterns of groundwater quality parameters in the Yazd-Ardakan plain. Mann-Kendall nonparametric test and Sen's slope were used to examine the temporal trends in the span of 2000 to 2020. The interpolation models and groundwater quality index (GQI) were used to study the spatial patterns and classify the quality of groundwater. The assessment of quality parameters of all studied wells including Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} and TDS were studied in equal time periods. Groundwater quality measurements were performed twice a year using a volumetric method, one in spring and the other one in autumn. The World Health Organization (WHO) standard was considered to compare values of different parameters in the plain.

Results and Discussion: A decreasing trend was observed in SO_4^{2-} , Na^+ and TDS parameters in most wells and there was an increasing trend for Ca^{2+} , Mg^{2+} and Cl^- parameters. Considering WHO classification standard, all the studied parameters were in the allowable ranges except TDS. The parameter ranking showed that TDS, Cl^- and Mg^{2+} had the greatest impact on the quality of aquifer groundwater. The Mg and TDS parameters had the highest and the lowest changes, respectively during 2000 to 2020. Results of the GQI showed that the total quality of the Yazd-Ardakan aquifer was in the moderate class and acceptable because of relatively large decrease in the groundwater in the span of the studied period. However, the decrease in groundwater quality was negligible. Changes of the quality map showed that the most negative quality changes were related to the Yazd, Taft, Meybod, Ardakan and northern regions (Chah-Afzal desert). This indicates high groundwater pumping in these areas and being located near the desert area. The most positive quality changes belonged to the central and southern part of the aquifer.

Conclusion: Comparison of the interpolation models showed that the geostatistical methods can show better results than the definitive methods in zoning groundwater quality parameters. The Kriging and IDW models were the best models and consistent with the results of the research. The quality of groundwater was acceptable, while the reduction in quality was very low and negligible in the Yazd-Ardakan aquifer during the studied period. The temporal trends of SO_4^{2-} , Na^+ and TDS had either a negative significant trend or no trend in the Yazd area. Considering ranking maps, TDS, Cl^- and Mg^{2+} had high impacts on determining the GQI. These trends were positive in Yazd city and consequently the GQI maps could not confirm the negative temporal trend and zoning maps. This finding showed that the use of qualitative indicators could neutralize the effects of the parameters on each other and provide a better and acceptable result. In all, the transfer water with appropriate

1- Ph.D. Student, Department of Watershed, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University

2- Assistant Professor, Department of Watershed, Faculty of Natural Resources, Yazd University

(*- Corresponding Author Email: zare.chahouki@yazd.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2021.71571.1073

quality could control the increase of the TDS, SO_4^{2-} , Na and caused an increase in Cl^- in these areas. There are many effective factors to study water quality, so its description seems to be difficult. Therefore, using water quality indicators can provide total water quality conditions in a concise and understandable way.

Keywords: Groundwater quality index, Mann-Kendal, Sen's slope, Water transfer Yazd_Ardakan

مقاله پژوهشی

توسعه روش روندیابی هیدرولیکی معکوس سیل در خشک‌رودها با در نظر گرفتن میزان نفوذ یا نشت

علی اصغر خسروی^{۱*} - عاطفه پرورش ریزی^۲ - رضا براتی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵

چکیده

در بسیاری موارد بعد از وقوع سیل به اطلاعاتی درباره مشخصات سیلاب در بالادست یک موقعیت مشخص نیاز است و ممکن است رودخانه در آن نقطه فاقد ایستگاه آب‌سنجی باشد یا داده‌برداری در زمان سیلاب انجام نشده باشد. در روندیابی معکوس، محاسبات از مقطع پایین دست به صورت گام به گام به سمت مقطع بالادست رودخانه صورت می‌گیرد و هیدروگراف ورودی بر اساس مشخصات هیدرولیکی رودخانه و هیدروگراف پایین دست تولید می‌شود. در مطالعه حاضر روندیابی معکوس هیدرولیکی سیلاب به روش‌های موج سینماتیک و موج دینامیک انجام شد؛ و اعمال مقدار نفوذ یا نشت که در خشک رودها بسیار مهم است، با جفت کردن رابطه نفوذ گرین-آمپت در معادله پیوستگی جریان انجام شده است. با وجود ماهیت ناپایدار مدل‌های روندیابی معکوس، به ویژه زمانی که عمق یا دبی اولیه جریان صفر است، با انتخاب پارامترهای وزنی مناسب ورودی به مدل، این فرایند با موفقیت انجام شد. قابلیت کاربرد مدل عددی توسعه یافته با استفاده از دو سری داده اندازه‌گیری شده و واقعی بررسی شد و نتایج نشان داد مدل عددی پیشنهادی، دبی اوج هیدروگراف ورودی یا بالادست را تا دقت ۹۹ درصد و زمان اوج را تا دقت ۹۷ درصد بازیابی نموده است. این نتایج قابلیت استفاده از مدل‌های روندیابی هیدرولیکی معکوس سیلاب در خشک‌رودها را تایید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: روندیابی معکوس، ناپایداری مدل عددی، محاسبات گام به گام، مقدار نفوذ، معادله گرین-آمپت

مقدمه

دو دیدگاه هیدرولوژیکی و هیدرولیکی قابل مطالعه است. روش‌های هیدرولیکی بر اصول تئوری جریان‌های غیردائمی در آبراهه روباز و حل معادله دیفرانسیل مربوطه استوارند. جواب‌های حاصل از این روش‌ها دقیق ولی روابط پیچیده و استفاده از آن‌ها مشکل است. در روش‌های هیدرولوژیکی، اصل پیوستگی جریان و رابطه بین دبی و ذخیره آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مساله سبب می‌شود استفاده از این روش‌ها نسبت به روش‌های هیدرولیکی، حل مسائل روندیابی را به میزان قابل ملاحظه‌ای ساده نماید، ولی جواب‌های به دست آمده دارای دقت کمتری نسبت به روش‌های هیدرولیکی هستند (۱۰ و ۱۸).

تعیین هیدروگراف مقطع پایین دست با استفاده از هیدروگراف ورودی یا بالادست، روندیابی (یا روندیابی مستقیم سیلاب) نامیده می‌شود. در روندیابی معکوس، محاسبات از مقطع پایین دست به صورت گام به گام به سمت بالادست مسیر جریان آب انجام می‌شود و هیدروگراف ورودی (در بالادست یک بازه) با توجه به مشخصات

رود و بستر آن، یعنی رودخانه نقش مهمی در زندگی بشر دارند. سیلاب‌های مهیب در رودخانه‌ها، تهدیدی برای تاسیسات، مناطق شهری، صنعتی و کشاورزی مجاور آن محسوب می‌شود و سالانه باعث ایجاد تلفات جانی و خسارات مالی فراوان می‌شود.

برای جلوگیری و یا کاهش آثار مخرب سیل، شناخت ویژگی‌های سیل شامل ارتفاع آب و دبی متناظر با آن به‌ویژه دبی اوج سیلاب با استفاده از روش‌های روندیابی حائز اهمیت است. روندیابی سیلاب از

۱ و ۲- به ترتیب کاندیدای دکتری سازه‌های آبی و دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

*- نویسنده مسئول: (Email: Ali.a.khosravi@ut.ac.ir)

۳- دکتری در مهندسی عمران، رئیس گروه تحقیقات کاربردی، شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی

DOI: 10.22067/JSW.2022.73670.1116

داده‌های واقعی نشان داد که بیان‌گر قابلیت کاربرد مدل ارائه شده در شرایط واقعی جریان‌های رودخانه‌ای می‌باشد.

در هنگام وقوع سیل در رودخانه‌ها، در اثر تبخیر و نفوذ از بستر و کناره‌ها، حجم سیلاب به مرور کاهش می‌یابد. این کاهش حجم سیلاب، که تلفات انتقال نامیده می‌شود، در مناطق خشک قابل توجه بوده و در برخی از مطالعات مقدار آن تا ۳۰ درصد حجم سیلاب ورودی به بازه گزارش شده است (۶). از این رو مدل‌های توسعه یافته برای روندیابی سیلاب در رودخانه‌های فصلی و رودخانه‌های جاری در مناطق خشک و نیمه خشک باید بتوانند برآوردی مناسب از تلفات انتقال ارائه دهند، چرا که تعیین مقدار تلفات انتقال اطلاعات مفیدی در خصوص رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی به دست می‌دهد. مورین و همکاران (۲۳) با انجام روندیابی سیلاب و با استفاده از داده‌های مشاهداتی سیلاب‌های رودخانه کوسیب در کشور نامیبیا که در منطقه بسیار خشک آفریقا واقع شده است بیان داشتند سیلاب‌های با حجم جریان متوسط تا بزرگ نقش مهمی در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی داشته که مقدار نشت در بسترهای با نفوذپذیری بالا و مجاری آبی طولانی و عریض محسوس‌تر است. شدت نفوذ در برخی وقایع سیلاب به حدی بود که در عمل هیچ‌گونه جریانی به مقاطع پایین دست رودخانه نمی‌رسید.

اگر چه اهمیت تلفات انتقال در مناطق خشک از سالیان دور مورد توجه بوده است، اما اطلاعات چندانی از فرآیند حاکم بر شکل‌گیری این تلفات در دست نیست. به علاوه، وجود این رودخانه‌ها در مناطق خشک و محروم که اغلب فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری می‌باشند، برآورد تلفات انتقال در این مناطق را دشوار می‌نماید (۴).

در کشور ما ایران، حدود ۳۹ درصد یعنی ۲۶،۰۰۰ کیلومتر از طول رودخانه‌های اصلی و مهم را رودخانه‌های فصلی و خشک تشکیل داده‌اند ولی متأسفانه مطالعات محدودی درخصوص برآورد میزان نفوذ از بدنه رودخانه در حین عبور جریان سیل انجام شده است. همچنین این بررسی‌ها میزان نفوذ را تنها در روندیابی مستقیم جریان تخمین زده‌اند. لذا در رودخانه‌های فصلی و خشک که معمولاً فاقد ایستگاه هیدرومتری می‌باشند، ضروری است جهت بررسی چگونگی طغیان یا فروکش کردن سیلاب، میزان نفوذ از بدنه رودخانه نیز در فرآیند روندیابی معکوس وارد شود تا بتوان با انجام محاسبات هیدرولیکی دقیق‌تر، تراز آب یا دبی جریان را در نقاط مورد نیاز به دست آورد.

در فرآیند روندیابی، معادلات حاکم با رابطه‌ای برای منظور کردن میزان نفوذ یا نشت به بستر رودخانه یا مسیل، ترکیب می‌شوند. سپس با روندیابی سیلاب در طول بازه و بررسی هیدروگراف‌های حاصل در نقاط مختلف، میزان نشت مشخص می‌شود (۸).

بهرامی و همکاران (۳) به مدل‌سازی عددی نحوه پیشروی آب در جویچه‌های زراعی با روش روندیابی جریان و با مدل ماسکینگام-کونژ پرداختند که در آن معادله نفوذ لویس-کوستیاکف جهت برآورد

هیدرولیکی رودخانه و هیدروگراف در پایین دست تعیین می‌شود (۱۳). در برخی موارد، بعد از گذر سیل مخرب، به اطلاعاتی درباره مشخصات سیلاب رخ داده در نقطه بالادست یک ایستگاه هیدرومتری نیاز است و ممکن است رودخانه در آن نقطه فاقد ایستگاه هیدرومتری باشد و یا داده‌برداری در زمان سیل اتفاق نیفتاده باشد. هدف از روندیابی معکوس بعد از مشخص کردن دبی یا تراز سطح آب سیلاب در بالادست، برآورد ابعاد مناسب سازه‌های مرتبط با مهندسی رودخانه‌ها (دیواره‌های حفاظتی، آبشکن‌ها و سرریزها) در آن نقطه است. از دیگر موارد کاربرد روندیابی معکوس می‌توان به واسنجی ایستگاه‌های هیدرومتری احداث شده در بالادست اشاره کرد (۲). روندیابی معکوس در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از دریچه‌های تخلیه مخازن و سدهای مخزنی در مواقع سیلاب، برای جلوگیری از خسارت به مناطق پایین دست نیز قابل استفاده است (۱۲).

نتایج بررسی مطالعات انجام شده در زمینه روندیابی معکوس سیلاب بیانگر این موضوع است که روش‌های هیدرولیکی که به حل معادله سنت-نانت می‌پردازند و در صدر آن‌ها روش موج دینامیکی، نتایج دقیق‌تری را در روندیابی معکوس سیلاب ارائه می‌دهند (۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲).

همچنین با توجه به دشواری کاربرد روش‌های هیدرولیکی در روندیابی معکوس سیلاب، محققان مختلف از روش‌های ساده‌تر استفاده کرده‌اند که هم به لحاظ زمان و هم به لحاظ هزینه به صرفه‌ترند و دقت قابل قبولی دارند. مدل خطی و یا غیرخطی ماسکینگام و الگوریتم ژنتیک از جمله روش‌های به کار رفته در تحقیقات گذشته هستند.

داس (۱۱) از مدل ماسکینگام برای روندیابی معکوس سیلاب استفاده کرد. در این تحقیق، روشی برای تعیین پارامترهای معادلات ماسکینگام ارائه شد که برای حل غیرخطی معادلات روندیابی معکوس کاربرد داشت. نتایج نشان داد که برای روندیابی معکوس جریان، انجام واسنجی پارامترهای مدل الزامی است.

کوسیسی و همکاران (۱۹) به بررسی روندیابی معکوس سیلاب با هدف روندیابی جریان ورودی از روی هیدروگراف خروجی با پایین دست با استفاده از روش ماسکینگام پرداختند و نتیجه را با حل معکوس معادلات سنت-نانت مقایسه کردند. نتایج آن‌ها دقت قابل قبول روش ماسکینگام را نسبت به روندیابی هیدرولیکی معکوس سیلاب نشان داد.

بادفر و همکاران (۲) عملکرد مدل ماسکینگام خطی و غیرخطی را در روندیابی معکوس هیدرولوژیکی سیلاب از طریق حل تابع ذخیره به روش اویلر و رانج کوتای مرتبه چهار مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای روندیابی سیل با استفاده از الگوریتم رقابت تکاملی جوامع (SCE) بهینه گردید. نتایج تحقیق آن‌ها در بازیابی هیدروگراف مقطع بالادست جریان دقتی بالغ بر ۸۲ درصد را در شرایط استفاده از

در مطالعه حاضر که به روندیابی معکوس هیدرولیکی سیلاب در مناطق خشک می‌پردازد، نفوذ در طول مسیر رودخانه نیز توسط رابطه گرین-آمپت در مدل عددی تهیه شده، وارد شده است تا بتواند روندیابی معکوس را با دقت مناسب و در شرایط هیدرولیکی مسیل‌ها و خشک‌رودها انجام دهد. بر اساس بررسی‌های انجام شده، تاکنون هیچ پژوهشگری مقدار نفوذ را در روندیابی معکوس هیدرولیکی سیلاب مورد بررسی و تحلیل قرار نداده است و تنها توکلی و همکاران (۲۷) با موفقیت توانستند روندیابی معکوس خشک‌رودها را در حضور نشت یا نفوذ و به روش هیدرولوژیکی ماسکینگام غیرخطی به انجام رسانند.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

حرکت موج سیلاب در رودخانه‌ها از نوع جریان غیرماندگار متغیر تدریجی می‌باشد. در جریان‌های متغیر تدریجی شتاب قائم ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن بوده، ولی اثر اصطکاک کانال قابل ملاحظه است و می‌بایست در محاسبات مدنظر قرار گیرد. معادله‌های حاکم بر جریان‌های غیرماندگار متغیر تدریجی به معادله‌های سنت-ونانت معروف می‌باشند که شامل معادله پیوستگی و معادله اندازه حرکت بوده و به صورت روابط زیر خلاصه می‌شوند (۱):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q_L = 0 \quad (1) \text{ پیوستگی:}$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + \quad (2) \text{ اندازه حرکت:}$$

$$g \frac{\partial y}{\partial x} - g (s_0 - s_f) = 0$$

که در آن‌ها Q دبی جریان، A سطح مقطع عرضی آبراهه، q_L جریان جانبی ورودی، g شتاب گرانش، s_0 شیب بستر و s_f شیب خط انرژی ناشی از مقاومت جریان است.

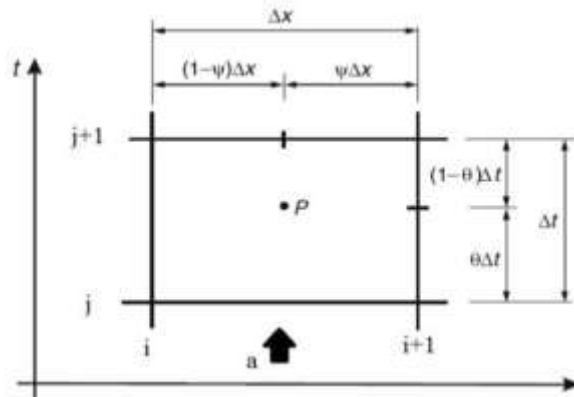
در تمام مدل‌های روندیابی هیدرولیکی جریان از شکل کامل معادله پیوستگی استفاده می‌شود، اما معادله اندازه حرکت در شکل‌های مختلفی که از حذف برخی اجزای آن به دست می‌آیند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساده‌ترین مدل روندیابی هیدرولیکی، مدل موج سینماتیک است که در آن از اجزای مربوط به شتاب موضعی، شتاب انتقالی و نیروی فشاری در معادله اندازه حرکت صرف نظر می‌شود. یعنی فرض می‌شود $s_0 = s_f$ که بدین معنا است که نیروهای اصطکاک و گرانشی با هم در تعادل هستند. در مدل موج پخشیدگی از اجزای مربوط به شتاب موضعی و انتقالی صرف نظر شده اما نیروی فشاری در آن لحاظ می‌شود.

میزان نفوذ استفاده شده بود. آن‌ها با مقایسه نتایج مدل عددی خود با خروجی نتایج نرم افزار SIRMOD که روندیابی سیلاب را به روش‌های سینماتیک، اینرسی صفر و هیدرودینامیک مدل می‌کند، بیان کردند دقت روش ماسکینگام-کوئر به‌ویژه در جویچه‌های کوتاه و دبی ورودی بزرگ‌تر، بیش‌تر است.

قبادیان و خلج (۱۶) مدلی عددی ارائه کردند که در آن معادلات سنت-ونانت با روش تفاضل‌های محدود حل شد. رابطه نشت موسکات به گونه‌ای در معادلات مذکور گنجانده شده تا به طور همزمان نشت در مسیر جریان را نیز محاسبه کند. مدل ارائه شده با دقت مطلوبی هیدروگراف خروجی از بازه رودخانه زنگمار را پیش‌بینی نمود. محمدی و قبادیان (۲۱) مدل عددی را جهت تخمین مقدار نشت در رودخانه‌ها تهیه کردند که برای برآورد نشت، رابطه گرین-آمپت در مدل مذکور با معادلات جریان غیرماندگار ترکیب شد. در مدل مذکور، مقدار نفوذ در بازه‌ای از رودخانه قره‌سو در حدود سه درصد از حجم سیلاب ورودی به آن برآورد شد.

نوردونین و همکاران (۲۴) تقریب موج پخشیدگی معادلات سنت-ونانت در روندیابی را با معادله نفوذ فیلیپ و جریان آب زیرزمینی ترکیب نمودند. خروجی مدل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی، چشم-انداز امیدوارکننده را برای محاسبه مقدار نشت در جریان‌های ماندگار و غیرماندگار نشان داد. چنگ و همکاران (۹) یک مدل روندیابی سیلاب شامل نفوذ از کف کانال را پیشنهاد کردند. در این مدل، یک روش شبیه‌سازی نفوذ از کف براساس تئوری نفوذ هورتون، توسعه داده شد. روش ماسکینگام-کوئر با جریان نفوذی از کف به عنوان خروجی جانبی، برای روندیابی سیلاب مورد استفاده قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که دقت این مدل بالاست و علاوه بر ساده بودن، برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی سیلاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب است.

محمدی و همکاران (۲۲) برای تخمین میزان نفوذ، مدلی عددی برای مقاطع نامنظم رودخانه‌ای تهیه کردند. در این مدل برای برآورد نفوذ، رابطه گرین-آمپت با معادله‌های جریان غیرماندگار جفت شد. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که وقتی از رابطه گرین-آمپت برای محاسبه نفوذ استفاده می‌شود، مقدار عمق نفوذ تجمعی و شدت نفوذ در هر یک از مقاطع در طول مسیر رودخانه قابل محاسبه و برآورد است. نویسندگان پس از مقایسه نتایج این مطالعه با تحقیقات قبلی بیان نمودند رابطه گرین-آمپت برای تخمین مقدار نفوذ یا نشت نسبت به روابط دیگر از دقت بالاتری برخوردار است. پاتواری و سارما (۲۵) یک مدل هیدرودینامیکی اصلاح شده جدید را با قابلیت تعیین دقیق مشخصات جریان در مناطق با نفوذپذیری بالا پیشنهاد کردند. این مدل با استفاده از معادلات جریان غیرماندگار، در ترکیب با معادله نفوذ گرین-آمپت به عنوان معادله حاکم، توسعه داده شد. برای حل معادلات حاکم، روش تفاضل محدود ضمنی به کار رفت.



شکل ۱- شمای چهار نقطه‌ای با $\phi=0.5$ (روش پرایسمن)

Figure 1- Four-point scheme with $\phi=0.5$ (Preissmann method)

$$f_p = \phi [\theta u_i^{j+1} + (1-\theta)u_i^j] + (1-\phi) \times [\theta u_{i+1}^{j+1} + (1-\theta)u_{i+1}^j] \quad (5)$$

فرد (۱۵) نشان داد که در حالت $0.5 \leq \theta \leq 1.0$ شمای مذکور برای هر بازه زمانی به‌طور غیرمشروط پایدار است و مقادیر ۰/۵۵ تا ۰/۶ را برای آن پیشنهاد کرد. با جای‌گذاری ترم‌های تفاضل محدود حاصل از روابط بالا در روابط ۱ و ۲ و بعد از ساده‌سازی، معادله پیوستگی و اندازه حرکت گسسته‌سازی می‌شوند.

روندیابی معکوس به روش موج سینماتیکی

همانطور که ذکر شد در مدل موج سینماتیکی گرادیان فشار و شتاب در مقایسه با ترم شیب کف کانال ناچیز است و نیروهای اصطکاکی و ثقلی با یکدیگر در تعادلند، پس حرکت موج را بیشتر با معادله پیوستگی توضیح می‌دهند (۱۰).

مدل موج سینماتیک به حل تقریبی معادلات سنت-ونانت می‌پردازد و به علت عدم نیاز به شرایط مرزی پایین‌دست بسیار پرکاربرد است. از آن‌جا که در این روش معادله پیوستگی به‌طور کامل استفاده می‌شود، لذا معادله اندازه حرکت یعنی رابطه ۲ به‌صورت رابطه زیر خلاصه می‌شود:

$$S_0 = S_f \quad (6)$$

رابطه فوق را برای استفاده در معادلات تفاضلات محدود می‌توان به فرم زیر بازآرایی نمود:

$$A = \alpha Q^\beta \quad (7)$$

که ضرایب α و β با توجه به معادله جریان مورد استفاده قابل استخراج است. در صورت به‌کارگیری رابطه مانینگ در محاسبات مقدار $\beta=3/5$ و α برابر خواهد بود با:

و در نهایت در مدل موج دینامیکی معادله اندازه حرکت به‌طور کامل و بدون ساده‌سازی در نظر گرفته می‌شود. به علت وجود اجزای غیرخطی در معادلات سنت-ونانت، راه حل تحلیلی برای این معادلات، به جز در مواردی که معادلات ساده شده‌اند، وجود ندارد. لذا برای حل این معادلات باید از روش‌های عددی استفاده نمود. در این تحقیق از روش تفاضلات محدود، که روش غالب برای حل عددی معادلات جریان غیر ماندگار یک بعدی است، برای حل معادلات غیرخطی سنت-ونانت استفاده خواهد شد. پرکاربردترین و قوی‌ترین روش به تایید عموم، شمای تفاضلی ضمنی چهار نقطه‌ای یا همان شمای پرایسمن است. از دلایل کاربرد گسترده این روش می‌توان به محاسبه همزمان دبی و عمق جریان در هر گره محاسباتی، امکان انتخاب گام زمانی بزرگتر و ضمنی و پایدار بودن روش اشاره نمود (۳۰).

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، دامنه حل در شمای پرایسمن از شبکه‌ای به ابعاد $\Delta x_i \times \Delta t$ ($i=1, 2, \dots, N$) تشکیل شده است. تقریب مشتق زمانی و مکانی در نقطه p که در وسط بازه طولی Δx_i است، انجام می‌گیرد. این نقطه تنها می‌تواند در امتداد محور t یا زمان توسط تغییر مقدار ضریب وزن‌دهنده θ جابجا گردد. اگر f یک متغیر وابسته مانند دبی جریان یا عمق جریان باشد، مقدار متغیر و مشتق‌های زمانی و مکانی آن بر اساس شمای چهار نقطه‌ای یا جعبه‌ای پرایسمن از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx (1-\phi) \frac{f_{i+1}^{j+1} - f_{i+1}^j}{\Delta t} + \phi \frac{f_i^{j+1} - f_i^j}{\Delta t} \quad (0 \leq \phi \leq 1) \quad (3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx (1-\theta) \frac{f_{i+1}^j - f_i^j}{\Delta x} + \theta \frac{f_{i+1}^{j+1} - f_i^{j+1}}{\Delta x} \quad (0 \leq \theta \leq 1) \quad (4)$$

$$D = \left(\frac{1-\theta}{\Delta x} + \frac{\varphi}{C_k \Delta t} \right) \quad (18)$$

به دست می‌آیند. در استخراج معادله ۱۴ علامت عبارت q_L نسبت به معادله پیوستگی اصلی تغییر یافته است. زیرا عبارت q_L در مدل روندیابی خشک‌رودها، نشت یا نفوذ به بستر رودخانه را نشان می‌دهد و باید آن را با علامت منفی در معادله پیوستگی وارد نمود.

روندیابی معکوس به روش موج دینامیکی

در روندیابی موج دینامیکی هیچ‌گونه ساده‌سازی در معادله اندازه حرکت صورت نمی‌گیرد و معادلات سنت-وانانت به‌طور کامل حل می‌شوند.

در روندیابی مستقیم، با گسسته‌سازی معادلات پیوستگی و اندازه حرکت با استفاده از تقریب‌های مربوط به مشتقات مکانی و زمانی شمای پرایسمن و اعمال معادلات در جهت محور مکانی برای هر یک از $N-1$ المان مستطیلی (مطابق با شکل ۲)، بین محور مکانی $i=1$ و $i=N$ تعداد $(2N-2)$ معادله به‌وجود می‌آید در حالی که تعداد مجهولات در هر گام زمانی $2N$ است. دو معادله اضافی مورد نیاز برای تکمیل معادلات موجود برای حل مسئله، توسط دو شرط مرزی یکی در انتهای بالادست و یکی در انتهای پایین دست بازه رودخانه یعنی در $x=0$ و $x=N$ تامین می‌شوند. شرط مرزی بالادست را می‌توان هیدروگراف ورودی یا تراز سطح آب اندازه‌گیری شده و شرط مرزی پایین دست را شرایط جریان نرمال، جریان بحرانی و یا رابطه دبی اشل تعیین نمود. همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است محاسبات از زمان اولیه یعنی $t=0$ شروع شده و در جهت افزایش گام زمانی تا زمان $t=T$ ادامه می‌یابد. مجهولات در شمای چهار نقطه‌ای پرایسمن دبی و تراز سطح آب در گام زمانی مجهول یعنی Q_i^j و y_{i+1}^{j+1} و y_i^{j+1} هستند.

در روندیابی معکوس که هدف تحقیق حاضر است با به کار بردن معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در جهت محور زمانی برای هر یک از $M-1$ المان مستطیلی (مطابق با شکل ۳)، بین محور زمانی $j=1$ تا $j=M$ ، تعداد $(2M-2)$ معادله به‌وجود می‌آید ولی تعداد مجهولات در هر گام مکانی $2M$ است. دو معادله اضافی مورد نیاز برای تکمیل معادلات موجود برای حل مسئله، توسط شرایط مرزی در $t=0$ و $t=T$ تامین می‌شوند:

$$\begin{aligned} Q(x, t) &= Q_o(t) && \text{جریان یکنواخت قبل سیلاب} \\ h(x, t) &= h_o(t) && \text{یا } (0 \leq x \leq L, t=0) \text{ شرط مرزی در } t=0 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\alpha = \left(\frac{nP^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{S_0}} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (8)$$

متغیر A یا سطح مقطع جریان را می‌توان با مشتق‌گیری از رابطه ۷ حذف کرد:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \alpha \beta Q^{\beta-1} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \quad (9)$$

و رابطه بالا را در رابطه پیوستگی جای‌گزین نموده تا معادله موج سینماتیک ناشی از تغییرات Q به دست آید:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \beta Q^{\beta-1} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) = q_L \quad (10)$$

معادله بالا را می‌توان خلاصه‌تر نیز نوشت:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{C_k} \frac{\partial Q}{\partial t} = q_L \quad (11)$$

که:

$$C_k = \frac{1}{\alpha \beta Q^{\beta-1}} \quad (12)$$

سرعت موج سینماتیک است. با جای‌گذاری مشتقات مکانی و زمانی حاصل از شمای پرایسمن یعنی روابط ۳ تا ۵ در معادله ۱۱ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} & \theta \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} + (1-\theta) \frac{Q_{i+1}^j - Q_i^j}{\Delta x} + \frac{1}{C_k} \\ & \times \left(\varphi \frac{Q_i^{j+1} - Q_i^j}{\Delta t} + (1-\varphi) \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta t} \right) \\ & + q_L = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

و رابطه بالا را بر حسب مقدار مجهول در حل معکوس یعنی Q_i^j ، به دست می‌آوریم:

$$Q_i^j = \frac{-A}{B} Q_{i+1}^{j+1} + \frac{1}{B} Q_{i+1}^{j+1} - \frac{C}{B} Q_{i+1}^j + \frac{q_L}{D} \quad (14)$$

که ضرایب موجود در آن از روابط:

$$A = \left(\frac{\theta}{\Delta x} - \frac{\varphi}{C_k \Delta t} \right) \quad (15)$$

$$B = \left(\frac{1-\theta}{\Delta x} + \frac{\varphi}{C_k \Delta t} \right) \quad (16)$$

$$C = \left(\frac{1-\varphi}{C_k \Delta t} + \frac{1-\theta}{\Delta x} \right) \quad (17)$$

مقدار نفوذ حین انتقال جریان در خشک‌رودها

همان‌طور که ذکر شد، در روندیابی هیدرولیکی سیلاب در خشک‌رودها که با لحاظ نمودن همزمان مقدار نفوذ یا نشت در بستر رودخانه است، معادلات سنت-ونانت باید با ترکیب معادله‌ای که نشت را برآورد می‌کند به‌طور همزمان حل شوند.

به منظور برآورد میزان نشت می‌توان از روابط متعددی که توسط محققان مختلف پیشنهاد شده است، استفاده نمود. این روابط جهت محاسبه دبی نفوذ به بستر کانال‌های خاکی یا محاسبه نرخ نفوذ از سطح زمین ارائه شده‌اند.

به‌طور کلی مدل نفوذ انتخابی بهتر است علاوه بر در نظر گرفتن شرایط غیر اشباع ناحیه بین بستر و سطح آب زیرزمینی، تغییرات غیر ماندگار عمق جریان بر روی میزان نفوذ را نیز لحاظ نماید شرایطی که در واقعیت در رودخانه‌های مناطق خشک اتفاق می‌افتد. لذا در این تحقیق از روش گرین-آمپت برای محاسبه نشت استفاده شده است.

$$Q(x, t) = Q_f(t)$$

$$h(x, t) = h_f(t) \quad \text{یا} \quad (20) \quad \text{جریان یکنواخت بعد سیلاب}$$

$$0 \leq x \leq L \quad t = T \quad \text{شرط مرزی در}$$

(۱)

$$Q(L, t) = Q(t) \quad \text{هیدروگراف و تراز آب مقطع}$$

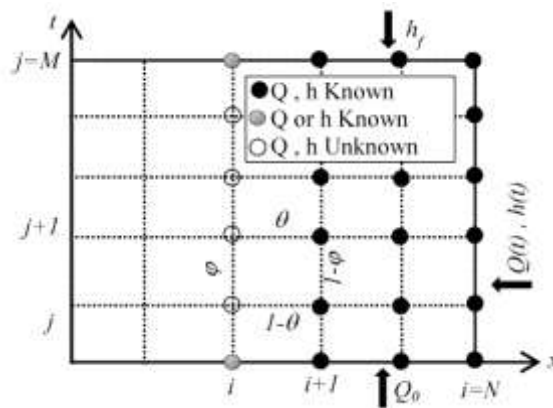
پایین‌دست

$$h(L, t) = h(t) \quad \text{شرط اولیه در } (0 \leq t \leq T, x=L)$$

در روندیابی معکوس، محاسبات از انتهای پایین دست یعنی $x=L$ شروع شده و تا ابتدای بالادست مجرا یعنی تا $x=0$ ادامه می‌یابد.

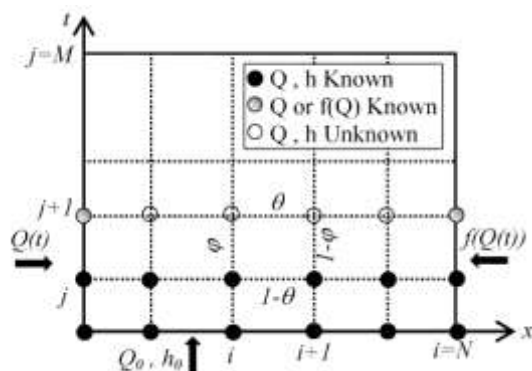
مجهولات در اینجا Q, \dot{Q}, y_i^{j+1} و y_i^j هستند.

شایان ذکر است گسسته سازی معادلات سنت-ونانت در هر گام مکانی منتهی به دستگاه معادلات $2M$ معادله و $2M$ مجهول می‌شود که از روش‌های تکراری مانند روش نیوتن-رافسون قابل حل است.



شکل ۲- شبکه محاسباتی اختلافات محدود ضمنی در روندیابی مستقیم سیلاب

Figure 2- Implicit finite difference computational network in direct flood routing



شکل ۳- شبکه محاسباتی اختلافات محدود ضمنی در روندیابی معکوس سیلاب

Figure 3- Implicit finite difference computational network in reverse flood routing

مدل عددی روندیابی معکوس

در تحقیق حاضر، برنامه‌های مجزایی در محیط نرم افزار متلب ۲۰۱۳ جهت روندیابی هیدرولیکی معکوس سیلاب به روش موج سینماتیکی و دینامیکی تهیه شد. در این مدل‌های عددی با ترکیب رابطه نفوذ گرین-آمپت با معادله پیوستگی، مجهولات عمق و دبی جریان در مکان‌ها و زمان‌های مختلف محاسبه می‌شود. همچنین دو مدل مذکور قابلیت تغییر پارامترهای عددی و فیزیکی (پارامترهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه و پارامترهای معادلات نفوذ) را در خود دارند و با دریافت این پارامترها به همراه هیدروگراف پایین دست جریان به عنوان ورودی، هیدروگراف جریان (مقادیر عمق و دبی جریان) را در انتهای بالادست رودخانه تولید می‌کنند. روند نمای نحوه انجام محاسبات در مدل معکوس روندیابی دینامیکی سیلاب در شکل شماره (۵) نشان داده شده است.

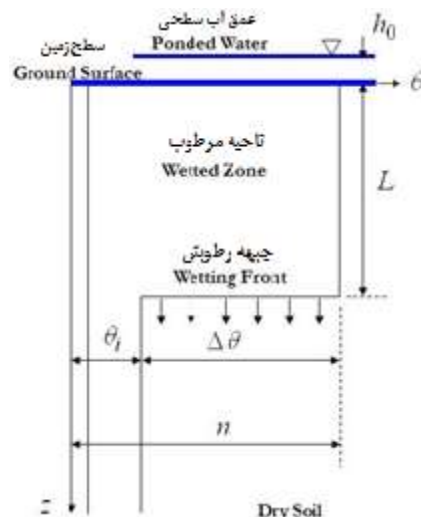
جهت صحت سنجی نتایج مدل عددی توسعه یافته و بررسی قابلیت کاربرد آن، از مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده یکی هیدروگراف معروف لین (۱۰) و دیگری هیدروگراف حاصل از مدل آزمایشگاهی-صحرایی بمبئی چی (۴) استفاده شده است که در شکل‌های ۶ تا ۸ مقطع تیپ مجرا یا رودخانه به همراه هیدروگراف‌های مشاهداتی نشان داده شده است. سری زمانی داده‌های اندازه‌گیری شده در مقاطع بالادست و پایین دست و همچنین داده‌های ورودی به مدل عددی شامل خصوصیات هندسی و هیدرولیکی و خصوصیات خاک بستر نیز، به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

در این روش نرخ نفوذ با گذشت زمان بر حسب پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع، مکش و درصد رطوبت در جبهه مرطوب پیش‌بینی می‌شود. ضمن آن که ارتفاع آب جمع شده بر روی سطح زمین نیز در محاسبه نفوذ تأثیر می‌گذارد. روش گرین-آمپت بر مبنای توسعه یک تئوری فیزیکی تقریبی است که راه حل دقیقی دارد. گرین و آمپت تصویر ساده شده نفوذ را به صورت شکل ۴ پیشنهاد کردند. در این شکل جبهه مرطوب یک مرز تیز است که خاک با مقدار رطوبت θ_i در پایین مرز را از خاک اشباع با مقدار رطوبت در بالای مرز جدا می‌کند. پس از زمان t از آغاز نفوذ، جبهه مرطوب به عمق L نفوذ می‌کند و آب تا عمق کم h_0 روی سطح خاک جمع می‌شود. معادلات نفوذ در این روش به صورت زیر است:

$$F(t) = kt + \Delta\theta\psi \ln\left[1 + \frac{F(t)}{\Delta\theta\psi}\right] \quad (22)$$

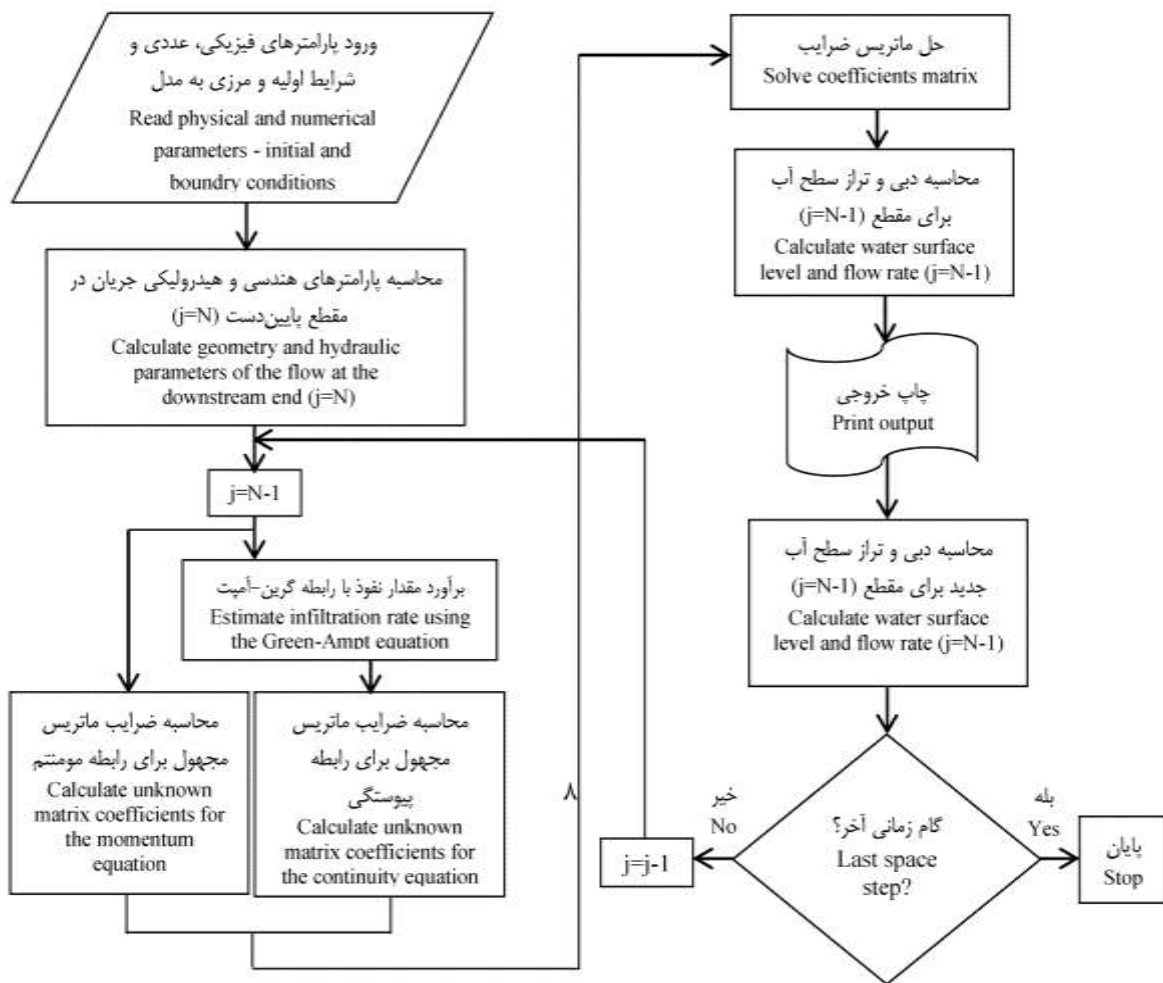
$$f = -k \left[1 + \frac{\Delta\theta\psi}{F}\right] \quad (23)$$

که $\Delta\theta = \eta - \theta_i$ ، درصد رطوبت اولیه، η تخلخل خاک، f سرعت نفوذ (سانتیمتر بر ساعت)، F نفوذ تجمعی (سانتی متر)، t زمان (ساعت)، k هدایت هیدرولیکی غیراشباع (سانتی متر بر ساعت) و ψ مکش رطوبتی خاک (سانتی متر) هستند. علامت منفی به این دلیل است که جهت جریان به سمت پایین است. قابل ذکر است که اگر عمق آب بر روی سطح خاک قابل اغماض نباشد، مقدار $\psi + h_0$ جایگزین ψ در معادلات می‌شود.



شکل ۴- متغیرهای موثر در مدل نفوذ گرین-آمپت

Figure 4- Effective variables in Green-Ampt infiltration model



شکل ۵- روند نمای مدل معکوس روندیابی دینامیکی سیلاب
Figure 5- Flowchart of reverse dynamic flood routing model

نتایج و بحث

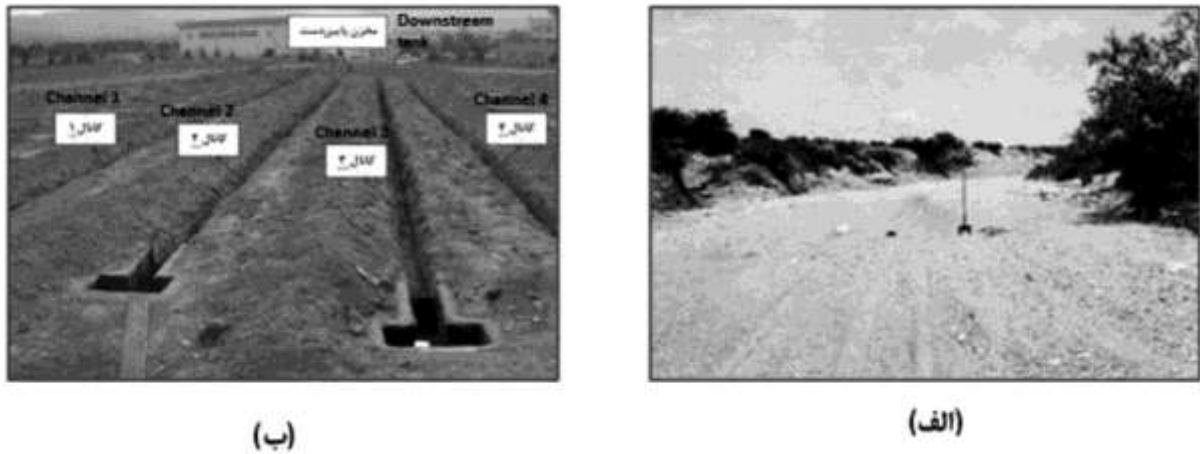
معکوس و با استفاده از داده‌ها و یا هیدروگراف‌های مشاهداتی موجود آزمایش‌های عددی متعددی صورت پذیرفت تا گام زمانی و مکانی و محدوده مناسب پارامترهای وزنی ورودی به مدل جهت صحت سنجی آن استخراج شود.

برای تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی، با انجام آزمایش‌های عددی متعدد، بازه‌های پایداری مدل عددی در روندیابی معکوس سینماتیکی و دینامیکی بازای تغییر پارامترهای وزنی مدل یعنی θ و φ به دست آمد. در مواردی که به‌ازای ترکیب‌های مختلف پارامترهای وزنی، محاسبات قبل از رسیدن به مقطع بالادست واگرا شده و یا هیدروگراف خروجی بالادست دارای نوسانات مشخصی باشد آن ترکیب به عنوان بازه ناپایدار مدل روندیابی هیدرولیکی معکوس در نظر گرفته می‌شود. شکل‌های ۷ و ۸ نمونه‌ای از این ناپایداری‌ها را نشان می‌دهد که به علت انتخاب نامناسب پارامترهای وزنی، روندیابی معکوس با شکست مواجه شده است.

حل معکوس معادلات سنت-ونانت، بدو وضع^۱ است. در روندیابی معکوس جهت حل برخلاف حالت روندیابی مستقیم، در راستای تقویت موج پیش می‌رود و به این علت هرگونه خطا در مقادیر تراز سطح آب یا دبی جریان در طول محاسبات تشدید شده و منجر به ناپایداری در حل می‌شود (۱۲). این ناپایداری عددی با ورود ترم نفوذ به معادله پیوستگی شدیدتر هم می‌شود.

لذا در ابتدا نیاز است بازه مناسب پارامترهای وزنی شمایی پرایسمن و گام‌های زمانی و مکانی طوری انتخاب شوند که مدل عددی علاوه بر همگرا بودن، هیدروگراف بالادست جریان را با دقت مطلوبی به دست آورد. بدین منظور بعد از تهیه مدل عددی روندیابی

1- Ill-posed



شکل ۶- مقطع تیپ رودخانه یا مجرا در زمان اندازه‌گیری، (الف) رودخانه فصلی هاگز واش (داده‌های لین) و (ب) مجموعه آزمایشگاهی - میدانی (داده‌های بمبئی چی)

Figure 6- Typical channel or river cross section, (a) Hughes Wash river (Lane data), (b) field-experimental model (Bambeichi Data)

سینماتیک بیش‌تر است. در نتیجه، بازه پایداری پارامترهای وزنی مدل عددی در موج دینامیکی محدودتر است. جهت تعیین مقادیر مناسب گام زمانی و مکانی ورودی به مدل عددی و بالا رفتن دقت محاسبات، سعی بر آن شد عدد کورانت - نسبت سرعت انتشار حل تحلیلی به سرعت انتشار حل عددی - نزدیک به یک باشد. لذا Δx و Δt برای هیدروگراف بمبئی چی به ترتیب ۳ متر و ۵ ثانیه و برای هیدروگراف لین به ترتیب ۵۰ متر و ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

مقادیر کوچک‌تر برای این دو پارامتر علاوه بر افزایش زمان انجام محاسبات، تاثیر محسوسی در بهبود دقت در تخمین هیدروگراف بالادست ندارد.

در هنگام وقوع سیل در خشک‌رودها، کاهش حجم سیلاب در طول مسیر قابل توجه بوده و نیاز است مقدار این تلفات در روندیابی سیلاب اعمال شود. لذا برای نشان دادن اهمیت موضوع در ابتدا مدل‌های عددی توسعه یافته برای داده‌های موجود و در حالت نفوذ صفر $q_L=0$ اجرا شد که خروجی‌های مدل در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شد. در این شکل‌ها هیدروگراف ورودی یا بالادست به دست آمده از روندیابی معکوس دینامیکی در هیچ‌یک از سری داده‌های در دسترس، با هیدروگراف‌های مشاهداتی تطابق مناسبی نداشته است؛ طوری که دبی اوج هیدروگراف بالادست در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد کمتر از حالت واقعی برآورد شده است.

نوسانات ایجاد شده در نتایج آنقدر شدید است که در برخی از آزمون‌های عددی، برای دبی و تراز سطح آب مقادیر منفی حاصل و باعث واگرا شدن مدل روندیابی معکوس می‌شود.

نتایج این قسمت از آزمایش‌های عددی نشان داد که مساله معکوس برای مقادیر مشابه پارامترهای وزنی که برای روندیابی مستقیم مناسب است، قابل حل نیست، یعنی بازای مقادیر $0.5 \leq \theta \leq 1.0$ و $\varphi = 0.5$ دلیل این تفاوت، چرخش ۹۰ درجه‌ای راستای حل معادلات سنت - ونانت در روندیابی معکوس می‌باشد (شکل ۲ و ۳ مشاهده گردد). در شمای پرایسمن بکار برده شده در روندیابی مستقیم پارامتر θ به عنوان پارامتر ضمنی ساز و باعث ایجاد اتلاف در محاسبات است. در مساله معکوس عملکرد پارامترهای وزنی برعکس بوده، بنابراین پارامتر φ به عنوان ضمنی ساز شمای عددی تعریف می‌شود، پس حل پایدار برای $0.5 \leq \varphi \leq 1.0$ حاصل می‌گردد. همچنین مشخص گردید هرچه مقدار φ به یک نزدیک‌تر باشد، اتلاف شما افزایش می‌یابد که باعث حذف نوسانات شده و حلی پایدار را تضمین می‌نماید. در نهایت بازه‌های پایداری مدل هیدرولیکی معکوس برای داده‌های مشاهداتی موجود، در روندیابی سینماتیکی مقادیر $0 \leq \theta \leq 0.5$ و $0.5 \leq \varphi \leq 1.0$ در روندیابی دینامیکی $0.3 \leq \theta \leq 0.6$ و $0.6 \leq \varphi \leq 1.0$ به دست آمد که با نتایج تحقیقات شیمکوویچ (۲۸) و (۲۹) که بازه پایداری مدل روندیابی معکوس را $\varphi \geq 0.5$ و $\theta \leq 0.5$ تعیین نمود، تطابق مناسبی دارد.

شایان ذکر است در روندیابی معکوس دینامیکی به علت پیچیدگی و غیرخطی بودن روابط، شدت نوسانات و ناپایداری‌ها نسبت به موج

جدول ۱- سری زمانی هیدروگراف‌های مشاهداتی
Table 1- Time series of observational hydrographs

هیدروگراف لین Lane Hydrograph				هیدروگراف بمبئی چی Bambeichi Hydrograph			
زمان ورودی Inflow Time (Sec)	دبی ورودی Inflow Rate (m ³ /s)	زمان خروجی Outflow Time (Sec)	دبی خروجی Outflow Rate (m ³ /s)	زمان ورودی Inflow Time (Sec)	دبی ورودی Inflow Rate (L/s)	زمان خروجی Outflow Time (Sec)	دبی خروجی Outflow Rate (L/s)
0	0	0	0	0	0	0	0
996	0	3692	0	4	4.3	75	1.2
1117	3.5	3765	4.6	7	11.8	72	8.7
1190	5.9	3814	8.3	11	17.6	75	13.9
1360	14.7	3960	18.4	18	29.2	86	18.5
1652	22.6	4081	18.9	25	34.7	93	21.1
1895	28.4	4300	18.2	32	39	100	24.0
1919	29.2	4445	15.9	43	41.9	118	31.5
2089	30.9	4640	13.6	54	43.4	136	33.8
2162	31.1	4785	12.2	86	43.1	151	33.8
2429	27.7	5247	8.5	108	42.8	161	32.9
2721	19	5490	7	143	35.3	208	21.7
3012	13.8	5709	5.8	154	23.7	240	14.5
3644	5.3	6291	3.4	190	16.5	301	9.5
4057	1.1	6534	2.7	226	11.6	394	5.5
4178	2.1	6972	1.6	283	7.5	559	2.3
4543	2.9	7190	1.3	373	5.2	681	1.4
5563	1.5	7360	0.7	530	2.3	796	0.5
5903	0.6	8696	0	746	1.4	889	0.2
7506	0	10737	0	946	0	953	0

است. به منظور بررسی میزان کارایی مدل عددی در تخمین هیدروگراف بالادست از شاخص‌های میزان خطای نسبی و ضریب نش - ساتکلیف استفاده شد:

$$RE (\%) = \left| 1 - \frac{f_{ic}}{f_{io}} \right| \times 100 \quad (24)$$

$$NS = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{io} - Q_{ic})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{io} - \bar{Q}_{io})^2} \right) \quad (25)$$

که f_{ic} مقدار دبی اوج، زمان اوج و حجم هیدروگراف بالادست محاسباتی، f_{io} مقادیر مشاهداتی این پارامترها، \bar{Q}_{io} به ترتیب دبی اوج و دبی متوسط هیدروگراف مشاهداتی و Q_{ic} دبی اوج در هیدروگراف محاسباتی است.

در مواردی که طراحی سازه‌های مرتبط با فعالیت‌های مهندسی رودخانه مدنظر است، مقادیر دبی حداکثر سیلاب اهمیت پیدا می‌کند. همچنین حجم زیر هیدروگراف که معرف حجم سیلاب می‌باشد در تعیین حجم مخازن ذخیره و همچنین محاسبه میزان تلفات جریان در

با محاسبه حجم زیر نمودار هیدروگراف‌های حاصل، حجم هیدروگراف روندیابی شده بالادست در حدود ۴۰ درصد کمتر از حجم سیلاب واقعی به دست می‌آید که بیان گر آن است که برای بررسی طغیان یا فروکش کردن سیلاب باید میزان نفوذ از بدنه رودخانه نیز در فرآیند روندیابی معکوس وارد شود تا بتوان با انجام محاسبات هیدرولیکی دقیق‌تر، تراز آب یا دبی جریان را در نقاط مورد نیاز به دست آورد.

در مرحله بعد با وارد کردن ترم نفوذ از طریق رابطه گرین - آمپت در مدل و با انتخاب پارامترهای وزنی در محدوده‌های پایدار، دقت مدل‌های عددی در روندیابی معکوس سینماتیکی و دینامیکی بررسی شد. از آنجا که مسیل‌ها قبل از وقوع سیلاب خشک بوده‌اند بنابراین در نظر گرفتن عمق جریان یا دبی برابر با صفر به عنوان شرط اولیه مدل، باعث واگرا شدن آن در شروع محاسبات می‌شود. لذا برای جلوگیری از کاهش دقت مدل و واگرا شدن آن، عمق جریان در تمام طول مجرا برابر یک سانتی‌متر به عنوان شرط اولیه در نظر گرفته شده است.

هیدروگراف‌های خروجی مدل عددی در مقطع بالادست در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده

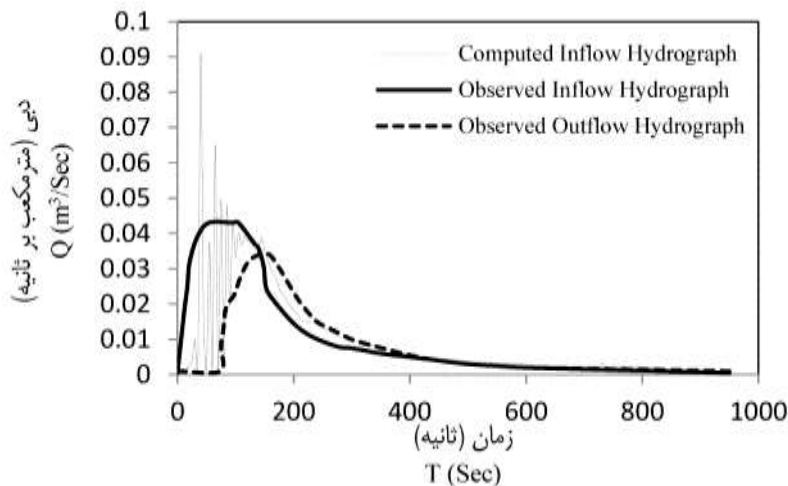
دقت مناسبی هیدروگراف بالادست را روندیابی نمودند. نتایج حاصل از داده‌های هیدروگراف بمبئی چی (هیدروگراف اول) دارای دقت بیشتری نسبت به هیدروگراف لین (هیدروگراف دوم) است. به‌عنوان مثال دبی اوج محاسبه شده به روش موج دینامیکی برای داده‌های هیدروگراف دوم دارای ۷ درصد خطا نسبت به مقدار مشاهده‌ای آن است در صورتی‌که برای داده‌های هیدروگراف اول خطای نسبی ۲ درصد به‌دست آمده است.

بازه عبوری از رودخانه کاربرد دارد. در جدول ۳ و ۴ مقادیر دبی اوج، زمان دبی اوج، حجم هیدروگراف‌ها و پارامترهای آماری حاصل از روابط ۲۴ و ۲۵ آورده شده است. هرچه درصد خطای نسبی کمتر و معیار نش-ساتکلیف به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تطابق بهتر خروجی مدل عددی با داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. همان‌طور که از نتایج مشخص است هر دو مدل روندیابی معکوس هیدرولیکی استفاده شده با اعمال ترم نفوذ در معادلات، با

جدول ۲- داده‌های استفاده شده در مدل عددی (۴ و ۲۰)

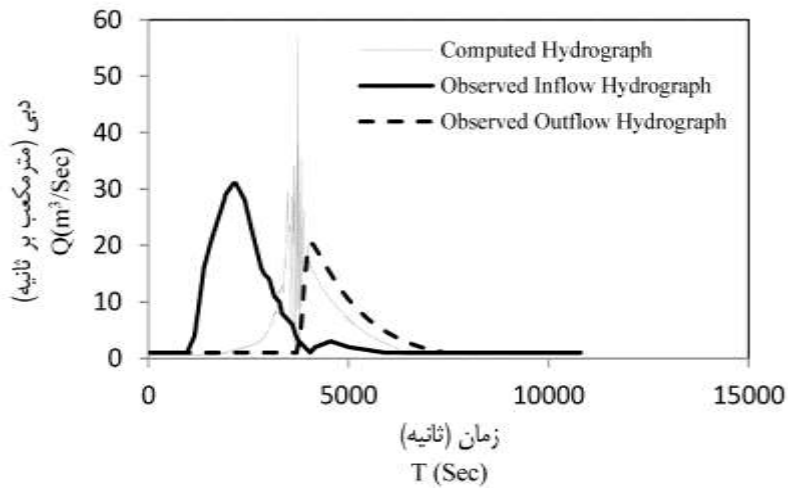
Table 2- Data used in the numerical model (4, 20)

پارامترهای ورودی Input Parameters	نوع هیدروگراف Hydrograph Type	
	(لین) (Lane)	(بمبئی چی) (Bambeichi)
	طول Length (m)	6400
عرض Width (m)	11	0.5
مجرا Channel شیب جانبی Side Slope	0	0
ضریب مانینگ Manning's Coefficient	0.035	0.25
شیب کف Bed Slope	0.012	0.006
K (m/s)	4.2×10^{-5}	1.1×10^{-5}
خاک Soil ψ (m)	0.0012	6.72
$\Delta\theta$	0.256	0.27

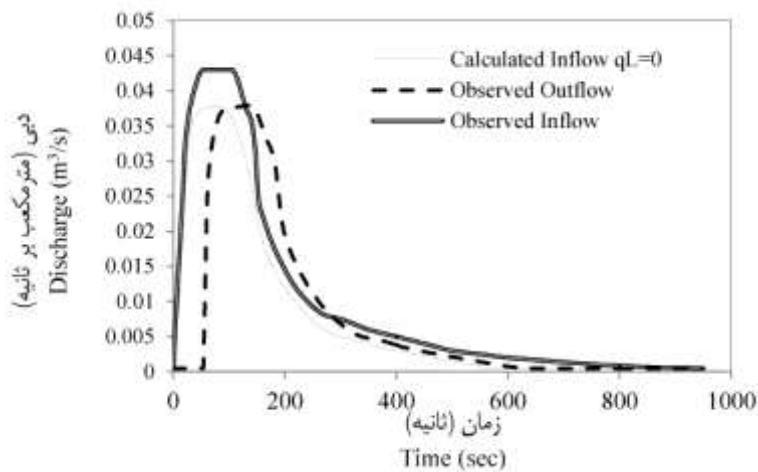


شکل ۷- مثالی از ناپایداری مدل عددی روندیابی معکوس بازای $\theta=0.8$ و $\phi=0.6$ - هیدروگراف بمبئی چی

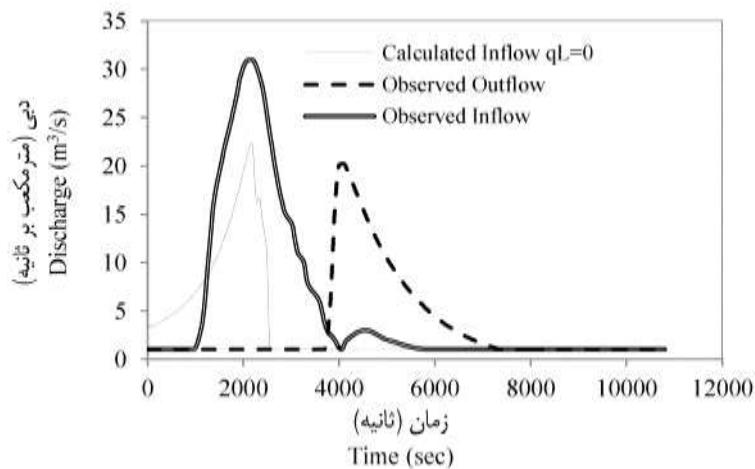
Figure 7- An example of the reverse model instability for $\theta=0.8$, $\phi=0.6$ - Bambeichi hydrograph



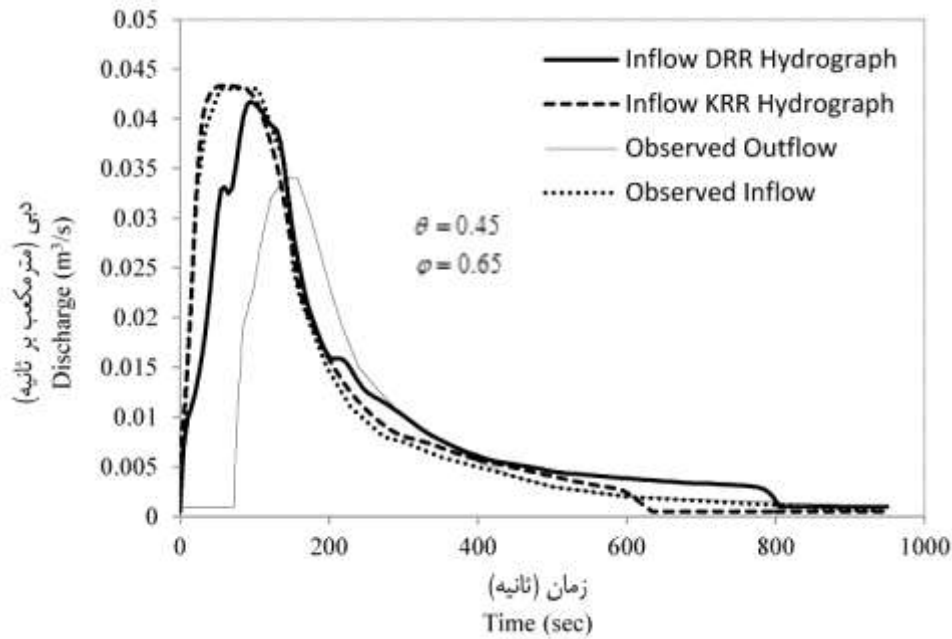
شکل ۸- مثالی از ناپایداری مدل عددی روندیابی معکوس بازای $\theta=0.8$ و $\phi=0.6$ - هیدروگراف لین
 Figure 8- An example of the reverse model instability for $\theta=0.8$, $\phi=0.6$ - Lane hydrograph



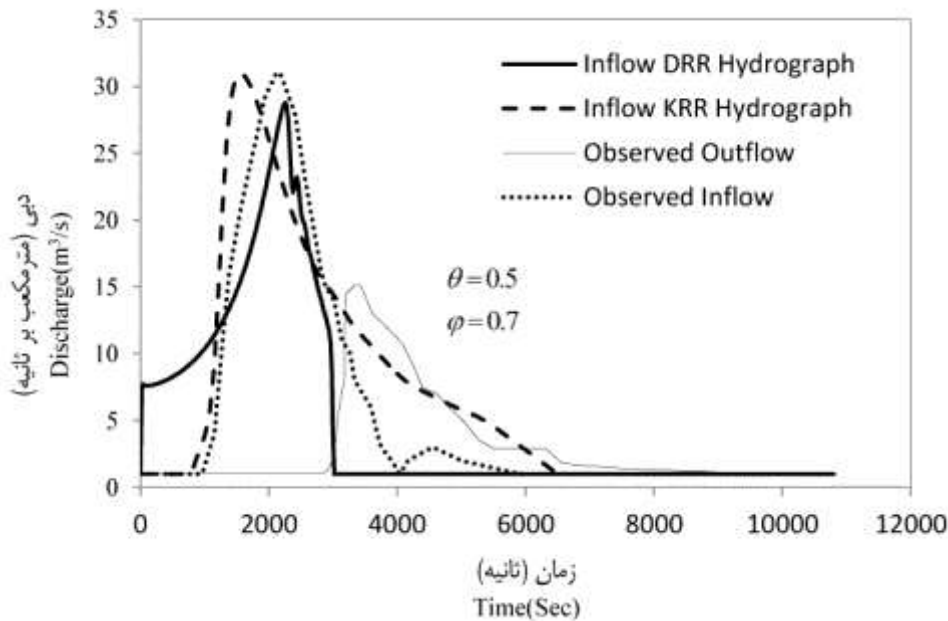
شکل ۹- خروجی مدل روندیابی معکوس دینامیکی بدون منظور کردن نفوذ - هیدروگراف بمبئی چی
 Figure 9- Output of dynamic reverse routing model without applying infiltration - Bambeichi hydrograph



شکل ۱۰- خروجی مدل روندیابی معکوس دینامیکی بدون منظور کردن نفوذ- هیدروگراف لین
 Figure 10- Output of dynamic reverse routing model without applying infiltration- Lane hydrograph



شکل ۱۱- مقایسه هیدروگراف بالادست روندیابی شده در مطالعه حاضر با هیدروگراف بمبئی چی
 Figure 11- Comparison of the inflow hydrograph obtained in the present study with Lane hydrograph



شکل ۱۲- مقایسه هیدروگراف بالادست روندیابی شده در مطالعه حاضر با هیدروگراف لین
 Figure 12- Comparison of the inflow hydrograph obtained in the present study with Lane hydrograph

همان‌طور که در قبل ذکر شد و بر اساس شکل‌های ۱۱ و ۱۲، دقت مدل عددی روندیابی معکوس در شبیه‌سازی هیدروگراف بالادست برای هیدروگراف اول (بمبئی چی) نسبت به هیدروگراف دوم بالاتر است که یکی از دلایل اصلی آن طول کوتاه بازه بین بالادست و پایین دست جریان است (جدول ۲). طی آزمایش‌های عددی که در

مقدار ضریب نشت - ساتکلیف نیز برای هیدروگراف اول ۰/۸۹ محاسبه گردید که بیان‌گر دقت بالاتر خروجی مدل عددی نسبت به هیدروگراف دوم با ضریب ۰/۸۲ می‌باشد. در مورد زمان اوج، بیشترین مقدار خطا مربوط به روندیابی معکوس سینماتیکی داده‌های هیدروگراف اول و به مقدار ۱۵ درصد است.

دقت مدل‌های روندیابی معکوس در برآورد حجم هیدروگراف بالادست و در نتیجه میزان تلفات انتقال به‌ویژه برای داده‌های هیدروگراف اول مطلوب بوده و بیش‌ترین میزان خطای نسبی در برآورد تلفات باتوجه به نتایج به میزان ۲۵ درصد در مدل روندیابی معکوس سینماتیکی و داده‌های مربوط به هیدروگراف دوم به‌دست آمده است. در بین دو روش روندیابی معکوس هیدرولیکی، نتایج روش موج دینامیکی در اکثر آزمایش‌های عددی دارای دقت بالاتری بود، به این دلیل که در این روش معادلات سنت-نانت به‌طور کامل حل می‌شوند. این اختلاف در هیدروگراف لین که معرف شرایط واقعی یک خشک‌رود می‌باشد، محسوس‌تر است (جدول ۴). به دلیل طول کوتاه مجرای مربوط به آزمایش‌های بمبئی چی، اثرات حذف ترم‌های موجود در رابطه مومتم جریان در فرآیند روندیابی سینماتیک محسوس نبوده و باتوجه به ارقام جدول ۳، نتایج هر دو روش روندیابی معکوس تقریباً نزدیک به هم می‌باشد.

این مطالعه انجام شد، مشاهده گردید که با افزایش طول بازه، احتمال ایجاد ناپایداری و یا خطا در محاسبات بیش‌تر می‌شود.

