



مجله پژوهش آب ایران

فصلنامه

جلد ۱۶ / شماره ۴ / پیاپی ۴۷ / زمستان ۱۴۰۱

فهرست مقالات پژوهشی:

- ۱ اندازه‌گیری حجم آب آبیاری و بهره‌وری آب مزارع پیاز در سه منطقه استان فارس
محمدعلی شاهرخ‌نیا، مهدی اکبری و فریبرز عباسی
- ۱۱ ارزیابی خطر سیل خیزی در حوضه آبخیز رودخانه زشک شانديز با استفاده از مدل‌سازی بر مبنای سنجش‌ازدور و ...
حمیرا شامکونیان، کامران داوری و محمد فرشته‌پور
- ۲۳ مدل طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد سدهای تأخیری پاره‌سنگی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ...
محمد مهدی ریاحی، حسین ریاحی مدوار و ایمان چگنی بهرامی
- ۴۱ ارزیابی توسعه‌یافتگی توده‌های کارستی دیمه و پیرغار براساس تحلیل هیدروگراف چشمه
فاطمه گراوند، سید موسی حسینی، مهران مقصودی، مجتبی یمانی و راضیه لک
- ۵۷ بهبود دقت در مدل‌سازی عمق برف مبتنی بر اثربخشی انتخاب ویژگی‌های شاخص در رگرسیون‌های ...
مصطفی آصفی و علی فتح‌زاده
- ۶۹ تصفیه آلودگی‌های پساب شهری با استفاده از گیاهان وتیور و گل اختر
مرتضی محمدی دیلمانی، محدثه مؤمن‌زاده، صاحبه حاجی‌پور و منصور افشار محمدیان
- ۸۱ تأثیر کاربرد زغال‌زیستی پوسته برنج و سطوح مختلف کاربرد آب بر پتانسیل ماتریک خاک، ویژگی‌های بیوشیمیایی ...
تارا جمیلی، افسانه عالی‌نژادیان بیدآبادی، عباس ملکی، محمد فیضیان و امید علی اکبرپور
- ۹۳ اثر روش‌های آبیاری تناوبی و غرقابی بر عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری برنج در شهرستان آمل
مهسا رحیمی پول، داود اکبری نودهی، رضا اسدی، علی باقری و فضل شیردل شه‌میری
- ۱۰۳ مطالعه اثر آلودگی کادمیوم و آبیاری با آب مغناطیس بر رشد و آنتی‌اکسیدان‌های گیاه وتیور
الهه جعفری هفشجانی، مهران هودجی، فائزه قناتی، یعقوب حسینی و ولی علیپور
- ۱۱۵ حذف ناپیوسته سرب و کادمیم از محلول‌های آبی با استفاده از نانولوله‌های کربنی چنددیواره
محمدجواد امیری، صابر جمالی و حسن زنگنه

تصلی

مجله پژوهش آب ایران

نشریه علمی

جلد ۱۶ / شماره ۴ / پیاپی ۴۷ / زمستان ۱۴۰۱

شاپا (چاپی): ۱۲۳۵-۲۰۰۸

شاپا (آنلاین): ۶۶۵۵-۲۳۴۵

صاحب امتیاز: دانشگاه شهرکرد

مدیر مسئول: محمدعلی نصر اصفهانی

سر دبیر: منوچهر حیدرپور

سر دبیر همکار: سید حسن طباطبائی

هیأت تحریریه:

سید سعید اسلامیان

محمد پسرک لی

دیپاک جاجهاریا

منوچهر حیدرپور

حمید زارع ایبانه

محمد شایان نژاد

سید حسن طباطبائی

فریبرز عباسی

روح‌اله فتاحی نافچی

احمدرضا قاسمی

رضا قضاوی

روهیتاشو کومار

سید فرهاد موسوی

رسول میرعباسی نجف‌آبادی

هیدرولوژی

روابط آب و خاک

مهندسی منابع آب

هیدرولیک

مهندسی آب

آبیاری و زهکشی

آلودگی آب و خاک

آبیاری و زهکشی

هیدرولیک

اقلیم‌شناسی

آبخیزداری

آبیاری و زهکشی

منابع آب

منابع آب

استاد دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

استاد دانشگاه آریزونا، آریزونا، آمریکا

استاد دانشگاه کشاورزی مرکزی، نیرجولی، هند

استاد دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

استاد دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران

دانشیار دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

دانشیار دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

استاد مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج، البرز، ایران

دانشیار دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

دانشیار دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

استاد دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

استاد دانشگاه علوم و تکنولوژی کشاورزی، شهر کشمیر، کشمیر، هند

استاد دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

دانشیار دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

ویراستار علمی: پری سعیدی، فروغ عباسی

ویراستار انگلیسی: رضوان السادات شریف‌نیا

صفحه آرایی: فاطمه قانی

شمارگان: ۲۰۰ نسخه

مدیر داخلی: احمدرضا قاسمی

ویراستار فارسی: فاطمه ثواب

کارشناس: فاطمه قربانی‌زاده

ناشر: دانشگاه شهرکرد

ترتیب انتشار: فصلنامه

این نشریه طی نامه ۳/۱۱/۴۰۵۹ به تاریخ ۱۳۸۹/۰۴/۲۸ از کمیسیون بررسی نشریات علمی کشور دارای اعتبار علمی - پژوهشی بوده و در جدیدترین ارزیابی سال ۱۴۰۰ توسط کمیسیون مذکور، موفق شده است رتبه B را دریافت نماید.

مقالات مجله پژوهش آب ایران در CIVILICA، Magiran، SID، JSC و Google Scholar نمایه می‌شود.

آدرس دفتر مجله: شهرکرد، دانشگاه شهرکرد، اداره انتشارات و مجلات علمی - پژوهشی، مجله پژوهش آب ایران

نمابر: ۰۳۸-۳۲۳۲۱۶۶۹

تلفن: ۰۳۸-۳۲۳۲۴۴۰۱-۷

صندوق پستی: ۱۱۵

کد پستی: ۳۴۱۴۱-۸۱۸۶

پست الکترونیک: iwrj@journals.sku.ac.ir

وبگاه: http://iwrj.sku.ac.ir

اسامی داوران مقالات این شماره (به ترتیب حروف الفبا)

نام خانوادگی	نام	نام خانوادگی	نام
طباطبائی	سید حسن	ابراهیمی	افشین
فارابی	ارسلان	احترام	محمد
قاسمی	احمدرضا	برهانی	فائزه
قبادی‌نیا	مهدی	پارسایی	عباس
مقامی مقیم	غلامرضا	دهقانی سانچ	حسین
موسوی	سید مجید	رستمی	محمد
نادری	مهدی	ریاحی سامانی	مجید
نوابیان	مریم	رئیزی	طاهره
نورمهنداد	نگار	زارع بیدکی	رفعت
هنریخش	افشین	زبردست	سونیا
یعقوب‌زاده	مصطفی	صداقت	آزاده

اندازه‌گیری حجم آب آبیاری و بهره‌وری آب مزارع پیاز در سه منطقه استان فارس

محمدعلی شاهرخ‌نیا^{۱*}، مهدی اکبری^۲ و فریبرز عباسی^۳

چکیده

پیاز یکی از محصولات مهم تولیدی در استان فارس است. تاکنون اطلاعات اندکی در خصوص وضعیت آبیاری و بهره‌وری آب مزارع پیاز منتشر شده است. از این رو، میزان عملکرد، آب آبیاری، آب کاربردی و بهره‌وری آب در ۳۰ مزرعه در سه شهرستان عمده تولید پیاز در استان فارس اندازه‌گیری و بررسی شد. برای مقایسه آماری نتایج به دست آمده از آزمون تی استفاده شد. میانگین حجم آب آبیاری پیاز در سه شهرستان مورد نظر به ترتیب ۱۵۸۴۸، ۱۴۸۸۸ و ۱۰۵۰۷ مترمکعب در هکتار به دست آمد. میانگین کل حجم آب آبیاری مزارع ۱۳۸۸۰ مترمکعب در هکتار بود. تفاوت حجم آب آبیاری دو شهرستان شیراز و سپیدان از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبود؛ اما تفاوت حجم آب آبیاری شهرستان کازرون با هر دو منطقه دیگر بیشتر از ۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار بوده که در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. از نظر عملکرد محصول نیز تفاوت دو شهرستان شیراز و سپیدان کمتر از یک تن در هکتار بود که معنی‌دار نشد؛ اما عملکرد شهرستان کازرون حدود ۱۶ تن در هکتار کمتر از عملکرد شهرستان‌های سپیدان و شیراز بود که این تفاوت‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. تفاوت بهره‌وری آب آبیاری در مناطق مورد بررسی در سطح ۵ درصد معنی‌دار نشد. مقایسه حجم آب آبیاری با نیاز آبی ناخالص نشان داد که سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، بیشترین تطابق را با نیاز آبی ناخالص داشته و به‌طور متوسط ۵ درصد بیشتر آبیاری انجام شده بود؛ اما در مزارع تحت آبیاری بارانی و سطحی به ترتیب ۱۷ و ۴۵ درصد آب کمتر از نیاز آبی ناخالص داده شده بود. میزان عملکرد در مزارع پیاز تحت آبیاری سطحی حدود ۲۸ درصد کمتر از عملکرد در مزارع تحت سامانه آبیاری قطره‌ای بود. تفاوت بهره‌وری آب آبیاری بین سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و سطحی معنی‌دار نبود.

واژه‌های کلیدی: حجم آب کاربردی، سامانه آبیاری، عملکرد محصول، نیاز آبی.

ارجاع: شاهرخ‌نیا، م. ع. و اکبری، م. ع. و عباسی، ف. ۱۴۰۱. اندازه‌گیری حجم آب آبیاری و بهره‌وری آب مزارع پیاز در سه منطقه استان فارس. مجله پژوهش آب ایران. ۴۷: ۱-۱۰. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13937.2412>

۱- دانشیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.
۲- دانشیار پژوهشی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۳- استاد پژوهشی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

* نویسنده مسئول: m.shahrokhnia@areco.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۲

مقدمه

پیاز یکی از محصولات مهم در کشور و استان فارس است. تولید پیاز در کشور در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ حدود ۲/۴ میلیون تن با سطح زیرکشت ۵۴/۷ هزار هکتار و متوسط عملکرد ۴۴/۳ تن در هکتار بوده است. استان‌های اصلی تولید پیاز در کشور عبارت‌اند از: هرمزگان، جنوب کرمان، فارس، اصفهان، خوزستان، زنجان، خراسان شمالی، آذربایجان شرقی و خراسان رضوی. در سال زراعی ۱۳۹۶-۹۷، سطح زیر کشت پیاز در استان فارس و درصد سطح محصول پیاز این استان از کل سطح تولید کشور به ترتیب حدود ۵۰۰۰ هکتار و ۹ درصد بوده است. ۱۱ درصد تولید محصول پیاز در کشور متعلق به استان فارس است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷). پیاز مانند اکثر محصولات سبزی و صیفی به کمبود آب حساس است. پیاز دارای سیستم ریشه‌های سطحی، کم‌عمق و ظریف است و باید به دفعات با مقدار کم آبیاری شود تا رطوبت کافی در دسترس جوانه‌ها قرار گیرد؛ چون رطوبت یکنواخت و مداوم در طول دوره رشد برای رشد پیاز بسیار مفید است. پیاز، نیاز به آبیاری سبک و متناوب دارد. آبیاری بیش از حد علاوه بر کاهش رشد محصول، باعث افزایش هزینه، اتلاف آب، کاهش کارایی مصرف آب و کاهش خاصیت انبارداری محصول می‌شود (روباتزکی و یاماگوچی، ۱۹۹۷). میزان آب آبیاری در پیاز، به روش آبیاری، بافت خاک و اقلیم منطقه بستگی دارد. میزان آب آبیاری پیاز به روش کشت نیز وابسته است، به طوری که آب آبیاری در روش کشت نشانی معمولاً کمتر از کشت مستقیم بذر است (کادافیچی، ۲۰۰۵). ناصری (۱۳۹۳) گزارش داد که آب خالص مورد نیاز پیاز در استان آذربایجان شرقی بین ۱۰۱۰۰-۸۵۷۰ مترمکعب در هکتار و میانگین بهره‌وری آب آن برابر با ۶/۱ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. پیری (۱۳۹۷) در شهرستان زهک، بیشترین مقدار عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری در سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی را ۲۸/۴۲ تن در هکتار و ۵/۱۹ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین کرد. کمترین مقادیر این عوامل در آبیاری سطحی و به ترتیب ۱۹ تن در هکتار و ۲/۳۳ کیلوگرم بر مترمکعب بود. آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه توصیه شد. سرهت و سیگدم (۲۰۰۹) نشان دادند که با کاهش آب آبیاری از ۱۰۰ به ۷۵ درصد تبخیر از تشک تبخیر، عملکرد پیاز از ۵۱ به ۳۹ تن در هکتار رسید. آياس

(۲۰۱۹) نشان داد که با کم‌آبیاری پیاز، عملکرد محصول کاهش یافت و در دو سال به ترتیب به ۵۲/۲ و ۵۲/۴ تن در هکتار رسید. نتایج مطالعه‌ای در هند نشان داد که حداکثر عملکرد محصول ۳۵/۵ تن در هکتار در روش آبیاری قطره‌ای بود و این تیمار نسبت به آبیاری سطحی حدوداً ۲۹ درصد افزایش عملکرد و ۴۳ درصد صرفه‌جویی در آب داشت (دینگر و پوار، ۲۰۲۰). موگورو و همکاران (۲۰۲۰)، عملکرد پیاز در جنوب اتیوپی در شرایط بدون تنش آبی و ۵۰ درصد کاهش آب را به ترتیب ۲۱/۳ و ۱۲/۹ تن در هکتار گزارش کردند. بیشترین میزان بهره‌وری آب ۲/۴۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود. اکبری و همکاران (۱۳۸۲)، نشان دادند که آبیاری سطحی با عملکرد ۹۰ تن در هکتار نسبت به روش بارانی با عملکرد ۶۶ تن در هکتار برتری داشت. تفاوت بهره‌وری آب در روش‌های آبیاری سطحی و بارانی معنی‌دار نبود. در مطالعه‌ای دوساله در هند، میزان آب آبیاری در آبیاری قطره‌ای ۶۰۳ و ۵۵۷ میلی‌متر بود که در مقایسه با آبیاری سطحی نزدیک به ۳۰ درصد کاهش داشت. میزان عملکرد محصول پیاز در روش‌های آبیاری قطره‌ای و سطحی به ترتیب ۳۳/۹ و ۲۹/۹ تن در هکتار بود. نتایج نشان داد که در آبیاری قطره‌ای، بهره‌وری آب آبیاری پیاز حدود ۶۰ درصد افزایش و از ۳/۴۹ در روش سطحی به ۵/۶۲ کیلوگرم بر مترمکعب در آبیاری قطره‌ای افزایش یافت (باسکر و همکاران، ۲۰۱۸). در اتیوپی تأثیر کم‌آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب محصول پیاز در تیمارهای مختلف تأمین نیاز آبی در سه روش آبیاری شیاری مرسوم، یک‌درمیان متغیر و یک در میان ثابت بررسی شد. بیشترین عملکرد پیاز ۲۸/۵ تن در هکتار در آبیاری شیاری مرسوم و حداکثر بهره‌وری آب ۹/۱ کیلوگرم بر مترمکعب در آبیاری شیاری یک‌درمیان متغیر به دست آمد. کمترین عملکرد (۱۶/۴ تن در هکتار) از آبیاری شیاری یک‌درمیان ثابت و کمترین بهره‌وری آب با ۴/۴ کیلوگرم بر مترمکعب از آبیاری شیاری مرسوم به دست آمد (میراتو، ۲۰۱۹). راثو و همکاران (۲۰۱۹)، در هند بیشترین عملکرد پیاز را به میزان ۴۵/۳ تن در هکتار در آبیاری قطره‌ای و کمترین عملکرد آن را به میزان ۲۴/۵ تن در هکتار در آبیاری غرقابی گزارش کردند. حداکثر و حداقل بهره‌وری آب پیاز به ترتیب مربوط به آبیاری قطره‌ای (۱۲/۴ کیلوگرم بر مترمکعب) و سطحی (۴/۱)

رده‌های نیمه‌خشک سرد، نیمه‌مرطوب سرد و نیمه‌خشک معتدل قرار دارند و جزو مناطقی از استان فارس هستند که بیشترین سطح کشت و تولید پیاز استان را دارا هستند. سه منطقه مورد مطالعه و سه نوع سامانه آبیاری (سطحی، بارانی و قطره‌ای) به‌عنوان تیمارهای آزمایش در نظر گرفته شدند. تعداد مزارع انتخابی در هر منطقه و هر سامانه آبیاری در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- تعداد مزارع انتخابی در هر منطقه و هر سامانه

آبیاری		منطقه/ نوع سامانه آبیاری		
سطحی	قطره‌ای	بارانی		
۲	۳	۵	شیراز	
۲	۳	۵	سپیدان	
۵	۳	۲	کازرون	

مقادیر آب آبیاری، آب کاربردی (مجموع آبیاری و بارش مؤثر)، عملکرد و بهره‌وری آب به‌عنوان صفات مورد بررسی در سامانه‌های مختلف آبیاری و در مناطق مختلف با استفاده از آزمون آماری تی (t-test) مورد مقایسه قرار گرفت. مزارع از بین کشاورزانی که مایل به همکاری بودند، به صورتی انتخاب شدند که عوامل مختلف از جمله مساحت مزرعه، روش آبیاری، بافت خاک و کیفیت آب را پوشش دهند. مدیریت آبیاری توسط بهره‌بردار صورت گرفت و برهمن اساس پارامترهای مختلف مزرعه‌ای شامل دبی آب ورودی به مزرعه، عملکرد محصول، تعداد دفعات آبیاری، موقعیت جغرافیایی و سطح زیر کشت اندازه‌گیری شد. اطلاعات هواشناسی روزانه مورد نیاز برای برآورد نیاز آبی به روش پنمن مانیتیت از ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مناطق اخذ شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). برای برآورد نیاز آبی پیاز سه سناریو در نظر گرفته شد. ۱- نیاز آبی از روش پنمن مانیتیت، با استفاده از داده‌های هواشناسی سال انجام تحقیق (۱۳۹۹) ۲- نیاز آبی از روش پنمن مانیتیت، با استفاده از داده‌های هواشناسی ۱۰ سال منتهی به زمان انجام پژوهش، ۳- نیاز آبی از سندملی آب (از نرم‌افزار Netwat). در سناریوهای ۱ و ۲ از نرم‌افزار محاسبه‌گر تبخیر و تعرق (ET Calculator) استفاده شد. میانگین راندمان سامانه‌های آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای به ترتیب ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد در نظر گرفته (بیورنبرگ، ۲۰۱۳) و نیاز آبی خالص به نیاز آبی ناخالص تبدیل شد. مقادیر دبی آب مزرعه‌ای در سامانه‌های

کیلوگرم بر مترمکعب) بود. بیشترین میزان مصرف آب پیاز در مصر، مربوط به آبیاری شیاری سنتی و کمترین میزان مصرف آب و بیشترین بهره‌وری آب (۷/۶۳ کیلوگرم بر مترمکعب) از روش آبیاری شیاری یک‌درمیان متغیر به‌دست آمد. بهره‌وری آب در آبیاری شیاری سنتی ۵/۲۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود (گریس و همکاران، ۲۰۲۱). نتایج مطالعه‌ای در اتیوپی نشان داد که حداکثر و حداقل عملکرد محصول پیاز به ترتیب از آبیاری قطره‌ای و سطحی به میزان ۴۱/۷۶ و ۳۴/۴۸ تن بر هکتار به‌دست آمد. بهره‌وری به ترتیب ۱۳/۰۵ و ۶/۸۴ کیلوگرم بر مترمکعب بود (آبومسا و همکاران، ۲۰۲۰). رستگار و همکاران (۱۳۸۷) تأثیر سه روش آبیاری بر عملکرد پیاز را در نیشابور بررسی کردند. نتایج نشان داد که آبیاری قطره‌ای نسبت به دو روش آبیاری شیاری و کرتی عملکرد را افزایش داد. بهره‌وری آب در آبیاری قطره‌ای به ترتیب حدود ۲۸ و ۵۲ درصد بالاتر از آبیاری شیاری و کرتی بود. میانگین عملکرد در آبیاری قطره‌ای ۷ درصد کمتر از عملکرد در آبیاری شیاری و ۲۷ درصد بیشتر از آبیاری کرتی بود. تحلیل اقتصادی نشان داد که آبیاری قطره‌ای در همه ارقام بهتر از سایر روش‌ها بود. کریم‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) نیاز آبی پیاز در استان خراسان رضوی و بهره‌وری آب آن را به ترتیب ۱۱۲۹۳ مترمکعب در هکتار و ۷/۱۱ گیلوگرم بر مترمکعب گزارش کردند.

اگرچه استان فارس یکی از استان‌های مطرح در تولید پیاز کشور است، لیکن تاکنون تحقیقات اندکی در خصوص میزان آب آبیاری و بهره‌وری آب در مزارع پیاز این استان انجام شده است. اطلاع از میزان آب آبیاری و بهره‌وری آب مزارع پیاز می‌تواند به برنامه‌ریزان و مدیران کشوری و استانی کمک کند تا بتوانند به‌طور مؤثرتری هم تولید را افزایش داده و هم در مصرف آب صرفه‌جویی کنند؛ بنابراین هدف از انجام این تحقیق، بررسی وضعیت مزارع پیاز استان فارس از لحاظ میزان آب آبیاری و بهره‌وری آب و عوامل اثرگذار بر آن‌ها در شرایط زارعین است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به‌منظور اندازه‌گیری بهره‌وری آب و اجزای آن در مزارع پیاز استان فارس، ۳۰ مزرعه پیاز در سه شهرستان شیراز، سپیدان و کازرون انتخاب و بررسی شد. این سه منطقه از نظر طبقه‌بندی اقلیمی به ترتیب در

سپیدان و کازرون به ترتیب ۱۵۸۴۸، ۱۴۸۸۸ و ۱۰۵۰۷ مترمکعب در هکتار به دست آمد. این نتایج با نتایج گزارش شده توسط کریمزاده و همکاران (۱۳۹۵) همخوانی دارد. میانگین کل حجم آب آبیاری مزارع ۱۳۸۸۰ مترمکعب در هکتار بود. با اعمال به ترتیب ۱۱۸، ۳۲۷ و ۱۹۵ میلی‌متر بارندگی مؤثر برای سه منطقه مورد بررسی، میزان متوسط حجم آب کاربردی در مزارع سه منطقه، به ترتیب ۱۷۰۲۸، ۱۸۱۵۸ و ۱۲۴۵۷ مترمکعب در هکتار به دست آمد. میانگین حجم آب کاربردی در سه منطقه مورد بررسی ۱۶۰۵۴ مترمکعب در هکتار بود. ملاحظه می‌شود در شهرستان شیراز که کمترین میزان بارندگی مؤثر را داشته، حجم آب آبیاری بیشتر از دو منطقه دیگر بوده که منطقی به نظر می‌رسد. کمترین میزان حجم آب آبیاری و حجم آب کاربردی متعلق به شهرستان کازرون بوده است. در حالی که بیشترین حجم آب آبیاری در شهرستان شیراز مشاهده شد. بهره‌وری آب آبیاری مزارع پیاز انتخابی از ۲/۱۲ تا ۸/۵۱ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر و به طور میانگین ۴/۲۸ کیلوگرم بر مترمکعب بود. بیشترین و کمترین میزان بهره‌وری آب آبیاری به ترتیب مربوط به شهرستان کازرون و شیراز بود. بیشترین و کمترین بهره‌وری آب کل در شهرستان‌های شیراز و سپیدان به دست آمد. این نتایج با نتایج گزارش شده توسط کریمزاده و همکاران (۱۳۹۵)، باسکر و همکاران (۲۰۱۸)، مبراتو و همکاران (۲۰۱۹) و گریس و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد.