بعنوان مثال با افزایش طول بازه روندیابی معکوس سیلاب در داده‌های هیدروگراف لین، محاسبات در روندیابی سینماتیکی حداکثر تا طول ۱۵ کیلومتر و در روندیابی دینامیکی تا طول ۸ کیلومتر به سمت بالادست جریان دارای پایداری عددی بود که به علت ساده‌سازی صورت گرفته در معادلات روندیابی سینماتیک، هیدروگراف در طول بیش‌تری در جهت بالادست جریان روندیابی گردید.

مقدار تلفات انتقال واقعی داده‌های در دسترس با مقایسه حجم زیر نمودار هیدروگراف ورودی و خروجی مشاهده‌ای قابل برآورد است. حجم نفوذ یا تلفات انتقال برای داده‌های هیدروگراف اول و دوم به‌ترتیب ۲،۱۲ و ۲۰۰۰۰ متر مکعب است که به‌ترتیب ۲۳ و ۳۴ درصد از حجم جریان ورودی به بازه‌های رودخانه یا کانال را شامل می‌شود. با بررسی خروجی نتایج مدل عددی و مطابق با جدول ۳ و ۴،

جدول ۳- دقت مدل‌های عددی روندیابی معکوس در برآورد پارامترهای شاخص در هیدروگراف بمبئی چی

Table 3- Accuracy of reverse routing numerical models in estimating determinative parameters in Bambeichi hydrograph

پارامترهای شاخص Index parameters	نوع هیدروگراف Hydrograph Type		
	مشاهداتی Observed	مدل معکوس دینامیکی Dynamic reverse model	مدل معکوس سینماتیکی Kinematic reverse model
	Qp (m³/s)		0.042
NS	0.043	0.89	0.94
RE (%)		2	1
tp (hr)		0.023	0.022
RE (%)	0.026	11	15
حجم Volume (m ³)	9.1	9.4	9.31
RE (%)		3	2

جدول ۴- دقت مدل‌های عددی روندیابی معکوس در برآورد پارامترهای شاخص در هیدروگراف لین

Table 4- Accuracy of reverse routing numerical models in estimating determinative parameters in Lane hydrograph

پارامترهای شاخص Index parameters	نوع هیدروگراف Hydrograph Type		
	مشاهداتی Observed	مدل معکوس دینامیکی Dynamic reverse model	مدل معکوس سینماتیکی Kinematic reverse model
	Qp (m³/s)		28.8
NS	31	0.82	0.84
RE (%)		7	1.5
tp (hr)		0.63	0.53
RE (%)	0.61	3	13
حجم Volume (m ³)	55000	52000	69000
RE (%)		5.5	25

هیدروگراف پایین دست بدون تغییر شکل به مقطع بالادست منتقل می‌شود. از آن‌جا که فرونشینی امواج سیلاب در هر آبراهه به خوبی

به‌طور کلی در مدل موج سینماتیک در صورت حذف اثر مقدار نفوذ بر روی حجم هیدروگراف، فرونشینی موج اتفاق نمی‌افتد و

بالاتری نسبت به روش‌های هیدرولوژیکی است. همچنین معادله نشت استفاده شده در مطالعه توکلی و همکاران (۲۷) رابطه غیرخطی معروف به سینگ است که مقدار نفوذ در آن تنها تابعی از دبی جریان می‌باشد در صورتی که میزان نفوذ در خشک‌رودها علاوه بر شرایط هیدرولیکی جریان، به پارامترهای فیزیکی خاک بستر نیز وابسته است که توسط رابطه گرین - آمپت در مدل عددی حاضر در نظر گرفته شده است.

میزان دقت مدل عددی توسعه داده شده در این پژوهش، در برآورد دبی اوج هیدروگراف بالادست بالغ بر ۹۰ درصد با حداقل مقدار ضریب نش- ساتکلیف ۰/۸۲ و در محاسبه زمان اوج، دقت مدل بین ۸۵ تا ۹۷ درصد است. همچنین حجم هیدروگراف بالادست که نشان دهنده عملکرد مدل در برآورد نفوذ در مسیر جریان است با دقت ۷۵ تا ۹۸ درصد برآورد شده است. محمدی و همکاران (۲۱) با جفت کردن معادله گرین- آمپت و معادلات سنت - ونانت در روندیابی مستقیم دینامیکی، میزان تلفات نفوذ را برای داده‌های هیدروگراف لین در حدود ۳۰۰۰ مترمکعب برآورد نمودند که ۸۰۰۰ مترمکعب بیش‌تر از مقدار واقعی آن (۲۰۰۰ مترمکعب) محاسبه شده است ولی در مطالعه حاضر میزان این تلفات در روندیابی معکوس دینامیکی ۱۹۰۰۰ مترمکعب برآورد شده است که نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل عددی روندیابی هیدرولیکی معکوس می‌باشد. به دلیل رویکردهای متفاوت در محاسبه نفوذ (استفاده از روابط نفوذ در حالت اشباع و غیر اشباع خاک بستر)، روش‌های مختلف محاسبه تلفات در مدل روندیابی هیدرولیکی معکوس، می‌توانند تفاوت‌هایی را از نظر قابلیت کاربرد در روندیابی سیلاب و اثرات آن بر روی هیدروگراف خروجی مدل ایجاد کنند. این موضوع هم باید مورد توجه کاربران روندیابی معکوس باشد و هم برای تحقیقات آتی در این باره مد نظر قرار گیرد.

مشهود است، در نتیجه تعیین درجه اهمیت شیب بستر نسبت به بقیه جملات معادله اندازه حرکت که در مدل موج سینماتیک حذف می‌شوند، ضروری است. با این تفاسیر می‌توان دریافت که در مجاری با شیب زیاد، اهمیت جمله S_0 از بقیه جملات بیشتر است. لذا استفاده از روش موج سینماتیک در صورت زیاد بودن شیب بستر پیشنهاد می‌شود. البته با افزایش شیب کف و در نتیجه سرعت جریان، جریان به سمت حالت فوق بحرانی تغییر کرده و در این حالت به دلیل حرکت یک‌طرفه موج سیلاب به سمت پایین دست و عدم انعکاس حرکت امواج به سمت بالادست جریان، روندیابی معکوس سیلاب قابل کاربرد نخواهد بود.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر دو مدل عددی موج سینماتیکی و دینامیکی توسعه یافته است که با استفاده از حل معکوس سنت-ونانت و کوپل کردن معادله نفوذ گرین- آمپت با معادله پیوستگی جریان، روندیابی معکوس سیلاب در خشک‌رودها را همزمان با برآورد نفوذ در مسیر رودخانه انجام می‌دهند. برای صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی سیلاب خشک‌رودها از دو مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده به نام‌های هیدروگراف لین و داده‌های آزمایشگاهی- صحرایی بمبئی چی (سال ۲۰۱۲) استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل‌های عددی مذکور توانایی شبیه‌سازی معکوس جریان را در خشک‌رودها که مقدار نفوذ در آن‌ها قابل توجه است، دارا است. در مدل روندیابی معکوس هیدرولوژیکی ارائه شده توسط توکلی و همکاران (۲۷) امکان برآورد میزان نشت با استفاده از روندیابی معکوس سیل بررسی شده است ولی روش هیدرولیکی استفاده شده در تحقیق حاضر به علت حل کامل معادلات سنت-ونانت دارای دقت

منابع

- 1- Akan A.O. 2006. Open Channel Hydraulics. Elsevier, Oxford, UK.
- 2- Badfar M., Barati R., Dogan E., and Tayfur G. 2021. Reverse flood routing in rivers using linear and nonlinear muskingum models. Journal of Hydrologic Engineering 26(6): 04021018.
- 3- Bahrami M., BoroomandNasab S., Naseri A.A., and Albaji M. 2010. Comparison of Muskingum-Cunge model and irrigation hydraulic models in estimation of furrow irrigation advance phase. Research on Crops 11(2): 541-544.
- 4- Bambeichi S. 2012. Estimation of transmission losses and development of an extended flood routing model for ephemeral rivers. PhD Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian with English abstract)
- 5- Bautista E., Clemmens A.J., and Strelkoff T. 1997. Comparison of numerical procedures for gate stroking. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 123: 129-136.
- 6- Boroto R.A.J., and Gorgens A.H.M. 2003. Estimating transmission losses along the Limpopo river-an overview of alternative methods. Hydrology of the Mediterranean and Semi Arid Regions. IAHS Publication 278: 138-143.
- 7- Bruen M., and Dooge J. 2007. Harmonic analysis of the stability of reverse routing in channels. Hydrology and Earth System Sciences 11(1): 559-568.
- 8- Cataldo J.C., Behr C., and Montalto F.A. 2004. A summary of published reports of transmission losses in ephemeral streams in the U.S. A Report to the National Center for Housing and Environment. 38 PP.
- 9- Cheng L., Wang Z., Hu S., Wang Y., Jin J., and Zhou Y. 2015. Flood routing model incorporating intensive

- streambed infiltration. *Science China Earth Sciences* 58(5): 718-726.
- 10- Chow V.T., Maidment D.R., and Mays L.W. 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Editions.
 - 11- Das A. 2009. Reverse stream flow routing by using Muskingum models. *Sadhana* 34(3): 483-499.
 - 12- Dooge J., and Bruen M. 2005. Problems in reverse routing. *Acta Geophysica Polonica* 53(4): 357-371.
 - 13- D'Oria M., and Tanda M.G. 2012. Reverse flow routing in open channels: A bayesian geostatistical approach. *Journal of Hydrology* 460-461: 130-135.
 - 14- Eli R.N., Wiggert J. M., and Contractor D.N. 1974. Reverse flow routing by the implicit method. *Water Resources Research* 10(3): 597-600.
 - 15- Fread D.L. 1973. Effects of time step size in implicit dynamic routing. *Water resources bulletin. American Water Resources Association* 9(2): 338-351.
 - 16- Ghobadian R., and Khalaj M. 2012. Estimating of unsteady seepage losses in Zangemar river using mathematical model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 3(6): 206-214. (In Persian with English abstract)
 - 17- Heydari M., Oodi Sh., and Ahmadi Dehrashid F. 2019. Inverse flood routing based on diffusion wave model (A case study on Yuan river, China). *Iranian Journal of Soil and Water Research* 51(4): 1003-1012. (In Persian with English abstract)
 - 18- Hosseini S.M., and Abrishami J. 2015. *Open Channel Hydraulics*. Ferdowsi University of Mashhad Press. (In Persian)
 - 19- Koussis A.D., Mazi K., Lykoudis S., and Argiriou A.A. 2012. Reverse flood routing with the inverted Muskingum storage routing scheme. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12(1): 217-227.
 - 20- Lane L.J., Diskin M.H., and Reynard K.G. 1971. Input-output relationships for an ephemeral stream channel system. *Journal of Hydrology* 13: 22-40.
 - 21- Mohamadi S., and Ghobadian R. 2013. Flood routing and estimating of transmission losses in ephemeral rivers (A case study: Gharesoo river). 2th National Conference on Flood Management and Engineering with an Urban Flood Approach, Tehran, Iran. (In Persian)
 - 22- Mohamadi S., Ghobadian R., and Kashefipour S.M. 2015. Coupling Green-Ampt and Saint-Venant equations for estimating of transmission losses during flood routing in rivers. *Iranian Journal of Irrigation Sciences and Engineering* 39(1): 143-153. (In Persian with English abstract)
 - 23- Morin E., Grodek T., Dahan O., Benito G., Kulls C., Jacoby Y., Langenhove G.V., Seely M., and Enzel Y. 2009. Flood routing and alluvial aquifer recharge along the ephemeral arid Kuseb river, Namibia. *Journal of Hydrology* 368: 262-275.
 - 24- Noorduijn S.L., Shanafield M., Trigg M.A., Harrington G.A., Cook P.G., and Peeters L. 2014. Estimating seepage flux from ephemeral stream channels using surface water and groundwater level data. *Water Resources Research* 50(2): 1474-1489.
 - 25- Patowary S., and Sarma A.K. 2017. A modified hydrodynamic model for routing unsteady flow in a river having piedmont zone. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 65(1): 60-67.
 - 26- Shamaa M.T., and Harkuri H.M. 2011. Implicit numerical scheme for regulating unsteady flow in open channel. 15th International Water Technology Conference. IWTC-15. Alexandria, Egypt.
 - 27- Tavakkoli E., Zangoii M., and Barati R. 2021. Reverse flood routing in ephemeral rivers using a hydrological approach. 19th Iranian Hydraulic Conference, 15-16 Feb. 2021. Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian)
 - 28- Szymkiewicz R. 1993. Solution of inverse problem for the saint venant equations. *Journal of Hydrology*, 147: 105-120.
 - 29- Szymkiewicz R. 2008. Application of the simplified models to inverse flood routing in Upper Narew river (Poland). *Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences*, 405: 121-135.
 - 30- Szymkiewicz R. 2010. *Numerical modeling in open channel hydraulics*. Springer. New York.



Development of Reverse Hydraulic Flood Routing Method in Ephemeral Rivers Considering Infiltration Rate

A.A. Khosravi^{1*} - A. Parvaresh Rizi² - R. Barati³

Received: 04-12-2021

Accepted: 05-01-2022

Introduction: In many cases, after a flood, some information is needed about the flood characteristics at the upstream of a specific location where there is no hydrometric station on the river or flow discharge, and water surface level was not measured at the time of the flood. In reverse flood routing, calculations are performed from the downstream section step by step to the upstream section of the river and inlet hydrograph is produced based on river hydraulic characteristics and downstream hydrograph. During floods in rivers, the volume of floods gradually decreases due to infiltration into the bed and sides. This reduction in flood volume, called transmission losses, is significant in arid areas. Therefore, developed models for flood routing in seasonal rivers in arid and semi-arid regions should provide an appropriate estimate of transmission losses. In the routing process, the governing equations are combined with an equation to account for infiltration or seepage losses into the riverbed or canal. Then, by routing the flood along the interval and examining the resulting hydrographs at different points, the amount of transmission losses is determined. In the present study, which deals with the reverse hydraulic routing of floods in arid areas, the infiltration losses along the river estimated by the Green-Ampt relationship was considered in numerical models so as to perform reverse flood routing with appropriate accuracy and under hydraulic conditions of ephemeral rivers. To the best of our knowledge, so far no study has analyzed transmission losses in reverse hydraulic flood routing.

Materials and Methods: The equations governing gradual variable flows are known as the Saint-Venant equations, which include the continuity and the momentum equations. In hydraulic flow routing models, the complete form of the continuity equation is used, but the momentum equation is applied in various forms obtained by removing some components. The simplest hydraulic routing model is the kinematic wave model in which the components related to inertial forces and pressure force in the momentum equation are omitted. In the diffusion wave model, the components related to inertial forces are omitted, but the pressure force is taken into account and finally, in the dynamic wave model, the momentum equation is considered completely without simplification. In the present study, separate programs were prepared in MATLAB 2013 software for reverse hydraulic flood routing by Kinematic and dynamic wave methods. In these numerical models, by coupling the Green-Ampt infiltration equation with the continuity equation, the depth and flow rate in different places and times are calculated in the upstream direction of the flow.

Results and Discussion: In order to validate the results of the developed numerical models and to evaluate its applicability, a set of measured data known as Lane hydrograph and Bambeichi hydrograph was used. The results showed that both reverse hydraulic flood routing models produced the upstream hydrograph with appropriate accuracy. The results of the Bambeichi hydrograph data were more accurate than the Lane hydrograph due to its shorter length of the interval between upstream and downstream sections. For example, the peak discharge of inlet hydrograph calculated by the dynamic wave method for the Lane hydrograph data had an error of 7% compared to the observed value, while the error obtained for Bambeichi hydrograph data was 2%. Therefore, the accuracy of inverse routing models in estimating the volume of upstream hydrograph and consequently the amount of transmission losses was desirable especially for the Bambeichi hydrograph data. The highest error in estimating losses was 25% for the reverse kinematic model and the data related to the Lane hydrograph.

Between the two reverse hydraulic flood routing methods, the performance of the dynamic wave method was more accurate for the most numerical experiments, as the governing equations are completely solved in this method. This difference is more pronounced in the Lane hydrograph, which represents the actual conditions of

1 and 2- Ph.D. Candidate and Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: Ali.a.khosravi@ut.ac.ir)

3- Ph.D. in Civil Engineering, Head of Applied Research Group, Khorasan Razavi Water Authority

DOI: 10.22067/JSW.2022.73670.1116

an ephemeral river.

Conclusion: The accuracy of the developed numerical models was 90% in estimating the peak flow rate of the upstream hydrograph, and between 85% and 97% in estimating the time related to this discharge. The volume of the upstream hydrograph, which indicates the model performance in estimating the infiltration in the flow path, was also modeled with 75 to 98% accuracy. These results show that the numerical models simulate reverse flood routing with acceptable accuracy in ephemeral rivers, where transmission or seepage losses are significant. Due to different approaches in calculating infiltration losses, these methods can make differences for the hydrograph output of numerical models.

Keywords: Green-Ampt equation, Infiltration rate, Numerical model instability, Reverse routing, Step by step calculations

مقاله پژوهشی

تأثیر سرباره مس مواد آلی بر شاخص‌های فیزیولوژیک کمبود آهن گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor*)

الهام میرپاریزی^۱ - مجتبی بارانی مطلق^{۲*} - سید علیرضا موحدی نائینی^۳ - رضا قربانی نصرآبادی^۴ - سمیه بختیاری^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷

چکیده

حدود ۵۳/۸ درصد سرباره مس را اکسیدهای آهن به خود اختصاص می‌دهند، لذا در این مطالعه تأثیر سرباره مس به همراه ترکیبات آلی بر میزان آهن کل برگ، رنگدانه‌های فتوسنتزی، شاخص SPAD، فعالیت آنزیم‌های گیاهی (گایاکول پراکسیداز و گلوکاتایون پراکسیداز) و میزان آهن فعال در گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor*) رقم اسپید فید به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار ارزیابی شد. تیمارهای آزمایشی شامل ۵ سطح ماده آلی (پوست پسته و کود گاوی در دو سطح ۲ و ۴ درصد وزنی و نمونه شاهد بدون ماده آلی) و ۱۱ سطح آهن (شاهد یعنی بدون کاربرد مواد حاوی آهن (S)، سکوسترین (Seq) FeEDDHA^۶ به میزان ۵ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک، سرباره مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک (S₂)، سرباره مس به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک (S₄)، سرباره مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد (S₂S^۷)، سرباره مس به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد (S₄S^۷)، سرباره مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک اسیدی شده مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک (S_{2a})، سرباره اسیدی شده مس به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک (S_{4a}) و محلول‌پاشی برگ‌های آهن از منبع کود کلات (Fe-EDTA^۸) با غلظت ۵ در هزار) بودند. نتایج نشان داد تیمار ۴ درصد وزنی کود گاوی با سرباره مس به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک (C₄S₄) و تیمار ۴ درصد وزنی کود گاوی با سرباره مس به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد و تیوباسیلوس (C₄S₄S^۹) بیشترین تأثیر را در افزایش شاخص‌های مد نظر داشتند، به طوری که بیشترین میزان آهن فعال برگ‌های جوان توسعه یافته (۵۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) در تیمار (C₄S₄S^۹) مشاهده شد که در مقایسه با تیمار شاهد (۱۷ میلی‌گرم در کیلوگرم) افزایش معناداری نشان داد. بررسی ضرایب همبستگی نشان داد که آهن فعال برگ‌های جوان توسعه یافته گیاه سورگوم در مقایسه با غلظت آهن کل برگ‌ها همبستگی بیشتری با شاخص‌های فیزیولوژیک گیاه سورگوم نشان داد. لذا می‌توان استفاده از غلظت آهن فعال برگ‌های جوان توسعه یافته گیاه به عنوان شاخص تشخیص کمبود آهن در گیاه به جای آهن کل گیاه را توصیه نمود.

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های گیاهی، آهن فعال، رنگدانه‌های فتوسنتزی، سرباره مس

مقدمه

آهن به عنوان یکی از عناصر فراوان خاک شناخته شده ولی به دلیل خصوصیات شیمیایی این عنصر و همچنین شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک، حلالیت آن عموماً ناچیز و کمتر از حد مورد نیاز گیاهان می‌باشد (۲۷). عنصر آهن در خاک به صورت یون Fe³⁺ در کانی‌هایی مثل هماتیت (Fe₂O₃) و

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب دانش‌آموخته دکتری، دانشجویان و استادیار، گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
(*) نویسنده مسئول: (Email: mbarani@gau.ac.ir)
۵- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

۶- اتیلن دی آمین دی هیدروکسی فنیل استیک اسید
۷- اتیلن دی آمین تترا استیک اسید

مواد آلی نیز روش مؤثری برای مبارزه با این عارضه می‌باشد (۳۹). بنابراین شناسایی و معرفی روشی ارزان و کارآ، برای رفع کمبود آهن ضروری است. از ترکیبات دیگر مورد استفاده، مواد زائد حاصل از معادن و محصولات جنبی و ضایعات فرایندهای صنعتی هستند که حاوی مقدار توجهی آهن می‌باشد. سیکا و کانسال (۵۹) گزارش کردند تیمار ۸ درصد خاکستر بادی^۱ سبب افزایش معنادار غلظت آهن گیاه گندم از ۱۳۸ میلی‌گرم در کیلوگرم به ۱۶۱ میلی‌گرم در کیلوگرم شد. فابریزو و همکاران (۱۳) تأثیر سرباره کوره پاتیلی^۲ را بر پارامترهای بیوشیمیایی گیاه *Amaranthus paniculatus* مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌های آنان نشان داد که کاهش مقدار کلروفیل کل با افزایش نسبت کلروفیل a به کلروفیل b قابل جبران است. از طرف دیگر ترکیبات آلی علاوه بر بهبود خواص فیزیکی خاک می‌توانند قابلیت جذب عناصر فلزی از قبیل آهن را افزایش دهند. مختاری و همکاران (۳۳) در مطالعات خود سطح مختلف سرباره و لجن کنورتور را بر میزان آهن در اندام‌های هوایی گیاه ذرت بررسی کردند. سطح ۵ درصد سرباره بیش‌ترین تأثیر را در مقدار آهن گیاه داشت. بنابراین با توجه به حجم عظیم ضایعات آلی مانند کود دامی، زباله شهری، لجن فاضلاب، بقایای گیاهی و هم‌چنین تولید مقادیر فراوان ضایعات معدنی حاوی آهن از قبیل سرباره حاصل از ذوب مس می‌توان مشکل کمبود آهن را برطرف نمود. لذا هدف از این مطالعه تأثیر سرباره مس و ترکیبات آلی بر میزان آهن، رنگدانه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و غلظت آهن فعال در برگ‌های جوان توسعه‌یافته گیاه سورگوم بود. انتخاب گیاه سورگوم بر مبنای حساسیت زیاد این گیاه به کمبود عنصر آهن و استفاده در مطالعات پیشین مربوط به بررسی کمبود آهن بود (۲۴).

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر سرباره مس (از محصولات جانبی حاصل از ذوب کنسانتره مس در مجتمع مس سرچشمه استان کرمان) و ترکیبات آلی (کود گاوی و پوست پسته) بر میزان آهن کل، رنگدانه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و غلظت آهن فعال برگ‌های بالایی گیاه سورگوم، نمونه خاکی با آهن قابل استفاده و ماده آلی کم از روستای دوچاهی تحت کشت پسته استان کرمان (N ۵۳/۸ ' ۴۹ ° ۲۹ و E ۱/۴ ' ۳۵ ° ۵۵) برداشت شد. بخشی از نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه و خشک‌شدن در مجاورت هوا از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد.

پیریت (FeS₂) وجود دارد. اما در خاک‌های خنثی یا قلیایی، آهن به قدری نامحلول است که گیاه به مقدار کافی نمی‌تواند آن را جذب کند (۵۱). آهن نقش مهمی در فعالیت آنزیم‌ها، متابولیسم اسیدهای نوکلئیک و پروتئین‌های هم (سیتوکروم، لگ‌هموگلوبین، پروتئین‌های Fe-S و فردوکسین)، فتوسنتز، تنفس گیاه، احیای نیترات، سوخت و ساز اسیدهای آلی و تکامل کلروپلاست دارد (۲۷ و ۵۸). در شرایط کمبود آهن، رادیکال‌های آزاد اکسیژن تجمع می‌یابند. یکی از سامانه‌های دفاعی گیاهان در مقابل این رادیکال‌ها، تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز می‌باشد که در ساختار آن‌ها عنصر آهن وجود دارد. لذا در شرایط کمبود آهن فعالیت این آنزیم‌ها مختل می‌شود (۱، ۳ و ۳۱). رانیری و همکاران (۴۶) در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که میزان فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز در برگ‌های گیاه سویا در محلول غذایی فاقد آهن برای حذف پراکسید هیدروژن کاهش می‌یابد. لومباردی و همکاران (۲۵) نیز نشان دادند در شرایط کمبود آهن، بسیاری از آنزیم‌هایی که فعالیت آن‌ها وابسته به آهن است، غیرفعال می‌شوند. مطالعات آنان نشان داد که فعالیت پراکسیداز یک شاخص خوب برای تعیین وضعیت تغذیه‌ای آهن است. بیش‌تر انواع کلروز آهن نه ناشی از جذب کم آهن به‌وسیله درختان است و نه ناشی از کمبود آهن در برگ‌ها، بلکه یک اختلال فیزیولوژیکی است که به وسیله افزایش pH در آپوپلاست سلول‌های گیاهان ایجاد شده است، افزایش pH شیره سلولی و رسوب عناصر غذایی به ویژه آهن، روی، منگنز و مس در آن‌ها شده و تحت چنین شرایطی نشانه‌های ظاهری کمبود آن‌ها دیده می‌شود. به نحوی که احیای آهن II در pH بالا آپوپلاست متوقف می‌شود (۱۵). محمد و همکاران (۳۲) اظهار داشتند که با اندازه‌گیری غلظت آهن کل نمی‌توان تفاوت بین گیاهانی که کمبود آهن دارند با گیاهان سالم تشخیص داد در حالی که نسبت آهن فعال به آهن کل رابطه نزدیکی با درجه کلروز در گیاه داشت. پیرسون و کلارک (۴۲) مقدار آهن فعال را در برگ‌های تازه، منجمد خشک شده و خشک گیاه سورگوم (برگ‌های توسعه یافته انتهای) به ترتیب ۲۷/۴، ۱۲/۱ و ۱۱/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش کردند. این محققان گزارش کردند که مقدار آهن فعال در برگ‌های تازه در مقایسه با دو روش دیگر بیش‌تر بوده و از نمونه‌های خشک می‌توان برای تعیین مقدار آهن فعال در گیاهانی که کمبود آهن ندارند استفاده کرد. از روش‌های مهم درمان عارضه کلروز آهن استفاده از کودهای مختلف حاوی آهن و مواد اصلاحی می‌باشد. از جمله ترکیباتی که به این منظور استفاده می‌شود، می‌توان به نمک‌های معدنی آهن، اصلاح اسیدزا، ضایعات و تولیدات جنبی صنایع و کلات‌های آهن اشاره کرد. این در حالی است که کلات‌های مصنوعی آهن موثرترین آن‌ها بوده است. کاهش pH کود نیز می‌تواند اثر خوبی بر افزایش حلالیت آهن داشته باشد (۲۶). جایگذاری موضعی نمک‌های معدنی آهن به همراه

1- fly-ash

2- ladle furnace slag

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- Some soil physical and chemical properties

ویژگی Property	مقدار Value	ویژگی Property	مقدار Value	ویژگی Property	مقدار Value
بافت خاک Texture	Loamy Sand	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	309.33	نسبت جذب سدیم SAR	6.73
واکنش خاک pH	7.44	آهن Fe (mg.kg ⁻¹)	1.3	درصد رطوبت اشباع SP %	33.5
هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	3.39	مس Cu (mg.kg ⁻¹)	0.91	درصد رطوبت ظرفیت مزرعه FC %	11.3
کربن آلی OC %	0.35	روی Zn (mg.kg ⁻¹)	0.78		
آهک T.N.V %	14	منگنز Mn (mg.kg ⁻¹)	3.15		
درصد نیتروژن N %	0.029	کلسیم Ca (meq.L ⁻¹)	13.5		
فسفر P (mg.kg ⁻¹)	18.6	منیزیم Mg (meq.L ⁻¹)	1.75		

جدول ۲- برخی خصوصیات شیمیایی مواد آلی مورد استفاده

Table 2- Selected chemical properties of organic matters used

ویژگی Property	کود گاوی Cow manure	پوست پسته Pistachio shell	ویژگی Property	کود گاوی Cow manure	پوست پسته Pistachio shell
آهن کل Total Fe (mg kg ⁻¹)	4150	910	واکنش خاک pH	8.1	4.9
مس کل Total Cu (mg kg ⁻¹)	39.2	11.06	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	5.34	6.26
روی کل Total Zn (mg kg ⁻¹)	148.5	24	درصد کربن OC %	29.22	54.7
منگنز کل Total Mn (mg kg ⁻¹)	357	34	درصد نیتروژن کل Total N %	1.4	2.5
درصد سدیم Na %	0.59	0.11	درصد فسفر کل Total P %	0.42	0.12
درصد کلسیم Ca %	7.56	0.84	درصد پتاسیم کل Total K %	1.63	5.02
درصد منیزیم Mg %	1.58	0.58			

وزنی و رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) با استفاده از دستگاه صفحه فشار اندازه‌گیری شدند (۱۶). برای تعیین غلظت کل فلزات در ترکیبات آلی (کود گاوی و پوست پسته) از روش اکسایش تر (اسید نیتریک ۷۰ درصد، اسید کلریدریک غلیظ و آب اکسیژنه ۳۰ درصد) استفاده شد (۶۰). آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو عامل منابع مختلف آهن و ترکیبات آلی با سه تکرار انجام شد. منابع مختلف آهن شامل شاهد یعنی بدون کاربرد مواد حاوی آهن در (S)، سکوسترین^۱ (Seq) FeEDDHA به میزان ۵ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک، سرباره مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک (S₂)، سرباره مس به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک (S₄)، سرباره مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد (S₂S[°])، سرباره مس به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد (S₄S[°])، سرباره مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد و تیوباسیلوس (S₂S[°]T)، سرباره مس به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد (S₄S[°]T)، سرباره اسیدی شده مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک (S_{2a})، سرباره اسیدی شده مس به

کود گاوی از واحد دامپروری اطراف سیرجان و پوست پسته مورد استفاده از باغات پسته اطراف سیرجان تهیه شد. ترکیبات آلی پس از خشک کردن در مجاورت هوا، از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شدند. برخی از خصوصیات فیزیکوشیمیایی نمونه خاک مورد استفاده و ترکیبات آلی به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. بافت خاک به روش هیدرومتر (۱۴)، pH و EC نمونه خاک در گل و عصاره اشباع و در ترکیبات آلی در نسبت ۵:۱ ترکیب آلی به آب تعیین شد (۲۹)، درصد کربن آلی در نمونه خاک و ترکیبات آلی با استفاده از روش واکلی بلک اندازه‌گیری شد (۳۴)، مقدار کربنات کلسیم معادل خاک به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتراسیون با سود ۱ نرمال تعیین شد (۲۹). نیتروژن کل خاک و ترکیبات آلی به روش کجلدال (۶)، فسفر قابل جذب خاک به روش اولسن (۳۷) و پتاسیم قابل جذب خاک با استفاده از استات آمونیوم عصاره‌گیری شده و با دستگاه فلیم فوتومتر قرائت شد (۲۳).

عناصر قابل جذب خاک (آهن، مس، روی و منگنز) بعد از عصاره‌گیری با DTPA با دستگاه جذب اتمی پراکین المر-مدل ۳۰۳۰ اندازه‌گیری شدند (۲۴). سدیم، کلسیم و منیزیم محلول در عصاره اشباع به ترتیب با استفاده از فلیم‌فوتومتر و روش کمپلکسومتری تعیین شدند (۱۶). رطوبت اشباع (SP) خاک به روش

۱- اتیلن دی آمین دی هیدروکسی فنیل استیک اسید

خاک و محلول پاشی عناصر غذایی کم مصرف (مس و منگنز) به میزان ۳ در هزار از منبع سولفات انجام گرفت (۲۷). جهت ایجاد شرایط یکسان برای گلدانها، هر هفته یکبار تمام گلدانها به طور تصادفی در گلخانه جابجا شدند. قبل از برداشت گیاهان، شاخص سبزیبگی برگهای جوان (SPAD) با دستگاه کلروفیل متر دستی SPAD مدل Konica Minolta ساخت ژاپن اندازه گیری شد. بعد از دوره کشت، نمونه های گیاهی از ۱ سانتی متری محل طوقه برداشت شدند. برداشت بوته های گیاه سورگوم ۱۲۰ روز پس از کاشت انجام شد. برگ های گیاه سورگوم ابتدا با آب شهری، سپس با اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال و در نهایت با آب مقطر شسته شدند. نمونه های گیاهی به مدت ۴۸ ساعت در درجه حرارت ۷۰ درجه سلسیوس خشک شدند، پس از هضم نمونه های گیاهی به روش اکسیداسیون تر (۵)، غلظت آهن کل برگ با استفاده از دستگاه جذب اتمی پراکین الم مدل ۳۰۳۰ اندازه گیری شد. در برگ های بالغ و جوان، غلظت رنگدانه های فتوسنتزی کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل به ترتیب با روش پورا (۴۳) توسط دستگاه اسپکتروفتومتر تعیین شدند. جهت سنجش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان، در پایان دوره کشت، نمونه هایی از برگ های تازه انتهایی گیاه تهیه و در نیتروژن مایع منجمد شد و تا زمان انجام آنالیزهای شیمیایی در دمای ۸۰- درجه سلسیوس نگهداری شدند. فعالیت آنزیم های گایاکول پراکسیداز^۲ (GO) به روش جنس و مهلی (۷)، گلوکاتایون پراکسیداز^۳ (GPX) به روش هوپکین (۱۸) اندازه گیری شدند. به منظور اندازه گیری غلظت آهن فعال از محلول ۱/۵ درصد ۱۰،۱ فنانتروپین در بافت تازه گیاه (برگ های جوان توسعه یافته) استفاده شد (۲۲). تجزیه واریانس با استفاده از نرم افزار SAS و مقایسه میانگین ها به کمک آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج کانی شناسی سربراه نشان داد که این ترکیب حاوی کانی های اولیوین، اوژیت، فایالیت، هماتیت، مگنتیت و فاز آمورف می باشد. آنالیز فلورسانس اشعه ایکس نتایج نشان داد که حدود ۵۳/۸ درصد سربراه را اکسیدهای آهن به خود اختصاص می دهند (جدول ۳). علاوه بر این عناصر سیلیسیم، کلسیم، پتاسیم، مس، منیزیم و مقداری روی در سربراه وجود دارند. ترکیب این ماده حاکی از وجود تعدادی از عناصر کم مصرف و پرمصرف در غلظت بالاست.

میزان ۲۰ میلی گرم آهن در کیلوگرم خاک (S_{4a}) و محلول پاشی برگی آهن از منبع کود کلات ($Fe-EDTA^1$) با غلظت ۵ در هزار و سطوح مختلف ماده آلی: بدون ماده آلی (C)، کود گاوی ۲ درصد (C_2)، کود گاوی ۴ درصد (C_4)، پوست پسته ۲ درصد (P_2)، پوست پسته ۴ درصد (P_4). تیمارهای سربراه بر اساس میزان آهن قابل جذب خاک و سربراه و نیز حد توصیه آهن قابل جذب (آهن قابل استخراج با DTPA) محصولات زراعی بیان شده توسط لیندزی و نورول (۱۹۷۸) یعنی ۵ میلی گرم آهن در کیلوگرم خاک محاسبه و به گلدانها اضافه شدند. بدین منظور، با توجه به میزان آهن اولیه قابل عصاره گیری خاک (۱/۳ میلی گرم در کیلوگرم، جدول ۱) و میزان آهن قابل جذب سربراه (۲۵۰ میلی گرم در کیلوگرم، جدول ۵)، مقادیر سربراه هر تیمار که به میزان ۲ برابر (۱۰ میلی گرم آهن در کیلوگرم خاک) و ۴ برابر (۲۰ میلی گرم آهن در کیلوگرم خاک) مقدار توصیه آزمون خاک آهن بودند محاسبه و به گلدانها اضافه شد. اعمال این تیمار در طی دوره کشت قبل از گلدهی صورت گرفت. گوگرد عنصری استفاده شده از شرکت مرک آلمان و باکتری تیوباسیلوس از مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور خریداری گردید. مایه تلقیح های یک کیلوگرمی با تراکم جمعیت حدود 10^7 سلول در گرم مایه تلقیح تهیه شد. برای تعیین مقدار گوگرد، ابتدا مقدار اسیدی که لازم است تا pH سربراه را به ۳ تنزل دهد، محاسبه گردید. آنگاه از لحاظ توازن شیمیایی (استیوکیومتری)، گوگرد معادل اسید محاسبه شده، تعیین شد و مقدار مایه تلقیح باکتری تیوباسیلوس به میزان ۲ درصد گوگرد بود. برای اسیدی کردن سربراه مس در حدود pH=۳ از اسید سولفوریک غلیظ استفاده شد. تیمارهای آزمایشی به صورت یکنواخت در گلدان های ۳ کیلوگرمی مخلوط و به مدت ۳ ماه انکوباسیون شدند. در طی دوره انکوباسیون، نمونه ها در رطوبت ۷۵٪ ظرفیت مزرعه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به حالت تعادل رسیدند. بعد از اتمام دوره انکوباسیون داخل هر گلدان ۱۰ عدد بذر سورگوم *Sorghum bicolor* رقم اسپید فید کاشته شده و بعد از استقرار گیاهان، شمار بوته ها به چهار عدد کاهش یافت. در طول مدت زمان کشت رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه نگه داشته شد. (آب آبیاری دارای pH برابر با ۶/۹۸ و هدایت الکتریکی ۴۳/۲ میکروزیمنس بر سانتی متر بود). همچنین برای جلوگیری از بروز نشانه های کمبود سایر عناصر در گیاه و براساس نتایج آزمون خاک، کوددهی به گلدانها به صورت زیر انجام شد. فسفر از منبع دی آمونیوم فسفات به میزان ۴۰ میلی گرم فسفر در کیلوگرم خاک، پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم به میزان ۲۰۰ میلی گرم پتاسیم در کیلوگرم خاک، نیتروژن از منبع اوره طی دو مرحله قبل از گلدهی و بعد از گلدهی به میزان ۳۰ میلی گرم نیتروژن در کیلوگرم

2- Guaiacol peroxidase
3- Glutathione peroxidase

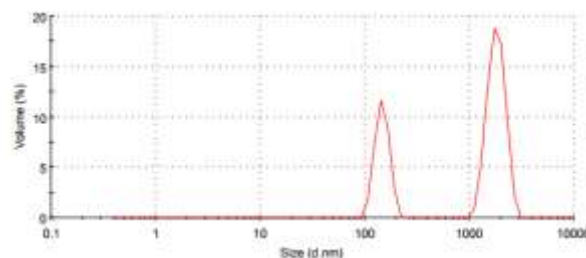
۱- اتیلن دی آمین تترا استیک اسید

جدول ۳- تجزیه شیمیایی سرباره با استفاده از تکنیک XRF
Table 3- Chemical analysis of slag by XRF technique

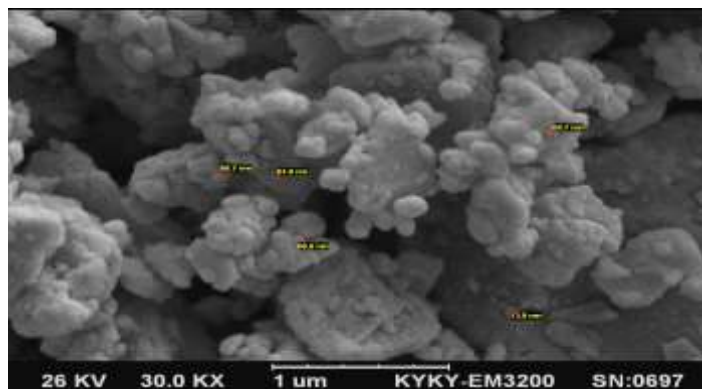
ترکیب Composition	مقدار % Value	ترکیب Composition	مقدار % Value
K ₂ O	1.41	Fe ₂ O ₃	44.54
Cu	1.21	Fe ₃ O ₄	9.24
MgO	1.02	SiO ₂	31.47
ZnO	0.72	CaO	5.63
TiO ₂	0.42	Al ₂ O ₃	4.05

جدول ۴- توزیع اندازه ذرات بر حسب درصد حجمی آن‌ها
Table 4- Size distribution by percentage of volume

	قطر Diam (nm)	حجم Volume (%)	پهنای Width (nm)
Peak 1	146.6	32.8	22.79
Peak 2	1810	67.2	346.8



شکل ۱- توزیع اندازه ذرات بر حسب درصد حجمی آن‌ها
Figure 1- Size distribution by percentage of volume



شکل ۲- آنالیز SEM نمونه سرباره مورد استفاده
Figure 2- SEM analysis of slag used

جدول ۵- عناصر قابل جذب سرباره (قابل عصاره‌گیری با DTPA)
Table 5- Elemental analysis of slag (extracted with DTPA)

ویژگی Property	مقدار Value	عنصر Element	مقدار Value (ppm)	عنصر Element	مقدار Value (ppm)	عنصر Element	مقدار Value (ppm)	عنصر Element	مقدار Value (ppm)	عنصر Element	مقدار Value (ppm)
pH	7.5	آهن Fe	250	منگنز Mn	14.67	کبالت Co	513.3	سرب Pb	ND	مولیبدن Mo	ND
EC (dS.m ⁻¹)	0.42	مس Cu	266.7	کادمیم Cd	80.67	نقره Ag	24	آرسنیک As	ND	سلنیم Se	ND
		روی Zn	33166.7	نیکل Ni	2220	کرم Cr	ND	بیسموت Bi	ND		

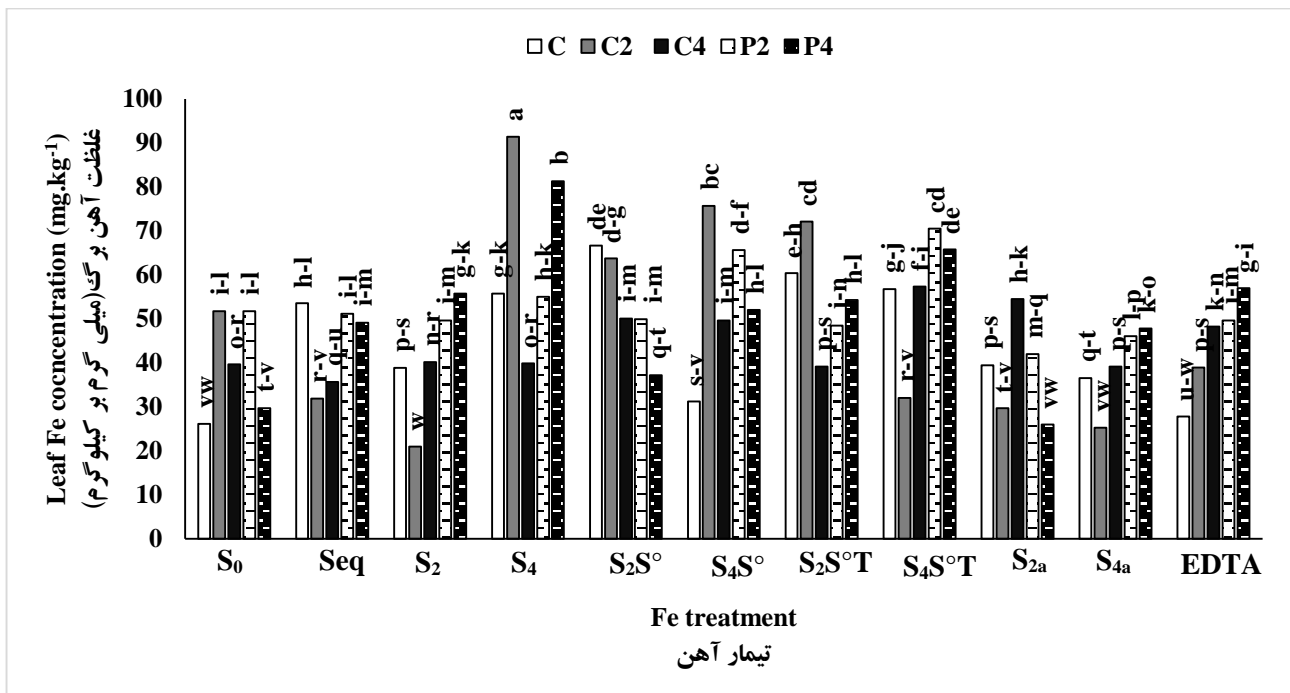
ND: زیر حد تشخیص دستگاه
ND: Under Detection Limit

داده نشده‌اند). حد بحرانی غلظت آهن در گیاه سورگوم ۶۵ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک گزارش شده است (۲۷). شریعتمداری و همکاران (۵۷) نیز نشان داد که بیش‌ترین غلظت آهن در گیاهانی که تحت تأثیر تیمارهای سرباره و لجن کنورتور بوده‌اند مربوط به سطوح بالای این دو ترکیب بود. بعد از تیمار (S₄) بیش‌ترین مقدار آهن گیاه به تیمارهای S₂S[°]T و S₄S[°]T تعلق داشت (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). کاپلان و اورمان (۲۰) در آزمایش گلخانه‌ای و مزرعه‌ای در خاک‌های آهکی پی بردند که مصرف گوگرد، عملکرد محصول و نیز مقدار آهن، روی، منگنز گیاه سورگوم را افزایش داد. سامر و شهپایان (۵۳) دریافتند با مصرف توأم گوگرد و سولفات آهن، غلظت آهن برگ افزایش یافت. نتایج مقایسات میانگین مربوط به اثرات متقابل تیمارهای مختلف بر غلظت آهن در گیاه سورگوم در شکل ۳ نشان داده شده است.

نتایج آنالیز زینت سايزر نشان داد، در نمونه سرباره مورد استفاده ۳۲ درصد حجمی ذرات، قطری در حد ۱۴۰ نانومتر داشته و ۶۷ درصد حجمی، قطر ۱۸۱۰ نانومتر را دارند (جدول ۴ و شکل ۱). آنالیز (SEM) انجام شده نیز تأیید کننده این نتایج است (شکل ۲). همچنین pH، EC در نسبت ۲/۵:۱ سرباره به آب و عناصر قابل عصاره‌گیری با DTPA در نمونه سرباره در جدول ۵ آمده است (۲۴).

تأثیر تیمارهای مختلف بر آهن کل برگ گیاه سورگوم

بررسی اثر اصلی سطوح مختلف تیمارهای سرباره بر مقدار آهن گیاه نشان داد کاربرد سرباره سبب افزایش معنادار غلظت آهن در گیاه سورگوم نسبت به شاهد شد. بیش‌ترین مقدار آهن گیاه برابر با ۶۴/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم، مربوط به تیمار (S₄) بود که با شاهد در سطح احتمال ۵ درصد دارای تفاوت معناداری داشت (داده‌ها نشان



شکل ۳- مقایسه میانگین‌های غلظت آهن (mg.kg⁻¹) برگ در تیمارهای مختلف

Figure 3- Means comparison of Fe (mg.kg⁻¹) concentration of leaves in various treatments

S₀: شاهد بدون کاربرد مواد حاوی آهن؛ Seq: سکوسترین آهن به میزان ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک؛ S₂: سرباره مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک؛ S₄: سرباره مس به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک؛ S₂S[°]: سرباره مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد؛ S₄S[°]: سرباره مس به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد؛ S₂S[°]T: سرباره مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد و تیوباسیلوس؛ S₄S[°]T: سرباره مس به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد و تیوباسیلوس؛ S_{2a}: سرباره اسیدی شده مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک؛ S_{4a}: سرباره اسیدی شده مس به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک؛ EDTA: محلول‌پاشی فتریلون با غلظت ۵ در هزار.

S₀: Control, Seq: Fe Sequestrine (5 mg kg⁻¹), S₂: Copper slag (10 mg Fe kg⁻¹ soil), S₄: Copper slag (20 mg Fe kg⁻¹ soil), S₂S[°]: Copper slag (10 mg Fe kg⁻¹ soil) with elemental S, S₄S[°]: Copper slag (20 mg Fe kg⁻¹ soil) with elemental S, S₂S[°]T: Copper slag (10 mg Fe kg⁻¹ soil) with elemental S and *Thiobacillus*, S₄S[°]T: Copper slag (20 mg Fe kg⁻¹ soil) with elemental S and *Thiobacillus*, S_{2a}: acidic Copper slag (10 mg Fe kg⁻¹ soil), S_{4a}: acidic Copper slag (20 mg Fe kg⁻¹ soil), EDTA: foliar application of EDTA

رحمانی و همکاران (۴۴) در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند، عناصر ریزمغذی مخصوصاً آهن با افزایش میزان کلروفیل، منجر به افزایش فتوسنتز گیاه شده و رشد و توسعه بیش‌تر اندام هوایی گیاه را به‌دنبال دارد که با نتایج این مطالعه تطبیق دارد. ساندر و همکاران (۵۴) در یک آزمایش گلخانه‌ای تأثیر سرباره کوره الکتریکی (۱۰ و ۲۰ گرم در کیلوگرم) را در مقایسه با منبع کودی مایع Fe+NPK بر رشد گیاه ذرت و رنگدانه‌های فتوسنتزی مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد، استفاده از ۲۰ گرم در کیلوگرم سرباره در مقایسه با منابع کودی دیگر افزایش قابل ملاحظه‌ای را در مقدار کلروفیل a ایجاد کرد.

استفاده از ترکیبات آلی سبب افزایش مقدار پارامترهای مذکور در مقایسه با تیمار شاهد شد که این افزایش متناسب با مقدار ترکیبات آلی مصرفی بود، به طوری که بیش‌ترین مقدار رنگدانه‌های فتوسنتزی در گیاهانی که تحت تأثیر تیمارهای کود گاوی و پوست پسته بوده‌اند مربوط به سطوح بالای این دو ترکیب است. سطوح ۴ درصد وزنی کود گاوی و پوست پسته به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را بر مقدار رنگدانه‌های فتوسنتزی داشتند (جدول‌های ۶ تا ۸). بیش‌ترین مقدار کلروفیل a، در تیمار ۴ درصد وزنی پوست پسته (P₄) با میانگین ۴/۲۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر بود. هرچند که با تیمار ۴ درصد وزنی کود گاوی (C₄) با میانگین ۴/۲۳ میلی‌گرم در گرم وزن تر از لحاظ آماری اختلاف معناداری نداشت و کم‌ترین مقدار مربوط به تیمار شاهد (C) با میانگین ۳/۲۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر بود. استفاده از تیمار ۴ درصد وزنی کود گاوی (C₄)، به ترتیب منجر به افزایش ۳۱/۹۰ و ۳۰/۶۷ درصد در میزان کلروفیل b و کلروفیل کل نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد مواد آلی) (C) شد. چوکانو و همکاران (۹) به این نتیجه رسیدند، استفاده از ترکیبات آلی، منجر به انتقال بهتر مواد غذایی از ریشه به سمت اندام هوایی شده و در نهایت با افزایش شاخص‌های مورفولوژیکی، سبب بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک در گیاه می‌شوند. اثر بر هم کنش تیمارهای سرباره و ترکیبات آلی نشان داد تیمار (C₄S₄) بیش‌ترین میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی را دارا بود که با تیمار (C₄S₄S^oT) تفاوت معناداری نداشت. بیش‌ترین مقدار کلروفیل a، b و کلروفیل کل در تیمار (C₄S₄) به ترتیب با میانگین ۶/۱۳، ۳/۰۶، ۹/۱۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر بود و کم‌ترین مقدار مربوط به تیمار شاهد (CS₀) به ترتیب با میانگین ۲/۱۵، ۰/۹۷، ۳/۲۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر مشاهده شد (جدول‌های ۶ تا ۸).

تأثیر تیمارهای مختلف بر شاخص سبزی‌نگی برگ (SPAD)

نتایج حاصل از مقایسات میانگین مربوط به تأثیر این تیمارها بر شاخص سبزی‌نگی برگ در جدول ۹ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۳، بیش‌ترین غلظت آهن در تیمار (C₂S₄) با مقدار ۹۱/۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که دلیل آن را می‌توان به افزایش آهن قابل جذب خاک در این تیمار ارتباط داد (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). از آنجا که غلظت یک عنصر ویژه در گیاه زمانی افزایش می‌یابد که در خاک نیز افزایش پیدا کرده باشد، برخی پژوهشگران بر این باور هستند که برای بیش‌تر عناصر رابطه مثبت معناداری بین غلظت عناصر در بافت گیاهی و غلظت قابل استفاده آن‌ها در خاک وجود دارد (۲۱). از طرفی با توجه به نتایج جدول ۲، افزایش مقدار آهن در این تیمار (C₂S₄) را می‌توان به آهن بیش‌تر در کود گاوی در مقایسه با پوست پسته ارتباط داد.

استفاده از ترکیبات آلی با افزایش ترکیبات کلات کننده موجبات افزایش فراهمی آهن را فراهم می‌کنند. مواد هیومیکی موجود در این ترکیبات، موجب ایجاد کمپلکس با عناصر کم مصرف شده و در نتیجه عناصر مؤثر در دستگاه فتوسنتزی، خصوصاً آهن بیش‌تر در دسترس گیاه قرار می‌گیرند. چن و اونیملیچ (۸) گزارش کردند که استفاده از کودهای حیوانی همراه با سولفات آهن مشکل کمبود آهن را در سورگوم رفع خواهد کرد. ونگ و همکاران (۶۷) اظهار داشتند که غلظت آهن، منگنز، روی، مس در بافت گیاهی ذرت کاشته شده در خاک‌های تحت تیمار کمپوست و لجن فاضلاب به مقدار معناداری افزایش پیدا کرد.

تأثیر تیمارهای مختلف بر رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه سورگوم

جدول‌های ۶ تا ۸ نشان دهنده تأثیر اثرات اصلی و متقابل تیمارهای مختلف بر مقدار رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل) نمونه‌های تازه برگ گیاه سورگوم می‌باشند. مقایسه اثرات اصلی تیمارهای سرباره نشان داد، تیمار (S₄) بیش‌ترین مقدار کلروفیل a، b و کلروفیل کل را دارا می‌باشد که با تیمار (S₄S^oT) تفاوت معناداری نداشت (جدول‌های ۶ تا ۸). حداکثر مقدار رنگدانه‌های فتوسنتزی در گیاه، در تیمار (S₄) به دست آمد. به نحوی که به ترتیب منجر به افزایش مقدار کلروفیل a، b و کلروفیل کل از ۲/۲۴، ۱/۲۰ و ۳/۶۸ میلی‌گرم در گرم وزن تر در خاک بدون کاربرد سرباره (S₀) به ۵/۵۴، ۲/۷۷ و ۸/۲۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر شد. اورمان و کاپلان (۳۸) در آزمایشی مشاهده کردند مصرف کودهای گوگرد باعث افزایش محتوی کلروفیل کل در گیاه گوجه فرنگی می‌شود. آهن جزء متابولیک آنزیم کاپروپورفینوزن اکسیداز است این آنزیم در بیوسنتز آلفا-آمینولیوونولیک (ALA) که پیش نیاز کلروفیل است تأثیر دارد. به نظر می‌رسد در شرایطی که کمبود آهن در خاک کم‌تر از حد بهینه باشد، مقدار کلروفیل کاهش می‌یابد (۲۷).

با دستگاه‌های کلروفیل سنج قابل اندازه‌گیری است. افزایش شاخص میزان کلروفیل برگ در نتیجه افزایش میزان آهن برگ به دلیل نقش آهن در ساخت کلروفیل است. ماده مشترک برای ساخت کلروفیل و هیم، اسید دلتا-آمینولولینیک است که میزان تشکیل آن به وسیله آهن مهار می‌شود.

استفاده از تیمارهای سرباره اثر معناداری بر افزایش شاخص سبزیگی برگ‌ها داشت. به طوری که بیشترین شاخص سبزیگی برگ (۳۷/۲۸) در تیمار (S₄) مشاهده شد که در مقایسه با تیمار شاهد (۱۰/۴۳) افزایش چشمگیری را نشان داد. (جدول ۹). شاخص SPAD، که تابعی از میزان کلروفیل برگ است، به راحتی

جدول ۶- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای سرباره و ترکیبات آلی بر غلظت کلروفیل a برگ (mg g⁻¹Fw)

Table 6- Means comparison of the effects of slag and organic compounds treatments on Leaf chlorophyll a concentration

	C	C ₂ %	C ₄ %	P ₂ %	P ₄ %	میانگین (Average)
S ₀	2.15 ^s	2.19 ^{rs}	2.40 ^{o-s}	2.32 ^{p-s}	3.17 ^{l-r}	2.44 ^G
Seq	2.36 ^{p-s}	2.57 ^{n-s}	3.15 ^{l-r}	3.21 ^{l-q}	3.42 ^{j-n}	2.94 ^{EF}
S ₂	3.60 ^{i-m}	4.04 ^{g-l}	4.27 ^{f-k}	4.35 ^{f-j}	4.56 ^{d-i}	4.16 ^{BC}
S ₄	5.52 ^{a-d}	5.88 ^{ab}	6.13 ^a	5.08 ^{b-f}	5.10 ^{b-f}	5.54 ^A
S ₂ S ^o	3.22 ^{l-p}	4.01 ^{g-l}	4.30 ^{f-k}	3.66 ^{h-m}	4.34 ^{f-k}	3.90 ^C
S ₄ S ^o	2.23 ^{q-s}	5.21 ^{a-f}	5.69 ^{a-c}	4.47 ^{e-i}	4.86 ^{e-g}	4.49 ^B
S ₂ S ^o T	3.98 ^{g-l}	4.50 ^{e-i}	4.59 ^{d-h}	4.25 ^{f-k}	4.51 ^{e-i}	4.36 ^B
S ₄ S ^o T	4.88 ^{c-g}	5.40 ^{a-e}	5.91 ^{ab}	5.19 ^{a-f}	5.73 ^{a-c}	5.42 ^A
S _{2a}	2.55 ^{n-s}	2.61 ^{n-s}	2.84 ^{m-s}	2.92 ^{m-s}	3.15 ^{l-r}	2.81 ^{FG}
S _{4a}	2.88 ^{m-s}	3.12 ^{l-s}	3.70 ^{h-m}	3.39 ^{j-n}	3.96 ^{g-l}	3.41 ^D
EDTA	2.86 ^{m-s}	2.90 ^{m-s}	3.63 ^{h-m}	3.36 ^{k-o}	3.91 ^{g-l}	3.33 ^{DE}
میانگین (Average)	3.29 ^C	3.85 ^B	4.23 ^A	3.83 ^B	4.24 ^A	

میانگین‌هایی با حروف مشابه، در هر ستون یا ردیف، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنادار ندارند.

Means followed by the same letters are insignificant at the 0.05 probability within each column or row.

S₀: شاهد بدون کاربرد مواد حاوی آهن؛ Seq: سکوسترین آهن به میزان ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک؛ S₂: سرباره مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک؛ S₄:

سرباره مس به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک؛ S₂S^o: سرباره مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد؛ S₄S^o: سرباره مس به میزان ۲۰

میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد؛ S₂S^oT: سرباره مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد و تیوباسیلوس؛ S₄S^oT: سرباره مس به میزان

۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد و تیوباسیلوس؛ S_{2a}: سرباره اسیدی شده مس به میزان ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک؛ S_{4a}: سرباره اسیدی شده مس به

میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک؛ EDTA: محلول پاشی فتریلون با غلظت ۵ در هزار.

S₀: Control, Seq: Fe Sequestrine (5 mg kg⁻¹), S₂: Copper slag (10 mg Fe kg⁻¹ soil), S₄: Copper slag (20 mg Fe kg⁻¹ soil), S₂S^o: Copper slag (10 mg Fe kg⁻¹ soil) with elemental S, S₄S^o: Copper slag (20 mg Fe kg⁻¹ soil) with elemental S, S₂S^oT: Copper slag (10 mg Fe kg⁻¹ soil) with elemental S and *Thiobacillus*, S₄S^oT: Copper slag (20 mg Fe kg⁻¹ soil) with elemental S and *Thiobacillus*, S_{2a}: acidic Copper slag (10 mg Fe kg⁻¹ soil), S_{4a}: acidic Copper slag (20 mg Fe kg⁻¹ soil), EDTA: foliar application of EDTA

جدول ۷- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای سرباره و ترکیبات آلی بر غلظت کلروفیل b برگ (mg g⁻¹Fw)

Table 7- Means comparison of the effects of slag and organic compounds treatments on Leaf chlorophyll b concentration

	C	C ₂ %	C ₄ %	P ₂ %	P ₄ %	میانگین (Average)
S ₀	0.97 ^{xy}	1.09 ^{w-y}	1.20 ^{v-x}	1.16 ^{v-x}	1.59 ^{q-t}	1.20 ^G
Seq	1.15 ^{v-x}	1.27 ^{u-w}	1.58 ^{q-t}	1.61 ^{q-s}	1.73 ^{o-r}	1.47 ^F
S ₂	1.81 ^{n-p}	2.00 ^{k-n}	2.11 ^{j-m}	2.18 ^{i-k}	2.27 ^{g-j}	2.07 ^C
S ₄	2.74 ^{cd}	2.95 ^{ab}	3.06 ^a	2.52 ^{ef}	2.57 ^{de}	2.77 ^A
S ₂ S ^o	1.61 ^{q-s}	2.00 ^{k-n}	2.14 ^{j-l}	1.82 ^{n-p}	2.16 ^{j-l}	1.94 ^D
S ₄ S ^o	0.95 ^y	2.62 ^{de}	2.84 ^{bc}	2.36 ^{f-i}	2.45 ^{e-g}	2.24 ^B
S ₂ S ^o T	1.99 ^{l-n}	2.24 ^{ij}	2.29 ^{g-j}	2.14 ^{j-l}	2.26 ^{h-j}	2.18 ^B
S ₄ S ^o T	2.44 ^{e-h}	2.71 ^{cd}	2.96 ^{ab}	2.58 ^{de}	2.88 ^{a-c}	2.71 ^A
S _{2a}	1.28 ^{uv}	1.30 ^{uv}	1.75 ^{o-q}	1.46 ^{s-u}	1.57 ^{q-t}	1.47 ^F
S _{4a}	1.45 ^{s-u}	1.56 ^{r-t}	1.88 ^{no}	1.68 ^{p-r}	1.97 ^{l-n}	1.71 ^E
EDTA	1.41 ^{tu}	1.45 ^{s-u}	1.82 ^{n-p}	1.68 ^{p-r}	1.95 ^{mn}	1.66 ^E
میانگین (Average)	1.63 ^C	1.92 ^B	2.15 ^A	1.92 ^B	2.12 ^A	

میانگین‌هایی با حروف مشابه، در هر ستون یا ردیف، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنادار ندارند.

Means followed by the same letters are insignificant at the 0.05 probability within each column or row.

تیمارها در جدول ۶ توصیف شده‌اند.

See the Table 6 for description of the treatments

جدول ۸- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای سرباره و ترکیبات آلی بر غلظت کلروفیل کل برگ ($\text{mg g}^{-1}\text{Fw}$)

Table 8- Means comparison of the effects of slag and organic compounds treatments on Leaf total chlorophyll concentration.

	C	C ₂ %	C ₄ %	P ₂ %	P ₄ %	میانگین (Average)
S ₀	3.24 ^x	3.29 ^{wx}	3.61 ^{t-x}	3.49 ^{u-x}	4.77 ^{p-s}	3.68 ^G
Seq	3.53 ^{u-x}	3.85 ^{s-x}	4.70 ^{p-s}	4.82 ^{p-s}	5.15 ^{o-r}	4.41 ^F
S ₂	5.44 ^{n-q}	6.09 ^{k-o}	6.43 ^{j-n}	6.58 ^{j-l}	6.89 ^{h-l}	6.29 ^C
S ₄	8.30 ^{a-e}	8.80 ^{a-c}	9.19 ^a	7.26 ^{f-j}	7.63 ^{d-i}	8.24 ^A
S ₂ S ^o	4.50 ^{q-u}	6.05 ^{k-o}	6.44 ^{j-n}	5.49 ^{m-q}	6.50 ^{j-m}	5.80 ^D
S ₄ S ^o	3.36 ^{v-x}	7.94 ^{b-g}	8.54 ^{a-d}	7.41 ^{e-j}	7.30 ^{e-j}	6.91 ^B
S ₂ S ^o T	6.01 ^{k-o}	6.74 ^{i-l}	6.91 ^{g-k}	6.42 ^{j-n}	6.80 ^{h-l}	6.57 ^{BC}
S ₄ S ^o T	7.32 ^{e-j}	8.11 ^{b-f}	8.91 ^{ab}	7.80 ^{c-h}	8.63 ^{a-d}	8.15 ^A
S _{2a}	3.83 ^{s-x}	3.93 ^{s-x}	4.62 ^{p-t}	4.38 ^{r-v}	4.75 ^{p-s}	4.30 ^F
S _{4a}	4.35 ^{r-v}	4.68 ^{p-s}	5.54 ^{m-p}	5.10 ^{o-r}	5.92 ^{k-o}	5.12 ^E
EDTA	3.94 ^{s-x}	4.33 ^{r-w}	5.46 ^{n-q}	5.07 ^{o-r}	5.86 ^{l-o}	4.93 ^E
میانگین (Average)	4.89 ^C	5.80 ^B	6.39 ^A	5.80 ^B	6.38 ^A	

میانگین‌هایی با حروف مشابه، در هر ستون یا ردیف، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنادار ندارند.

Means followed by the same letters are insignificant at the 0.05 probability within each column or row.

تیمارها در جدول ۶ توصیف شده‌اند.

See the Table 6 for description of the treatments

جدول ۹- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای سرباره و ترکیبات آلی بر شاخص سبزیبگی برگ (SPAD)

Table 9- Means comparison of the effects of slag and organic compounds treatments on SPAD value.

	C	C ₂ %	C ₄ %	P ₂ %	P ₄ %	میانگین (Average)
S ₀	4.37 ^u	5.90 ^u	17.83 ^{o-q}	8.36 ^{tu}	15.33 ^{p-s}	10.43 ^F
Seq	13.43 ^{q-s}	11.96 st	25.23 ^{i-l}	11.10 st	20.86 ^{l-o}	16.52 ^E
S ₂	29.10 ^{e-i}	31.06 ^{e-h}	31.86 ^{d-g}	30.03 ^{e-h}	31.93 ^{c-g}	30.80 ^{BC}
S ₄	36.13 ^{b-d}	36.40 ^{bc}	41.23 ^a	36.56 ^b	36.06 ^{b-d}	37.28 ^A
S ₂ S ^o	27.16 ^{h-k}	33.26 ^{b-f}	31.13 ^{e-h}	28.16 ^{g-k}	29.86 ^{e-h}	29.92 ^{BC}
S ₄ S ^o	33.53 ^{b-e}	29.56 ^{e-i}	29.16 ^{e-i}	28.36 ^{g-k}	30.73 ^{e-h}	30.27 ^{BC}
S ₂ S ^o T	30.23 ^{e-h}	27.76 ^{g-k}	28.16 ^{g-k}	29.00 ^{f-i}	30.86 ^{e-h}	29.20 ^C
S ₄ S ^o T	30.13 ^{e-h}	31.06 ^{e-h}	37.53 ^{ab}	28.80 ^{f-j}	31.36 ^{e-h}	31.78 ^B
S _{2a}	13.20 ^{rs}	15.40 ^{p-s}	21.43 ^{l-o}	15.60 ^{p-s}	20.83 ^{l-o}	17.29 ^E
S _{4a}	17.66 ^{o-r}	18.86 ^{op}	24.10 ^{k-n}	20.23 ^{m-o}	25.13 ^{i-l}	21.20 ^D
EDTA	11.93 st	17.56 ^{o-r}	29.30 ^{e-i}	19.66 ^{n-p}	24.46 ^{j-m}	20.58 ^D
میانگین (Average)	22.44 ^B	23.53 ^B	28.81 ^A	23.26 ^B	27.04 ^A	

میانگین‌هایی با حروف مشابه، در هر ستون یا ردیف، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنادار ندارند.

Means followed by the same letters are insignificant at the 0.05 probability within each column or row.

تیمارها در جدول ۶ توصیف شده‌اند.

See the Table 6 for description of the treatments

به طوری که میزان کلروفیل درختان تیمار شده در مقایسه با شاهد تفاوت معناداری نشان داد.