جدول ۴ نتایج بررسی آماری تفاوت اجزای مختلف بهره‌وری آب مزارع پیاز در مناطق مختلف را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که تفاوت حجم آب آبیاری دو منطقه شیراز و سپیدان از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبوده و می‌توان از این تفاوت صرف‌نظر کرد؛ اما تفاوت حجم آب آبیاری شهرستان کازرون با هر دو منطقه دیگر بیشتر از ۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار بوده که در سطح ۱ درصد معنی‌دار شده و قابل توجه است. در خصوص حجم آب کاربردی نیز نتایج آزمون تی مشابه حجم آب آبیاری بود. از نظر عملکرد محصول نیز تفاوت دو شهرستان شیراز و سپیدان کمتر از یک تن در هکتار بود که معنی‌دار نشد؛ اما عملکرد شهرستان کازرون حدود ۱۶ تن در هکتار کمتر از عملکرد شهرستان‌های سپیدان و شیراز بود که این تفاوت‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد.

سطحی با استفاده از فلوم‌های WSC و در سامانه‌های بارانی و قطره‌ای به صورت حجمی اندازه‌گیری شد. میزان آب آبیاری مصرفی در هر هکتار از مزرعه (مترمکعب بر هکتار) با ضرب میزان دبی مزرعه‌ای در مدت زمان کل آبیاری در طول فصل رشد با استفاده از رابطه ۱ به دست آمد. در رابطه (۱)، V_i حجم آب آبیاری در طول فصل رشد بر حسب مترمکعب در هکتار، Q دبی آب ورودی به مزرعه بر حسب مترمکعب بر ثانیه، t مدت زمان هر آبیاری بر حسب ثانیه و m تعداد دفعات آبیاری است. میزان بهره‌وری آب آبیاری (WP_i) با استفاده از رابطه (۲) از تقسیم میزان محصول تر تولیدی (y) بر حسب کیلوگرم در هکتار بر میزان آب آبیاری (V_i) بر حسب مترمکعب در هکتار به دست آمد.

$$V_i = Q \cdot t \cdot m \quad (1)$$

$$WP_i = \frac{y}{V_i} \quad (2)$$

مجموع مقادیر آب آبیاری و بارش مؤثر محاسبه و با نیاز آبی ناخالص به دست آمده از سه سناریوی نیاز آبی مقایسه شد. در نهایت با جمع‌بندی نتایج به دست آمده از تفاوت مقادیر عملکرد، آب آبیاری و بهره‌وری آب، پیشنهادهایی برای بهبود تولید و آبیاری پیاز ارائه شد.

نتایج و بحث

جدول ۲ مشخصات کلی مزارع پیاز انتخابی و عملکرد محصول این مزارع را نشان می‌دهد. مساحت مزارع انتخابی از ۰/۶ هکتار تا ۱۰ هکتار و به طور متوسط ۲ هکتار بود. طول دوره رشد پیاز در مناطق مورد بررسی از ۱۱۴ تا ۲۳۲ روز متفاوت بود. متوسط طول دوره رشد پیاز در سه منطقه، ۱۷۳ روز بود. حداقل، حداکثر و میانگین دبی مزارع انتخابی به ترتیب ۴، ۳۵/۴ و ۱۲/۷ لیتر بر ثانیه به دست آمد. حداقل، حداکثر و میانگین عملکرد محصول در سه منطقه مورد بررسی به ترتیب حدود ۳۴، ۸۶ و ۵۸ تن در هکتار به دست آمد. این نتایج با نتایج گزارش شده توسط سرهت و سیگدم (۲۰۰۹)، آیاس و همکاران (۲۰۱۹) و آمبومسا و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد. جدول ۳ مقادیر پارامترهای آبیاری اندازه‌گیری شده در مزارع پیاز مورد بررسی را در مناطق مختلف استان فارس نشان می‌دهد. میانگین عمق و تعداد دفعات آبیاری در مناطق مورد بررسی به ترتیب ۴۳ میلی‌متر و ۳۵ مرتبه بود. میانگین حجم آب آبیاری پیاز در سه شهرستان شیراز،

بررسی قرار داد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. تفاوت حجم آب آبیاری سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی حدود ۸۰۰ مترمکعب در هکتار بود که از نظر آماری معنی‌دار نشد. تفاوت حجم آب آبیاری بین آبیاری سطحی و قطره‌ای (۳۱۰۰ مترمکعب در هکتار)، و بین آبیاری سطحی و بارانی (۲۳۰۰ مترمکعب در هکتار) از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار نشد، لیکن در سطح حدود ۶ درصد معنی‌دار شد. تفاوت حجم آب کاربردی در سامانه‌های آبیاری مختلف از نظر آماری در سطح ۵ درصد و حتی در سطح ۱۰ درصد نیز معنی‌دار نشد. جدول ۵ نشان می‌دهد که میانگین عملکرد محصول در سامانه‌های آبیاری بارانی، سطحی و قطره‌ای به ترتیب حدود ۶۲، ۴۴ و ۶۱ تُن در هکتار بود؛ بنابراین تفاوت عملکرد بین سامانه آبیاری بارانی و قطره‌ای حدود ۱ تُن در هکتار بود که این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار نشد؛ اما تفاوت عملکرد بین آبیاری سطحی و قطره‌ای (۱۷ تُن در هکتار) و بین آبیاری سطحی و بارانی (۱۸ تُن در هکتار) به ترتیب در سطح ۵ و ۱ درصد معنی‌دار شد؛ بنابراین میزان محصول تولیدی در مزارع پياز تحت آبیاری سطحی افت شدیدی نسبت به مزارع تحت سامانه‌های آبیاری مدرن داشته است. تفاوت میزان بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب کاربردی در سامانه‌های آبیاری بارانی، قطره‌ای و سطحی از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار نشد. میانگین بهره‌وری آب آبیاری در سامانه‌های آبیاری بارانی، سطحی و قطره‌ای به ترتیب ۴/۵۵، ۳/۷۸ و ۴/۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب بود. میانگین بهره‌وری آب کاربردی در این سه سامانه آبیاری به ترتیب ۳/۹۳، ۳/۱۷ و ۳/۶۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود.

با وجود متفاوت بودن حجم آب آبیاری و عملکرد محصول، تفاوت بهره‌وری آب آبیاری در مناطق مورد بررسی در سطح ۵ درصد معنی‌دار نشد. چون با تغییر میزان آب آبیاری، میزان عملکرد نیز با نرخی مشابه کاهش یافته است. با استدلال مشابه، تفاوت بهره‌وری آب کل نیز در مناطق مورد بررسی از نظر آماری معنی‌دار نشد. به‌طور کلی، نوع سامانه آبیاری مورد استفاده در مزارع، می‌تواند بر میزان حجم آبیاری و در نتیجه میزان عملکرد و بهره‌وری آب اثرگذار باشد. جدول ۵ و ۶ حدود پارامترهای اندازه‌گیری شده مزارع پياز انتخابی براساس نوع سامانه آبیاری را نشان می‌دهد. جدول ۷، نتایج بررسی آماری تفاوت بین اجزای بهره‌وری آب در سامانه‌های مختلف آبیاری را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که دفعات آبیاری در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای بیشترین و در آبیاری سطحی کمترین تعداد را داشته است. متوسط عمق آب آبیاری در هر نوبت در سامانه آبیاری قطره‌ای، کمتر از دو نوع سامانه آبیاری دیگر بود. معمولاً مورد انتظار است که میزان حجم آب آبیاری در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای کمتر از سامانه‌های آبیاری بارانی و در سامانه‌های آبیاری بارانی کمتر از آبیاری سطحی باشد؛ چون معمولاً راندمان آبیاری سامانه‌های آبیاری قطره‌ای بیشتر از آبیاری بارانی و در آبیاری بارانی بیشتر از آبیاری سطحی است؛ اما اندازه‌گیری‌ها نشان داد که حجم آب آبیاری داده شده در مزارع تحت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای (۱۴۹۳۵ مترمکعب در هکتار) بیشتر از آبیاری بارانی (۱۴۱۵۷ مترمکعب در هکتار) و بیشتر از آبیاری سطحی (۱۱۸۵۱ مترمکعب در هکتار) بوده است. برای یافتن علت این تفاوت‌ها، بایستی تفاوت حجم آب آبیاری با نیاز آبی ناخالص را نیز مورد

جدول ۲- مشخصات کلی و عملکرد مزارع پياز مورد بررسی

منطقه	پارامتر	دبی (لیتر بر ثانیه)	مساحت مزرعه (هکتار)	طول دوره رشد (روز)	عملکرد محصول (تُن در هکتار)
شیراز	حداقل	5/5	0/8	129	36/3
	حداکثر	35/4	10/0	198	86/3
	میانگین	18/0	2/3	166	62/2
سپیدان	حداقل	4/0	1/0	114	38/5
	حداکثر	25/3	4/5	226	84/5
	میانگین	11/4	2/6	171	63/0
کازرون	حداقل	4/0	0/6	152	34/0
	حداکثر	16/0	2/5	232	56/3
	میانگین	8/3	1/1	183	46/6
مجموع مزارع	میانگین	12/7	2/0	173	57/8

جدول ۳- پارامترهای آبیاری و بهره‌وری آب مزارع پیاز براساس منطقه

منطقه	پارامتر	عمق آبیاری هر نوبت (میلی‌متر)	تعداد آبیاری	حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)	حجم آب کاربردی (مترمکعب در هکتار)	بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب)
شیراز	حداقل	31	19	10138	11318	1/99
	حداکثر	89	48	18144	19324	7/62
	میانگین	52	32	15848	17028	3/84
سپیدان	حداقل	26	22	11232	14502	2/16
	حداکثر	69	70	18144	21414	5/46
	میانگین	43	38	14888	18158	3/48
کازرون	حداقل	19	23	10022	11972	2/83
	حداکثر	45	60	11520	13470	4/59
	میانگین	32	36	10507	12457	3/74
مجموع	میانگین	43	35	13880	16054	3/68

جدول ۴- نتایج بررسی آماری آب کاربردی و بهره‌وری آب توسط آزمون t براساس منطقه

پارامتر	منطقه	میانگین تفاوت	t بحرانی	مقدار t	سطح معنی‌داری
حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)	(شیراز-سپیدان)	960	2/08	0/90	0/377
	(شیراز-کازرون)	5341	2/20	6/70	0/000
	(سپیدان-کازرون)	4381	2/18	5/96	0/000
حجم آب کاربردی (مترمکعب در هکتار)	(شیراز-سپیدان)	-1130	2/08	1/60	0/300
	(شیراز-کازرون)	4571	2/20	5/74	0/000
	(سپیدان-کازرون)	5701	2/18	7/76	0/000
عملکرد (تن در هکتار)	(شیراز-سپیدان)	-0/7	2/08	0/11	0/914
	(شیراز-کازرون)	15/7	2/11	3/11	0/006
	(سپیدان-کازرون)	16/4	2/11	2/74	0/014
بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب)	(شیراز-سپیدان)	-0/13	2/09	0/20	0/146
	(شیراز-کازرون)	-0/29	2/13	0/49	0/630
	(سپیدان-کازرون)	-0/16	2/09	0/35	0/732
بهره‌وری آب کاربردی (کیلوگرم بر مترمکعب)	(شیراز-سپیدان)	0/35	2/11	0/65	0/525
	(شیراز-کازرون)	0/09	2/13	0/19	0/1856
	(سپیدان-کازرون)	-0/26	2/09	0/68	0/502

جدول ۵- حدود پارامترهای آبیاری مزارع پیاز براساس سامانه آبیاری

منطقه	پارامتر	دبی (لیتر بر ثانیه)	عمق آبیاری هر نوبت (میلی‌متر)	تعداد آبیاری	حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)	حجم آب کاربردی (مترمکعب در هکتار)
بارانی	حداقل	4/0	19	19	10138	11318
	حداکثر	35/4	89	60	18144	20852
	میانگین	15/2	44	36	14157	16288
سطحی	حداقل	7/5	23	22	10080	12030
	حداکثر	16/0	69	45	15444	18714
	میانگین	10/9	44	29	11851	14178
قطره‌ای	حداقل	4/0	26	28	10022	11972
	حداکثر	16/8	60	70	18144	21414
	میانگین	9/4	40	39	14935	17069
مجموع	میانگین	12/7	43	35	13880	16054

جدول ۶- حدود پارامترهای عملکرد و بهره‌وری آب مزارع پياز براساس سامانه آبياري

منطقه	پارامتر	طول دوره رشد (روز)	عملکرد (تن در هکتار)	بهره‌وری آب آبياري (کيلوگرم بر مترمکعب)	بهره‌وری آب کل (کيلوگرم بر مترمکعب)
باراني	حداقل	114	38/5	3/18	2/56
	حداکثر	232	86/3	8/51	7/62
	میانگین	169	62/0	4/55	3/93
سطحي	حداقل	150	34/0	2/62	2/16
	حداکثر	182	58/0	5/43	4/57
	میانگین	162	43/9	3/78	3/17
قطره‌اي	حداقل	140	36/3	2/12	1/99
	حداکثر	232	83/8	5/49	4/59
	میانگین	189	60/6	4/18	3/61
مجموع	میانگین	173	57/8	4/28	3/68

جدول ۷- تفاوت آب کاربردی، عملکرد، بهره‌وری آب براساس نوع سامانه آبياري

پارامتر	نوع سامانه آبياري	میانگین تفاوت	t بحراني	مقدار t	سطح معنی‌داری
حجم آب آبياري	(باراني-سطحي)	۲۳۰۶	۲/۱۶	۲/۰۲	۰/۰۶۴
	(قطره‌اي-سطحي)	۳۰۸۴	۲/۱۴	۲/۰۷	۰/۰۵۸
	(قطره‌اي-باراني)	۷۷۸	۲/۱۴	۰/۵۷	۰/۵۸۰
حجم آب کاربردی	(باراني-سطحي)	۲۱۱۰	۲/۲۳	۱/۵۸	۰/۱۴۵
	(قطره‌اي-سطحي)	۲۸۹۰	۲/۱۴	۱/۶۹	۰/۱۱۲
	(قطره‌اي-باراني)	۷۸۰	۲/۱۶	۰/۵۴	۰/۵۹۶
عملکرد	(باراني-سطحي)	۱۸/۰	۲/۱۱	۳/۶۳	۰/۰۰۲
	(قطره‌اي-سطحي)	۱۶/۶	۲/۱۶	۲/۴۰	۰/۰۳۲
	(قطره‌اي-باراني)	-۱/۳۹	۲/۱۴	۰/۲۰	۰/۸۴۳
بهره‌وری آب آبياري	(باراني-سطحي)	۰/۷۷	۲/۰۹	۱/۵۶	۰/۱۳۶
	(قطره‌اي-سطحي)	۰/۴۰	۲/۱۴	۰/۷۸	۰/۴۴۸
	(قطره‌اي-باراني)	-۰/۳۷	۲/۰۹	۰/۶۸	۰/۵۰۱
بهره‌وری آب کاربردی	(باراني-سطحي)	۰/۷۶	۲/۰۹	۱/۸۱	۰/۰۸۶
	(قطره‌اي-سطحي)	۰/۴۴	۲/۱۵	۱/۰۶	۰/۳۰۶
	(قطره‌اي-باراني)	-۰/۳۲	۲/۰۷	۰/۷۴	۰/۴۶۵

بلندمدت (۱۲۲۱ میلی‌متر) بوده است. در جدول ۹، نتایج بررسی آماری تفاوت حجم آب آبياري داده‌شده نسبت به نیاز آبی ناخالص برآوردشده از سه سناریوی مختلف در مناطق مورد بررسی آورده شده است. در شهرستان شیراز حجم آب آبياري داده‌شده به ترتیب ۱۰۰۳ و ۷۲۳ مترمکعب در هکتار کمتر از نیاز آبی ناخالص یک‌ساله و بلندمدت بوده که این تفاوت‌ها در سطح ۵ درصد معنی‌دار نشد. در شهرستان سپیدان این تفاوت‌ها به ترتیب ۱۴۶۰ و ۱۵۰ مترمکعب در هکتار بود که از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار نشد. در شهرستان کازرون حجم آب

مقادیر نیاز آبی خالص پياز در مناطق مورد بررسی براساس سناریوهای مختلف نیاز آبی در جدول ۸ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که در هر سه سناریوی نیاز آبی، بیشترین و کمترین نیاز آبی خالص پياز به ترتیب مربوط به شهرستان شیراز و سپیدان بوده است. نیاز آبی خالص یک‌ساله بیشترین و نیاز آبی خالص براساس سند ملی آب کمترین مقادیر را داشته‌اند؛ البته تفاوت نیاز آبی خالص یک‌ساله و بلندمدت زیاد نبوده، ولی میانگین نیاز آبی خالص برآوردشده از سند ملی آب (۷۰۰ میلی‌متر)، خیلی کمتر از دو سناریوی یک‌ساله (۱۲۸۸ میلی‌متر) و

معنی‌دار شد. در آبیاری قطره‌ای، حجم آب آبیاری از نیاز آبی ناخالص یک‌ساله و بلندمدت به ترتیب ۵۹۸ و ۱۳۳۲ مترمکعب در هکتار بیشتر بود که این تفاوت‌ها در سطح ۵ درصد معنی‌دار نشد؛ بنابراین می‌توان گفت در سال انجام تحقیق، متوسط حجم آب آبیاری داده‌شده به مزارع تحت سامانه آبیاری قطره‌ای، تقریباً به اندازه مورد نیاز بوده (۵ درصد بیشتر) و در مزارع تحت آبیاری سطحی کم‌آبیاری نسبتاً شدیدی (۴۵ درصد) انجام شده است. در مزارع تحت سامانه آبیاری بارانی به‌طور متوسط حدود ۱۷ درصد کم‌آبیاری انجام شده بود. به‌طور میانگین، حجم آب آبیاری داده‌شده در سامانه‌های آبیاری مختلف، ۱۷ درصد کمتر از نیاز آبی ناخالص یک‌ساله بود. درصد تفاوت حجم آب آبیاری در سامانه‌های آبیاری بارانی، سطحی و قطره‌ای، به ترتیب ۱۳ درصد کمتر، ۴۱ درصد کمتر و ۱۰ درصد بیشتر و به‌طور متوسط ۱۲ درصد کمتر از نیاز آبی ناخالص بلندمدت بود. به‌طور متوسط حجم آب آبیاری حدود ۶۷ درصد بیشتر از نیاز آبی ناخالص از سند ملی آب بود.

آبیاری به ترتیب ۸۴۲۷ و ۷۳۰۹ مترمکعب در هکتار کمتر از نیاز آبی ناخالص بوده که این تفاوت‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. یعنی مزارع پیاز این منطقه آب مورد نیاز را دریافت نکرده بودند؛ به‌طور کلی در مجموع مزارع پیاز انتخابی، حجم آب آبیاری از نیاز آبی ناخالص یک‌ساله و بلندمدت به ترتیب ۳۴۱۹ و ۲۵۱۱ مترمکعب در هکتار کمتر بود که این تفاوت‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. با توجه به برآورد خیلی کم نیاز آبی پیاز از سند ملی آب، حجم آب آبیاری از نیاز آبی ناخالص برآوردشده به این روش بیشتر شد. جدول ۱۰ نتایج بررسی آماری تفاوت حجم آب آبیاری با نیاز آبی ناخالص در سامانه‌های مختلف آبیاری را نشان می‌دهد. در سامانه‌های آبیاری بارانی، حجم آب آبیاری از نیاز آبی ناخالص یک‌ساله و بلندمدت به ترتیب ۲۹۳۵ و ۲۱۵۵ مترمکعب در هکتار کمتر بود که این تفاوت‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. در مزارع تحت آبیاری سطحی، حجم آب آبیاری از نیاز آبی ناخالص یک‌ساله و بلندمدت به ترتیب ۹۷۱۳ و ۸۳۱۸ مترمکعب در هکتار کمتر بود که این تفاوت‌ها نیز در سطح ۱ درصد

جدول ۸- مقادیر نیاز آبی خالص پیاز در مناطق مورد مطالعه

شهرستان	سند ملی	پنمن مانتیث یک‌ساله	پنمن مانتیث بلندمدت
شیراز	۱۰۸۵	۱۳۲۴	۱۳۰۲
سپیدان	۴۹۵	۱۲۲۶	۱۱۲۸
کازرون	۵۲۱	۱۳۲۱	۱۲۴۳
میانگین	۷۰۰	۱۲۸۸	۱۲۲۱

جدول ۹- نتایج بررسی تفاوت آب آبیاری و نیاز آبی ناخالص مزارع پیاز براساس منطقه

منطقه	پارامتر	میانگین تفاوت (مترمکعب در هکتار)	t بحرانی	مقدار t	سطح معنی‌داری
شیراز	آب آبیاری-پنمن مانتیث یک‌ساله	-۱۰۰۳	۲/۲۳	۰/۹۹	۰/۳۴۵
	آب آبیاری-پنمن مانتیث بلندمدت	-۷۲۳	۲/۲۳	۰/۷۲	۰/۴۸۹
	آب آبیاری-سند ملی	۲۰۳۹	۲/۲۳	۲/۱۲	۰/۰۶۰
سپیدان	آب آبیاری-پنمن مانتیث یک‌ساله	-۱۴۵۹	۲/۲۰	۱/۳۵	۰/۲۰۵
	آب آبیاری-پنمن مانتیث بلندمدت	-۱۵۲	۲/۲۰	۰/۱۵	۰/۸۸۷
	آب آبیاری-سند ملی	۸۲۸۸	۲/۲۰	۱۰/۰۴	۰/۰۰۰
کازرون	آب آبیاری-پنمن مانتیث یک‌ساله	-۸۴۲۷	۲/۲۶	۷/۸۱	۰/۰۰۰
	آب آبیاری-پنمن مانتیث بلندمدت	-۷۳۰۹	۲/۲۶	۷/۲۰	۰/۰۰۰
	آب آبیاری-سند ملی	۳۰۳۹	۲/۲۶	۶/۹۲	۰/۰۰۰
مجموع	آب آبیاری-پنمن مانتیث یک‌ساله	-۳۴۱۹	۲/۰۴	۴/۱۰	۰/۰۰۰
	آب آبیاری-پنمن مانتیث بلندمدت	-۲۵۱۱	۲/۰۴	۳/۱۳	۰/۰۰۴
	آب آبیاری-سند ملی	۴۶۱۴	۲/۰۴	۶/۹۳	۰/۰۰۰

جدول ۱۰- نتایج بررسی تفاوت آب کاربردی و نیاز آبی ناخالص مزارع پیاز براساس سامانه آبیاری

نوع سامانه	پارامتر	میانگین تفاوت	t بحرانی	مقدار t	سطح معنی داری
بارانی	آب آبیاری-پنمن مانیتیت یکساله	-۲۹۵۳	۲/۱۲	۴/۲۷	۰/۰۰۱
	آب آبیاری-پنمن مانیتیت بلندمدت	-۲۱۵۵	۲/۱۲	۳/۱۴	۰/۰۰۶
	آب آبیاری-سند ملی	۳۸۱۴	۲/۱۲	۳/۹۸	۰/۰۰۱
سطحی	آب آبیاری-پنمن مانیتیت یکساله	-۹۷۱۳	۲/۴۵	۸/۱۲	۰/۰۰۰
	آب آبیاری-پنمن مانیتیت بلندمدت	-۸۳۱۸	۲/۴۵	۶/۶۲	۰/۰۰۱
	آب آبیاری-سند ملی	۳۲۹۲	۲/۴۵	۳/۳۴	۰/۰۱۶
قطره‌ای	آب آبیاری-پنمن مانیتیت یکساله	۵۹۸	۲/۳۱	۰/۴۷	۰/۶۵۲
	آب آبیاری-پنمن مانیتیت بلندمدت	۱۳۳۲	۲/۳۱	۱/۰۵	۰/۳۲۳
	آب آبیاری-سند ملی	۷۱۵۴	۲/۳۱	۶/۱۶	۰/۰۰۰

نتیجه‌گیری

مورد بررسی، کمتر از میزان نیاز آبی ناخالص آبیاری شده بودند که باعث شده بود دچار کاهش محصول شوند؛ اما چون تغییرات حجم آبیاری با تغییرات محصول تقریباً متناسب بود، تغییرات بهره‌وری آب از نظر آماری معنی‌دار نبود. پیشنهاد می‌شود برنامه‌ریزی آبیاری که تعیین دقیق زمان و مقدار آبیاری است، در مزارع پیاز اعمال شود تا عملکرد کاهش نیابد. همچنین در شرایط کمبود منابع آبی، با کم‌آبیاری کنترل‌شده می‌توان با مصرف آب کمتر، از کاهش زیاد عملکرد جلوگیری کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت‌های سازمان جهاد کشاورزی استان فارس، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس در انجام این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

- احمدی ک.، عبادزاده ح.، حاتمی ف.، عبدشاه ه. و کاظمیان ا. ۱۳۹۸. آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۷-۱۳۹۶. وزارت جهاد کشاورزی و معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی. دفتر فناوری اطلاعات و ارتباطات. جلد اول: محصولات زراعی.
- اکبری م.، مرتضوی ا.، نصرافهانی م.، زیدی م. و پاشنام ر. ۱۳۸۲. مقایسه روش‌های آبیاری سطحی و بارانی روی عوامل کمی و کیفی در ارقام تجارتهی پیاز. گزارش پژوهشی نهایی شماره ۵۵/۲۷۴. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج.
- پیری ح. ۱۳۹۷. تأثیر مقادیر مختلف آبیاری و کود نیتروژن بر عملکرد پیاز و بهره‌وری مصرف آب در

نتایج کلی به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان داد که انتظار می‌رفت حجم آب آبیاری داده‌شده در مزارع پیاز تحت سامانه‌های آبیاری سطحی بیشتر از آبیاری بارانی و در آبیاری بارانی بیشتر از آبیاری قطره‌ای باشد، اما نتایج به‌دست‌آمده متفاوت بود. تفاوت حجم آب داده‌شده در مزارع پیاز تحت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی معنی‌دار نبود. حجم آب آبیاری در آبیاری بارانی و قطره‌ای بیشتر از آبیاری سطحی بود که دلیل آن کم‌آبیاری در مزارع تحت آبیاری سطحی بود. مقایسه حجم آب آبیاری با نیاز آبی ناخالص نشان داد که سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، بیشترین تطابق را با نیاز آبی ناخالص داشته و به‌طور متوسط ۵ درصد بیشتر آبیاری انجام شده بود؛ اما در مزارع تحت آبیاری بارانی و سطحی، به‌ترتیب ۱۷ و ۴۵ درصد آب کمتر از نیاز آبی ناخالص داده شده بود؛ بنابراین میزان عملکرد در مزارع پیاز تحت آبیاری سطحی حدود ۲۸ درصد کمتر از عملکرد در مزارع تحت سامانه آبیاری قطره‌ای بود. بین عملکرد مزارع تحت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی تفاوت ناچیزی وجود داشت. از نظر آماری تفاوت معنی‌داری بین مقادیر بهره‌وری آب بین سامانه‌های مختلف آبیاری در سطح ۵ درصد مشاهده نشد. از نظر منطقه مورد مطالعه، تفاوت حجم آب آبیاری در شهرستان‌های شیراز و سپیدان معنی‌دار نبود؛ اما حجم آب آبیاری داده‌شده در شهرستان کازرون به‌طور معنی‌داری از دو منطقه دیگر کمتر بود؛ بنابراین میزان عملکرد پیاز در شهرستان کازرون به‌طور معنی‌داری از دو منطقه دیگر کمتر شد. بین بهره‌وری آب در مناطق مختلف نیز تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری مشاهده نشد؛ بنابراین به‌طور کلی می‌توان گفت که بیشتر مزارع پیاز

- (*Allium cepa* L.) in Turkey. *Agricultural Water Management*. 72: 59-68.
15. Mebrahtu Y. 2019. Effect of deficit irrigation and furrow irrigation techniques on onion water productivity and yield. *International Journal of Novel Research in Life Sciences*. 6(2): 1-12.
 16. Mugoro T. Assefa S. and Getahun A. 2020. Effect of Deficit Irrigation on Yield and Water Productivity of Onion (*Allium cepa* L.) under Conventional Furrow Irrigation System, in Bennatsemay Woreda, Southern Ethiopia. *Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 1(1): 2-13.
 17. Rao K. V. R. Gangwar S. Aherwar P. and Yadav D. 2019. Growth, yield, economics and water use efficiency of onion under different micro irrigation systems. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 8(3): 3866-3869.
 18. Rubatzky V. E. and Yamaguchi M. 1997. *World Vegetable*. Champan and Hall. New York, USA. 279-332.
 19. Serhat A. and Cigdem D. 2009. Deficit irrigation effects on onion (*Allium cepa* L. cv. E. T. Grano 502) yield in unheated greenhouse condition. *J Food Agric Environ*. 7(3): 239-243.
- ۳۲(۲): ۱۸۷-۲۰۰. *مجله پژوهش آب در کشاورزی*. سه روش آبیاری.
 ۴. رستگار ج. باغانی ج. و زارع ش. ۱۳۸۷. بررسی فنی و اقتصادی سه روش مختلف آبیاری (قطره‌ای، شیاری و کرتی) و اثر آن بر عملکرد کمی ارقام روزبلند پیاز خوراکی در نیشابور. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. ۵۳ ص.
 ۵. کریم‌زاده م. علیزاده ا. انصاری ح. قربانی م. و بنایان اول م. ۱۳۹۵. بهینه‌سازی بهره‌وری آب و کارایی انرژی در انتخاب الگوی کشت. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۰(۶): ۸۴۹-۸۵۹.
 ۶. ناصری ا. ۱۳۹۳. بهره‌وری آب در تولید محصولات زراعی. مجموعه نگاشت‌های ترویجی آبیاری. ۲۳۳ ص.
 7. Allen R. G. Pereira L. S. Raes D. and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirement. FAO Irrig. Drain. Paper No. 56. FAO, Rome, Italy, 300 p.
 8. Ambomsa A. Seyoum T. and Hordofa T. 2020. Effect of Irrigation Methods and Irrigation Levels on Yield and Water Productivity of Onion at Awash Melkasa, Ethiopia. *Industrial Engineering*. 4(2): 33-42.
 9. Ayas S. 2019. Water-Yield Relationships in Deficit Irrigated Onion. *Turkish Journal of Agriculture Food Science and Technology*., 7(9): 1310-1320.
 10. Bhasker P. Singh R. K. Gupta R. C. Sharma H.P. and Gupta P.K. 2018. Effect of drip irrigation on growth and yield of onion. *Journal of Spices and Aromatic Crops*. 27(1): 32-37.
 11. Bjerneberg D. L. 2013. *Irrigation methods*. USDA Agricultural Research Service. Kimberly. ID. USA.
 12. Dingre S. K. and Pawar D. D. 2020. Response of drip irrigated onion (*Allium cepa* L.) growth, yield and water productivity under deficit irrigation schedules. *Journal of Natural Resource Conservation and Management*. 1(1): 69-75.
 13. Geris L. S. M. El-Shahawi T. A. and Moursi E. A. 2021. Cut-off irrigation as an effective tool to increase water-use efficiency, enhance productivity, quality and storability of some onion cultivars. *Agricultural Water Management*. 244: 106589.
 14. Kadayifci A. Tuylu G. I. Ucar Y. and Cakmak B. 2005. Crop water use of onion

ارزیابی خطر سیل خیزی در حوضه آبخیز رودخانه زشک شانديز با استفاده از مدل‌سازی بر مبنای سنجش‌ازدور و روش تحلیل سلسله‌مراتبی-فازی

حمیرا شامکوئیان^۱، کامران داوری^{۲*} و محمد فرشته‌پور^۳

چکیده

در این تحقیق، به منظور ارزیابی خطر سیل‌خیزی حوضه آبخیز زشک شانديز در استان خراسان رضوی، از مدل تلفیقی تحلیل سلسله‌مراتبی-فازی استفاده شد که دربرگیرنده مراحل مختلف، نظیر امتیازدهی زوجی معیارها و زیرمعیارها براساس نظرات کارشناسی، فازی‌سازی امتیازات، اختصاص وزن‌های فازی و تلفیق نهایی عوامل است. بدین‌منظور، ۱۵ شاخص مورفومتریک در فرایند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. در نتیجه این تحقیق، از بین عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی، آبراه‌ها به‌عنوان بستر اصلی رخداد‌های سیل، عامل بارش به‌عنوان کلیدی‌ترین محرکه اقلیمی سیل و متغیرهای هیدرولوژیک، آدافیک و بوتانیک حاکم بر حوضه آبخیز نظیر جریان تجمعی، شماره منحنی و شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی، به‌ترتیب با وزن‌های فازی‌شده ۰/۰۷۲، ۰/۰۷۱، ۰/۰۷، ۰/۰۶۸، ۰/۰۶۷ و به‌عنوان مهم‌ترین عوامل در محدوده مطالعاتی شناسایی شدند. نتایج پهنه‌بندی پتانسیل مکانی سیل‌خیزی در محدوده مطالعاتی حاکی از آن است که حدود ۲۷/۵ درصد (۱۸۷۳ هکتار) از سطح حوضه در کلاس‌های خطر سیل‌خیزی زیاد و خیلی‌زیاد قرار گرفته‌اند. توزیع مکانی کلاس‌های خطر بالای سیل‌خیزی در بالادست و پایین‌دست بیانگر لزوم اجرای توأم اقدامات مدیریتی نرم در بالادست (بیولوژیک و بیومکانیکی) و سخت (مکانیکی) در پایین‌دست حوضه است. همچنین، آموزش ساکنان درباره مفاهیم خطر و ریسک سیل در همه مناطق اعم از کلاس‌های خطر خیلی‌کم تا خیلی‌زیاد پیشنهاد می‌شود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در حوضه‌های وسیع با داده‌های محدود، استفاده از مدل‌های تلفیقی کارشناسی-قاعده‌محور نسبت به مدل‌های داده‌کاوی داده‌محور (لرزش) میدانی نقطه‌ای یا پهنه‌ای) ارجحیت بالاتری دارند. در تحقیق حاضر، روش فازی با تبدیل نظرات کارشناسی در مقیاس‌های ۰ تا ۱ در ارائه بهتر نظرات و هم‌سوسازی با واقعیت طبیعی منطقه نقش مؤثری داشت.

واژه‌های کلیدی: خطر سیل‌خیزی، ریسک سیل‌خیزی، شاخص مورفومتریک، مدل‌سازی تلفیقی سیل.

ارجاع: داوری ک. شامکوئیان ح. و فرشته‌پور م. ۱۴۰۱. ارزیابی خطر سیل‌خیزی در حوضه آبخیز رودخانه زشک شانديز با استفاده از مدل‌سازی بر مبنای سنجش‌ازدور و روش تحلیل سلسله‌مراتبی-فازی. ۴۷: ۱۱-۲۲. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13882.2401>

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- پسادکتری در دانشگاه آنتاریو غربی کانادا.

* نویسنده مسئول: m.shahrokhnia@areeo.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶

مقدمه

لامرد استان فارس با دخیل کردن دو مجموعه معیار طبیعی (فاصله از آبراهه، زمین شناسی و شیب) و انسانی (شبکه معابر، پل های شهری، کاربری های مسکونی، کشاورزی و جنگلی و قابلیت اراضی) بهره بردند. براساس نتایج تحقیق ایشان، نزدیک به نیمی از محدوده مطالعاتی در وضعیت هشدار قرار داشته و شرایط سیل خیزی مهیا است. در تحقیقات خارجی نیز، اکمچی اوقلو و همکاران (۲۰۲۱) با بهره گیری از روش تلفیقی فازی-تحلیل سلسله مراتبی (FAHP) و در نظر گرفتن عوامل مؤثر شامل زیرساخت های آسیب پذیر، تراکم جمعیت، جمعیت آسیب پذیر، سطح آموزش، سطح درآمد، مسیرهای حمل و نقل، تعداد خانوار، کاربری اراضی، شبکه پمپاژ آب، شیب، شماره منحنی (مناطق نفوذناپذیر)، دوره بازگشت رگبارها و تعداد روزهای بارانی در سال، به ارزیابی ریسک سیل خیزی شهر استانبول پرداختند. براساس بزرگی رخدادهای دو دهه اخیر، دقت مدل قابل قبول ارزیابی شده است. کارایی مناسب مدل FAHP در تحقیقات بویوکوزخان و فیضی اوقلو (۲۰۰۴)، یانگ و همکاران (۲۰۱۳)، تهرانی و همکاران (۲۰۱۵) و دارکو و همکاران (۲۰۱۹) نیز مبتنی بر مقایسه با واقعیت زمینی الگوی پراکنش و مستندات خسارات سیل گزارش شده است با مرور منابع فوق، مشخص شد که شکاف تحقیقاتی شامل عدم استفاده از روش تلفیقی فازی-تحلیل سلسله مراتبی به عنوان یک روش مناسب مدیریتی برای سناریوسازی در حوضه مطالعاتی و در نظر گرفتن مجموعه محدودی از عوامل برای مدل سازی پتانسیل سیل خیزی بوده که انجام تحقیق حاضر را الزامی می سازد. در این تحقیق سعی بر آن است که علاوه بر استفاده از روش تلفیقی FAHP، عوامل مؤثر بر سیل خیزی نیز غنی شود. با تکیه بر موارد فوق، اهداف تحقیق حاضر مشتمل بر تهیه عوامل مؤثر بر سیل خیزی حوضه (متناسب با موجودیت داده)، تهیه پرسشنامه های مقایسات زوجی درون عاملی و بین عاملی، استخراج وزن عوامل مبتنی بر تحلیل سلسله مراتبی، فازی سازی وزن های مستخرج و پهنه بندی سیل خیزی در حوضه آبخیز زشک شانديز استان خراسان رضوی تعریف شد.

هرساله بلایای طبیعی مانند سیلاب باعث تلفات فراوان جانی و مالی در سراسر جهان می شود که سیلاب به دلیل وسعت زمانی و مکانی آن، مخرب ترین آن ها شناخته شده است (تیرنی و همکاران، ۲۰۰۲). یکی از جنبه های مهم و قابل توجه در برنامه ریزی توسعه، تأکید و توجه به آسیب پذیری کشور و مهم تر از همه، آسیب پذیری عناصر در معرض خطر در مقابل مخاطرات طبیعی است؛ بنابراین شناسایی مناطق حساس به وقوع سیل و شناخت عوامل مؤثر بر آن به منظور انجام اقدامات لازم، برای کاهش خسارات ضروری است (بابک و همکاران، ۲۰۱۲). امروزه با وجود توسعه مدل های پیشرفته، مدل سازی فرایندهای دخیل در ایجاد سیل با سرعت و دقت بالا انجام می گیرد؛ البته بخش اعظم این مدل ها نیازمند داده های ورودی دقیق و بسیار بوده که اغلب با تعیین پارامترهای متعدد اجرا می شوند. از سوی دیگر، روش های یادگیری ماشین نیز جایگاه ویژه ای نزد محققان یافته است، اما به دلیل ذات جعبه سیاه بودن و عدم اطلاع کاربر از معادلات ریاضی به کاررفته در بطن مدل و نحوه فرموله کردن روابط درهم تنیده و پیچیده عوامل طبیعی با واقعه هدف (سیل)، ابهامات متعددی مشاهده می شود. در زمینه مدل سازی پتانسیل مکان سیل خیزی، مجموعه وسیعی از مدل های آماری (دومتغیره و چندمتغیره)، مدل های کمی و نیمه کمی مبتنی بر نظر کارشناسی، مدل های قاعده محور فازی^۱ و روش های احتمالاتی داده محور^۲ از جمله مدل های داده کاوی یادگیری ماشین/عمیق توسعه داده شده اند. مدل های احتمالاتی داده محور عمدتاً بر پایه شواهد حضور و عدم حضور پدیده در طبیعت استوار هستند که معمولاً در قالب داده های نقطه ای یا پهنه ای فراخوانی شده و بعضاً خروجی های قابل قبولی ارائه می کنند؛ بنابراین در این تحقیق، ارزیابی پتانسیل مکانی سیل خیزی حوضه زشک شانديز با تکیه بر روش تلفیقی تحلیل سلسله مراتبی-فازی (FAHP) بدون نیاز به شواهد میدانی انجام شد. تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده که به شرح ذیل ارائه می شود:

غلامی و احمدی (۱۳۹۸) از دو روش AHP و Fuzzy به طور جداگانه برای ارزیابی پتانسیل سیل خیزی در شهر

مواد و روش‌ها

تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است. این مدل‌سازی شامل مراحل مختلف امتیازدهی زوجی معیارها و زیرمعیارها براساس نظرات کارشناسی، فازی‌سازی امتیازات، اختصاص وزن‌های فازی و تلفیق نهایی عوامل است.

نمودار جریان‌ی تحقیق حاضر در شکل ۱ ارائه شده است که در بخش‌های بعدی به تفصیل به آن‌ها پرداخته می‌شود. طبق این شکل، از ۱۵ شاخص مورفومتری که در ادامه به آن اشاره می‌شود، در فرایند مدل‌سازی پتانسیل سیل‌خیزی حوضه زشک شاندیز با روش تلفیقی فازی-

ارزیابی پتانسیل سیل‌خیزی حوضه زشک شاندیز، استان خراسان رضوی



شکل ۱- نمودار جریان‌ی تحقیق

کوه‌های زنبورگاه، سیاه‌خانی، تیغ سیاه و کوه‌چمن سرچشمه می‌گیرد و پس از پیوستن به شاخه‌های فرعی کنگ، زشک بزرگ و کوچک به سمت پایین‌دست حوضه حرکت کرده و در پایین‌دست روستای سرآسیاب با پیوستن چند شاخه فرعی به آن وارد بند گلستان می‌شود و طغیان‌های این رودخانه پس از عبور از بند گلستان وارد دشت مشهد می‌شود. به‌طور کلی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع سیل و آبگرفتگی اراضی مجاور رودخانه زشک می‌توان به تصرف بستر و کاهش ظرفیت آبگذری آن اشاره کرد که با توجه به جذابیت‌های گردشگری منطقه مکرراً مشاهده می‌شود. در این رودخانه سیلاب‌های متعددی با ایجاد خسارت به ابنیه و راه‌های مواصلاتی رخ داده است که از آن جمله می‌توان به سیل ۸ شهریور ماه سال ۱۳۸۷، ۱۷ فروردین ماه سال ۱۳۹۱ و ۷ اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۱ اشاره کرد (شامکوئیان و میرقاسمی، ۱۳۹۴).

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه مطابق با شکل ۲ حوضه آبخیز رودخانه زشک با طول تقریبی ۱۷ کیلومتر در بالادست شهر شاندیز و جنوب‌غربی دشت مشهد واقع شده است. کاربری اراضی این حوضه شامل مراتع نیمه‌تراکم، کم‌تراکم و زراعت آبی و باغات است. بیشترین ارتفاع این حوضه ۲۵۴۰ متر در نزدیکی روستای زشک و کمترین ارتفاع آن ۱۲۵۰ متر در خروجی دشت و در نزدیکی بندگلستان است. متوسط دمای سالیانه این حوضه براساس ایستگاه هواشناسی سرآسیاب ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد است و حداقل دمای آن در فصل زمستان به ۱۶- درجه سانتی‌گراد و حداکثر دمای آن در فصل تابستان به ۴۱ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. متوسط بارندگی در این حوضه با توجه به آمار ۳۰ ساله ایستگاه فوق ۳۱۱ میلی‌متر در سال است. رودخانه زشک-شاندیز که مهم‌ترین رودخانه این حوضه است، از ارتفاعات بینالود،

شدند. شاخص NDVI بیانگر وضعیت پوشش گیاهی منطقه است؛ به طوری که مقادیر منفی به پهنه های آبی و یخی، مقادیر نزدیک به صفر مناطق فاقد پوشش و بایر و مقادیر بالا به مناطق با پوشش متراکم اشاره دارند. نقشه کاربری اراضی از تصاویر اپتیک سنتینل ۲ با تکیه بر روش های کلاسه بندی نظارت شده و الگوریتم Maximum Likelihood در محیط ArcGIS 10.8 با تعیین نمونه های تعلیمی از کاربری های مختلف تهیه و نقشه آرشو شده در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی به روزرسانی و تدقیق شد. نقشه بافت خاک و بارش متوسط سالانه منطقه از آرشو اطلاعات اداره منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی تهیه شد. به منظور فراهم آوردن بستر مقایسه های زوجی درون عاملی، لایه عوامل کمی پیوسته (نظیر ارتفاع از سطح دریا و شیب) مانند سایر عوامل کیفی گسسته (نظیر جهت شیب) به طبقات همگن طبقه بندی شدند. استراتژی طبقه بندی عوامل کمی و تعداد کلاس های طبقه بندی همانند تحقیقات متعدد مرتبط با این مسئله مبتنی بر نظر کارشناسی بوده، اگرچه از شکل توزیع پیکسل های هر لایه نیز بهره برده شده است. به عبارت دیگر، برای طبقه بندی لایه های پیوسته دارای توزیع پیکسل های نرمال و زنگوله ای شکل (نظیر لایه ارتفاع) عمدتاً از تکنیک کلاسه بندی فواصل یکسان یا چارک استفاده می شود. در حالی که روش نقاط عطف منحنی تجمعی فراوانی پیکسل ها (Natural Break) بیشتر در صورت مشاهده چولگی مثبت یا منفی در توزیع پیکسل های یک لایه کمی پیوسته به کار می رود.

تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

فرایند تحلیل سلسله مراتبی بر تجزیه مسائل پیچیده به سلسله مراتب استوار است که در رأس آن هدف کلی قرار دارد. در مرحله بعدی معیارها و زیرمعیارها قرار می گیرند و در پایین ترین رده، سلسله مراتب گزینه ها قرار دارند. بعد از تجزیه مسئله به سلسله مراتب، عناصر سطوح مختلف به صورت دوتایی با هم مقایسه می شوند (ساتی، ۲۰۰۰). سپس براساس میزان ارجحیت دو معیار، ارزش گذاری صورت می گیرد (علیجانی و همکاران، ۱۳۸۴). تحلیل سلسله مراتبی ۴ مرحله دارد: ۱- ایجاد درخت سلسله مراتبی: انتخاب معیارها و عوامل مؤثر بر هدف. ۲-



شکل ۲- نقشه موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز زشک

تولید عوامل مؤثر بر سیل خیزی

براساس مرور منابع گسترده، بازدیدهای گسترده میدانی و بررسی شرایط و عوامل مؤثر بر وقوع سیل های حوضه مورد مطالعه و همچنین در نظر گرفتن قابلیت دسترسی به داده های عوامل، ۱۵ عامل مؤثر از مجموعه عوامل اقلیمی، زمین شناختی، توپوگرافیکی، توپو-هیدرولوژیکی و انسان ساخت انتخاب شد که شامل ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، جریان تجمعی، شماره منحنی (تلفیق واحدهای همگن کاربری اراضی و بافت خاک)، شاخص ارتفاع از سطح دریا، شاخص زهکش $HAND^1$ ، بارش متوسط سالانه، انحنای طولی دامنه، انحنای عرضی دامنه، شاخص رطوبت توپوگرافی TWI^2 ، شاخص طول شیب LS^3 ، شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده $NDVI^4$ ، موقعیت نسبی شیب RSP^5 ، شاخص توان جریان SPI^6 و شاخص زبری دامنه TRI^7 هستند. نقشه این عوامل در سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS 10.8) و نقشه مدل رقمی ارتفاعی DEM^8 با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر، از تصاویر ماهواره راداری ALOS PALSAR تهیه شد. نقشه آبراهه از روی نقشه توپوگرافی تهیه شده و سپس با استفاده از الگوریتم Euclidean Distance در محیط ArcGIS 10.8، نقشه فاصله ای تهیه شد. عوامل درجه شیب، جهت شیب، انحنای طولی و عرضی دامنه، شاخص TWI ، شاخص $HAND$ ، شاخص RSP ، شاخص SPI و شاخص TRI از لایه DEM منطقه در محیط ArcGIS 10.8 و SAGA-GIS استخراج و تهیه

1- Height Above the Nearest Drainage (HAND)

2- Topographic Wetness Index (TWI)

3- Slope Length (LS)

4- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

5- Relative Slope Position (RSP)

6- Stream Power Index (SPI)

7- Topographic Ruggedness Index (TRI)

8- Digital Elevation Model (DEM)

معیارها و گزینه‌ها (در صورت وجود) در ماتریس‌های مقایسه زوجی و (۷) محاسبه بردار وزن نهایی است.

مدل تلفیقی تحلیل سلسله‌مراتبی-فازی (FAHP)

مدل ترکیبی Fuzzy-AHP به مفهوم فازی کردن روش AHP به صورت غیرمستقیم و بدون استفاده از مجموعه‌های فازی است. در واقع در این روش با استفاده از عبارات‌های زبانی، مفهوم فازی بودن، در تعیین ماتریس‌های مقایسه زوجی دخالت داده می‌شود؛ اما محققان با تعمیم روش AHP، روش‌هایی پیشنهاد کرده‌اند که در آن‌ها از اعداد فازی برای بیان ارجحیت گزینه‌ها استفاده می‌شود. در این میان می‌توان به روش‌های لارهن، پدریچ و باکلی اشاره کرد. اعداد فازی مثلثی به صورت (l, m, u) ارائه می‌شوند که پارامترهای l ، m و u به ترتیب کوچک‌ترین مقدار ممکن مورد انتظار، مقدار محتمل‌تر مورد انتظار و بیشترین مقدار ممکن مورد انتظار هستند. روش مقایسات زوجی برای هر سطح با توجه به هدف انتخاب بهترین گزینه با استفاده از مقیاس نه‌تایی انجام می‌شود؛ بنابراین به‌کارگیری AHP سانی دارای کمبودهایی است که عبارت‌اند از: (۱) روش AHP اساساً در تصمیم‌گیری‌های فرایندمحور و غیرفازی استفاده شده است؛ (۲) مقیاس خیلی نامتعادل قضاوت را مورد بررسی قرار می‌دهد؛ (۳) عدم اطمینان‌های موجود در قضاوت‌های فردی را در نظر نمی‌گیرد؛ (۴) رتبه‌بندی این روش تقریباً غیردقیق است؛ و (۵) قضاوت‌های ذهنی، انتخاب و عملکرد تصمیم‌گیران تأثیرات بسیار زیادی در نتایج AHP دارد؛ بنابراین AHP متعارف و کلاسیک، در دستیابی دقیق نیازمندی‌های تصمیم‌گیران ناکافی و ناکارآمد به نظر می‌رسد. به‌منظور مدل‌سازی این نوع از عدم اطمینان‌ها، تئوری مجموعه‌های فازی می‌بایست با مقایسات زوجی - به‌عنوان توسعه تکنیک AHP- ترکیب شود. روش AHP فازی چانگ، شکل تعمیم‌یافته‌ای از روش AHP کلاسیک است. در این روش برای مقایسه زوجی گزینه‌ها از اعداد فازی و برای به‌دست‌آوردن وزن‌ها و ارجحیت‌ها از روش میانگین‌گیری هندسی استفاده می‌شود؛ زیرا این روش به‌سادگی به حالت فازی قابل تعمیم است و جواب یگانه‌ای برای ماتریس مقایسه‌های زوجی تعیین می‌کند که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل تحلیل توسعه چانگ (۱۹۹۶)، از اعداد فازی مثلثی (l, m, u) برای

مقایسه زوجی؛ مقایسات زوجی توسط گروه کارشناس خبره و نرم‌افزار Expert-Choice 11 انجام می‌شود. در این مرحله با توجه به عوامل مؤثر، ماتریس وزن برای مقایسه، تشکیل و عوامل مؤثر دوبه‌دو با هم مقایسه می‌شوند. تمام مقایسه‌ها در تحلیل سلسله‌مراتبی به صورت زوجی انجام می‌پذیرد. در این مقایسه‌ها تصمیم‌گیرندگان از قضاوت شفاهی استفاده می‌کنند. این قضاوت‌ها در سال ۲۰۰۰ توسط ساتی براساس میزان ارجحیت به مقدار کمی بین ۱ الی ۹ تبدیل شده است. ۳- نرمال‌سازی و تعیین اولویت‌ها: یعنی گزینه‌های مختلف بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از نظر هر معیار با هم مقایسه شده و سپس توسط میانگین وزنی، نرمال می‌شوند. بدین‌صورت اولویت هر گزینه به‌دست می‌آید. ۴- محاسبه وزن یا میزان اثربخشی هر یک از عوامل: شامل روش‌های حداقل مربعات، روش حداقل مربعات لگاریتمی، روش بردار ویژه و روش تقریبی شامل جمع سطرها، جمع ستون‌ها و روش میانگین هندسی است. نرم‌افزار Expert-Choice از روش بردار ویژه که در حال حاضر دقیق‌ترین روش است، استفاده می‌کند. با وجود مزایای قابل‌توجه روش تحلیل سلسله‌مراتبی، نقایصی نیز بدان مترتب است. از آن جمله، تصمیم‌گیرندگان اغلب به‌دلیل طبیعت فازی مقایسه‌های زوجی قادر نیستند به صراحت نظرشان را در مورد برتری معیارها بیان کنند، به همین دلیل در قضاوت‌هایشان ارائه یک بازه را به‌جای یک عدد ثابت ترجیح می‌دهند. بدین‌ترتیب برای مدل‌سازی این نوع از عدم اطمینان‌ها، تئوری مجموعه‌های فازی که اولین بار توسط لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ مطرح شده بود؛ مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌منظور استفاده از مزایای هر دو تکنیک فازی و AHP و نیز غلبه بر نقاط ضعف آن‌ها، ون لارهن و پدریکز (۱۹۸۳) اولین بار اصول منطق فازی را در تحلیل سلسله‌مراتبی به‌کار بردند. این روش دامنه‌ای از مقادیر را برای بیان عدم قطعیت تصمیم‌گیرندگان به‌کار می‌گیرد. چانگ (۱۹۹۶) روش فازی-تحلیل سلسله‌مراتبی (FAHP) را ارائه کرد. خلاصه این روش شامل (۱) رسم نمودار سلسله‌مراتبی، (۲) مرحله تعریف اعداد فازی به‌منظور انجام مقایسه‌های زوجی، تشکیل ماتریس مقایسه زوجی با به‌کارگیری اعداد فازی، (۴) محاسبه اعداد فازی مثلثی برای سطرهای ماتریس، (۵) محاسبه درجه بزرگی اعداد فازی مثلثی نسبت به همدیگر، (۶) محاسبه وزن

$$V(S_i > S_k) = \begin{cases} 0 & m_i \geq m_k \\ 1 & l_k \geq u_i \\ \frac{l_k - u_i}{(m_i - u_i) - (m_k - l_k)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

نهایتاً، با استفاده از معادله (۳)، وزن‌های خام محاسبه و با تقسیم هر وزن خام بر مجموع اوزان خام، وزن نرمال حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} V(S > S_1, S_2, \dots, S_k) &= (V(S > S_1), (S > S_2), \dots, (S > S_k)) \\ &= \min(V(S > S_1), (S > S_2), \dots, (S > S_k)) \\ &= \min V(S > S_i) \quad i = 1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (3)$$

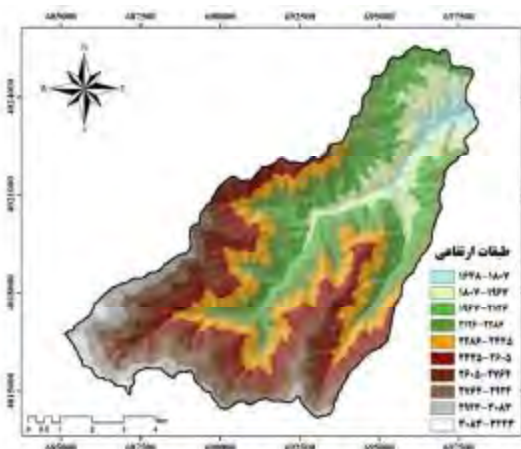
نتایج و بحث

براساس توضیحات ارائه شده در بخش مواد و روش‌ها، ۱۵ عامل توپوگرافی، توپویدرولوژیک، اقلیمی و پوشش گیاهی به‌عنوان مؤثرترین عوامل در سیل‌خیزی حوضه زشک انتخاب و در محیط ArcGIS تهیه و طبقه‌بندی شدند. در شکل ۳ نقشه طبقات ارتفاعی و شیب به‌صورت نمونه ارائه شده است.

ایجاد مقیاس مقایسه زوجی استفاده می‌شود و یک ماتریس مقایسه زوجی برای هر سطح در سلسله‌مراتب ساخته می‌شود. سپس، زیرمجموعه‌های هر سطر در ماتریس محاسبه می‌شود تا عضو یک مجموعه جدید شوند. مقادیر کلی فازی مثلثی (ui, mi, li) برای معیار Mi با محاسبه $li/\sum li$ ، $mi/\sum mi$ و $ui/\sum ui$ به‌دست می‌آید. توابع عضویت که به معنی میانگین وزن متناظر گزینه‌ها در ماتریس مربوطه است، با استفاده از این مقادیر برای هر معیار محاسبه می‌شود. درنهایت این مقادیر، نرمال شده و وزن نهایی اهمیت هر یک از معیارها به‌دست می‌آید. برای محاسبه وزن با روش چانگ، ابتدا مقادیر وزن فازی M_{gi} (Si) برای هر سطر ماتریس مقایسه زوجی فازی از معادله (۱) به‌دست می‌آید.

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \times \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right] \quad (1)$$

که در آن M_{gi}^j مجموعه هدف و اعداد فازی مثلثی هستند. در مرحله بعدی، میزان بزرگی (درجه اهمیت) هر S_i بر S_k از معادله (۲) محاسبه می‌شود.



شکل ۳- نقشه عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی حوضه زشک شانديز (طبقات ارتفاعی و شیب)

کارشناس خبره، به‌دلیل تعدد نظرات در هر سلول از ماتریس‌های ارائه شده، از مقادیر طیف فازی تعلق‌گرفته به ۹ طیف کلامی ساتی میانگین‌گیری شد. این مقادیر فازی در سه طیف (Lower) L، (Modal) M و (Upper) U تعریف شدند. از مینیمم مقادیر برای تعیین حد پایین اعداد فازی استفاده شد. همچنین، از اعداد میانی فازی میانگین‌گیری هندسی و برای حد بالا از اعداد ماکزیمم استفاده شد. در جدول ۱ میانگین مقادیر طیف‌های فازی

پس از تهیه نقشه عوامل و طبقه‌بندی آن‌ها، ماتریس مقایسات زوجی بین‌عاملی و درون‌عاملی تهیه و در اختیار کارشناس خبره از سازمان‌های تحقیقاتی و اجرایی مشرف بر مسائل سیل و آشنا با حوضه مورد مطالعه قرار گرفت. امتیازات مقایسات زوجی، شامل طیف ۹ تایی ساتی بوده که کارشناسان مربوطه از ارجحیت برابر (عدد ۱) تا ارجحیت خیلی زیاد (عدد ۹)، عدد مناسب را برای مقایسه خود برگزیدند. پس از تکمیل پرسشنامه‌ها توسط ۱۲

مثلی مقایسات زوجی برای عامل NDVI به‌عنوان مثال ارائه شده است. براساس مقادیر میانگین طیف‌های فازی، وزن نهایی عوامل و کلاس‌های هر عامل به‌دست آمد که در جداول ۲ و ۳ به صورت نمونه ارائه شده است.

جدول ۱- میانگین مقادیر طیف‌های فازی مثلی مقایسات زوجی نسبت به عامل NDVI

پوشش متراکم	پوشش کم تا متوسط	پوشش ناچیز	فاقد پوشش	مقایسه زوجی طبقات
(۶، ۷/۶۱۲، ۹)	(۳، ۴/۳۰۸، ۶)	(۱، ۲/۲۸۹، ۴)	(۱، ۱، ۱)	فاقد پوشش
(۴، ۵، ۶)	(۲، ۳، ۴)	(۱، ۱، ۱)		پوشش ناچیز
(۲، ۳، ۴)	(۱، ۱، ۱)			پوشش کم تا متوسط
(۱، ۱، ۱)				پوشش متراکم

جدول ۲- وزن نهایی عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی حوضه زشک مبتنی بر روش FAHP

ردیف	رتبه	نام معیار	وزن معیار
۱	۳	شماره منحنی	۰/۰۷
۲	۴	جریان تجمعی	۰/۰۶۸
۳	۵	شاخص NDVI	۰/۰۶۷
۴	۶	شیب	۰/۰۶۶

جدول ۳- وزن نهایی کلاس‌های عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی حوضه زشک مبتنی بر روش FAHP

عامل	کلاس	وزن معیار	عامل	کلاس	وزن معیار
	۰-۴۵/۰۶	۰/۳۱۳		۰-۲۷	۰/۷۴۳
	۴۵/۰۶-۱۰۰/۷۷	۰/۲۵۳		۲۷-۴۳	۰/۲۵۷
	۱۰۰/۷۷-۱۵۴/۶۱	۰/۲۱۴	درصد شیب	۴۳-۵۸	.
	۱۵۴/۶۱-۲۰۶/۱۵	۰/۱۴۵		۵۸-۷۷	.
فاصله از آبراهه	۲۰۶/۱۵-۲۵۷/۶۹	۰/۰۷۵		۷۷-۲۲۲	.
	۲۵۷/۶۹-۳۱۰/۴۹	.		۱۶۴۸-۱۸۰۷	۰/۳۱۸
	۳۱۰/۴۹-۳۶۵/۹۳	.	ارتفاع از سطح دریا	۱۸۰۷-۱۹۶۷	۰/۲۵۷
	۳۶۵/۹۳-۴۲۷/۹۳	.		۱۹۶۷-۲۱۲۶	۰/۲۱۵

هر عامل، نتیجه می‌شود که مناطق حاشیه آبراهه بیشترین وزن را از آن خود کرده که ناشی از اهمیت بالای دشت‌های سیلابی در سیل‌خیزی بالای منطقه مورد مطالعه بوده و قاعدتاً آبنیه و زیرساخت‌های مستقر در این عرصه‌ها، خسارات بالایی از سیل را متحمل خواهند شد. مقادیر بالای بارش، بیشترین وزن را از آن خود کرده که بیانگر نقش تداوم بارش به‌عنوان اصلی‌ترین عامل اقلیمی در وقوع سیل در محدوده مورد مطالعه است. مقادیر بالای شماره منحنی بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند که خود از ترکیب دو عامل محرک خاک‌های با پتانسیل تولید رواناب بالا (گروه هیدرولوژیکی D) و کاربری‌های مصنوعی و طبیعی با پوشش کم ناشی می‌شود. افزایش جریان تجمعی با بیشترین وزن بیانگر نقش تحریکی

نتایج حاکی از آن است که عامل ارتفاع به‌عنوان یک لایه بینابینی و نماینده به تولید مجموعه وسیعی از شاخص‌های توپویدرولوژیک منجر شده، به‌طوری‌که این شاخص‌های مورفومتریک بعضاً دارای صفاتی بوده که در لایه مادر (ارتفاع) پنهان است. استفاده ترکیبی از این مجموعه شاخص مورفومتریک به درک بهتر مدل و ارتقای قابلیت تشخیص الگوی سیل‌خیزی در مدل نهایی کمک شایان توجهی کرد. بهره‌گیری از این شاخص‌های مورفومتریک، در کنار سایر عوامل زمینه‌ساز اصلی، نظیر عوامل مورفومتریک (ارتفاع، شیب و جهت)، خاکشناسی و زمین‌شناختی (بافت خاک، زمین‌شناسی) و زیست‌محیطی-انسان‌ساز (کاربری و پوشش اراضی) به تشکیل یک مدل کارا ختم شد. با بررسی وزن‌های طبقات

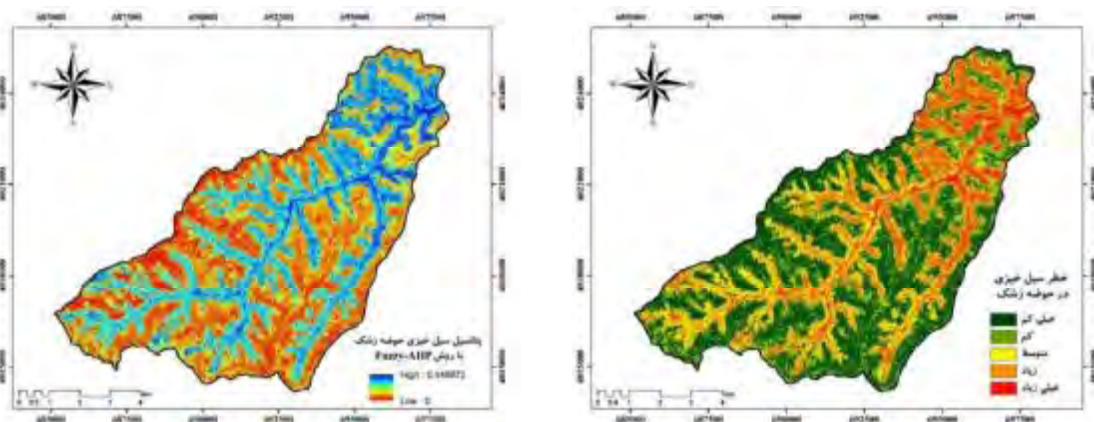
علاوه‌براین، نقشه مؤثر عوامل بنیادین، نظیر آبراهه‌ها به‌عنوان بستر اصلی رخداد‌های سیل، عامل بارش به‌عنوان کلیدی‌ترین محرکه اقلیمی سیل، متغیرهای هیدرولوژیک، ادافیک و بوتانیک حاکم بر حوضه آبخیز نظیر جریان تجمعی، شماره منحنی و شاخص NDVI در تحقیق حاضر به‌عنوان مهم‌ترین عوامل شناسایی‌شده حائز اهمیت است. همچنین، نقش کلیدی شاخص‌های مورفومتریک مشتق از مدل رقومی ارتفاع نظیر SPI، TRI و HAND بار دیگر بر تأثیر قابل‌ملاحظه این نوع از متغیرها بر دلالت غیرمستقیم بر پدیده‌های توپوهیدرولوژیک در فرایند مدل‌سازی صحه می‌گذارد. پس از اعمال وزن عوامل (جدول ۲) در وزن طبقات (جدول ۳)، نقشه نهایی پتانسیل سیل‌خیزی حوضه زشک شانديز در محیط ArcGIS تهیه و سپس با اعمال الگوریتم نقاط عطف منحنی فراوانی تجمعی پیکسل‌ها (Natural Break) به پنج کلاس خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد کلاسه‌بندی شد که در شکل ۴ ارائه شده است. مساحت طبقات خطر سیل‌خیزی نیز در جدول ۴ ارائه شده است. براساس جدول و شکل ۴، حدود ۲۷/۵ درصد (۱۸۷۳ هکتار) از سطح حوضه در کلاس‌های خطر سیل‌خیزی زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند. روند نزولی مساحت از کلاس‌های کم‌خطر به پرخطر یکی دیگر از مضامین کاربردی‌بودن نقشه خروجی از الگوریتم محاسباتی FAHP است؛ به‌طوری‌که تخصیص عملیات مدیریتی به سطح کوچک‌تر امری قابل‌اجرا است. همچنین، این روند با طبیعت بلایای طبیعی نیز سازگارتر است؛ به‌طوری‌که مخاطرات طبیعی معمولاً در سطحی کوچک و با شدت بزرگ (و بالتبع خسارات بالا) متمرکز بوده و ممکن است بخش اعظم منطقه از گزند این بلاها در امان باشند. نکته حائز اهمیت در نقشه نهایی طبقات خطر سیل‌خیزی در حوضه زشک، تنوع گسترش مکانی پدیده، هم در بالادست و هم در پایین‌دست است (شکل ۵ و ۶).