کاربرد ترکیبات آلی (کود گاوی و پوست پسته)، منجر به افزایش معنادار شاخص سبزیبگی برگ‌ها (SPAD) شدند. بیش‌ترین مقدار شاخص سبزیبگی برگ‌ها مربوط به سطوح بالای این دو ترکیب (۴ درصد وزنی کود گاوی (C₄) و ۴ درصد وزنی پوست پسته (P₄)) بود که از نظر آماری اختلاف معناداری نداشتند. استفاده از این تیمارها (C₄) و (P₄)، به ترتیب منجر به افزایش ۲۸/۳۸ و ۲۰/۴۹ درصدی در میزان شاخص سبزیبگی برگ‌ها نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد مواد آلی) (C) شدند (جدول ۹). وجود مواد آلی در خاک بر احیای آهن مؤثر است زیرا مواد آلی در حال تجزیه با انتقال الکترون به آهن سه

افزایش شاخص میزان کلروفیل برگ در نتیجه افزایش میزان آهن مصرفی در تحقیقات انجام شده توسط بانولز و همکاران (۴) در پرتقال، هیرایی و همکاران (۱۷) در جو نیز گزارش شده است. نتایج تحقیقات هیرایی و همکاران (۱۷) نشان داد مقدار آهن کل و شاخص میزان کلروفیل برگ به طور معناداری با افزایش میزان آهن کاربردی افزایش یافت. دلاگواردیا و آکانترا (۱۱) بیان داشتند که بروز کلروز برگی به افت میزان کلروفیل و توان تولیدی گیاه و در نهایت کاهش عملکرد گیاه می‌انجامد. رامبول و همکاران (۵۰) اعلام کردند که کمبود آهن موجب کاهش میزان کلروفیل در برگ گیاهان می‌گردد. ایگلسیاس و همکاران (۱۹) از کلروز درختان در خاک‌های آهنکی به وسیله تزریق سولفات آهن II در خاک به طور مؤثری جلوگیری کردند،

هم نداشتند. به نحوی که اعمال تیمار (S₄) منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسید و گلوکاتایون پراکسیداز به ترتیب از ۰/۹۲ و ۱/۲۳ (Iu/ gr. Fw) در خاک بدون کاربرد سرباره (S₀) به ۳/۶۸ و ۴/۲۵ (Iu/ gr. Fw) شد (جدول‌های ۱۰ و ۱۱). پراکسیدازها از سیستم‌های فتوسنتزی گیاهانی که در معرض تنش‌های محیطی قرار می‌گیرند، محافظت می‌کنند. آنزیم سوپراکسید دیسموتاز رادیکال سوپراکسید تولید شده به وسیله زنجیره انتقال الکترون در کلروپلاست‌ها و میتوکندری‌ها را با تولید پراکسید هیدروژن از بین می‌برد. پراکسید هیدروژن به وسیله آنزیم پراکسیداز در بخش‌های مختلف سلولی از بین می‌رود. این آنزیم‌ها حاوی آهن هستند و فعالیت آن‌ها در شرایط کمبود آن کم خواهد شد (۳۰ و ۶۲). محققین در مطالعات خود تأکید کردند استفاده از مقادیر کافی کلات EDDHA می‌تواند با افزایش فعالیت آنزیم‌های گیاهی به طور موثری کلروز را کاهش دهد (۴۰ و ۶۶). رحیم زاده و همکاران (۴۵) اظهار داشتند کمبود آهن در گیاهان نه تنها موجب کلروز می‌شود، بلکه فعالیت آنزیم‌های مشخصی مانند پراکسیدازها را نیز کاهش می‌دهد. مکرسی و همکاران (۲۸) در آزمایشی مشاهده کردند که با مصرف ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سولفات آهن فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و گلوکاتایون پراکسیداز به ترتیب ۸۹، ۶۹ و ۴۸ درصد افزایش نشان داد. کم‌ترین فعالیت این آنزیم‌ها نیز مربوط به تیمار شاهد بود که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد. بنابراین فراوانی آهن در سلول‌های گیاهی تعیین‌کننده فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانت است.

ظرفیتی و احیای آن، غلظت آهن را در محلول خاک افزایش می‌دهد، مولکول‌های آلی با آهن یا برخی دیگر از کاتیون‌ها تشکیل کمپلکس‌های آلی فلزی را می‌دهند، که قابلیت جذب عناصر را افزایش می‌دهند. هم‌چنین اثرات مفید ماده آلی همراه با ترکیبات معدنی آهن موجب حفظ قابلیت جذب (ممانعت و یا تأخیر در رسوب) آهن موجود در ترکیبات معدنی شده، در نتیجه امکان جذب برای گیاه به میزان بیش‌تری فراهم خواهد بود. با افزایش فراهمی آهن، فتوسنتز زیاد شده در نتیجه سنتز کلروفیل افزایش خواهد یافت.

اثر برهم کنش تیمارهای سرباره و ترکیبات آلی نشان داد میزان شاخص سبزیگی برگ از ۴/۷۳ در تیمار شاهد CS^o به مقدار ۴۱/۲۳ در تیمار (C₄S₄) رسید که تفاوت معناداری نسبت به تیمار (C₄S₄T) نداشت (جدول ۹). تریپوریدیس و همکاران (۶۵) نیز نشان دادند که کاربرد EDDHA و FeSO₄.7H₂O همراه با مواد آلی به صورت تزریق مایع در خاک به طور معناداری شاخص سبزیگی برگ‌ها را حتی تا بعد از ۱۲۰ روز پس از کاربرد افزایش می‌دهند.

تأثیر تیمارهای مختلف بر فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسیداز، گلوکاتایون پراکسیداز

جدول‌های ۱۰ و ۱۱ نشان دهنده تأثیر اثرات اصلی و متقابل تیمارهای مختلف بر مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانت می‌باشند. مقایسه اثرات اصلی تیمارهای سرباره نشان داد، بیش‌ترین مقدار فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسید و گلوکاتایون پراکسیداز به ترتیب در تیمارهای (S₄) و (S₄S^oT) بود که از نظر آماری اختلاف معناداری با

جدول ۱۰- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای سرباره و ترکیبات آلی بر میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز (IU/grFw) GO
Table 10- Means comparison of the effects of slag and organic compounds treatments on Guaiacol Peroxidase activity (IU/grFw)

	C	C ₂ %	C ₄ %	P ₂ %	P ₄ %	میانگین (Average)
S ₀	0.65 ^{qr}	1.07 ^{op}	1.54 ⁿ	0.60 ^{qr}	0.75 ^q	0.92 ^G
Seq	0.71 ^{qr}	0.69 ^{qr}	2.96 ^{de}	2.47 ^{jk}	2.49 ^{jk}	1.86 ^D
S ₂	1.94 ^m	3.07 ^d	3.10 ^d	2.80 ^{e-g}	2.95 ^{d-f}	2.77 ^B
S ₄	3.81 ^b	3.85 ^b	4.20 ^a	3.12 ^d	3.45 ^c	3.68 ^A
S ₂ S ^o	1.47 ⁿ	2.21 ^l	2.75 ^{f-h}	2.73 ^{gh}	3.03 ^d	2.43 ^C
S ₄ S ^o	0.51 ^r	3.46 ^c	3.73 ^b	2.63 ^{g-j}	3.09 ^d	2.68 ^B
S ₂ S ^o T	1.90 ^m	2.52 ^{ij}	2.71 ^{g-i}	2.55 ^{h-j}	2.76 ^{e-g}	2.49 ^C
S ₄ S ^o T	2.77 ^{e-g}	3.76 ^b	4.27 ^a	3.50 ^c	3.90 ^b	3.64 ^A
S _{2a}	1.23 ^{op}	1.51 ⁿ	2.50 ^{jk}	1.48 ⁿ	2.19 ^l	1.76 ^E
S _{4a}	0.98 ^p	2.31 ^{kl}	1.88 ^m	1.05 ^{op}	1.58 ⁿ	1.56 ^F
EDTA	0.63 ^{qr}	1.79 ^m	2.24 ^l	1.25 ^o	1.86 ^m	1.55 ^F
میانگین (Average)	1.50 ^E	2.38 ^C	2.89 ^A	2.19 ^D	2.55 ^B	

میانگین‌هایی با حروف مشابه، در هر ستون یا ردیف، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنادار ندارند.

Means followed by the same letters are insignificant at the 0.05 probability within each column or row.

تیمارها در جدول ۶ توصیف شده‌اند.

See the Table 6 for description of the treatments

جدول ۱۱- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای سرباره و ترکیبات آلی بر میزان فعالیت آنزیم گلوکوتاتیون پراکسیداز (GPX) (IU/grFw)
Table 11- Means comparison of the effects of slag and organic compounds treatments on Glutathione peroxidase activity

	C	C ₂ %	C ₄ %	P ₂ %	P ₄ %	میانگین (Average)
S ₀	0.86 ^{yz}	1.40 ^{tu}	1.86 ^{qr}	0.91 ^{x-z}	1.23 ^{v-x}	1.23 ^G
Seq	0.80 ^z	1.10 ^{w-y}	3.52 ^f	2.76 ^k	2.70 ^k	2.17 ^D
S ₂	2.15 ^{m-o}	3.46 ^{fg}	3.54 ^f	3.04 ^{h-j}	3.57 ^f	3.15 ^B
S ₄	4.35 ^{cd}	4.57 ^{bc}	4.88 ^a	3.58 ^f	3.89 ^e	4.25 ^A
S ₂ S ^o	1.92 ^{o-q}	2.40 ^l	3.08 ^{hi}	3.14 ^h	3.50 ^f	2.81 ^C
S ₄ S ^o	0.71 ^z	3.96 ^e	4.38 ^{cd}	3.18 ^h	3.51 ^f	3.14 ^B
S ₂ S ^t T	2.11 ^{n-p}	2.85 ^{i-k}	3.06 ^{hi}	2.81 ^{jk}	3.11 ^h	2.78 ^C
S ₄ S ^t T	3.22 ^{gh}	4.27 ^d	4.81 ^{ab}	4.00 ^e	4.52 ^c	4.16 ^A
S _{2a}	1.59 st	1.80 ^{q-s}	2.75 ^k	1.82 ^{q-s}	2.30 ^{l-n}	2.05 ^E
S _{4a}	1.36 ^{t-v}	2.33 ^{l-n}	2.12 ^{n-p}	1.32 ^{u-w}	1.89 ^{p-r}	1.80 ^F
EDTA	1.04 ^{xy}	2.16 ^{m-o}	2.38 ^{lm}	1.65 ^{rs}	2.19 ^{l-n}	1.88 ^F
میانگین (Average)	1.82 ^E	2.75 ^C	3.30 ^A	2.56 ^D	2.93 ^B	

میانگین‌هایی با حروف مشابه، در هر ستون یا ردیف، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنادار ندارند.

Means followed by the same letters are insignificant at the 0.05 probability within each column or row.

تیمارها در جدول ۶ توصیف شده‌اند.

See the Table 6 for description of the treatments

مطالعات یوفا و همکاران (۶۸) نشان داد استفاده از لاشبرگ‌های ۴ گونه گیاهی^۱ (TR)،^۲ (RA)،^۳ (BD) و^۴ (NR) به همراه سرباره حاصل از ذوب روی نشان داد، به جز لاشبرگ حاصل از گونه گیاهی (NR)، استفاده از بقیه ترکیبات آلی به همراه سرباره روی منجر به کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز شد. نتایج مطالعات حیدری و همکاران (۱۳۹۴) نشان داد که مصرف هم‌زمان گوگرد و کودهای عناصر کم صرف، منجر به افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز شد. تأثیر استفاده از سرباره فولاد بر فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز در جلبک سبز آبی در یک دوره ۳۰ روزه توسط نوگامی و همکاران (۳۵) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد، با اعمال سرباره به میزان ۵ گرم در لیتر، pH محیط افزایش پیدا کرده و با کاهش غلظت آهن، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز کم شد. یافته‌های ساندر و همکاران (۵۴) نشان داد، استفاده از ۲۰ گرم در کیلوگرم سرباره، افزایشی را در مقدار فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در مقایسه با منابع کودی دیگر ایجاد کرد.

تأثیر تیمارهای مختلف بر غلظت آهن فعال برگ‌های جوان توسعه یافته

در شرایط کمبود آهن فراهمی Fe²⁺ در اندام‌های گیاه کاهش می‌یابد. لذا Fe²⁺ که جزئی از آهن کل گیاه است، مسئول زردی و سبز رنگ بودن برگ‌هاست. کاتیال و شارما (۲۲) روشی را با استفاده

ادیجا و همکاران (۱۲) تأثیر استفاده از سرباره چدن را بر خصوصیات فیزیوشیمیایی و فعالیت آنزیم‌های موجود در خاک بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد سرباره با افزایش شوری و آلوده کردن خاک به عناصر فسفر و پتاسیم، منجر به کاهش فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز، پروتاز می‌شود.

استفاده از ترکیبات آلی سبب افزایش مقدار فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسیداز، گلوکوتاتیون پراکسیداز در مقایسه با تیمار شاهد شد. بیش‌ترین میزان فعالیت این دو آنزیم در تیمار ۴ درصد وزنی کود گاو (C₄) با مقادیر ۲/۸۹ و ۳/۳۰ (IU/ gr. Fw) مشاهده گردید (به ترتیب جدول‌های ۱۰ و ۱۱). مطالعات وین تراب و همکاران (۲۰۱۳) اثبات کرد استفاده از ترکیبات آلی منجر به تحرک عناصر غذایی، افزایش جامعه میکروبی خاک شده و سلامت اکوسیستم را در پی خواهد داشت. شاه و همکاران (۵۶) اثر مثبت اضافه کردن ترکیبات آلی را در افزایش میزان جذب عناصر غذایی، میزان فتوسنتز و فعالیت گلوکوتاتیون پراکسیداز گزارش کردند.

اثر متقابل تیمارهای سرباره و ترکیبات آلی نشان داد، بیش‌ترین فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسیداز ۴/۲۷ (IU/ gr. Fw) مربوط به تیمار (C₄S₄S^oT) بود (جدول ۱۰). این در حالی بود که تیمار (C₄S₄) نسبت به بقیه تیمارها در افزایش فعالیت آنزیم‌های گلوکوتاتیون پراکسیداز ۴/۸۸ (IU/ gr. Fw) حداکثر تأثیر را داشت (جدول ۱۱). محققان در مطالعه‌ای اثر استفاده از گوگرد و ترکیبات آلی را بر فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانت ذرت، بررسی کردند. کاربرد ۳۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار باعث افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز، رشد ریشه، تشکیل کلروفیل و در نتیجه افزایش فتوسنتز در ذرت گردید (۴۹).

- 1- Trifolium repens
- 2- Rumex acetosa
- 3- Buddleia davidii
- 4- Neyraudia reynaudiana

استفاده از ترکیبات آلی سبب افزایش معنادار غلظت آهن فعال شد. بیشترین غلظت آهن فعال در برگ‌های جوان توسعه یافته سورگوم، با میانگین (۴۲/۷۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) مربوط به تیمار ۴ درصد وزنی کود گاوی (C₄) بود که در مقایسه با تیمار شاهد (C) با میانگین (۲۸/۷۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) افزایش ۴۸/۷۸ درصدی را نشان داد (جدول ۱۲).

بررسی برهم کنش تیمارهای سرباره و ترکیبات آلی نشان داد، بیشترین میزان غلظت آهن فعال گیاه سورگوم به‌ترتیب با اضافه‌شدن ۴ درصد وزنی کود گاوی با تیمار سرباره به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد و تیوباسیلوس (C₄S₄S^oT) با میانگین (۵۴/۰۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) و ۴ درصد وزنی کود گاوی با تیمار سرباره به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک (C₄S₄) با میانگین (۵۳/۱۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) و کمترین مقدار مربوط به تیمار شاهد (CS₀) با میانگین (۱۷/۱۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) حاصل شد (جدول ۱۲).

مطالعات کاتیال و شارما (۲۲) بر روی گیاه برنج نشان داد، مقدار آهن فعال از ۲۸/۱ تا ۶۴ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌ترتیب در گیاهان کلروز و سبز متغیر است. پیرسون و کلارک (۴۲) در مطالعه‌ای دیگر مقدار آهن فعال اندازه‌گیری شده در گیاه به روش ۱۰،۱ فنانترولین (C₁₂H₈N₂) را ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش کردند (۴۱). اولسن (۳۶) بیان داشت، یکی از موارد مهم در رابطه با عصاره‌گیری با ۱۰،۱ فنانترولین این است که این عصاره‌گیر به‌عنوان یک عامل کلات‌کننده برای استخراج آهن در عصاره‌های خاک و بافت‌های گیاهی استفاده می‌شود.

از ۱۰،۱ فنانترولین برای اندازه‌گیری Fe²⁺ در نظر گرفتند. این پژوهشگران تفاوت قابل ملاحظه‌ای را در میزان آهن اندازه‌گیری شده در برگ‌های سبز و برگ‌های کلروز مشاهده کردند. آهن فعال جزئی از آهن بوده که در فرایندهای متابولیسمی شرکت داشته و در ساختمان مولکول‌ها به کار گرفته می‌شود. مقدار باقی مانده آهن احتمالاً رسوب کرده و برای گیاه قابل استفاده نیست. راثو (۴۷) متوجه شد که غلظت آهن فعال اندازه‌گیری شده با استفاده از اسیدکلریدریک میزان کمبود آهن را به‌خوبی نشان نمی‌دهد. این محقق گزارش کرد، برای تشخیص کمبود آهن، روش ۱۰،۱ فنانترولین ۱/۵٪ در برگ تازه بهتر از HCl یک نرمال در برگ‌های تازه و یا خشک بود. اما در مطالعات خلخال و همکاران (۱۳۹۵) مقدار آهن فعال اندازه‌گیری شده با HCl یک نرمال در گیاه ذرت، ۵ برابر (۶۴/۸۳ - ۴۱/۶) آهن عصاره‌گیری شده با ۱۰،۱ فنانترولین ۱/۵٪ (۱۷/۵۹ - ۸/۵۴) گزارش شد.

همان‌طور که در جدول ۱۲ ملاحظه می‌گردد، تیمارهای سرباره، منجر به افزایش معنادار غلظت آهن فعال اندازه‌گیری شده در برگ‌های تازه نسبت به تیمار شاهد شده‌اند. بیشترین مقدار آهن فعال مربوط به تیمار (S₄S^oT) بود که تفاوت معناداری با تیمار (S₄) نداشت. به‌گونه‌ای که مقدار آهن فعال از ۲۲/۷۳ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار شاهد (S₀) به ۴۹/۸۱ و ۴۹/۵۷ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌ترتیب در تیمارهای (S₄S^oT) و (S₄) افزایش یافت که نشانگر افزایش ۱۱۹/۱۳، ۱۱۸/۰۸ درصدی در مقدار آهن فعال است (جدول ۱۲). نتایج مطالعات سچنکول و همکاران (۵۵) نیز نشان داد، بیشترین مقدار آهن فعال در تیمار ۲۰ کیلوگرم آهن در هکتار به-دست آمد. همچنین کمترین مقدار آهن فعال در شاهد مشاهده شد.

جدول ۱۲ - مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای سرباره و ترکیبات آلی بر میزان آهن فعال (mg.kg⁻¹)

	C	C ₂ %	C ₄ %	P ₂ %	P ₄ %	میانگین (Average)
S ₀	17.14 ^{xy}	25.11 ^{s-u}	29.66 ^{rs}	19.27 ^{v-y}	22.51 ^{u-w}	22.73 ^E
Seq	28.16 ^{r-t}	30.36 ^r	39.45 ^{l-o}	31.04 ^{qr}	38.59 ^{l-o}	33.52 ^C
S ₂	31.14 ^{qr}	45.37 ^{d-g}	46.16 ^{d-f}	43.51 ^{f-k}	45.09 ^{d-h}	42.25 ^B
S ₄	43.90 ^{f-j}	49.76 ^{a-d}	53.19 ^{ab}	49.37 ^{a-d}	51.66 ^{a-c}	49.57 ^A
S ₂ S ^o	32.03 ^{p-r}	39.07 ^{k-o}	43.11 ^{f-l}	42.96 ^{f-l}	44.40 ^{e-i}	40.31 ^B
S ₄ S ^o	16.83 ^y	47.41 ^{c-f}	49.30 ^{b-d}	44.28 ^{e-i}	46.38 ^{d-f}	40.84 ^B
S ₂ S ^o T	35.52 ^{o-q}	41.20 ^{g-m}	42.79 ^{f-l}	40.19 ^{i-o}	43.67 ^{f-k}	40.67 ^B
S ₄ S ^o T	46.77 ^{d-f}	52.27 ^{ab}	54.06 ^a	47.11 ^{c-f}	48.82 ^{b-e}	49.81 ^A
S _{2a}	21.69 ^{u-x}	35.57 ^{o-q}	37.40 ^{m-o}	27.76 ^{r-t}	36.18 ^{n-p}	31.72 ^{CD}
S _{4a}	24.70 ^{tu}	37.21 ^{m-o}	31.68 ^{p-r}	23.95 ^{t-v}	32.03 ^{p-r}	29.91 ^D
EDTA	18.26 ^{w-y}	22.10 ^{u-w}	43.60 ^{f-k}	40.46 ^{h-n}	40.60 ^{h-n}	33.00 ^C
(Average) میانگین	28.74 ^D	38.67 ^C	42.76 ^A	37.26 ^C	40.90 ^B	

میانگین‌هایی با حروف مشابه، در هر ستون یا ردیف، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنادار ندارند.

Means followed by the same letters are insignificant at the 0.05 probability within each column or row.

تیمارها در جدول ۶ توصیف شده‌اند.

See the Table 6 for description of the treatments

آهن جذب شده به فرم ترکیبات نامحلول در می‌آید. هم‌چنین نتایج گزارش‌های تریوس و همکاران (۶۴) نشان داد که همبستگی چندانی بین غلظت آهن کل و درجه زردی ناشی از کمبود آهن (کاهش میزان کلروفیل) وجود ندارد و در بیش‌تر موارد برگ‌های زرد شده، آهن کل بیش‌تر از برگ‌های سالم دارند که به تضاد آهن مشهور می‌باشد، اما در مقابل این برگ‌های زرد شده آهن فعال کم‌تری از برگ‌های سالم داشتند. محمد و همکاران (۳۲) نیز در مطالعات خود گزارش کردند، ارتباط ضعیفی بین آهن کل و کلروفیل وجود دارد و همبستگی به دست آمده بین آهن فعال و کلروفیل زیاد می‌باشد، لذا می‌توان از آهن عصاره‌گیری شده با ارتوفنان ترولین یا نسبت بین آهن فعال به آهن کل، به‌عنوان شاخصی برای تفاوت بین گیاهان دچار کمبود و گیاهان سالم استفاده کرد. سوداهنو (۶۱) در مطالعه‌ای در محیط کشت شنی نشان داد، آهن فعال در مقایسه با آهن کل ارتباط بیش‌تری با مقدار کلروفیل داشته و نشان‌دهنده میزان واقعی کلروز در نهال‌های مرکبات است. بر اساس نتایج این مطالعه، با توجه به ضریب همبستگی ($r = 0.75^{***}$) به‌دست آمده بین شاخص سبزیگی و آهن فعال در گیاه، می‌توان از این شاخص برای تخمین میزان آهن فعال در گیاه استفاده کرد (جدول ۱۳). میزان آهن برگ‌های جوان توسعه یافته با فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسیداز ($r = 0.9^{***}$) و گلوکاتینون پراکسیداز ($r = 0.89^{***}$) همبستگی معناداری را نشان داد، این در حالی است آهن دو ظرفیتی برگ‌های جوان توسعه یافته همبستگی بیش‌تری را با این آنزیم‌ها نشان داد (جدول ۱۳). بین آهن فعال و آهن گیاه همبستگی معناداری ($r = 0.45^*$) مشاهده شد (جدول ۱۳). نتایج مطالعات اسپنکولد و همکاران (۲۰۰۸) نشان داد بیش‌ترین مقدار آهن گیاه و آهن فعال در تیمار ۲۰ کیلوگرم آهن در هکتار به دست آمد. نتایج مطالعات این افراد نشان داد به‌طور متوسط کم‌تر از ۳۰ درصد از غلظت آهن کل برگ، به شکل آهن فعال بود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با افزایش سطح سرباره مصرفی و به تبع آن افزایش غلظت آهن در برگ منجر به افزایش معنادار مقدار کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ و فعال شدن آنزیم‌های گیاهی شد.

تیمارهای ۴ درصد وزنی کود گاوی با سرباره به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک (C_4S_4) و ۴ درصد وزنی کود گاوی با سرباره به میزان ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک همراه با گوگرد و تیوباسیلوس $C_4S_4S^{\circ}T$ بیش‌ترین تأثیر را در افزایش میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی، شاخص SPAD، فعالیت آنزیم‌های گیاهی و آهن فعال در سطح احتمال ۵ درصد داشتند.

محمد و همکاران (۳۲) با افزایش زمان عصاره‌گیری از ۲۰ به ۴۵ ساعت در نهال‌های مرکبات که درجه متفاوتی از کلروز را نشان می‌دادند (کم، متوسط و زیاد)، مقدار آهن فعال را به‌ترتیب از ۱۲/۶، ۱۵/۲۳، ۲۳ میلی‌گرم در کیلوگرم به ۱۱/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش دادند. این محققین محدوده آهن فعال را از ۱۵/۸ تا ۳۶/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌ترتیب در نهال‌های کلروز و سبز مرکبات گزارش کردند. یافته‌های پیرسون و کلارک (۴۱) نشان دادند که مقدار Fe^{2+} اندازه‌گیری شده با استفاده از روش ۱۰،۱ فنانترویلین ($C_{12}H_8N_2$) در مقایسه با روش PDTS ۳، ۲، پیریدیل-۵، ۶ بیس-۴، فیل سولفونیک اسید-۱،۲،۴-تریازین بیش‌تر است. هم‌چنین با مقایسه میزان آهن فرو در برگ‌های خشک و تازه به این نتیجه رسیدند، میزان آهن فعال اندازه‌گیری شده در برگ‌های تازه در مقایسه با برگ‌های خشک بیش‌تر است. دیوید و ساندر (۱۰) با افزایش غلظت آهن در محیط‌های آبی، افزایش غلظت آهن فعال را در گونه‌های آبی مشاهده کردند که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد به‌نحوی که با افزایش غلظت آهن تا ۸ میلی‌گرم در لیتر در ۴ گونه آبی، افزایش در میزان آهن فعال را تا ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نشان دادند. بر اساس مقادیر به‌دست آمده در جدول ۱۲ افزایش غلظت آهن فعال ناشی از کاربرد تیمارهای (سرباره، ترکیبات آلی و اثر متقابل استفاده از این تیمارها) در برگ‌های جوان توسعه یافته گیاه سورگوم بیشتر از حد کفایت آهن فعال (۲۷/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) گیاه سورگوم بود (۴۲).

همبستگی ساده بین آهن برگ با رنگدانه‌های فتوسنتزی، آنزیم‌های گیاهی و آهن فعال

نتایج این مطالعه نشان داد میزان آهن برگ با کلروفیل a ($r = 0.45^{***}$)، کلروفیل b ($r = 0.51^{***}$)، کلروفیل کل ($r = 0.47^{***}$) (=) و شاخص SPAD ($r = 0.39^{***}$)، ضرایب همبستگی معناداری را نشان داد، این در حالی است آهن دو ظرفیتی برگ (آهن عصاره‌گیری شده با ارتوفنان ترولین) با میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی، کلروفیل a ($r = 0.79^{***}$)، کلروفیل b ($r = 0.87^{***}$)، کلروفیل کل ($r = 0.83^{***}$) (=) و شاخص SPAD ($r = 0.75^{***}$)، همبستگی بیش‌تری را نشان داد (جدول ۱۳). همبستگی مثبت و معناداری بین میزان آهن کل برگ و شاخص میزان کلروفیل برگ در تحقیقات هیرایی و همکاران (۱۷) در جو نیز مشاهده شده است. در تحقیقات تری (۶۳) نیز میزان کلروفیل برگ‌های چغندر قند تحت شرایط تنش آهن، همبستگی مثبتی با غلظت آهن برگ داشت. رابطه مستقیم بین کمبود آهن برگ و میزان کلروفیل به‌عنوان شاخص این کمبود اثبات شده است (۵۲). بررسی‌های انجام شده توسط کاتیل و شارما (۲۲) نشان داد، تمامی آهن جذب شده توسط گیاهان مورد استفاده قرار نگرفته و بخشی از

جدول ۱۳- ضریب همبستگی ساده بین صفات مورد مطالعه

Table 13- Simple correlations coefficients for traits

	Cha	Chb	Cht	SPAD	GO	GPX	FeA	FeP
Cha	1							
Chb	0.9***	1						
Cht	0.98***	0.95***	1					
SPAD	0.70***	0.78***	0.75***	1				
GO	0.82***	0.89***	0.86***	0.75***	1			
GPX	0.82***	0.90***	0.87***	0.74***	0.98***	1		
FeA	0.79***	0.87***	0.83***	0.75***	0.90***	0.89***	1	
FeP	0.45***	0.51***	0.47***	0.39***	0.40***	0.41***	0.45***	1

*** بیانگر معنادار بودن در سطح آماری ۰/۰۰۱ است.

*** significant at %0.1 level of probability

Cha: کلروفیل a، Chb: کلروفیل b، Cht: کلروفیل کل، SPAD: شاخص سبزیگی برگ، GO: آنزیم گایاکول پراکسیداز، GPX: آنزیم گلوکاتاتیون پراکسیداز، FeA: آهن فعال گیاه، FeP: آهن کل برگ‌های گیاه.

Cha: chlorophyll a, Chb: chlorophyll b, Cht: Total chlorophyll, SPAD: Leaf chlorophyll Index, GO: Guaiacol Peroxidase, GPX: Glutathione Peroxidase, FeA: Active Fe, FeP: Total Leaf Fe.

سپاسگزاری

بدین وسیله از تحقیقات آب و محیط زیست مس منطقه کرمان که در تأمین بخشی از مواد و هزینه‌های مورد نیاز اجرای این تحقیق با کد پروژه ۹۴/د/۲۵۵/آ همکاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود. هم‌چنین از سرکار خانم مهندس اسماعیل‌زاده، رییس تحقیقات آب و محیط زیست و جناب آقای مهندس اسپهبدی کارشناس ارشد تحقیقات آب و محیط زیست که با همکاری صمیمانه خود شرایط لازم را برای انجام این کار تحقیقاتی فراهم کردند، سپاسگزاری می‌گردد.

از آنجایی که میزان آهن فعال برگ‌های جوان توسعه یافته در مقایسه با غلظت آهن کل برگ‌ها ارتباط بیش‌تری با شاخص‌های فیزیولوژیک گیاه سورگوم داشت لذا می‌توان از این پارامتر به‌عنوان شاخصی برای تشخیص کمبود آهن استفاده کرد. یافته‌های این پژوهش همچنین نشان داد که سرباره حاصل از ذوب مس دارای قابلیت استفاده به‌عنوان یک پسماند برای رفع مشکل کمبود آهن در گیاهان در خاک‌های آهکی است لکن باتوجه به وجود برخی فلزات سنگین در این ترکیب، تحقیقات بیشتر در مورد اثرات زیست محیطی آن ضروری بنظر می‌رسد.

منابع

- 1- Aebi H. 1984. Catalase in vitro. *Methods in Enzymology* 105: 121-126.
- 2- Allison L.E., and Modie C.D. 1965. Carbonate. p. 1379-1396. In C.A. Black (ed.), *Method of Soil Analysis Part 2*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- 3- Amal A.M., and Aly A.A. 2008. Alteration of some secondary metabolites and enzymes activity by using exogenous antioxidant compound in onion plants growth under seawater salt stress. *American Journal of Scientific Research* 3: 139-146.
- 4- Banuls J.A., Quinones B., Martin E., Primo-Millo E., and Legaz F. 2003. Effects of frequency of iron chelate supply by fertigation on chlorosis in citrus. *Journal of Plant Nutrition* 26: 1985-1996.
- 5- Benton J., Jones J.R., and Case V.W. 1990. Sampling, handling and analyzing plant tissue sample. p. 389-429. In: R.L. Westerman (ed.), *Soil Testing and Plant Analysis*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- 6- Bremner J.M. 1996. Nitrogen-total. p. 1-89. In: D.L. Sparks, *Methods of Soil Analysis, Part 3*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- 7- Chance B., and Maehly A.C. 1955. Assay of catalases and peroxidases. *Methods in Enzymology* 11: 764-755.
- 8- Chen Y., and Avnimelech Y. 1986. The role of organic mater in modern agriculture. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht Netherland.
- 9- Chocano C., Garcia C., Gonzalez D., de Aguilar J.M., and Hernandez T. 2016. Organic plum cultivation in the Mediterranean region: The medium-term effect of five different organic soil management practices on crop

- production and microbiological soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 221: 60-70.
- 10- Daived F., and Ksander G. 1989. Influence of external iron concentration on active iron for four species of aquatic macrophytes. *Journal of Aquatic Plant Management* 27: 65-69.
 - 11- De La Guardia M.D., and Alcantara E. 2002. A comparison of ferric-chelate reductase and chlorophyll and growth ratios as indices of selection of quince, pear and olive genotypes under iron deficiency stress. *Plant Soil* 241: 49-56.
 - 12- Ediga A., Ramgopal M., Narasimha G., and Balaji M. 2010. Effect of Pig Iron Slag Particles on Soil Microbial and Enzyme Activities. *European Journal of Applied Sciences* 2(3): 122-126.
 - 13- Fabrizio P., Iori V., Beone T., Mirabile D., and Zacchini M. 2017. Effects of a ladle furnace slag added to soil on morpho-physiological and biochemical parameters of *Amaranthus paniculatus* L. plants. *Journal of Hazardous Materials* 329: 339-347.
 - 14- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
 - 15- Havlin J., Beaton J.D., Tisdale S.L., and Nelson W.L. 2005. *Soil fertility and fertilizers*, 7th edition. Pearson Prentice Hall.
 - 16- Hesse P.R. 1971. *A text book of soil chemical analysis*. John Murray. London
 - 17- Hirai M.K. Higuchi K., Sasaki H., Suzuki T., Maruyama T., and Tadano T. 2007. Contribution of iron associated with high molecular weight substances to the maintenance of the SPAD value of young leaves of barley under iron deficient conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 53: 612-620.
 - 18- Hopkins J., and Tudhope G.R. 1973. Glutathione peroxidase in human red cells in health and disease. *British Journal of Haematology* 25: 563-575.
 - 19- Iglesias I.R., Dalmau X., Marce M.C., Delcampillo V., and Torrent J. 2003. Fertilization with iron(II)-phosphate effectively prevents iron chlorosis in pear trees *pyrus communis*. *Acta Horticulturae* 511:65-72.
 - 20- Kaplan M., and Orman S. 1998. Effect of elemental sulfur and sulfur containing waste in a calcareous soil in Turkey. *Journal of Plant Nutrition* 21:1655-1665.
 - 21- Karla Y.P. 1998. *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. CRC Press, Washington D.C. USA.
 - 22- Katyal J.C., and Sharma B.D. 1984. Some modification in the assay of Fe²⁺ in 1-10, o-phenanthroline extracts of fresh plant tissues. *Plant Soil* 79: 449-450.
 - 23- Knudsen D., Peterson G.A., and Pratt P.F. 1982. Lithium, Sodium and Potassium. p. 225-246. In: A.L. Page et al. (ed.). *Methods of soil analysis (part II), Chemical and microbiological properties*, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
 - 24- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42: 421-428.
 - 25- Lombardi L., Sebastiani L., and Vitagliano C. 2003. Physiological, Biochemical and Molecular Effects of in vitro induced iron deficiency in peach rootstock. *Journal of Plant Nutrition* 26: 2149-216.
 - 26- Majidi A. 2013. Assessing the nutritional status of apple orchards in western Azerbaijan, and guidelines to improve the quantity and quality of product. *The First Scientific Conference on Agricultural and Rural Development with a Focus on National Production, Piranshahr, Iran. (In Persian)*
 - 27- Marshner H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. Academic press. New York.
 - 28- McKersie B.D., Murnaghan J., Jones K.S., and Bowley S.R. 2000. Iron superoxidase dismutase expression in transgenic alfalfa increases winter survival without a detectable increase in photosynthetic oxidative stress tolerance. *Plant Physiology* 122: 1427-1437.
 - 29- Miller R.H., and Keeney D.R. 1982. *Methods of Soil Analysis Part 2: Chemical and Microbiological properties*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
 - 30- Minami M., and Yoshikawa H. 1979. A simplified assay method of superoxide dismutase activity for clinical use. *Clinica Chimica Acta* 92: 337-342.
 - 31- Mittler R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science* 7: 405-410
 - 32- Mohammad M.J., Najim H., and Khresat S. 1998. Nitric acid-and O-Phenanthrolineextractable iron for diagnosis of iron chlorosis in citrus lemon trees. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29: 1035-1043.
 - 33- Mokhtari S., Hodaji M., and Kalbasi M. 2014. The effect of steel converter slag application along with sewage sludge in iron nutrition and corn plant yield. *Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research* 3: 96-104.
 - 34- Nelson D.W., and Sommers L.P. 1986. Total carbon, organic carbon and organic matter. p. 539-579. In A.L. Page et al. (ed.), *Methods of Soil Analysis Part 2*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
 - 35- Nogami R., Tam L.T., Anh H.T.L., and Quynh H.T.H. 2016. Growth promotion effect of steelmaking slag on *Spirulina platensis*. *Journal of Physics. Conference Series* 704: 12-19.
 - 36- Olsen R.A., Brown J.C., Bennett J. H., and Blum D. 1982. Reduction of Fe³⁺ as it relates to Fe chlorosis. *Journal of Plant Nutrition* 5: 433-445.

- 37- Olsen S.R., Close V., Watnebe F.S., and Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorous in soil by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture 939: 1-19.
- 38- Orman S., and Kaplan M. 2007. Effects of elemental sulphur and organic manure on sulphur, zinc, and total chlorophyll contents of tomato in a calcareous sandy loam soil. *Soil Science Society of America Journal* 55: 85-90.
- 39- Pestana M., Varennes A., and Faria E.A. 2003. Diagnosis and correction of iron chlorosis in fruit trees. *Food, Agriculture and Environment* 1: 46-51.
- 40- Peyvandi M., Kamali Jamakani Z., and Mirza M. 2011. Comparison of nano Fe chelat with Fe chelate effect on growth parameters and antioxidant enzymes activity of *Satureja hortensis*. *New Cellular and Molecular Biotechnology Journal* 2(5): 25-32.
- 41- Pierson E., and Clark R.B. 1984a. Chelanting agent differences in ferrous iron determination. *Journal of Plant Nutrition* 7(1-5): 91-106 .
- 42- Pierson E., and Clark R.B. 1984b. Ferrous Iron determination in plant tissue. *Journal of Plant Nutrition* 7(1-5): 107-116.
- 43- Porra R.J., Thompson W.A., and Kriedemann P.E. 1989. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biophysica Acta* 975: 384-94.
- 44- Rahmani A., Mirza M., and Tabaei Aghdai S.R. 2013. Effects of different fertilizers (macro and micro element) on quantity and quality of essential oil and other byproducts of *Rosa damascena* Mill. *Iranian Journal of Medical Sciences* 29(4): 747-759.
- 45- Rahimizadeh M., Habibi D., Madani H., Mohammadi G.N., Mehraban A., and Sabet A.M. 2007. The effect of micronutrients on antioxidant enzymes metabolism in sunflower (*Helianthus annuus* L.) under drought stress. *Helia* 30: 167-174.
- 46- Ranieri A., Castagna A., Baldan B., and Soldatini G.F. 2001. Iron deficiency differently affects peroxidase isoforms in sunflower. *Journal of Experimental Botany* 52: 25-35.
- 47- Rao A.C.S. 1993. Diagnosis of nutrient deficiencies of citrus orange orchards in Jiroft Valley of Iran. *Agrochimica* 37(1-2): 41-54.
- 48- Razmjoo S. 1997. Manual of analysis of fruit and vegetable products. 9th. ed. Tata MC Grow Hill, New Delhi.
- 49- Reddappa Reddy M. 2006. Effect of calcium, sulphur and boron on the yield and composition of corn (*Zea mays* L.) under water deficit stress. *Plant Growth Regulation* 54: 205-209.
- 50- Rombola A.D., Bruggemann A.F., LopezMillan M., Tagliavini J., Abadia B., Marangoni B., and Moog. P.R. 2002. Biochemical responses to iron deficiency in kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). *Tree Physiology* 22: 869-875.
- 51- Roosta H.R., and Karimi H.R. 2012. Effects of alkali-stress on ungrafted and grafted cucumber plants: using two types of local squash as rootstock. *Journal of Plant Nutrition* 35(12): 1843-1852.
- 52- Rosado R., del Campillo M.C., Martinez M.A., Barron V., and Torrent J. 2002. Longterm effectiveness of vivianite in reduce iron chlorosis in olive trees. *Plant Soil* 241: 139-144.
- 53- Samar S.M., and Shahabian M. 2003. Effect of organic manure enrichment with sulfur and sulfate on increasing availability of iron in a calcareous soil. National Seminar of production and application of sulfur in the country. Mashhad, Iran. (In Persian)
- 54- Sandra R., Crnojevic H., and Sandev D. 2013. Effect of electric arc furnace slag on growth and physiology of maize (*Zea mays* L.). *Acta Biologica Hungarica* 64(4): 490-499.
- 55- Schenkeveld W.D.C., Dijcker R., Reichwein A.M., Temminghoff E.J.M. and Riemsdijk W.H. 2008. The effectiveness of soil- applied FeEDDHA treatments in preventing iron chlorosis in soybean as a function of the o, o-FeEDDHA content. *Plant and Soil* 303: 161-176
- 56- Shah B., Sulaimana S., Jamal P., and Alam M.S. 2014. Production of heterogenous catalysts for biodiesel synthesis. *Environmental Chemical Engineering* 5(2): 73-75.
- 57- Shariatmadari H., Rezainejad Y., Abdi A., Mahmoudabadi A., and Karam M. 2009. Effect of Converter Sludge and Slag of Isfahan Iron Melting Factory on Corn Yield and Some Heavy Metal Uptake in a Calcareous Soil. *Journal of Water and Soil Science* 12(46): 667-680. (In Persian with English abstract)
- 58- Sharma P.K., and Hall D.O. 1991. Interaction of salt stress and photoinhibition on photosynthesis in barley and sorghum. *Journal of Plant Physiology* 138(5): 614-619.
- 59- Sikka R., Kansal B.D. 1994. Effect of fly-ash application on yield and nutrient composition of rice, wheat and on pH and available nutrition status of soils. *Bioresource Technology* 51: 199-203.
- 60- Sposito G., Lund L.J., and Chang A.C. 1982. Trace metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge, I.: Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. *Soil Science Society of America Journal* 46: 260-264.
- 61- Sudahono D., Byrne H., and Rouse R.E. 1994. Greenhouse screening of citrus rootstocks for tolerance to bicarbonate induced iron chlorosis. *Horticultural Science* 29: 113-116.
- 62- Sun B., Jing Y., Chen K., Song L., Chen F., and Zhang L. 2007. Protective effect of nitric oxide on iron deficiency-induced oxidative stress in maize (*Zea mays*). *Journal of Plant Physiology* 164: 536-543.

- 63- Terry N. 1980. Limiting factors in photosynthesis. I. Use of iron stress to control photochemical capacity in vivo. *Plant Physiology* 65: 114-120.
- 64- Therios I., Chouliaras V., Bizas D., Boukouvalas S., Palioura E., Hatzidimitriou E., Basioukas D., Gioldasis V. and Stavrou N. 2005. Changes in leaf biochemical and physiological indices due to iron deficiency in citrus. *AgroThesis* 1: 18-25.
- 65- Tsipouridis C., Almaliotis D., Thomidis T., and Isaakidis A. 2006. Effects of different sources of iron, hormones and *Agrobacterium tumefaciens* on chlorophyll and iron concentration in the leaves of peach trees. *Horticultural Science* 33(4): 140-147.
- 66- Wiersma J.V. 2005. High rates of Fe-EDDHA and seed iron concentration suggest partial solutions to iron deficiency in soybean. *Agronomy Journal* 97: 924-934.
- 67- Wonge J.W.C., Lik L., Zhoul X., and Selvam A. 2007. The sorption of Cd and Zn by different soils in the presence of dissolved organic matter from sludge. *Geoderma* 137: 310-317.
- 68- Youfa L., Yonggui W., Rongrong X., and Cong Y. 2018. Effects of plant litter decomposition on chemical and microbiological characteristics of artisanal zinc smelting slag using indigenous methods. *Journal of Geochemical Exploration* 292-301.

Effects of Copper Slag and Organic Matters on Physiological Indices of Iron Deficiency in Sorghum (*Sorghum bicolor*)

E. Mirparizi¹- M. Barani Motlagh^{2*}- S.A. Movahedi Naeni³- R. Ghorbani Nasrabadi⁴- S. Bakhtiary⁵

Received: 09-12-2019

Accepted: 28-11-2021

Introduction: Iron deficiency is one of the most common nutritional problems of plants in arid and semi-arid soils especially in calcareous soils. Iron is essential to many cellular activities, required for optimum growth and development, however it is insoluble in aerated soils at neutral or basic pH, therefore, iron deficiency is common in these soils. The problem is usually solved by using iron synthetic chelates which is a very expensive option. There is, therefore, a need for cheaper and more effective alternatives to traditional Fe fertilizers. Several reports have shown that application of Fe factory by-product to soil tends to raise the availability of Fe and reduce Fe deficiency in plants. Application of organic compounds to soil may improve the solubility of the minerals containing micronutrients and correct their deficiencies in alkaline and calcareous soils. A large amount of slag is produced annually at the Sarcheshmeh Copper Complex, Kerman Province, Iran. So far, the copper slag, however, has not been tested as an Fe fertilizer in calcareous soils. Since about 53.8% of slag obtained from copper concentrate melting is composed of iron oxides, we, thus, examined the effect of copper slag along with organic compounds on the level of upper leaf iron, photosynthetic pigments, SPAD index, the activity of plant enzymes and the level of active iron in the upper leaves of sorghum by performing a factorial experiment in a completely randomized design.

Materials and Methods: In order to study the effect of copper slag (one of by-products of melting copper concentrate in Sarcheshmeh Copper Complex, Kerman Province) and organic compounds (cow manure and pistachio skin) on total leaf iron content, photosynthetic pigments (chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll), antioxidant enzymes activity (Guaiacol Peroxidase, Glutathione peroxidase) and concentration of active iron of young leaves developed of sorghum, a pot experiment was conducted in the greenhouse with three replicates per treatment. We applied experimental treatments including 5 levels of organic matter (pistachio skin, cow manure at 2 and 4 wt. % and control sample), and 11 levels of iron (copper slag, copper slag with sulfur, copper slag with sulfur and thiobacillus, acidic slag (each 2 levels each), sequesterine, foliar application of EDTA, and control sample) to a soil sample with low iron content. At the end of the incubation period, *sorghum bicolor* was cultured in the above treatments. Ten seeds were sown in each pot. Seedlings were thinned to 4 when they were about 10 cm high. During the growth period, pots were irrigated with distilled water as needed. Before harvesting, SPAD, the concentration of photosynthetic pigments, level of active iron and activity of plant enzymes were also measured in fresh plant samples. Furthermore, the concentration of Fe in the leaves was measured. Analysis of variance was performed using software SAS and significant differences were determined based on LSD (Least Significant Difference Test) at $p < 0.05$ level.

Results and Discussion: The interaction between slag treatments and organic compounds showed that treatments of 4 wt. % of cow manure with slag of 4 times of recommended soil test value (C_4S_4 , and 4 wt. % of cow manure with slag of 4 times of recommended soil test value with sulfur and thiobacillus ($C_4S_4S^OT$), had significant effects on increasing photosynthetic pigments (chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll), SPAD index, activity of plant enzymes (Guaiacol peroxidase, Glutathione peroxidase) and active iron. The highest active iron level in the young leaves developed (54.06 mg / kg) was observed in ($C_4S_4S^OT$) treatment which showed a significant increase compared to the control treatment (17.14). Increased concentration of active iron was also observed due to application of treatments (slag, organic compounds and the interaction between treatments) in sorghum young leaves. The photosynthetic pigments (chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll), SPAD index and activity of plant enzymes (Guaiacol peroxidase, Glutathione

1, 2, 3 and 4- Ph.D. Graduate, Associate Professors and Assistant Professor, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, respectively.

(* - Corresponding Author Email: mbarani@gau.ac.ir)

5- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan

DOI: 10.22067/JSW.2021.14923.0

peroxidase) were more correlated with active iron in young leaves developed compared to total iron concentration in these leaves. This indicates that active iron can be used as an index to detect iron deficiency.

Conclusion: The higher level of active iron in the young leaves developed was more associated with physiological indices of sorghum as compared with total Fe concentration in these leaves. Therefore, this parameter can be used as an index to detect iron deficiency. In this study, increasing the level of slag consumed and consequently increasing Fe concentration in the leaf resulted in a significant increase in chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, carotenoids and activation of the plant enzymes.

Keywords: Active iron, Copper slag, Photosynthetic pigments, Plant enzymes

مقاله پژوهشی

تأثیر نانو ذرات نقره بر فعالیت میکروبی و جمعیت باکتریایی یک خاک آهکی با استفاده از qPCR

سکینه بالنده^۱ - امیر لکزیان^{۲*} - علی جوادمنش^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۳۰

چکیده

نانوذرات نقره (AgNPs) به دلیل خاصیت ضد میکروبی خود در بسیاری از محصولات تجاری استفاده می‌شوند. با توجه به مصرف بالای AgNPs آزاد شدن آن در محیط زیست دور از انتظار نمی‌باشد. AgNPs به عنوان یک آلاینده نو ظهور پذیرفته شده است و برای اکثر جوامع باکتریایی و قارچی سمی است. اگر چه انتظار می‌رود رفتار AgNPs در محیط پیچیده خاک تحت تاثیر عوامل مختلفی قرار بگیرد که بر روی خاصیت ضد میکروبی آن تاثیر می‌گذارد. به دلیل آگاهی از خطرات زیست محیطی و ارزیابی اثرات AgNPs بر فعالیت میکروبی خاک آزمایشی با دو شکل نقره (یونی و نانو) در ۲ بازه زمانی انجام شد. غلظت‌های ۵، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم AgNPs و $AgNO_3$ بر مبنای نقره به هر کیلوگرم خاک خشک اضافه و گرماگذاری شد. تاثیر هر دو ترکیب بر تنفس برانگیخته میکروبی، تعداد باکتری‌های هتروتروف، فعالیت آنزیم اوره‌آز و دهیدروژناز و جمعیت همه باکتری‌های خاک با استفاده از qPCR برآورد شد. در نهایت با استفاده از شاخص‌های زیستی فوق، نمودار شاخص زیستی کیفیت خاک رسم شد. نتایج نشان داد با افزایش غلظت AgNPs و $AgNO_3$ ، فعالیت دهیدروژناز و اوره‌آز خاک، تنفس برانگیخته میکروبی و تعداد باکتری‌های خاک کاهش پیدا کرد؛ اما با گذشت زمان فقط فعالیت اوره‌آز خاک و جمعیت باکتری‌های هتروتروف افزایش پیدا کرد. نتایج شاخص زیستی کیفیت خاک نشان داد با افزایش غلظت AgNPs و $AgNO_3$ و گذشت زمان این شاخص نسبت به تیمار شاهد کاهش پیدا کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که بازدارندگی نقره به شکل یونی بر فعالیت میکروبی خاک به ویژه فعالیت آنزیم دهیدروژناز بیشتر از شکل نانو آن بود. در حالی که فراوانی نسبی جمعیت باکتریایی خاک کاهش بیشتری در تیمار AgNPs نسبت به تیمار $AgNO_3$ نشان داد.

واژه‌های کلیدی: اوره‌آز، دهیدروژناز، جمعیت باکتریایی، نانو ذرات نقره، qPCR

مقدمه

نانولوله‌های کربنی چندلایه^۵ و فولرین است که در این میان نانو ذرات نقره (AgNPs) به دلیل رسانایی خوب، پایداری شیمیایی، خواص کاتالیزوری و فتوژنیک و اپتوالکترونیک بسیار مورد توجه هستند (۱۴). نقره گسترده‌ترین نانوذره فلزی (MNPs^۶) تجاری است که در جواهرسازی، دندان پزشکی، عکاسی، پزشکی، لوازم آرایش، نساجی، بسته‌بندی مواد غذایی، کاتالیزورها و غیره کاربرد دارد (۹). نقره فعال‌ترین فلز بی‌اثر است که سه گونه کاتیونی Ag^+ ، Ag^{2+} ، Ag^{3+} تشکیل می‌دهد که در میان آن‌ها فقط شکل یک ظرفیتی نقره از نظر

امروزه گسترده‌گی و تنوع کاربرد فناوری نانو به حدی است که صنعت، کشاورزی، محیط‌زیست، بهداشت و درمان، علوم دارویی، اقتصاد، تغذیه و سایر جنبه‌های زندگی بشر تحت تاثیر آن قرار گرفته است. با وجود روند روبه رشد محصولات تجاری دارای نانو ذرات در حال حاضر تنها از چند ماده در حجم و تعداد بالا در محصولات تجاری استفاده می‌شود که شامل نقره، دی‌اکسید تیتانیوم، اکسید روی، سیلیس، نانو مواد با پایه کربن (نانولوله‌های کربنی تک دیواره^۴)،

[DOI: 10.22067/JSW.2021.67908.1004](https://doi.org/10.22067/JSW.2021.67908.1004)

4- single-walled nanotubes

5- multi walled carbon nanotubes

6- Metal Nanoparticles

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی،

دانشگاه فردوسی مشهد

(Email: lakzian@um.ac.ir)

*- نویسنده مسئول:

۳- استادیار، گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

بر ویژگی‌های بیولوژیکی خاک خواهد داشت (۳۸). از جمله موارد استفاده از نمودارهای رادار در مطالعه خاک می‌توان به بررسی تاثیر سرب بر شاخص فعالیت آنزیمی کل خاک اشاره کرد (۳۳).

شاخص‌های زیستی علاوه بر اینکه تحت تاثیر تغییرات و در هم آمیختگی خاک مانند آلاینده‌ها به سرعت واکنش می‌دهند اندازه‌گیری آن‌ها نیز نسبت به سایر شاخص‌های شیمیایی و فیزیکی هزینه کمتری دارد (۳۱). آنزیم‌های برون سلولی نقش مهمی در چرخه‌های بیوشیمیایی خاک دارند. اوره از به دلیل سهم ویژه خود در چرخه نیتروژن در خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این آنزیم توسط گیاهان، جانوران و ریزجانداران در خاک تولید می‌شود اما تحقیقات نشان داده است ریزجانداران منبع اصلی تولید این آنزیم در خاک می‌باشند (۳۷). آنزیم اوره‌آز به دلیل مشارکت در بزرگ‌ترین چرخه غذایی بیولوژیکی خاک (چرخه نیتروژن) و آنزیم دهیدروژناز به دلیل مشارکت در چرخه کربن در این پژوهش استفاده شدند. علاوه بر این فعالیت دهیدروژناز در ارتباط نزدیک با تنفس میکروبی و کربن زیست‌توده است و به طور غیرمستقیم نشان دهنده فعالیت و توانایی زنده ماندن جمعیت میکروبی خاک تحت تنش است (۳۳). همچنین فعالیت آنزیم دهیدروژناز نشان دهنده اکسیداسیون ترکیبات آلی است و کاهش فعالیت آن می‌تواند تجزیه مواد آلی را تحت تاثیر قرار دهد (۴۵). فعالیت دهیدروژناز به عنوان یک شاخص از سیستم‌های ردکس زیستی است و می‌تواند به عنوان معیاری از شدت متابولیسم میکروبی در خاک استفاده شود (۵۱). باکتری‌های هتروتروف به علت گسترش و فراگیری در اکثر محیط‌های خاکی و عدم وجود شرایط اختصاصی برای رشد آن‌ها در خاک برای سنجش تاثیر نقره انتخاب شدند. همچنین تنفس میکروبی نشان دهنده کارکرد بخش زنده و فعال جامعه میکروبی خاک است بنابراین شاخص مناسبی برای بررسی اثرات آلاینده‌ها در خاک می‌باشد (۳۴). علاوه بر این تنفس برانگیخته خاک در ارتباط نزدیک با زیست‌توده میکروبی خاک می‌باشد و تغییر در آن نشان دهنده تغییرات زیست توده میکروبی است.

با افزایش روبه رشد استفاده از نانو ذرات در صنعت و زندگی روزمره بشر با توجه به عدم اطمینان کامل از بی‌خطر بودن این مواد برای اکوسیستم‌های خاکی به نظر می‌رسد جامعه میکروبی خاک می‌تواند تحت تاثیر این آلاینده‌های نوظهور قرار بگیرد و ارائه خدمات ضروری اکوسیستم را تحت شعاع قرار دهد. از آنجایی که ریزجانداران خاک مسؤل و موتور محرکه بیشتر فعالیت‌هایی هستند که در خاک صورت می‌گیرد، مطالعه تاثیر فلز سنگین نقره چه به صورت ترکیبات عادی (یونی) و چه به صورت نانو ذرات بر ریزجانداران خاک به‌ویژه با توجه به خاصیت ضد میکروبی نقره امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد.

تاکنون مطالعات اندکی در مورد تاثیر نانو ذرات نقره بر

زیست‌محیطی اهمیت دارد (۸). نترات نقره ($AgNO_3$) ترکیب واسط شیمیایی است که همه ترکیبات دیگر Ag از آن تشکیل می‌گردند و مهم‌ترین ترکیب صنعتی این عنصر محسوب می‌شود. بخش بزرگی از این مواد در نتیجه دفع نامناسب فاضلاب و زباله‌های شهری و پزشکی در نهایت وارد خاک می‌شوند. علاوه بر این استفاده از لجن فاضلاب، کودهای آلی و آفت‌کش‌ها از مهم‌ترین راه‌های ورود AgNPs به زمین‌های کشاورزی می‌باشند (۳).

مطالعات نشان می‌دهند که نقره به هر دو شکل نانو و یونی پس از ورود به بدن مهره‌داران به بافت‌های کبد، شش‌ها و غدد حس بویایی و DNA آسیب می‌رساند و سبب تنش اکسیداتیو در سلول می‌شود (۱، ۵ و ۶). از پیامدهای تماس کرم‌های خاکی و نماتدها با نقره می‌توان به کاهش تولیدمثل، کوچک شدن جثه و تجمع نقره در بافت‌های بدن اشاره کرد (۴۴ و ۴). همچنین نقره به هر دو شکل یونی و نانو باعث اختلال در فتوسنتز و عملکرد عمومی سلول‌ها و ایجاد تنش اکسیداتیو در گیاه می‌شود (۵۷). مهم‌ترین کاربرد نانو ذرات نقره، فعالیت ضد باکتریایی آن‌هاست اما سمیت آن‌ها بر روی قارچ‌ها و ویروس‌ها نیز مشاهده شده است (۱۹). فرضیه‌های متعددی درباره سمیت AgNPs برای ریزجانداران وجود دارد. بیشترین دلیل سمیت این نانو ذرات مربوط به انتشار یون نقره از AgNPs است (۵۶، ۲۵). علاوه بر این تعامل فیزیکی AgNPs با ریزجانداران و تولید گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن می‌تواند یکی از این دلایل باشد (۴۸، ۲۷، ۲۶). تغییر در نفوذپذیری غشا و پتانسیل ردکس در سیتوزول، اختلال در سنتز ATP، افزایش تنش ناشی از تجمع رادیکال‌های آزاد، اختلال در سنتز پروتئین و DNA از دیگر پیامدهای سمیت نقره در سلول باکتری‌ها است (۲۶، ۲۸، ۲۹ و ۴۲). تحقیقات نشان داده است که نقره به هر دو شکل یونی (Ag^+) و نانو برای ریزجانداران خاک سمی است (۲۲، ۴۶، ۵۳ و ۵۴). در بین فلزات، نقره سمی‌ترین فلز برای جمعیت میکروبی خاک است (۱۶). همچنین ماندگاری بالا در خاک و احتمال تجمع زیستی در زنجیره غذایی، نقره را به یک خطر زیست‌محیطی تبدیل کرده است (۴۳).

جامعه میکروبی خاک به هرگونه اختلال و عوامل تنش‌زا بسیار حساس است و به سرعت پاسخ می‌دهند. عوامل تنش‌زا می‌توانند سبب تغییر در فعالیت، زیست‌توده و ساختار جامعه میکروبی شوند (۳۱). علاوه بر این فعالیت آنزیمی خاک که بخش اعظمی از آن به عهده ریز جانداران است به دلیل شرکت در چرخه‌های عناصر غذایی معیار مناسبی برای سنجش تاثیر آلاینده‌ها بر فعالیت متابولیسی خاک است. استفاده از شاخص‌های زیستی خاک مانند فعالیت آنزیمی، تنفس میکروبی، تغییرات کمی جمعیت میکروبی و نحوه ارتباط آن‌ها با هم از طریق بررسی شاخص زیستی کیفیت خاک به وسیله نمودارهای رادار کمک شایان توجهی در فهم تاثیرات نقره به هر دو شکل یونی و نانو

فاکتوریل با فاکتورهای؛ ۱ - نوع نقره (یونی و نانو) ۲- غلظت نقره (در ۶ سطح ۰، ۰/۵، ۵، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ میلی گرم نقره بر کیلوگرم خاک خشک) و ۳ - زمان (۷ و ۴۲ روز) انجام شد. سپس نمونه‌های خاک به صورت حذفی در زمان ۷ و ۴۲ روز جهت تعیین تنفس میکروبی برانگیخته، جمعیت باکتری‌های هتروتروف، فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز و دهیدروژناز؛ و زمان ۴۲ روز جهت کمی‌سازی جمعیت باکتریایی خاک مورد آنالیز قرار گرفتند.

در این پژوهش برای اندازه‌گیری تنفس برانگیخته میکروبی از روش اندرسون و دامش (۲)، شمارش باکتری‌های هتروتروف از روش سامارجیو و همکاران (۴۵)، فعالیت آنزیم اوره‌آز از روش طباطبایی و برمنر (۵۰)، فعالیت آنزیم دهیدروژناز از روش اصلاح شده تالمان (۵۲)، شاخص زیستی کیفیت خاک از روش حسینی و همکاران (۲۳) و استخراج DNA از نمونه‌های خاک از روش بهینه شده ژو و همکاران (۶۰) استفاده شد. همچنین جهت آنالیز کمی روش Real time qPCR نسبی مطابق با استاندارد MIQE (۷) عمل شد. جهت تکثیر قطعات ژن 16S rDNA باکتری‌های خاک از جفت آغازگر همگانی باکتریایی (PLK1/PLK2) که قسمتی از منطقه متغیر V3 توالی‌های ژن 16S rDNA باکتریایی را تکثیر می‌کند (۵۹)، استفاده شد (جدول ۱).

آنالیز آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری JMP 8 و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد.

به منظور محاسبه شاخص کیفیت زیستی خاک مطابق با دستورالعمل زیر استفاده شد. با توجه به اینکه پارامترهای زیستی به کار رفته در این پژوهش دارای واحدهای مختلفی می‌باشند ابتدا همه پارامترها بی بعد شدند. برای این منظور بیشترین مقدار هر پارامتر، یک در نظر گرفته شد و مقادیر بقیه پارامتر به بیشترین عدد تقسیم شدند. سپس نمرات مربوط به هر پارامتر در غلظت‌های مختلف هر دو تیمار به صورت نمودار رادار نمایش داده شد. پس از رسم نمودار از مساحت چند ضلعی ایجاد شده توسط شاخص‌های زیستی در نمودار رادار برای مقایسه گرافیکی و آماری تیمارها به وسیله نرم‌افزار Nitro Pro استفاده شد.

ویژگی‌های بیولوژیکی خاک‌های آهکی صورت گرفته است و در پژوهش‌های صورت گرفته نیز تغییرات جمعیت میکروبی خاک توسط روش‌های مولکولی مورد بررسی قرار نگرفته‌است. فرضیات پژوهش حاضر عبارت است از: ۱- نانو ذرات نقره نسبت به نیترات نقره اثر بازدارنده بیشتری بر فعالیت میکروبی خاک دارد و ۲- نقره (یونی، نانو) می‌تواند ترکیب نسبی جمعیت باکتریایی خاک را نسبت به تیمار شاهد تغییر دهد؛ بنابراین این پژوهش با هدف مقایسه تأثیر شکل یونی و نانو نقره بر شاخص‌های بیولوژیکی خاک (تنفس برانگیخته میکروبی، شمارش باکتری‌های هتروتروف، فعالیت آنزیم اوره‌آز و دهیدروژناز و شاخص زیستی کیفیت خاک) و بررسی تغییرات کمی جمعیت باکتریایی خاک انجام شد.

مواد و روش‌ها

خاک مورد مطالعه از عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متری محلی واقع در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد با رده‌بندی *Typic Haplocambids* تهیه و پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری به آزمایشگاه منتقل شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک مورد مطالعه با استفاده از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد (جدول ۲). AgNPs از شرکت مهرگان شیمی تهیه شد و از لحاظ شکل ظاهری ذرات توسط میکروسکوپ الکترونی (TEM) و متوسط اندازه ذرات مورد بررسی قرار گرفت.

جهت آماده‌سازی تیمارها ابتدا نمونه‌های ۱۰۰ گرمی خاک با غلظت‌های مختلف نانو ذرات نقره (AgNPs) (۰، ۰/۵، ۵، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم نقره در کیلوگرم خاک خشک) و نیترات نقره (AgNO₃) (۰، ۰/۵، ۵، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم نقره در کیلوگرم خاک خشک) تیمار شدند. برای هر کدام از غلظت‌ها مقدار تیمار مورد نظر برای ۶۰۰ گرم خاک وزن شد و پس از هم زدن و یکنواخت شدن به قسمت‌های ۱۰۰ گرمی تقسیم شدند. در نهایت هر تیمار با ۳ تکرار ۱۰۰ گرمی به صورت مجزا برای دو زمان ۷ و ۴۲ روز آماده شدند و سپس نمونه‌های خاک در ظروف پلی‌اتیلنی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت معادل ۶۰ درصد ظرفیت نگهداشت رطوبتی خاک در تاریکی گرم‌گذاری شدند. این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش

جدول ۱- آغازگرهای مورد استفاده برای تکثیر منطقه متغیر V3 توالی‌های ژن 16S rDNA باکتریایی

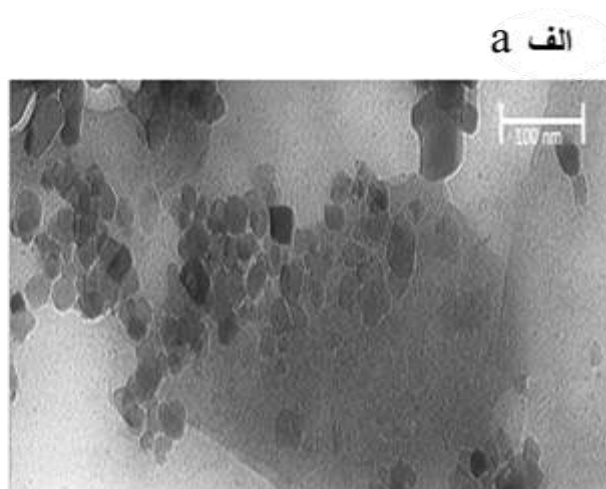
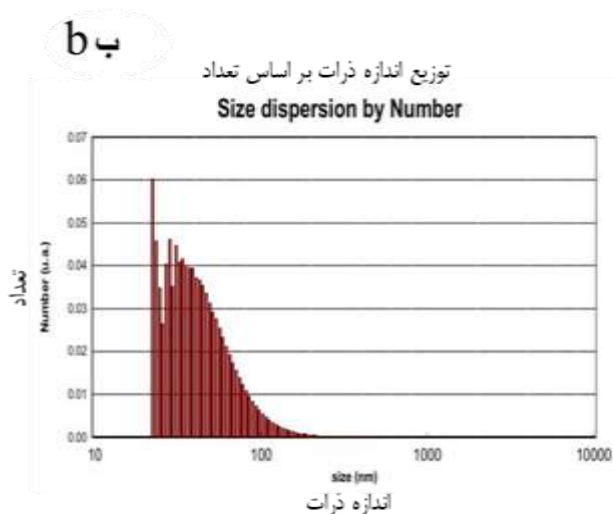
Table 1- Primers used to amplify the V3 variable region of bacterial 16S rDNA gene sequences

توالی (Sequence)	نام آغازگر (primer)
5' TACGGGAGGCAGCAGT 3'	PLK1
5' TATTACCGCGTCTGCT 3'	PLK2

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک مورد مطالعه

Table 2- Some physical, chemical and biological properties of the studied soil

جمعیت باکتری‌های هتروتروف Heterotrophic bacterial population (CFU (log ₁₀) g ⁻¹ soil)	تنفس برانگیخته میکروبی Substrate-induced respiration (mg CO g ⁻¹ soil h ⁻¹)	آهک Calcium carbonate (%)	هدایت الکتریکی Electrical conductivity (dS m ⁻¹)	pH	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)
6.013	0.0045	14.5	2.01	7.71	33.12	38.16	28.72
فعالیت آنزیم اوره‌آز Urease activity (μg NH ₄ -N g ⁻¹ soil h ⁻¹)	فعالیت آنزیم دهیدروژناز Dehydrogenase activity (μg TPF g ⁻¹ soil 16 h ⁻¹)	FC (g.g ⁻¹)	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity (Cmol ⁺ kg ⁻¹ soil)	کربن آلی Organic carbon (%)	پتاسیم قابل دسترس Available potassium (mg kg ⁻¹)	فسفر قابل دسترس Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	نیتروژن کل Total nitrogen (mg kg ⁻¹)
73	0.1843	27.19	8.69	0.273	206	18.29	1085



شکل ۱- الف. تصویر میکروسکوپ الکترونی (TEM) AgNPs (TEM) ب. توزیع اندازه ذرات AgNPs
Figure 1- a. Electron Microscope (TEM) Image of AgNPs b. Particle size distribution of AgNPs

نتایج و بحث

نتایج حاصل از مطالعه تاثیر AgNPs و AgNO₃ بر جمعیت باکتری‌های هتروتروف در شکل ۲ نشان داده شده است. در تیمارهای نانو به جز غلظت ۵ میلی گرم در کیلوگرم، با گذشت زمان جمعیت باکتری‌های هتروتروف افزایش یافت. در تیمارهای غیر نانو نیز به جز دو غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، با گذشت زمان جمعیت افزایش یافت. البته باید گفت که اختلاف بین دو زمان ۷ و ۴۲ روز (به جز سطح ۵۰ و ۱۰۰ تیمار نانو) از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (شکل ۲). نتایج به طور کلی نشان دهنده سازگاری جمعیت میکروبی هتروتروف خاک در طی زمان نسبت به ترکیبات وارد شده است؛ که دلایل این امر احتمالاً کاهش خاصیت آنتی‌باکتریایی این ترکیبات، مقاوم شدن ریزجانداران خاک در طی زمان و یا ظهور گونه‌های مقاوم می‌باشد. سامارجیو و همکاران (۴۵) اثر غلظت‌های مختلف AgNPs را بر

برخی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک استفاده شده در این آزمایش قبل از اعمال تیمارها در جدول ۲ نشان داده شده است. بافت خاک مورد مطالعه لوم رسی، pH آن قلیایی و کربنات کلسیم معادل آن ۱۴ درصد بود. AgNPs به کار رفته در این پژوهش دارای ۳ درصد پوشش پلی وینیل پیرولیدون^۱، از منبع نیترات نقره، دارای شکل ظاهری کروی و متوسط اندازه ذرات آن بین ۳۰-۴۰ نانومتر بود (شکل ۱).

تأثیر AgNPs و AgNO₃ بر جمعیت باکتری‌های هتروتروف

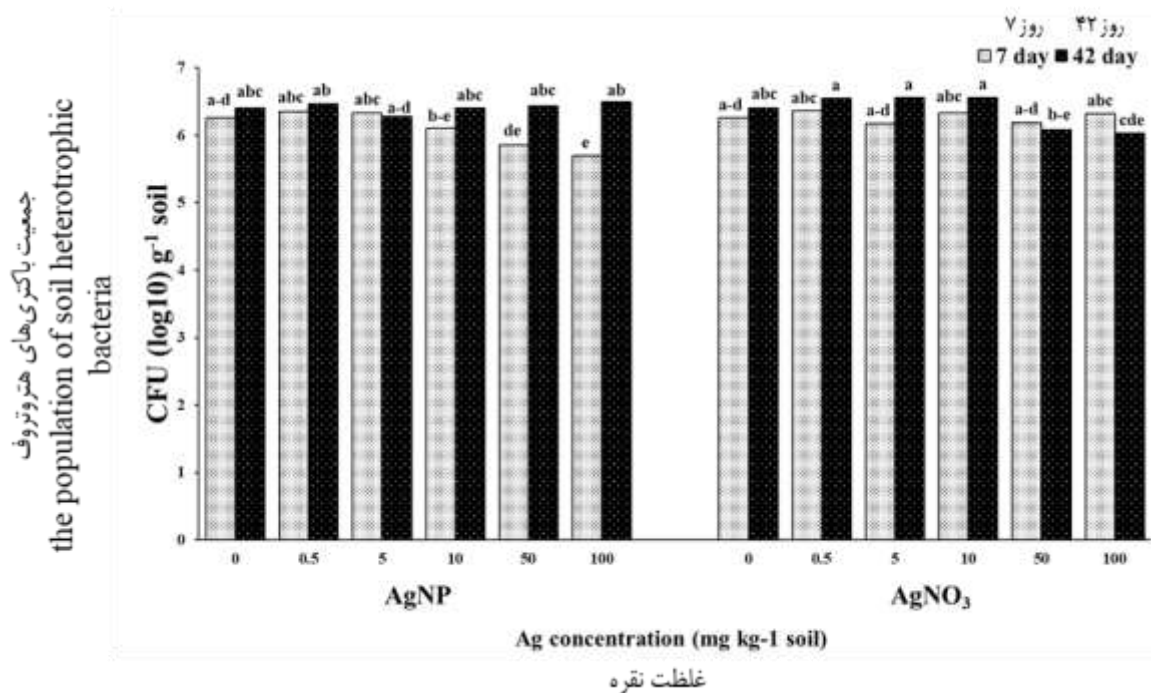
1- Polyvinylpyrrolidone

بهبود رشد میکروبی شود. به نظر می‌رسد احتمالاً همین عامل در غلظت‌های بالای نقره در تیمار یونی بخشی از اثرات سمی نقره را با افزایش رشد جمعیت میکروبی پوشش داده است و سبب کاهش اثر بازدارنده $AgNO_3$ نسبت به AgNPs شده است.

تنفس میکروبی برانگیخته

در هر دو ترکیب مورد استفاده تا غلظت ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم، با گذشت زمان تنفس میکروبی برانگیخته کاهش معنی‌داری داشت؛ که این کاهش در تیمار نانو تا غلظت ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم ادامه داشت. به تدریج و با افزایش غلظت این دو ترکیب در خاک روند عکس مشاهده شد و با گذشت زمان تنفس میکروبی افزایش معنی‌دار یافت (شکل ۳). با وجود روندهای ذکر شده نتایج نشان داد که به طور کلی بیشترین مقدار تنفس میکروبی برانگیخته در غلظت‌های کم این دو ترکیب بود. احتمال می‌رود این افزایش در میزان تنفس در غلظت‌های بالا هر دو ترکیب در روز چهارم و دوم به علت ظهور گونه‌های مقاوم به تنش و یا تغییر در ترکیب جامعه میکروبی خاک باشد (۲۱).

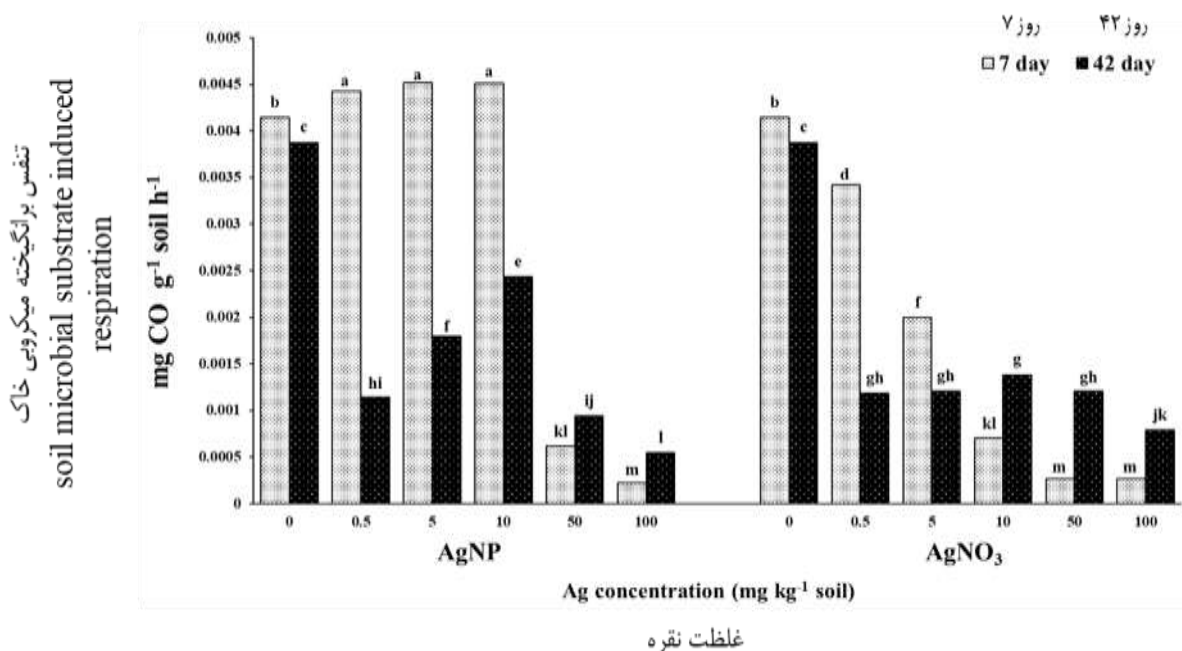
فعالیت و جمعیت میکروبی خاک مطالعه کردند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که جمعیت باکتری‌های هتروتروف خاک در غلظت‌های بیشتر از ۴۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم AgNPs در روز چهارم و نهم آنکوباسیون نسبت به شاهد افزایش داشته است که با نتایج آزمایش حاضر مطابقت داشت. آن‌ها ظهور گونه‌های مقاوم به AgNPs در خاک را دلیل افزایش جمعیت باکتری‌های هتروتروف گزارش کرده‌اند. چارلی و بورن (۱۳) با مطالعه تجمع زیستی نقره در باکتری‌ها استخراج شده از خاک و رشد آن‌ها در محیط‌های کشت خالص گزارش کردند با وجود استفاده گسترده از نقره به عنوان یک ماده ضد باکتریایی، برخی از باکتری‌های هتروتروف خاک حتی به سطوح بالای نقره تحمل نشان می‌دهند. این طور به نظر می‌رسد که با از بین رفتن گونه‌های حساس به تنش، علاوه بر فراهم شدن منابع غذایی جدید، رقابت برای کسب منابع غذایی و محل زندگی در بین ریزجانداران باقی مانده کاهش می‌یابد و در نتیجه احتمالاً شاهد افزایش جمعیت گونه‌های مقاوم به تنش خواهیم بود (۲۰). علاوه بر این برخی از باکتری‌ها در معرض AgNPs با گذشت زمان پروتئین‌های خاصی مانند فلاژنین تولید می‌کنند که باعث تجمع AgNPs می‌شود و خاصیت آنتی باکتریایی این نانوذرات را کاهش می‌دهد (۳۶). علاوه بر این یون نیترات همراه با تیمار $AgNO_3$ می‌تواند تا حدودی سبب



شکل ۲- اثر متقابل زمان و غلظت‌های مختلف AgNPs و $AgNO_3$ بر جمعیت باکتری‌های هتروتروف خاک (مقادیر حاصل از میانگین ۳ تکرار هستند). میانگین‌ها با حروف غیرمشابه دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

Figure 2- Interaction of different times and concentrations of AgNPs and $AgNO_3$ on the population of soil heterotrophic bacteria

(Values obtained from the mean of 3 replicates). The means with dissimilar letters have a significant difference at the level of 5% probability.



شکل ۳- اثر متقابل زمان و غلظت‌های مختلف AgNPs و AgNO₃ بر تنفس برانگیخته میکروبی خاک

(مقادیر حاصل از میانگین ۳ تکرار هستند). میانگین‌ها با حروف غیرمشابه دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

Figure 3- Interaction of time and different concentrations of AgNPs and AgNO₃ on soil microbial substrate induced respiration

(Values obtained from the mean of 3 replicates). The means with dissimilar letters have a significant difference at the level of 5% probability.

در محلول خاک ناشی از اکسید شدن AgNPs و انحلال AgNO₃ ممکن است در طی زمان جذب سطحی ذرات خاک شوند و یا با ترکیبات آلی تشکیل لیگاند دهند و دسترسی زیستی آن‌ها کاهش یابد. همچنین با تشکیل ترکیبات نامحلول نقره از جمله سولفید شدن نقره و کاهش دسترسی زیستی، سمیت نقره برای جامعه میکروبی خاک کاهش پیدا می‌کند (۱۷).

فعالیت آنزیم اوره‌آز

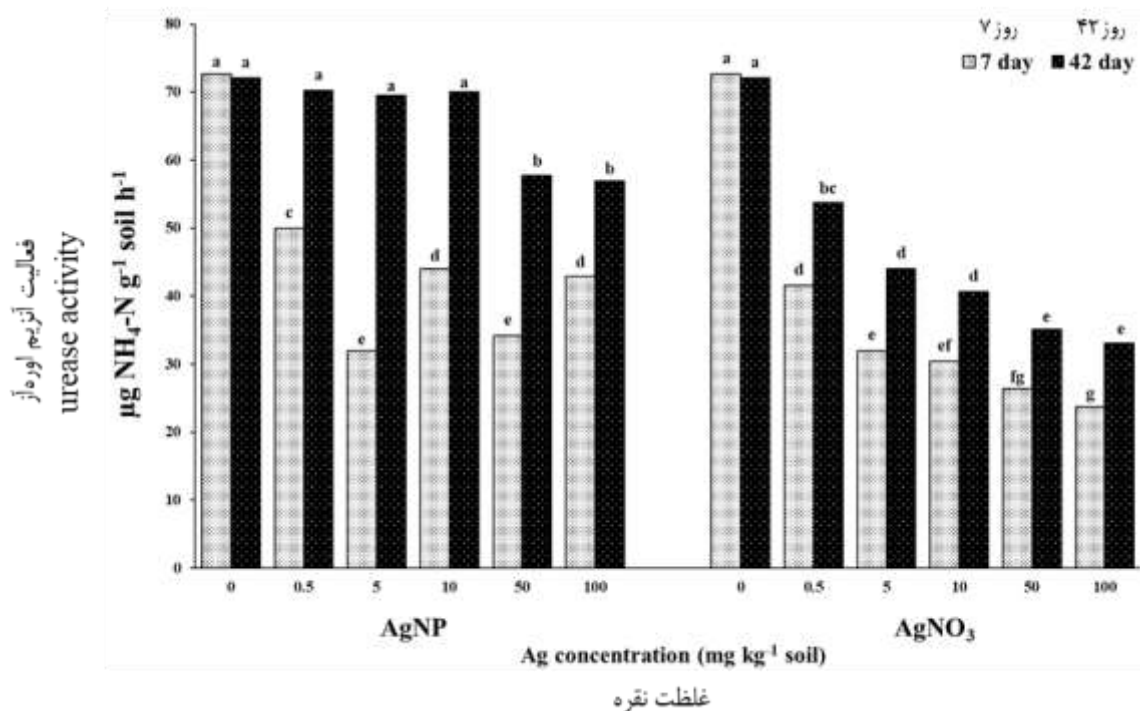
در هر دو ترکیب مورد استفاده تمام غلظت‌ها در هر دو زمان مورد بررسی (به جز غلظت‌های ۰/۵، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم AgNPs در زمان ۴۲ روز که تفاوت معنی‌دار با شاهد نداشتند) موجب کاهش معنی‌دار فعالیت آنزیم اوره‌آز نسبت به تیمار شاهد شدند (شکل ۴). درصد کاهش فعالیت آنزیم اوره‌آز در ترکیب AgNO₃ با افزایش غلظت در هر دو زمان مورد بررسی افزایش یافت. این روند کاهش در ترکیب AgNPs در روز چهل و دوم هم مشاهده شد ولی در زمان هفتم روند مشخصی نداشت. علاوه بر این مقدار فعالیت آنزیم اوره‌آز در حضور AgNPs و AgNO₃ در روز هفتم آنکوباسیون به طور معنی‌داری کمتر از روز چهل و دوم آنکوباسیون بود. این نتایج در

هنج و امرلینگ (۲۱) با مطالعه تاثیر نقره بر فعالیت جامعه میکروبی خاک گزارش کردند در یک خاک آلوده به نقره، تیمارهایی که دارای مقادیر کمتر از دوزهای کشنده هستند با کاهش کارایی استفاده از بستره در ریزجانداران، تنفس برانگیخته میکروبی را کاهش می‌دهند. همچنین زمانی که ریزجانداران در معرض تماس با یک آلاینده مانند نقره قرار می‌گیرند جهت حفظ بقای خود، در ابتدا بیشتر انرژی خود را صرف تنفس می‌کنند تا اثر بازدارنده آن را کاهش دهند در این حالت اگرچه ریزجاندار از لحاظ فیزیکی فعال است اما تکثیر پیدا نمی‌کند (۲۴). در غلظت‌های کم AgNPs در روز هفتم این روش دفاعی به خوبی مشاهده می‌شود. علاوه بر این مطالعات نشان می‌دهد که AgNPs در مقایسه با AgNO₃ تحرک کمی در خاک دارد و با توجه به اینکه در تماس با کدام بخش خاک (مواد آلی، رس، ریزجانداران) باشد تاثیر متفاوتی خواهد داشت (۴۱). اینطور به نظر می‌رسد که به دلیل دسترسی زیستی بیشتر یون نقره در تیمار AgNO₃ نسبت به AgNPs در تمامی غلظت‌ها اثر کاهنده بیشتری بر تنفس برانگیخته میکروبی داشته است نانوذرات با گذشت زمان از شکل نانو به توده^۱ تغییر ماهیت می‌دهند و خصوصیات مربوط به شکل نانو در آن‌ها کاهش پیدا می‌کند. علاوه بر این یون‌های نقره آزاد

1- bulk

و همکاران (۴۰) علی‌رغم تشابه زیاد خاک مورد مطالعه آن‌ها با خاک مورد استفاده در این آزمایش با نتایج تحقیق پیش رو مطابقت نداشت. در مطالعه این محققین ترکیب AgNPs اثر بازدارنده بیشتری بر فعالیت آنزیم اوره‌آز نسبت به $AgNO_3$ داشت که می‌توان دلیل آن را تفاوت در اندازه نانو ذرات به کار رفته در پژوهش پیش رو دانست. هرچه AgNPs به کار رفته کوچک‌تر باشد آسیب‌های زیست‌محیطی آن بیشتر خواهد بود. همچنین تفاوت در درصد ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی و نحوه آلوده کردن خاک با AgNPs نیز می‌تواند در اختلاف نتایج تأثیرگذار باشد. در نتیجه بنا بر مطالب گفته شده و با توجه به این که اوره‌آز یک آنزیم برون سلولی است و تحت تأثیر جمعیت میکروبی زنده نیست و توسط طیف گسترده‌ای از ریزجانداران تولید می‌شود، به دلیل کاهش دسترسی زیستی نقره در طی زمان به وسیله جذب سطحی ذرات خاک و مواد آلی و تشکیل ترکیبات نامحلول کاهش اثر بازدارندگی نقره و افزایش فعالیت اوره‌آز در هر دو تیمار در زمان ۴۲ روز در هر دو تیمار توجیه‌پذیر است. بنابراین از دلایل افزایش بازدارندگی فعالیت اوره‌آز با افزایش غلظت در هر دو ترکیب می‌توان به افزایش دسترسی زیستی نقره به دلیل افزایش فراوانی آن‌ها اشاره کرد.

راستای با نتایج پژوهش شین و همکاران (۴۷) است. آن‌ها گزارش کردند که بیشترین بازدارندگی فعالیت آنزیم اوره‌آز تحت تأثیر نقره در یک بازه زمانی ۷ روزه رخ می‌دهد. AgNPs علاوه بر انتشار Ag^+ به دلیل ماهیت ویژه خود نیز اثر بازدارنده بر فعالیت آنزیمی خاک دارند (۳۹ و ۴۷). اینطور به نظر می‌رسد که استفاده از شکل جامد و عدم پراکندگی یکنواخت AgNPs و تحرک پایین آن در خاک و زمان بر بودن اکسید شدن و انتشار یون نقره از آن نسبت به یون نقره موجود در تیمار $AgNO_3$ سبب کاهش دسترسی زیستی تیمار AgNPs و در نتیجه سبب کاهش اثر بازدارنده آن بر فعالیت آنزیم اوره‌آز نسبت به تیمار $AgNO_3$ شده است. بررسی تأثیر ۲۰ عنصر کمیاب بر فعالیت آنزیم اوره‌آز حاکی از آن است که فعالیت اوره‌آز به طیف وسیعی از کاتیون‌های فلزی واکنش نشان می‌دهد که در میان آن‌ها Ag^+ بیشترین تأثیر بازدارندگی را بر فعالیت اوره‌آز دارد (۵۰). نقره با اتصال به گروه‌های تیول (مانند -SH) به عنوان یک بازدارنده غیررقابتی عمل می‌کند و فعالیت آنزیم اوره‌آز را کاهش می‌دهد (۳۰ و ۱۰). رحمت پور و همکاران (۴۰) با بررسی غلظت‌های مختلف AgNPs و $AgNO_3$ بر فعالیت آنزیم اوره‌آز گزارش کردند که با افزایش غلظت در هر دو ترکیب فعالیت آنزیم اوره‌آز کاهش پیدا کرد. نتایج رحمت پور



شکل ۴- اثر متقابل زمان و غلظت‌های مختلف AgNPs و $AgNO_3$ بر فعالیت آنزیم اوره‌آز

(مقادیر حاصل از میانگین ۳ تکرار هستند). میانگین‌ها با حروف غیرمشابه دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

Figure 4- Interaction of time and different concentrations of AgNPs and $AgNO_3$ on urease activity (Values obtained from mean 3 replicates). The means with dissimilar letters have a significant difference at the level of 5% probability.

فعالیت آنزیم دهیدروژناز

گزارش کردند که AgNPs و یون Ag^+ حاصل از آن با پیوند قوی‌ای به پروتئین‌ها متصل می‌شوند که بیش از ۶۰ درصد این پروتئین‌ها آنزیم بودند. AgNPs و یون Ag^+ پس از پیوند با آنزیم با اشغال و یا تغییر جایگاه فعال سبب کاهش قابل ملاحظه فعالیت آنزیمی می‌شود. هرگونه آشفتگی و اختلال در وضعیت طبیعی اکسیداسیون-احیا (رداکس)، از طریق تولید پراکسید و رادیکال‌های آزاد، منجر به تولید اثرات سمی و آسیب به تمامی اجزاء و ساختارهای درون سلولی، از جمله پروتئین‌ها، لیپید و DNA می‌گردد (۱۳). یکی از دلایل اصلی افزایش بازدارندگی فعالیت آنزیم دهیدروژناز با افزایش غلظت نقره در هر دو ترکیب این است که با افزایش میزان نقره سمیت آن برای ریزجانداران خاک که مسئول اصلی تولید آنزیم دهیدروژناز هستند افزایش می‌یابد و در نهایت با کاهش جمعیت میکروبی فعالیت آنزیم دهیدروژناز کاهش می‌یابد.

اثر نانو ذرات و نیترات نقره بر شاخص بیولوژیکی کیفیت خاک (SBQI)

نتایج غلظت‌های مختلف AgNPs و $AgNO_3$ بر شاخص بیولوژیکی کیفیت خاک در روز هفتم و چهل و دوم انکوباسیون در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است. تمام غلظت‌های هر دو ترکیب در هر دو زمان مورد بررسی (به جز تیمارهای ۰/۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم AgNPs در روز هفتم انکوباسیون) موجب کاهش شاخص SBQI نسبت به تیمار شاهد شدند. تیمار $AgNO_3$ نسبت به AgNPs در هر دو زمان انکوباسیون و در تمامی غلظت‌ها اثر بازدارنده بیشتری بر شاخص SBQI داشت. با گذشت زمان در روز چهل و دوم انکوباسیون در غلظت‌های کم (۰/۵، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) هر دو ترکیب، شاخص SBQI نسبت به روز هفتم کاهش پیدا کرد اما در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نقره در هر دو ترکیب نسبت به روز هفتم افزایش پیدا کرد که ممکن است به دلیل ظهور گونه‌های مقاوم به تنش در این بازه زمانی در غلظت‌های بالای نقره باشد. همچنین نتایج نشان داد که $AgNO_3$ برخلاف AgNPs حتی در غلظت‌های کم اثر بازدارنده بر فعالیت‌های میکروبی خاک دارد که احتمالاً به دلیل دسترسی زیستی بیشتر یون نقره در این ترکیب می‌باشد.

استفاده از منحنی‌های رادار برای نشان دادن تاثیر شرایط مدیریتی و محیطی متفاوت بر کیفیت خاک امروزه در حال افزایش است (۳۸). در این پژوهش ویژگی‌های بیولوژیکی با هم ترکیب شده و به صورت نمودار رادار نمایش داده شدند و از مساحت تشکیل شده بین ویژگی‌های بیولوژیکی در نمودار به عنوان شاخص SBQI استفاده

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در هر دو ترکیب مورد استفاده در هر دو زمان تمام غلظت‌ها (به جز غلظت‌های ۰/۵ و ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم AgNPs در روز هفتم) موجب کاهش معنی‌دار فعالیت آنزیم دهیدروژناز نسبت به تیمار شاهد شدند. غلظت‌های ۰/۵، ۵، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم $AgNO_3$ در روز هفتم انکوباسیون به ترتیب موجب کاهش ۹، ۷۵، ۸۵، ۹۸ و ۹۹ درصدی و در روز چهل و دوم انکوباسیون موجب کاهش ۸۶، ۹۳، ۹۷، ۹۹ و ۹۷ درصدی فعالیت آنزیم دهیدروژناز نسبت به تیمار شاهد شدند که نشان دهنده کاهش بیشتر فعالیت دهیدروژناز با افزایش غلظت $AgNO_3$ است. مشابه با فعالیت آنزیم اوره‌آز، اثر بازدارندگی ترکیب $AgNO_3$ بر فعالیت آنزیم دهیدروژناز بیشتر از تیمارهای AgNPs بود. برخلاف اوره‌آز، فعالیت دهیدروژناز به غلظت کم نقره به ویژه در تیمار AgNPs در کوتاه‌مدت حساسیت کمی داشت. افزایش اولیه فعالیت دهیدروژناز در غلظت‌های کمتر از ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم AgNPs در روز هفتم انکوباسیون در مطالعات شین و همکاران (۴۷) نیز مشاهده شده است. سامارجیو و همکاران (۴۵) و شین و همکاران (۴۷) با بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف AgNPs بر فعالیت آنزیمی خاک گزارش کردند که با افزایش غلظت AgNPs و همچنین گذشت زمان فعالیت آنزیم دهیدروژناز کاهش می‌یابد که این نتایج هم‌راستا با نتایج پژوهش پیش رو بود. موراتا و همکاران (۳۲) تاثیر ۳ فلز سنگین (Ag, Cu, Pb) را بر فعالیت آنزیم دهیدروژناز مطالعه کردند. نتایج این محققان نشان داد که نقره به شکل $AgNO_3$ بیشترین بازدارندگی را بر فعالیت آنزیم دهیدروژناز در بین این فلزات دارد. همچنین مطالعات آن‌ها نشان داد که در مطالعه سمیت فلزات در خاک باید به حلالیت و اثر متقابل آن‌ها با مواد آلی و زیست‌فراهمی آن‌ها نیز توجه کرد که در این پژوهش یون نقره احتمالاً به علت حلالیت و زیست‌فراهمی بیشتر در تیمار $AgNO_3$ نسبت به AgNPs اثر بازدارندگی بیشتری بر فعالیت آنزیم دهیدروژناز داشته است. آنزیم دهیدروژناز به علت حساسیت بالا شاخص مناسبی برای ارزیابی آلودگی فلزات در خاک است (۳۵). در پژوهش حاضر این موضوع با کاهش ۹۹ درصدی فعالیت دهیدروژناز در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم $AgNO_3$ نسبت به شاهد در روز هفتم انکوباسیون به خوبی نشان داده شده است. یون نقره با بلاک کردن گروه‌های تیول آنزیم (مانند NADH دهیدروژناز II) در چرخه تنفس باعث تولید گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن و تنش اکسیداتیو در داخل سلول می‌شود. ویگینتون و همکاران (۵۵) با مطالعه تاثیر پیوند AgNPs با پروتئین‌های باکتریایی و پیامد آن بر فعالیت آنزیمی

نقره در هر دو ترکیب اثر کاهنده بر جمعیت نسبی باکتریایی خاک دارد (شکل ۸). غلظت‌های ۵، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم $AgNO_3$ و $AgNPs$ به ترتیب موجب کاهش (۲۲، ۴۰، ۵۹، ۷۳ و ۸۲)؛ (۱۰، ۳۰، ۶۸، ۷۶ و ۸۶) درصدی جمعیت نسبی باکتریایی خاک نسبت به تیمار شاهد شدند. این نتایج نشان می‌دهد که تیمار $AgNPs$ در غلظت‌های بالاتر از ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اثر بازدارنده بیشتری نسبت به تیمار $AgNO_3$ بر جمعیت نسبی باکتریایی خاک داشته است با این وجود در غلظت‌های مشابه تفاوت معنی‌داری ($p > 0.05$) بین دو تیمار وجود نداشت.

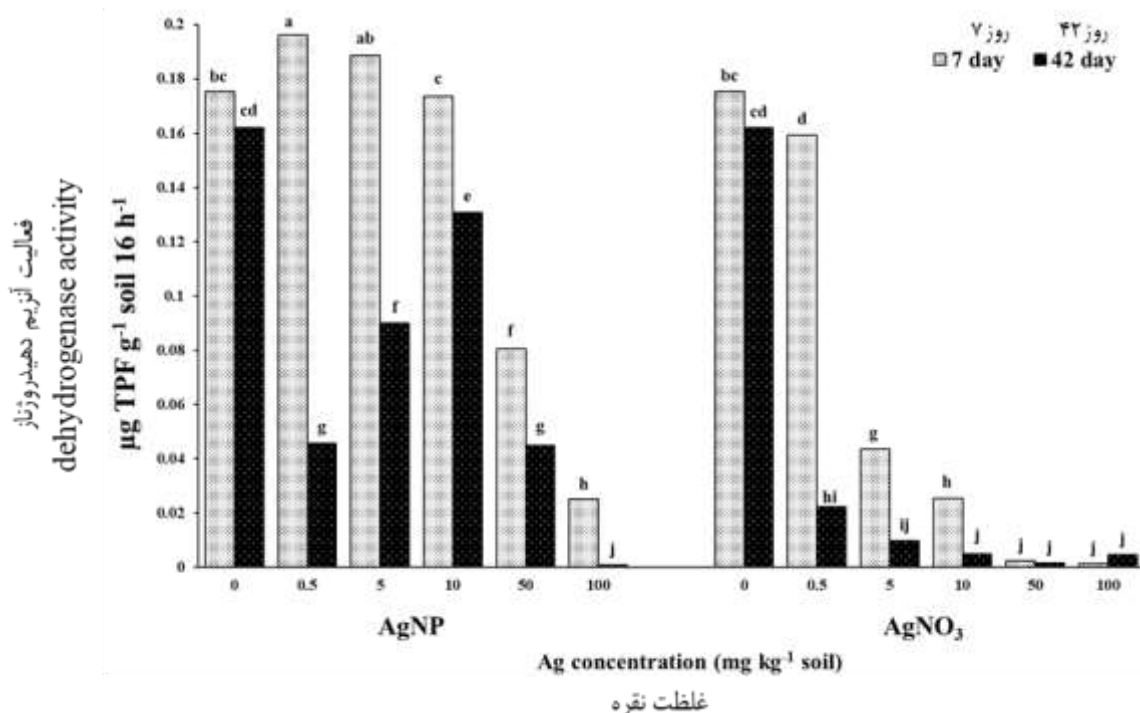
تحقیقات بسیاری اثرات منفی $AgNPs$ بر ساختار جمعیت میکروبی را در محیط‌های مختلف گزارش کرده‌اند. سامارجیو و همکاران (۴۵) با بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف $AgNPs$ بر ساختار جمعیت میکروبی خاک گزارش کردند که $AgNPs$ سبب تغییر در تنوع و کاهش جمعیت نسبی میکروبی خاک می‌شود. در آزمایش این پژوهشگران کاهش تنوع جمعیت میکروبی سودمند خاک حتی در کمترین غلظت به کار رفته (۴۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم $AgNPs$) نیز مشاهده شد.

شده. منحنی شاخص زیستی کیفیت خاک نشان داد که نقره به هر دو شکل یونی و نانو بیشترین اثر بازدارندگی را بر فعالیت آنزیم دهیدروژناز و تنفس برانگیخته میکروبی خاک داشت. از آنجایی که فعالیت دهیدروژناز در ارتباط نزدیک با تنفس میکروبی است و تنفس میکروبی نشان دهنده کارکرد بخش زنده و فعال جامعه میکروبی خاک می‌باشد (۳۳ و ۳۴) شاخص بیولوژیکی کیفیت خاک به خوبی نشان دهنده سمیت هر دو ترکیب نقره برای جامعه میکروبی خاک است. اینطور به نظر می‌رسد که در حضور غلظت‌های بالای نقره در هر دو ترکیب با حذف و یا کاهش جمعیت میکروبی حساس به تنش و کاهش رقابت بین ریزجانداران، جایگاه‌های جدیدی برای جمعیت باقی‌مانده ایجاد می‌شود که این امر جمعیت مقاوم به تنش را در طی زمان افزایش می‌دهد و جمعیت باقی‌مانده با توجه به توانایی‌های خود کارکردهای اکوسیستم را به عهده می‌گیرند.

اثر نانو ذرات و نیترات نقره بر فراوانی نسبی باکتری‌های

خاک بر اساس 16S rDNA

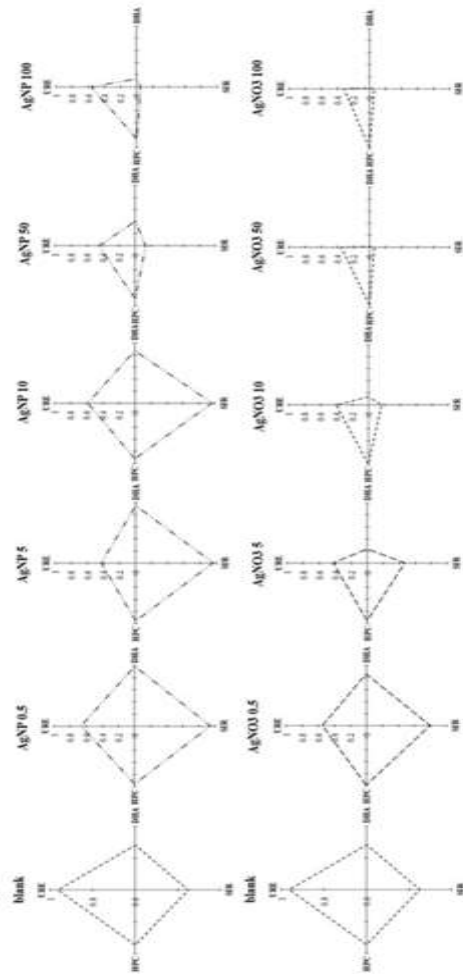
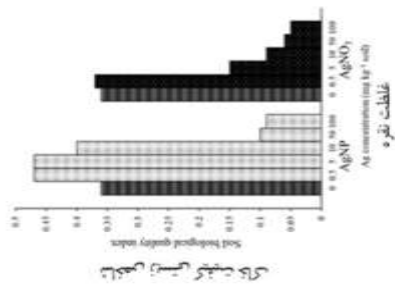
اثر غلظت‌های مختلف $AgNO_3$ و $AgNPs$ بر فراوانی نسبی باکتریایی خاک بر اساس 16S rDNA نشان داد که افزایش غلظت



شکل ۵- اثر متقابل زمان و غلظت‌های مختلف $AgNO_3$ و $AgNPs$ بر فعالیت آنزیم دهیدروژناز

(مقادیر حاصل از میانگین ۳ تکرار هستند). میانگین‌ها با حروف غیرمشابه دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

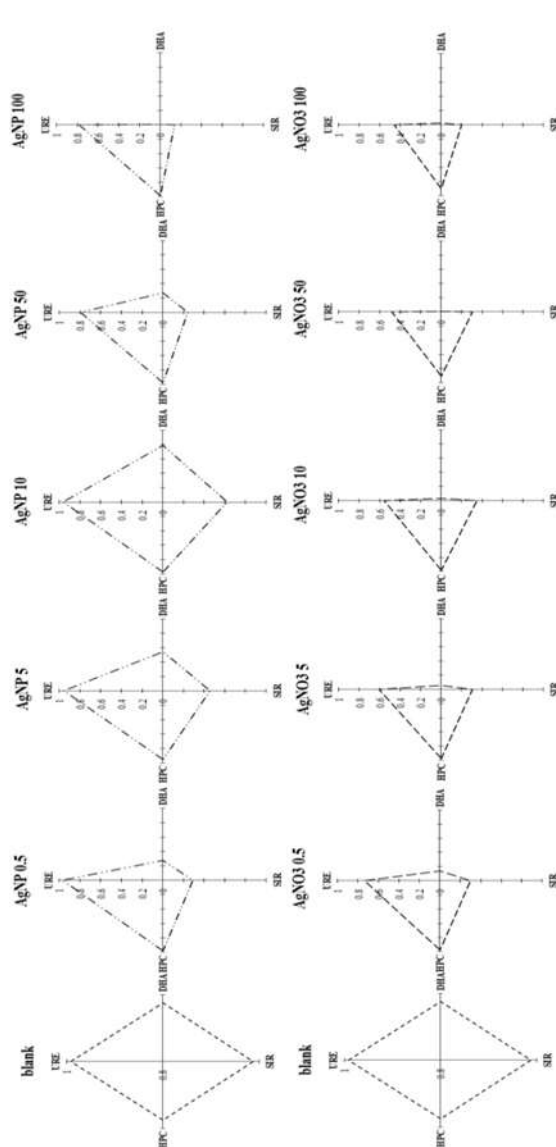
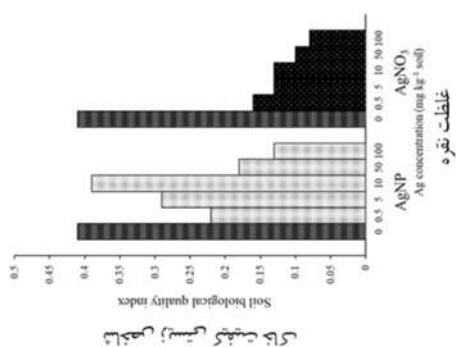
Figure 5- Interaction of time and different concentrations of $AgNPs$ and $AgNO_3$ on dehydrogenase activity (Values are the mean of 3 replicates). The means with dissimilar letters have a significant difference at the level of 5% probability.



شکل ۶ - تاثیر غلظت‌های مختلف AgNO₃ و AgNPs بر شاخص کیفیت بیولوژیکی خاک در روز هفتم انکوباسیون

شکل سمت راست نشان دهنده مساحت چندضلعی‌های تشکیل شده در غلظت‌های مختلف AgNO₃ و AgNPs می‌باشد. (DHA) فعالیت دهیدروژناز، SIR، تنفس بزرگ‌کشته میکروبی، URE فعالیت اوره‌از.

Figure 5- The effect of different concentrations of AgNPs and AgNO₃ on soil biological quality index on the seventh day of incubation. The figure on the right shows the area of the polygons formed at different concentrations of AgNPs and AgNO₃. (DHA) dehydrogenase activity, SIR microbial substrate induced respiration, URE urease activity).



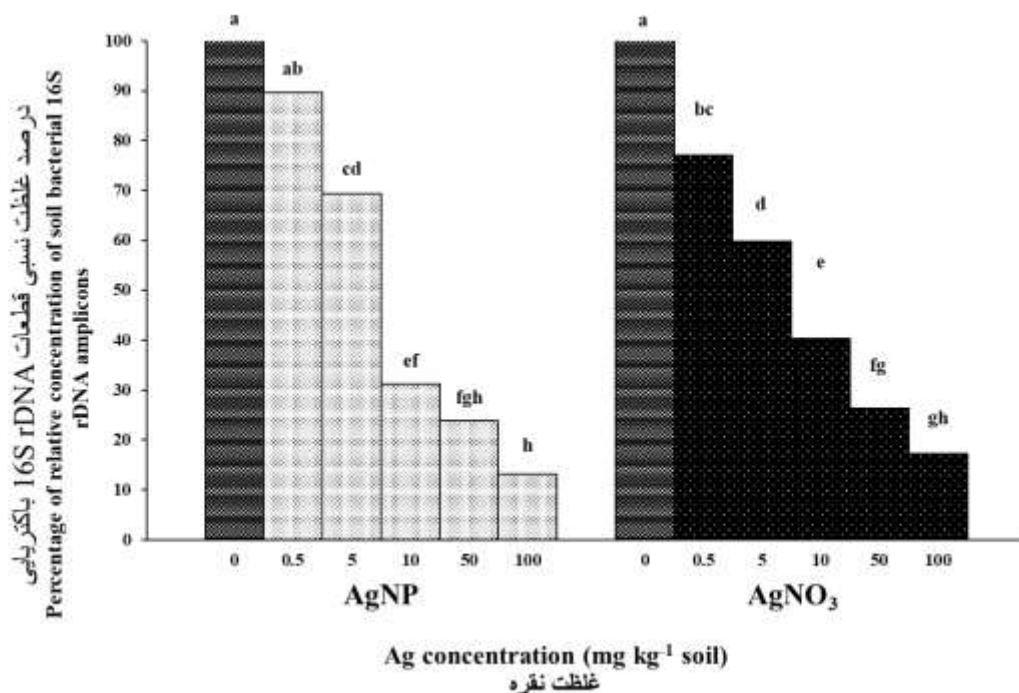
شکل ۷ - تأثیر غلظت‌های مختلف AgNPs و AgNO₃ بر شاخص کیفیت بیولوژیکی خاک در روز چهل و دوم انکوباسیون

فاصلیت اوره‌از)، فعالیت اوره‌از)، HPC باکتری‌های هتروترف، URE فعالیت اوره‌از)، SIR تنفس برانگیخته میکروبی، DBA فعالیت دهیدروژناز، AgNO₃ می‌باشد.

Figure 6- The effect of different concentrations of AgNPs and AgNO₃ on soil biological quality index on the forty-second day of incubation
The figure on the right shows the area of the polygons formed at different concentrations of AgNPs and AgNO₃. (DBA dehydrogenase activity, SIR microbial substrate induced respiration, HPC heterotrophic bacteria, URE urease activity).

وجود این که از لحاظ فیزیکی قابل اندازه‌گیری هستند اما توانایی رشد و تکثیر خود را از دست می‌دهند (۲۴). در واقع با مرور زمان به دلیل عدم قابلیت تکثیر جمعیت باکتری‌ها کاهش پیدا می‌کند و تنها گونه‌های مقاوم و سازگار باقی خواهند ماند. کارلسون (۱۱) با بررسی اثر نانو ذرات نقره بر سلول باکتریایی گزارش کرد که AgNPs نسبت به یون نقره با تولید بیشتر گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن سبب رهاسازی بیشتر رادیکال‌های آزاد در داخل سلول می‌شوند و سمیت شدیدتری برای سلول‌های باکتریایی ایجاد می‌کنند. همچنین چوی و همکاران (۱۵) با بررسی تاثیر AgNPs بر باکتری *E. coli* گزارش کردند که AgNPs علاوه بر اثرات یون نقره با چسبیدن به غشا باکتری سبب ایجاد حفراتی در آن می‌شود. تحت تاثیر این حفرات محتویات سلول به بیرون نشت می‌کند و سلول باکتری از بین می‌رود. در نتیجه حذف گونه‌های حساس با توجه به دلایل ذکر شده در روز شصت و سوم آزمایش جمعیت باکتریایی خاک به مقدار قابل توجهی کاهش یافت. این کاهش جمعیت قطعا با تغییر ترکیب جامعه میکروبی نیز همراه بوده است؛ که خود گواهی از تاثیر منفی نقره به هردو شکل یونی و نانو بر اکوسیستم خاک می‌باشد.

انها گزارش کردند که در پایان روز چهل و دوم در غلظت ۳۴۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم AgNPs تنوع جامعه میکروبی به شدت کاهش یافت و ۷۲ درصد از جمعیت باکتری‌های خاک را گونه *Rhodanobacter sp.* تشکیل داد. یانگ و همکاران (۵۸) اثر غلظت‌های مختلف AgNPs و $AgNO_3$ را بر جمعیت باکتری‌های نیتروبیفیکاتور در لجن فاضلاب با استفاده از روش qPCR مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هر دو شکل نقره سبب کاهش فراوانی جمعیت باکتری‌های نیتروبیفیکاتور در لجن فاضلاب شدند اما $AgNO_3$ نسبت به AgNPs تاثیر بازدارنده بیشتری داشت. $AgNO_3$ و Ag^+ با ایجاد تنش اکسیداتیو، اختلال در سنتز ATP، DNA و همچنین تغییر در نفوذپذیری غشا و نشت محتویات سلول به بیرون سبب تخریب سلول‌های باکتریایی می‌شوند (۲۸). مطالعات نشان داده است که سلول باکتری تحت تاثیر غلظت‌های میلی‌مولار Ag^+ دچار تغییرات مورفولوژیکی می‌شود. در نتیجه این تغییرات سیتوپلاسم کوچک می‌شود و از دیواره سلولی فاصله می‌گیرد دیواره سلولی تخریب می‌شود و محتویات سلول به بیرون نشت می‌کند. تحت تاثیر این تغییرات سلول‌های باکتریایی وارد یک مرحله فعال می‌شوند که با



شکل ۸- میانگین درصد غلظت نسبی قطعات 16S rDNA باکتریایی خاک در تیمارهای مختلف AgNPs و $AgNO_3$ (مقادیر حاصل از میانگین ۳ عدد هستند). میانگین‌ها با حروف غیرمشابه دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

Figure 7- Mean Percentage of relative concentration of soil bacterial 16S rDNA fragments in different treatments of AgNPs and $AgNO_3$

(Values obtained from the average are 3). The means with dissimilar letters have a significant difference at the level of 5% probability.

نتیجه گیری

دهیدروژناز و تنفس برانگیخته میکروبی خاک کاهش پیدا کرد درحالی که در فعالیت آنزیم اوره‌آز و جمعیت باکتری‌های هتروتروف افزایش مشاهده شد. شاخص زیستی کیفیت خاک با گذشت زمان در غلظت‌های ۱۰ و کمتر از آن کاهش و در غلظت‌های بیشتر افزایش یافت. به نظر می‌رسد با توجه به دسترسی زیستی بیشتر $AgNO_3$ به طور کلی می‌توان گفت که تبدیل نقره به شکل نانو و جامد آن موجب کاهش سمیت نقره بر فعالیت و جمعیت میکروبی خاک مورد مطالعه شد. با این وجود AgNPs به عنوان یک آلاینده نوظهور همچنان پتانسیل سمیت بالایی برای جامعه میکروبی خاک دارد و می‌تواند سبب تغییر در جمعیت نسبی و کارکرد جامعه میکروبی خاک شود.

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش غلظت نقره در هر دو شکل مورد بررسی فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز و اوره‌آز، تنفس برانگیخته میکروبی، شاخص زیستی کیفیت خاک و غلظت نسبی قطعات 16S rDNA باکتریایی خاک کاهش یافت. ترکیب $AgNO_3$ نسبت به AgNPs اثر بازدارندگی بیشتری بر فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز، اوره‌آز، تنفس میکروبی برانگیخته خاک و شاخص زیستی کیفیت خاک داشت. با این حال بین شکل یونی و نانو نقره از لحاظ درصد غلظت نسبی قطعات 16S rDNA باکتریایی خاک تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. با گذشت زمان تحت تأثیر نقره فعالیت آنزیم

منابع

- 1- Ahamed M., Posgai R., Gorey T.J., Nielsen M., Hussain S.M., and Rowe J.J. 2010. Silver nanoparticles induced heat shock protein 70, oxidative stress and apoptosis in *Drosophila melanogaster*. *Toxicology and Applied Pharmacology* 242: 263-269.
- 2- Anderson J., and Domsch K. 1978. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biology and Biochemistry* 10: 215-221.
- 3- Anjum N.A., Gill S.S., Duarte A.C., Pereira E., and Ahmad I. 2013. Silver nanoparticles in soil-plant systems. *Journal of Nanoparticle Research* 15: 1896.
- 4- Antisari L.V., Carbone S., Gatti A., Ferrando S., Nacucchi M., De Pascalis F., Gambardella C., Badalucco L., and Laudicina V.A. 2016. Effect of cobalt and silver nanoparticles and ions on *Lumbricus rubellus* health and on microbial community of earthworm faeces and soil. *Applied Soil Ecology* 108: 62-71.
- 5- Arora S., Jain J., Rajwade J., and Paknikar K. 2009. Interactions of silver nanoparticles with primary mouse fibroblasts and liver cells. *Toxicology and Applied Pharmacology* 236: 310-318.
- 6- Braydich-Stolle L., Hussain S., Schlager J.J., and Hofmann M.C. 2005. In vitro cytotoxicity of nanoparticles in mammalian germline stem cells. *Toxicological Sciences* 88: 412-419.
- 7- Bustin S.A., Benes V., Garson J.A., Hellems J., Huggett J., Kubista M., Mueller R., Nolan T., Pfaffl M.W., and Shipley G.L. 2009. The MIQE guidelines: minimum information for publication of quantitative real-time PCR experiments. *Clinical Chemistry* 55: 611-622.
- 8- Butterman W., and Hilliard H. 2004. Mineral commodity profiles. Selenium. *Rapport US Department of the Interior US Geological Survey* 1-20.
- 9- Buzea C., Pacheco I.I., and Robbie K. 2007. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases* 2: MR17-MR71.
- 10- Cao C., Huang J., Cai W.-S., Yan C.-N., Liu J.-L. and Jiang Y.-D. 2017. Effects of silver nanoparticles on soil enzyme activity of different wetland plant soil systems. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 26: 558-567.
- 11- Carlson C., Hussain S.M., Schrand A.M., K. Braydich-Stolle L., Hess K.L., Jones R.L., and Schlager J.J. 2008. Unique cellular interaction of silver nanoparticles: size-dependent generation of reactive oxygen species. *The Journal of physical chemistry B*, 112: 13608-13619.
- 12- Charley R.C., and Bull A.T. 1979. Bioaccumulation of silver by a multispecies community of bacteria. *Archives of Microbiology*, 123: 239-244.
- 13- Chandra, K., Salman, A. S., Mohd, A., Sweet, R. and Ali, K. N. 2015. Protection against FCA induced oxidative stress induced DNA damage as a model of arthritis and In vitro anti-arthritis potential of *costus speciosus* rhizome extract. *International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research* 7: 383-9.
- 14- Cho K.-H., Park J.-E., Osaka T., and Park S.-G. 2005. The study of antimicrobial activity and preservative effects of nanosilver ingredient. *Electrochimica Acta* 51: 956-960.
- 15- Choi O., Deng K.K., Kim N.-J., Ross Jr L., Surampalli R.Y., and Hu Z. 2008. The inhibitory effects of silver nanoparticles, silver ions, and silver chloride colloids on microbial growth. *Water Research* 42: 3066-3074.
- 16- Cornfield A. 1977. Effects of addition of 12 metals on carbon dioxide release during incubation of an acid sandy soil. *Geoderma* 19: 199-203.
- 17- Doolette C.L., McLaughlin M.J., Kirby J.K., Batstone D.J., Harris H.H., Ge H., and Cornelis G. 2013.

- Transformation of PVP coated silver nanoparticles in a simulated wastewater treatment process and the effect on microbial communities. *Chemistry Central Journal* 7: 46.
- 18- Franci G., Falanga A., Galdiero S., Palomba L., Rai M., Morelli G., and Galdiero M. 2015. Silver nanoparticles as potential antibacterial agents. *Molecules* 20: 8856-8874.
 - 19- Furno F., Morley K.S., Wong B., Sharp B.L., Arnold P.L., Howdle S.M., Bayston R., Brown P.D., Winship P.D., and Reid H.J. 2004. Silver nanoparticles and polymeric medical devices: a new approach to prevention of infection *Journal of Antimicrobial Chemotherapy* 54: 1019-1024.
 - 20- Giller K.E., Witter E., and Mcgrath S.P. 1998. Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils: a review. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 1389-1414.
 - 21- Hänsch M., and Emmerling C. 2010. Effects of silver nanoparticles on the microbiota and enzyme activity in soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173: 554-558.
 - 22- Holden P.A., Klaessig F., Turco R.F., Priester J.H., Rico C.M., Avila-Arias H., Mortimer M., Pacpaco K., and Gardea-Torresdey J.L. 2014. Evaluation of exposure concentrations used in assessing manufactured nanomaterial environmental hazards: are they relevant? *Environmental Science & Technology* 48: 10541-10551.
 - 23- Hosseini S.S., Lakzian A., Halajnia A., and Hammami H. 2018. The Effect of olive husk extract compared to the EDTA on Pb availability and some chemical and biological properties in a Pb-contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation* 20: 643-649.
 - 24- Jung R., Kim Y., Kim H.-S., and Jin H.-J. 2009. Antimicrobial properties of hydrated cellulose membranes with silver nanoparticles. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition* 20: 311-32.
 - 25- Levard C., Hotze E.M., Lowry G.V., and Brown Jr G.E. 2012. Environmental transformations of silver nanoparticles: impact on stability and toxicity. *Environmental Science & Technology* 46: 6900-6914.
 - 26- Lok C.-N., Ho C.-M., Chen R., He Q.-Y., Yu W.-Y., Sun H., Tam P.K.-H., Chiu J.-F., and Che C.-M. 2006. Proteomic analysis of the mode of antibacterial action of silver nanoparticles. *Journal of Proteome Research* 5: 916-924.
 - 27- Lubick N. 2008. Nanosilver toxicity: ions, nanoparticles or both?: ACS Publications.
 - 28- Marambio-Jones C., and Hoek E.M. 2010. A review of the antibacterial effects of silver nanomaterials and potential implications for human health and the environment. *Journal of Nanoparticle Research* 12: 1531-1551.
 - 29- McShan D., Ray P.C., and Yu H. 2014. Molecular toxicity mechanism of nanosilver. *Journal of Food and Drug Analysis*, 22, 116-127. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2014.01.010>
 - 30- Morones J.R., Elechiguerra J.L., Camacho A., Holt K., Kouri J.B., Ramírez J.T., and Yacaman M.J. 2005. The bactericidal effect of silver nanoparticles. *Nanotechnology* 16: 2346.
 - 31- Moreno B., Nogales R., Macci C., Masciandaro G., and Benitez E. 2011. Microbial eco-physiological profiles to estimate the biological restoration of a trichloroethylene-contaminated soil. *Ecological Indicators* 11: 1563-1571.
 - 32- Murata T., Kanao-Koshikawa M., and Takamatsu T. 2005. Effects of Pb, Cu, Sb, In and Ag contamination on the proliferation of soil bacterial colonies, soil dehydrogenase activity, and phospholipid fatty acid profiles of soil microbial communities. *Water, Air, and Soil Pollution* 164: 103-118.
 - 33- Neto M., Ohannessian A., Delolme C., and Bedell J.-P. 2007. Towards an Optimized Protocol for Measuring Global Dehydrogenase Activity in Storm-Water Sediments (10 pp). *Journal of Soils and Sediments* 7: 101-110.
 - 34- Nielsen M.N., Winding A., and Binnerup S. 2002. Microorganisms as indicators of soil health.
 - 35- Oliveira A., and Pampulha M.E. 2006. Effects of long-term heavy metal contamination on soil microbial characteristics. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 102: 157-161.
 - 36- Panáček A., Kvítek L., Směkalová M., Večeřová R., Kolář M., Röderová M., Dyčka F., Šebela M., Pucek R., and Tomanec O. 2018. Bacterial resistance to silver nanoparticles and how to overcome it. *Nature Nanotechnology* 13: 65-71.
 - 37- Paulson K.N., and Kurtz L. 1969. Locus of Urease Activity in Soil 1. *Soil Science Society of America Journal* 33: 897-901.
 - 38- Paz-Ferreiro J., and Fu S. 2016. Biological indices for soil quality evaluation: perspectives and limitations. *Land Degradation & Development* 27: 14-25.
 - 39- Peyrot C., Wilkinson K.J., Desrosiers M., and Sauvé S. 2014. Effects of silver nanoparticles on soil enzyme activities with and without added organic matter. *Environmental Toxicology and Chemistry* 33: 115-125.
 - 40- Rahmatpour S., Shirvani M., Mosaddeghi M.R., Nourbakhsh F., and Bazarganipour M. 2017. Dose-response effects of silver nanoparticles and silver nitrate on microbial and enzyme activities in calcareous soils. *Geoderma* 285: 313-322.
 - 41- Rahmatpour S., Mosaddeghi M.R., Shirvani M., and Šimůnek J. 2018. Transport of silver nanoparticles in intact columns of calcareous soils: The role of flow conditions and soil texture. *Geoderma* 322: 89-100.
 - 42- Reidy B., Haase A., Luch A., Dawson K., and Lynch I. 2013. Mechanisms of silver nanoparticle release, transformation and toxicity: a critical review of current knowledge and recommendations for future studies and applications. *Materials* 6: 2295-2350.
 - 43- Rico C.M., Majumdar S., Duarte-Gardea M., Peralta-Videa J.R., and Gardea-Torresdey J.L. 2011. Interaction of

- nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59: 3485-3498.
- 44- Roh J.-y., Sim S.J., Yi J., Park K., Chung K.H., Ryu D.-y., and Choi J. 2009. Ecotoxicity of silver nanoparticles on the soil nematode *Caenorhabditis elegans* using functional ecotoxicogenomics. *Environmental Science & Technology* 43: 3933-3940.
- 45- Samarajeewa A., Velicogna J., Princz J., Subasinghe R., Scroggins R., and Beaudette L. 2017. Effect of silver nanoparticles on soil microbial growth, activity and community diversity in a sandy loam soil. *Environmental Pollution* 220: 504-513.
- 46- Schlich K., and Hund-Rinke K. 2015. Influence of soil properties on the effect of silver nanomaterials on microbial activity in five soils. *Environmental Pollution* 196: 321-330.
- 47- Shin Y.-J., Kwak J.I., and An Y.-J. 2012. Evidence for the inhibitory effects of silver nanoparticles on the activities of soil exoenzymes. *Chemosphere* 88: 524-529.
- 48- Siripattanakul-Ratpukdi S., and Fürhacker M. 2014. issues of silver nanoparticles in engineered environmental treatment systems. *Water, Air, & Soil Pollution* 225: 1939.
- 49- Tabatabai M. 1977. Effects of trace elements on urease activity in soils. *Soil Biology and Biochemistry* 9: 9-13.
- 50- Tabatabai M., and Bremner J. 1972. Assay of urease activity in soils. *Soil Biology and Biochemistry* 4: 479-487.
- 51- Tabatabai M.A. 1982. Soil enzymes. *Methods of Soil Analysis, Part 2. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, In: Page A.L., Miller R.H., Keeney D.R. (eds.)*
- 52- Thalmann A. 1966. The determination of the dehydrogenase activity in soil by means of TTC (triphenyltetrazolium). *Soil Biology* 6: 46-49.
- 53- van der Ploeg M.J., Handy R.D., Waalewijn-Kool P.L., van den Berg J.H., Herrera Rivera Z.E., Bovenschen J., Molleman B., Baveco J.M., Tromp P., and Peters R.J. 2014. Effects of silver nanoparticles (NM-300K) on *Lumbricus rubellus* earthworms and particle characterization in relevant test matrices including soil. *Environmental Toxicology and Chemistry* 33: 743-752.
- 54- Velicogna J.R., Ritchie E.E., Scroggins R.P., and Princz J.I. 2016. A comparison of the effects of silver nanoparticles and silver nitrate on a suite of soil dwelling organisms in two field soils. *Nanotoxicology* 10: 1144-1151.
- 55- Wigginton N.S., Titta A., Piccapietra F., Dobias J., Nesatyy V.J., Suter M.J., and Bernier-Latmani R. 2010. Binding of silver nanoparticles to bacterial proteins depends on surface modifications and inhibits enzymatic activity. *Environmental Science & Technology* 44: 2163-2186.
- 56- Wijnhoven S.W., Peijnenburg W.J., Herberts C.A., Hagens W.I., Oomen A.G., Heugens E.H., Roszek B., Bisschops J., Gosens I., and Van De Meent D. 2009. Nano-silver—a review of available data and knowledge gaps in human and environmental risk assessment. *Nanotoxicology* 3: 109-138.
- 57- Xu Q., Hu J., Xie K., Yang H., Du K., and Shi G. 2010. Accumulation and acute toxicity of silver in *Potamogeton crispus* L. *Journal of Hazardous Materials* 173: 186-193.
- 58- Yang Y., Quensen J., Mathieu J., Wang Q., Wang J., Li M., Tiedje J.M., and Alvarez P.J. 2014. Pyrosequencing reveals higher impact of silver nanoparticles than Ag⁺ on the microbial community structure of activated sludge. *Water Research* 48: 317-325.
- 59- Zhang Z., Qu Y., Li S., Feng K., Wang S., Cai W., Liang Y., Li H., Xu M., and Yin H. 2017. Soil bacterial quantification approaches coupling with relative abundances reflecting the changes of taxa. *Scientific Reports* 7: 1-11.
- 60- Zhou J., Bruns M.A., and Tiedje J.M. 1996. DNA recovery from soils of diverse composition. *Applied Environment Microbiology* 62: 316-322.

Effects of Silver Nanoparticles on Soil Microbial Activity and Bacterial Populations in a Calcareous Soil Using qPCR

S. Balandeh¹- A. Lakzian^{2*}- A. Javadmanesh³

Received: 25-01-2021

Accepted: 19-04-2021

Introduction: Silver nanoparticles (AgNPs) have a broad spectrum of uses, therefore, AgNPs will be released from those products into many different ecosystems. In the last decades, AgNPs have received substantial attention due to their distinctive physical and chemical properties such as high thermal and electrical conductivity, chemical stability, catalytic activity and antimicrobial properties against microbes such as bacteria, fungi, and viruses. There are many parameters for assessment effect of toxicity due to AgNPs but soil microbial community is one of which considered being an important target for assessing the impact of manufactured nano-materials on the terrestrial environment. Toxicity of AgNPs is due to the physical interaction of AgNPs with microorganisms and the production of reactive oxygen species (ROS). Although as we have been known harmful effects of AgNPs on the soil bacterial community, but the most information about antimicrobial properties of AgNPs come from the routine lab instructions such as soil respiration, substrate induced respiration and microbial biomass and colony forming unite. So, the objective of this paper was to study the effects of silver nanoparticles on microbial activity using the routine lab instructions and compare with the obtained data from the molecular genetic techniques. In this paper, the quantitate population of soil bacterial was estimated using Real time qPCR with the MIQE guidelines.

Materials and Methods: In order to study the effect of silver nanoparticles on microbial activity and bacterial population in a calcareous soil, an experiment was conducted as a completely randomized design based on factorial arrangement with three replications. Experimental factors included silver slat forms (AgNPs and AgNO₃), Ag concentrations (0, 0.5, 5, 10, 50, and 100 mg Ag kg⁻¹ dry soil) and incubation time (7 and 42 days). Soil samples (*Typic Haplicambids*) with clay loam texture and seven percent of calcium carbonate was collected from Research Field of Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Khorasan Razavi, Iran. The soil samples were amended with different concentrations of AgNPs and incubated at 25°C for 42 days. The water content of soil samples was adjusted at 70% WHC during the incubation time. After 7 and 42 days of incubation, the soil substrate-induced respiration (SIR), heterotrophic plate count (HPC), and soil urease and dehydrogenase activities were measured. Finally, based on the obtained data, the soil biological quality index was estimated using the soil biological parameters. In order to quantify the total bacterial population, DNA was extracted from soil samples and was estimated using the relative concentration of 16S rDNA gene by a quantitative Polymerase Chain Reaction (qPCR), with a minimum information for publication of quantitative real-time PCR experiments (MIQE) guidelines.

Results and Discussion: The results showed that with increasing the concentration of both AgNPs and AgNO₃, the activity of dehydrogenase and urease in soil samples decreased during the incubation times. Microbial substrate induced respiration (SIR) and the total bacterial population in soil samples considerably declined at the end of experiment. Bacterial population in AgNPs treatments decreased compared to AgNO₃ treatments but the reduction was not statistically significant. Over time, soil dehydrogenase activity and soil SIR decreased in both AgNPs and AgNO₃ treatments, while soil urease activity and heterotrophic bacterial populations improved but again in heterotrophic bacterial populations was not statistically significant. The soil biological quality index was estimated from the soil biological data. AgNO₃ treatments reduced the soil biological quality index compared to AgNPs treatments. In other words, the results showed that AgNO₃ was more toxic to soil bacteria activity compared to AgNPs. The lowest soil urease and dehydrogenase enzyme activity and soil biological quality index were observed in the treatment of 100 mg kg⁻¹ dry soil AgNO₃ after 7 days of incubation. The application of 0.5, 5, 10, 50, and 100 mg Ag kg⁻¹ dry soil decreased relative soil bacterial population by 22%, 40%, 59%, 73%, and 82% in AgNO₃ treatment and 10%, 30%, 68%, 76%, and 86% in AgNO₃ treatment compared to control after 42 days of incubation,

1 and 2- Ph.D. Student and Professor Department of Soil Science, Faculty of Agriculture Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, respectively.

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

3- Assistant Professor, Department of Animal Science, Faculty of Agriculture Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad
DOI: 10.22067/JSW.2021.67908.1004

respectively.

Conclusion: The results of this study showed that silver nanoparticles can negatively affect the enzymes involved in the nitrogen and carbon cycle. The AgNPs had less toxicity effect on the soil microbial activity compared to AgNO₃. However, AgNPs was more toxic to soil bacteria populations compared to AgNO₃. Different behavior AgNPs and AgNO₃ in calcareous soil needs more investigations but there is no doubt that AgNPs is as an emerging contaminant and it has high toxicity potential for soil microbial community.

Keywords: Bacterial population, Dehydrogenase, Silver nanoparticles, Urease, qPCR

مقاله پژوهشی

روش برآورد رطوبت خاک با استفاده از تکنیک سنجنش از دور توسط ماهواره Landsat

سید فرشید موسوی زاده^۱ - حسین انصاری^{۲*} - علیرضا فریدحسینی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۴

چکیده

خشکسالی یک فاجعه طبیعی پیچیده است که در سطح جهان زیاد اتفاق می افتد. رطوبت خاک به عنوان مستقیم ترین و مهم ترین متغیر توصیف خشکسالی، از جمله اطلاعات اساسی برای نظارت از راه دور بر وقایع خشکسالی و تخمین عملکرد محصول می باشد. برای کاهش نمونه برداری میدانی و استفاده همزمان از مدل های گیاهی برای تخمین عملکرد محصول استفاده از تصاویر ماهواره ای سهل ترین راه حل می باشد. در این پژوهش، با استفاده از روشی رطوبت خاک با فضای بازتاب طیفی نزدیک به مادون قرمز در مقابل باند طیفی قرمز (Red - NIR) تخمین و توسعه داده شد. در ابتدا فضای انعکاس طیفی Red-NIR پس از تصحیحات اتمسفری به صورت نمودار با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 7 و سنجنده ETM⁺ با روش اصلاح شده هندسی ایجاد شد. سپس با استفاده از معادله خط برازش شده در این نمودارها، مقادیر با محاسبات ریاضی به رطوبت حجمی تبدیل و با میانگین مقادیر رطوبت خاک اندازه گیری شده در دشت نیشابور (خراسان رضوی) در وسعت ۱۳ هکتار در شش روز در طی دوران کشت محصول مقایسه و اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد برآورد رطوبت خاک که با روش هندسه فضایی در سطح خاک صورت گرفت با توجه به تطابق شش تصویر ماهواره ای از لحاظ زمان با اندازه گیری های میدانی، شاخص آماری NRMSE برابر ۱۸ درصد بدست آمد که می توان دقت انجام کار را به غیر از زمان های ۲۸ نوامبر و ۳۰ دسامبر که وضعیت ابرناکی وجود داشت و باعث شد تصویربرداری خطای بیشتری داشته باشد، رضایت بخش دانست. بنابراین نتیجه گیری شد که مدل ساده و کارآمد هندسه فضایی Red-NIR توانایی زیادی برای تخمین رطوبت سطح خاک در شرایط جوی مساعد را داشته باشد و می توان از این روش برای مدل سازی گیاهی به عنوان اطلاعات ورودی استفاده نمود.