با تکیه بر موارد فوق، مشخص می‌شود که مدیریت سیل در حوضه مطالعاتی نیازمند به‌کارگیری برنامه‌های مدیریتی و تسکینی با تنوع بالا است. به‌طوری‌که مناطق بالادست برای اجرای اقدامات بیومکانیکی آبخیزداری شامل افزایش سطح پوشش گیاهی و احداث بندهای گابیونی و سنگی ملاتی جزو مناطق مناسب با راندمان سیل‌گیری بالا هستند. حال آنکه تمرکز بالای ابنیه و حضور مردم در بخش خروجی حوضه، نیازمند دخالت

افزایش مشارکت فضایی در تجمع رواناب بوده که نتیجتاً به غرقاب مناطق تحت‌تأثیر منجر خواهد شد. مقادیر پایین شاخص NDVI به عرصه‌های فاقد پوشش یا پوشش تنک اشاره داشته و به‌سبب عدم نفوذ بارش در این عرصه‌ها، حجم رواناب افزایش یافته و بستر را برای شرایط سیل‌خیزی و غرقاب فراهم می‌کند که به‌درستی بالاترین وزن را از آن خود کرده است. طبقه مناطق اشباع در شاخص HAND به‌عنوان یک شاخص توپوهیدرولوژیک جدید بیشترین وزن را از آن خود کرده که حاکی از افزایش حجم رواناب در مناطق با مکانیسم تولید رواناب اشباع به‌دلیل کاهش نفوذپذیری و قرارگیری در مناطق هموار و مستعد تجمع بارش است. مقادیر بالا در شاخص TWI هم‌راستا با شاخص جریان تجمعی به افزایش مشارکت فضایی در تولید و تجمع رواناب اشاره داشته که بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است. طبقات عوامل شیب، جهت، ارتفاع و انحناهای طولی و عرضی دامنه هم‌راستا بوده و به وزن بالای مناطق هموار واقع در کف دره‌ها (شیب کم و ارتفاع پایین) اشاره دارد که به‌عنوان نخستین عرصه‌های تحت‌تأثیر سیل شناخته می‌شوند. علاوه‌براین، جهات دامنه رو به شمال و شرق به‌سبب دریافت بارش بیشتر، وزن بالاتری را به خود اختصاص داده‌اند. وزن طبقات عامل موقعیت نسبی دامنه نیز با عامل فاصله از آبراهه هم‌راستا بوده و حاکی از خطر بالای سیل‌خیزی در مناطق حاشیه رودخانه است. مقادیر بالای عامل توان جریان نیز بیشترین وزن را به خود اختصاص داده که ناشی از نقش افزایش توان جریان در انتقال حجم بالای دبی جریان و بالتبع افزایش خطر سیل‌خیزی است. مقادیر بالای عامل TRI دارای بیشترین وزن بوده که ناشی از نقش زبری کم‌دامنه در افزایش سرعت انتقال جریان و بالتبع افزایش پتانسیل سیل‌خیزی است. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که مناطق نزدیک به آبراهه، تمرکز بالای بارش سالانه در بخش خروجی حوضه و دامنه‌های شمالی، شمال‌شرقی، شمال‌غربی و شرق، شماره منحنی بالا، جریان تجمعی قابل‌ملاحظه، پوشش گیاهی ناچیز، نواحی هیدرولوژیک اشباع واقع در بافر رودخانه با مشارکت بالا در تولید رواناب، مناطق هموار کم‌ارتفاع، کوریدورهای رودخانه با توان بالای انتقال آب و درنهایت مناطق متجانس با زبری توپوگرافیک کم، بیشترین تأثیر را در سیل‌خیزی بالای حوضه دارند؛

از سوی دیگر، الگوی درجات خطر در آبراهه‌های اصلی حاصل از به‌هم‌پیوستن آبراهه‌های رتبه ۱ بعضاً بین خطر بالا و پایین تغییر کرده درحالی‌که با حرکت از سمت بالادست به سمت پایین‌دست و خروجی حوضه، آبراهه‌های با رتبه‌های بالاتر به‌صورت یکنواخت خطرات خیلی‌زیاد را نشان می‌دهند و انقطاع الگو مشاهده نمی‌شود که ناشی از تجمع جریان، افزایش سرعت و حجم در بخش خروجی حوضه است. الگوی توزیع خطر سیل‌خیزی در زیرحوضه‌های محدوده مطالعاتی در شکل ۸ نیز مؤید همین موضوع بوده، به‌طوری‌که زیرحوضه‌های خروجی خطر سیل‌خیزی بالاتری نسبت به حوضه‌های بالادست نشان می‌دهند. براساس دو شکل فوق، اختصاص برنامه‌های مدیریتی خطرمدار نرم-به-سخت ارائه شده در چارچوب‌های مدیریت بلایای طبیعی در بخش‌های مختلف دنیا (ساندرس و همکاران، ۲۰۱۳) امکان‌پذیر است. در جدول ۵ به‌عنوان نمونه، کلاس خطر سیل‌خیزی خیلی کم تا متوسط ارائه شده است.

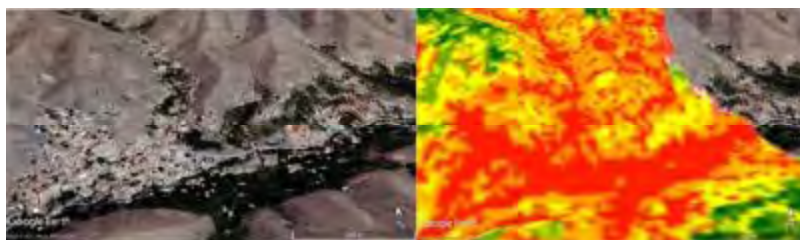
مستقیم مکانیکی به یکی از طرق کاهش عناصر متمرکز، کاهش آسیب‌پذیری عناصر در معرض خطر یا کاهش مستقیم خطر سیل (لایروبی رودخانه، احداث دایک حفاظتی) به‌منظور کاهش خسارات احتمالی است. در این حین، بایستی به اجرای عملیات مدیریتی نرم در سایر بخش‌های حوضه (کلاس‌های خطر خیلی کم تا متوسط) نظیر آموزش اقدامات لازم در قبل، حین و بعد از وقوع سیل، تفهیم معانی مدیریت ریسک و بحران، ظرفیت‌سازی، تحکیم و تقویت اعتماد جاری بین مردم و سازمان‌های مدیریتی، تهییج جوامع محلی برای افزایش مشارکت مردمی در مقابله با سیل توجه ویژه داشت. همچنین، تقسیم‌بندی و مدیریت خطرمدار سیل در دو قالب آبراهه و زیرحوضه در شکل ۷ و ۸ ارائه شده است. شکل ۷ از روی هم‌گذاری نقشه خطر سیل‌خیزی و شبکه آبراهه‌های حوضه تولید شده است. براساس شکل ۷، آبراهه‌های درجه ۱ به‌دلیل پایین بودن توان جریان و سرعت و حجم قابل انتقال محدود سیل نسبت به آبراهه‌های اصلی با درجات بالاتر خطر سیل‌خیزی کمتری نیز دارند.



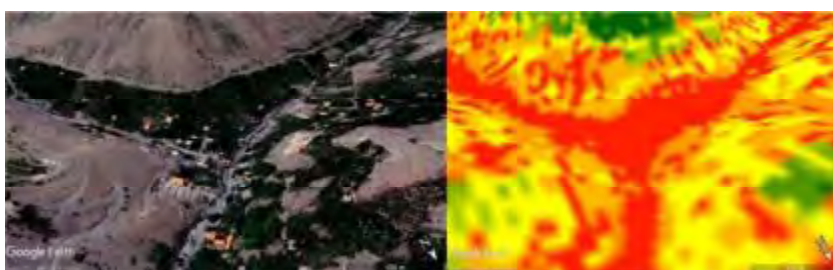
شکل ۴- نقشه‌های پتانسیل و طبقات خطر سیل‌خیزی حوضه زشک شاندیز حاصل از مدل FAHP چانگ

جدول ۴- مساحت و درصد مساحت طبقات خطر سیل‌خیزی در حوضه زشک شاندیز

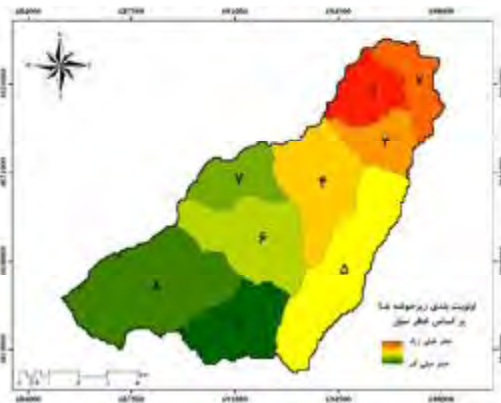
درصد مساحت	مساحت (هکتار)	کلاس‌های خطر سیل‌خیزی
۲۹/۸۳	۲۰۳۱/۴۷	خیلی کم
۲۲/۰۶	۱۵۰۲/۳۴	کم
۲۰/۶۲	۱۴۰۴/۳۴	متوسط
۱۸/۶۳	۱۲۶۸/۷۲	زیاد
۸/۸۶	۶۰۳/۶۱	خیلی زیاد
۱۰۰	۶۸۱۰/۴۸	کل



شکل ۵- تمرکز بالای کلاس های خطر زیاد و خیلی زیاد سیل خیزی در بخش خروجی حوضه زشک و تمرکز بالای اینیه



شکل ۶- تمرکز بالای کلاس های خطر زیاد و خیلی زیاد سیل خیزی در بالادست حوضه زشک با تمرکز کاربری های باغ کاری و مسکونی



شکل ۸- طبقه بندی خطرمدار سیل زیرحوضه های زشک



شکل ۷- طبقه بندی خطرمدار سیل شبکه آبراهه های حوضه

جدول ۵- تخصیص برنامه های مدیریتی به کلاس های مختلف خطر سیل خیزی

ردیف	کلاس خطر سیل خیزی	تُن رنگ غالب	رویکرد کلی	برنامه مدیریتی
۱	خیلی کم	سبز	قابل قبول	(۱) فاقد برنامه (BAU) (۲) آموزش ساکنان و ظرفیت سازی برای افزایش بردباری فیزیکی و اجتماعی - اقتصادی مقابل خسارات سیل
۲	کم	سبز روشن	قابل قبول	(۱) آموزش ساکنان و ظرفیت سازی برای افزایش بردباری فیزیکی و اجتماعی - اقتصادی مقابل خسارات سیل (۲) اجرای عملیات بیولوژیک
۳	متوسط	زرد	قابل تحمل	(۱) آموزش ساکنان و ظرفیت سازی برای افزایش بردباری فیزیکی و اجتماعی - اقتصادی مقابل خسارات سیل (۲) اجرای عملیات بیومکانیکی (۳) وضع قوانین جدی در زمینه عدم تغییر کاربری

نتیجه‌گیری

شباهت بالای نتایج مدل به ماهیت خطر سیل به‌عنوان یک مخاطره طبیعی در منطقه است. روند توزیع مکانی کلاس‌های خطر سیل‌خیزی در سطح محدوده مطالعاتی نیز اشاره به لزوم اجرای اقدامات تلفیقی بیولوژیک و مکانیکی، هم در بالادست و هم در پایین‌دست منطقه دارد. نقشه پهنه‌بندی سیل‌خیزی تهیه‌شده در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک سند مطالعاتی در تخصیص اقدامات تسکینی به مناطق مختلف منطقه و همچنین اجرای تحقیقات آمایش سرزمین خطرمنابا استفاده می‌شود.

منابع

1. شامکوئیان ح. و میرقاسمی س. ح. 1394. سیل‌های خراسان رضوی (1334-1392). شرکت رایانه‌ای میلان‌افزار-مهر آفاق. 146 ص.
2. علیجانی ب. قهرودی م. و امیراحمدی ا. 1384. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در دامنه‌های شمالی شاه جهان با استفاده از GIS (مطالعه موردی: حوضه اسطرخی شیروان). فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، 84: 118-131.
3. غلامی م. و احمدی م. 1398. ریزپهنه‌بندی خطر سیلاب در شهر لامرد با استفاده از GIS، AHP و منطق فازی. مجله مخاطرات طبیعی، 8(20): 101-114.
4. Bubeck P. Botzen W and Aerts J. 2012. A review of risk perceptions and other factors that influence flood mitigation behavior. Risk Analysis. 32: 1481-1495.
5. Büyükközkan G. and Feyzioğlu O. 2004. A fuzzy-logic-based decision-making approach for new product development. International journal of production economics, 90(1): 27-45.
6. Chang D. Y. 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. European journal of operational research. 95(3): 649-655.
7. Darko A. Chan A. P. C. Ameyaw E. E. Owusu E. K. Pärn E. and Edwards D. J. 2019. Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction. International journal of construction management, 19(5): 436-452.
8. Ekmekcioğlu Ö. Koc K. and Özger M. 2021. District based flood risk assessment in Istanbul using fuzzy analytical hierarchy process. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 35(3): 617-637.

مخاطرات طبیعی همه‌ساله خسارات فراوانی را در سراسر جهان و ایران به‌بار می‌آورد که زلزله، طوفان، خشکسالی، آتش‌سوزی و سیل، از جمله آن‌ها هستند. سیل، بزرگ‌ترین و مهم‌ترین بحران اقلیمی است که همه‌ساله جان هزاران نفر را گرفته و خسارات قابل‌توجهی به جوامع انسانی، زیرساخت‌ها و محیط‌زیست وارد می‌سازد. شواهد حاکی از آن است که خسارت ناشی از سیل به‌مراتب بیشتر از سایر مخاطرات طبیعی بوده که ناشی از تکرار بالای وقوع این پدیده است. امروزه استفاده از علوم جدید به‌ویژه سیستم اطلاعات جغرافیایی به برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا ارزیابی سریعی از پتانسیل خطرات طبیعی از جمله سیل را در حداقل زمان ممکن داشته باشند؛ بنابراین سیستم اطلاعات جغرافیایی به شناسایی مناطق سیل‌خیز، تعیین گستره سیل، پهنه‌بندی مناطق سیل‌گیر به درجات مختلف خطر و برآورد خسارات وارده در سطح وسیع کمک شایان توجهی کرده است. در این پژوهش، پتانسیل سیل‌خیزی حوضه آبخیز رودخانه زشک شان‌دیز با استفاده از تکنیک تلفیقی تحلیل سلسله‌مراتبی-فازی (FAHP) در سامانه اطلاعات جغرافیایی مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در حوضه‌های وسیع با داده‌های محدود، استفاده از مدل‌های تلفیقی کارشناسی-قاعده‌محور نسبت به مدل‌های داده‌کاوی داده‌محور (لزوم شواهد میدانی نقطه‌ای یا پهنه‌ای) ارجحیت بالاتری دارند. در تحقیق حاضر، روش فازی با تبدیل نظرات کارشناسی در مقیاس‌های 0 تا 1 در ارائه بهتر نظرات و هم‌سوسازی با واقعیت طبیعی منطقه نقش مؤثری داشت. همچنین، نقش امیدوارکننده شاخص‌های متعدد مورفومتریک مشتق از لایه مدل رقومی ارتفاع در نمایش خصوصیات پنهان توپویدرولوژیک مؤثر در سیل‌خیزی محدوده مطالعاتی حائز اهمیت است. با توجه به امکان تهیه رایگان باندهای ماهواره‌های راداری و اپتیک با بازه‌های زمانی موجود از پایگاه داده‌های بین‌المللی، امکان تهیه سری‌های زمانی از نقشه پهنه‌بندی سیلاب حوضه مطالعاتی نیز امکان‌پذیر است. به‌طور کلی، مشخص شد که سیل‌خیزی منطقه تابع شرایط مختلف توپوگرافیک، خاکشناسی، گیاه‌شناسی و اقلیمی بوده که این مهم در وزن‌های نهایی فازی‌شده عوامل مبرهن است. علاوه بر این، روند کلاسه‌بندی پهنه‌های سیل‌خیز بیانگر

9. Saaty T. L. 2000. Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process (Vol. 6). RWS publications.
10. Saunders W. Beban J. G. and Kilvington M. 2013. Risk-based land use planning for natural hazard risk reduction (p. 97). Lower Hutt: GNS Science.
11. Tehrany M. S. Pradhan B. and Jebur M. N. 2015. Flood susceptibility analysis and its verification using a novel ensemble support vector machine and frequency ratio method. Stochastic environmental research and risk assessment. 29(4): 1149-1165.
12. Tierney K. J. Lindell M. K. and Perry R. W. 2002. Facing the unexpected: disaster preparedness and response in the United States. Disaster Prevention and Management: An International Journal. 11(3): 222-222.
13. Van Laarhoven P. J. and Pedrycz W. 1983. A fuzzy extension of Saaty's priority theory. Fuzzy sets and Systems. 11(1-3): 229-241.
14. Yang X. L. Ding J. H. and Hou H. 2013. Application of a triangular fuzzy AHP approach for flood risk evaluation and response measures analysis. Natural hazards. 68(2): 657-674.

مدل طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد سدهای تأخیری پاره‌سنگی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه خودتطبیق

محمد مهدی ریاحی^۱، حسین ریاحی مدوار^{۲*} و ایمان چگنی بهرامی^۳

چکیده

در این مقاله با استفاده از مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز به طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد سدهای تأخیری پاره‌سنگی پرداخته شد. مطالعه موردی در تحقیق حاضر، حوضه آبخیز رودخانه کرگانرود در غرب استان گیلان است که براساس آمار هیدرومتری سال‌های ۱۳۳۶-۱۳۹۶ طراحی بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی در جهت کاهش پیک سیلاب ورودی به شهر تالش با رویکرد طراحی اولیه مبتنی بر بهینه‌سازی تک‌هدفه و تدقیق طراحی براساس بهینه‌سازی چندهدفه انجام شده است. ابتدا با استفاده از معادلات حاکم، مدل شبیه‌سازی سد تأخیری پاره‌سنگی تهیه شده و سپس طرح اولیه سد برای انواع مختلف شیب دیواره سد (۷۰، ۷۵، ۸۰ و ۹۰ درجه) به دست آمد. در ادامه هریک از طرح‌های اولیه به دست آمده با استفاده از بهینه‌سازی به گونه‌ای بازطراحی شدند که قیود اطمینان تأمین شوند. در نهایت نیز براساس طراحی اولیه به دست آمده، طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و الگوریتم ژنتیک چندهدفه خودتطبیق انجام شد. نتایج حاصل از طراحی اولیه نشان داد که در این حالت ضرایب اطمینان برای طرح ارائه شده تأمین نمی‌شوند و نیاز به استفاده از ابزار بهینه‌ساز برای تأمین قیود اطمینان است. در نتیجه از ابعاد به دست آمده از طراحی اولیه به عنوان کران پایین برای مسائل بهینه‌سازی استفاده شد. همچنین نتایج حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه برای حالات مختلف سد تأخیری نشان داد که بهینه‌ترین حالت سد تأخیری برای حالتی است که زاویه دیواره سد برابر با ۸۰ درجه باشد که در این حالت کمترین هزینه اتفاق می‌افتد و هزینه در این حالت حدود ۲۰ درصد کمتر از سایر حالات است. همچنین نتایج داد که با کاهش مقدار زاویه در سد تأخیری پاره‌سنگی هزینه ساخت سد تأخیری پاره‌سنگی حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. مدل توسعه یافته در این تحقیق امکان بازطراحی و تدقیق طرح اولیه براساس مفاهیم عدم قطعیت، بهینه‌سازی و اعتمادپذیری را فراهم می‌کند و می‌تواند در مطالعات کاربردی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: سد تأخیری پاره‌سنگی، الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک چندهدفه خودتطبیق، طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد، شبیه‌سازی مونت کارلو.

ارجاع: ریاحی م. م.، ریاحی مدوار ح. و چگنی بهرامی ا. ۱۴۰۱. مدل طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد سدهای تأخیری پاره‌سنگی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه خودتطبیق. مجله پژوهش آب ایران. ۴۷: ۲۳-۴۰. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14015.2441>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز.
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان.
۳- مربی و عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد.

* نویسنده مسئول: h.riahi@vru.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹

مقدمه

امروزه وقایع حدی به‌صورت جدی زندگی بشر را مورد تهدید قرار داده‌اند. از جمله مهم‌ترین وقایع حدی می‌توان به وقوع سیل در اثر تغییرات اقلیمی اشاره کرد. روش‌های زیادی برای مدیریت و کنترل سیل ارائه شده است که به دو دسته راهکارهای سازه‌ای و غیرسازه‌ای تقسیم‌بندی شده‌اند. راهکارهایی همچون توسعه مدلهای پیش‌بینی سیل، سیستم‌های هشدار و کاربرد سیستم‌های پشتیبان تصمیم در مدیریت یکپارچه حوضه آبریز، آموزش و آگاهی عمومی قبل از وقوع سیل را می‌توان نمونه‌هایی از روش‌های غیرسازه‌ای در کنترل سیل دانست (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ ویو و همکاران، ۲۰۰۶؛ لی و همکاران، ۲۰۰۶؛ چونتیان و همکاران، ۲۰۰۲؛ یاسین و همکاران، ۲۰۱۹؛ موسوی و همکاران، ۲۰۱۸). در روش‌های سازه‌ای با ساخت سازه، سیل کنترل می‌شود. از جمله این روش‌ها، می‌توان به سدهای تأخیری پاره‌سنگی اشاره کرد که به‌دلایلی از جمله سهولت در ساخت و بهره‌برداری از مقبولیت بالایی برخوردار هستند و برای کاهش پیک سیلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌دلیل آنکه مواد تشکیل‌دهنده این سدها سنگریزه و سنگ هستند، آب ناشی از سیل که در پشت سد جمع شده است، با گذر از منافذ بدنه سد خارج می‌شود و نیاز به بهره‌برداری خاصی نیست، در نتیجه بهره‌برداری از این سدها آسان است. همچنین به جهت وجود چنین ساختاری که دارای منافذ است، این‌گونه سدها از سدهای خاکی ریسک کمتری دارند (سامانی و همکاران، ۲۰۰۳؛ هوشیاری‌پور و طاهرشمسی، ۲۰۱۵؛ هوشیاری‌پور و همکاران، ۲۰۱۷). با این حال مکانیزم خاص جریان نشتی از درون بدنه این نوع سدها، روش طراحی خاصی را نیاز دارد. طراحی سدهای تأخیری پاره‌سنگی شامل سه مرحله است. مرحله اول مکان‌یابی مناسب سد به‌منظور رسیدن به حجم مخزن مناسب است که بتواند پیک سیلاب ورودی را به میزان کافی کاهش دهد تا از خسارت به پایین‌دست جلوگیری کند؛ مرحله بعدی طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی به‌منظور به‌دست‌آوردن ابعاد اولیه سد است و گام نهایی استفاده از ابعاد اولیه سد برای طراحی بهینه است.