واژه های کلیدی: آب خاک، بازتاب طیفی، محاسبات ریاضی، مدل هندسه فضایی Red-NIR

مقدمه

اصلی میزان تبخیر و تعرق است که می تواند آن را تحت تأثیر قرار دهد. رطوبت خاک را می توان به عنوان مستقیم ترین و مهم ترین متغیر توصیف کننده خشکسالی دانست که به عنوان پارامتر اصلی توصیف گردش آب و تبادل انرژی بین سطح و جو است (۳). روش های کوچک سازی از لحاظ مقیاس برای رطوبت خاک را می توان در سه گروه عمده شامل روش مبتنی بر ماهواره، روش استفاده از داده های اطلاعات جغرافیایی و روش های مبتنی بر مدل تقسیم بندی کرد (۴). از همین روش ها برای الگوهای طیفی متفاوت در طول موج های مختلف، داده های سنجنش از دور از مرئی تا مایکروویو به طور گسترده ای در پایش رطوبت خاک استفاده شده است که نتیجه می شود بازتاب طیفی با افزایش رطوبت خاک در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک (NIR) کاهش می یابد. بنابراین از این روش ها برای برآورد

در دهه گذشته روش های مبتنی بر ماهواره از جمله روش های سنجنش از دور حرارتی و مایکروویو، در بسیاری از مطالعات برای تشخیص رطوبت سطح خاک به صورت منطقه ای استفاده شده است (۱). روش سنجنش از دور حرارتی برای بررسی رطوبت برای خاک لخت کاملاً موثر است اما همبستگی ضعیفی برای سطوح با پوشش گیاهی نشان می دهد. علاوه بر این، در صورت وجود اختلاف دما در روز استفاده گسترده از این روش را به چالش می کشد. تصاویر ماهواره ای توانایی اندازه گیری رطوبت را با توجه به شرایط محیطی در سطح را امکان پذیر می کند. بنابراین در مقایسه با اندازه گیری میدانی، تکنیک های سنجنش از دور امیدوارکننده هستند زیرا آن ها قادر به اندازه گیری های مکانی با هزینه نسبتاً کم است (۲). تأمین آب از علل

(Email: Ansary@um.ac.ir)

(*) - نویسنده مسئول:

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

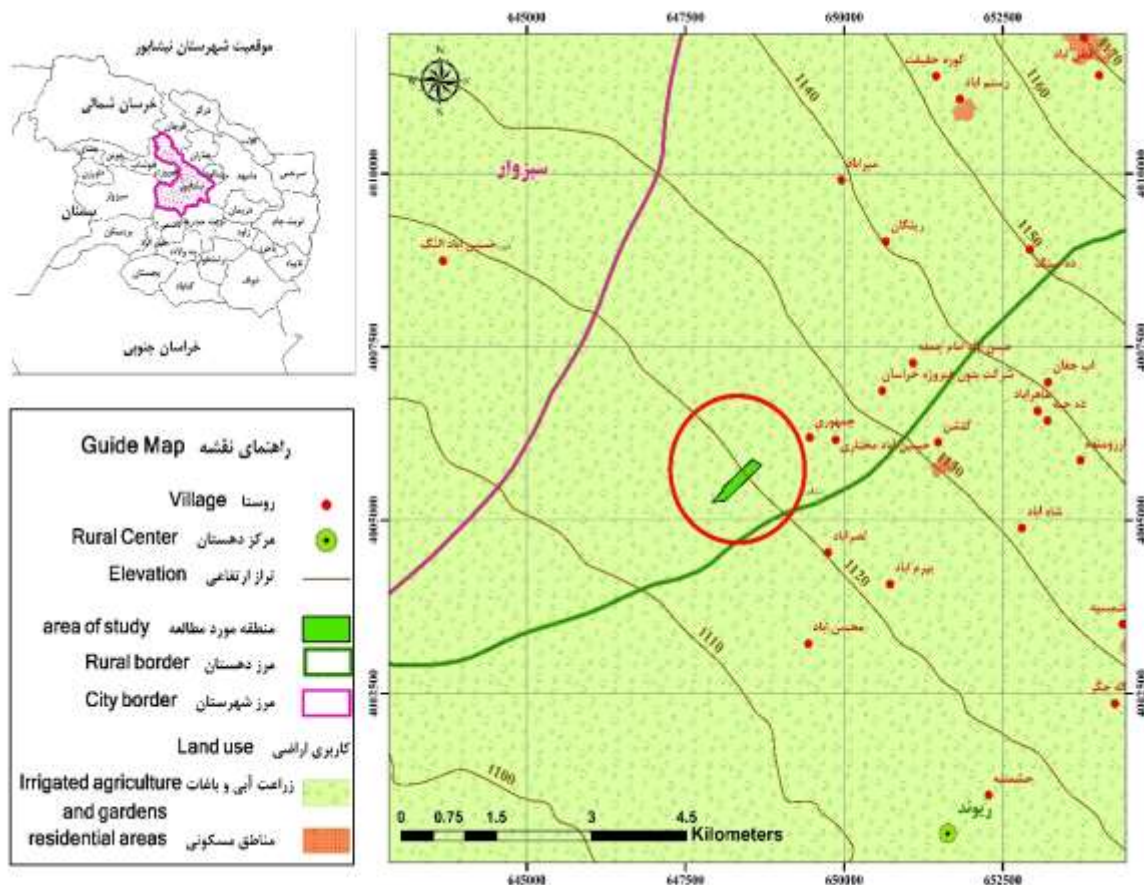
در این مطالعه با استفاده از اطلاعاتی که توسط زکی (۱۱) ارائه شد رطوبت اندازه‌گیری شده توسط سنسور رطوبتی با رطوبت بدست آمده توسط تصاویر ماهواره مقایسه خواهد شد. این مطالعه در دشت نیشابور استان خراسان رضوی جهت اندازه‌گیری رطوبت در ۱۶ نقطه به وسعت ۱۳ هکتار نمونه‌برداری شد (شکل ۱). نمونه‌برداری به صورت روزانه انجام شد که با زمان‌هایی که تصویربرداری شده بود مطابقت صورت پذیرفت. اغلب در این منطقه گندم، پنبه و کلزا کشت می‌شود و بافت خاک در ۱۰ سانتی‌متری لومی است اقلیم منطقه نیز گرم و خشک می‌باشد ضمن اینکه در مزرعه انتخاب شده محصول گندم زمستانه کشت شده بود که از نوامبر ۲۰۱۲ تا مارس ۲۰۱۳ به طول انجامید (۱۱). برای تخمین رطوبت خاک توسط ماهواره نیاز است تا شرایط محیطی و رشد گیاه مشخص باشد بنابراین در اوایل دوره رشد بدلیل اینکه محصول رشد کمی دارد می‌توان گفت که خاک لخت است و رفته رفته گیاه رویش پیدا می‌کند بنابراین رویش گیاه به دلیل پوشاندن خاک مورد اهمیت می‌باشد. از لحاظ تغذیه آب ورودی به زمین، محل مورد مطالعه را علاوه بر بارندگی تحت تاثیر آبیاری و لزوماً تبخیر و تعرق در نظر گرفته خواهد شد که این خود هنگام تصویربرداری توسط ماهواره حائز اهمیت است. با توجه به قدرت تصویربرداری ماهواره، در این مطالعه بررسی بافت خاک در نظر گرفته نشد (۱۲). بنابراین حجم رواناب سطحی و شارژ مجدد آب زیرزمینی از طریق میزان نفوذ آب در خاک به رطوبت‌خاک نسبت داده خواهد شد (۱۳).

اطلاعات و داده‌های مورد استفاده

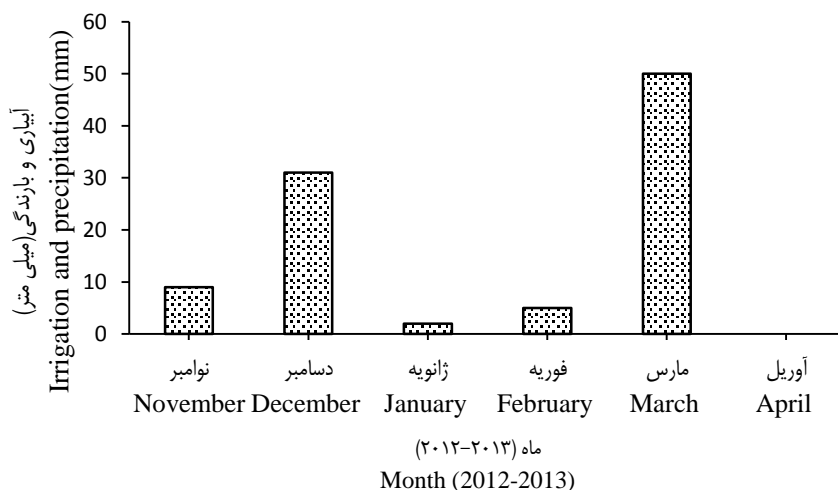
شکل ۲ مجموع میزان تغذیه ورودی به زمین را در ماه‌های مختلف طی دوران کشت گیاه نشان می‌دهد که بیشترین تغذیه در مارس ۲۰۱۳ به میزان ۵۰ میلی‌متر اتفاق افتاده است. مقدار بارندگی با توجه به اطلاعات حاصل از ایستگاه باران‌سنجی روح‌آباد در نیشابور بدست آمده است که شکل ۳ تغییرات دمایی در ایستگاه فدیشه نیشابور به صورت حداکثر و حداقل دما در ماه‌های مختلف مشخص شده است. ایستگاه فدیشه و روح‌آباد به دلیل نزدیکی به محل انتخاب شد. با توجه به اینکه ماهواره Landsat 7 با فواصل زمانی متفاوت تصویربرداری انجام می‌دهد تعداد شش تصویر (۱۲ نوامبر ۲۰۱۲، ۲۸ نوامبر ۲۰۱۲، ۱۴ دسامبر ۲۰۱۲، ۳۰ دسامبر ۲۰۱۲، ۱۶ فوریه ۲۰۱۳ و ۴ مارس ۲۰۱۳) در مدت زمان کاشت گیاه انتخاب و بررسی شد.

رطوبت خاک با استفاده از اطلاعات ماهواره برای بودجه‌بندی آب و سایر کاربردهای هواشناسی و کشاورزی می‌توان استفاده کرد (۵). از تکنیک سنجش از دور با استفاده از ماهواره‌های Landsat 7 و 8 در مزرعه برنج که در کشور چین صورت گرفت، نتایج نشان از دقت بالا داشت (۶). در مطالعه‌ای دیگر، یک روش جدید برای بازیابی رطوبت خاک سطح تحت شرایط پوشش گیاهی جزئی براساس همکوشی بین داده‌های رادار ماهواره Sentinel و Landsat برای حذف اثر پوشش گیاهی انجام شد که با ساخت مدلی برای برآورد محتوای آب پوشش گیاهی به مدل ابر-آب تبدیل شد. این روش در انگلستان و اسپانیا مورد آزمایش قرار گرفت که در نتیجه مدل توانست در حذف ابر و آب موجود در جو خوب عمل نماید (۷). در مطالعه محمد و همکاران (۸) که در مصر انجام شد بررسی‌ها با استفاده از ماهواره Landsat 7 و Sentinel 1 بدست آمد. نتایج آنان نشان داد با محاسبه شاخص آماری R^2 برای پیش‌بینی رطوبت خاک همبستگی بالایی برای رطوبت حجمی خاک و شاخص رطوبت خاک وجود دارد. در پژوهشی با استفاده از تصاویر Sentinel 1 در کشور ایتالیا برای چمن جهت بازیابی اطلاعات رطوبت خاک استفاده شد و روش‌های متفاوتی بررسی شد که روش ساده‌سازی پارامترها توصیه گردید (۹). همچنین با استفاده از تصاویر همین ماهواره در ایران با سه الگوریتم با رطوبت خاک واقعی نتایج بررسی شد و الگوریتم شبکه عصبی رضایت‌بخش بود (۱۰).

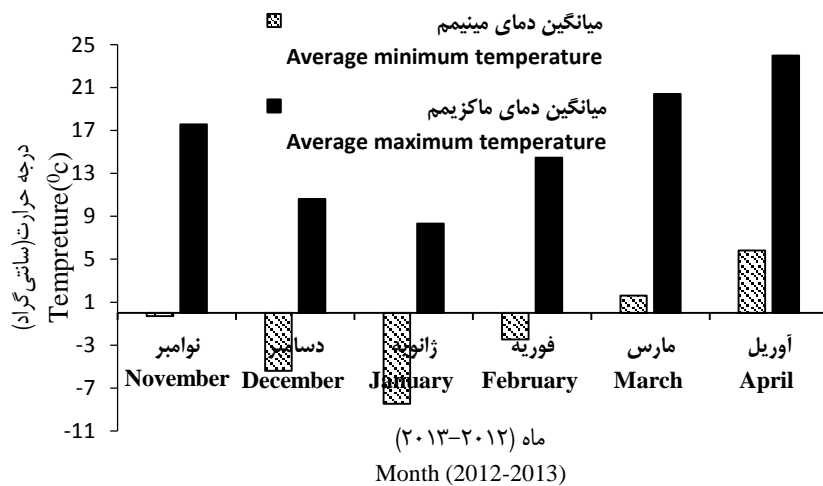
بنابراین، این ضرورت وجود دارد جهت کاهش عملیات اجرایی در مزرعه برای پیش‌بینی عملکرد محصول و سایر اطلاعات خواسته شده توسط کشاورزان از جمله برنامه آبیاری و انتخاب روش آبیاری مناسب از تکنیک معرفی شده در این پژوهش برای شبیه‌سازی مزرعه کشاورزی استفاده نمود تا کشاورزانی که از مسئولین جهاد کشاورزی درخواست برنامه برای محصول خود می‌نمایند راه کاری ارائه شود. بنابراین می‌توان هدف از این مقاله را ارائه روشی به عنوان اطلاعات ورودی برای برآورد رطوبت خاک جهت مدل‌سازی گیاهی دانست. با توجه به این که اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی گیاهی، در اختیار داشتن رطوبت خاک طی دوره کشت است می‌توان با تلفیق سایر اطلاعات عملکرد گیاه را تخمین زد. بنابراین برای تخمین رطوبت سطحی خاک (۰-۱۰ سانتی‌متر) با برآزش معادله خط نمودار باند قرمز و باند مادون قرمز نزدیک و انجام عملیات ریاضی می‌توان پهنه‌بندی رطوبت سطحی خاک را بدست آورد. به طور ساده‌تر می‌توان بیان کرد که نوآوری این مطالعه ارائه روشی ساده جهت استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 7 است که برای تخمین رطوبت سطحی مناطقی از کره زمین جهت حذف نمونه‌برداری میدانی و استفاده بهینه برای کشاورزی است. یکی از مزیت‌های این روش تخمین یکی از اطلاعات ضروری مزرعه است که به عنوان مقادیر ورودی برای مدل‌سازی گیاهی نیاز است.



شکل ۱- موقعیت مکانی محل مورد مطالعه در دشت نیشابور
Figure 1- Location of the study site in Neishabour plain



شکل ۲- مجموع تغذیه ورودی به زمین (بارندگی و آبیاری) در منطقه مطالعاتی در دشت نیشابور
Figure 2- Total inlet feeding to the ground (rainfall and irrigation) in the study area in Neishabour plain



شکل ۳- تغییرات دمایی طی سال های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳ در ایستگاه فدیسه نیشابور در منطقه مطالعاتی
Figure 3- Temperature changes during 2012 to 2013 at Fadisheh station in Neishabour in the study area

قسمت توصیف کرد: یکی از پراکندگی ناشی از پوشش گیاهی و دومی پراکندگی از زمین بدون پوشش گیاهی است. این مدل نسبتاً ساده و عملی اغلب برای تخمین اطلاعات مرتبط در مناطق تحت پوشش گیاهی استفاده می‌شود (۱۵). از معادلات ۱ تا ۳ برای حذف ابر و آب در اتمسفر استفاده شد:

$$\sigma^0 = \sigma_{veg}^0 + T^2 \sigma_{soil}^0 \quad (1)$$

$$\sigma_{veg}^0 = AM_v \cos(\theta)(1 - T^2) \quad (2)$$

$$T^2 = \exp(-2M_v \sec(\theta)) \quad (3)$$

که در آن σ^0 ضریب سطح سایه انداز گیاهی پراکنش شده، σ_{veg}^0 ضریب پوشش سطح پراکنش شده، σ_{soil}^0 ضریب خاک پراکنش شده، M_v مقدار آب گیاه ($\frac{kg}{m^2}$)، T^2 نیز فاکتور موج عبوری از گیاه و θ زاویه تابش برحسب درجه است و A نیز سطح مورد بررسی می‌باشد (۱۶). مقادیر مذکور در فایل متادیتا تصاویر استخراج شده از ماهواره قابل دریافت است ضمن اینکه مقدار M_v برای گیاه گندم از اطلاعات موجود در مدل گیاهی WOFOST استفاده شد (۱۷). در این مطالعه شش تصویر به طور کامل دانلود گردید که تصاویر دریافتی دارای رقوم دیجیتالی است و با توجه به اطلاعات موجود در فایل متادیتا باید سایر امواج که از سطح زمین دورتر هستند، حذف گردد بنابراین با توجه به منطقه براساس زاویه تابش و ارتفاع خورشید نسبت به تابش طیفی و بازتاب در بالای

مواد و روش‌ها

تصحیحات اتمسفری داده‌های ماهواره‌ای

برای حذف اثر پوشش گیاهی بر روی برآورد رطوبت خاک، مدل ابر- آب در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. سنجنده ETM+ شامل ۸ باند موج کوتاه است و تصاویر استفاده شده در این مطالعه دارای وضوح ۳۰ متری هستند. برای تصحیح اتمسفری، مقادیر اعداد در تصاویر باید به تابش طیفی و سپس بازتاب اتمسفر تبدیل شوند که با این کار گازهای اتمسفری و آيروسول‌های موثر در تصویربرداری حذف می‌شوند. بنابراین با انجام تصحیحات اتمسفری دقت باندهای تصویر در محدوده مرئی بالا خواهد رفت (۱۴). که با رجوع به فایل متادیتا از مجموعه تصاویر دانلود شده از سایت GLOVIS و اعمال ضرایب معرفی شده در آن تصحیحات انجام شد.

مدل ابر- آب

مدل پراکنش پوشش گیاهی یک ابزار مهم برای رابطه بین پوشش خاک و رطوبت خاک است. برای توصیف بهتر در مناطق پوشیده از پوشش گیاهی، مدل ابر-آب توسط آتما و الابی (۱۴) ارائه شد که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. مدل ابر- آب براساس مدل انتقال تشعشع است و پوشش گیاهی به صورت ابرهای افقی یکنواخت فرض می‌شود که در نتیجه پراکندگی چندگانه شامل ساختمان، آب و خشکی را تفکیک می‌نماید. در این مدل نواحی پوشیده از پوشش گیاهی را در نظر می‌گیرد که می‌توان به صورت دو

5- double attenuation factor for radar waves passing through vegetation
6- incident angle

1- total canopy backscattering coefficient
2- vegetation backscattering coefficient
3- soil backscattering coefficient
4- vegetation water content

با قراردادن باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک در مقابل یکدیگر تصویر فرضی مطابق با شکل ۴ بدست آمد که این هندسه توسط ریچاردسون و ویگند (۲۲) ارائه شد و یک محدوده هندسی مثلثی شکل را تشکیل می‌دهد که یکی از خطوط اطراف آن معرف خط خاک (BC) می‌باشد. این خط به گونه‌ای برآش داده می‌شود که به انتهایی‌ترین نقطه در شکل مماس باشد و تمام نقاط مشخص شده در یک سمت خط قرار گیرد. این خطوط سطح مرطوب و خشک را نشان می‌دهد. خط L نیز عمود بر خط خاک و از مبدا مختصات عبور می‌کند. بنابراین هر نقطه انتخابی تا خط L به عنوان خط EF معرفی می‌گردد. این محدوده نه تنها می‌تواند وضعیت پوشش سطح را نشان دهد بلکه می‌تواند خشکسالی در سطح و همچنین شدت خشکسالی را نشان دهد. هرچه نقاط از خط L فاصله بیشتری داشته باشد به عبارتی مقدار EF بیشتر باشد می‌توان نتیجه گرفت که رطوبت در آن نقطه از محدوده مطالعاتی بیشتر است (۱۸). ضمن اینکه برای مقایسه رطوبت اندازه‌گیری شده در محل با تکنیک سنجش از راه دور باید رطوبت حجمی را با استفاده از معادله خط محاسبه نمود که این رطوبت تخمین مناسبی تا عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متر است (۲۳). در شکل ۵ یک نمونه از تصاویر دریافت شده از ماهواره Landsat 7 را در مورخ ۲۸ نوامبر ۲۰۱۲ و رقوم دیجیتالی منتسب به آن مشخص شده که شکل ۵ (آ) مربوط به باند ۳ و شکل ۵ (ب) مربوط به باند ۴ پس از تصحیح اتمسفری را نشان می‌دهد. دامنه نوسان رقوم دیجیتالی در باند ۳ از ۰/۳۷ تا ۰/۴۶ می‌باشد در حالی که رقوم باند ۴ از ۰/۳۷ تا ۰/۴۷ است. با توجه به اینکه در ۲۸ نوامبر در اوایل دوره رشد است و خاک عمدتاً لخت می‌باشد، هرچند گیاه مرحله جوانه‌زنی را گذرانده است انتظار می‌رود تصویربرداری از دقت خوبی برخوردار باشد. بنابراین روش کار با انجام عملیات ریاضی قابل توصیف است. جهت مقایسه نتایج بدست آمده از روش Red-NIR با رطوبت اندازه‌گیری شده میدانی با استفاده از شاخص نرمال انحراف جذر میانگین مربعات (NRMSE) استفاده شد (۲۴).

روش کار به این صورت است که پس از تصحیح اتمسفری باندهای ۳ و ۴ در مقابل یکدیگر قرار می‌گیرند و فضای هندسی را تشکیل می‌دهند. پس از استخراج معادله خط، برای بیان ریاضی خط خاک می‌توان از معادله ۴ استفاده کرد:

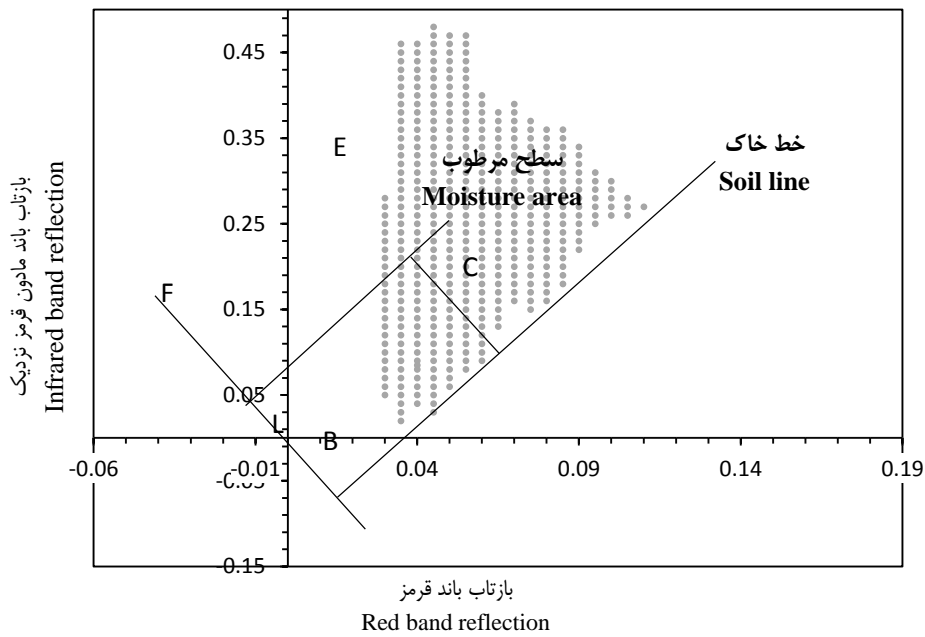
$$R_{NIR} = MR_{Red} + I \quad (4)$$

که در اینجا R_{NIR} مربوط به باند مادون قرمز نزدیک و R_{Red} مربوط به باند قرمز و M شیب خط خاک و I عرض از مبدا خط خاک می‌باشد. فاصله هر نقطه بر روی فضای بازتابی باند مادون قرمز نزدیک و قرمز تا خط L نشان دهنده رطوبت سطحی خاک می‌باشد. بنابراین برای محاسبه این فاصله از فرمول ۵ استفاده می‌شود:

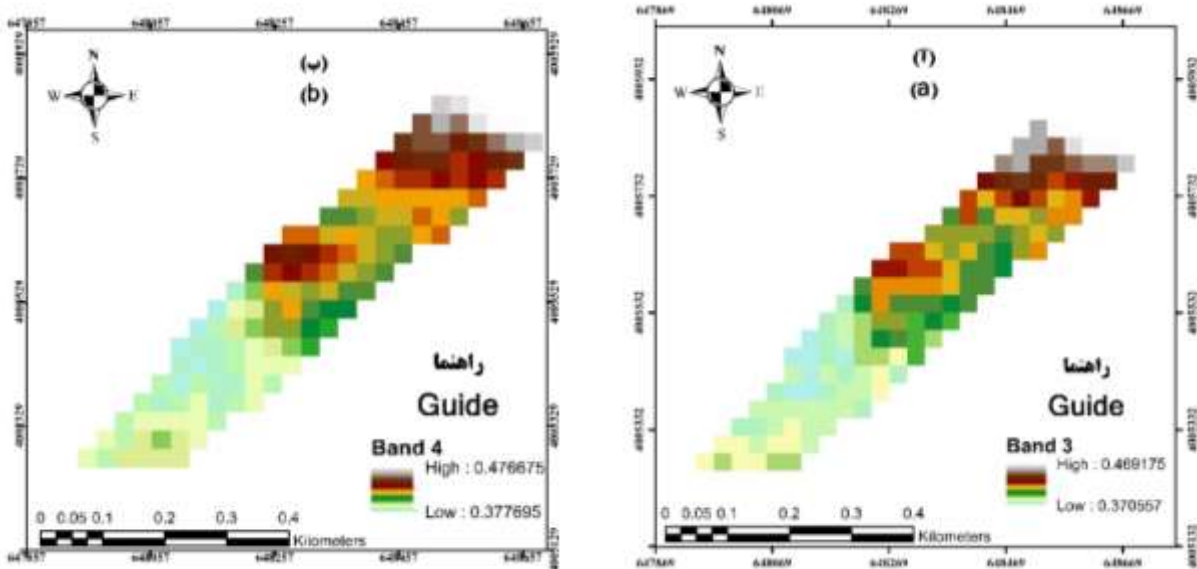
اتم‌سفر برای باندهای ۳ و ۴ که معرف باند قرمز و مادون قرمز نزدیک (Red و NIR) است مورد تصحیح اتمسفری قرار گیرد در واقع امواجی که در نتیجه انعکاس از سطح زمین نمی‌باشد باید حذف گردد که به اصطلاح تصحیح اتمسفری گفته می‌شود. باند ۳ (قرمز) در محدوده ۶۳۰ تا ۶۹۰ نانومتر و باند ۴ (مادون قرمز نزدیک) در محدوده ۷۸۰ تا ۹۰۰ نانومتر قرار می‌گیرد. بنابراین پس از محاسبه σ^0 با استفاده از اطلاعات موجود در فایل متادیتا، در زمان‌هایی که پوشش گیاهی در سطح زمین وجود دارد ضریب سطح سایه‌انداز در رقوم دیجیتالی ضرب می‌شود و با این روش پوشش گیاهی از سطح حذف می‌شود و دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک بالا می‌رود.

معرفی ساختار مدل Red-NIR

بافت لایه‌های گیاهی به شدت نورهای آبی و قرمز را جذب و نور سبز به ویژه مادون قرمز نزدیک را منعکس می‌کند. بازتاب از خاک لخت به شدت زیاد است البته افزایش آن به آرامی صورت می‌گیرد. هرچه تراکم پوشش گیاهی ضخیم‌تر باشد، بازتاب از رنگ قرمز کوچک‌تر و بازتابندگی در نور مادون قرمز نزدیک بیشتر می‌شود. از آنجا که جذب در محدوده نور قرمز به سرعت اشباع می‌شود، تنها افزایش بازتاب در محدوده مادون قرمز نزدیک می‌تواند افزایش پوشش گیاهی را منعکس کند (۱۸). باند قرمز (باند ۳) در واقع برای تشخیص گیاهان از یکدیگر اهمیت فراوانی دارد. این محدوده که در یکی از محدوده‌های جذب کلروفیل قرار گرفته است برای شناسایی مناطق پوشش گیاهی از مناطق عاری از پوشش گیاهی و نیز برای شناسایی گونه‌های مختلف گیاهی به کار می‌رود. باند مادون قرمز نزدیک (باند ۴) در جهت تخمین مقادیر پوشش‌های گیاهی بهره‌برداری می‌شود. علاوه بر این از بررسی داده‌های این باند می‌توان در تمایز خاک بایر از مزارع یا آب از خاک استفاده نمود. با این اوصاف از هرگونه عملیات ریاضی که تفاوت بین مادون قرمز نزدیک و قرمز را نشان دهد می‌توان برای توصیف خصوصیات پوشش گیاهی استفاده نمود. به منظور ترسیم فضایی بین محدوده باند قرمز و مادون قرمز نزدیک برای مناطق مختلف می‌توان فضای انعکاسی این دو باند را مورد بررسی قرار داد (۱۹). در تحقیقی که توسط بابائیان و همکاران (۲۰) در چهار منطقه از آمریکا انجام شد با استفاده از تصاویر ماهواره MODIS فضای انعکاسی موسوم به CRN که به شکل دوزنقه‌ای می‌باشد با قراردادن باند مربوط به مادون قرمز نزدیک و شاخص NDVI در مقابل یکدیگر و محاسبه سایر عملیات ریاضی توانستند رطوبت خاک را تخمین بزنند و با استفاده از شاخص‌های آماری R^2 و RMSE دقت کار را مورد بررسی قرار دهند. می‌توان گفت که مدل دوزنقه‌ای یا مثلثی محبوب‌ترین روش برای سنجش از راه دور برای رطوبت سطحی خاک است (۲۱). اما در این مطالعه به عنوان نوآوری در ایران



شکل ۴- نقشه فرضی طرح رطوبت خاک توسط اتما و البی (۱۴) با قرار گرفتن بازتاب باند قرمز در مقابل باند مادون قرمز نزدیک
 Figure 4- Hypothetical map of soil moisture design by Attema and Ulaby (14) with the red band reflection in front of the near infrared band



شکل ۵- تصاویر ماهواره Landsat 7 در تاریخ ۲۸ نوامبر ۲۰۱۲ مربوط به باند قرمز (ا) و باند مادون قرمز نزدیک (ب)
 Figure 5- Landsat 7 satellite images on November 28, 2012 of the red band (a) and the near infrared band (b)

است کمترین رطوبت سطحی خاک متعلق به نقطه‌ای است که کمترین فاصله را با خط L دارد و بیشترین رطوبت سطحی خاک مربوط به نقطه‌ای است که بیشترین فاصله را از خط L دارد.

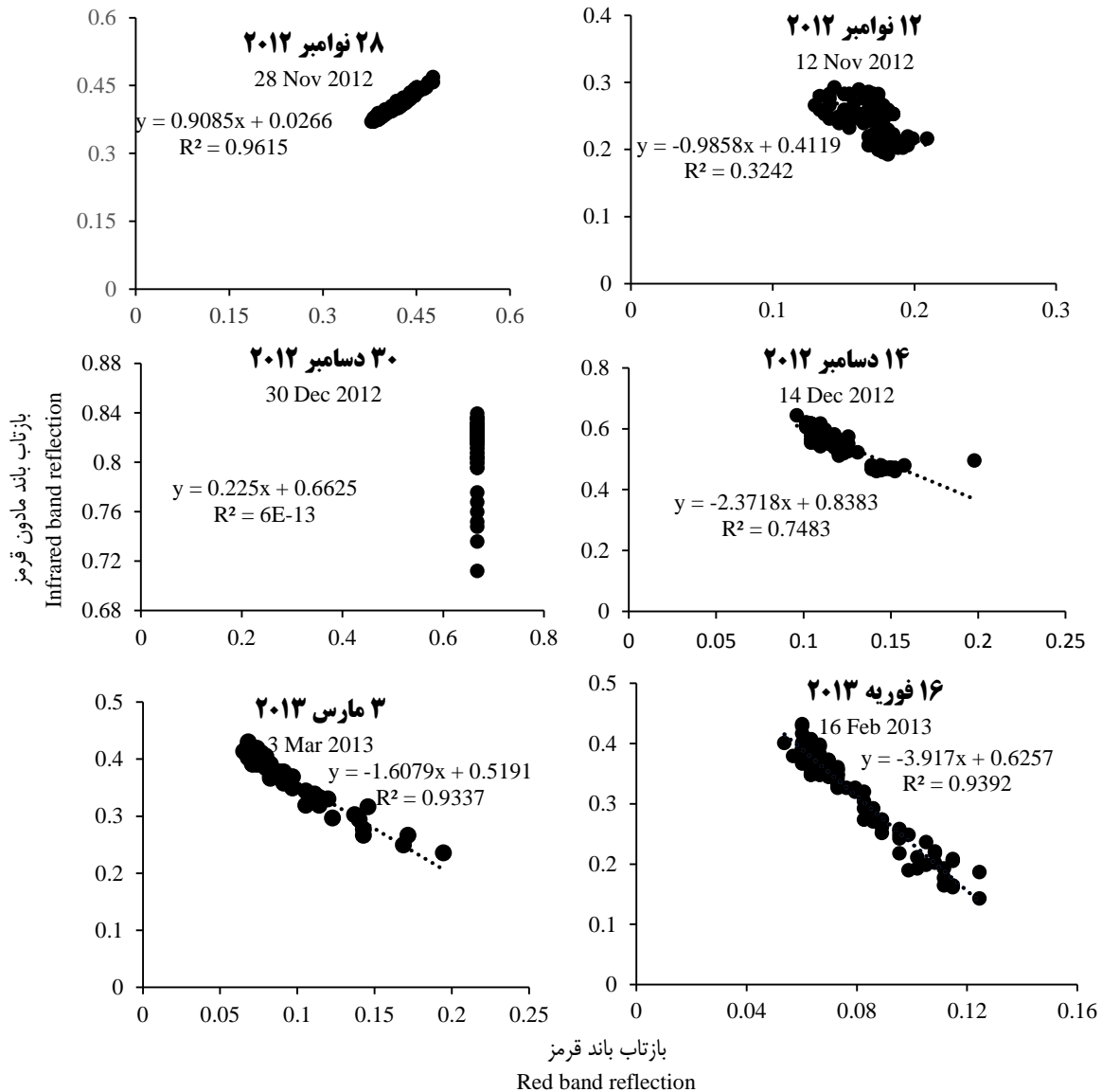
$$ESM = \frac{1}{\sqrt{M^2 + 1}} (R_{NIR} + MR_{red}) \quad (5)$$

در معادله ESM معرف رطوبت خاک برآورده شده با سنجش از راه دور می‌باشد که در واقع همان خط EF است. همانطور که مشخص

نتایج و بحث

در ۱۲ نوامبر که در واقع ۱۲ روز پس از کشت گیاه است گیاه در حال ورود به مرحله جوانه زنی است و خاک عمدتاً لخت است. بدلیل اینکه ماهواره نور سبز منعکس شده را به مقدار کافی دریافت نمی کند دقت تصویر در اندازه گیری رطوبت خاک کاهش می یابد اما پس از رویش گیاه، نور سبز منعکس شده و مقدار رطوبت دیجیتال باند ۴ تحت تاثیر قرار می گیرد و در نتیجه مقدار رطوبت موجود در برگ و ساقه گیاه در اندازه گیری رطوبت خاک دخالت می نماید که با نتایج تحقیق پتروپولوس و همکاران (۲۵) مطابقت دارد.

با توجه به شکل ۶ و قرار گرفتن رقوم باند ۳ و ۴ در مقابل یکدیگر برای محاسبه M، معادله خط برازش داده شد. از آنجایی که تصویربرداری از سطح زمین توسط ماهواره به طور روزانه انجام نمی گیرد تعداد شش تصویر در طول فصل کشت استخراج شد و معادله خط و R² در شکل ۶ برای هر زمان تصویربرداری نشان داده شد.



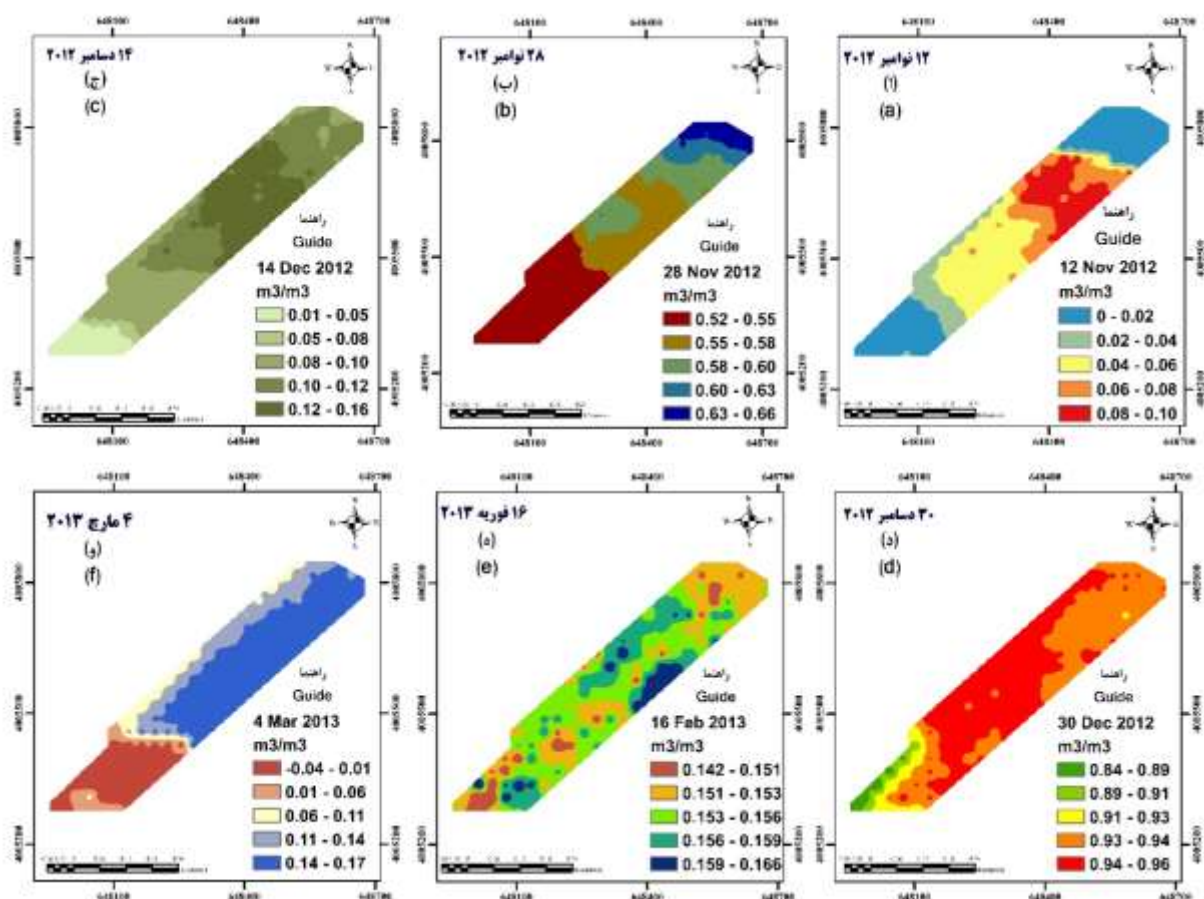
شکل ۶- بازتاب باند مادون قرمز و باند قرمز اصلاح شده اتمسفری در مقابل یکدیگر و نمایش معادله خط برازش داده شده و محاسبه شاخص آماری مجذور خطا (R²) برای هر یک از تصاویر خروجی توسط ماهواره Landsat 7

Figure 6- Infrared band reflection in front of atmospheric correction red band and display of the fitted line equation and calculation of the error square (R²) statistical index for each of the output images by Landsat 7 satellite

توسط ماهواره Landsat 7 ارائه نشد از مقایسه آن اجتناب شد ولی با توجه به روند انعکاس باندهای ماهواره انتظار می‌رود با توجه به رشد گیاه نور قرمز بیشتری منعکس شود به دلیل اینکه کلروفیل در گیاه شکل می‌گیرد که از جمله خصوصیات این باند توانایی تشخیص انواع گیاه می‌باشد (۲۶). همچنین مقادیر شکل ۶ به صورت آماری مورد تحلیل قرار گرفت که آزمون f تست ارائه شده توسط ژنگ و همکاران (۲۷) در سطح ۵ درصد برای تمام تصاویر برای شیب معنی‌دار شد و برای عرض از مبدا معنی‌دار نشد و فقط در ۲۸ نوامبر برای عرض از مبدا نیز معنی‌دار شد. در شکل ۷ پهنه‌بندی رطوبت پس از انجام محاسبات ریاضی در زمان‌هایی که تصویربرداری شد ارائه می‌گردد.

میانگین رطوبت حجمی به صورت میدانی در کل دوره رشد گیاه به صورت روزانه با استفاده از سنسور رطوبتی اندازه‌گیری شد. همانطور که در شکل ۷ مشخص است در ۱۲ نوامبر ۲۰۱۲، دامنه نوسان رطوبت حجمی بین ۰ تا ۰/۱ می‌باشد و عمدتاً رطوبت تجمع یافته در مرکز بیشتر است.

در ۲۸ نوامبر با توجه به وضعیت ابرناکی و کاهش دما که از عوامل تاثیرگذار محیطی در تصویربرداری است نشان می‌دهد شیب معادله خط نسبت به تصویر ۱۲ نوامبر معکوس می‌شود که از علل آن می‌توان به انعکاس بیشتر نور قرمز اشاره کرد. در ۱۴ دسامبر انعکاس نور قرمز کمتر می‌شود و بدلیل اینکه پوشش گیاهی بیشتر می‌شود انعکاس نور مادون قرمز نزدیک نسبت به نور قرمز پیشی می‌گیرد. در ۳۰ دسامبر تصویر استخراج شده از ماهواره Landsat 7 در باند قرمز به صورت یک‌دست منعکس شد که می‌تواند علل مختلفی داشته باشد. با بررسی وضعیت ابرناکی و بارندگی در آن زمان نشان می‌دهد که در محدوده ۱۰ روزه با توجه به اطلاعات ایستگاه باران‌سنجی روح‌آباد در نیشابور بارندگی اتفاق افتاده و همچنین عمدتاً وجود ابر در انعکاس نور قرمز موثر بوده است که می‌توان گفت این شرایط محتمل‌تر می‌باشد. در ۱۶ فوریه و ۳ مارس با توجه به اینکه پوشش گیاهی افزایش پیدا نموده انعکاس نور مادون قرمز نزدیک بیشتر می‌شود و با توجه به اینکه تصویری در ادامه دوره رشد گیاه



شکل ۷- رطوبت خاک برآورد شده از ماهواره Landsat 7 در شش زمان مختلف

Figure 7- Soil moisture estimated from the Landsat 7 satellite at six different times

جدول ۱- مقایسه رطوبت خاک تخمین‌زده با تصاویر ماهواره Landsat 7 و اندازه‌گیری شده میدانی

Table 1- Comparison of estimated soil moisture with Landsat 7 satellite imagery and field measurements

زمان تصویربرداری (وضعیت هوا)	رطوبت خاک تخمین‌زده با Landsat 7 (m ³ /m ³)	رطوبت خاک اندازه‌گیری شده (m ³ /m ³)	خطای نرمال شده (NRMSE%)
Imaging time (weather conditions)	Soil moisture estimated by Landsat 7 (m ³ /m ³)	Soil moisture measurement (m ³ /m ³)	Normalized root-mean-square error (%)
۱۲ نوامبر ۲۰۱۲ (صاف) 12 Nov 2012 (clear)	0.06	0.34	18
۲۸ نوامبر ۲۰۱۲ (ابرناکی) 28 Nov 2012 (cloudy)	0.58	0.23	
۱۴ دسامبر ۲۰۱۲ (تا حدودی ابر) 14 Dec 2012 (Somewhat cloudy)	0.07	0.32	
۳۰ دسامبر ۲۰۱۲ (ابرناکی) 30 Dec 2012 (cloudy)	0.85	0.31	
۱۶ فوریه ۲۰۱۳ (صاف) 16 Feb 2013 (clear)	0.15	0.32	
۴ مارس ۲۰۱۳ (صاف) 4 Mar 2013 (clear)	0.13	0.24	

نتیجه‌گیری

هدف از تخمین رطوبت خاک در این مطالعه، آماده‌سازی اطلاعات برای استفاده در مدل‌های گیاهی است که نتایج قابل اعتماد می‌باشد. در زمانی که کاربر از مدل‌های گیاهی جهت تخمین عملکرد محصول استفاده می‌کند نیاز به اطلاعات هواشناسی، گیاهی و آب دارد که با این روش با در اختیار داشتن اطلاعات رطوبتی خاک تا حدودی برای محاسبه عملکرد محصول با دقت عمل شود بنابراین در این مقاله با استخراج تصاویر ماهواره Landsat 7 با وضوح ۳۰ متری سطح زمین در منطقه دشت نیشابور و اندازه‌گیری تغذیه ورودی آب به زمین در وسعت ۱۳ هکتار با روش آبیاری بارانی جهت تخمین رطوبت انجام شد. با توجه به اینکه شش تصویر در طی دوره کشت محصول گندم موجود بود باندهای ۳ و ۴ این تصاویر در مقابل یکدیگر قرار گرفتند و با مدل ابر- آب تصحیحات اتمسفری صورت پذیرفت که با محاسبه شیب خط برازش داده شده و ترسیم فضای هندسی مثلثی شکل مقدار رطوبت حجمی به صورت میانگین محاسبه شد و با رطوبت اندازه‌گیری شده توسط سنسور رطوبتی REC در محل مقایسه شد و شاخص آماری ۱۸ درصد نشان داد در صورتی که مقایسه در روزهای ابری صورت نپذیرد نتایج رضایت‌بخش است. پیشنهاد می‌شود جهت افزایش دقت بررسی محاسبه رطوبت به روش‌های مختلف دیگر و نیز انتخاب سایر ماهواره‌ها جهت مقایسه دقیق‌تر انجام شود، ضمن اینکه می‌توان محصول‌های دیگر را نیز بررسی نمود به دلیل اینکه پوشش گیاهی هر محصول می‌تواند تاثیرگذار باشد. همچنین از محدودیت‌های تحقیق می‌توان به تعداد کم تصویربرداری در برخی از کشورها اشاره نمود که سبب می‌شود تعداد مقایسه‌ها کاهش یابد.

بدلیل اینکه آبیاری به صورت بارانی انجام شده و در این روز طبق شکل ۲ تغذیه ورودی صورت نگرفته بنابراین پهنه‌بندی رطوبت منطقی به نظر می‌رسد. در ۲۸ نوامبر در قسمت شمالی زمین رطوبت بیشتر است و هر چه به سمت جنوب حرکت می‌کنیم رطوبت کاهش می‌یابد بنابراین میانگین رطوبتی برای آن روز طبق تکنیک سنجش از دور برابر ۰/۵۸ بدست آمد که در جدول ۱ مقادیر رطوبتی آمده است ضمن اینکه وضعیت هوا در آن روز ابری بوده و خطای بیشتری در تصویربرداری بوجود آمده بود. همان‌طور که در شکل ۲ تغذیه ورودی نشان داده شد در این ماه تغذیه به ۳۰ میلی‌متر می‌رسد اما در اوایل دسامبر تغذیه کم می‌شود و در ۱۴ دسامبر هم گویای این مطلب می‌باشد ولی در اواخر دسامبر تغذیه در خاک در اثر بارندگی و آبیاری افزایش می‌یابد و مطمئناً رطوبت تخمین‌زده توسط تکنیک سنجش از دور بالاتر می‌باشد که میانگین رطوبتی به ۸۵ درصد رسید ولی بدلیل عدم تطابق زمانی در ساعت تصویربرداری و همچنین محاسبه رطوبت به صورت میانگین تفاوت در مقدار عددی ملاحظه می‌شود ضمن اینکه وضعیت هوا ابری بوده است. در ۱۶ فوریه و ۴ مارس ۲۰۱۳ با توجه به اینکه گیاه رفته رفته به رشد خود ادامه می‌دهد و روند صعودی دما را شاهد هستیم مطابقت مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده با تکنیک سنجش از دور بیشتر می‌شود. بنابراین در جدول ۱ شاخص NRMSE برابر ۱۸ درصد بدست آمد و چون مقدار شاخص بین ۱۰ تا ۲۰ درصد می‌باشد نتایج نسبتاً خوب است و با توجه به اینکه در ۲۸ نوامبر و ۳۰ دسامبر وضعیت ابرناکی بود دقت در مجموع پایین آمد که با حذف آن‌ها نتایج از رضایت کافی برخوردار است (۲۴).

این مطالعه به عنوان طرح مصوب رساله دکتری به شماره ۵۱۷۶۰ در دانشگاه فردوسی مشهد در گروه آب مورد تایید قرار گرفته است و ضمن ادامه پژوهش در قالب طرح تحقیقاتی، بدین وسیله از معاونت مالی دانشگاه فردوسی مشهد و سایر اساتید گروه تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

این روش در مزرعه‌های چندین هکتاری دقت بیشتری دارد بدلیل اینکه وضوح تصویربرداری به صورت موزاییک‌هایی با ابعاد معمولاً چند متری است که هرچه تعداد این موزائیک‌ها بیشتر باشد دقت بالاتر خواهد رفت.

سپاسگزاری

منابع

- 1- Pasolli L., Notarnicola C., Bertoldi G., Della Chiesa S., Niedrist G., Bruzzone L., et al. 2014. Soil moisture monitoring in mountain areas by using high-resolution SAR images: Results from a feasibility study. *European journal soil science* 65(6): 852-64.
- 2- Verstraeten WW., Veroustraete F., Van Der Sande CJ., Grootaers I., and Feyen J. 2006. Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests. *Remote Sensing of Environment* 101(3): 299-314.
- 3- Wagner W., Naeimi V., Scipal K., Jeu R., and Martínez-Fernández J. 2007. Soil moisture from operational meteorological satellites. *Hydrogeol Journal* 15(1):121-31.
- 4- Peng J., Loew A., Merlin O., and Verhoest NEC. 2017. A review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture. *Reviews of Geophysics* 55(2): 341-66.
- 5- Verhoest NEC., Lievens H., Wagner W., Álvarez-Mozos J., Moran MS., and Mattia F. 2008. On the soil roughness parameterization problem in soil moisture retrieval of bare surfaces from synthetic aperture radar. *Sensors* 8(7): 4213-48.
- 6- Li B., Ti C., Zhao Y., and Yan X. 2016. Estimating soil moisture with Landsat data and its application in extracting the spatial distribution of winter flooded paddies. *Remote Sensing* 8(1).
- 7- Bao Y., Lin L., Wu S., Kwal Deng KA., and Petropoulos GP. 2018. Surface soil moisture retrievals over partially vegetated areas from the synergy of Sentinel-1 and Landsat 8 data using a modified water-cloud model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 72: 76-85.
- 8- Mohamed ES., Ali A., El-Shirbeny M., Abutaleb K., and Shaddad SM. 2019. Mapping soil moisture and their correlation with crop pattern using remotely sensed data in arid region. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 23(3) 347-353.
- 9- Montaldo N., Fois L., and Corona R. 2021. Soil moisture estimates in a grass field using sentinel-1 radar data and an assimilation approach. *Remote Sensing* 13(16): 1-25.
- 10- Rabiei S., Jalilvand E., and Tajrishy M. 2021. A method to estimate surface soil moisture and map the irrigated cropland area using sentinel-1 and sentinel-2 data. *Sustainability (Switzerland)*, 13(20).
- 11- Zaki M. Estimation of groundwater recharge from irrigated fields using zero flux method. Msc thesis. 2013. (In Persian with English abstract)
- 12- Carlson TN., and Petropoulos GP. 2019. A new method for estimating of evapotranspiration and surface soil moisture from optical and thermal infrared measurements: the simplified triangle. *International journal remote sensing* 40(20): 7716-29.
- 13- Tuttle SE., and Salvucci GD. 2014. A new approach for validating satellite estimates of soil moisture using large-scale precipitation: Comparing AMSR-E products. *Remote Sensing of Environment* 142: 207-22.
- 14- Attema EPW., and Ulaby FT. 2016. Prevalence of anemia in patients with diabetic kidney disease. *Abstract book - 29th European Diabetic Nephropathy Study Group Meeting* 13(2): 357-64.
- 15- Kumar K., Suryanarayana Rao HP., and Arora MK. 2015. Study of water cloud model vegetation descriptors in estimating soil moisture in Solani catchment. *Hydrological Processes* 29(9): 2137-48.
- 16- Park SE., Jung YT., Cho JH., Moon H., and Han S hoon. 2019. Theoretical evaluation of water cloud model vegetation parameters. *Remote Sens* 11(8).
- 17- de Wit A., Boogaard H., Fumagalli D., Janssen S., Knapen R., and van Kraalingen D. 2019. 25 years of the WOFOST cropping systems model. *Agricultural Systems* 168: 154-67.
- 18- Zhan ZM., Qin QM., Ghulan A., and Wang DD. 2007. NIR-red spectral space based new method for soil moisture monitoring. *Science in China, Series D: Earth Sciences* 50(2): 283-9.
- 19- Foroughi H., Naseri A., Nasab SB., Hamzeh S., and Scott B. 2019. Presenting a New Method for Soil-moisture Estimation Using Optical Remotely-sensed Imagery. *Iranian journal of soil and water research* 50(3):641-52. (In

Persian with English abstract)

- 20- Babaeian E., Sadeghi M., Franz TE., Jones S., and Tuller M. 2018. Mapping soil moisture with the OPTical TRAppezoid Model (OPTRAM) based on long-term MODIS observations. *Remote Sensing of Environment* 211: 425–40.
- 21- Sadeghi M., Babaeian E., Tuller M., and Jones SB. 2017. The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. *Remote Sensing of Environment* 198: 52–68.
- 22- Richardson AJ., and Wiegand CL. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 43(12): 1541–52.
- 23- Welikhe P., Quansah JE., Fall S., and McElhenney W. 2017. Estimation of Soil Moisture Percentage Using LANDSAT-based Moisture Stress Index. *Journal of Remote Sensing & GIS* 06(02).
- 24- Mousavizadeh SF., Honar T., and Ahmadi SH. 2016. Assessment of the AquaCrop Model for simulating canola under different irrigation managements in a semiarid area. *International Journal of Plant Production* 10(4): 425–46.
- 25- Petropoulos GP., Ireland G., Srivastava PK., and Ioannou-Katidis P. 2014. An appraisal of the accuracy of operational soil moisture estimates from SMOS MIRAS using validated in situ observations acquired in a Mediterranean environment. *International Journal of Remote Sensing* 35(13): 5239-5250.
- 26- Ihlen V., USGS. 2019. Landsat 7 (L7) Data Users Handbook. USGS Landsat User Serv .7:151.
- 27- Geng SHU., and Supit I. 1986. *Agricultural and Forest Meteorology* 36: 363–76.



Soil Moisture Estimation Method Using Remote Sensing Technique by Landsat Satellite

S.F. Mousavizadeh¹- H. Ansari^{2*}- A. Faridhosseini³

Received: 24-07-2021

Accepted: 15-12-2021

Introduction: In the last decade, satellite-based methods, including remote sensing and microwave methods, have been used in many studies to detect soil surface moisture regionally. Thermal remote sensing method is quite effective for checking moisture for bare soil but shows poor correlation for vegetated surfaces. In addition, there is a widespread use of this method in the presence of temperature differences during the day. Satellite imagery enables the ability to measure humidity according to the environmental conditions at the surface. Thus, compared to field measurements, remote sensing techniques are promising because they are capable of spatial measurements at a relatively low cost. Water supply is one of the main causes of evapotranspiration, which can affect it. Soil moisture can be considered as the most direct and important variable describing drought and is the main parameter describing water circulation and energy exchange between the surface and the atmosphere. Scale reduction methods for soil moisture can be divided into three main groups including satellite-based method, GIS data and model-based methods. The same methods have been used extensively in monitoring soil moisture for different spectral patterns at different wavelengths, from visible to microwave remote sensing data. Spectral reflectance decreases with increasing soil moisture in the visible and near-infrared (NIR) range. Therefore, these methods can be used to estimate soil moisture using satellite data for water budgeting and other meteorological and agricultural applications.

Materials and Methods: In this study, using the information provided by Zaki (2013), the measured humidity by the sensor was compared with the humidity obtained from the satellite. The soil moisture were measured in 16 points from an area of 13 hectares from Neyshabour plain of Khorasan Razavi province. The novelty of this study is to provide a simple method for using Landsat 7 satellite imagery to estimate the surface moisture of areas of the Earth to eliminate field sampling and optimal use for agriculture. One of the advantages of this method is the reduction of information obtained from the field as input values for crop modeling that can be used to estimate crop yield, so the moisture measured during the winter wheat crop period from November 2012 to March 2013 was used.

Results and Discussion: The placement of band numbers 3 and 4 opposite each other to calculate M, the line equation was fitted. Since satellite imagery is not performed daily by satellite, six images were extracted during the growing season. On November 12, which is actually 12 days after planting, the plant is entering the germination stage and the soil is mostly bare. Because the satellite does not receive enough reflected green light, the accuracy of the image in measuring soil moisture decreases, but after the plant grows, the green light is reflected and the amount of digital digit of band 4 is affected, as a result, the amount of moisture in the plant leaves and stem is involved in measuring soil moisture, which is consistent with the results obtained by Petropoulos et al.

Conclusion: In general, the results of this study showed that the simple and efficient Red-NIR spatial geometry model has a great ability to estimate soil surface moisture in favorable weather conditions and this method can be used for plant modeling as input data.

Keywords: Mathematical calculations, Red-NIR spatial geometry model, Spectral reflection, Soil water

1, 2 and 3- Ph.D. Candidate, Professor and Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

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

DOI: 10.22067/JSW.2021.71524.1070

مقاله پژوهشی

کاربرد سطح فاز زمین ریخت در افزایش خلوص واحدهای نقشه خاک در رودیکرد ژئوپدولوژی

فاطمه ابراهیمی میمند^۱ - حسن رمضانپور^{۲*} - نفیسه یغمائیان^۳ - کامران افتخاری^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳

چکیده

تفکیک صحیح واحدهای زمین نما گام مهمی در مدیریت منابع اراضی و خاک در جهت نیل به توسعه پایدار و حفظ محیط زیست است. بنابراین در این پژوهش کارایی نقشه‌های ژئوپدولوژی در سطح فاز زمین ریخت با هدف افزایش خلوص واحدهای نقشه، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور پس از تفکیک و ترسیم واحدهای ژئومورفیک طبق ساختار پیشنهادی روش ژئوپدولوژی در سطح زمین ریخت، بزرگترین و گسترده‌ترین واحد نقشه با استفاده از ویژگی‌های مورفومتری و پوشش گیاهی به سطح فاز زمین ریخت تفکیک گردید. پس از حفر، تشریح و طبقه‌بندی ۳۱ خاکرخ مطالعاتی، پراکندگی خاک‌های واقع شده در هر واحد نقشه فاز زمین ریخت با استفاده از احتمالات شرطی و شاخص‌های تنوع از جمله شاخص شانن، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با توجه به نرمال بودن توزیع شاخص تفرق شانن محاسبه شده، از آزمون آماری t به منظور بررسی معنی‌دار بودن تفاوت موجود بین واحدهای نقشه تفکیک شده، استفاده شد. نتایج حاصل از مطالعه نشان دهنده کاهش شاخص‌های تفرق و افزایش احتمالات شرطی در واحدهای فاز زمین ریخت در مقایسه با واحد زمین ریخت انتخابی بود. نتایج همچنان نشان داد استفاده از ویژگی پوشش گیاهی نسبت به سایر ویژگی‌های محیطی در تفکیک واحدهای فاز زمین ریخت و ارائه واحدهای نقشه‌های همگن موثر بوده است. به طوری که حداکثر احتمال مشاهده خاک‌های غالب منطقه مطالعاتی از ۳۲/۲۵ درصد در واحد زمین ریخت به ۵۲/۶۳، ۷۵ و ۸۷/۵۰ درصد در واحدهای نقشه فاز زمین ریخت افزایش و شاخص تفرق شانن نیز از ۱/۵۹ در واحد زمین ریخت به ۱/۳۶، ۰/۵۶ و ۰/۳۷ در واحدهای نقشه فاز زمین ریخت کاهش پیدا کرده است. استفاده از سایر ویژگی‌های محیطی جهت افزایش خلوص واحدهای نقشه فاز زمین ریخت در مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: احتمالات شرطی، تفرق خاک، شاخص ناهمواری زمین، نقشه ژئوپدولوژی

مقدمه

یک از آن‌ها، مشاهده نمود، بدین معنی که تفاوت میان این واحدها حداکثر و تغییرپذیری درونی آن‌ها حداقل باشد. که در نتیجه آن هر واحد نقشه خاک شامل مجموعه‌ای از محدوده‌های ترسیمی باشد که به استثنای موقعیت، در بقیه ویژگی‌ها با هم مشابه باشند. بسیاری از محققان برای دستیابی به این هدف از معیارهای ژئومورفولوژیکی که عمدتاً بر اساس شکل اراضی است، استفاده نموده‌اند (۶ و ۱۶). در همین راستا رویکرد ژئوپدولوژی^۵، یک روش سیستماتیک تجزیه و تحلیل سطوح ژئومورفیک است که با بررسی روابط خاک و ژئومورفولوژی و بر هم کنش آن‌ها اقدام به تهیه نقشه‌های پایه، جهت نقشه‌برداری خاک نموده است (۳۱). در این روش موقعیت خاک‌ها بر روی زمین نما و همچنین نقش توأم فرایندهای پدولوژیک و ریخت‌شناسی که در پیدایش، توزیع، نقشه‌برداری، رده‌بندی و مدیریت خاک‌ها موثرند، به‌عنوان مهم‌ترین فاکتورهای موثر در تفکیک

اهمیت تفکیک واحدهای اراضی به واحدهای همگن با خصوصیات مشابه مدتهاست که در مطالعات مختلف به‌عنوان یک مسئله مهم شناخته شده است و از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، در هر مطالعه تمرکز عمومی معمولاً بر روی یک موضوع خاص بوده است و مرزها براساس هدف مورد نظر ترسیم شده‌اند (۱۵). در مطالعات تهیه نقشه خاک، هدف تفکیک واحدهای خاک به گونه‌ای است که بتوان خاک‌های همگن‌تر و مشابه‌تری در هر

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان

۴- عضو هیأت علمی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کرج

(*- نویسنده مسئول: Email: hasramezanpour@yahoo.com

DOI: 10.22067/JSW.2021.72597.1094

واحدهای خاک مورد توجه قرار می‌گیرند (۴۲).

در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در ارتباط با روش ژئوپدولوژی صورت گرفته است. در اولین مطالعات صورت گرفته به مقایسه نقشه‌های تهیه شده در روش ژئوپدولوژی و روش معمول نقشه‌برداری خاک (۱ و ۱۳) و همچنین قابلیت‌ها و کارایی این روش (۱۴، ۲۶ و ۲۷) پرداخته شده است. محققان متعددی نیز از جمله احمدی ثانی و بابایی (۲)، یودمسری (۳۹)، اسفندیارپور و همکاران (۱۰)، راشد و همکاران (۲۸) و زینک (۴۲) از تلفیق روش‌های مبتنی بر اصول ژئوپدولوژیک و تکنیک‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در تهیه نقشه خاک به روش ژئوپدولوژیک استفاده کرده‌اند.

به‌طور کلی، هدف اصلی در تمامی این مطالعات، سازمان‌دهی و طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس شواهد ژئومورفولوژیکی آن‌ها در سطح زمین و استفاده از یک ساختار سلسله مراتبی می‌باشد، که متناسب با مقیاس و سطح دقت^۱ مطالعه، خاک‌ها را در این سطوح مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد (۴۱). اما نکته قابل توجه اینست که در واحدهای نقشه‌ی خاک تهیه شده در مقیاس‌های مختلف مطالعات خاکشناسی، تغییرات مکانی خصوصیات ژئومورفیک و پدولوژیک به یک اندازه نیست. به عبارت روشن‌تر در واحدهای نقشه خاک مطالعات بزرگ مقیاس (تفصیلی)، خصوصیات پدولوژیک در مقایسه با خصوصیات ژئومورفیک در فواصل کوتاه‌تری تغییر کرده و دارای تنوع بیشتری است. بنابراین رویکرد ژئوپدولوژی که بیشتر مبتنی بر تغییرات ژئومورفیک است، آنچنان‌که در مطالعات کوچک مقیاس (اجمالی) قادر به بیان تغییرات انواع خاک‌ها است در مطالعات بزرگ مقیاس در بیان این تغییرپذیری با محدودیت روبرو است (۴۲).

این نکته در مطالعات زیادی که با هدف بررسی دقت و خلوص واحدهای نقشه خاک و ارزیابی تعمیم‌پذیری نتایج داده‌های خاک منطقه نمونه به خارج از آن، در نقشه‌های تولید شده به روش ژئوپدولوژی انجام شده است مورد تأیید قرار گرفته است (۳). اسفندیارپور و همکاران (۹) در تحقیقی به منظور ارزیابی نقشه برداری خاک به روش ژئوپدولوژی با استفاده از شاخص جاکارد و شباهت نسبی نشان دادند که روش ژئوپدولوژی می‌تواند به منظور تعمیم نتایج برای واحدهای ژئومورفیک مشابه، تنها تا سطح زیرگروه، مورد استفاده قرار گیرد و برای سطوح پایین‌تر رده‌بندی خاک (فامیل و سری) از کارایی لازم برخوردار نمی‌باشد. رشیدی کوچی و همکاران (۲۹) در بررسی اثر مقیاس بر نتایج نقشه‌برداری خاک به روش ژئوپدولوژی اظهار کردند این روش قادر به برآورد و تعیین تغییرات کامل خاک‌ها و تعیین دقیق طبیعت بی‌نظم و درهم آن‌ها نمی‌باشد و کارایی این

روش، محدود به مقیاس‌های نیمه تفصیلی و کوچک‌تر است.

نتایج مطالعه کشتکار و همکاران (۲۲) که با هدف بررسی تنوع خاک‌ها در زمین‌ریخت‌های مختلف انجام شده بود نیز نشان داد که تنوع خاک‌ها در مقیاس‌های کوچک و در سطوح رده‌بندی بالا بیشتر تحت تأثیر نیروهای پیش‌برنده بیرونی قوی است، در حالی که در سطوح پایین‌تر رده‌بندی، نیروهای ذاتی و درونی که نتیجه برهم‌کنش فاکتورهای تشکیل خاک می‌باشند، ظهور پیدا می‌کند.

نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهد، مناسب‌ترین مقیاس برای روش ژئوپدولوژی، نیمه تفصیلی تا اجمالی است. در تمامی این تحقیقات اعتقاد بر این است که به‌منظور بهره‌بردن از این روش در مطالعات خاکشناسی با مقیاس‌های بزرگ‌تر، نیاز به تغییر و ویرایش راهکار موجود که در آن از زمین‌ریخت^۲ به‌عنوان آخرین سطح ساختار سلسله مراتبی زینک، استفاده شده است، می‌باشد (۴۱).

یکی از روش‌های پیشنهادی به‌منظور ویرایش راهکار مورد استفاده برای مقیاس‌های تفصیلی و بزرگ‌تر که با هدف طبقه‌بندی خاک‌ها و شناسایی تفاوت‌ها و ویژگی‌های مهم آن‌ها برای اهداف مدیریتی صورت می‌گیرد، تعریف فازهای زمین‌ریخت^۳ است. بدین معنی که با دریافت اطلاعات بیشتر به همراه جزئیات دقیق‌تر در تعریف فازها، می‌توان سیمای اراضی را تحت واحدهای یکنواخت‌تر (همگن‌تر) تفکیک نمود، به‌طوری‌که رفتارها و ویژگی‌های مشابه این واحدها بتوانند در رابطه با مدیریت و استفاده از آن‌ها مفید و موثر واقع شود. در این صورت، هر فاز زمین‌ریخت در واقع، بیانگر یک واحد نقشه مجزا خواهد بود که تغییرپذیری منطقه مطالعاتی را جهت اعمال مدیریت‌های یکنواخت بهتر و دقیق‌تر نشان می‌دهد (۸ و ۴).

سیستم طبقه‌بندی ژئوفرم در حال حاضر شامل مفهوم فاز برای هر یک از تقسیمات فرعی یک زمین‌ریخت یا هر کلاس ژئوفرم در سایر سطوح دسته‌بندی می‌باشد (۴۲). مومنی و همکاران (۲۶) اظهار داشتند، همان‌گونه که در سامانه رده‌بندی جامع خاک‌ها سری‌های خاک دارای حداکثر یکنواختی بوده و تغییرات جزئی آن‌ها جهت اهداف خاص به صورت فاز نشان داده می‌شوند، در سیستم سلسله مراتبی روش ژئوپدولوژی نیز، زیر تقسیم‌های زمین‌ریخت به‌عنوان پایین‌ترین سطح سیستم (دارای بالاترین درجه همگنی) در سطح فاز قابل تفکیک است. زینک (۴۲) عنوان کرد فازهای زمین‌ریخت را می‌توان با مشاهدات میدانی مانند درصد سنگ و سنگریزه سطحی، نوع و تراکم پوشش گیاهی و همچنین با استفاده از اطلاعات دریافت شده از مدل رقومی ارتفاع و مشتقات آن و یا شرایط هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه تعیین نمود. باقری بداغ‌آبادی و تومانیان (۴)

2- land form

3- land form phases

1- Level of detail

بررسی میزان افزایش خلوص واحدهای نقشه با استفاده از سطح فاز زمین‌ریخت نسبت به سطح زمین‌ریخت.

مواد و روش‌ها

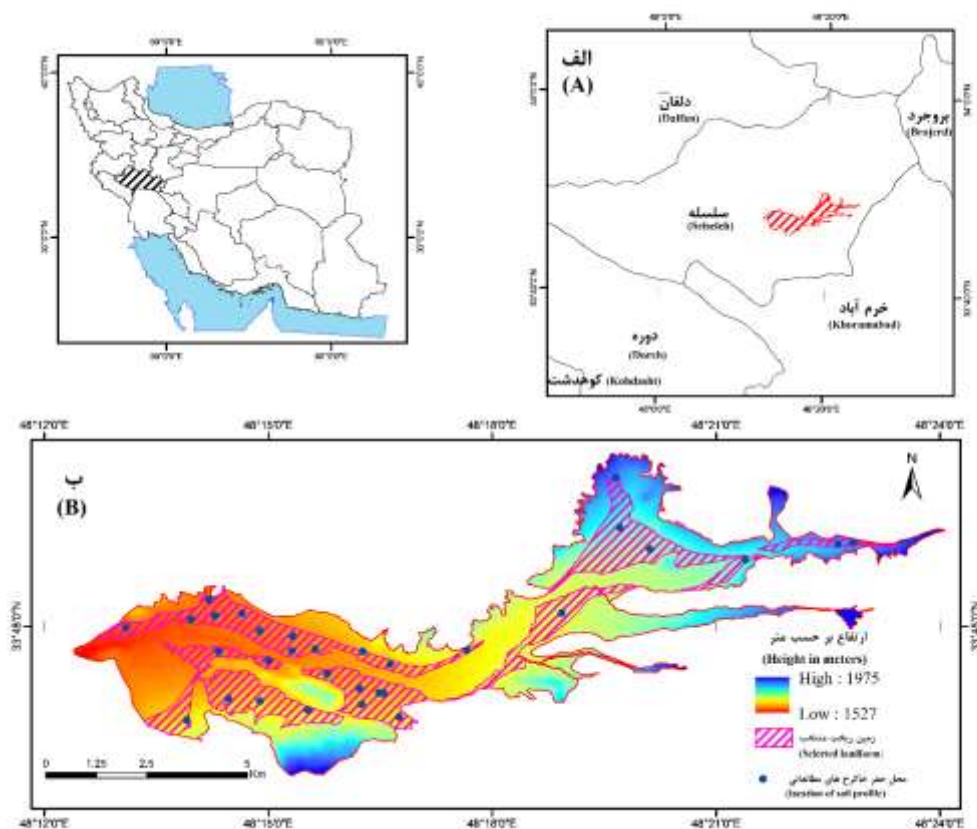
منطقه مورد مطالعه در بخشی از اراضی زیرحوضه هنام در استان لرستان، جنوب شهر الشتر، بین طول جغرافیایی $48^{\circ}12'00''$ تا $48^{\circ}13'00''$ و عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ}49'00''$ تا $33^{\circ}47'00''$ شرقی و شمالی، در مساحتی حدود ۴۰۰۰ هکتار واقع شده و دارای رژیم رطوبتی زیریک و رژیم حرارتی مزیک است (۵). کاربری اصلی اراضی در این زیر حوضه کشت آبی (گندم، جو، کلزا، انواع لوبیا، علوفه و چغندرقد) و دیم (گندم، جو و نخود) گیاهان زراعی می‌باشد. مساحت کمی از اراضی نیز به باغات میوه (گردو و میوه‌های سردسیری) اختصاص داده شده است. مهم‌ترین منبع آب سطحی زیرحوضه، رودخانه هنام است. میانگین بارندگی سالانه منطقه ۵۵۴ میلی‌متر و میانگین سالیانه دمای هوا ۸/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (۱۹).

مواردی چون جهت یا شکل شیب، نوع و تراکم پوشش گیاهی و نوع کاربری سرزمین را که در سطوح بالاتر واحدهای زمین‌ریخت‌شناختی مد نظر قرار نگرفته‌اند، جهت تفکیک فازهای زمین‌ریخت پیشنهاد داده‌اند.

چارتین و همکاران (۷)، در مطالعه‌ای در جنوب غربی پاریس از مشتقات مدل رقومی ارتفاع و ضخامت خاک جهت تفکیک زمین‌ریخت‌ها به واحدهای کوچک‌تر استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که با استفاده از علم مورفومتری می‌توان زمین‌ریخت‌ها را طبقه‌بندی و خاک‌های منطقه را بر اساس ضخامت از یکدیگر متمایز نمود.

بنابراین، به‌منظور افزایش خلوص واحدهای نقشه در راستای شناخت دقیق و همه‌جانبه‌ی تغییرات سیمای اراضی در راستای اهداف مدیریتی و همچنین امکان استفاده از این نقشه‌ها جهت تفکیک واحدهای همگن مدیریت‌پذیر، این تحقیق برای دسترسی به اهداف زیر صورت گرفت:

تعیین کارایی شاخص‌های مورفومتریک و پوشش گیاهی برای تفکیک فازهای زمین‌ریخت



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، الف) موقعیت زیر حوضه در شهرستان سلسله، استان لرستان - ب) موقعیت زمین‌ریخت منتخب و خاک‌رغ‌های مطالعاتی

Figure 1- Location map of study area, A) The location of sub-basin in Lorestan province-B) The location of selected landform and soil profile

تهیه نقشه زمین‌ریخت‌های منطقه مطالعاتی

تفکیک و ترسیم واحدهای ژئومورفیک در این مطالعه طبق ساختار پیشنهادی روش ژئودولوژی (۴۱) صورت گرفت. به‌منظور تفکیک چهار سطح طبقاتی این رویکرد که شامل زمین‌نما^۱، پستی و بلندی^۲، سنگ‌شناسی^۳ و زمین‌ریخت^۴ می‌باشد، از لایه‌های اطلاعاتی نظیر عکس‌های هوایی (مقیاس: ۱:۲۰۰۰۰)، نقشه‌های توپوگرافی (مقیاس: ۱:۲۵۰۰۰)، نقشه‌های زمین‌شناسی (مقیاس: ۱:۱۰۰۰۰۰)، مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره سنتینل ۲، منطقه مطالعاتی استفاده شد.

همچنین از سامانه اطلاعات جغرافیایی و محیط نرم‌افزار گوگل ارث برای تهیه، بررسی و تدقیق نقشه‌ی نهایی تولید شده، استفاده گردید (۲۳). پس از نهایی شدن نقشه زمین‌ریخت‌ها و کدگذاری واحدها، بزرگترین واحد این نقشه با مساحت ۱۲۲۳/۳۵ هکتار و کد واحد نقشه Pi641 که در زمین‌نمای دشت دامنه‌ای، پستی و بلندی دشت‌سر^۵، زمین‌شناسی آبرفت‌های قدیمی و تراس‌های فوقانی (Qt) و زمین‌ریخت دشت‌سر میانی واقع شده و بیشترین سطح از محدوده مطالعاتی را در بر گرفته و گستردگی خوبی در منطقه داشت، جهت انجام مطالعات صحرایی، نمونه‌برداری خاک و همچنین انجام مراحل بعدی تحقیق انتخاب گردید.

مطالعات صحرایی و نمونه‌برداری خاک

در این مرحله با توجه به مقیاس مطالعه که نیمه تفصیلی دقیق است (هر ۱۰۰۰ هکتار ۲۰ خاکرخ) و همچنین مساحت زمین‌ریخت منتخب (۱۲۲۳/۳۵ هکتار)، ۳۱ محل جهت حفر خاکرخ انتخاب گردید، به‌طوری‌که سعی گردید توزیع نقاط مطالعاتی به‌گونه‌ای باشد که قسمت‌های مختلف منطقه مطالعاتی را پوشش دهند. در بعضی مناطق به لحاظ پیچیدگی پدیده‌های موجود، فواصل نقاط مطالعاتی کمتر در نظر گرفته شد و بالعکس برای مناطق همگن‌تر فواصل بیشتری منظور گردید. سپس نسبت به حفر و نمونه‌برداری از خاکرخ‌ها اقدام و تمامی خاکرخ‌ها بر اساس راهنمای تشریح و نمونه‌برداری خاک‌ها در صحرا (۳۳) تشریح شدند و مطابق با کلید رده بندی امریکایی خاک طبقه‌بندی گردیدند (۳۷).

تفکیک فازهای زمین‌ریخت در واحد زمین‌ریخت منتخب

از آن‌جایی که هدف این پژوهش تفکیک فازهای زمین‌ریخت به‌عنوان پایین‌ترین سطح رویکرد ژئودولوژی و بررسی افزایش خلوص این واحدها نسبت به سطح زمین‌ریخت در منطقه مورد مطالعه بود، در این مرحله زمین‌ریخت منتخب به فازهای زمین‌ریخت تفکیک گردید. در این تحقیق از ژئومورفومتری که هدف اصلی آن بررسی، کمی‌سازی و استخراج ویژگی‌های شکل زمین و عوارض موجود در آن با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاع و نرم‌افزارهای پارامترسازی است، به‌منظور تفکیک فازهای زمین‌ریخت بهره برده شد (۴۱). برای این منظور از داده‌های ارتفاعی حاصل از سنجنده SRTM^۶ با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شد (۱۸). پس از انجام پیش پردازش‌های لازم بر روی مدل رقومی ارتفاع، به‌منظور جلوگیری از خطاهای پردازش در مرز منطقه مطالعاتی نیز یک حریم^۷ صد متری برای مرز منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد. سپس از نرم‌افزار SAGA GIS به‌منظور استخراج شاخص‌های مورفومتری، سامانه گوگل ارث انجین برای تهیه شاخص پوشش گیاهی و نرم‌افزار GIS برای تهیه نقشه‌های نهایی استفاده شد.

استخراج شاخص‌های مورفومتری

پس از مرور تحقیقات انجام شده در منطقه مطالعاتی (۳۴) که ویژگی‌های شیب و ارتفاع را از عوامل مهم اثرگذار بر تغییرات خصوصیات خاک‌ها در منطقه مورد مطالعه عنوان کرده بودند و همچنین بررسی‌های اولیه صورت گرفته بر روی انواع شاخص‌های مورفومتری استخراج شده، از نقشه جهت شیب و شاخص ناهمواری‌های زمین^۸ به‌عنوان شاخص‌هایی که بهتر از سایر شاخص‌ها تغییرات مورفومتری منطقه مورد مطالعه نشان می‌دادند، استفاده شد. شاخص ناهمواری‌های زمین در واقع به نوعی اختلاف ارتفاع یک پیکسل با هشت پیکسل اطراف خود می‌باشد. برای این کار ارتفاع هر پیکسل از پیکسل‌های اطراف خود کم شده و برای مثبت کردن این اعداد آن‌ها را به توان ۲ رسانده، از آن‌ها میانگین گرفته و دوباره ریشه دوم آن حساب می‌شود و به پیکسل موردنظر نسبت داده می‌شود (۳۰). این کار از طریق رابطه زیر صورت می‌گیرد که در آن P تعداد پیکسل اطراف و ZMd میانگین تفاضل ۸ پیکسل اطراف هر پیکسل می‌باشد.

$$TRI = \sqrt{\sum_{p=1}^8 ZMd}. \quad (1)$$

در این پژوهش نقشه جهت شیب و شاخص ناهمواری زمین در

6- Shuttle Radar Topography Mission
7- Buffer
8- Terrain Ruggedness Index (TRI)

1- Landscape
2- Relief/Molding
3- Lithology/Origin
4- Landform
5- Glacis

بررسی احتمالات شرطی

با توجه به این فرض که عوامل تشکیل دهنده خاک و نیز فرآیندهای خاک‌سازی در سطوح فاز زمین‌ریخت یکسان‌تر از سطح زمین‌ریخت عمل می‌کنند، در نتیجه انتظار همگنی بیشتری در این واحدها وجود دارد. به عبارتی با استفاده از نظریه آمار و احتمال می‌توان چنین بیان کرد که احتمال شرطی مشاهده یک خاک می‌تواند وابسته به واحد ژئوپدولوژی باشد. به عبارت دیگر در پائین‌ترین سطح تفکیک در رویکرد ژئوپدولوژی انتظار وجود خاک‌های یکسان‌تر می‌رود. پس به زبان ریاضی می‌توان نوشت:

$$P(\text{Soil A}|\text{Geo A}) = \alpha \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (3)$$

یعنی احتمال وجود خاک A به شرط مشاهده واحد ژئوپدولوژی A برابر مقدار α است. بنابراین، وقتی انتظار می‌رود در آخرین سطح تفکیک شده، بیشترین همگنی وجود داشته باشد به این معنی است که اگر در این واحد عمدتاً یک نوع خاک مشاهده شود مقدار احتمال شرطی برای آن خاک به یک نزدیک می‌شود (۴). نتیجه منطقی این خواهد بود که اگر احتمال شرطی خاک A به شرط واحد ژئوپدولوژی A برابر یک باشد یعنی بکارگیری رویکرد ژئوپدولوژی و یا به عبارتی تفکیک واحدها در سطح فاز زمین‌ریخت در فرآیند شناسایی خاک به خوبی توانسته است واحدهای متفاوت خاک را تفکیک کند.

بررسی شاخص‌های تنوع

شاخص‌های تنوع شامل شاخص شانن^۲، همواری^۳ و غنی‌شدگی^۴ می‌باشند. این شاخص‌ها مبتنی بر فراوانی نسبی پدیده‌های مورد مطالعه می‌باشند (۱۷). شاخص تفرق شانن به‌عنوان معیاری از غیریکنواختی^۵ ساختار یک جامعه یکی از پر کاربردترین این شاخص‌ها در مطالعات اکولوژی می‌باشد. شاخص همواری، یکی دیگر از شاخص‌های تنوع است که بیانگر فراوانی نسبی هر کدام از پدیده‌های موجود می‌باشد و در مطالعات مختلف استفاده می‌شود. کلیه شاخص‌ها و توابع مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه گردیده است. وجود شاخص‌های غنی‌شدگی و همواری بزرگتر، دلیلی بر وجود تفرق بیشتر است (۲۰).

نرم‌افزار SAGA GIS و بر پایه مدل ارتفاع رقومی برای واحد زمین‌نمای منتخب تهیه شد. سپس شاخص ناهمواری زمین در ۳ کلاس (۳۰) اراضی با ناهمواری کم، متوسط و زیاد و نقشه جهت شیب با در نظر گرفتن جهت‌های غالب شیب منطقه مطالعاتی در سه کلاس شمالی، جنوبی و جنوب شرقی طبقه‌بندی گردید.

شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی^۱

این شاخص که از طریق نسبت‌گیری باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک به دست می‌آید و به‌طور گسترده برای پایش تغییرات پوشش گیاهی به کار می‌رود، از طریق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (2)$$

در این فرمول، NIR، باند مادون قرمز نزدیک و RED باند قرمز تصاویر است. در این مطالعه در راستای در نظر گرفتن تنوع کشت و شرایط تفاوت متفاوت سبزیگی شاخص حداکثر تراکم پوشش گیاهی، با استفاده از تصاویر ماهواره سنیتل ۲ مربوط به ماه‌های خرداد تا شهریور ماه سال ۱۳۹۸ مطابق با انجام مطالعات صحرایی توسط سامانه گوگل ارث انجین استخراج گردید. بدین ترتیب بیشترین میزان تراکم پوشش گیاهی در طول دوره مطالعاتی استخراج و با عنوان NDVI_{max} برای زمین‌ریخت منتخب در نظر گرفته شد. در انتها تفکیک واحد زمین‌ریخت منتخب به فازهای زمین‌ریخت با استفاده از هر کدام از نقشه‌های تولید شده در مرحله قبل به تنهایی و همچنین تلفیق هر سه نقشه صورت پذیرفت. با جانمایی خاک‌های حفر شده بر روی نقشه‌های فاز زمین‌ریخت تهیه شده و بررسی شاخص‌های تنوع و همچنین بررسی احتمالات شرطی، همگنی واحدهای تفکیک شده از لحاظ طبقه‌بندی خاک‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

بررسی همگنی خاک‌ها در فازهای زمین‌ریخت تفکیک شده

اهمیت غیریکنواختی سیمای اراضی و شناسایی تنوع خاک، در مطالعات مختلف مد نظر قرار گرفته است. تجزیه و تحلیل احتمالات شرطی و شاخص‌های تنوع خاک به‌عنوان معیاری از تغییرپذیری خاک و یا تابعی از فاکتورهای خاک‌سازی جهت بررسی کمی این موضوع در این مطالعات استفاده شده‌اند (۲۴).

در این مطالعه جهت بررسی این موضوع که آیا به‌کارگیری رویکرد ژئومورفولوژی و تفکیک فازهای زمین‌ریخت به خوبی توانسته است در فرآیند شناسایی خاک‌ها، واحدهای همگن‌تری را تفکیک کند، هر دو معیار احتمالات شرطی و شاخص‌های تنوع مورد محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

2- Shannon
3- Evenness
4- Richness
5- Heterogeneity

1- Normalized difference vegetation index (NDVI)

جدول ۱- انواع شاخص‌های تنوع استفاده شده در این مطالعه

Table 1- Types of diversity indices used in this study

شاخص‌ها Indices	منبع Reference	فرمول Formula
شاخص تفرق شانن Shannon index		$H' = -\sum p_i \ln p_i$
شاخص همواری Evenness index	Ibanez et al, 1995	$E = H' / H_{max} = H' / \ln S$
شاخص غنا Richness index		$H' = H_{max} = \ln S$

H' = انترنپی، p_i = نسبت n_i/N ، n_i = تعداد و فراوانی اجزاء متعلق به واحد i ، N = تعداد کل اجزاء موجود در مطالعه، S = تعداد گونه‌ها یعنی تعداد اجزاء داخل هر طبقه یا واحد نقشه

H' = entropy, P_i = Ratio of n_i/N , n_i = Number and frequency of components belonging to unit i , N = The total number of components in the study, S = Number of species means the number of components within each class or map unit

جدول ۲- روابط استفاده شده جهت مقایسه‌های آماری بین شاخص‌های تفرق شانن

Table 2- Statistical Relationships used for comparisons between Shannon diversity indices

منبع Reference	فرمول Formula
واریانس شاخص تفرق (Shannon index variance)	$\text{Var } H'_i = \left\{ \left[\sum_{i=1}^n p_i (\ln p_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \right)^2 / N \right] / N \right\} + \{ (S - 1) / 2N^2 \}$
درجه آزادی (Degrees of freedom)	$d.f = (\text{Var } H'_1 + \text{Var } H'_2)^2 / \left\{ \left[\frac{(\text{Var } H'_1)^2}{N_1} \right] + \left[\frac{(\text{Var } H'_2)^2}{N_2} \right] \right\}$
آماره t (t Statistic)	$t = (H'_1 - H'_2) / (\text{Var } H'_1 + \text{Var } H'_2)^{1/2}$

H'_i = شاخص تفرق محاسبه شده، $\text{Var } H'_i$ = واریانس تفرق محاسبه شده برای واحد i ، $d.f$ = درجه آزادی، t = آماره t

H'_i = Calculated diversity index, $\text{Var } H'_i$ = Variance of Calculated diversity index for unit i , $d.f$ = Degrees of freedom, t = t Statistic

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تهیه نقشه ژئوپدولوژی منطقه مطالعاتی نشان داد این منطقه شامل دو زمین‌نمای دشت دامنه‌ای و دره می‌باشد و زمین‌نمای دشت دامنه‌ای بخش اعظم منطقه را در بر گرفته است (به دلیل محدودیت حجم مقاله، این نقشه و راهنمای مربوط به آن ارائه نشده است). در این زمین‌نما شش سطح پستی و بلندی و در زمین‌نمای دره سه سطح پستی و بلندی تفکیک گردید. از لحاظ منشا زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در پنج واحد سنگ‌شناسی قرار دارد و نهایتاً ۲۲ کلاس زمین‌ریخت در این منطقه شناسایی گردید.

لازم به ذکر است با توجه به سلسله مراتبی بودن این روش، تقسیم‌بندی واحدها از زمین‌نما به زمین‌ریخت انجام می‌گیرد و نمادگذاری نیز به نحوی انجام می‌شود که یک واحد ژئوفرم در هر سطحی که تفکیک شده باشد دارای یک کد منحصر به فرد گردد.

برای مثال نماد P_i برای نشان دادن زمین‌نمای دشت دامنه‌ای می‌باشد که در سطح اول، زمین‌نما را مشخص می‌کند. در سطح پستی و بلندی از نماد عددی مانند P_{i1} استفاده می‌شود که در اینجا P_i

مقایسه آماری بین شاخص‌های تفرق شانن

با توجه به این که بر اساس مقادیر مطلق شاخص‌های تنوع نمی‌توان راجع به معنی‌دار بودن یا نبودن تفاوت‌های موجود بین واحدهای تفکیک شده قضاوت کرد؛ بنابراین مقایسه‌های آماری بین شاخص‌های تفرق شانن محاسبه شده برای هر واحد نقشه صورت گرفت. با توجه به این موضوع که اگر شاخص تفرق شانن برای جوامع مختلف محاسبه شود، شاخص‌های محاسبه شده از توزیع نرمال تبعیت خواهند نمود (۳۸) از روابط ارائه شده در جدول ۲ استفاده شد.

در صورتی که مقداری محاسبه شده، بزرگتر از t جدول باشد؛ فرض صفر مبنی بر یکسان بودن میانگین تفرق در واحدهای مختلف نقشه رد می‌شود. بدین معنی که دو واحد نقشه مورد مقایسه از نظر تفرق خاک‌های موجود دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشند. برای این منظور واحدهای فاز زمین‌ریخت تفکیک شده با توجه به هر ویژگی به صورت دو به دو با هم مورد مقایسه قرار گرفته و معنی‌دار بودن اختلاف شاخص تفرق شانن برای آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

اینسپتی سول و زیر رده‌های هاپلو زریپتز و کلسی زریپتز رده‌بندی شده‌اند.

شکل ۲، نقشه‌های فاز زمین‌ریخت تفکیک شده با استفاده از شاخص‌های جهت شیب، شاخص ناهمواری‌های زمین و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی و محل حفر خاک‌های مطالعاتی به همراه کد طبقه‌بندی هر خاک را نشان می‌دهد. در این مطالعه برای نشان دادن سطح فاز در کدگذاری از نماد عددی و برای نشان دادن ویژگی تفکیک کننده فاز از حرف N برای ویژگی پوشش گیاهی، از حرف A برای جهت شیب و از حرف T برای شاخص ناهمواری استفاده شد. لازم به ذکر است زمانی که هر سه ویژگی در تفکیک فاز مورد توجه قرار گرفته‌اند، فقط از اعداد ۱ تا ۱۱ برای کدگذاری فازهای اول تا یازدهم استفاده شده است (شکل ۲).

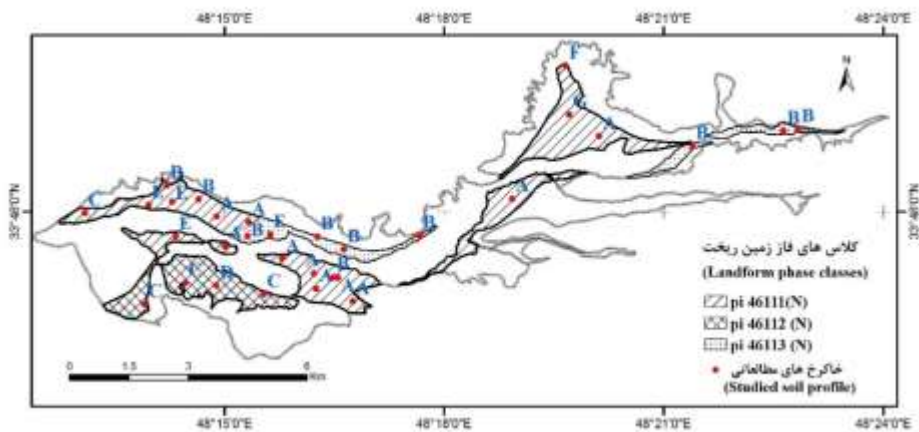
نشان دهنده زمین‌نما و عدد 1 نشان دهنده پستی و بلندی می‌باشد. اگر در این سطح، دو واحد شناسایی گردد به این معنی که در یک زمین‌نما دو نوع پستی و بلندی تشخیص داده شود، واحدهای تفکیک شده را به صورت Pi1 و Pi2 روی نقشه نشان می‌دهیم. برای سطوح بعدی نیز به همین صورت نمادگذاری انجام می‌شود. برای نمونه، در کد Pi461 مربوط به زمین‌ریخت منتخب، نماد Pi نشان دهنده زمین‌نمای دشت دامنه‌ای، 4 نشان دهنده پستی و بلندی دشت‌سر، 6 نشان دهنده سنگ شناسی (رسوبات کواترنری دانه درشت و ریز) و 1 نشان دهنده زمین‌ریخت دشت‌سر میانی می‌باشد.

جدول ۳ خاک‌های واقع شده در واحد ژئوفرم Pi461 با مساحت هکتار به‌عنوان بزرگترین و گسترده‌ترین زمین‌ریخت منطقه مطالعاتی و تعداد هر کدام از آن‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود خاک‌های واقع شده در این زمین‌ریخت در رده

جدول ۳- خاک‌های واقع شده در واحد زمین‌ریخت منتخب به همراه تعداد مشاهده هر کدام

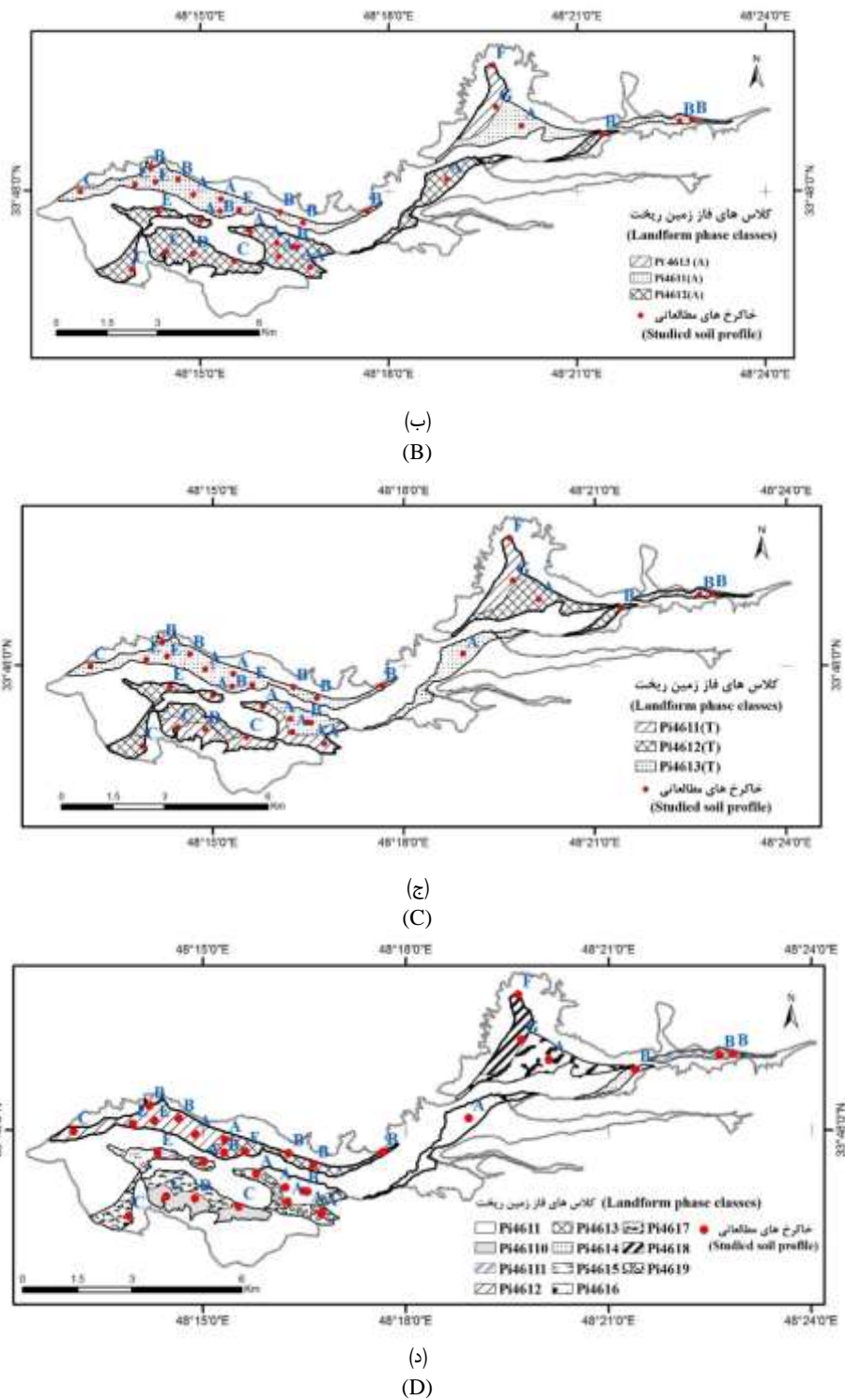
Table 3- Located Soils in the selected landform unit with observations number

رده‌بندی خاک‌ها در سطح فامیل خاک Soil family	کد خاک Soil code	تعداد مشاهده Number of observation
Fine, mixed, mesic, Vertic Haploxerepts	A	10
Fine, mixed, mesic, Typic Haploxerepts	B	10
Fine, mixed, mesic, Typic Calcixerepts	C	4
Fine loamy, mixed, mesic, Typic Calcixerepts	D	1
Fine, mixed, mesic, Vertic Calcixerepts	E	4
Fine, carbonatic, mesic, Typic Calcixerepts	F	1
Fine loamy, carbonatic, mesic, Typic Calcixerepts	G	1



(الف)

(A)



شکل ۲- نقشه تفکیک زمینریخت منتخب به فاز زمینریخت با استفاده از شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (الف)، جهت شیب (ب)، شاخص ناهمواری (ج)، تلفیق هر سه شاخص (د)
(راهنمای نقشه کلاس‌های فاز زمینریخت در جدول ۴ ارائه شده است)

Figure 2- Separation of selected landform unit to phase of landform units using Normalized difference vegetation index (A), Aspect (B), Terrain Ruggedness Index (C), incorporation of these 3 indexes (D)
(Legend of landform phase maps is given in Table 4)

است. اما زمانی که هر سه ویژگی برای تفکیک فاز مورد استفاده قرار می‌گیرند ۱۱ فاز زمین‌ریخت (Pi4611 برای اولین فاز تا Pi46111 برای فاز یازدهم) قابل جداسازی می‌باشد.

در جدول ۴ راهنمای نقشه‌های فاز زمین‌ریخت، به همراه مشخصات جداکننده فازها ارائه شده است. همانطور که این جدول نشان می‌دهد، زمانی که زمین‌ریخت منتخب بر اساس فقط یک ویژگی به فازهای زمین‌ریخت تفکیک می‌شود، سه فاز قابل جداسازی

جدول ۴- راهنمای نقشه‌های فاز زمین‌ریخت
Table 4- Legend of landform phase maps

واحد زمین‌ریخت Landform unit	مشخصات Characteristics	ویژگی جداکننده فاز Phase separator feature	واحد فاز زمین‌ریخت Landform phase unit	مشخصات Characteristics
Pi461	(Landscape: Piedmont plain, Relief / molding: Glacis, Lithology: coarse and fine grain quaternary deposits, Landform: Middle glacis)	شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) (الف)	Pi4611(N)	پوشش گیاهی: متوسط (Vegetation: Medium)
			Pi4612 (N)	پوشش گیاهی: کم (Vegetation: Low)
			Pi4613 (N)	پوشش گیاهی: زیاد (Vegetation:High)
		جهت شیب (Aspect) (ب)	Pi4611(A)	جهت شیب: جنوبی (Aspect: to the South)
			Pi4612 (A)	جهت شیب: شمالی (Aspect: to the North)
			Pi4613 (A)	جهت شیب: جنوب شرقی (Aspect: to the Southeast)
		شاخص ناهمواری‌های زمین (TRI) (ج)	Pi4611(T)	ناهمواری: زیاد (TRI:High)
			Pi4612 (T)	ناهمواری: متوسط (TRI:Medium)
			Pi4613 (T)	ناهمواری: کم (TRI:Low)
		شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی، جهت شیب، شاخص ناهمواری (NDVI, Aspect and TRI) (د)	Pi4611	پوشش گیاهی: متوسط - ناهمواری: کم - جهت شیب: شمالی (Medium vegetation, Low TRI, to the North Aspect)
			Pi4612	پوشش گیاهی: متوسط - ناهمواری: کم - جهت شیب: جنوبی (Medium vegetation, Low TRI, to the South Aspect)
			Pi4613	پوشش گیاهی: زیاد - ناهمواری: کم - جهت شیب: جنوبی (High vegetation, Low TRI, to the South Aspect)

Pi4614	پوشش گیاهی: زیاد- ناهمواری: متوسط- جهت شیب: شمالی (High vegetation, Medium TRI, to the North Aspect)
Pi4615	پوشش گیاهی: متوسط- ناهمواری: متوسط- جهت شیب: شمالی (Medium vegetation, Medium TRI, to the North Aspect)
Pi4616	پوشش گیاهی: متوسط- ناهمواری: متوسط- جهت شیب: جنوبی (Medium vegetation, Medium TRI, to the South Aspect)
Pi4617	پوشش گیاهی: کم- ناهمواری: متوسط- جهت شیب: شمالی (Low vegetation, Medium TRI, to the North Aspect)
Pi4618	پوشش گیاهی: متوسط- ناهمواری: زیاد- جهت شیب: جنوب شرقی (Medium vegetation, High TRI, to the Southeast Aspect)
Pi4619	پوشش گیاهی: متوسط- ناهمواری: زیاد- جهت شیب: شمالی (Medium vegetation, High TRI, to the North Aspect)
Pi46110	پوشش گیاهی: کم- ناهمواری: زیاد- جهت شیب: شمالی (Low vegetation, High TRI, to the North Aspect)
Pi46111	پوشش گیاهی: زیاد- ناهمواری: زیاد- جهت شیب: جنوبی (High vegetation, High TRI, to the South Aspect)

اندازه باشد. بر عکس این موضوع زمانی اتفاق می افتد که کل فراوانی یک کلاس در یک مجموعه داده متمرکز شود، در این صورت آنتروپی شانن به صفر نزدیک خواهد شد. در این مطالعه تعداد خاک‌های واقع شده در هر واحد نقشه در سطح رده‌بندی فامیل، برای محاسبه و ارزیابی شاخص‌های تنوع خاک‌ها استفاده شد.

جداول ۵ و ۶ مقادیر احتمال شرطی خاک‌ها و همچنین شاخص‌های تنوع محاسبه شده را برای واحد زمین‌ریخت منتخب و واحدهای فاز زمین‌ریخت نشان می‌دهد. از نظر تئوری، شاخص تفرق شانن میزان آنتروپی را اندازه‌گیری می‌کند و بیشترین مقدار آن زمانی حاصل می‌شود که فراوانی انواع کلاس‌ها در مجموعه داده به یک

جدول ۵- مقادیر احتمال شرطی و شاخص‌های تنوع در زمین‌ریخت منتخب
Table 5- Conditional probability values and pedodiversity indices in the selected landform

زمین‌ریخت Landform	کد خاک Soil code	تعداد مشاهده Number of observation	P(X) Conditional statistics	شاخص شانن Shannon index	شاخص غنا Richness index	شاخص همواری Evenness index	مساحت Area (ha)
Pi4611	A	10	32.25	1.59	1.94	0.81	1223.35
	B	10	32.25				
	C	4	12.90				
	D	1	3.22				
	E	4	12.90				
	F	1	3.22				
	G	1	3.22				

بالاتر رده‌بندی از کارایی لازم برخوردار بوده و این موضوع توسط محققین مختلف مورد تأیید قرار گرفته است (۲۲، ۱، ۱۱ و ۲۱). همان‌طور که در جدول ۶ ارائه شده است با تفکیک واحد زمین‌ریخت به فازهای زمین‌ریخت واحد نقشه Pi461 حاوی ۳۱ خاکرخ به واحدهای کوچک‌تر تفکیک شده و کاهش تنوع خاک‌ها مورد انتظار می‌باشد. به‌عنوان مثال زمانی که زمین‌ریخت مورد نظر با توجه به ویژگی پوشش گیاهی جداسازی می‌شود سه فاز Pi4611(N)، Pi4612(N) و Pi4613(N) به ترتیب دارای تمامی ویژگی‌های زمین‌ریخت منتخب با تمایز در پوشش گیاهی متوسط، کم و زیاد تفکیک می‌شود. با توجه به نتایج جدول ۶، واحد نقشه Pi4612(N) با احتمال ۷۵ درصد مشاهده خاک C و واحد نقشه Pi4613(N) با احتمال ۸۷/۵۰ درصد مشاهده خاک B، دو واحد نقشه همگن می‌باشند. شاخص تفرق شانن این دو واحد نیز به ترتیب ۰/۵۶ و ۰/۳۷ می‌باشد که نشان دهنده یکنواختی این واحدها می‌باشد. یکنواخت شدن واحدهای نقشه همچنین زمانی که هر سه ویژگی برای تفکیک فازها مورد استفاده قرار گرفته است نیز مشاهده می‌شود. به‌طوری‌که در دو واحد Pi4619 و Pi46111 خاک‌های کاملاً مشابه با صد در صد احتمال مشاهده و شاخص تفرق صفر قرار گرفته است. سایر واحدهای تفکیک شده به جز واحد Pi4612 نیز تقریباً همگن می‌باشند. البته باید به این موضوع نیز اشاره کرد که در چهار واحد مشخص شده در جدول فقط یک خاک قرار گرفته است و محاسبه شاخص تفرق و احتمال شرطی برای این واحدها معنایی ندارد. به‌طور کلی نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد خاک‌ها در واحدهای فاز زمین‌ریخت نسبت به واحد زمین‌ریخت از نظر طبقه‌بندی در سطح فامیل یکنواخت‌تر شده‌اند. به‌عبارت دیگر عوامل تشکیل دهنده خاک و نیز فرآیندهای خاکزایی در سطح فاز زمین‌ریخت نسبت به سطح زمین‌ریخت یکسان‌تر عمل کرده و همگنی بیشتری در این واحدها دیده می‌شود. کاهش شاخص‌های تنوع و افزایش احتمالات شرطی این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد. این نتایج با نتایج حاصل از پژوهش باقری بداغ آبادی و تومانیان (۴) تطابق دارد.

همان‌طور که در جدول ۵ مشخص است زمانی که واحد زمین‌ریخت به فازهای زمین‌ریخت تفکیک نشده است و به‌عبارتی یک مجموعه داده با ۳۱ خاکرخ، حاوی ۷ نوع کلاس خاک متفاوت است، مقدار غیر یکنواختی در این واحد نقشه (Pi461) به‌عنوان یک مجموعه داده حاوی کلاس‌های خاک با توجه به شاخص تفرق شانن محاسبه شده، ۱/۵۹ می‌باشد. این شاخص برای واحدهای نقشه فاز زمین‌ریخت از صفر برای واحدهای نقشه Pi4619 و Pi46111 که به ترتیب دربرگیرنده ۳ و ۲ خاکرخ و فقط یک کلاس خاک هستند تا حداکثر ۱/۶۵ برای واحد نقشه Pi4611(T) که دربرگیرنده ۱۰ خاکرخ و ۶ کلاس خاک است، متغیر است (جدول ۶). در یک طبقه‌بندی کلی واحدهای نقشه خاک را در دو دسته یکنواخت (همگن)^۱ و ترکیبی^۲ قرار می‌دهند. در واحدهای نقشه یکنواخت تمام موقعیت‌های موجود در هر محدوده دارای خصوصیات یکسان می‌باشند و تحت یک نام یکسان در سطح طبقه‌بندی مورد نظر قرار می‌گیرند. در واحدهای نقشه ترکیبی، در هر محدوده سطوح معنی‌داری از چند کلاس خاک مختلف موجود می‌باشد. بنابراین، موقعیت‌های مختلف موجود در واحد نقشه ممکن است در سطح طبقه‌بندی مورد نظر، تحت عنوان خاک‌های متفاوت، طبقه‌بندی شوند (۳۶). با توجه به این تعاریف و همچنین نوع و تعداد خاک‌های قرار گرفته در واحد زمین‌ریخت Pi461، این واحد نقشه یک واحد ترکیبی متشکل از چندین خاک است، که در آن بیشترین احتمال مشاهده خاک‌ها مربوط به خاک A و B با ۳۲/۵ درصد احتمال می‌باشد. شاخص‌های تنوع محاسبه شده برای این واحد نیز ترکیبی بودن این واحد نقشه را به خوبی نشان می‌دهند. البته باید به این موضوع توجه کرد که این واحد زمین‌ریخت در سطوح بالای رده‌بندی دارای خاک‌های یکنواختی می‌باشد. این بدان معنی است که سطح زمین‌ریخت در رویکرد ژئوپدولوژی برای تفکیک خاک‌ها در سطوح

- 1- Homogenous map units
- 2- Compound map units

جدول ۶- مقادیر احتمال شرطی و شاخص‌های تنوع در فازهای زمین‌ریخت تفکیک شده

Table 6- Conditional probability values and pedodiversity indices in the landform phases

ویژگی جداکننده فاز Phase separator feature	فاز زمین‌ریخت Landform phase unit	کد خاک Soil code	تعداد مشاهده Number of observation	P(X)	شاخص شانن Shannon index	شاخص غنا Richness index	شاخص همواری Evenness index	مساحت Area (ha)
جهت شیب (Aspect)	Pi4611(A)	A	3	20	1.18	1.38	0.85	490.76
		B	8	53.33				
		C	1	6.66				
		E	3	20				
	Pi4612 (A)	A	7	35.7	1.33	1.60	0.82	640.57
		B	2	14.28				
		C	3	21.42				
		D	1	7.14				
		E	1	7.14				
	Pi4613 (A)	F	1	50	0.69	0.69	0.99	92.01
G	1	50						
شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)	Pi4611(N)	A	10	52.63	1.36	1.79	0.75	812.24
		B	3	15.78				
		C	1	5.26				
		E	3	15.78				
		F	1	5.26				
	Pi4612 (N)	C	3	75	0.56	0.69	0.80	244.06
		D	1	25				
	Pi4613 (N)	B	7	87.50	0.37	0.69	0.53	167.04
		E	1	12.50				
	شاخص ناهمواری‌های زمین (TRI)	Pi4611(T)	A	3	30	1.65	1.79	0.92
B			2	20				
C			2	20				
D			1	10				
F			1	10				
Pi4612 (T)		G	1	10	1.38	1.38	0.99	376.50
		A	1	25				
		B	1	25				
Pi4613 (T)		A	5	31.25	1.21	1.38	0.87	503.86
		B	7	43.75				
	C	1	6.25					
	E	3	18.75					
شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی، جهت شیب، شاخص ناهمواری (NDVI, Aspect and TRI)	Pi 4611	A	4	80	0.50	0.69	0.72	209.27
		B	1	20				
	Pi 4612	A	2	28.57	1.3	1.38	0.93	190.71
		B	2	28.57				
		C	1	14.28				
		E	2	28.57				
	pi 4613	B	4	80	0.50	0.69	0.72	103.88
		E	1	20				
	*pi 4614	B	1	100	-	-	-	27.63
	*pi 4615	E	1	100	-	-	-	47.76
*pi 4616	A	1	100	-	-	-	160.63	
*pi 4617	C	1	100	-	-	-	140.44	
pi 4618	F	1	50	0.69	0.69	0.99	92.01	
G	1	50						
pi 4619	A	3	100	0	1	-	111.81	
pi 46110	C	2	66.66	0.63	0.69	0.90	103.61	
	D	1	33.34					
pi 46111	B	2	100	0	1	-	35.52	

*فقط یک نوع خاک در این واحدها قرار گرفته است و محاسبه شاخص تنوع برای این واحدها معنایی ندارد.

*Only one soil type is located in these units so calculating the diversity index for these units is not significant.

در این مقایسه، چنانچه مقدار آماره t محاسباتی بزرگتر از t جدول باشد، فرض صفر مبنی بر معنی‌دار نبودن تفاوت تفرق خاک در دو واحد نقشه‌مطالعاتی رد می‌شود. به بیان دیگر در حالت برقراری فرض صفر، میزان تفاوت خاک‌های واقع شده در دو واحد نقشه معنی‌دار نمی‌باشد و بنابراین می‌توان با نادرست قلمداد کردن مرزبندی میان واحدها، آن دو را به‌عنوان یک واحد در نظر گرفت. وجود اختلاف معنی‌دار در شاخص‌های تفرق دو واحد از سه واحد تفکیک شده فاز زمین‌ریخت بر اساس ویژگی پوشش گیاهی نیز موید این موضوع است که این ویژگی به خوبی توانسته است نسبت به دو ویژگی دیگر با مرزبندی میان واحدها، واحدهای همگن‌تری را ارائه کند. جدول ۸ نتایج حاصل از انجام مقایسه آماری بین واحدهای فاز زمین‌ریخت که هر سه ویژگی در تفکیک آن نقش داشته‌اند را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که چهار واحد نقشه که فقط یک خاک در آن‌ها قرار گرفته است در این جدول ارائه نشده‌اند. مقایسه آماری تفرق شانن در سطح احتمال ۹۰ درصد تفاوت معنی‌داری بین اغلب واحدهای نقشه‌ی تفکیک شده نشان می‌دهد.

مقادیر شاخص‌های تنوع و همچنین احتمالات شرطی ارائه شده در جدول ۶ همچنین نشان می‌دهد که تفکیک فازهای زمین‌ریخت بر اساس ویژگی پوشش گیاهی نسبت به دو ویژگی دیگر (جهت شیب و ناهمواری سطح) واحدهای همگن‌تری را ارائه کرده است. به‌طوری‌که مقادیر شاخص تفرق در واحدهای Pi4613 (N) و Pi4612 (N) به ترتیب ۰/۳۷ و ۰/۵۶ می‌باشد. از طرفی در حالتی که هر سه ویژگی پوشش گیاهی، جهت شیب و ناهمواری سطح در تفکیک فازهای زمین‌ریخت مورد استفاده قرار گرفته‌اند، یکنواختی خاک‌ها در واحدهای تفکیک شده بیشتر شده است. اما در چهار واحد فقط یک نوع خاک قرار گرفته است. با توجه به پیچیدگی و وقت‌گیر بودن طبقه‌بندی نقشه‌های ویژگی‌های زمین‌ریخت و استفاده از هر سه آن‌ها جهت تفکیک نقشه‌های فاز و نتایج حاصل از جدول ۶ به‌نظر می‌رسد طبقه‌بندی نقشه‌های حداکثر تراکم پوشش گیاهی، جهت جداسازی فازهای زمین‌ریخت در سایر زمین‌ریخت‌های منطقه مطالعاتی نتایج قابل قبولی را ارائه دهد. مقایسه‌های آماری انجام شده بین شاخص‌های تفرق شانن محاسبه شده برای هر واحد نقشه در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷- مقایسه آماری واحدهای فاز زمین‌ریخت تفکیک شده با توجه به ویژگی‌های مختلف زمین‌ریخت

Table 7- Comparing of statistical differences between landform phase units separated according to different landform characteristics

ویژگی جداکننده نقشه فاز زمین-ریخت Phase separator feature	واحدهای نقشه Map unit code	شاخص تفرق شانن (Shannon index)	واریانس شاخص تفرق Shannon index variance	درجه آزادی Degrees of freedom	آماره t t Statistic
جهت شیب (Aspect)	Pi4611 (A)	1.18	0.032	28	0.53
	Pi4612 (A)	1.33	0.046		
	Pi4611 (A)	1.18	0.032	3	1.23
	Pi4613 (A)	0.69	0.125		
	Pi4612 (A)	1.33	0.046	4	1.54*
	Pi4613 (A)	0.69	0.125		
پوشش گیاهی (NDVI)	Pi4611 (N)	1.36	0.045	9	2.24*
	Pi4612 (N)	0.56	0.087		
	Pi4611 (N)	1.36	0.045	20	3.10*
	Pi4613 (N)	0.37	0.059		
	Pi4612 (N)	0.56	0.078	9	0.63
	Pi4613 (N)	0.37	0.059		
ناهمواری (TRI)	Pi4611 (T)	1.65	0.043	8	0.72
	Pi4612 (T)	1.38	0.093		
	Pi4611 (T)	1.65	0.043	20	1.71*
	Pi4613 (T)	1.21	0.021		
	Pi4612 (T)	1.38	0.093	6	0.49
	Pi4613 (T)	1.21	0.021		

* در سطح احتمال ۹۰ درصد معنی‌دار می‌باشد.

(Significance at 90% confidence level)*

جدول ۸- مقایسه آماری واحدهای نقشه فاز زمین‌ریخت با در نظر گرفتن هر سه ویژگی زمین‌ریخت

Table 8- Comparison of statistical differences between landform phase map units considering all 3 landform characteristics

Map unit code	کد واحد نقشه	واریانس شاخص تفرق Shannon index variance	pi 4611	pi 4612	pi 4613	pi 4618	pi 4619	pi 46110	pi 46111
pi 4611		0.0815		*	-	-	*	-	*
pi 4612		0.0392	*		*	*	*	*	*
pi 4613		0.0815	-	*		-	*	-	*
pi 4618		0.125	-	*	-		*	-	*
pi 4619		0	*	*	*	*		*	*
pi 46110		0.0914	-	*	-	-	*		*
pi 46111		0	*	*	*	*	*	*	

* در سطح احتمال ۹۰ درصد معنی‌دار می‌باشد.

(Significance at 90% confidence level)*

و ارائه واحدهای نقشه یکنواخت‌تر در سطوح پایین‌تر رده بندی نقشه‌های فاز زمین‌ریخت با توجه به ویژگی‌های محیطی زمین‌ریخت منتخب ارائه گردید. بررسی احتمالات شرطی و شاخص‌های تنوع در راستای تجزیه و تحلیل تنوع مکانی خاک‌ها در واحدهای فاز زمین‌ریخت تهیه شده نشان داد که استفاده از ویژگی پوشش گیاهی نسبت به سایر ویژگی‌های محیطی در تفکیک واحدهای نقشه همگن موثر بوده است. نتایج حاصل از مقایسه‌های آماری بین شاخص‌های تفرق نشان محاسبه شده برای هر واحد نقشه نیز نشان داد با وجود مقادیر متفاوت شاخص‌های تفرق نشان بین واحدهای نقشه تفکیک شده در سطح فاز زمین‌ریخت، تفاوت واحدها از لحاظ آماری تنها در تعدادی از آن‌ها در سطح احتمال ۹۰ درصد معنی‌دار شده است که نشان دهنده افزایش خلوص این واحدها در سطح فامیل خاک می‌باشد. به عبارت دیگر عوامل تشکیل دهنده خاک و فرآیندهای خاکزائی در سطح فاز زمین‌ریخت نسبت به سطح زمین‌ریخت یکسان‌تر عمل کرده و همگنی بیشتری در این واحدها دیده می‌شود. با توجه به نتایج این مطالعه، به منظور بررسی بهتر تنوع خاک، مطالعات تکمیلی با فواصل کمتر نمونه‌برداری و روش‌های نمونه‌برداری منظم و شبکه‌ای می‌تواند انجام گیرد. همچنین در مطالعات آتی می‌توان تنوع خاک‌ها را از دیدگاه‌های مختلف مانند تفرق ژنتیکی خاک، تفرق ویژگی‌های خاک و تفرق کارکردی خاک مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. با توجه به ویژگی‌های اثرگذار بر تشکیل و تکامل خاک‌ها در مناطق مطالعاتی سایر ویژگی‌های محیطی برای تهیه نقشه‌های فاز زمین‌ریخت می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

نتایج حاصل از این مقایسه آماری نشان می‌دهد دو واحد Pi4619 و Pi46111 دارای اختلاف معنی‌دار با تمامی واحدهای تفکیک شده می‌باشند. علت این موضوع اینست که این واحدها کاملاً همگن بوده و فقط یک نوع کلاس خاک در آن‌ها واقع شده است، به بیان دیگر دارای شاخص تفرق نشان صفر و در نتیجه واریانس صفر هستند. بر عکس این موضوع در واحد Pi4612 که ناهمگن‌ترین واحد موجود می‌باشد مشاهده می‌شود. این واحد دارای چهار کلاس خاک متفاوت و در نتیجه بیشترین شاخص تفرق نسبت به سایر واحدها (۱/۳) می‌باشد. این واحد بر خلاف دو واحد Pi4619 و Pi46111 به علت غیر یکنواختی زیاد نسبت به سایر واحدهای تفکیک شده، دارای اختلاف معنی‌داری با سایر واحدها می‌باشد. به عبارت دیگر میزان تفاوت خاک‌های واقع شده در این واحدهای نقشه معنی‌دار بوده و بنابراین می‌توان با درست قلمداد کردن مرزبندی میان این واحدها، آن‌ها را به عنوان واحدهای متمایز در نظر گرفت.

به‌طور کلی این یافته‌ها با دستاوردهای پژوهش‌های دیگر که از نقشه‌های فاز زمین‌ریخت به عنوان متغیر کمی در نقشه‌برداری رقومی خاک برای پیش‌بینی کلاس‌های خاک (۱۲ و ۳۵) و نشان دادن تغییرات و توسعه خاک (۲۳) استفاده کردند، همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد استفاده از رویکرد ژئوپدولوژی در سطح زمین‌ریخت در منطقه مورد مطالعه، در سطوح بالای رده‌بندی مفید بوده است، اما با توجه به ذات پیچیده خاک‌ها در سطوح پایین‌تر طبقه‌بندی (فامیل و سری خاک) از کارایی لازم برخوردار نمی‌باشد. لذا به منظور افزایش دقت نتایج روش ژئوپدولوژی

منابع

- 1- Abbaszadeh Afshar F., Ayoubi S.H., and Jafari A. 2018. The extrapolation of soil great groups using multinomial

- logistic regression at regional scale in arid regions of Iran. *Geoderma* 315: 36-48.
- 2- Ahmadi Sani N., and Babaie Kafaky S. 2017. Mapping of soil properties in environmental science studies based on geopedological principles using remote sensing and geo-information system (GIS). *Journal of Renewable Natural Resources Research* 8(1): 55-68. (In Persian with English abstract)
 - 3- Alijani Z., Sarmadian F., and Musavi S. 2013. Comparison of traditional and geopedologic soil surveys: a case study in kuhin, iran. *Iranian Natural Resources Journal* 67(1): 93-102. (In Persian)
 - 4- Bagheri Bodaghabadi M., and Toomanian N. 2019. Investigation of the relationship between geopedology and soil taxonomy in the soil-landscape models using conditional probabilities. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(5): 1152-1168. (In Persian with English abstract)
 - 5- Banai M.H. 1998. Soil thermal-moisture regimes map of Iran on 1:1,250,000 scales. Soil and Water Research Institute, Tehran. Iran.
 - 6- Butler D. 2001. Geomorphic process-disturbance corridors: A variation on a principle of landscape ecology .*progress in physical geography: earth and environment* 2: 237-248.
 - 7- Caroline Chartin C., Bourennane H., Salvador-Blanes S., Hinschberger F., and Macaire J.J. 2011. Classification and mapping of anthropogenic landforms on cultivated hillslopes using DEMs and soil thickness data - Example from the SW Parisian Basin, France. *Geomorphology, Elsevier* 135(1-2): 8-20.
 - 8- Esfandiarpour I., Salehi M.H., Toomanian N., and Mohammadi J. 2009. The effect of location of sample area and expert knowledge on the results of geopedological approach in soil mapping. *Journal of Soil and Water Sciences* 49: 113-147. (In Persian with English abstract)
 - 9- Esfandiarpour I., Toomanian N., Salehi M.H., and Mohammadi J. 2009. Assessing geopedological soil mapping using diversity and similarity indices (A case study: Borujen area, Chaharmahal-Va-Bakhtiari province) *Journal of Soil and Water* 23: 100-114. (In Persian with English abstract)
 - 10- Esfandiarpour I., Mohammadi J., Salehi M.H., Toomanian N., and Poch R.M. 2010. Assessing geopedological soil mapping results by statistical and geostatistical methods: a case study in the borujen region, central iran". *Catena* 82: 1-14.
 - 11- Esfandiarpour I., and Safari Y. 2014. Comparison of functional soil dispersion in two units of detailed soil map (Case study of Faradonbeh plain, Chaharmahal and Bakhtiari province). *Journal of Agricultural Science, Technology and Natural Resources, Soil and Water Sciences* 18(67): 269-277. (In Persian)
 - 12- Esfandiarpour I., Shahini-Shamsabadi M., Shirani H., Mosleh Z., Bagheri-Bodaghabadi M., and Salehi M.H. 2020. Assessment of Different Digital Soil Mapping Methods for Prediction of Soil Classes in the Shahrekord Plain, Central Iran. *Catena* 193: 104648.
 - 13- Farajnia A., and Yar Ahmadi J. 2015. Evaluation of the efficiency of geopedology method in preparing soil map and comparing it with physiographic method. *Quantitative Geomorphological Research* 4(2): 154-166. (In Persian)
 - 14- Farshad A., Udomsri S., Yadav R.D., Shrestha D.P., and Sukchan S. 2005. Understanding geopedologic is clue for improving the management of salt-affected soil in NongSuang district, NakhonRatchasima. Land Development Department, Thailand.
 - 15- Gerçek D. 2017. A conceptual model for delineating land management units (LMUS) using geographical object-based image analysis. *International Journal of Geo-information* 6(170): 1-18.
 - 16- Gessler P.E., Moore I.D., McKenzie N.J., and Ryan P.J. 1995. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographical Information Science* 9: 421-432.
 - 17- Guo Y., Gong P., and Amundson R. 2003. Pedodiversity in the United States of America. *Geoderma* 117: 99-115.
 - 18- <https://earthexplorer.usgs.gov>.
 - 19- <https://www.accuweather.com/fa/ir/alashtar>.
 - 20- Ibanez J.J., De Alba S., Bermudes F.F., and Garcia-Alvarez A. 1995. Pedodiversity: concepts and measurements. *Catena* 24: 215-232.
 - 21- Jafari A., Ayoubi S.H., Khademi H., Finke P.K., and Toomanian N. 2013. Selection of a taxonomic level for soil mapping using diversity and map purity indices: A case study from an Iranian arid region. *Geomorphology* 201: 86-97.
 - 22- Keshtkar S., Jafari A., and Farpoor M.H. 2018. The effect of environmental and pedogenic factors on soil diversity in Kerman and Lalehzar regions. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 8(1): 89-106. (In Persian with English abstract)
 - 23- Maleki S., Khormali F., Bodaghabadi M.B., Mohammadi J., Hoffmeister D., and Kehl M. 2020. Role of geomorphic surface on the above-ground biomass and soil organic carbon in a semi-arid region of Iranian loess plateau, *Quaternary International* 552: 111-121.
 - 24- McBratney A.B., and Minasny B. 2007. On measuring pedodiversity. *Geoderma* 141: 149-154.
 - 25- McKenzie N.J., and Ryan P.J. 1999. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma* 89: 67-94.
 - 26- Momeni A. 2015. Determining the geomorphic levels of sloping lands in the east and west of Alamut region of Qazvin province as basic information for soil studies. research project, Soil and Water Research Institute. (In Persian)

- Persian)
- 27- Phillips J.D., and Marion D. 2007. Soil geomorphologic classification, soil taxonomy and effects on soil richness assessments. *Geoderma* 141: 89-97.
 - 28- Rasheed M.A., Wahab M.A., and Youssef R.A. 2010. Digital geopedological mapping of some study areas in western desert, Egypt. *Journal of American Science* 6(9): 23-29.
 - 29- Rashidi Koochi Z., Esfandiarpour Borujeni I., Abbaspour A., Kamali A., and Naderi N.N. 2012. Effect of Scale and type of classification system on the results of soil mapping using geopedologic approach (a case study: damavand region, tehran province). *Journal of Water and Soil* 26(5): 1247-1256. (In Persian with English abstract)
 - 30- Riley S.J., DeGloria S.D., and Elliot R. 1999. Index that quantizes topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences* 5: 23-2.
 - 31- Rossiter D.G. 2000. *Methodology for soil resource inventories* (2nd ed.). Soil Science Division, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science (ITC), Enschede, The Netherlands.
 - 32- Rossiter D.G., and Hengl T. 2001. Technical note: creating geometrically-correct photo-interpretation, photomosaics, and base maps for a project GIS. <http://www.itc.nl/~rossiter>.
 - 33- Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C., and Broderson W.D. (Eds.). 2002. *Field Book for Describing and Sampling Soils* (2nd ed.). Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE, 228 pp.
 - 34- Sepahvand M. 2017. Modeling soil –landscape relationships for predicting the soil properties in small watersheds of middle Zagros (Case study: Rimeleh watershed, Lorestan province, Iran). Ph.D. Thesis. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.
 - 35- Shahini-Shamsabadi M., Esfandiarpour-Boroujeni I., Shirani H., and Salehi M.H. 2019. Application of soil properties, auxiliary parameters, and their combination for prediction of soil classes using decision tree model. *Desert* 24(1): 153-169.
 - 36- Soil and water research institute. 2008. *Guidelines for Soil Survey*. No: 466.
 - 37- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy* (12th ed.). NRCS, USDA.
 - 38- Taylor L.R. 1978. A variety of diversities. In: Mound I.A. et al. (eds.) *Diversity of Insect Faunas*. Ninth Symposium of the Royal Entomological Society. Blackwell.Oxford. pp. 1-18.
 - 39- Udomsri S. 2006. Application of computer assisted geopedology to predictive soil mapping and its use in assessing soil erosion prone areas: a case study of Doi Ang Khang, Ang Khang Royal Agricultural Station, Thailand. MSc. Thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, The Netherlands.
 - 40- Wilson J.P., and Gallant J.C. 2000. Secondary topographic attributes. *Terrain Analysis-Principles and Applications*. Wiley, NewYork, 87-132.
 - 41- Zinck J.A. 1989. *Physiography and soils*. Lecture-notes for soil students. Soil Science Division. Soil survey courses subject matter: K6 ITC, Enschede, The Netherlands.
 - 42- Zinck J.A. 2016. *Geopedology. An integration of geomorphology and pedology for soil and landscape studies*. 1. Twenty: Springer International Publishing.

Increasing the Homogeneity of Soil Map Units Using the Level of Landform Phase in the Geopedologic Approach

F. Ebrahimi Meymand¹- H. Ramezanpour^{2*}- N. Yaghmaeian³- K. Eftekhari⁴

Received: 16-10-2021

Accepted: 04-12-2021

Introduction: Delineating landscape into homogenous units is fundamental to managing resources and delivering sustainable development. The importance of this has long been recognized as a critical issue in various studies and it has been examined from different aspects. In soil mapping, the geopedologic approach is used for landscape classification, which was defined by Zinck (1989). This approach differentiates landscapes into landforms to increase the purity of soil map units. Therefore, the aim of this study was preparing geopedologic maps of the study area on the level of landform phases intending to make more homogeneous soil units.

Materials and Methods: Honam sub-basin in Lorestan province is one of the most important agricultural areas in the Karkheh River watershed. Soil moisture and temperature regimes of the area were Xeric and Mesic, respectively. After a primary interpretation, a geopedology map of the study area at the landform level was prepared according to the geopedologic approach. After soil surveying, 31 profiles were excavated, described, and sampled in the largest delineation of this map. Ultimately, this landform unit was differentiated to the landform phase units using morphometric features and normalized difference vegetation index. Pedodiversity index was computed for each landform phase unit to investigate the credibility of the geopedological approach for this unit. The conditional probability of each soil family was also measured in each landform phase unit to compare statistical differences between landform phase units. Furthermore, statistical comparisons were made between the Shannon indices of each unit.

Results and Discussion: The soils of the study area were classified into seven soil families according to Soil Survey Staff (2014). Based on the geopedology map, this area includes two landscapes of Piedmont plains and valleys. These two landscapes were differentiated to 6 and 3 relief/molding, respectively. Geologically, the study area has 5 lithologic units. Finally, 22 landform units were identified in this area. The area of the widest landform with the code of Pi461 was 1223.35 ha. With individual use of NDVI, TRI, and aspect map, this landform unit was differentiated into 3 phases, and with the use of these 3 maps collectively, 11 phases were differentiated. The results showed landform map unit of Pi461 with 31 soil profiles and 7 soil families has the highest value of diversity indices, such as 1.59 for the Shannon index. In addition, this map unit is a compound map unit consisting of several soils, where the highest probability of observing soils is related to soils A and B with 32.5% probability. By differentiating this landform unit into phases, the Pi461 map unit is separated into smaller units that are more homogeneous. For example, when it is separated according to the vegetation characteristics, the three phases Pi4611 (N), Pi4612 (N), and Pi4613 (N) were differentiated that have medium, low, and high vegetation, respectively. In this case, Pi4612 (N) map unit with 75% probability of soil C observation and Pi4613 (N) map unit with 87.50% probability of soil B observation are two homogeneous map units. The Shannon index of these two units is 0.56 and 0.37, respectively, which indicates the purity of these map units. The results also showed that diversity indices and conditional probabilities, respectively, were decreased and increased in most of the landform phase map unit compared to the landform map unit. The use of normalized difference vegetation index compared to other environmental features has been effective in separating the landform phase units and preparation of homogeneous map units. So, the most probability of observing the dominant soils of the study area increased from 32.25% in the landform unit to 52.63, 75.75, and 87.50% in the landform phase unit, and the Shannon index decreased from 1.59 in the landform unit to 1.36, 0.56, and 0.37 in the landform phase units. The use of other environmental features to increase the purity of the landform phase map unit is suggested in future studies.

Conclusion: Results of using geopedological approach at landform level in the study area showed that this

1, 2 and 3- Ph.D. Student, Associated Professor and Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran, respectively.

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

4- Research Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agriculture Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

DOI: 10.22067/JSW.2021.72597.1094

level is useful at highest levels of soil classification (from order to great group), but due to the complex nature of soils at lower levels of classification (family and soil series) does not have enough efficiency. Therefore, for improving the geopedology method accuracy and to present more uniform map units at lower levels of classification, landform phase maps were presented according to the environmental characteristics of the selected landform. The statistical comparisons between Shannon indices calculated for each map unit in the landform phase map showed a significant difference at the 90% probability level between most of the units, which indicates an increase in the purity of these units at the soil family level.

Keywords: Conditional probability, Geomorphology map, Pedodiversity indices, Terrain Ruggedness Index

مقاله پژوهشی

تحلیل هواشناختی بارش‌های سیل‌آسا و فراگیر در جنوب شرق ایران

مازیار محمدی^۱ - مهری اکبری^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷

چکیده

هدف از این پژوهش تحلیل هواشناختی الگوهای گردشی بزرگ مقیاس جوی بارش‌های فراگیر و سیل‌آسا در نیمه گرم سال در جنوب شرق ایران است. در ابتدا بر اساس داده‌های بارش شش ایستگاه سینوپتیک استان سیستان و بلوچستان طی دوره آماری (۲۰۱۸-۱۹۷۹)، برای استخراج روزه‌های بارشی، شدت بارش با آستانه صدک نودم و فراگیری بارش با رخداد بارش همزمان مساوی یا بیشتر از نیمی از ایستگاه‌ها تعیین شد. فراسنج‌های فشار تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، رطوبت ویژه، چرخندگی نسبی، مؤلفه‌های باد در ترازهای مختلف جو از مرکز پیش بینی‌های میان مدت اروپایی نسخه بازکاوی شده ERA5 دریافت شد. بررسی شرایط ترمودینامیکی این سامانه‌ها نشان داد که در الگوی اول پر ارتفاع تشکیل شده بر روی شبه قاره هند در تراز میانی به صورت یک مانع عمل کرده و مانع حرکت طوفان به طرف شرق شده و منجر به هدایت طوفان به سمت شرق ایران شده است. الگوی دوم به نحوه توزیع پراکندگی فشار بر روی زمین در این روز مربوط است. الکلنگ فشاری ناشی از بلاکینگ امگا مناطق جنوب شرقی ایران را تحت تاثیر قرار داده است. الگوی سوم با عمیق شدن تراف میانی اتمسفر و قرارگیری منطقه در زیر محور فرود توام بوده است. منبع رطوبتی الگوی دوم و سوم یک رودخانه اتمسفری بوده که با سوگیری شمال شرقی از استوا به حرکت درآمده و به جنوب شرق ایران رسیده است. در هر سه الگو شار رطوبت از سطح زمین تا تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برقرار بوده و مقدار رطوبت به علت چینش و ارتفاع ناهمواری‌ها از جنوب به شمال استان کاهش پیدا کرده است. از آنجا که گرمایش جهانی منجر به افزایش دمای سطح آب اقیانوس‌ها و دریاهای نامعین منابع تامین رطوبت بارش شده است، انتظار می‌رود بر اساس الگوهای شناسایی شده در این پژوهش، در این پژوهش در دهه‌های آتی شاهد بارش‌های سیل‌آسای بهاره و تابستانه‌ی بیشتری در استان سیستان و بلوچستان خواهیم بود.