تاکنون روش‌های مختلفی برای طراحی سد تأخیری ارائه شده است (آکان، ۱۹۹۰؛ مک‌انرو، ۱۹۹۲؛ آبت و گریگ، ۱۹۷۸؛ وایکوف و سینگ، ۱۹۷۶). از جمله این روش‌ها

می‌توان به روش گرافیکی برای طراحی اولیه سد تأخیری اشاره کرد. آکان و همکاران (۱۹۸۷)، هورن (۱۹۸۷) و آکان (۱۹۸۹) به توسعه روش گرافیکی پرداخته‌اند. فرضی که در این مطالعات شده، این است که رابطه حجم مخزن با عمق آب به‌صورت خطی است. نوع سازه خروجی سد در این مطالعات از نوع تخلیه‌کننده تحتانی منفرد یا دوگانه است و جریان از درون بدنه سد وجود ندارد. روش گرافیکی دیگری که توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) ارائه شده است از دو منحنی به‌منظور طراحی اولیه سد تأخیری استفاده می‌کند (آبت و گریگ، ۱۹۷۸). در دهه ۱۹۹۰ میلادی، آکان (۱۹۹۰) به ارائه روش گرافیکی پرداخت که با استفاده از هیدروگراف ورودی که از روش SCS به‌دست می‌آید، اندازه سازه را به‌دست می‌آورد. در روش دیگر که توسط SCS ارائه شد، از دو منحنی برای طراحی سد تأخیری استفاده می‌شد. یکی از منحنی‌ها نشان‌دهنده نسبت پیک خرجی مخزن به حجم کلی سیلاب است و منحنی دیگر نسبت پیک دبی خروجی به پیک دبی ورودی است (آکان و همکاران، ۱۹۸۷). علاوه بر روش‌های مبتنی بر گراف، یکسری روابط به‌منظور تعیین حجم مخزن سد تأخیری در حالت خروجی آزاد و با توجه به شرایط پایین‌دست و نوع هیدروگراف نیز توسعه داده شده است. یکی از این روابط توسط باکر (۱۹۷۹) ارائه شد که برای حالتی است که هیدروگراف ورودی و خروجی مثلثی باشند. این رابطه در معادله (۱) آورده شده است (مک‌انرو، ۱۹۹۲).

$$\frac{S_f}{V_f} = 1 - \frac{Q_p}{I_p} \quad (1)$$

در این معادله S_f حجم موردنیاز مخزن، V_f حجم سیلاب، Q_p پیک دبی خروجی و I_p پیک دبی هیدروگراف ورودی است. همچنین نسبت S_f به V_f برابر با ضریب ذخیره سیل و نسبت Q_p به I_p به‌عنوان ضریب پیک سیل شناخته می‌شود. رابطه دیگر برای تعیین حجم مخزن سد توسط آبت و گریگ (۱۹۷۸) ارائه شد که معادله آن در زیر آمده است.

$$\frac{S_f}{V_f} = \left(1 - \frac{Q_p}{I_p}\right)^2 \quad (2)$$

معادله بالا برای حالتی است که هیدروگراف ورودی مثلثی و هیدروگراف خروجی ذوزنقه‌ای باشد. رابطه دیگری که توسط وایکوف و سینگ (۱۹۷۶) ارائه شد، براساس نتایج شبیه‌سازی عددی ۵۰ سیل مختلف بود. این ۵۰ سیل مختلف، براساس ۱۰ هیدروگراف متفاوت و ۵ مخزن با

این مطالعات طراحی سدهای پاره‌سنگی مدنظر قرار گرفته است؛ اما بحث پایداری سازه در برابر جریان سیلابی، شکست و قابلیت اعتماد و اطمینان عملکرد سازه بررسی نشده است. با بررسی سوابق تحقیق مشخص می‌شود که کمتر به طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه پرداخته شده و مبحث پایداری سازه و قابلیت اطمینان سازه در طراحی لحاظ نشده است. مبحث اعتمادپذیری و طراحی مهندسی براساس اعتمادپذیری یکی از موضوعات بسیار کاربردی در طراحی سازه‌های آبی است. محققان و مهندسان همواره به دنبال حداقل کردن هزینه طراحی یا به عبارتی ارائه طرح بهینه اقتصادی بوده‌اند. غافل از اینکه این طرح اقتصادی که با کمینه‌کردن یا بهینه‌کردن ابعاد یک طرح به دست می‌آید، ممکن است در اثر وجود عدم قطعیت در پارامترهای طراحی دست‌خوش تغییرات شده و حتی آن طرح را از حالت ایمن خارج کند. مقاله پیش‌رو نیز به بررسی همین عامل در طراحی بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی پرداخته است. در این مقاله نشان داده شده است که چگونه تنها در نظر گرفتن طراحی اولیه باعث عدم تأمین ضرایب ایمنی سد تأخیری پاره‌سنگی شده است. نوآوری این مقاله استفاده از ترکیب مدل شبیه‌ساز و بهینه‌ساز با مدل شبیه‌سازی مونت کارلو برای به دست آوردن اعتمادپذیری در جهت طراحی مبتنی بر اعتمادپذیری سد تأخیری پاره‌سنگی است. همچنین در این مقاله از یک مورد مطالعاتی واقعی به منظور ارائه ایده طراحی مبتنی بر قابلیت اعتماد استفاده شده است. ویژگی دیگر پژوهش حاضر در استفاده از مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز و با لحاظ معادلات جریان غیرداریسی محیط متخلخل و اتصال آن به روش تحلیل عدم قطعیت مونت کارلو به منظور محاسبه اعتمادپذیری و مبحث پایداری سازه است. در مدل بهینه‌ساز با استفاده از رویکرد خودتطبیق، تأمین قیود به صورت خودکار توسط الگوریتم بهینه‌ساز فراهم می‌شود. در این مقاله ابتدا طراحی اولیه سد تأخیری پاره‌سنگی انجام شد و سپس با استفاده از بهینه‌سازی تک‌هدفه، بهینه‌ترین حالت برای طراحی سد تأخیری براساس طراحی اولیه به دست آمد. سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه، طراحی بهینه براساس تحلیل پایداری و اعتمادپذیری انجام و مدل توسعه یافته در مطالعه موردی رودخانه کرگانرود برای کنترل سیل شهر

خروجی‌های مختلف شبیه‌سازی شده بودند.

$$\frac{S_f}{V_f} = \frac{129 \left(1 - \frac{Q_p}{I_p}\right)^{0.753}}{\left(\frac{t_b}{T}\right)^{0.411}} \quad (3)$$

در این معادله t_b و T به ترتیب نشان‌دهنده زمان پایه و زمان رسیدن به پیک هیدروگراف ورودی است. همچنین در رابطه بالا، اثر نوع سازه خروجی در نظر گرفته نشده است. در ادامه، مکاترو (۱۹۹۲) دو رابطه دیگر برای سدهای تأخیری ارائه داد که یکی برای تخلیه‌کننده از نوع سرریز روگذر و دیگری برای تخلیه‌کننده تحتانی از نوع دریچه یا روزنه است. معادلات زیر به ترتیب برای دو حالت تخلیه‌کننده فوق هستند.

$$\frac{S_f}{V_f} = 0.97 - 1.42 \frac{Q_p}{I_p} + 0.82 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^2 - 0.34 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^3 \quad (4)$$

$$\frac{S_f}{V_f} = 0.97 - 1.17 \frac{Q_p}{I_p} + 0.77 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^2 - 0.46 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^3 \quad (5)$$

با توجه به معادلات ارائه شده می‌توان به این نتیجه رسید که در مطالعات قبلی بدنه سد غیرقابل نفوذ فرض شده است و تخلیه توسط سرریز روگذر یا تخلیه تحتانی انجام می‌شود. این در حالی است که با توجه به نفوذپذیر بودن بدنه سدهای تأخیری پاره‌سنگی، این مفروضات با واقعیت سد تأخیری پاره‌سنگی در تعارض است و لازم است مدل طراحی متناسب این نوع سدها تهیه شود (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۹). مطالعات متعددی روی هیدرولیک جریان در سدهای تأخیری پاره‌سنگی انجام شده است، از جمله این موارد روندیابی هیدرولیکی جریان غیرداریسی از درون بدنه سدهای تأخیری پاره‌سنگی (سامانی و همکاران، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴)، مدل‌سازی عددی حجم محدود جریان غیرداریسی از درون بدنه سدهای پاره‌سنگی (سرخوش و همکاران، ۲۰۲۰)، اصلاح رابطه مانینگ برای مقاومت جریان از درون بدنه سدهای پاره‌سنگی (صدقی اصل و رحیمی، ۲۰۱۱)، جریان آشفته از درون بدنه سدهای پاره‌سنگی (صدقی اصل و همکاران، ۲۰۱۴) است که اصول هیدرولیکی جریان از درون بدنه سنگریزه‌ای سدهای پاره‌سنگی را مدنظر قرار داده‌اند و کمتر به اصول و مبانی طراحی این سدها پرداخته شده است. در زمینه طراحی سدهای تأخیری پاره‌سنگی می‌توان به ارائه مدل هیدرولیکی طراحی اولیه سدهای تأخیری پاره‌سنگی توسط ریاحی و همکاران (۲۰۱۹) و طراحی سدهای پاره‌سنگی با استفاده از مدل بهینه‌سازی-شبیه‌سازی توسط نیکو و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد که در هر دوی

هیدروگراف سیل ورودی

یکی از رایج‌ترین معادلاتی که برای مدل‌سازی هیدروگراف سیل ورودی استفاده می‌شود، تابع توزیع احتمال گاما است. این معادله توسط محققان زیادی به‌منظور شبیه‌سازی هیدروگراف سیل استفاده شده است (نش، ۱۹۵۹؛ گری، ۱۹۶۱؛ آکسوی، ۲۰۰۰؛ مچاجسکی و کوستسکی، ۲۰۱۸). همچنین محققان زیادی از این معادله برای به‌دست‌آوردن هیدروگراف واحد استفاده کرده‌اند (نش، ۱۹۵۹؛ گری، ۱۹۶۱؛ بهونیا و همکاران، ۲۰۰۵؛ سینگ، ۲۰۱۴). در زیر معادله pdf تابع توزیع احتمال گاما آمده است (گری، ۱۹۶۱).

$$I = I_p \left(\frac{t}{t_p} \right)^m \exp \left(-m \left(\frac{t}{t_p} - 1 \right) \right) \quad (۶)$$

در معادله بالا I ، m ، t_p و I_p به ترتیب برابر با زمان رسیدن هیدروگراف ورودی به مقدار پیک دبی سیلاب ورودی، ضریب بدون بُعد شکل هیدروگراف، دبی هیدروگراف ورودی و دبی پیک هیدروگراف ورودی است. پارامتر m یکی از پارامترهای مهم در این معادله است. دلیل این اهمیت این است که با افزایش m میزان حجم سیلاب کاهش پیدا می‌کند و شاخه پایین‌رونده هیدروگراف کوتاه‌تر می‌شود و در نتیجه شکل هیدروگراف تیزتر خواهد شد. می‌توان با استفاده از معادله (۶) و با انتگرال‌گیری از روی زمان، حجم سیل را به‌دست آورد:

$$V_f = I_p t_p m^{-(m+1)} \exp(m) \Gamma(m+1) \quad (۷)$$

در معادله بالا V_f و Γ به ترتیب حجم سیلاب و تابع گاما است.

رابطه حجم-ارتفاع مخزن

رابطه سطح-ارتفاع مخزن برای $H > 0$ به‌صورت زیر است:

$$A = k(H + z_0)^n \quad (۸)$$

در معادله بالا A برابر با مساحت سطح آب در مخزن و k ، z_0 ضرایب شکل مخزن هستند و n نیز شیب دیواره مخزن است که بین ۱ تا ۲ متغیر است. رابطه حجم-ارتفاع مخزن که از ترکیب معادله (۸) و معادله $A = dS/dh$ به‌دست می‌آید به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$S = \frac{k}{n+1} [(H + z_0)^{n+1} - z_0^{n+1}] \quad (۹)$$

در این معادله، S حجم مخزن و H ارتفاع آب در مخزن است.

تالش استفاده شد. برای محاسبه شاخص اعتمادپذیری از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شد. در این مقاله، انجام بهینه‌سازی دودنه با استفاده از الگوریتم جدید بهینه‌ساز ژنتیک چندهدفه خود تطبیق انجام شد.

مواد و روش‌ها

هدف اصلی تحقیق حاضر، طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد سد تأخیری پاره‌سنگی است. بدین‌منظور در گام اول یک طرح اولیه با استفاده از ترکیب معادلات (۷)، (۹)، (۱۰) و (۱۳) برای به‌دست‌آوردن V_f ، H_1 ، L و S_f استفاده شد. سپس از ابعاد به‌دست‌آمده از این طرح اولیه به‌عنوان کران پایین در الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده و در نهایت یک جبهه پارتو از جواب‌های امکان‌پذیر برای طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی به‌دست می‌آید.

مطالعه موردی

رودخانه مورد مطالعه در این تحقیق، رودخانه کرگانرود است که در غرب استان گیلان و در شهرستان تالش واقع شده است و یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های این استان است. رودخانه کرگانرود همه‌ساله به‌دلیل بارندگی‌های شدید، هندسه رودخانه، شیب زیاد حوضه و ساخت‌وسازهای زیادی که در بستر رودخانه انجام شده است، با سیلاب‌های متعددی روبه‌رو می‌شود و خسارات مالی و جانی زیادی را در پی دارند. این رودخانه از به هم پیوستن رودخانه‌های کوچکی به‌وجود می‌آید. در این حوضه ایستگاه هیدرومتری ماشین‌خانه بر شاخه اصلی رودخانه کرگانرود در ارتفاع ۱۵۲ متری در سال ۱۳۳۶ احداث شده که تا به امروز فعال و در حال بهره‌برداری است. شکل ۱ حوضه رودخانه کرگانرود را نشان می‌دهد. بررسی اطلاعات هیدرومتری رودخانه در سال‌های ۱۳۳۶ تا ۱۳۶۹ در ایستگاه ماشین‌خانه نشان می‌دهد که حداقل دبی رودخانه ۲۰ مترمکعب در ثانیه و حداکثر دبی ۲۸۹ مترمکعب در ثانیه و دبی متوسط ۵۸/۵ مترمکعب در ثانیه است.

معادلات و قیود طراحی سدهای تأخیری پاره‌سنگی

در این قسمت به‌صورت خلاصه معادلات حاکم و همچنین ضرایب اطمینان به‌منظور طراحی سدهای تأخیری پاره‌سنگی ارائه شده است.

دبی اشل سد تأخیری پاره‌سنگی

سدهای تأخیری پاره‌سنگی از مواد متخلخل درشت ساخته شده است. از این جهت برای تعیین جریان از درون بدنه این سدها از رابطه قانون داری و جریان آشفته غیرخطی استفاده می‌شود. رابطه تحلیلی دبی اشل سد تأخیری پاره‌سنگی توسط سامانی و همکاران (۲۰۰۳) ارائه شده است. این معادله از ترکیب معادله جریان غیرداری در محیط درشت‌دانه سنگدانه‌ای با معادلات پیوستگی و معادلات مقاومت جریان غیرخطی به دست آمده است که به صورت زیر است (سامانی و همکاران، ۲۰۰۳).

$$Q = W \left[\frac{H_1^{b+3} - H_2^{b+3}}{L - 0.7H_1 \cot \theta} \times \frac{1}{a(b+3)} \right]^{\frac{1}{b+2}} \quad (10)$$

در معادله بالا α به صورت زیر است:

$$\alpha = \frac{a(a-\sigma)^{b-1}}{2gvbn_p^{b+1}} \quad (11)$$

در معادله بالا a و b ضرایب ثابت هستند، d اندازه مصالح بدنه سد، σ انحراف معیار اندازه مصالح بدنه سد، g شتاب ثقل، n_p تخلخل مصالح، v گرانروی سیال، L طول سد در جهت جریان، W طول سد در جهت عمود جریان، H_1 عمق آب در سراب، H_2 عمق آب در پایاب و θ زاویه شیب وجوه سراب و پایاب سد است. مقادیر بهینه a و b با استفاده از بهینه‌سازی به ترتیب ۵۴ و -0.077 به دست آمده است (سامانی و همکاران، ۲۰۰۳).

روندیابی جریان در سدهای تأخیری پاره‌سنگی

با ترکیب معادلات (۶) تا (۱۱) با معادله پیوستگی $\left(\frac{dS}{dt} = I - Q\right)$ می‌توان به یک معادله دیفرانسیل معمولی غیرخطی حاکم بر جریان در سدهای تأخیری پاره‌سنگی رسید که به صورت زیر است.

$$\frac{dS}{dt} = I_p \left(\frac{t}{t_p}\right)^m \exp\left(-m\left(\frac{t}{t_p} - 1\right)\right) - \left(W \left(\frac{\alpha}{b+3}\right)^{\frac{1}{b+2}} \left(\frac{\left((A_0S + A_0)^{\frac{1}{n+1}} - Z_0\right)^{b+3} - H_2^{b+3}}{L - A_2 \left((A_0S + A_1)^{\frac{1}{n+1}} - Z_0\right)}\right)^{\frac{1}{b+2}}\right) \quad (12)$$

۳۶۰۰۰ شبیه‌سازی انجام شد و در نهایت یک فرمول کاربردی ساده برای طراحی سدهای تأخیری پاره‌سنگی ارائه داده شد که در زیر آمده است (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۹).

در این معادله S_f حجم مخزن مورد نیاز و Q_p دبی پیک هیدروگراف خروجی است.

$$\frac{S_f}{V_f} = 1.0166 - 0.231 \frac{Q_p}{I_p} - 2.2433 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^2 + 1.4661 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^3 \quad (13)$$

به دست آوردن مقادیر H و L به ترتیب از معادلات (۹) و (۱۰) استفاده کرد. حال برای به دست آوردن پایداری سد تأخیری طراحی شده می‌توان از معادلاتی که در قسمت بعد ارائه خواهد شد، استفاده کرد.

پایداری سازه‌ای و ضرایب اطمینان سد پاره‌سنگی

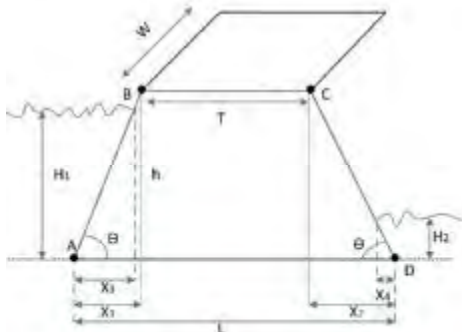
نیروهای وارد بر سد تأخیری پاره‌سنگی

در این قسمت نیروهای وارد بر سد تأخیری پاره‌سنگی و ممان هریک از این نیروها با فرض اینکه سازه به صورت یک جسم صلب عمل می‌کند، بررسی می‌شود. شماتیک سد تأخیری پاره‌سنگی در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این شکل نقطه D ، پنجه سد است. هریک از نیروهای وارد بر سد را می‌توان به دو دسته افقی و قائم تقسیم‌بندی

مطابق با این معادله، حجم آب ذخیره‌شده در مخزن تابع غیرخطی از حجم مخزن، عمق آب در پایاب و عمق آب در سراب است. برای حل این معادله می‌توان از روش تکرار استفاده کرد. در تحقیقی که توسط ریاحی و همکاران (۲۰۱۹) انجام شد، با تحلیل پارامتریک روی محدوده وسیعی از پارامترهای $m, n, Z_0, k, I_p, t_p, d, L, \theta, S$ تعداد

روند طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی

در این قسمت به صورت خلاصه روند طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی بیان شده است. بدین‌منظور بعد از تعیین مقادیر اولیه مانند دبی پیک هیدروگراف خروجی (Q_p) ، عمق آب در پایاب (H_2) ، اندازه مصالح بدنه سد (d) ، انحراف معیار اندازه مصالح بدنه سد (σ) ، شتاب ثقل (g) ، تخلخل مصالح (n_p) ، گرانروی سیال (v) ، طول سد در جهت عمود جریان (W) ، دبی پیک هیدروگراف ورودی (I_p) ، زمان رسیدن هیدروگراف به پیک (t_p) ، ضریب بدون بُعد هیدروگراف (m) ، ضرایب ثابت مخزن (n, k, Z_0) ، ضرایب ثابت (a, b) و زیادیه شیب دیواره سد (θ) می‌توان ابتدا از معادله (۷) به منظور به دست آوردن V_f استفاده کرد سپس S_f از معادله (۱۳) تعیین شود و در نهایت برای

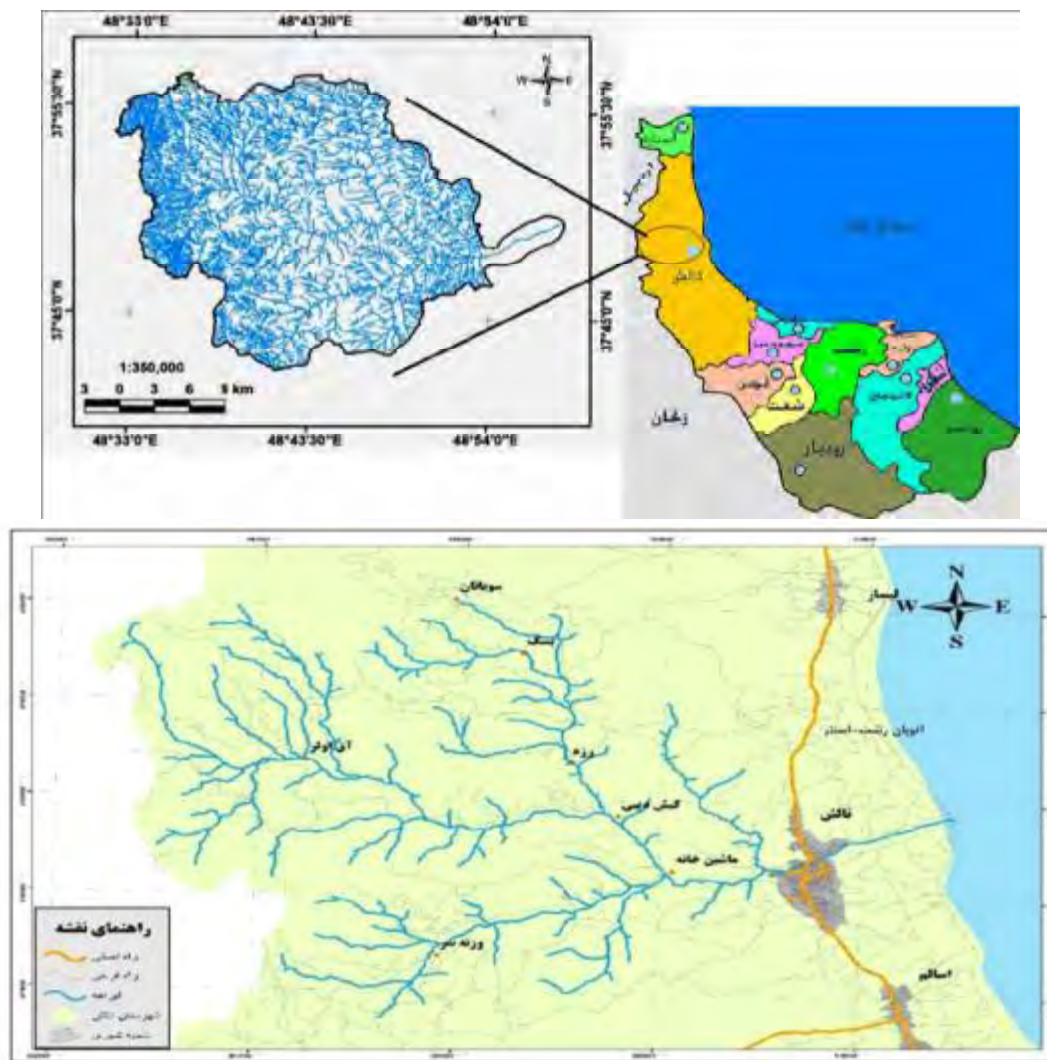


شکل ۲- مقطع سد تأخیری پاره‌سنگی و ابعاد آن

کرد. حال هریک از این نیروهای افقی و عمودی می‌توانند عامل واژگون‌کننده یا مقاوم باشند. جدول ۱ به شرح کامل این نیروها پرداخته است و معادلات هریک و نحوه اثر هر نیرو آورده شده است.