واژه‌های کلیدی: بارش سیل‌آسا، بارش فراگیر، سیستان و بلوچستان

مقدمه

فرین‌های هیدرولوژیکی محسوب می‌شوند که به صورت ناگهانی و کوتاه مدت رخ می‌دهند و با فرسایش خاک و آلودگی آب همراه هستند. شکی نیست که بارندگی شدید از نظر ایمنی و رفاه انسان، آسیب رساندن به مسکن و زیرساخت‌ها و آسیب‌های محیطی و اکولوژیکی می‌تواند پرهزینه باشد. با توجه به این اثرات اگر الگوهای گردشی به وجود آورنده بارش‌ها شناسایی شوند، می‌توان از حداقل یک یا دو روز قبل با رویت آغاز توالی الگوهای مختوم به ایجاد سیل، وقع سیلاب را پیش‌بینی کرد (۴). به علاوه درک خصوصیات اقلیمی و دینامیکی حاکم بر وقوع این بارش‌های سیل‌آسا و فراگیر می‌تواند پایه‌ای برای بهبود پیش‌بینی میان مدت و بلند مدت اقلیمی باشد و در مدیریت و کاهش خسارات ناشی از آن ما را یاری کند (۳). در نتیجه در این پژوهش بارش‌های سیل‌آسا و فراگیر^۳ جنوب شرق ایران

بارش به اشکال گوناگون همواره عنصری حیاتی در سرتاسر کره زمین محسوب می‌شود اما در دوره‌های اخیر تغییر در بارش (مقدار، زمان و توزیع) تغییرات مهمی را به همراه داشته است و تاثیر عمیقی بر جوامع انسانی گذاشته است. گاهی تسریع در عوامل ترمودینامیکی (رطوبت) و دینامیکی (صعود) که موجب رخداد بارش می‌شوند سبب تشدید بارش در مقیاس زمان و مکان و در نتیجه وقوع فرین‌های اقلیمی مرطوبی همچون بارش‌های سیل‌آسا می‌شود که می‌تواند تهدیدی برای زندگی بشر باشد (۲۴ و ۳۵). بارش‌های سیل‌آسا جزء

۱ و ۲- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد و دانشیار آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی

*- نویسنده مسئول: (Email: mehryakbary@khu.ac.ir)

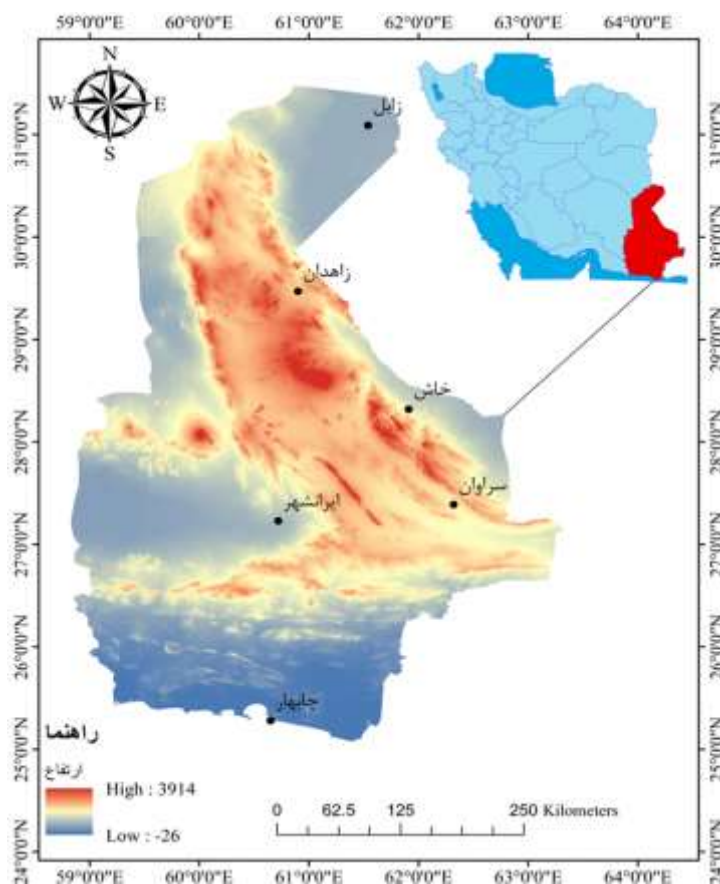
DOI: 10.22067/JSW.2022.68783.1024

فشار مدیترانه‌ای و کم فشار سودانی دانسته‌اند (۲، ۳، ۵، ۶، ۷، ۸، ۱۶ و ۲۲). سلیقه (۳۶) و عربی (۶) در تحلیل بارش‌های تابستانه جنوب شرق ایران ناشی از مونسون هند به این نتیجه رسیدند که ریزش هوای سرد عرض‌های شمالی و رویاروی آن با هوای گرم و مرطوب مونسون هند از عوامل اصلی ایجاد بارش بوده است. سلیقه (۳۷) سازوکار بارش‌های جنوب شرق ایران را مورد بررسی قرار داد و سیستم‌های ایجاد کننده بارش در این منطقه را در سه دسته تقسیم نمود. اولین سیستم سیکلون‌های هستند که به همراه بادهای غربی منطقه معتدله از سمت غرب به منطقه نفوذ می‌کنند و در فصل سرد سال و به صورت مداوم حدود ۶۰ درصد از بارش‌های آن را به وجود می‌آورند. دومین سیستم توسط موج کوتاه بادهای غربی هنگامی که تراف آن‌ها عمیق تر شده به وجود آمده که حدود ۳۰ درصد از بارش‌های منطقه را به وجود می‌آورند. سومین سیستم زبانه‌ی کم فشار مونسون هندوستان است که کمتر از ۱۰ درصد از بارش‌ها را ایجاد می‌کند. سیستم‌های دوم و سوم اغلب رگباری بوده و کمتر احتمال ریزش‌های جوی مطلوب از آن‌ها انتظار می‌رود. فرج‌زاده و همکاران (۱۴) نقش سامانه‌های موسمی را در بارش‌های تابستانه جنوب شرق ایران مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که در این منطقه، علاوه بر عامل صعود و هوای مرطوب که باعث وقوع بارش می‌شوند، پیچیدگی و موقعیت توپوگرافی منطقه می‌تواند باعث افزایش و کاهش بارش گردد. پدیده‌های بندالی موثر بر آب و هوای ایران در میان پارامترهای جوی بیشترین تاثیر را بر بارش داشته و رخداد بلاکینگ در برخی موارد می‌تواند به واسطه‌ی شدت و تداوم در یک منطقه موجب ایجاد سیل و خسارت شود. بررسی بارش‌های فرین استان بوشهر را نشان داد که وقوع بارش‌های شدید در استان بوشهر، نتیجه‌ی استقرار یک سامانه‌ی بندالی از نوع رکس یا امگا در ترازهای میانی جو و سامانه سودانی کم فشار سطح زمین در جنوب غرب ایران است (۳۴). بررسی سینوپتیکی الگوهای فشار مرتبط با بلاکینگ‌های موثر بر رخداد بارش‌های مداوم (۵ روز و بیشتر) و سنگین در ایران نشان داده که الگوی بلاکینگ امگا در پهنه‌ی ایران از فراوانی و تداوم بارش بیشتری برخوردار است (۱۱ و ۲۹).

اطلاق صفت سیل آسا به بارش تا حد زیادی تابع مکان و قلمروی جغرافیایی و شرایط اقلیمی منطقه‌ی دریافت بارش است (۵). بنابراین با توجه به وضعیت پوشش گیاهی و اقلیم خشک استان سیستان و بلوچستان، پایین بودن متوسط بارش سالانه، پتانسیل بالای این استان در نزول بارش‌های سنگین و سیل آسا که از مشخصه‌های بارز اقلیمی جنوب شرقی ایران است (۲۱ و ۳۶) و پیش‌بینی افزایش رخداد بارش‌های سیل آسا برای دهه‌های آینده در این منطقه ناشی از اثرات تغییر اقلیم (AR5)، بدیهی است که یکی از راهکارهای پیشگیری از وقوع مخاطرات طبیعی همچون سیل، درس گرفتن و آگاهی از رخداد بارش‌های سیل آسای گذشته است.

(سیستان و بلوچستان) در نیمه‌ی گرم سال (بهار و تابستان) مورد مطالعه قرار گرفته است. دوستکامیان و میرموسوی (۱۲) منطقه جنوب شرق ایران را یک منطقه با آستانه بارش شدید بسیار کم و ضریب تغییرپذیری بسیار زیاد است و میانگین آستانه بارشی در این نواحی را ۲٫۸ میلی‌متر دانسته‌اند که وجود بارش‌های کوتاه مدت، رگباری و سیل آسا از مهمترین ویژگی‌های آن است. با توجه به اینکه بارش‌های سنگین از ویژگی‌های اقلیمی مناطق خشک و نیمه خشک هستند (۳۳ و ۴۰) پس می‌توان نتیجه گرفت که در صورت وجود رطوبت کافی و عامل صعود مناسب شاهد وقوع بارش‌های سیل‌آسای در جنوب شرق ایران خواهیم بود. در عصر حاضر به دلیل تغییر اقلیم وقوع بارش‌های سیل‌آسا افزایش پیدا کرده است (۳۸، ۳۹ و ۴۲). ایران نیز از اثرات تغییر اقلیم در امان نبوده، به طوری که سرعت روند افزایش گرمایش ایران بیش از میانگین نیمکره شمالی است (۱۹) از این رو بسامد رخداد بارش‌های فرین در ایران رو به افزایش است (۱) و (۲۵). چشم‌انداز تغییر اقلیم کشور تا انتهای قرن ۲۱ میلادی که با استفاده از سناریوهای گزارش پنجم هیات بین دولتی تغییر اقلیم (AR5, IPCC) در سازمان هواشناسی کشور شبیه‌سازی شده است (۱۸) حاکی از آن است که از معدود مناطق کشور که احتمال افزایش بارش در آن وجود دارد، جنوب شرق ایران است به طوری که رفتار بارش در این منطقه به صورت ناگهانی و سیل آسا خواهد بود (۱۳، ۱۴ و ۴۱).

لذا شناخت و مطالعه این پدیده، شناسایی الگوهای سینوپتیکی، سازوکار وقوع و پراکنش زمانی و مکانی آنها در پیش‌بینی و مقابله با خطرات احتمالی آن موثر خواهد بود (۹). در ارتباط با بررسی اثرات گردش جوی بر وقوع بارش‌های فراگیر و سیل آسا و طبقه‌بندی الگوهای هم‌دید متناظر با آنها، مطالعات گسترده‌ای در سطح دنیا و ایران انجام شده که تعدادی از آنها در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی بارش‌های سنگین ماه نوامبر ۲۰۱۵ در شهر چنای یا مدرس^۱ هندوستان نشان داد که سیستم‌های همرفتی غرب اقیانوس آرام توسط انرژی حرارتی اقیانوس هند تشدید و توسعه یافته و گسترش آن‌ها به سوی شبه قاره‌ی هند توسط الگوی پر ارتفاع سطوح میانی اتمسفر، تقویت می‌شود (۱۰). بررسی الگوهای سینوپتیکی و منابع رطوبتی بارش‌های سنگین در نپال، نقش ناهمواری‌های هیمالیا در ارتباط با الگوهای اتمسفری در رخداد بارش‌های سنگین در این منطقه را حائز اهمیت می‌داند (۳۱). پژوهش‌های انجام شده در خصوص تحلیل سینوپتیکی و شناسایی الگوهای ایجاد کننده بارش‌های سیل آسا در ایران نشان داد که برخی از آنها از عوامل اصلی ایجاد کننده بارش‌های سیل آسا را حالت ادغام شده و تفکیکی، کم



شکل ۱- موقعیت جغرافیای منطقه مورد مطالعه و پراکنش ایستگاه‌های سینوپتیک در سطح منطقه
Location of the studied area and distribution of synoptic stations-Figure 1

مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای مشخص کردن روزهای با بارش سنگین و فراگیر، آمار بارش روزانه ۶ ایستگاه سینوپتیک در بازه زمانی ۲۰۱۸-۱۹۸۸ در گستره‌ی استان سیستان و بلوچستان از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. پراکنش ایستگاه‌ها به گونه‌ای است که کل منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهند (نگاره ۱). با توجه به اینکه بارش‌های کمتر از ۱ میلی‌متر ممکن است توسط عوامل محلی نیز رخ داده باشند که در مقیاس سینوپتیک قابل تشخیص نیستند؛ لذا همچون پژوهش‌های گذشته (۵، ۱۷، ۲۳، ۳۰ و ۳۲)، آستانه روز بارش ۱ میلی‌متر و بیش از آن انتخاب و روزهایی که بارش ۲۴ ساعته آن‌ها کمتر از ۱ میلی‌متر بود به عنوان روز بدون بارش مشخص و حذف شد. در ادامه بر اساس پژوهش‌های انجام شده در زمینه توزیع بارش، چون استفاده از شاخص صدک‌ها نسبت به شاخص‌های آستانه‌ای

بر همین اساس هدف از پژوهش حاضر شناسایی و تحلیل هواشناختی الگوهای گردش بزرگ مقیاس جوی ایجاد کننده‌ی بارش‌های فراگیر و سیل‌آسا در نیمه گرم سال (بهار و تابستان) در جنوب شرق ایران (استان سیستان و بلوچستان) است.

منطقه مورد مطالعه

استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرق ایران، با وسعتی برابر ۱۸۱۷۵۸ کیلومتر مربع نزدیک به ۱۱ درصد از کل مساحت کشور را در بر می‌گیرد. منطقه مورد مطالعه در حد فاصل دو عرض جغرافیایی ۲۵ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی و از ۵۸ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است (نگاره ۱). این استان از نظر بارش جز خشک‌ترین و کم باران‌ترین استان‌های کشور است و میانگین بارش سالانه آن ۱۱۰ میلی‌متر است.

بارشی در چابهار ۳۲ روز بوده است (جدول ۱). در میان این آمار با توجه به شروط تعریف شده برای انتخاب بارش‌های سیل‌آسا و فراگیر در نهایت ۳ سیستم سینوپتیکی بزرگ مقیاس و متفاوت که باعث رخداد بارش‌های سیل‌آسا در مقیاس وسیعی گشتند شناسایی شدند که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

الگوی اول: طوفان سوپر سیکلونی گونو^۳

گونو قوی‌ترین چرخند حاره‌ای است که در شرق دریای عرب تشکیل و گسترده شده است (۱۵ و ۲۷). در روز پنجم ژوئن به علت تابش شدید خورشید کشورهای حاشیه خلیج فارس و جنوب ایران تا سوریه تحت استیلای کم فشار حرارتی سطح زمین با فشار ۱۰۰۵ هکتوپاسکال بوده و چرخند حاره‌ای گونو با حرکت غرب سوی خود با منحنی بسته ۵۸۵۰ ژئوپتانسیل متر در شرق دریای عرب به خشکی‌های عمان رسیده است. از آنجا که چرخند گونو حرکت غرب‌سو داشته، در نتیجه انتظار می‌رود تحت تاثیر نیروی کوریولیس در روزهای بعدی به سوی شمال پیشروی کند. نفوذ چرخند به داخل خشکی‌های کشور عمان و دور شدن از منابع رطوبتی باعث شده که در این روز از انرژی جنبشی چرخند کاسته شده و تضعیف شود. در ادامه چرخند مسیر شمال و شمال غرب را در پیش گرفته و حاشیه شمالی چرخند به سواحل چابهار رسیده است. در سطوح میانی اتمسفر نیز یک پر ارتفاع بر روی شبه قاره هند در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در حال تکوین است. در همین زمان زبانه‌ای از پرفشار تشکیل شده بر روی جزایر اسکاندیناوی با فشار مرکزی ۱۰۲۵ تا ۱۰۳۰ هکتوپاسکال در حال تزریق هوای سرد عرض‌های شمالی از طریق ناوهی تشکیل شده در شمال دریای خزر به مناطق شمال غرب و شمال شرق ایران است. قرار گرفتن مرکز کم ارتفاع سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال بر روی مرکز کم‌فشار سطح زمین در غرب دریای مدیترانه نشان دهنده تشکیل یک چرخند دینامیکی در این منطقه بوده که با حرکت مداری خود تا نیمه جنوبی کشور پیشروی کرده است (a-1).

در ادامه و در روز ششم ژوئن، بررسی نقشه‌ها (b-1) نشان می‌دهد که در این روز چرخند گونو توسط نیروی کوریولیس به عرض‌های شمالی‌تر منتقل شده و بخش‌هایی از کشور عمان و مناطق ساحلی جنوب شرق ایران را در بر گرفته است. علی‌رغم استقرار سمت غربی چرخند بر روی خشکی‌های عمان، در این روز قرار گرفتن کم ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر روی مناطق کم فشار سطح زمین باعث تشدید واگرایی سطح بالا شده همچنین قرار گیری قسمت شرقی طوفان بر روی دریای عمان منجر به تقویت طوفان شده و گونو را از یک چرخند حاره‌ای به یک طوفان حاره‌ای تبدیل کرده است.

ارجح است (۷، ۲۶ و ۲۸) بنابراین در این پژوهش نیز از صدک ۹۰ام برای مشخص نمودن بارش سیل‌آسای هر ایستگاه به تفکیک استفاده شد. برای شاخص فراگیری بارش نیز، از بارش‌هایی که همزمان حداقل در ۵۰ درصد از ایستگاه‌ها گزارش شده بود استفاده شد. با توجه به دو ویژگی سیل‌آسا و فراگیر بودن بارش، طی ۳۰ سال روزهای مورد نظر در دوره‌ی آماری منتخب ۲۰۱۸-۱۹۸۸ مشخص و استخراج شدند. در گام بعدی برای شناسایی الگوهای سینوپتیکی جو بالای این سامانه‌های سیل‌آسا از داده‌های بازکای شده ERA۵ مرکز پیش‌بینی میان مدت اروپایی^۱ ECMWF با قدرت تفکیک مکانی $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ استفاده شد. پارامترهای جوی دریافتی شامل فشار تراز دریا (mslp)، ارتفاع ژئوپتانسیل (z)، رطوبت ویژه (q)، مؤلفه باد مداری (V)، مؤلفه باد نصف‌النهاری (U)، تاوایی نسبی (rv) و امگا (w) بودند. سپس نقشه‌های جو بالا در ترازهای مختلف با استفاده از نرم افزار گردس^۲ ترسیم شد. به منظور شناسایی روند تغییرات فشار تراز دریا (mslp) و ارتفاع ژئوپتانسیل (hpa 500)، از دو روز قبل از شروع بارش‌های سیل‌آسا و فراگیر مورد مطالعه قرار گرفتند. برای انتخاب شبکه‌ی مناسب برای نمایش الگوهای گردش، به استناد به مطالعات پیشین، در ابتدا شبکه‌ای به طول ۰ تا ۹۰ درجه‌ی شرقی و عرض جغرافیایی ۰ تا ۷۰ درجه‌ی شمالی انتخاب شد اما در ارائه الگوی دوم در این پژوهش که الگوی سلول بسته‌ی بن‌دال امگایی تکوین یافته بر روی غرب ایران است، لازم دیده شده که طول جغرافیایی منتخب به طول ۴۰ درجه شرقی جابجا شود تا شبکه‌ی منتخب برای نمایش کامل الگوهای گردشی موثر بر رخداد بارش‌های سیل‌آسا و فراگیر جنوب شرق ایران کارآمد و مناسب باشد.

نتایج

با تجزیه و تحلیل داده‌های بارش روزانه در طی بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۹۸۸-۲۰۱۸) طی ماه‌های گرم سال تعداد روزهای بارش‌های سیل‌آسا و فراگیر در استان سیستان و بلوچستان مشخص شدند و با توجه به شاخص‌های سیل‌آسا و فراگیری که پیش‌تر تعریف شدند، ۳ روز با بارش‌های سیل‌آسا و فراگیر بدست آمد که اغلب در فصل بهار رخ داده‌اند (جدول ۱). اما خلاصه‌ای از آمار بارش‌های رخ داده در استان سیستان و بلوچستان نشان داد که در ۳۰ سال گذشته شدیدترین و کمترین بارش‌های ۲۴ ساعته به ترتیب با ۹۰٫۳ میلی‌متر در چابهار و ۱۴٫۵ میلی‌متر در زاهدان رخ داده است. همچنین بیشترین تعداد روزهای بارشی در خاش ۱۱۷ روز و کمترین تعداد روزهای

1- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

2- Grads

3- Gonu Super Cyclonic Storm

جدول ۱- تعداد روزهای بارشی و شدیدترین بارش روزانه در سیستان و بلوچستان

Table 1- Number of rainy days and the Maximum daily precipitation in Sistan and Baluchestan

ایستگاه Station	حداکثر بارش روزانه Maximum Daily Precipitation	فراوانی روزهای با بارش روزانه بیش از یک میلی‌متر Number of Rainy Days with more than 1 mm rain
زابل (Zabol)	20	66
زاهدان (Zahedan)	14.5	102
ایران‌شهر (Iranshar)	31	116
خاش (Khash)	27	117
سراوان (Saravan)	14.6	100
چابهار (Chahbahar)	90.5	32

جدول ۲- آستانه‌های بارشی صدک ۹۰ام در ایستگاه‌های سیستان و بلوچستان

Table 2- Precipitation thresholds of the 90th percentile in Sistan and Baluchestan stations

تاریخ (Date)	زابل (Zabol)	زاهدان (Zahedan)	ایران‌شهر (Iranshar)	خاش (Khash)	سراوان (Saravan)	چابهار (Chahbahar)
صدک ۹۰ام ایستگاه به میلی‌متر (90 th percentile in mm)	6.5	8	8.3	7.4	8	13.4
2007/6/7	0	1.3	23	10.5	14.3	90.3
2009/3/31	3	14.5	22	16	13.8	0.7
2014/3/27	0	0.7	12	7.3	14.6	21

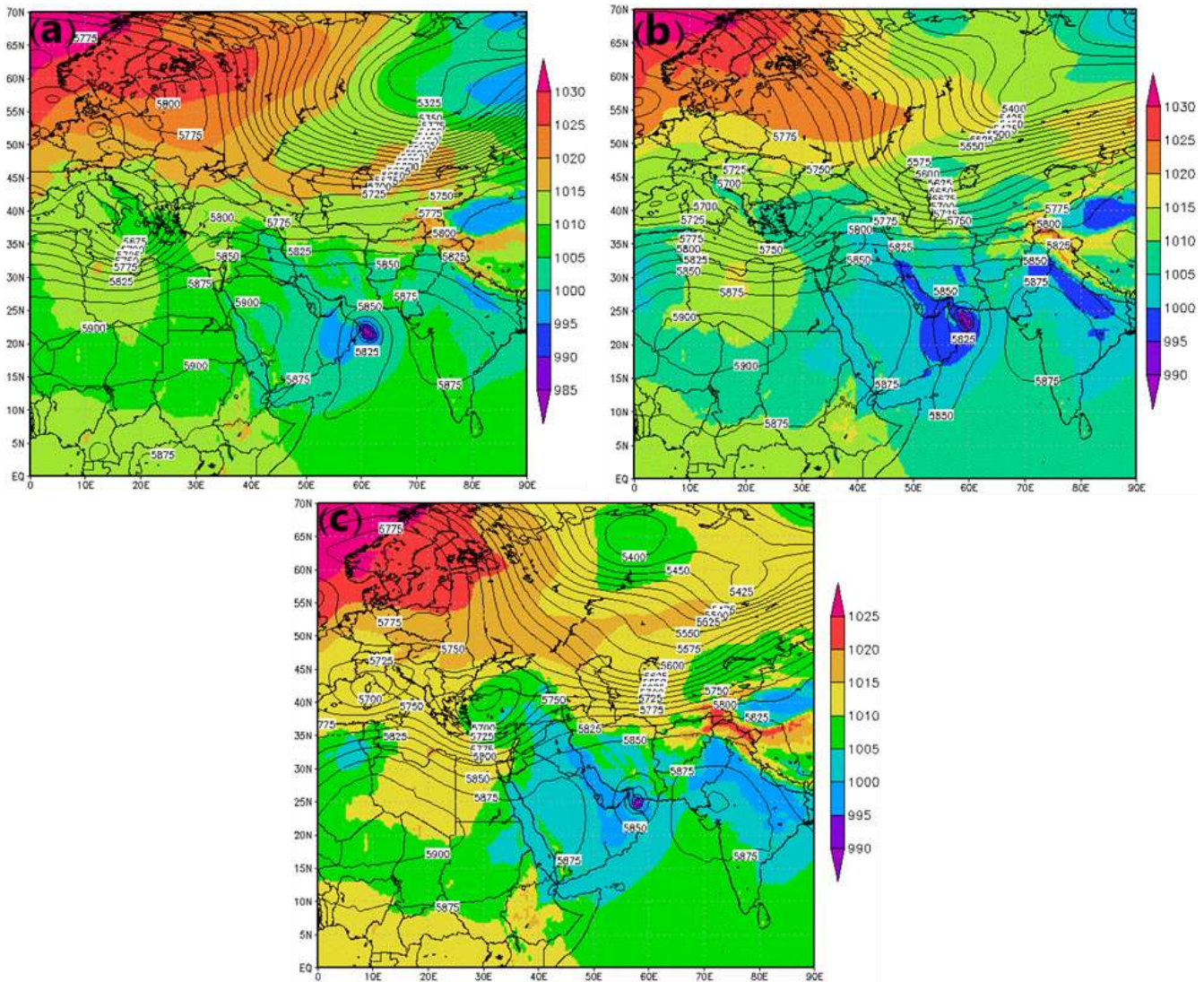
خشکی‌های ایران، قسمت مرکزی آن بر روی دریای عمان و قسمت جنوبی آن بر روی خشکی‌های کشور عمان قرار دارد هر چند که در این روز بیشترین بارش‌های ۲۴ ساعته در ایستگاه‌های سیستان و بلوچستان به ثبت رسیده است اما انرژی جنبشی طوفان به دلیل نبود هوای گرم و مرطوب در این روز با ورود به خشکی کاهش یافته و طوفان در حال ضعیف شدن است پر ارتفاعی که بر روی شبه قاره هند تکوین یافته بود در این روز تقویت شده و تا مرکز دریای عرب رسیده است و مانع حرکت طوفان به سمت شرق شده است که در تغییر مسیر طوفان کاملاً تاثیرگذار بوده است (C-1). در این روز زبانه پرفشار تشکیل شده بر روی شمال اروپا که تا شمال ایران پیشروی کرده بود عقب‌نشینی کرده است و کم ارتفاعی که در غرب دریای مدیترانه تشکیل شده بود به خشکی‌های شمال غرب ترکیه منتقل شده به علت این جابجایی ناوه شمال دریای خزر حرکت مداری را در پیش گرفته و انتقال هوای سرد عرض‌های شمال ضعیف تر شده و به

به نظر می‌رسد پر ارتفاعی که در روز قبل در شرق چرخند تشکیل شده بود در تغییر مسیر چرخند و هدایت آن به سوی جنوب شرق ایران موثر بوده و در واقع به صورت یک مانع عمل کرده است. فشار مرکزی طوفان نسبت به روز قبل ۵ هکتوپاسکال کاهش یافته و به ۱۰۰۰ هکتوپاسکال رسیده است.

همچنین پرفشار شمال اروپا مقداری ضعیف شده و عقب نشینی کرده اما در شمال ایران، ناوه شمال دریای خزر عمیق تر شده و با حرکت چرخندی خود هوای سرد را به داخل ایران تزریق کرده که منجر به ایجاد گرادیان حرارتی شدیدی در این منطقه شده که نقش شایانی در تقویت طوفان گونو داشته است. اما در روز هفتم ژوئن طوفان با جهت‌گیری جنوب شرقی - شمال غربی از جنوب وارد ایران شده است و شاهد افت شدید فشار در مناطق نزدیک به چشم طوفان بوده‌ایم که نشان از حرکت چرخندی جریان هوا در سطح زمین می‌باشد در این حالت قسمت شمالی هسته طوفان بر روی

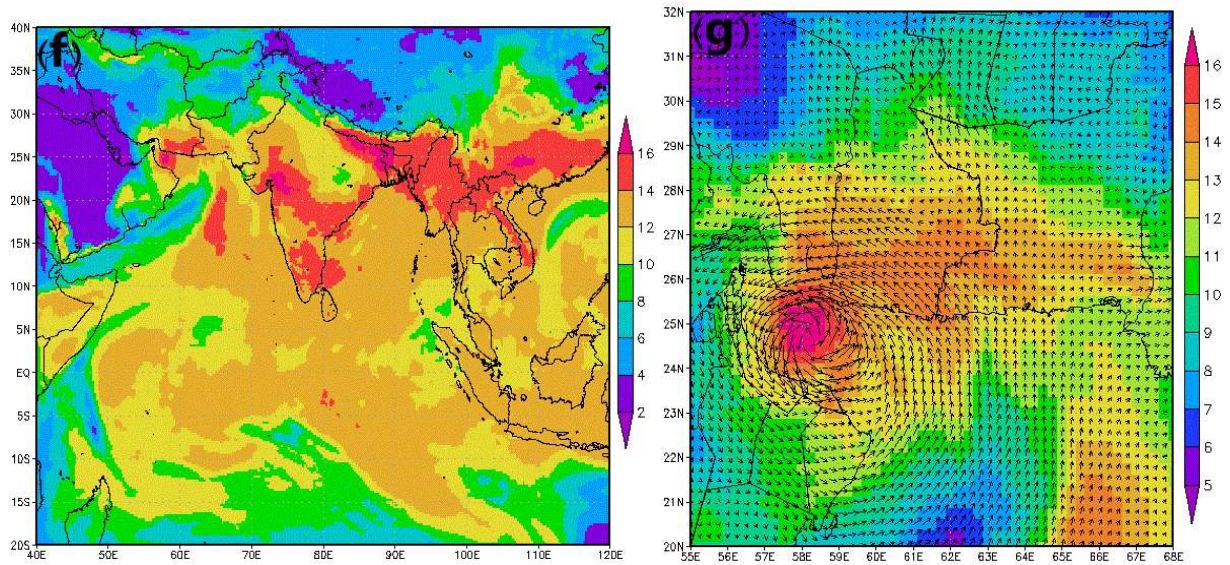
تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بوده است شدت صعود هوا در اطراف چشم طوفان به بیش از ۳٫۵ پاسکال بر ثانیه رسیده است اما در مناطقی همچون شمال زاهدان و زابل عامل صعود برقرار نبوده است (d-1) در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز تقریباً در اکثر نقاط چرخندگی مثبت بود است که نشان از واگرایی سطوح فوقانی اتمسفر بر روی استان سیستان و بلوچستان می‌باشد (f-1).

این علت گردایی حرارتی ایجاد شده در این منطقه از بین می‌رود اما انتقال هوای سرد با شدت کمتری به پشت طوفان همچنان ادامه دارد (c-1). بیشترین بارش ۲۴ ساعته طی طوفان گونو در این روز باریده است به طوری که شهرهای چابهار با ۹۰٫۵ و نیکشهر با ۲۳ میلی‌متر بیشترین بارش را در این روز داشته‌اند چون به هسته‌ای اصلی طوفان نزدیک تر بوده‌اند در نتیجه بارش بیشتری دریافت کرده‌اند زیرا هسته اصلی طوفان منطبق بر محل بیشینه شدت صعود (امگا) مناسب در



شکل ۲- (a, b, c) فشار تراز دریا (hpa) و ارتفاع ژئوپتانسیل ($m^2 s^{-2}$) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به ترتیب برای ۵، ۶ و ۷ ژوئن. (d) و (e) به ترتیب تاوایی نسبی ($s^{-1} \cdot 10^{-5}$) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و سرعت قائم جو ($s^{-1} \cdot 10^{-2}$) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به همراه ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ۷ ژوئن

Figure 2- (c, b, a) Sea level pressure (hpa) and geopotential height (m^2) of 500 hPa for June 5, 6 and 7, respectively. (a) and (b) the relative vorticity ($s^{-1} \cdot 10^{-5}$) of 500 hPa and the vertical velocity ($s^{-1} \cdot 10^{-2}$) of 700 hPa with geopotential height at 500 hPa on June 7, respectively



شکل ۳- (f) رطوبت ویژه (gr/kg^{-1}) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در مقیاس وسیع و (g) وزش رطوبتی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در روز ۷ ژوئن

Figure 3- (f) Specific humidity $(gr*kg^{-1})$ at 850 hPa on a large scale and (g) humidity advection at 850 hPa on 7 June

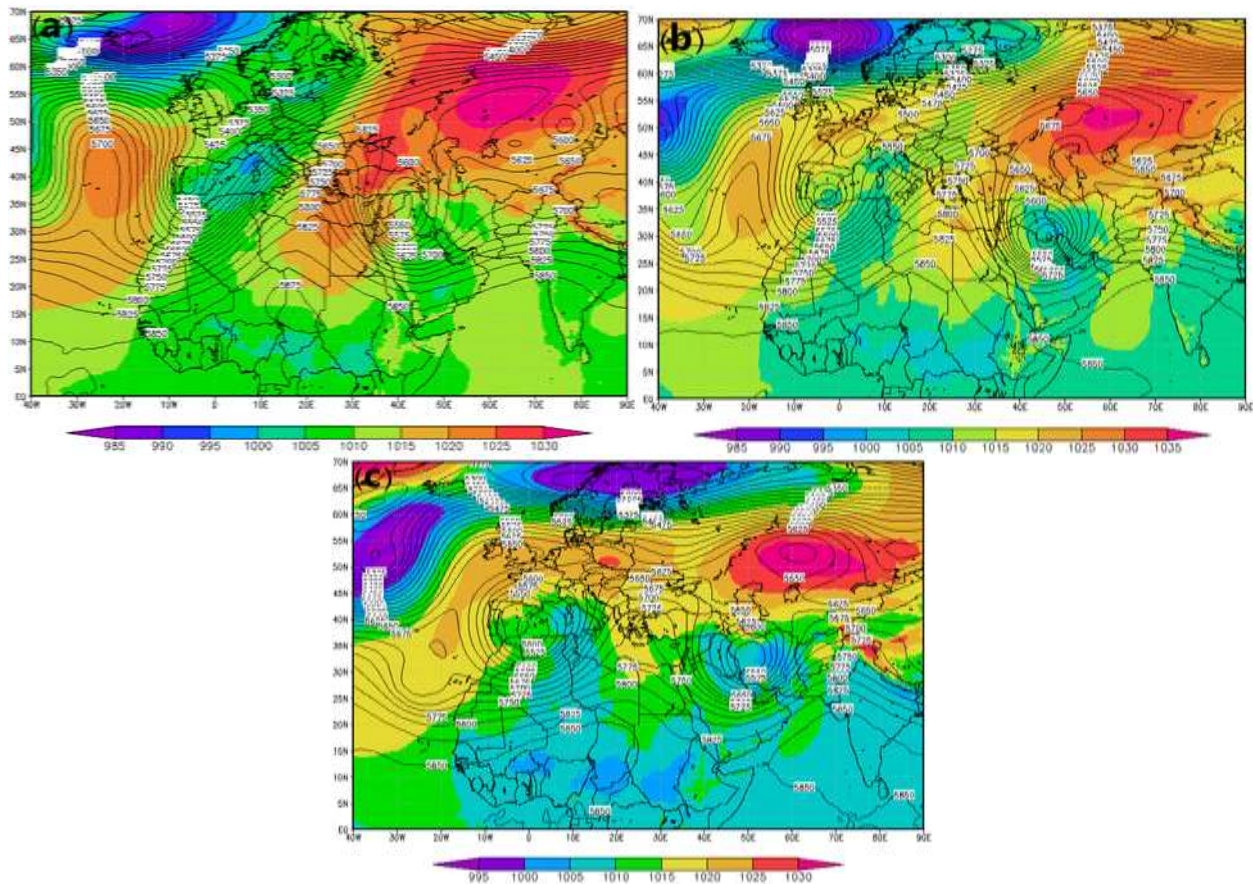
مارس، مرکز پرفشار دینامیکی آזור بیش از حد نرمال تقویت شده و فشار مرکزی آن به 1025 هکتوپاسکال رسیده که در این حالت در عرض‌های جغرافیایی 30° تا 50° درجه‌ی شمالی به صورت مانع عمل کرده و موجب شکست در بادهای غربی و متعاقباً دوشاخه شدن بادهای غربی شده است. این عمل باعث ایجاد یک پشته پر ارتفاع و حرکت نصف‌النهاری شدید در تراز 500 هکتوپاسکال شده است. در شمال این پرفشار کم فشار ایسلند به شدت تقویت شده و به سوی شرق پیشروی کرده است. در مقابل به علت افت فشار بر روی کشورهای اسپانیا و پرتغال، هسته‌ی کم ارتفاع اولیه بلاکینگ امگا با ناوه‌ی نسبتاً عمیقی ایجاد شده است و در همین هنگام پرفشار سیبری تقویت شده و زبانه‌ای از آن بر روی شرق و مرکز دریای مدیترانه تا شاخ آفریقا غلبه دارد و باعث ایجاد یک پشته عظیم بر روی مدیترانه شده است که محور شمالی آن تا دریای سیاه رسیده است. هسته‌ی کم فشار جنوب شرقی سیستم بلاکینگ امگا با منحنی بسته 5550 ژئوپتانسیل متر در غرب ایران قرار گرفته و عمق ناوه تا دریای سرخ پیشروی کرده است. فرارفت هوای سرد به داخل پشته روی مدیترانه، توسط پرفشار سیبری و انتقال این هوای سرد و ناپایدار توسط ناوه به جنوب شرق ایران در حال انجام است (a-2). در روز 30 مارس هسته اصلی پرفشار آזור تضعیف شده و در حال جابجایی به عرض‌های شمالی تر بوده و از آنجا که پیدایش این سیستم پرفشار، دینامیکی است؛ لذا جابجایی هسته‌ی مرکزی آن دور از انتظار نخواهد بود. هسته اصلی کم فشار ایسلند نیز پیشروی شرق سو داشته و به جزایر اسکاندیناوی رسیده است. اما وجود پرفشار آזור مانع از حرکت این کم فشار به عرض‌های پایین شده است.

طوفان با حرکات چرخندی خود باعث انتقال حجم عظیمی از رطوبت دریای عمان، دریای عرب و اقیانوس هند به مناطق جنوب شرقی ایران شده است که سهم دریای عمان در این روز بیشتر و اقیانوس هند بسیار اندک بوده است (f-1) بیشینه رطوبت در مرکز طوفان بیش از 16 گرم بر کیلوگرم بوده است و به تدریج با فاصله گرفتن از چشم طوفان مقدار رطوبت از جنوب استان با مقدار 15 گرم بر کیلوگرم به مقدار 9 گرم بر کیلوگرم در شمال کاهش یافته به همین دلیل شدت بارش‌ها در مناطق جنوبی استان بیشتر بوده است. شار رطوبتی از سطح زمین تا ترازهای 850 و 700 برقرار بوده است اما بیشترین انتقال رطوبت در تراز 850 رخ داده است (g-1). در این روز در قسمت‌های شمالی استان ارتفاعات مرکزی استان مانع انتقال رطوبت و شرایط ناپایدار حاصل از طوفان به این مناطق شده است در نتیجه هیچ بارشی دریافت نکرده‌اند. ارتفاع امواج در این روز در مناطق ساحلی سیستان و بلوچستان و هرمزگان بین 4 تا 5.5 متر بوده است و در مجموع این طوفان حاره‌ای در ایران موجب مرگ 21 نفر و 215 میلیون دلار خسارات شد (27).

الگوی دوم: بلاکینگ امگا^۱

دو روز قبل از بارش شدید فراگیر، ساختار الگوی بلاکینگ امگا در 29 مارس 2009 بر روی نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی خودنمایی می‌کند. علت تکوین این الگوی اقلیمی را می‌توان به نحوه توزیع پراکندگی فشار بر روی زمین در این روز نسبت داد. در روز سی

1- Omega Blocking



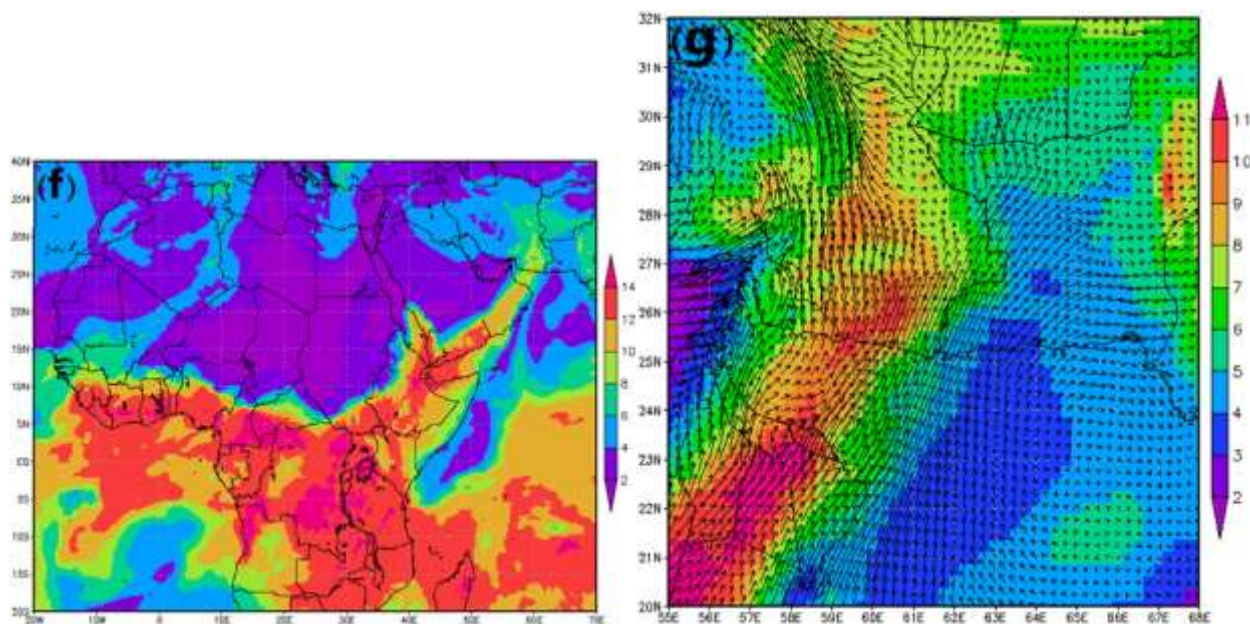
شکل ۴- (a, b, c) فشار تراز دریا (hpa) و ارتفاع ژئوپتانسیل ($m^2 s^{-2}$) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

به ترتیب برای ۲۹، ۳۰ و ۳۱ مارس. (d) و (e) به ترتیب تاوای نسبی ($s^{-1} \cdot 10^{-5}$) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و سرعت قائم جو ($s^{-1} \cdot 10^{-2}$) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال به همراه ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ۳۱ مارس

Figure 4- (a, b, c) Sea level pressure (hpa) and geopotential height (m) level of 500 hPa for March 29, 30 and 31, respectively. (d) and (e) the relative vorticity ($s^{-1} \cdot 10^{-5}$) of 500 hPa and the vertical velocity ($s^{-1} \cdot 10^{-2}$) of 700 hPa with geopotential height of 500 hPa on March 31, respectively

است به طوری که زبانه آن در شمال پرفشار سیبری قرار گرفته است. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال کم ارتفاع جنوب شرقی بلاکینگ در این روز شدت بیشتری گرفته و هسته مرکزی آن بر روی جنوب غرب ایران تا نواحی مرکزی قرار گرفته است و در سطح زمین شاهد تشکیل یک مرکز کم فشار می‌باشیم که در مرکز ایران قرار گرفته و فشار آن بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۵ هکتوپاسکال می‌باشد زبانه‌های این مرکز کم فشار به جز نوار شمالی کشور تقریباً کل ایران را فرا گرفته این نشان از وجود شرایط مناسب حرکات چرخندی در سطح زمین می‌باشد. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال منحنی‌های هم ارتفاع با جهت گیری جنوب به شمال در حال گذر هستند در این حالت استان سیستان و بلوچستان در زیر محور ناوه (محل بیشینه تاوای نسبی) قرار گرفته چرخندگی مثبت در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال حکایت از واگرایی مناسب در این روز دارد.

هسته کم فشار جنوب غرب بندال با مقداری جابجایی به سمت جنوب بر روی تنگه جبل الطارق قرار گرفته در مقابل پرفشار آזור به علت انتقال هوای گرم ناوه جنوب غرب بندال به عرض‌های شمالی پرفشار سیبری در حال تضعیف است؛ اما همچنان زبانه آن کل دریای مدیترانه تا شمال آفریقا را تحت سلطه خود قرار داده است. کم فشار جنوب شرق بندال به شمال غرب خلیج فارس منتقل شده و فرارفت هوای سرد سیبری از طریق پشته مدیترانه‌ای در حال انتقال به عرض‌های جنوبی‌تر و به دنبال آن ایجاد ناپایداری در عرض‌های میانی و بارش در جنوب شرق ایران خواهد شد (b-2). در نهایت در روز ۳۱ مارس تغییرات عمده‌ای در سیستم‌های فشار رخ داده و پرفشار سیبری مسیر شرق را در پیش گرفته و زبانه‌های آن نیز ضعیف‌تر شده‌اند. پرفشار آזור به سمت شرق حرکت کرده و با پرفشار سیبری ادغام شده است و کم فشار ایسلند نیز از شرق به غرب گسترش یافته



شکل ۵- (f) رطوبت ویژه (gr.kg^{-1}) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در مقیاس وسیع و (g) وزش رطوبتی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ۳۱ مارس
Figure 5- (f) Specific humidity (gr/kg-1) at 850 hPa on a large scale and (g) humidity advection at 850 hPa on 31 March

هکتوپاسکال برقرار بوده است اما در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال شدت بیشتری داشته است (g-2) و اثر اروگرافیک ناهموازی‌های استان از جمله کوه‌های سیستان، بلوچستان، سیاه کوه در شمال زاهدان، بم و از همه مهمتر تفتان را در وقوع بارش نشان می‌دهد؛ به طوری که در این روز در مناطق مرکزی و مرتفع سیستان و بلوچستان بارش‌های شدیدی رخ داده در حالی که در نقاط پست و هموار همچون چابهار و زابل کمترین بارش ثبت شده است.

الگوی سوم: فرود تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

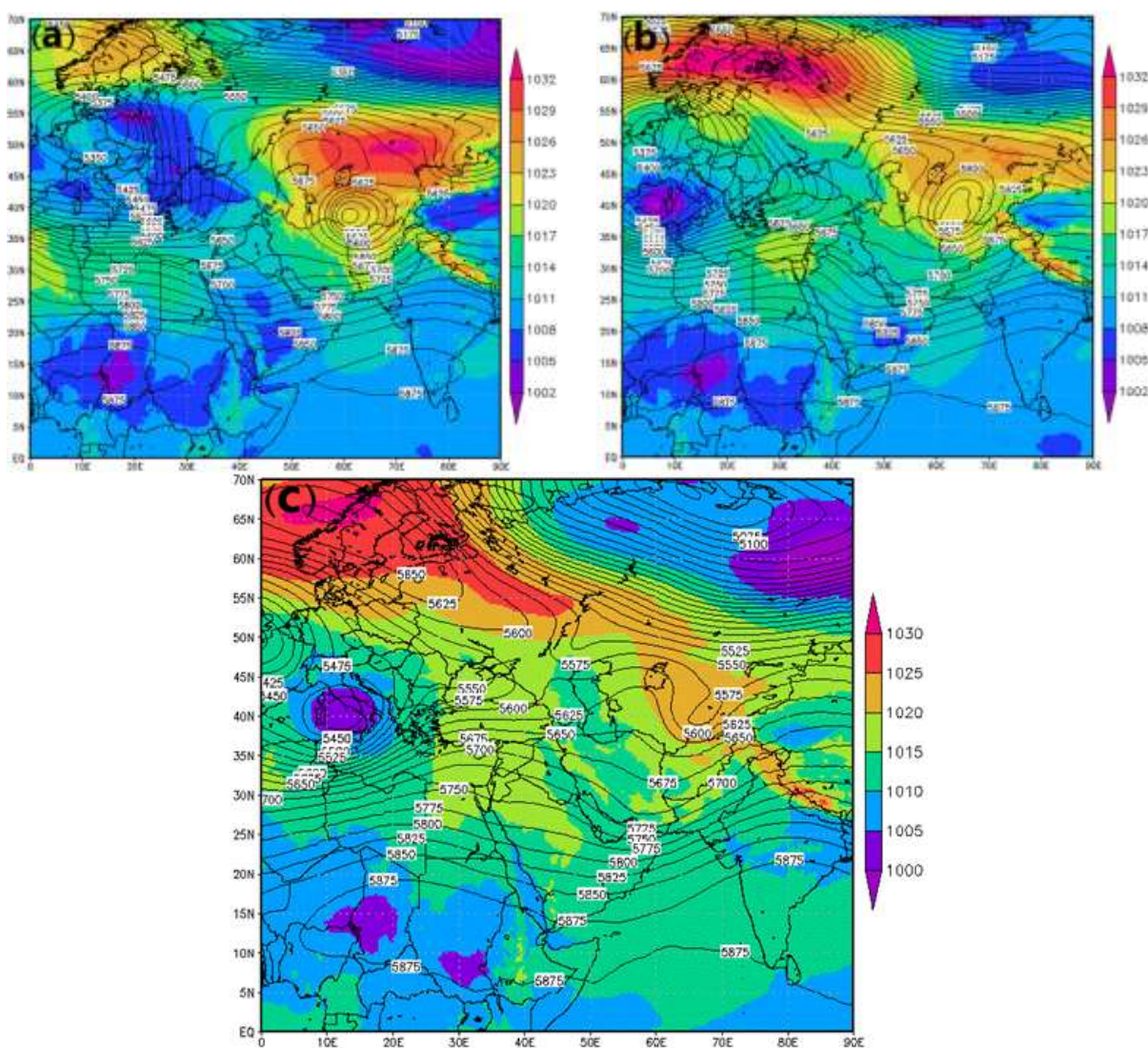
تشدید جریان‌های نصف‌النهاری بادهای غربی توسط پرفشار سبیری، دو روز قبل از بارش در ۲۵ مارس باعث شده که بادهای غربی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در عرض ۳۵ درجه شمالی بر روی مدیترانه مسیر خود را تغییر داده و یک پشته مرتفع تا شمال اروپا کشیده شود. در شمال شرق ایران جریان بادهای غربی از مسیر اصلی خود بریده شده و یک کم فشار بریده شده با هسته سرد و ارتفاع مرکزی ۵۵۰۰ ژئوپتانسیل متر تشکیل شده است که توسط پرفشار سبیری تقویت شده و ناقل هوای سرد بوده است. اما پایین‌تر از عرض ۳۵ درجه شمالی بادهای تقریباً به صورت مداری بر نیمه جنوبی ایران غلبه دارند. پرفشار شمال اروپا نیز در حال تقویت و گسترش غرب سو بوده است (a-3). در ۲۶ مارس در جریان بادهای غربی که از عرض‌های ۳۵ درجه شمالی به پایین در حال وزش مداری بوده‌اند به علت افت فشار بر روی جنوب عربستان یک فرود نسبتاً عمیق در تراز

در این شرایط فاصله خطوط هم ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نسبت به روزهای قبل کاهش یافته که نشان از افزایش گردانان فشاری مناسب برای رخداد بارش می‌باشد (c-2). در سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال شاهد حرکات بالاسوی^۱ شدید در زیر محل بیشینه چرخندگی مثبت در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بوده ایم (e-2) بیشینه حرکات بالاسوی جوی در جنوب شرق ایران بین ۱- تا ۲- پاسکال بر ثانیه رسیده است (d-2). در این روز در کل ایستگاه‌های سیستان و بلوچستان بارش گزارش شده و ایستگاه‌های نیکشهر با ۶۲،۰۱ و ایرانشهر با ۲۲ میلی‌متر بیشترین بارش را دریافت کرده‌اند در مجموع به علت سکون و حرکت کند این سامانه شاهد "فراگیرترین بارش ۲۴ ساعته" نسبت به دو الگوی دیگر بوده‌ایم.

سرچشمه رطوبت بارش‌ها در این روز یک رودخانه‌ی اتمسفری بوده این جریان عظیم رطوبتی که از استوا با جهت‌گیری شمال شرقی به حرکت درآمده است در بخش جنوبی دریای سرخ تقویت شده و از جنوب شبه جزیره عربستان وارد دریای عمان شده است (f-2) در این منطقه فعال بودن واچرخند جنوب شرقی دریای عرب اساسی‌ترین عامل در همگرایی و تقویت این جریان رطوبت از طریق انتقال رطوبت دریای عمان و دریای عرب و هدایت آن به جنوب شرق ایران بوده است این انتقال رطوبت در سطح زمین و ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰

فرود نیز افزایش پیدا کرده است. وجود یک بسته هوای سرد در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و قرار گیری آن بر روی مناطق مرکزی استان سبب ایجاد جوی آشفته در مناطق مرکزی بوده و باعث شده شدت صعود هوا در مناطق مرکزی استان به ۱- تا ۰.۸- پاسکال بر ثانیه برسد (d-3) به نظر می‌رسد وجود این بسته هوای سرد با کم فشار برید شده در شمال شرق ایران مرتبط بوده است. در نهایت عمیق شدن فرود تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال باعث تشدید واگرایی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال شده است.

۵۰۰ هکتوپاسکال شکل گرفته و در این حالت سیستان و بلوچستان در جلو محور فرود قرار گرفته است. همزمان در عرض‌های شمالی پرفشار شمال اروپا به شدت تقویت شده و زبانه‌ی آن با پرفشار سیبری ادغام شده اما پرفشار سیبری تضعیف شده و در حال جابجایی به سمت غرب بوده و کم فشار بریده شده نیز در حال جابجایی و تضعیف است (b-3). در روز اوج بارش فرود تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از جنوب خلیج فارس به جنوب شرق ایران منتقل شده است و فراز تشکیل شده بر روی شرق مدیترانه هوای سرد پرفشار شمال اروپا را به جنوب شرق ایران پمپاژ می‌کند. همزمان با عوامل یاد شده عمق



شکل ۶- (a, b, c) فشار تراز دریا (hpa) و ارتفاع ژئوپتانسیل ($m^2 s^{-2}$) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به ترتیب برای ۲۵، ۲۶ و ۲۷ مارس. (a) و (b) به ترتیب تاوایی نسبی ($s^{-1} \times 10^{-5}$) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و سرعت قائم جو ($s^{-1} \times 10^{-5}$) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال به همراه ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ۲۷ مارس.

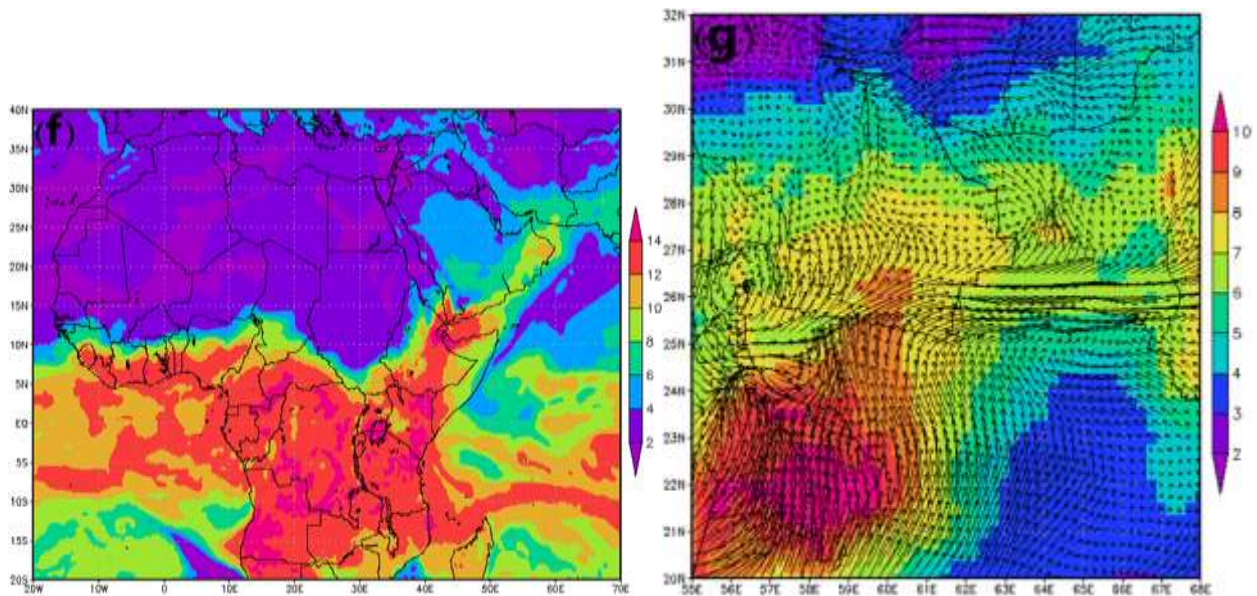
Figure 6- (c, b, a) Sea level pressure (hpa) and geopotential height (m) of 500 hPa for March 25, 26 and 27, respectively. (a) and (b) the relative vorticity ($s^{-1} \times 10^{-5}$) of 500 hPa and the vertical velocity ($s^{-1} \times 10^{-5}$) of 700 hPa with geopotential height at 500 hPa on March 27, respectively

استان شرقی بوده و رطوبت کمتر به یں منطقه رسیده است به همین دلیل ایستگاه‌های زابل (بدن بارش) و زاهدان (۰,۷) کمترین مقادیر بارش را در این روز ثبت کرده‌اند (g-3).

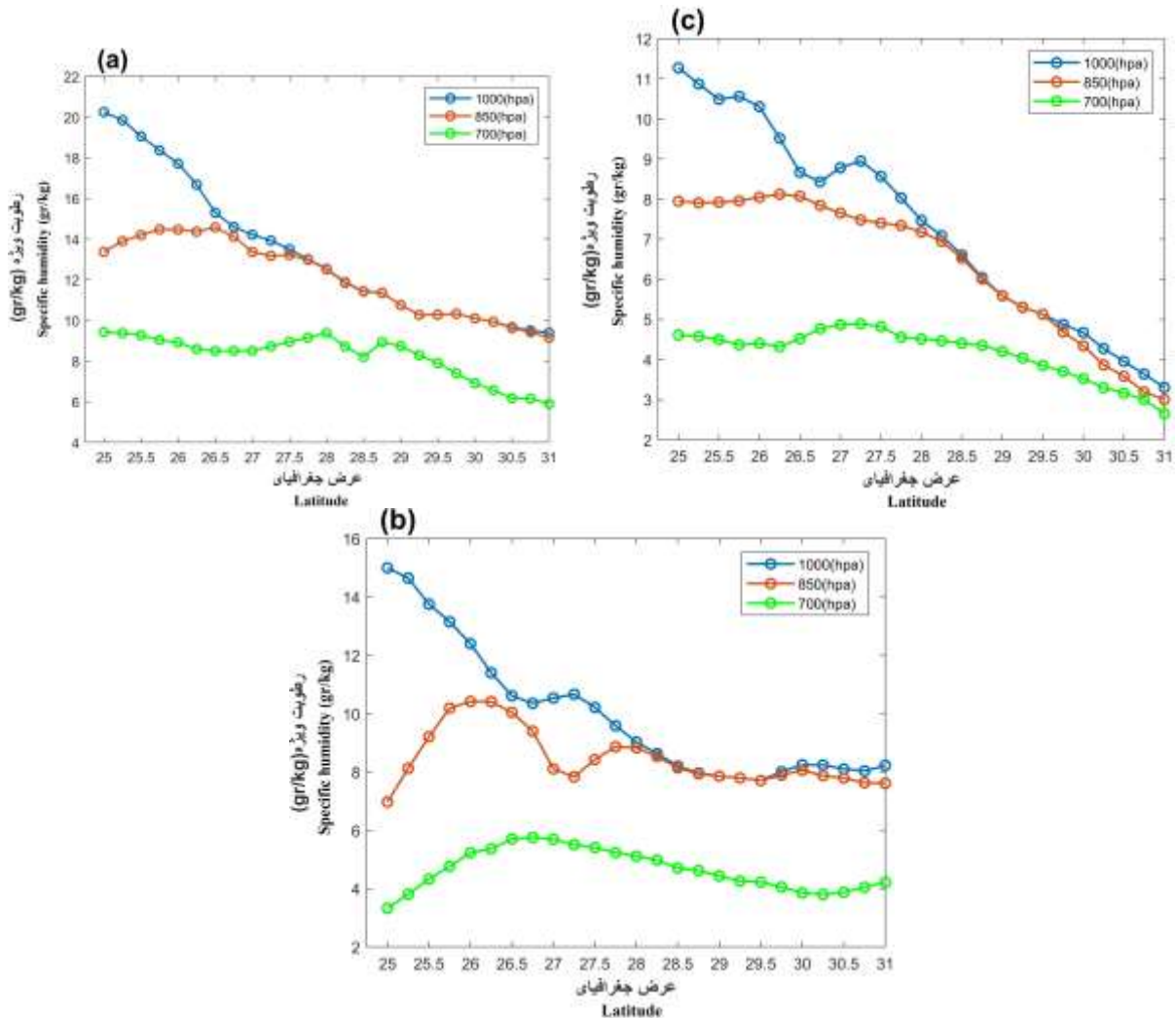
فاصله از منابع رطوبتی و ناهمواری‌ها در وقوع بارش‌های سنگین و فراگیر نقش قابل توجهی را در این منطقه بازی کرده‌اند. از نقاط مشترک هر سه الگوی بارشی کاهش رطوبت جوی در هر سه تراز سطح زمین، ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال از جنوب تا شمال استان بوده (a، b، c، ۸) که عمدتاً به دلیل فاصله از منابع رطوبتی و همچنین چینش و ارتفاع ناهمواری استان سیستان و بلوچستان بوده است که باعث گیرش رطوبت و مانع انتقال رطوبت کافی برای وقوع بارش‌های سیل آسا شده است. اما همچنان که پیداست در الگوی دوم مقدار کاهش رطوبت از جنوب به شمال کمتر بوده که این امر به علت فعال بودن و اچرخند دریای عرب و قدرت این و اچرخند در انتقال رطوبت را نشان می‌دهد. در مجموع با افزایش ارتفاع به طرف مناطق شمالی عمدتاً سامانه‌های بارشی رطوبت خود را از دست داده‌اند و ناهمواری‌ها مانع پراکنش مناسب رطوبت در سطح استان شده‌اند به همین دلیل در مناطق شمالی نسبت به مناطق جنوبی شدت بارش‌ها ضعیف تر بوده است.

مقادیر مثبت چرخندگی در این روز این امر را تأیید می‌کنند (e-3) در این حالت استان سیستان و بلوچستان در زیر محور فرود قرار گرفته همزمان در عرض‌های شمالی شاهد هم پیوندی پرفشار سبیری و پرفشار شمال اروپا هستیم در نتیجه این عمل پرفشار سبیری به سوی غرب حرکت کرده و کم فشار بریده شده نیز در حال تضعیف شدن بوده است اما در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به صورت یک فرود کم عمق در فرارفت هوای سرد به بخش‌های جنوب شرق ایران عمل کرده است این به معنی تشدید ناپایداری و ایجاد جوی منقلب در این روز می‌باشد (c-3).

رودخانه اتمسفری که در الگوی دوم تغذیه رطوبتی بارش‌ها را انجام داده بود در این الگو نیز تاثیر عمده‌ای بر تامین رطوبت بارش‌ها داشته است البته با شدتی کمتر (f-3)، جهت باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال حکایت از وجود حرکات چرخندی در غرب استان دارد که از طریق دریای عمان رطوبت بیشتری به این جریان اتمسفری تزریق کرده و در نهایت محرکه‌ای برای انتقال این جریان رطوبت به جنوب شرق ایران بوده است. همچون دو الگوی قبل در این الگو نیز شدت انتقال رطوبت در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نسبت به سطح زمین و تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بیشتر بوده است. جهت باد در مناطق شمالی



شکل ۷- (f) رطوبت ویژه (gr.kg⁻¹) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در مقیاس وسیع و (g) وزش رطوبتی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ۲۷ مارس
Figure 7- (f) Specific humidity (gr*kg⁻¹) at 850 hPa on a large scale and (g) humidity advection at 850 hPa on 27 March



شکل ۸- مقادیر یاخته‌ای (۲۵، ۲۵°×۰، ۲۵) رطوبت ویژه سیستم‌های بارش زا برای (a) الگوهای اول (۷ژوئن) (b) الگوی دوم دوم (۳۱ مارس) و (c) الگوی سوم (۲۷ مارس) در راستای طول جغرافیای ۶۰،۵ و بین عرض‌های جغرافیای ۲۵ تا ۳۱ درجه شمالی (از جنوب به شمال) در ۳ تراز: ۱۰۰۰، ۸۵۰ و ۷۰۰

Figure 8- Cell values (0.25° × 0.25°) of specific humidity of precipitation systems for (a) the first pattern (June 7) (b) the second pattern (March 31) and (c) the third pattern (March 27) in The longitude direction is 60.5 and between latitudes 25 to 31 degrees north (from south to north) at 3 levels of 1000, 850 and 700 hPa

به هسته اصلی طوفان افت فشار سطحی و حرکت چرخندی رخ داده است و بر اثر مجاورت منطقه با هسته اصلی طوفان و محل بیشینه‌ی شدت صعود (بیش از ۳،۵ پاسکال بر ثانیه) و تزریق هوای گرم و مرطوب (بیش از ۱۶ گرم بر کیلوگرم) بارش سنگینی رخ داده که شدیدترین بارش ۲۴ ساعته نسبت به الگوی دوم و سوم است. در این الگو انتقال حجم عظیمی از رطوبت دریای عرب، دریای عمان و اقیانوس هند به جنوب شرق ایران مشهود است و این مساله می‌تواند در دهه‌های آتی و افزایش دمای سطح آب اقیانوس‌ها و دریاها ناشی از گرمایش جهانی، زنگ خطری برای رخداد سیلاب در جنوب شرق کشور باشد. در خصوص الگوی دوم (بلاکینگ امگا) می‌توان به نقش

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس آمار بارش شش ایستگاه سینوپتیک طی بازه زمانی ۲۰۱۸-۱۹۷۹ تعداد روزهای بارشی در فصل بهار و تابستان از ۳۲ روز در چابهار تا ۱۱۷ روز در خاش متغیر است اما در دوره آماری مورد مطالعه وقوع بارش‌های سیل‌آسا و فراگیر نتیجه استقرار سه الگوی گردشی بزرگ مقیاس حاره‌ای و جنب حاره‌ای بوده‌اند. بررسی سازوکار هواشناختی آنها نشان داد که در الگوی اول (طوفان حاره‌ای گونو) تکوین پر ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال با منحنی بسته ۵۹۰۰ ژئوپتانسیل متر بر روی شبه قاره هند مانع حرکت طوفان به طرف شرق شده و با ورود طوفان به جنوب شرق ایران و در مناطق نزدیک

تأثیر عمده‌ای بر تأمین رطوبت بارش‌ها داشته است هر چند با شدتی کمتر.

از نقاط مشترک هر سه الگوی بارشی سیل‌آسا، برقراری شار رطوبت از سطح زمین تا تراز ۷۰۰، شدت انتقال رطوبت در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و کاهش رطوبت جوی در هر سه تراز سطح زمین، ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال از جنوب تا شمال استان است که عمدتاً به دلیل فاصله از منابع رطوبتی و همچنین چینش و ارتفاع ناهمواری استان سیستان و بلوچستان بوده است (۵ و ۲۱) و با نتایج پژوهش خسروی (۱۳۹۸) و علیجانی و همکاران (۲۱ و ۴) و لشکری و خزایی (۲۲) همخوانی دارد. بررسی ویژگی‌های هواشناختی این سامانه‌های بارشی یافته‌های سایر پژوهشگران اکبری و نودهی (۳) را مبنی بر رخداد بارش‌های سیل‌آسای تابستانه در شرق کشور تأیید می‌نماید و مبتنی بر این است که در جنوب شرق ایران اغتشاشات سطوح بالا فراوان‌ترین عامل صعود و عامل اصلی کاهش بارش سنگین در این مناطق نرسیدن بخار آب کافی به منطقه است و از نظر الگوهای همدید شناسایی شده شباهت دارد (۴، ۲۱ و ۳۶). در نهایت بایستی تأکید نمود که امکان وقوع بارش در فصل بهار نسبت به فصل تابستان به علت گرادیان حرارتی مناسب در جنوب شرق ایران و فعالیت پرفشار سیبری و پرفشار شمال اروپا، شرایط جبهه‌زایی در این مناطق فراهم است.