ضرایب اطمینان سد تأخیری پاره‌سنگی

در این قسمت با استفاده از نیروها و ممان‌های ارائه‌شده در جدول ۱، ضرایب ایمنی سد تأخیری پاره‌سنگی به‌دست آورده شده است. فرمول‌های ضرایب ایمنی سد و حدود مجاز هریک در ادامه ارائه شده‌اند (پونمیا، ۱۹۹۲؛ کشیرساگار، ۲۰۱۴؛ دپی‌کیا و سوریبابو، ۲۰۱۵؛ ریاحی و همکاران، ۲۰۲۲؛ مرادی‌کیا و همکاران، ۲۰۲۲).



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز و شبکه هیدروگرافی رودخانه کرگانرود (عابدینی و فتیحی، ۲۰۱۶)

جدول ۱- نیروهای وارد بر سد و ممان هریک

شماره	فرمول	توضیح	نوع نیرو از نظر جهت		واژگون کننده	مقاوم
			عمودی	افقی		
۱	$F_1=1/2*\gamma_w*H_1^2$	نیروی فشار افقی آب در سراب		*	*	
۲	$M(F_1)=F_1*H_1/3$	ممان نیروی افقی آب سراب نسبت به پنجه سد (D)				
۳	$F_2=1/2*\gamma_w*H_1*X_3$	نیروی عمودی آب سراب	*			*
۴	$M(F_2)=F_2*(L-(X_3/3))$	ممان نیروی عمودی آب سراب نسبت به پنجه سد (D)				
۵	$F_3=1/2*\gamma_w*H_2^2$	نیروی افقی آب در پایاب		*		*
۶	$M(F_3)=F_3*H_2/3$	ممان نیروی افقی آب پایاب نسبت به پنجه سد (D)				
۷	$F_4=1/2*\gamma_w*H_2*X_4$	نیروی عمودی آب پایاب	*			*
۸	$M(F_4)=F_4*X_4/3$	ممان نیروی عمودی آب پایاب نسبت به پنجه سد (D)				
۹	$W_1=1/2*\gamma_s*X_1*h$	وزن قسمت شماره ۱ سد (W_1)	*			*
۱۰	$M(W_1)=W_1*(L-(2*X_1/3))$	ممان وزن W_1 نسبت به پنجه سد				
۱۱	$W_2=1/2*\gamma_c*T*h$	وزن قسمت شماره ۲ سد (W_2)	*			*
۱۲	$M(W_2)=W_2*(L-T/2-X_1)$	ممان وزن W_2 نسبت به پنجه سد				
۱۳	$W_3=1/2*\gamma_c*X_2*h$	وزن قسمت شماره ۳ سد (W_3)	*			*
۱۴	$M(W_3)=W_3*(2*X_2/3)$	ممان وزن W_3 نسبت به پنجه سد				
۱۵	$U=1/2*\gamma_w*L*(H_1+H_2)$	نیروی زیر فشار U	*		*	
۱۶	$M(U)=U*(2*L/3)$	ممان نیروی زیر فشار نسبت به پنجه				
۱۷	$F_{e1}=s*W_1$	نیروی استاتیکی زلزله W_1		*	*	
۱۸	$M(F_{e1})=F_{e1}*1/3*h$	ممان نیروی استاتیکی زلزله W_1				
۱۹	$F_{e2}=s*W_2$	نیروی استاتیکی زلزله W_2		*	*	
۲۰	$M(F_{e2})=F_{e2}*1/2*h$	ممان نیروی استاتیکی زلزله W_2				
۲۱	$F_{e3}=s*W_3$	نیروی استاتیکی زلزله W_3		*	*	
۲۲	$M(F_{e3})=F_{e3}*1/2*h*(L-X_1-T)/(L-X_1)$	ممان نیروی استاتیکی زلزله W_3				
۲۳	$\beta=am(X_1/h)$	زاویه ضلع منتهی به پاشنه سد (A) با خط قائم بر حسب درجه				
۲۴	$Cm=0.73*(90-\beta)/90$	ضریب Cm برای محاسبه نیروی دینامیکی سد				
۲۵	$Pe=\gamma_w*Cm*H_1*a$	ضریب Pe برای محاسبه نیروی دینامیکی سد				
۲۶	$Fe=0.726*pe*H_1$	نیروی دینامیکی زلزله		*	*	
۲۷	$Me=0.299*pe*H_1^2$	ممان نیروی دینامیکی زلزله نسبت به پنجه سد D				
۲۸	$W=W_1+W_2+W_3$	وزن کل سد	*			*

ضریب اطمینان در برابر واژگونی

۱/۵ باشد، در این حالت سد در برابر واژگونی مقاوم است.

برای سد پاره سنگی رابطه ضریب اطمینان در برابر واژگونی به صورت زیر آمده است.

$$SFO = \frac{Me(R)}{Me(O)} \quad (14)$$

مجموع ممان‌های مقاوم نسبت به پنجه سد به مجموع ممان‌های واژگونی نسبت به پنجه سد برابر با ضریب اطمینان در برابر واژگونی است. اگر این نسبت بزرگتر از

۱. مدل شبیه‌ساز: این مدل دربرگیرنده معادلات (۷)، (۱۳)، (۹) و (۱۰) به‌منظور طراحی سد و به‌دست‌آوردن V_f ، s_f ، H و L است که عملکرد سد تأخیری پاره‌سنگی را شبیه‌سازی می‌کند.

۲. محاسبه معیار اعتمادپذیری: این گام محاسباتی به‌منظور محاسبه اعتمادپذیری در طراحی سد تأخیری ایجاد شده است. برای به‌دست‌آوردن مقادیر ضرایب اطمینان از معادلات (۱۴) تا (۲۰) می‌توان استفاده کرد که به‌ترتیب مقادیر SFO، SFS و SFF را به‌دست می‌آورد. همچنین نیروها و ممان‌هایی که برای محاسبه این ضرایب مورد نیاز است در جدول ۱ آمده است.

۳. الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه خودتطبیق: این الگوریتم عهده‌دار تعیین پاسخ‌های بهینه است؛ به‌صورتی که هزینه را کمینه و اعتمادپذیری را در طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی بیشینه می‌کند.

در ادامه هریک از موارد مطرح‌شده به‌صورت جداگانه بررسی خواهند شد.

طراحی بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی

در این قسمت مدل توسعه داده شده برای بهینه‌سازی چندهدفه سد تأخیری پاره‌سنگی آمده است. بهینه‌سازی سد تأخیری پاره‌سنگی به‌منظور کمینه‌کردن هزینه‌های اجرا و تأمین ضرایب اطمینان و همچنین بیشینه‌کردن اعتمادپذیری با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه خودتطبیق انجام شد. اولین تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه سد تأخیری پاره‌سنگی، کمینه‌کردن هزینه اجراست که در زیر آمده است.

$$\text{Minimize } C = A_{DRD} \times \gamma_s \quad (21)$$

در معادله بالا، γ_s وزن مخصوص مصالح سنگی به‌کاررفته در سد تأخیری پاره‌سنگی و A_{DRD} سطح مقطع سد تأخیری پاره‌سنگی است. الگوریتم بهینه‌سازی به‌منظور به‌دست‌آوردن بهینه‌ترین مقطع سد تأخیری پاره‌سنگی استفاده می‌شود. در نتیجه متغیرهای تصمیم‌گیری و متغیرهای ورودی در مسئله بهینه‌سازی، مقاطع سد تأخیری پاره‌سنگی هستند که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند و در زیر آمده‌اند.

$$X = [x_1, x_2, T, h] \quad (22)$$

که $Me(O)$ و $Me(R)$ در زیر آمده است.

$$Me(R) = M(W_1) + M(W_2) + M(W_3) + M(F_2) + M(F_3) + M(F_4) \quad (15)$$

$$Me(O) = M(F_1) + M(U) + M(F_{e1}) + M(F_{e2}) + M(F_{e3}) + Me \quad (16)$$

ضریب اطمینان در برابر لغزش

ضریب اطمینان در برابر لغزش برابر با نسبت مجموع نیروهای عمودی به مجموع نیروهای افقی است. اگر ضریب اطمینان در برابر لغزش بزرگ‌تر از $1/5$ باشد، در این حالت سد تأخیری پاره‌سنگی در برابر لغزش پایدار است. در ادامه فرمول ضریب اطمینان در برابر لغزش آمده است.

$$SFS = \frac{\mu F_V}{F_H} \quad (17)$$

که مقادیر F_H و F_V در زیر آمده است.

$$F_V = F_2 + F_4 + W_1 + W_2 + W_3 - U \quad (18)$$

$$F_H = F_1 - F_3 + F_{1e} + F_{2e} + F_{3e} + F_e \quad (19)$$

همچنین μ برابر با ضریب اصطکاک استاتیکی است که تقریباً برابر با 0.77 است.

ضریب اطمینان در برابر اصطکاک

نسبت مجموع نیروی عمودی و تنش برشی مجاز فونداسیون سد پاره‌سنگی به مجموع نیروی افقی برابر با ضریب اطمینان در برابر اصطکاک است. برای ایمنی سد در برابر اصطکاک باید مقدار این ضریب بزرگ‌تر از ۳ باشد. که در این معادله q تنش برشی مجاز مواد در سطح برش است.

$$SFF = \frac{\mu F_V + qL}{F_H} \quad (20)$$

بهینه‌سازی و طراحی مبتنی بر قابلیت اعتماد سد تأخیری پاره‌سنگی

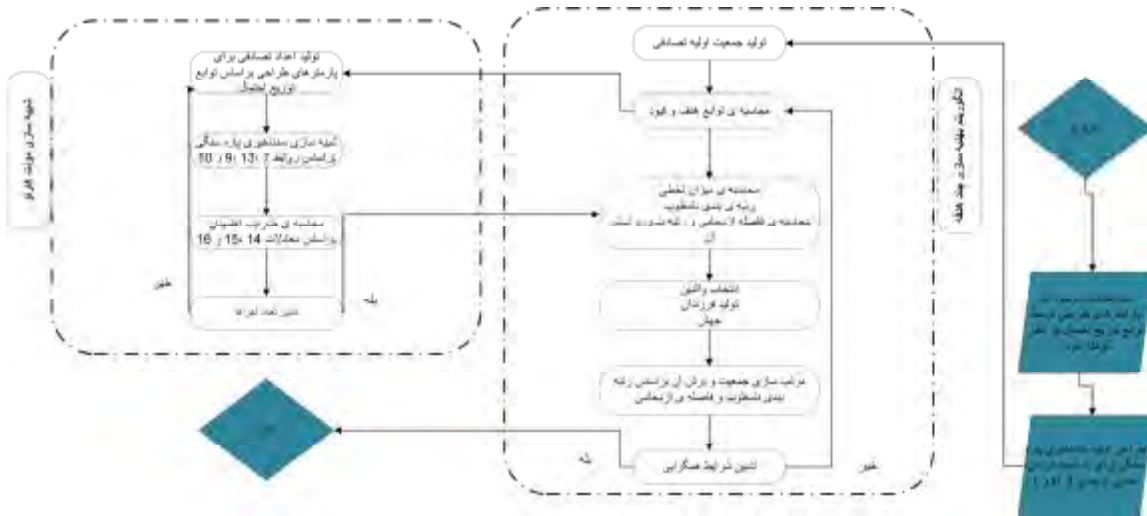
در این قسمت به ارائه روش طراحی و بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر قابلیت اعتماد سد تأخیری پاره‌سنگی پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، برای طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد سه هسته اصلی وجود دارد که در زیر به‌صورت خلاصه هرکدام توضیح داده می‌شوند.

در معادله (۲۴) مقادیر H_1' و L' به ترتیب طول اولیه و ارتفاع اولیه سد هستند که از طراحی اولیه به دست می‌آیند. یکی از مزیت‌های طراحی اولیه سد تأخیری پاره‌سنگی محدود کردن فضای جست‌وجوی الگوریتم است که باعث افزایش سرعت الگوریتم برای رسیدن به جواب بهینه می‌شود. دومین تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی سد تأخیری پاره‌سنگی، اعتمادپذیری است که در ادامه شرح داده شده است.

$$\begin{aligned} \text{Input parameters} \\ = [Q_p, I_p, t_p, \theta, W, H_2, n, a, b, \\ k, z_0, d, \sigma, m, \gamma_s, \gamma_w, v, n_p] \end{aligned} \quad (23)$$

پارامترهای x_1, x_2, T و h در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. قیود مسئله بهینه‌سازی سد تأخیری پاره‌سنگی، تأمین ضرایب اطمینان و همچنین مقاطع سد است که از طراحی اولیه به دست می‌آیند. قیود ضرایب اطمینان و قیود مقاطع سد در زیر آورده شده‌اند.

$$\begin{aligned} SFO \geq 1.5, SFS \geq 1.5, SFF \geq 3 \\ H_1 \geq H_1', L \geq L' \end{aligned} \quad (24)$$



شکل ۳- فلوچارت بهینه‌سازی طراحی مبتنی بر قابلیت اعتماد

بر اساس تابع جرم احتمال متغیرهای تصادفی به صورت زیر نوشت (نواک و کولینس، ۲۰۱۲؛ رشکی، ۲۰۱۸).

$$R = \int_{G(X) > 0} f_x(X) dx \quad (26)$$

در معادله بالا f_x بیان‌کننده تابع جرم احتمال متغیرهای تصادفی است. به دست آوردن مقدار R به دلیل پیچیدگی تابع چگالی احتمال به خصوص برای مواردی که توزیع‌های احتمالاتی غیرنرمال باشند، سخت است؛ بنابراین از روش‌های نمونه‌برداری بدین‌منظور استفاده می‌شود. یکی از روش‌های کارآمد برای محاسبه اعتمادپذیری، روش شبیه‌سازی مونت کارلو است.

شبیه‌سازی مونت کارلو

روش شبیه‌سازی مونت کارلو به دلیل سادگی و مدل‌سازی آسان بسیار مورد استفاده محققان قرار گرفته است. این روش اولین بار توسط متروپولیس و یولیام (۱۹۴۹) ارائه

محاسبه اعتمادپذیری

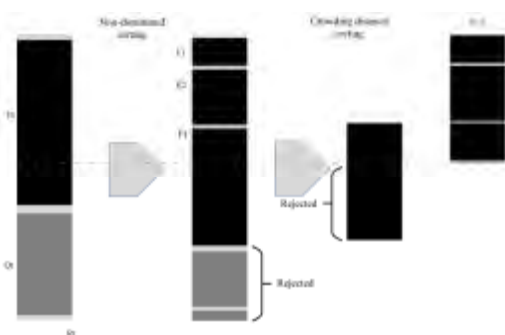
اعتمادپذیری یک سیستم هیدرولیکی به احتمال پایداری آن سیستم در برابر بارهای وارده^۱ بیان می‌شود (می، ۲۰۱۰)؛ از این‌رو اعتمادپذیری را می‌توان به‌عنوان مبثی از آمار و احتمالاتی در نظر گرفت. رابطه ریاضی اعتمادپذیری را می‌توان به صورت زیر بیان کرد (می، ۲۰۱۰).

$$R = P(G(X) > 0) = P(r > l) \quad (25)$$

در معادله بالا R نشان‌دهنده اعتمادپذیری، P نشان دهنده احتمال، $G(X)$ بیان‌کننده تابع حالت بین ایمنی و شکست، X برابر با $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ است که نشان‌دهنده متغیرهای تصادفی، r و l به ترتیب بیان‌کننده پایداری و بار وارده بر سیستم است. می‌توان معادله (۲۵) را

1- Resistance
2- loading

۴. محاسبه میزان تخطی هر عضو از جمعیت از مقادیر قیود
۵. رنک‌بندی جمعیت براساس رتبه‌بندی غیرمغلوب
۶. اندازه‌گیری معیار فاصله ازدحامی برای همه جمعیت
۷. انتخاب والدین
۸. تولید فرزندان
۹. جهش
۱۰. انتخاب جمعیت براساس رتبه‌بندی غیرمغلوب و فاصله ازدحامی
۱۱. اگر شرایط خاتمه برقرار نشده باشد، الگوریتم به گام ۳ برمی‌گردد و محاسبات دوباره انجام می‌گیرد.



شکل ۴- شماتیک الگوریتم ژنتیک مورد استفاده

الگوریتمی که در این پژوهش استفاده شده است، الگوریتم ژنتیک چندهدفه خودتطبیق است. این الگوریتم براین اساس است که به‌جای استفاده از تابع جریمه برای اعمال قیود از مکانیزم خودتطبیقی با تغییر در فرایند انتخاب والدین استفاده شد. در این الگوریتم انتخاب والدین با استفاده از روش چرخ گردان انجام می‌شود. این کار بدین‌صورت انجام می‌گیرد که ابتدا تخطی اعضای جمعیت محاسبه می‌شود و سپس اعضای جمعیت دوبار مرتب می‌شوند. ابتدا اعضای جمعیت از کوچک به بزرگ براساس تابع هدف مرتب می‌شوند. سپس اعضای جمعیت براساس تخطی‌شان مرتب می‌شوند به‌گونه‌ای که هرچه تخطی کمتر داشته باشند، در رنک بالاتر قرار می‌گیرند. حال بعد از مرتب‌سازی جمعیت، به اعضای جمعیت یک احتمال انتخاب نسبت داده می‌شود. این احتمال انتخاب براساس مرتب‌سازی است که صورت گرفته است. سپس برای انتخاب هر والد دوبار از روش چرخ گردان استفاده می‌شود و دو کروموزوم x و y انتخاب می‌شوند. از بین دو

شد. در این روش از توابع چگالی احتمال پارامترهای ورودی به‌منظور تولید اعداد تصادفی استفاده می‌شود. تولید اعداد تصادفی به تعداد زیاد انجام می‌گیرد. سپس مدل براساس پارامترهای تصادفی تولیدشده اجرا می‌شود و از خروجی‌های به‌دست‌آمده می‌توان میزان اعتمادپذیری مدل را محاسبه کرد. روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو یک روش عددی^۱، بر پایه نمونه‌برداری^۲ و روش غیراختلالی است (رجبی و همکاران، ۲۰۱۵). در ادامه معادله روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو بر پایه احتمال ایمنی^۳ آمده است.

$$p_R = \int \dots \int I[G(X) > 0] f_x(X) dx \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n_s} I[G(X) > 0] \approx \frac{n_s}{N} \quad (27)$$

در معادله بالا n_s تعداد نمونه‌های قرارگرفته در ناحیه ایمن، N تعداد کل نمونه‌های تولیدشده و I تعداد تابع شمارنده^۴ است که اگر در ناحیه ایمن باشد، مقدار یک و اگر در ناحیه شکست^۵ باشد، مقدار صفر می‌گیرد. حال می‌توان با استفاده از دو تابع ۱۷ و ۲۲ و همچنین متغیرهای ورودی و تصمیم‌گیری که در معادله ۱۸ آمده است و بهره‌گرفتن از قیود مسئله بهینه‌سازی که در معادله ۱۹ آمده است، بهینه‌سازی چندهدفه سد تأخیری پاره‌سنگی را انجام داد.

بهینه‌سازی چندهدفه سد تأخیری پاره‌سنگی

در این پژوهش بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم NSGA-II انجام می‌گیرد. این الگوریتم، توسعه‌یافته الگوریتم NSGA است که توسط دب و همکاران (۲۰۰۲) ارائه شده است. در شکل ۴ روند الگوریتم NSGA-II نشان داده شده است (دب و همکاران، ۲۰۰۲؛ لین و یی، ۲۰۱۲).

به‌طور خلاصه گام‌های الگوریتم ژنتیک را می‌توان به‌صورت زیر برشمرد (ریاحی و بهرامی‌چگنی، ۲۰۲۲):

۱. تنظیم پارامترهای الگوریتم مانند تعداد جمعیت اولیه، تعداد تکرار، نرخ جهش و...

۲. تولید جمعیت اولیه به‌صورت کاملاً تصادفی براساس محدوده باندهای اعلام‌شده

۳. ارزیابی تابع هدف برای جمعیت

1- Numerical method
2- Sampling-based
3- Safety
4- COUNTER FUNCTION
5- FAILURE

معادلات (۲۲) و (۲۳) آورده شده است و قیود مسئله نیز معادله (۲۴) است.

برای هرکدام از حالت‌های سد تأخیری پاره‌سنگی ۱۰ مرتبه بهینه‌سازی انجام می‌شود که از بین این ۱۰ اجرا، بهینه‌ترین خروجی در جدول ۴ آمده است. همچنین خروجی هر ۱۰ اجرا برای همه حالات سد تأخیری در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که از جدول ۴ مشخص است، با افزایش مقدار زاویه سد، ارتفاع سد کم شده و مقدار طول آن افزایش می‌یابد. همچنین از مقادیر ضرایب اطمینان کاملاً مشخص است، همه ضرایب اطمینان مقادیر حداقل را رعایت کرده‌اند. نکته ارزشمند درباره ضرایب اطمینان این است که بحرانی‌ترین مقدار برای ضرایب اطمینان، مقدار SFO است که اگر این مقدار تأمین شود، مابقی ضرایب اطمینان نیز تأمین خواهند شد. از بین چهار حالت سد تأخیری پاره‌سنگی، بهینه‌ترین حالت زمانی است که زاویه ۸۰ درجه باشد که در این حالت هزینه حدود ۲۰ درصد از بقیه حالات کمتر است.