تقویت شده‌ی پرفشار آزر و عملکرد آن به صورت یک مانع در برابر بادهای غربی اشاره داشت که موجب دوشاخه شدن آنها شده و تکوین یک الگوی بندالی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال شده است. فعالیت پرفشار سیبری ناپایداری‌های ناشی از این الگوی اقلیمی را تشدید کرده است. در این الگو استان سیستان و بلوچستان در زیر محور فرود (محل بیشینه تاوایی نسبی) قرار گرفته و چرخندگی مثبت در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال حکایت از واگرایی مناسب سطوح میانی برای تقویت شرایط صعودی در این روز دارد. به دلیل سکون و حرکت کند این سامانه شاهد "فراگیرترین بارش ۲۴ ساعته" نسبت به دو الگوی دیگر بوده‌ایم. سرچشمه رطوبت بارش‌ها در این روز رودخانه‌ی اتمسفری است که این جریان عظیم رطوبتی که از استوا با جهت‌گیری شمال شرقی به حرکت درآمده و در بخش جنوبی دریای سرخ تقویت شده و از جنوب شبه جزیره عربستان وارد دریای عمان شده است. در نهایت در الگوی سوم (فرود تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال) عمیق شدن تراف میانی وردسپهر باعث واگرایی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال شده و در این وضعیت منطقه مورد مطالعه در جلوی محور فرود قرار گرفته است. از طرفی هم پیوندی پرفشار سیبری و پرفشار شمال اروپا و فرارفت هوای سرد این دو پرفشار به جنوب شرق ایران باعث تشدید ناپایداری شده است. رودخانه اتمسفری که در الگوی دوم تغذیه رطوبتی بارش‌ها را انجام داده بود در این الگو نیز

منابع

- Ahmadi M., and Jafari F. 2018. Complete Routing and Synoptic Analysis A Study Sample of Systems Leading to Heavy Rainfall of More Than 50 mm in Southern Iran, *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 5th Year, No. 3: 83-102. (In Persian with English abstract)
- Akbary M. 2015. Combinatory Mediterranean-Sudanese systems role in the occurrence of heavy rainfalls (case study: south west of Iran), *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2015, DOI:10.1007/s00703-015-0389-x.
- Akbary M., and Nodehi V. 2015. Analysis of trends in annual and summer rainfall of Golestan Province, *Geographical Planning of Space Quarterly Journal* 5(17): 141-150. (In Persian with English abstract)
- Alijani B., Hashemi-Ana S., Abbasnia M., and Pour Hashemi S. 2014. Analysis of Dynamic, Thermodynamic and Synoptic Conditions of Flood Precipitation in the dry Area of Southeastern Iran, *Geography and Environmental Stability* 13: 28-13. (In Persian)
- Alijani B. 2017. *Climate of Iran*, Payam-e-Noor Publication, Number of pages 236.
- Arabi Z. 2005. Synoptic analysis of rainfall from July 17 to 21, 1999 in Iran, *Geographical Research*, 56: 15-1. (In Persian)
- Ashley S.T., and Ashley W.S. 2008. Flood fatalities in the United States. *Journal Appl. Meteor. Climatology* 47: 805-818, <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1611.1>
- Moore B., White A., Gottas J., and Neiman P. 2020. Extreme Precipitation Events in Northern California during Winter 2016-17: Multiscale Analysis and Climatological Perspective. *Monthly Weather Review* 148(3): 1049-1074.
- Borzoo F., and Azizi Gh. 2014. Proposing a simple criterion for estimating heavy rainfall in different regions of Iran, *Natural Geography Research*, Volume 47, and Number 3. (In Persian with English abstract)
- Chakraborty A. 2016. A synoptic-scale perspective of heavy rainfall over Chennai in November 2015, doi: 10.18520/cs/v111/i1/198-201.
- Dargahian F., Alijani B., and Mohammadi H. 2014. Synoptic study of pressure patterns associated with blocking affecting the occurrence of continuous rainfall (5 days and more) and heavy rains in Iran: in the cold season of 2012-1993. *Geography and Environmental Hazards* 10: 173-155. (In Persian)

- 12- Dostkamian M., and Mirmousavi S.H. 2015. Analysis of Extreme Precipitation Clusters in Iran, *Geography and Development* 41: 146-131. (In Persian)
- 13- Farajzadeh M. 2014. Climatic hazards of Iran, Samat Publications, number of pages: 348.
- 14- Farajzadeh M. Moghli M., and Afshari Far M. 2016. Analysis of the role of monsoon systems in precipitation in southeastern Iran, *Proceedings of the conference on geophysical development potentials in the oceanic coasts of southeastern Iran*. (In Persian)
- 15- Fritz Hermann M., Blount C.D., Albusaidi F.B., and Al-Harthy A.H. 2010. Cyclone Gonu Storm Surge in the Gulf of Oman. *Indian Ocean Tropical Cyclones and Climatic Change Publisher; Springer; DOI: 10.1007/978-90-481-3109-9_30*
- 16- Ghaderi H., and Alijani B. 2010. Synoptic Analysis of Larestan Severe Precipitations, *Journal of Physical Geography*, Third Year, No. 8, Summer 2010. (In Persian with English abstract)
- 17- Jennrich G.C., Furtado J.C., Basara J.B., and Martin E. 2020. Synoptic Characteristics of 14-Day Extreme Precipitation Events across the United States, *Journal Climate* 33(15): 6423–6440.
- 18- Islamic Republic of Iran Meteorological Organization (IRIMO); Office of National Reference of the International Panel of Climate Change (IPCC) of the Climatological Research Institute - Mashhad, in collaboration with: National Center for Drought and Crisis Management of the Meteorological Research Institute. Detection, evaluation of the effects and prospects of climate change in Iran during the 21st century, 2017.
- 19- IPCC, Climate Change. 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., Barros V.R., Dokken D.J., Mach K.J., Mastrandrea M.D., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., Girma B., Kissel E.S., Levy A.N., MacCracken S., Mastrandrea P.R., and White L.L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp., 2014.
- 20- Glisan J.M., Gutowski Jr W.J., Cassano J.J., Cassano E.N., Mark W., Kharin V.V., and Zwiers F.W. 2005. Estimating extremes in transient climate change simulations. *Journal Climate* 18: 1156– 1173.
- 21- Khosravi M. 2019. A Survey on the of the Summer Precipitation Events Moisture Supply Resources of Southeast of Iran. *12(41): 127-144.*
- 22- Lashkari H. 2005. Synoptic Analysis of two patterns of winter rainfalls in southeast of Iran, *Modarres Quarterly*, Volume 9, Number 1, Spring 2005. (In Persian with English abstract)
- 23- Lashkari H., and Khazaei M. 2014. Synoptic analysis of heavy rainfall in Sistan and Baluchestan province, *Sepehr Geographical Information Journal* 23(1-90): 70-85. (In Persian with English abstract)
- 24- Luo Y., Mengwen W., Fumin R., Jian L., and Wai-Kin W. 2016. Synoptic Situations of Extreme Hourly Precipitation over China, *Journal of Climate*.29; 24, 8703-8719. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0057.1.
- 25- Mafakheri O., Saligheh M., Alijani B., and Akbary M. 2016. The Hazards of Rainfall Concentration in Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards* 6(3): 143-162. (In Persian with English abstract)
- 26- Meehl G.A., Covey C., Delworth T., Latif M., McAvaney B., Mitchell J.F.B., Stouffer R.J., and Taylor K.E. 2007. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88: 1383–1394.
- 27- Wu M., Wu C.C., Yen T.H., and Luo Yali. 2017. Synoptic Analysis of Extreme Hourly Precipitation in Taiwan during 2003–12. *Journal of Monthly Weather Review* 145(12): 5123–5140.
- 28- Montazeri M., Nami M.H., and Dalaei H. 2013. Synoptic Analysis of Heavy Rainfall November 21, 2011. *Kohkiluyeh and Boyer-Ahmad Province Sarzamin Geographical Journal*; 10, 37; 77-89. (In Persian with English abstract)
- 29- Omidvar K., and Torki M. 2013. Identifying patterns of heavy rainfall in Chaharmahal and Bakhtiari province, *The Journal of Spatial Planning*, 16(4): 135-170. (In Persian)
- 30- Parand Khorani A., and Lashkari H. 2011. Heavy Storms in Southern Iran (Case Study of December 31, 1984 to January 4, 1985, Dalaki River Watershed, *Journal of Geography and Environmental Planning*, 22(41): 136-123. (In Persian)
- 31- Bohlinger P., Sorteberg A., and Sodemann A. 2017. Synoptic Conditions and Moisture Sources Actuating Extreme Precipitation in Nepal, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 12,653–12,671. <https://doi.org/10.1002/2017JD027543>
- 32- Pourasghar F, Jahanbakhsh S, Sari Sarraf B., Ghaemi H., and Tadayoni M. 2012. Zoning of precipitation regime in the southern half of Iran, *Journal of Geography and Planning* 17(44): 26-46.
- 33- Rahimi D., Khoshhal J., and Alizadeh T. 2010. Statistical-Synoptic Analysis of Heavy Precipitations of Dry Lands, *Journal of Geography and Regional Planning*, No. 14. (In Persian)
- 34- Rastgoo Z., and Ranjbar Saadatabadi A. 2018. Study of heavy and moderate rainfall in Bushehr province from a synoptic-dynamic perspective, *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, 1(1): 96-77. (In Persian with English abstract)

- 35- Rasouli A.A. 2004. Modeling of lightning in Tabriz city from the perspective of flood risk, International Conference on Natural Disasters, 5-7 October 2004, University of Tabriz. Schumacher, R. S., and R. H. Johnson, 2006: Characteristics of U.S. extreme rain events during 1999–2003. *Wea. Forecasting*, 21: 69–85. (In Persian)
- 36- Saliqeh M. 2001. Synoptic Patterns of Summer Precipitation in Southeastern Iran, *Geographical Research Quarterly*, Article Number: 521. (In Persian)
- 37- Saliqeh M. 2005. Precipitation mechanism of the southeast of the country, *Journal of Physical Geography Research*-No. 55. (In Persian)
- 38- Špitalar M., Gourley J.J., Lutoff C., Kirstetter P.-E., Brilly M., and Carr N. 2014. Analysis of flash flood parameters and human impacts in the US from 2006 to 2012. *Journal of Hydrology*., 519: 863–870, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.004>
- 39- Tebaldi C., Hayhoe K., Arblaster J.M., and Meehl G.A. 2006. Going to the extremes: An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Climatic Change* 79: 185–2113.
- 40- Vahdani I. 2013. *Book of Weather and Climatology*, First Issue. Aeezh Publication.
- 41- Yu M., Miao S., and Li Q. 2016. Synoptic analysis and urban signatures of a heavy rainfall on 7 August 2015 in Beijing, *Journal of Geophysical Research: atmospheres*, 122: 65-78., <https://doi.org/10.1002/2016JD025420>.
- 42- Zwiers F.W., and Kharin V.V. 1998. Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO₂ doubling. *Journal Climate* 11: 2200–2222.

Climatological Analysis of Extreme and Widespread Precipitations in Southeast of Iran

M. Moahmmadi¹-M. Akbary^{2*}

Received: 03-07-2021

Accepted: 17-01-2022

Introduction: Sistan and Baluchestan Province, in southeast of Iran, is covering about 11 percent of the whole space of the country but is one of the driest provinces in Iran and its average annual rainfall is about 110 mm. The purpose of this study was to identify large-scale atmospheric circulation patterns causing extreme and widespread rainfalls during the warm seasons (spring and summer) in southeast of Iran (Sistan and Baluchestan province).

Data and Methodology: Precipitation data of 6 synoptic stations of Sistan and Baluchestan province during a 30-year statistical period (1979-1998) were obtained from Meteorological Organization of Iran (IRIMO). The intensity of precipitation based on 90th percentile threshold and widespread precipitation index of at least $\geq 50\%$ of the studied area were calculated. To identify the synoptic patterns of the upper atmosphere, the ERA5 data of the ECMWF European Center of Med-Latitude Weather Forecast with spatial resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ were obtained. The collected atmospheric parameters included mean sea level pressure (mslp), geopotential height (z), specific humidity (q), zonal (U) and meridional (V) wind components, relative vorticity (rv) and omega (w) and maps of the upper atmosphere were drawn at different levels using Gads software in the domain of 10 to 70E and 10 to 90N. Regarding the two selected characteristics, three events of heavy and widespread precipitation were determined.

Results and Discussion: By analyzing the daily rainfall data over a period of 30 years (2018-1988) during the warm months of the year, the number of days with torrential and widespread rainfall in Sistan and Baluchestan province were determined. According to the index the previously defined floods and mudslides were obtained for 3 days with torrential and widespread floods that often occur in the spring, which are categorized to three main patterns including: 1- Gono Tropical Storm 2- Omega Blocking and 3 - 500 hpa trough system. The results showed that during the maximum 24-hour precipitation, in the first synoptic pattern, the southern cities of the province received the maximum precipitation due to the proximity of the storm's core, but gradually from southern to northern latitudes, the rainfall declined considerably so that Chahbahar station had the maximum rainfall and Zabol station recorded zero rainfall. The storm is expected to move eastward as it moves to higher latitudes, but the high pressure formed on the Indian subcontinent acted as a barrier and directed the storm to the west, thus affecting the southern regions of Iran. In the second and third pattern, the location of Sistan and Baluchestan province in front of the trough axis and advection of cold weather of the northern latitudes were the main causes of instability that lead to heavy rainfall. The moisture of these rainfalls was obtained from Oman, Arabian Sea and Indian Ocean respectively. In the second pattern, the anticyclonic clockwise motions of the Arabian Sea has provided the moisture for extreme precipitation events. Common points of all three precipitation patterns are atmospheric moisture reduction in all three levels of the earth, 850 and 700 hectopascals from south to north of the province. This is mainly due to the distance from moisture sources as well as the arrangement and height of the roughness of Sistan and Baluchestan province, which has caused moisture trapping and prevented the transfer of sufficient moisture for the occurrence of torrential rains. In the second model, the amount of moisture reduction from south to north is less, which indicates the activity of the Arabian Sea high pressure and the power of this high pressure in moisture transfer. In general, with increasing altitude towards the northern regions, mainly rainfall systems have lost their moisture and unevenness has prevented the proper distribution of moisture in the province.

Conclusion: In southeastern Iran, the spatial distribution of precipitation is strongly influenced by the proximity to the sea and the location of the topographic features. Upper air levels turbulences are the most common cause of air mass rise. The main factor in reducing heavy rainfalls in northern areas of Sistan and Baluchestan is the lack of sufficient water vapor to reach these areas. Extreme rainfall is more likely to occur in

1 and 2- M.Sc. and Associate Professor of Climatology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, respectively.

(*- Corresponding Author Email: mehryakbary@khu.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2022.68783.1024

spring than in summer due to the appropriate thermal gradient in southeastern Iran. Finally, the results of the study showed that the possibility of precipitation in spring compared to summer due to the appropriate temperature gradient in southeastern Iran and the activity of Siberian and Northern European high pressure, the conditions for fronting in these areas are provided. Since the humidity of the southern oceans through atmospheric rivers has been effective in the occurrence of heavy rainfall in southeastern Iran, rising temperatures in the southern oceans due to global warming can strengthen moisture flows in the future and from this route to affect the intensity of rainfall in southeastern Iran.

Keywords: Extreme precipitation, Sistan and Baluchestan, Widespread precipitation

مقاله پژوهشی

پیش‌نگری تغییرات قلمروی کشت خرماي گنطار و حلاوی در ایران در قرن بیست و یکم

سیده مریم افضلی^۱ - جواد خوشحال دستجردی^{۲*} - عزیز تراهی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷

چکیده

یکی از مسائل مهم کنونی بشر تولید مواد غذایی بیشتر برای جمعیت رو به رشد جهان است. اقلیم هر منطقه اهمیت بسزایی در بخش کشاورزی و میزان تولیدات آن دارد. کشور ایران یکی از کشورهای خرماخیز جهان است که از نظر تولید و صادرات خرما در جهان، رتبه دوم را دارا می‌باشد. این گیاه دارای ۲۰۰ جنس و ۴۰۰۰ گونه است که هر کدام توانایی تطبیق با منطقه‌ای از مناطق خشک را دارد و می‌تواند در محل مناسب خود بیشترین تولید و بازده اقتصادی را داشته باشد. با توجه به پدیده‌ی گرمایش جهانی و چالش‌های پیش‌آمده ناشی از آن، برنامه‌ریزان در تلاش هستند با آگاهی از شرایط اقلیمی کنونی و آتی و انتخاب گیاهان پایا با عمر طولانی‌تر حداکثر بازدهی اقتصادی را از هر منطقه به دست آورند. لذا یکی از بهترین مدل‌ها جهت شناخت رویشگاه‌های بالقوه کشت، مدل حداکثر آنتروپی است. در تحقیق حاضر، مدل CCSM4 با سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 برای پیش‌نگری و استعدادیابی مناطق مختلف کشور برای دو رقم خرماي حلاوی و گنطار انتخاب و مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان داد که پراکنش و سطح زیر کشت ارقام خرماي گنطار و حلاوی متفاوت است و در دوره‌های آتی سطح مطلوب کشت رقم گنطار کاهش و سطح مطلوب کشت رقم حلاوی افزایش خواهد یافت. آزمون جک‌نايف نشان داد که این مدل در پیش‌بینی قلمرو مطلوب کشت بر اساس معیار سطح زیر نمودار (AUC^۴) موفق بوده است (بالاتر از ۰/۹۰).

واژه‌های کلیدی: آنتروپی حداکثر (MaxEnt)، ایران، حلاوی، گنطار، مدل CCSM4، مطلوبیت قلمرو کشت

مقدمه

کافی پیرامون قلمرو پراکنش گونه‌های مختلف گیاهی، استفاده از این تکنیک‌ها مورد توجه قرار گرفته است. اساس کار برخی از این مدل‌ها، داده‌های حضور است و بعضی دیگر هم به داده‌های حضور و هم به داده‌های عدم حضور (روش‌های رگرسیونی مانند GLM و GAM) نیازمند هستند. از آنجا که در مباحث مدل‌سازی، به طور کلی اطلاعات در دسترس، بیشتر مربوط به حضور گونه‌ها بوده و داده‌های عدم حضور بندرت در دسترس هستند و گاهی هم در صورت دسترسی، مقادیر آن‌ها با شک و تردید همراه است یا اینکه امکان دارد یک گونه در یک مکان حضور داشته باشد اما مشاهده نشود، لذا روش‌های مدل‌سازی که فقط به داده‌های حضور گونه نیاز دارند (مانند MaxEnt، GARP، DOMAIN و BIOCLIM)، از اهمیت بیشتری برخوردار هستند (۷ و ۲). از جمله این روش‌ها، روش آنتروپی حداکثر یا MaxEnt است. این الگوریتم یکی از الگوریتم‌های رایج یادگیری ماشینی است که در بسته نرم‌افزاری MaxEnt ارائه شده است. این نرم‌افزار برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ توسط فیلیپس در بیست و یکمین کنفرانس فراگیری ماشینی مورد استفاده قرار گرفت (۱۳ و ۹). این روش در مقایسه با سایر روش‌ها، داده‌های زیادی لازم ندارد؛

تغییر اقلیم به شدت بر توزیع گونه‌های گیاهی تأثیرگذار است و منجر به ایجاد اکوسیستم‌های پیچیده و گاهی اختلال در سیستم‌های موجود می‌شود. از آنجا که کشت گونه‌ها ارتباط تنگاتنگی با اقلیم هر منطقه دارد و در ماهیت سیستم‌های اقلیمی عدم قطعیت یک مسئله ذاتی است، پراکنش آن‌ها یکی از مسائل مهم بخش کشاورزی محسوب می‌شود. در همین راستا و به منظور شناخت بیشتر از پراکنش گونه‌ها و ارقام گیاهان مختلف، تکنیک‌های مختلف مدل‌سازی ابداع شده است که به دلیل عدم وجود شناخت و اطلاعات

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری آب و هواشناسی کشاورزی و دانشیار، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان
* نویسنده مسئول: (Email: j.khosshal@geo.ui.ac.ir)

۳- استادیار پژوهشکده خرما و میوه‌های گرمسیری

DOI: 10.22067/JSW.2021.72036.1083

4- AUC: area under the receiver operating curve

مراتب دشوارتر است. علاوه بر این‌ها، خرما از جمله محصولات کشاورزی است که به علت مازاد تولید، پتانسیل بالایی جهت صادرات دارد و بدین دلیل یکی از مهم‌ترین محصولات صادراتی کشور محسوب می‌شود؛ بنابراین در نظر گرفتن اصل مزیت نسبی در کشت ارقام برتر و تجاری خرما، نقش مهمی در ارزآوری، ایجاد اشتغال، تأمین امنیت غذایی و در سطوح جهانی تقویت قابلیت رقابت از طریق تأمین درآمد حاصل از صادرات غیرنفتی را داراست.

حلاوی و گنطار، ارقام منتخب این پژوهش هستند که علت انتخاب آن‌ها، بازارپسندی داخلی و خارجی خوب آن‌هاست که آن‌ها را به ارقام تجاری خرما در کشور تبدیل کرده است. علاوه بر تفاوت‌های ظاهری، رقم حلاوی از جمله ارقام نیمه‌خشک خرما و رقم گنطار از جمله ارقام تر کشور است. لذا هدف پژوهش حاضر، تعیین قلمرو کشت این دو رقم در سطح کشور در شرایط کنونی و آتی به منظور حداکثر بهره‌وری از نخلستان‌ها، جلوگیری از اتلاف عمر و سرمایه نخلکاران، تضمین درآمد تجاری و پایداری صنعت خرماست.

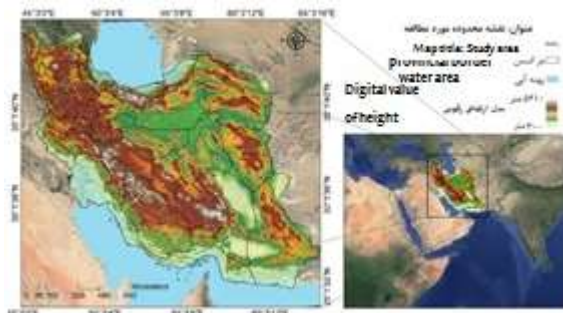
مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

ایران در عرض‌های جغرافیایی 25° تا 39° در جنوب منطقه معتدله نیمکره شمالی و همچنین در 44° تا 63° طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). مرتفع‌ترین بخش کشور مربوط به ارتفاعات البرز مرکزی با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر است. در محدوده دماوند ارتفاع ۵۶۱۰ متر و در مناطق شمال غرب ایران، در استان اردبیل، در سیلان و آذربایجان شرقی و سهند بیش از ۴۰۰۰ متر است. پست‌ترین بخش کشور هم در محدوده جلگه‌ای استان مازندران با ارتفاع ۳۰- متر پایین‌تر از سطح آب‌های آزاد در شهرستان‌های فریدون‌کنار و بندر انزلی و حوالی آن واقع شده است.

بنابراین راه‌حلی برای داده‌های کم حضور به وجود آورده است. علاوه بر این از لایه‌های محیط زیستی پس‌زمینه برای تمام منطقه مورد مطالعه استفاده می‌کند (۱۶ و ۹). کارایی این مدل به عنوان یکی از روش‌های مدل‌سازی پراکنش در مقایسه با سایر روش‌ها خوب ارزیابی شده است (۱۲ و ۱۷). مطالعات گسترده‌ای در زمینه پیش‌بینی قلمرو کشت گونه‌ها انجام گرفته است؛ مطالعات تغییر اقلیم در کشور اسپانیا علاوه بر آن که نشانگر افزایش قلمرو مناسب کشت خرما در آن کشور تا سال ۲۱۰۰ است، دارای اطلاعات مفیدی در زمینه برنامه‌ریزی استراتژیکی کشور در بخش کشاورزی خواهد بود تا ضمن شناسایی مناطق زیر کشت این محصول سودآور، مناطقی که به رسیدگی بیشتری نیاز دارند، بیش از قبل مورد توجه قرار گیرند (۱۳). باعقیده و همکاران (۳) با استفاده از خروجی‌های CMPI5 و بررسی روند من‌کندال نشان دادند که در دوره‌های آتی در مناطق مرکزی ایران، قلمرو کشت خرما افزایش خواهد یافت. در مطالعه دیگری تخمین زده شد مناطق مناسب کشت خرما که در زمان کنونی معادل ۴/۸ میلیون هکتار هستند تا سال ۲۱۰۰ به ۳۱/۳ میلیون هکتار خواهد رسید (۱۴).

نخل یا درخت خرما یکی از درختان مهم و استراتژیک ایران است. کشور ما به علت دارا بودن شرایط مناسب کشت خرما، بر اساس آمار موجود از نظر سطح زیر کشت دارای مقام اول جهان و از نظر تولید و صادرات با برخورداری از ۱۶/۵ درصد صادرات جهان، دارای مقام دوم می‌باشد. این گیاه چندین قرن عمر می‌کند و برخی از انواع آن‌ها تا حدود ۲۰۰ سالگی نیز میوه داده‌اند اما عمر مفید و اقتصادی آن‌ها به طور متوسط حدود ۵۰ سال است. لازم به ذکر است این درخت تا قبل از ۱۰ سالگی نیز محصول اقتصادی تولید نمی‌کند و به شرایط محیطی و به خصوص شرایط آب و هوایی بسیار حساس است؛ از سویی دیگر هزینه‌های بالای تغییر رقم و تفاوت قیمت میوه نقش تعیین‌کننده‌ای در سوددهی سرمایه‌گذاران دارد (۴)؛ بنابراین احداث نخلستان یک سرمایه‌گذاری بلندمدت ریسک‌پذیر در کشور بحساب می‌آید و به نسبت گیاهان زراعی، انتخاب رقم در گیاهان باغی به



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

Figure 1- Map of the geographical location of the study area (Authors, 1400)

داده‌ها

۲- آمار و اطلاعات کشاورزی: داده‌های مربوط به نقاط حضور ارقام خرما در سطح کشور که از موسسه خرما و میوه‌های گرمسیری اهواز اخذ گردید.

۱- اطلاعات اقلیمی: داده‌های روزانه دمای حداقل، حداکثر و میانگین و بارش مربوط به ایستگاه همدید با طول دوره آماری ۲۰ سال (۱۳۷۶-۱۳۹۵) که از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید.

جدول ۱- متغیرهای محیطی استفاده‌شده در ساخت مدل پراکنش ارقام حلاوی و گنطار در ایران و یکاهای آن

Table 1- Bioclimatic variables used in constructing the distribution model of Halawi and Gantar cultivars in Iran and its units

Abbreviation	Environmental layers	Unit
Bio 1 بیو ۱	Average annual temperature میانگین دمای سالانه	Degrees Celsius (°C) درجه سلسیوس
Bio 2 بیو ۲	Average daily temperature range میانگین دامنه دمای روز	Degrees Celsius (°C) درجه سلسیوس
Bio 3 بیو ۳	Isothermal (Bio2/Bio7*100) شاخص ایزوترمالتی	Degrees Celsius (°C) درجه سلسیوس
Bio 4 بیو ۴	Seasonal temperature تغییرات فصلی دما	Degrees Celsius (°C) درجه سلسیوس
Bio 5 بیو ۵	Minimum temperature in the coldest month حداکثر دمای گرم‌ترین ماه	Degrees Celsius (°C) درجه سلسیوس
Bio 6 بیو ۶	Maximum temperature in the warmest month حداقل دمای سردترین ماه	Degrees Celsius (°C) درجه سلسیوس
Bio 7 بیو ۷	Annual temperature range دامنه سالانه دما	Degrees Celsius (°C) درجه سلسیوس
Bio 8 بیو ۸	Average temperature of the wettest season دمای متوسط پربارش‌ترین سه‌ماهه متوالی	Degrees Celsius (°C) درجه سلسیوس
Bio 9 بیو ۹	Average temperature of the driest season of the year دمای متوسط کم‌بارش‌ترین سه‌ماهه متوالی	Degrees Celsius (°C) درجه سلسیوس
Bio 10 بیو ۱۰	Average temperature of the warmest season of the year دمای متوسط گرم‌ترین سه‌ماهه متوالی	Degrees Celsius (°C) درجه سلسیوس
Bio 11 بیو ۱۱	Average temperature of the coldest season of the year دمای متوسط سردترین سه‌ماهه متوالی	Degrees Celsius (°C) درجه سلسیوس
Bio 12 بیو ۱۲	Annual precipitation مجموع بارندگی سالانه	Millimeter (mm) میلی‌متر
Bio 13 بیو ۱۳	Precipitation of the warmest month of the year مجموع بارندگی گرم‌ترین ماه	Millimeter (mm) میلی‌متر
Bio 14 بیو ۱۴	Precipitation of the driest month of the year مجموع بارندگی خشک‌ترین ماه	Millimeter (mm) میلی‌متر
Bio 15 بیو ۱۵	Seasonal precipitation تغییرات فصلی بارش	Millimeter (mm) میلی‌متر
Bio 16 بیو ۱۶	Precipitation of the driest season of the year مجموع بارندگی خشک‌ترین فصل	Millimeter (mm) میلی‌متر
Bio 17 بیو ۱۷	Precipitation of the wettest season of the year مجموع بارندگی مرطوب‌ترین فصل	Millimeter (mm) میلی‌متر
Bio 18 بیو ۱۸	Precipitation of the warmest season of the year مجموع بارندگی گرم‌ترین فصل	Millimeter (mm) میلی‌متر
Bio 19 بیو ۱۹	Precipitation of the coldest season of the year مجموع بارندگی سردترین فصل	Millimeter (mm) میلی‌متر

یک از سه ماهه اوت، سپتامبر و اکتبر کمتر از ۵۰ میلی‌متر برسد، به‌عنوان طبقه خوب تا متوسط، اگر این مقدار به بیشتر از ۵۰ میلی‌متر در هر یک از سه ماه برسد، طبقه متوسط تا ضعیف و اگر به بیش از ۵۰ میلی‌متر در دو ماه برسد، به‌عنوان طبقه ضعیف جهت کشت خرما نام‌گذاری شد و طبقه خیلی ضعیف هم دربرگیرنده مناطقی است که در هر سه ماهه بارش بیشتر از ۵۰ میلی‌متر باشد (۶). سپس با استفاده از منابع و مصاحبه با متخصصان و باغداران، نیازهای حرارتی گیاه محاسبه و دماهای فرین بالا و پایین تعیین شد. دماهای فرین بالا و پایین برای خرما به ترتیب ۴۸ و ۴ درجه سانتی‌گراد و کمتر از آن در نظر گرفته شد (۱۳). به منظور تعیین فرین‌ها، در دوره‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰، مقدار کاهش در مقدار مطلق دمای فرین پایین هر کدام یک درجه سلسیوس در نظر گرفته شد و مناطق دارای دماهای مطلق فرین‌های پایین بالاتر از این مقادیر را غیرقابل کشت در نظر گرفته و از نقشه‌های تولیدی MaxEnt حذف شد. در مرحله بعد با وجودی که برای محصولات باغی یا درختان میوه معمولاً شیب زمین را حداکثر ۱۵ درصد در نظر می‌گیرند و یا حتی به طور خودرو درختانی ممکن است در شیب‌های بالاتر هم رشد کنند، اما در مورد درخت خرما در منابعی شیب‌های تا ۱۰ درصد ذکر شده است (۱۳ و ۱۴) اما دلیلی در مورد آن بیان نگردید. بهترین مطالعه‌ای که در این مورد انجام گرفته تحقیقی است که در عربستان سعودی برای کشت خرما انجام شده است و شیب مناسب را ۷ درصد پیشنهاد می‌نماید؛ چرا که بیش از ۹۰ درصد اراضی مناسب کشت خرما شیب کمتر از ۷ درصد داشته‌اند و شیب بیشتر باعث افزایش سرعت رواناب و فرسایش خاک خواهد شد (۱). لذا در این پژوهش نیز مقدار مذکور توسط محققان پذیرفته شده و مناطق بالاتر از آن، از نقشه‌های برآوردی MaxEnt کسر شده است.

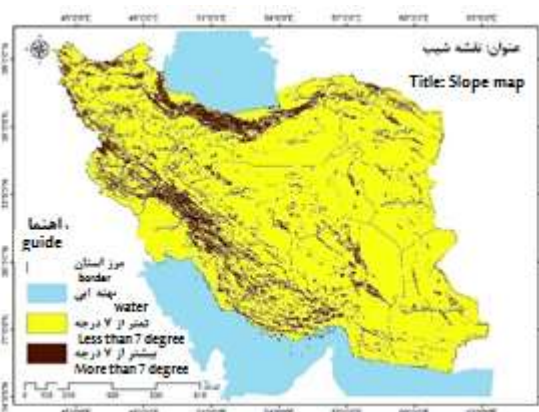
۳- اطلاعات ارتفاعی: داده‌های مربوط به ارتفاع مناطق کشت که از نقشه مدل رقومی سازمان نقشه‌برداری کشور با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰ برداشت گردید. علاوه بر آن از این مدل جهت ترسیم نقشه شیب نیز استفاده شد.

۴- لایه‌های محیطی: ۱۹ متغیر زیست‌اقلیمی که از سایت www.worldclim.org با دقت مکانی ۳۰ ثانیه (تقریباً ۱ کیلومتر) در سطح جهان دانلود گردید. پایگاه داده‌های مذکور از متوسط ماهیانه درجه حرارت و بارندگی در طول سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۰ ایجاد شده‌اند که شامل شاخص‌های بارندگی و درجه حرارت متوسط، متغیرهای فصلی حداکثر و حداقل می‌باشند (جدول ۱).

۵- اطلاعاتی نیز پیرامون میوه خرما و ارقام منتخب به صورت مکتوب و کتابخانه‌ای گردآوری شد.

روش‌ها

این تحقیق به روش میدانی، آمار توصیفی و کتابخانه‌ای انجام گرفت. نخست با مراجعه به منابع موجود، مصاحبه با کارشناسان، متخصصان، باغداران و حضور میدانی در نخلستان‌ها، رفتار درخت و میوه خرما و عوامل محیطی و اقلیمی محدودکننده رشد خرما در طول فرآیند رشد شناخته شد. به منظور کاهش خطای پیش‌بینی‌ها برای هر یک از عواملی که می‌تواند محدودکننده رشد خرما باشد (از قبیل ارتفاع، بارش، دمای فرین بالا و پایین شیب)، نقشه‌ای جداگانه در محیط ArcGIS 10.2.2 ترسیم گردید. شکل ۲ نشان‌دهنده نقشه طبقه‌بندی ارتفاعات است که در ارتفاعات بیشتر از ۱۲۰۰ متر، خرما غیرقابل کشت است. نقشه بارش بر اساس مجموع بارش‌های سه ماهه اوت، سپتامبر و اکتبر در طول سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۶ ترسیم گردید (شکل ۴). برای طبقه‌بندی آن مناطقی که بارندگی در طول هر



شکل ۳- نقشه طبقه‌بندی کشور برحسب شیب (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

Figure 3- Iran classification map in terms of slope (Author, 1400)



شکل ۲- نقشه طبقه‌بندی کشور برحسب ارتفاع (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

Figure 2- Iran classification map in terms of height (Author, 1400)



شکل ۵- نقشه طبقه‌بندی کشور برحسب دماهای فرین بالا و پایین (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

Figure ۵- Iran classification map in terms of temperature (Author, 1400)

منتخب، داده‌های نقاط حضور ارقام منتخب به صورت تصادفی به دو قسمت تقسیم و ۷۵ درصد داده‌ها برای مدل‌سازی و ۲۵ درصد باقیمانده برای اعتبارسنجی استفاده شد. شایان ذکر است در اجرای این مدل ۱۰۰۰ بار تکرار انتخاب شد و برای حساسیت‌سنجی و مشخص کردن متغیرهای مهم در پراکنش از تحلیل چکنایف استفاده شد. چکنایف یک روش محاسباتی- آماری - کامپیوتری برای تعیین میزان دقت برآوردگرهای حاصل داده نمونه است. در این تکنیک فقط با یک روش خیلی ساده می‌توان تقریباً هر آماره‌ای از توزیع داده‌های نمونه را تخمین زد (۱۶). برای ارزیابی دقت و صحت مدل از معیار سطح زیر منحنی AUC استفاده شد. ارزش AUC پیشنهادی برای طبقه‌بندی مدل با استفاده از مساحت AUC شامل (۰/۹-۱) دقت عالی، (۰/۸-۰/۹) دقت خیلی خوب، دقت خوب، (۰/۷-۰/۸) دقت متوسط و (۰/۶-۰/۷) دقت کم است (۹، ۱۰، ۱۵). مدل برگزیده این مطالعه CCSM4 بوده، چرا که بر اساس آزمون و خطا نسبت به سایر مدل‌های اقلیمی در پیش‌نگری قلمرو کشت خرما مقدار AUC این مدل بیشتر بوده است. از سویی دیگر RCP4.5، بعلاوه آن که AUC آن نسبت به سایر سناریوها بیشتر بوده است، به عنوان سناریو منتخب در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

شکل ۶ و ۷ نشان‌دهنده پراکنش خرماي ارقام گنطار و حلاوی در شرایط کنونی است. ارقام مذکور به علت داشتن خصوصیات متفاوت، پراکنده‌گی یکسانی در سطح کشور ندارند.



شکل ۴- نقشه طبقه‌بندی کشور برحسب بارش ۳ ماهه (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

Figure ۴- Iran classification map in terms of rainfall (Author, 1400)

سپس ۱۹ متغیر زیست‌اقلیمی با قدرت تفکیک‌پذیری ۳۰ ثانیه و به صورت ریزمقیاس شده بر مبنای سناریوهای جدید انتشار برای مدل اقلیمی CCSM4 از سایت اخذ و با کمک ArcGIS برای کشور ایران از آن تفکیک شد. سناریوهای مذکور شامل RCP2.6 (که طبق آن واداشت تابشی در اواسط این قرن به حدود ۳/۱ رسید و سپس کاهش یافته و به ۲/۶ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد)، RCP4.5 که در آن واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند، RCP6.0 (واداشت تابشی قبل از سال ۲۱۰۰ کمتر از ۶ وات بر مترمربع و بعد از ۲۱۰۰ به ۶ وات بر مترمربع می‌رسد و ثابت می‌ماند) و RCP8.5 (که واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌شود. در این هنگام غلظت دی‌اکسید کربن به ۱۰۰۰ ppm می‌رسد و همچنان روند افزایش خواهد داشت). مدل CCSM4 نیز، نسخه چهارم مدل سامانه جامع اقلیم و مدل تدوین شده مرکز پژوهش‌های هواشناسی آمریکاست. این مدل اقلیمی از پنج مدل جداگانه اتمسفری، اقیانوسی، زمینی، یخ و دریا- یخ بعلاوه یک مؤلفه ترکیبی مرکزی تشکیل شده است (۱۰). سپس متغیرهای زیست‌اقلیمی مذکور در نرم‌افزار ARCGIS10.2.2 به فرمت ASCII تبدیل و وارد نرم‌افزار MaxEnt شد. در نهایت عوامل محدودکننده رشد از نقشه‌های خروجی مدل کسر گردید و نقشه‌های نهایی پراکنده‌گی استعدادهای کشت ارقام منتخب خرما در زمان کنونی، سال ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ با توجه به تقسیمات سیاسی کشور در مقیاس ۱/۵۰۰۰۰۰ ترسیم و با استفاده از نرم‌افزار ARCGIS10.2.2 مساحت طبقات کشت خرما در سطح کشور به تفکیک استان و شهرستان محاسبه شد. به منظور ارزیابی عملکرد نرم‌افزار MaxEnt و مدل اقلیمی



شکل ۷- نقشه پراکنش رقم حلاوی در ایران (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)
Figure 6- Distribution map of Gantar cultivar in Iran (Source: Authors, 1400)

شکل ۶- نقشه پراکنش رقم گنطار در ایران (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

Figure 6- Distribution map of Gantar cultivar in Iran (Source: Authors, 1400)

در شرایط کنونی پتانسیل سطح مطلوب کشت ارقام گنطار و حلاوی در کشور به ترتیب $37429/15$ و $18335/83$ کیلومتر مربع می‌باشد. جدول ۲ مقادیر سطح زیرپوشش ارقام مذکور در شرایط کنونی را برحسب استعدادهای رشد در سطح کشور نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقادیر سطوح دارای پتانسیل کشت ارقام گنطار و حلاوی در شرایط کنونی بر اساس خروجی MaxEnt

Table 2- Values of potential area of Gantar and Halawi cultivars in the current conditions based on MaxEnt output

طبقات Classes	مساحت رقم گنطار Gantar area	مساحت رقم حلاوی Halawi area
غیرقابل کشت Non-cultivable	1458617.58	1538784.21
ضعیف Low	69966.64	36949.65
متوسط Medium	49139.15	30345.82
خوب Good	33042.49	23782.49
مطلوب Suitable	37429.15	18335.83

طبق تقسیم‌بندی آب و هوایی آمبرژه اقلیم شهرستان مذکور بیابانی گرم شدید است (۱۱). ارتفاع این شهرستان نیز ۵۹۱ متر از سطح دریاست و عوامل محدودیت‌زای شرح داده شده (از قبیل شرایط دمایی، بارشی، شیب زمین و ...) برای کشت این رقم در این شهرستان وجود ندارد، لذا تفسیر فوق از نظر علمی توجیه‌پذیر می‌باشد. در ارزیابی استعدادهای رشد رقم گنطار در کشور ایران مدل MaxEnt نشان داد که در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ بر اساس سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 مساحت طبقات مطلوب، خوب، متوسط و ضعیف، کاهش و مساحت طبقه غیرقابل کشت افزایش می‌یابد (شکل ۱۰). جدول ۳ مقادیر مساحت سطوح طبقات غیرقابل کشت، ضعیف، متوسط، خوب و مطلوب برای کشت را نشان می‌دهد.

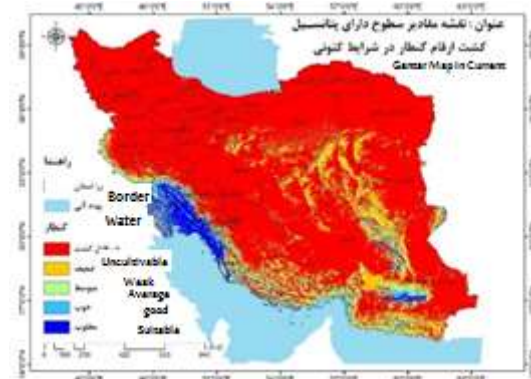
بیشترین سطح مطلوب کشت رقم گنطار را استان خوزستان با ۳۰۳۲۹ کیلومتر مربع داراست. بر اساس تقسیمات شهرستان‌های کشور، شهرستان ایرانشهر در استان سیستان و بلوچستان با ۵۱۵۸ کیلومتر مربع بیشترین سطح مطلوب را برای کشت این رقم را دارد (شکل ۸).

بیشترین سطح مطلوب کشت رقم حلاوی را استان هرمزگان با ۹۲۴۱ کیلومتر مربع دارد و بر اساس تقسیمات شهرستان‌های کشور، شهرستان ایرانشهر در استان سیستان و بلوچستان با ۳۸۱۶ کیلومتر مربع بیشترین سطح مطلوب را برای کشت این رقم دارد (شکل ۹).

بر اساس خروجی‌های مدل در ارقام گنطار و حلاوی بیشترین تأثیر در پراکنش ارقام مذکور را به ترتیب بیو ۱۰ و بیو ۱ دارند که مقدار آن به ترتیب برابر با $77/9$ و $73/1$ درصد است. مقادیر بیو ۱۰ و بیو ۱ در شهرستان ایرانشهر برابر با $26/7$ و $34/8$ درجه سلسیوس است و



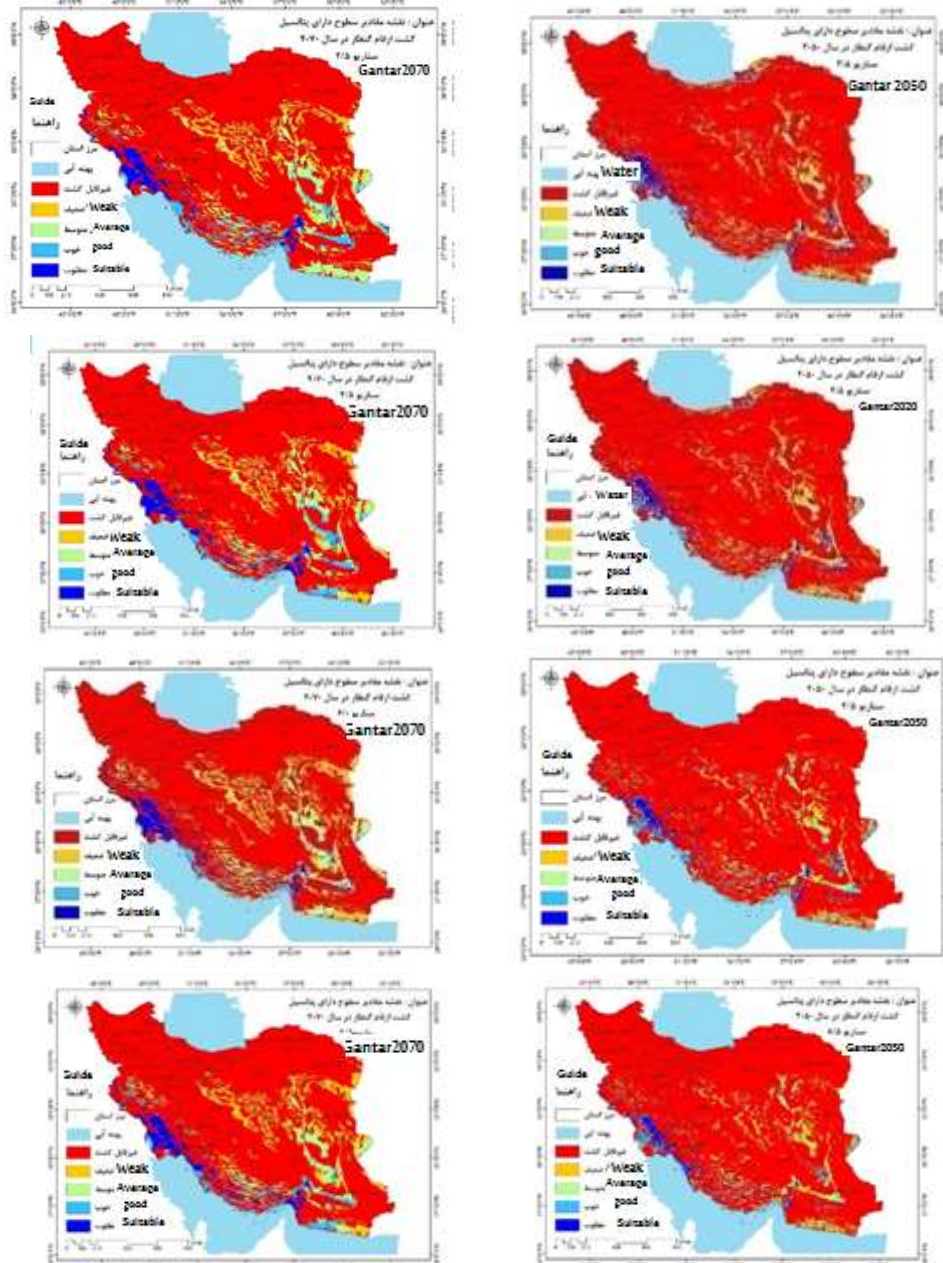
شکل ۹- نقشه پراکندگی استعدادهای رشد رقم حلاوی در شرایط کنونی بر اساس خروجی MaxEnt (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)
 Figure 9- Distribution map of Halawi cultivar growth talents in the current situation based on MaxEnt output (Authors, 1400)



شکل ۸- نقشه پراکندگی استعدادهای رشد رقم گنطار در شرایط کنونی بر اساس خروجی MaxEnt (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)
 Figure 8- Distribution map of Gantar cultivar growth talents in the current situation based on MaxEnt output (Authors, 1400)

جدول ۳- مقادیر سطوح دارای پتانسیل کشت ارقام گنطار در سال ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ بر اساس خروجی MaxEnt
 Table 3- Values of potential area of Gantar cultivars in 2050 and 2070 based on MaxEnt output

طبقات Classes	2050			
	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
غیرقابل کشت Non-cultivable	۱۵۲۷۹۸۵٫۰۵	1527985.5	1535115.8	1538069.2
ضعیف Low	۴۵۹۲۹٫۱۵	45929.15	37723.32	35846.65
متوسط Medium	۲۷۱۸۶٫۶۶	27186.66	27458.32	26629.16
خوب Good	۲۲۰۹۴٫۳۹	21094.16	23777.49	22042.49
مطلوب Suitable	۲۴۹۹۹٫۷۶	25999.99	24119.99	25607.49
طبقات Classes	2070			
	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
غیرقابل کشت Non-cultivable	1503237.5	1511243.3	1508954.2	1513361.6
ضعیف Low	22493.32	31136.65	33939.15	28731.66
متوسط Medium	54577.48	32464.15	44574.15	32969.99
خوب Good	37531.65	36643.32	29997.49	37087.49
مطلوب Suitable	30354.99	36707.48	30729.99	36044.21



شکل ۱۰- نقشه‌های پراکندگی استعداد‌های رشد رقم گنطار با سناریوهای RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 و RCP8.5 در سال ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ بر اساس خروجی MaxEnt (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

Figure 10- Distribution maps of Gantar cultivar growth talents with scenarios of RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5 in 2050 and 2070 based on MaxEnt output (Authors, 1400)

سلسبوس است و اقلیم منطقه خشک و گرمسیری است که دارای تابستان‌های طولانی و گرم است. ارتفاع آن ۱۲ متر از سطح دریاست و عوامل محدودیت‌زای دیگر نیز برای کشت این رقم در این شهرستان وجود ندارد، بنابراین تفسیر فوق از نظر علمی توجیه‌پذیر می‌باشد.

بر اساس یافته شماره ۵، در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ شرایط

با توجه به نقشه پراکندگی استعداد‌های رشد رقم گنطار (شکل ۱۰) و تقسیمات شهرستان‌های کشور، در سال ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰، شهرستان اهواز بیشترین سطح مطلوب کشت رقم گنطار را در سطح کشور خواهد داشت. بر اساس خروجی‌های مدل در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰، ۱۰ بیو با ۴۲ درصد تأثیرگذاری در پراکنش رقم مذکور بیشترین نقش را دارد. مقدار بیو ۱۰ در شهرستان اهواز برابر با ۳۱/۲ درجه

نتیجه‌گیری

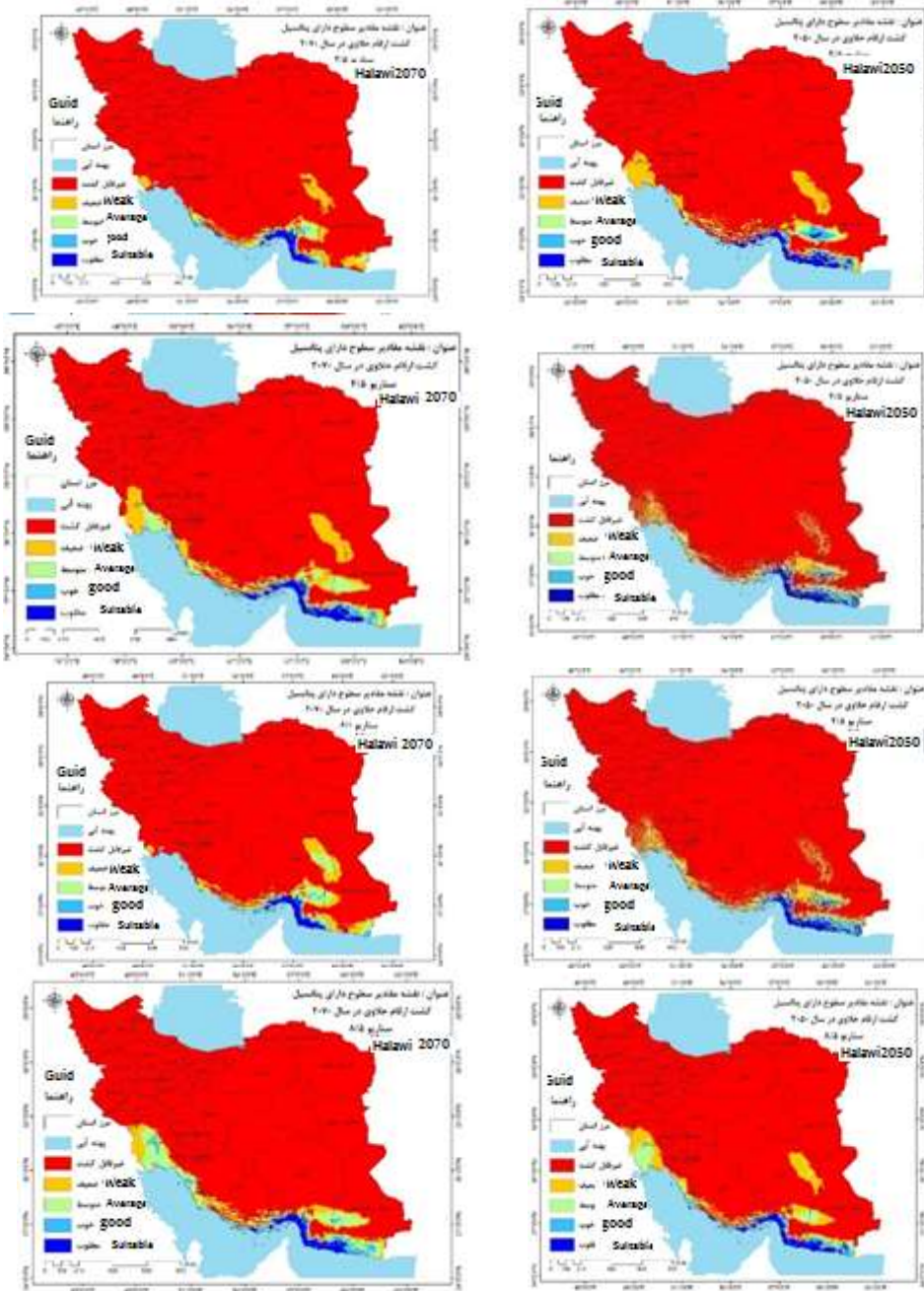
پیش‌نگری پراکنش ارقام گیاهی بازرش در کشور می‌تواند گام بلندی در جهت مدیریت بخش کشاورزی و تأمین معاش مردم باشد. پژوهش حاضر نیز که با هدف پیش‌نگری دو نمونه از ارقام مهم خرما در کشور انجام شد، مؤید عملکرد عالی مدل انتخابی است. خروجی‌های مدل نشانگر بالاترین مقدار AUC در سناریو RCP4.5 نسبت به سایر سناریوهاست بنابراین این سناریو به‌عنوان سناریو منتخب این پژوهش قرار گرفت. بر اساس آن، سطح مطلوب کشت رقم گنطار در سال ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ به ترتیب ۰/۶ درصد (۱۱۴۲۹ کیلومتر مربع) و ۰/۲ درصد (۷۲۱ کیلومتر مربع) نسبت به سطح مطلوب کشت در شرایط کنونی کاهش خواهد یافت اما سطح مطلوب کشت رقم حلاوی در سال ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ نسبت به مساحت مطلوب در شرایط کنونی به ترتیب ۰/۴۱ درصد (۶۷۸۵ کیلومتر مربع) و ۰/۴ درصد (۶۶۳۳ کیلومتر مربع) افزایش خواهد یافت.

کشت رقم حلاوی نسبت به شرایط کنونی مساعدتر خواهد شد. به شکلی که بر اساس سناریو ۴/۵ مساحت طبقه مطلوب که در شرایط کنونی ۱۸۳۳۵/۸۳ بوده در سال ۲۰۵۰ به ۲۵۱۲۱/۶۶ کیلومتر مربع و در سال ۲۰۷۰ به ۲۴۹۶۹/۱۶ کیلومتر مربع خواهد رسید (شکل ۱۱). جدول ۴ مقادیر مساحت و درصد سطوح طبقات غیرقابل کشت، ضعیف، متوسط، خوب و مطلوب برای کشت این رقم را در سال ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ نشان می‌دهند.

براساس نقشه‌های پراکنده‌ای استعدادهای رشد رقم حلاوی (شکل ۱۱) و تقسیمات شهرستان‌های کشور، در سال ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ شهرستان جاسک بیشترین سطح مطلوب کشت رقم مذکور را خواهد داشت. از میان متغیرهای زیست‌اقلیمی (جدول ۱) بیوع و بیوع با ۸۶/۹ و ۸۸/۷ درصد تأثیرگذاری بیشترین نقش را در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ بر روی پراکنش این رقم خواهند داشت. حداکثر دما در گرم‌ترین ماه و دمای متوسط مرطوب‌ترین فصل در این شهرستان ۳۰/۳ و ۲۴/۴ درجه سلسیوس است. ارتفاع آن ۴/۸ متر از سطح دریاست و عوامل محدودیت‌زای دیگر نیز برای کشت این رقم در این شهرستان وجود ندارد، لذا تفسیر فوق از نظر علمی توجیه‌پذیر می‌باشد.

جدول ۴- مقادیر سطوح دارای پتانسیل کشت رقم حلاوی در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ بر اساس خروجی مکسنت

طبقات Classes	2050			
	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
غیرقابل کشت Non-cultivable	1522590.88	1529638.38	1510695.6	1521107.55
ضعیف Low	46821.65	44957.48	48182.48	61493.31
متوسط Medium	36467.49	26514.99	37154.15	20884.99
خوب Good	16959.16	21962.49	27897.49	18388.33
مطلوب Suitable	25355.82	25121.66	24265.82	26320.82
طبقات Classes	2070			
	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
غیرقابل کشت Non-cultivable	1521440	1521485.88	1521653	1503202.56
ضعیف Low	51401.94	55757.48	59661.42	43599.15
متوسط Medium	29694.45	30699.99	37032.26	58791.31
خوب Good	23999.45	15282.49	9028.33	20791.66
مطلوب Suitable	21659.16	24969.16	20819.99	21803.32



شکل ۱۱- نقشه‌های پراکندگی استعداد های رشد رقم حلاوی با سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 در سال ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ بر اساس خروجی MaxEnt (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

Figure 11- Distribution maps of Halawi cultivar growth talents with scenarios of RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5 in 2050 and 2070 based on MaxEnt output (Source: Authors, 1400)

کاهش سطح مطلوب کشت آن شود. سطح مطلوب کشت رقم حلاوی تا سال ۲۰۷۰ افزایش می‌یابد زیرا این رقم از جمله ارقام زودرس و مقاوم خرماست و تنش‌های گرمایی خسارت چندانی به آن وارد نمی‌کند. به‌طور کلی در دهه‌های آینده با توجه به سیر صعودی دما، قلمرو

موطن اصلی رقم گنظار در غرب کشور است و بر اساس مطالعه دارند و حمیدی نیمه غربی کشور تا سال ۲۰۷۰ به مراتب افزایش دمای بیشتری را نسبت به نواحی دیگر کشور تجربه خواهد کرد (۵) بنابراین سیر صعودی متغیر بیو ۱۰ در فصل رسیدن خرما می‌تواند منجر به ریزش بیش‌ازحد طبیعی خرماها، خسارت به میوه‌های خرما و

یک گونه کفایت نمی‌کند و بهتر است تا توان‌سنجی با توجه به ویژگی‌های ارقام مختلف آن گونه انجام گیرد زیرا ارقام مختلف یک گیاه رفتارهای فنولوژیک یکسانی ندارند و همین امر بر دوره رشد و مکان‌های مستعد رشد آن‌ها تأثیرگذار است. مطالعات پیشین حکایت از افزایش سطح مطلوب کشت خرما در کشور تا ۲۱۰۰ دارند (۱۵) اما تمایز این مطالعه نیز نسبت به سایرین (۳، ۱۳ و ۱۵) علاوه بر استفاده از مدل اقلیمی CCSM4 و سناریوهای جدید انتشار (RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5)، پیش‌نگری پراکنش خرما با توجه به ارقام آن در سطح کشور و تعیین مطلوب‌ترین استان و شهرستان کشور جهت کشت ارقام منتخب است. درحالی‌که در مطالعات گذشته پیرامون پیش‌بینی پراکنش خرما، به ارقام آن توجهی نشده بود؛ بنابراین، تحقیق حاضر نتایج مطمئن‌تر و کاربردی‌تر برای بخش کشاورزی کشور به همراه دارد و این روش برای کاربران انتخاب بهترین رقم از هر گونه را در محل کشت فراهم می‌کند.

کشت خرما جابه‌جا خواهد شد و مناطقی از کشور به خصوص مناطق پای‌کوهی دشتی برای کشت آن مستعدتر می‌شوند. در زمان کنونی برای ارقام گنطار و حلاوی حداکثر ارتفاعی که رقم مذکور استعداد رشد به صورت مطلوب دارد، ارتفاع ۷۰۰ متری از سطح دریاست ولی در سال ۲۰۷۰ حداکثر ارتفاعی که ارقام مذکور می‌توانند رشد مطلوبی داشته باشند به ترتیب در حدود ۱۱۰۰ و ۱۲۳۰ متری از سطح دریاست. همچنین مشخص شد استفاده از داده‌های worldclim برای گیاهان چندساله و به خصوص پایا با عمر طولانی، به تنهایی کافی نیست؛ زیرا در این داده‌ها، دماهای فرین بالا و پایین که می‌تواند گیاه را در طول زندگی خود نابود گرداند و یا عمر آن را کوتاه کرده و ثمره اقتصادی کشت و کار را کمتر کند، لحاظ نشده است و البته چون باغداری و درختان میوه یک سرمایه‌گذاری بلندمدت است نباید خطر سرمایه‌گذاری را زیاد نمود. علاوه بر این، تحقیق حاضر نشان داد برای کاربرد توان‌سنجی مناطق از لحاظ شرایط آب و هوایی برای کاشت گونه‌های گیاهان پایا بر اساس نیازها و خصوصیات کلی

منابع

- Allbed A., Kumar L., and Shabani F. 2017. Climate change impacts on date palm cultivation in Saudi Arabia. *The Journal of Agricultural Science* 155(8): 1203-1218.
- Anderson R.P., Lew D., and Peterson A.T. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* 162: 211-232.
- Baaghdeh M., Azizzadeh J., Ahmadi H., and Entezari A. 2020. Climate change impacts on the cultivation areas of date palm tree in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(22): 1-20.
- Chao C.T., and Krueger R.R. 2007. The date palm (*Phoenix dactylifera* L.): Overview of biology, uses, and cultivation. *HortScience* 42(5): 1077-1082.
- Darand M., and Hamidi S. 2021. Prediction of temperature changes in Iran based on different scenarios. *Scientific Research Journal of Natural Hazards* 10(28): 85-104
- Fao. 2002. Date Palm Cultivation. <https://www.fao.org/3/Y4360E/y4360e00.htm>
- Graham C.H., Ferrier S., Huettman F., Moritz C., and Peterson A.T. 2004. New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis. *Trends Ecology and Evolution* 19(9): 497-503.
- Maleki S., Saghalian A., SoltaniKoopai S., Pourmanafi S., and Rahdari V. 2009. Modeling the suitability of waterfowl habitats and waterfront habitats of Hamoon Wetland using the maximum entropy model. *Scientific Journal of Wetland Ecobiology* 11(40): 6. (In Persian with English abstract)
- Mirzaei R., Homami M., Ismaili Sari A., Rezaei H., 2013. Modeling the distribution of *Falco nanumanni* in Golestan province. *Environmental Research* 4(8):152. (In Persian with English abstract)
- Mohammadi A., Alavi S., and Hosseini S.M. 2016. Determining the potential habitat of *UlmusglabraHuds.* *Iranian Forest Journal, Iranian Forestry Association* 4(10): 479. (In Persian with English abstract)
- Negaresh N. 2008. Analysis of recent droughts in Iranshahr region by SP method. *Journal of Geographical Sciences* 9(12): 32-58. (In Persian with English abstract)
- Phillips S.J., Anderson R.P., and Schapire R.E. 2006. Maximum entropy modeling of speciesgeographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.
- Shabani F., Kumar L., Esmaeili A., and Saremi H. 2013. Climate change will lead to larger areas of Spain being conducive to date palm cultivation. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 11(3&4): 2441-2446.
- Shabani F., Kumar L., and Taylor S. 2014. Suitable regions for date palm cultivation in Iran are predicted to increase substantially under future climate change scenarios. *The Journal of Agricultural Science* 152(4): 543-557.
- Weber T.C. 2016. Maximum entropy modeling of mature hardwood forest distribution in four U.S. states. *Forest Ecology and Management* 261: 779-788.
- Zarabi M., Haghgadi R., and Yusefi H. 2019. Habitat utility modeling of organic (wild) pistachios (*Pistacia vera*) using Maximum entropy Method (Maxent) in Sarakhs Forest Area (Gonbadli in Khorasan Province). *Iranian Journal of Ecohydrology* 4(3): 820.
- ZareChahouki M., Azarnivand H., and PiriSahragard H. 2013. Modeling the habitat distribution of plant species in

the rangelands of Hoz Sultan Qom by maximum entropy method. Rangeland 7(3): 212. (In Persian with English abstract)



Predicting Changes in Cultivation of Gantar and Halawi Dates in Iran in the 21st Century

S.M. Afzali¹- J. Khoshhal Dastjerdi²- A. Torahi³

Received: 08-09-2021

Accepted: 28-11-2021

Introduction: One of the most critical human issues globally is producing more food for the world's growing population. The climate of each region is an effective factor in the agricultural sector and the amount of its production. Iran is one of the world's date-producing countries, which ranks second in terms of date production and exports. This plant has 200 genera and 4000 species, each of which can adapt to arid regions and can have the highest production and economic efficiency in its proper place. It is a monocotyledonous plant from the Palmaceae family that needs at least 10 degrees Celsius for continued growth. Growth will stop at temperatures below 10 degrees Celsius, and temperatures below 4 degrees Celsius will encounter cold stress. This plant is sensitive to environmental conditions and cannot live qualitatively and quantitatively in all hot and dry regions. On the other hand, the palm tree is a plant that lives up to several hundred years, and some of its varieties bear fruit up to 200 years old, but their valuable and economic life is on average about 50 years. It is noteworthy that this tree did not produce an economic crop until ten years ago. Dates have an important role in currency exchange, job creation, food security, and strengthening global competitiveness by providing income from non-oil exports. Therefore, the construction of a palm tree is a risky long-term investment in the country. Dates have different varieties, each capable of adapting to a region of arid regions and can produce the most production and economic efficiency in its proper location. Global warming, its impact on different regions of the earth in the future, and the response of the living creatures of these regions in the last century have led planners and scientists of many disciplines, especially climatology researchers, and in particular agricultural climatologists, to understand climate conditions and design long-lived sustainable plants that can survive in future environmental conditions and have good economic returns, design programs, and awareness algorithms.

Materials and Methods: One of the best is the maximum entropy model (MaxEnt). By applying this algorithm, it can be predicted how the species will exist in different regions based on the presence of the species. The present study was conducted by field method, descriptive, and library statistics. The data used included WordClim site data (bioclimatic variables), presence data of two cultivars of date palm, Gantar and Halawi, daily meteorological data, elevation, and land slope based on the suitable land slope for palm tree cultivation, high and low temperatures, and phenological data. CCSM4 model with quadratic scenarios of 2.6, 4.5, 6.0, and 8.5 was used to predict and estimate different country regions in terms of talent for cultivation of two selected date varieties. Due to the higher value of AUC in Scenario 4.5, this scenario was considered as the selected scenario. This study is different from previous studies using the CCSM4 climatic model, new diffusion scenarios (RCP), and prediction of date distribution concerning its cultivars, while previous studies on prediction of date distribution have not paid any attention to it.

Results and Discussion: The results showed that the distribution and cultivation area of Gantar and Halawi are different, and in the future, the suitable area of cultivation of Gantar cultivar will decrease, and the suitable area of cultivation of Halawi cultivar will increase. Jackknife test showed that the model successfully predicted the potential of cultivation area based on the AUC criterion and temperature-related biological variables (Bio 1, Bio 6, Bio 8, and Bio 10) had the most significant impact on the distribution modeling of cultivars. Therefore, with the rising temperature, parts of the country, especially the foothills of the plains, become more susceptible to cultivation. So that at present, when the maximum height for the optimal growth of cultivars is about 700

1 and 2- Ph.D. Candidate in Agricultural Meteorology and Associate Professor, Faculty of Geography and Planning, University of Isfahan, respectively.

(*- Corresponding Author Email: j.khoshhal@geo.ui.ac.ir)

3- Assistant Professor of Date Palm and Tropical Fruits Research Institute

DOI: 10.22067/JSW.2021.72036.1083

meters, it will reach about 1200 meters in the coming decades. At present, Iranshahr city in Sistan and Baluchestan province has the most desirable area of Gantar and Halawi cultivar cultivation. However, in the next decade, the most desirable cultivation area will be the Gontar cultivar in Ahvaz city and Halawi cultivar in Jask city. It was also found that using WorldClim site data for perennial and especially long-lived plants was not sufficient. Because in these data, high and low temperatures that can destroy the plant during its life or shorten its life and reduce the economic fruit of cultivation are not included, and of course gardening and fruit trees are a long-term investment. The risk of investing should not be increased.

Keywords: CCSM4 model, Cultivation area suitability, Iran, Gantar, Halawi, MaxEnt entropy

Contents

Optimal Allocation of Surface Storage Tanks Using Fuzzy Hierarchy Method (Case Study: Shahrchay Storage Dam in Urmia)	778
E. Rezaei - M. Montaseri - H. Rezaei	
Comparison of Rice Direct Seeding and Transplanting Methods under Different Irrigation Methods	790
A.R. Kiani - M.R. Yazdani - M.T. Feyzbakhsh	
Study of the Efficiency of Groundwater Quality Index to Evaluate the Long-term Effects of Inter-Basin Water Transfer Using Non-Parametric Methods and GIS (Case Study Yazd-Ardakan Aquifer)	804
H. Sarvi Sadrabad - A. Zare Chahouki	
Development of Reverse Hydraulic Flood Routing Method in Ephemeral Rivers Considering Infiltration Rate	822
A.A. Khosravi - A. Parvaresh Rizi - R. Barati	
Effects of Copper Slag and Organic Matters on Physiological Indices of Iron Deficiency in Sorghum (<i>Sorghum bicolor</i>)	841
E. Mirparizi - M. Barani Motlagh- S.A. Movahedi Naeini- R. Ghorbani Nasrabadi- S. Bakhtiary	
Effects of Silver Nanoparticles on Soil Microbial Activity and Bacterial Populations in a Calcareous Soil Using qPCR	859
S. Balandeh - A. Lakzian- A. Javadmanesh	
Soil Moisture Estimation Method Using Remote Sensing Technique by Landsat Satellite	872
S.F. Mousavizadeh - H. Ansari- A. Faridhosseini	
Increasing the Homogeneity of Soil Map Units Using the Level of Landform Phase in the Geopedologic Approach	890
F. Ebrahimi Meymand - H. Ramezanpour- N. Yaghmaeian- K. Eftekhari	
Climatological Analysis of Extreme and Widespread Precipitations in Southeast of Iran	907
M. Moahmmadi -M. Akbary	
Predicting Changes in Cultivation of Gantar and Halawi Dates in Iran in the st Century	922
S.M. Afzali - J. Khoshhal Dastjerdi- A. Torahi	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 35

No. 6

2022

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
Bazrafshan, J.	Agricultural Meteorology	Assoc. Prof., Faculty of Agricultural Engineering and Technology
Fotovat, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Ghadiri, H.	Soil Science	Prof. Griffith University
Khorassani,R	Soil Science	Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Khormali, F.	Soil Science	Prof., Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan
Lakzian, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Liaghat, A.	Irrigation and Drainage	Prof., University of Tehran
Mosaedi, A.	Irrigation and Civil Eng.	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Mousavi Baygi, M	Agricultural Meteorology	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Oustan, Sh.	Soil Science	Prof., Tabrzi University
Taghvaeian, S.	Irrigation	Assoc. Prof., Oklahoma University

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jsa3@um.ac.ir

Web Site: <https://jsw.um.ac.ir/>

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).