عدم قطعیت پارامترهای ورودی مدل

در جدول ۵ پارامترهای ورودی به همراه دسته‌بندی، واحد، انحراف معیار، نوع توزیع و مقدار میانگین برای هرکدام از پارامترها آورده شده است. از سه نوع تابع توزیع احتمال برای مدل‌سازی احتمالاتی عدم قطعیت استفاده شده است. تابع توزیع یکنواخت، تابع توزیع گوسین و تابع توزیع مقادیر حدی توزیع یافته، سه تابع توزیع احتمال به‌کاررفته در این تحقیق هستند. برای مدل‌سازی عدم قطعیت در مقادیر پارامترهای حدی مانند مقادیر حداکثر دبی هیدروگراف ورودی، حداکثر مقدار زمان رسیدن هیدروگراف به پیک و حداکثر مقدار دبی هیدروگراف خروجی، از تابع توزیع احتمال مقادیر حدی توزیع یافته و برای مدل‌سازی عدم قطعیت ضرایب ثابت از توزیع گوسین و از توزیع یکنواخت به‌عنوان توزیعی برای مصالح استفاده شد. برای شناسایی عدم قطعیت با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو باید از مدل تعداد زیادی خروجی گرفته شود. بدین‌منظور برای پارامترهای ورودی براساس نوع توزیع احتمالاتی که برای هرکدام در نظر گرفته شده است، ۱۰۰۰۰۰ سری مقدار اولیه برای هرکدام از متغیرهای ورودی تولید می‌شود، سپس هر سری از این

کروموزوم، کروموزوم x به‌عنوان والد انتخاب می‌شود اگر یکی از حالات زیر اتفاق بیافتد:

- اگر x امکان‌پذیر باشد^۱ و y غیرشدنی^۲ باشد.
- اگر هر دوی x و y غیرشدنی باشند، اما مقدار تخطی x از y کمتر باشد.
- اگر هر دوی x و y شدنی باشند و مقدار هزینه x از y کمتر باشد.
- اگر موارد بالا اتفاق نیافتد، y به‌عنوان والد انتخاب می‌شود.

نتایج و بحث

طراحی اولیه سد تأخیری پاره‌سنگی

در این قسمت برای بررسی مدل ارائه‌شده از مثالی که در تحقیق ریاحی و همکاران (۲۰۱۹) آمده است، استفاده شده است. همچنین برای بررسی حالات مختلف، شیب دیواره‌های سد از چهار مقدار مختلف θ که برابر با ۹۰، ۸۰، ۷۵ و ۷۰ درجه است، استفاده شد. پارامترهای به‌کار رفته در این مثال در جدول ۲ آمده است. می‌توان از پارامترهای موجود در جدول ۲ و جای‌گذاری آن‌ها در معادلات (۷) به‌منظور به‌دست‌آوردن V_f ، در معادله (۱۳) برای به‌دست‌آوردن S_f ، در معادله (۹) برای به‌دست‌آوردن آب پشت سد (H_i)، در معادله (۱۰) برای به‌دست‌آوردن طول سد (L) و معادلات (۱۴) تا (۲۰) برای به‌دست‌آوردن SFO، SFS و SFF استفاده کرد. اگر همین طرح اولیه مبنای اجرای سازه سد قرار گیرد، باید ارتفاع سد (H) از ارتفاع آب پشت سد (H_i) بیشتر یا مساوی شود. برای هریک از طرح‌های اولیه مقادیر ضرایب اطمینان SFS، SFO و SFF نیز محاسبه شده‌اند. همان‌طور از جدول ۳ اولیه قابل‌مشاهده است، هیچ‌یک از طرح‌های اولیه نتوانسته‌اند ضرایب اطمینان SFO و SFS را تأمین کنند. حال با استفاده از بهینه‌سازی تک‌هدفه هریک از طرح‌های اولیه به بهینه‌ساز داده می‌شوند تا الگوریتم بهینه‌ساز، طرحی را براساس این طرح‌های اولیه به‌دست آورد که دارای کمینه هزینه است و درعین‌حال ضرایب اطمینان در آن‌ها تأمین شده است. معادله هدف در این مسئله، معادله (۲۱) و متغیرهای تصمیم‌گیری و متغیرهای ورودی در

سری داده می‌شود. سپس براساس معادله (۲۷) مجموع کل اجرایی که مقدار آن‌ها ۱ شده است، به تعداد ۱۰۰۰۰۰ که همان تعداد کل اجراها یا سری داده‌های تولید شده بود، تقسیم می‌شود و اعتمادپذیری سد تأخیری پاره‌سنگی به دست می‌آید و خروجی‌های مورد نیاز گرفته می‌شوند.

مقادیر به ترتیب به معادلات (۷)، (۱۳)، (۹) و (۱۰) به منظور به دست آوردن V_f ، d_f و H و L داده می‌شود. بعد از به دست آوردن مقادیر سد، برای به دست آوردن ضرایب اعتمادپذیری از معادلات (۱۴) تا (۲۰) استفاده می‌شود. اگر ضرایب اطمینان قیود مورد نظر در معادله (۲۴) را تأمین کرد مقدار یک و در غیر این صورت مقدار 0 به آن

جدول ۲- مقادیر مورد استفاده برای طراحی اولیه سد تأخیری پاره‌سنگی

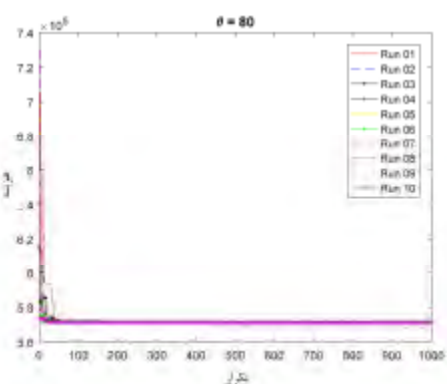
متغیرها	b	a	n	k	z_0	m	t_p	Q_p	I_p
مقادیر	-۰/۰۷۷	۵۴	۲	۱۱۰۰۰	0	۱۰	۳۶۰۰	۱۱	۲۸
متغیرها	θ_4	θ_3	θ_2	θ_1	w	n_p	σ	d	v
مقادیر	۷۰	۷۵	۸۵	۹۰	۲	۲	0	۰/۲۵	۰/۰۰۰۰۰۱

جدول ۳- خروجی طراحی اولیه برای انواع مختلف سد تأخیری پاره‌سنگی

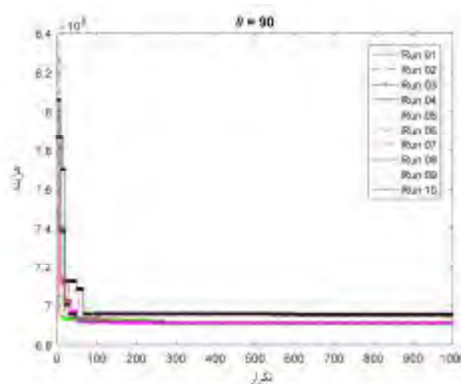
	طول (متر)	ارتفاع (متر)	SFS	SFF	SFO	θ
θ_1	۳/۴۸۴۳	۴/۷۷۸۵	۱/۰۲۷۴	۳/۵۵۶۷	۱/۱۲۷۶	θ_1
θ_2	۳/۹۹۱۵	۴/۷۷۸۵	۱/۲۴۳۳	۴/۰۶۹۶	۱/۰۰۳۹	θ_2
θ_3	۴/۲۸۲۶	۴/۷۷۸۵	۱/۳۵۷۳	۴/۳۴۷۵	۱/۳۱۸۶	θ_3
θ_4	۴/۶۱۶۸	۴/۷۷۸۵	۱/۴۷۶۹	۴/۶۴۳۶	۱/۳۱۱۲	θ_4

جدول ۴- بهینه‌ترین خروجی بهینه‌سازی تک‌هدفه برای انواع مختلف سد تأخیری پاره‌سنگی

	طول (متر)	ارتفاع (متر)	هزینه	SFS	SFF	SFO	θ
θ_1	۴/۳۵۱۳	۵/۸۸۱۷	۶۹۱۰۰۰	۱/۵۷۲۷	۴/۳۹۹۴	۱/۵	θ_1
θ_2	۴/۷۲۵۶	۵/۶۴۵۷	۵۶۸۵۹۲	۱/۶۸۶۳	۴/۷۳۸۸	۱/۵	θ_2
θ_3	۵/۹۲	۵/۰۸۴۰	۶۲۵۶۳۲	۱/۷۷۶۷	۵/۴۵۸۲	۱/۵	θ_3
θ_4	۷/۷۴۹۳	۴/۶۷۳۳	۷۶۳۱۷۳	۱/۹۳۰۲	۶/۴۳۵۷	۱/۵	θ_4

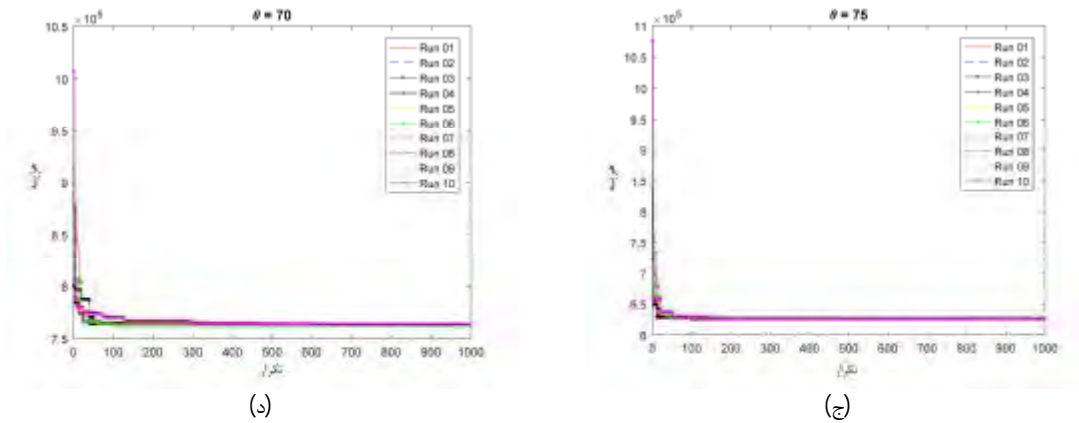


(ب)



(الف)

شکل ۵- خروجی ۱۰ اجرا برای همه حالات سد تأخیری پاره‌سنگی با زوایای الف - ۹۰ درجه، ب - ۸۰ درجه



ادامه شکل ۵- خروجی ۱۰ اجرا برای همه حالات سد تأخیری پاره‌سنگی با زوایای، ج- ۷۵ درجه و د- ۷۰ درجه

جدول ۵- عدم قطعیت پارامترهای ورودی

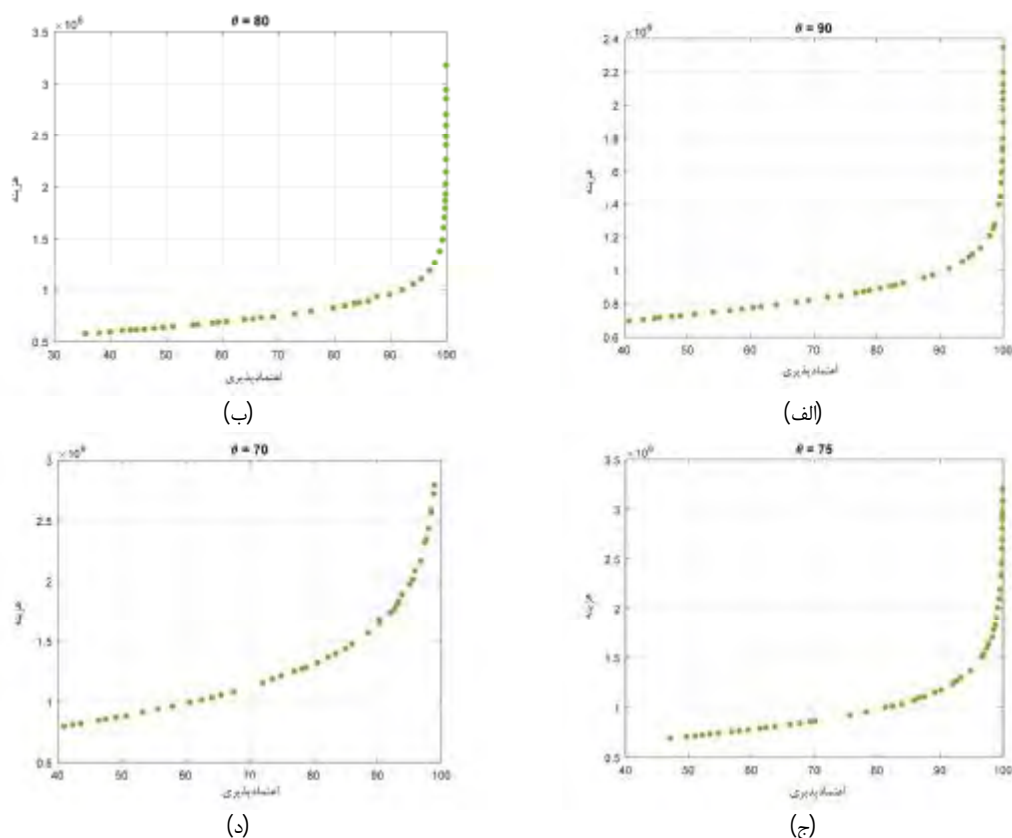
شماره	نوع	پارامتر	تعریف	واحد	نوع تابع توزیع احتمال	انحراف معیار	مقدار میانگین	فرمول
۱	دبی	I_p	ماکزیمم دبی هیدروگراف ورودی	m^3/s	GEV	%۵	۲۸	۶
۲		Q_p	دبی پیک هیدروگراف خروجی		GEV	%۵	۱۱	۱۳
۳	زمان	t_p	زمان رسیدن هیدروگراف ورودی به پیک خودش	s	GEV	%۵	۳۶۰۰	۶
۴		m	ضریب بدون بُعد شکل هیدروگراف		Gaussian	%۵	۱۰	۶
۵		z_0	ضرایب ثابت مخزن		Gaussian	%۵	0	۹
۶		k	ضرایب ثابت مخزن		Gaussian	%۵	۱۱۰۰۰	۹
۷	ضرایب	n	ضرایب ثابت مخزن	-	Gaussian	%۵	۲	۹
۸		a	مقادیر ثابت حاصل از بهینه‌سازی		Gaussian	%۵	۵۴	۱۱
۹		b	مقادیر ثابت حاصل از بهینه‌سازی		Gaussian	%۵	-۰/۰۷۷	۱۱
۱۰		s	ضریب زمین‌لرزه		Gaussian	%۵	۰/۱	
۱۱		μ	ضریب اصطکاک استاتیکی		Gaussian	%۵	۰/۷	۱۵
۱۲		d	اندازه مصالح سد		Uniform	%۵	-۰/۲۵	۱۱
۱۳	Material	σ	انحراف معیار اندازه مصالح سد	m	Gaussian	%۵	0	۱۱
۱۴		n_p	تخلخل مصالح		Uniform	%۵	-۰/۲	۱۱
۱۵		γ_s	وزن مخصوص مصالح (سنگ)	N/m^3	Gaussian	%۵	۲۷۰۰۰	۱۷
۱۶	طول	H_2	عمق پایاب	m	Gaussian	%۵	۱	۱۰
۱۷		w	عرض سد		Uniform	%۵	۲	۱۰
۱۸	زاویه	θ	زاویه شیب وجوه سراب و پایاب سد	degrees	Uniform	%۵	۹۰	۱۰
۱۹	تنش	q	تنش مجاز مواد در سطح برش	KN/m^2	Gaussian	%۵	۷۰	۱۶

جمعیت اولیه: ۵۰، تعداد تکرار: ۱۰۰۰، درصد جهش: ۵ درصد، درصد ترکیب: ۹۰ درصد. جبهه پارتوی حاصل از این روش در شکل ۶ نشان داده شده است. از بین جمعیت تشکیل‌دهنده جبهه پارتو، انتخاب بهینه براساس حالت تعادل بین درصد اعتمادپذیری سازه و هزینه انجام می‌شود که هم سازه اعتماد مطلوبی داشته باشد و هم اینکه از نظر هزینه نیز اقتصادی باشد. براین اساس در این تحقیق برای هر حالت از سد تأخیری یک عضو با اعتمادپذیری ۷۰ درصد انتخاب شده است و در جدول ۶ مقادیر آن نمایش داده شده است؛ علاوه بر این در شرایط کاربردی با توجه به بودجه در دسترس و میزان اعتمادی که کارفرما نیاز دارد، می‌توان جواب‌ها را اولویت‌بندی کرد و سپس تعادل بین اعتمادپذیری-هزینه را برای انتخاب طرح بهینه مدنظر قرار داد.

بهینه‌سازی طراحی مبتنی بر قابلیت اعتماد

در این مرحله و بعد از به‌دست‌آوردن مدل اولیه سد تأخیری و سپس اعمال عدم قطعیت روی پارامترهای موجود و تأثیرگذار در طراحی سد تأخیری، نوبت به بهینه‌سازی سد تأخیری با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه Self-adaptive NSGA-II می‌رسد. این بهینه‌سازی مبتنی بر اعتمادپذیری است و بدین‌منظور الگوریتم Self-adaptive NSGA-II به شبیه‌سازی مونت‌کارلو و مدل شبیه‌ساز سد تأخیری پاره‌سنگی متصل می‌شود. فلوچارت الگوریتم ارائه‌شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

بهینه‌سازی چندهدفه برای همه حالات سد تأخیری پاره‌سنگی انجام می‌شود. مشخصات پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی به‌کاررفته در این پژوهش عبارت‌اند از: تعداد



ادامه شکل ۶- خروجی جبهه پارتوی بهینه‌سازی چندهدفه برای حالات مختلف سد تأخیری پاره‌سنگی با زوایای، الف- ۹۰ درجه،

ب- ۸۰ درجه، ج- ۷۵ درجه و د- ۷۰

پاره‌سنگی در نظر گرفته شده است، افزایش چشم‌گیری می‌یابد؛ به‌عنوان مثال هزینه اجرای سد تأخیری در حالتی که زاویه برابر با ۷۰ درجه است، نسبت به حالت اول، یعنی

با توجه به خروجی‌های جدول ۶ نتیجه می‌شود که با کاهش مقدار زاویه در سد تأخیری پاره‌سنگی میزان حجم مصالح مصرفی که به‌عنوان هزینه ساخت سد تأخیری

به ۷۰ درجه می‌رسد، این مقادیر به ترتیب به ۱/۷۰۷۹، ۷/۴۹۴۷ و ۲/۲۹۴۷ می‌رسند. نکته دیگری که ارزش ذکر کردن را دارد این مورد است که با کاهش زاویه بدنه سد در سد تأخیری پاره‌سنگی مقدار طول بدنه سد افزایش و مقدار ارتفاع سد کاهش می‌یابد.

حالتی که زاویه ۹۰ درجه است، حدود ۴۰ درصد افزایش یافته است. از سوی دیگر با کاهش زاویه بدنه سد تأخیری، ضرایب اطمینان نیز افزایش می‌یابند؛ برای مثال، مقادیر SFO، SFF و SFS در سد تأخیری پاره‌سنگی در حالتی که زاویه برابر با ۹۰ درجه است به ترتیب برابر با ۱/۶۷۳۶، ۴/۷۴۴۱ و ۱/۸۵۹۸ است که هنگامی که زاویه بدنه سد

جدول ۶- اعضای انتخاب شده از جبهه پارتو برای هر حالت سد تأخیری پاره‌سنگی

طول (متر)	ارتفاع (متر)	هزینه	اعتمادپذیری (%)	SFS	SFF	SFO	
۴/۷۳۹۳	۶/۵۳۹۳	۸۳۶۷۸۰	۷۲/۲۴۵۰	۱/۸۵۹۸	۴/۷۴۴۱	۱/۶۷۳۶	θ_1
۵/۷۱۴۰	۵/۷۹۶۴	۷۳۴۲۹۰	۶۹/۵۷۸۲	۱/۹۴۰۳	۵/۳۵۷۲	۱/۶۳۰۰	θ_2
۷/۳۶۶۱	۵/۳۱۲۶	۸۵۲۴۱۰	۶۹/۴۲۳۱	۲/۰۹۴۳	۶/۶۲۲۷۳	۱/۶۹۰۵	θ_3
۱۰/۴۸۲۴	۴/۸۸۸۵	۱۱۴۸۷۰۰	۷۲/۱۱۵۰	۲/۲۹۴۷	۷/۴۹۴۷	۱/۷۰۷۹	θ_4

با استفاده از معادلات (۷)، (۱۳)، (۹) و (۱۰) به منظور به دست آوردن V_f ، H و L و جای گذاری پارامترهای موجود در جدول ۷ در این معادلات، طرح اولیه سد تأخیری پاره‌سنگی به دست می‌آید. مقادیر ارتفاع آب پشت سد (H_1)، همچنین طول سد (L) از طرح اولیه به دست می‌آیند. مقادیر ضرایب اطمینان SFS، SFO و SFF برای طراحی اولیه در جدول ۸ آمده است. همان‌طور از مقادیر ضرایب اطمینان قابل مشاهده است، هیچ‌کدام از ضرایب اطمینان در این طراحی تأمین نشده‌اند و لازم است بازطراحی شود.

کاربرد مدل در مطالعه موردی رودخانه کرگانرود

در ادامه با استفاده از پارامترهای طراحی موجود در جدول ۷ و مشخصات آماری و هیدرولوژی سیلاب براساس تحلیل فراوانی سیلاب در حوضه کرگانرود و همچنین دبی ایمن طراحی که توسط مهندسان مشاور سفیدرودگیلان (۱۳۹۸) توصیه شده است، سد تأخیری پاره‌سنگی با هدف کنترل سیلاب در رودخانه کرگانرود در سه فاز طراحی مختلف یعنی: طراحی اولیه، طراحی با استفاده از بهینه‌سازی تک‌هدفه و طراحی چندهدفه مبتنی بر قابلیت اعتماد، طراحی شد.

جدول ۷- مقادیر مورد استفاده برای طراحی اولیه سد تأخیری پاره‌سنگی

متغیرها	b	a	n	k	z_0	m	t_p	Q_p	I_p
مقادیر	-۰۰۰۷۷	۵۴	۲	۱۱۰۰۰	۰	۱۰	۳۶۰۰	۵۸/۵	۱۱۷
متغیرها	θ	w	n_p	σ	d	v			
مقادیر	۸۰	۱۰	۲	۰	۰/۲۵	۰/۰۰۰۰۰۱			

جدول ۸- خروجی طراحی اولیه سد تأخیری پاره‌سنگی رودخانه کرگانرود

طول (متر)	ارتفاع (متر)	SFS	SFF	SFO
۱۳/۷۱۷۸	۸/۳۲۸۴	۱/۴۱۸۸	۳/۴۵۲۲	۱/۱۱۹۶

این ۱۰ اجرا بهینه‌ترین خروجی مشخص شده است و در جدول ۹ آمده است. همچنین خروجی هر ۱۰ اجرا برای همه حالات سد تأخیری در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول ۹ قابل مشاهده است، همانند مثال‌های ارائه شده قبلی بحرانی‌ترین مقدار برای ضرایب اطمینان، مقدار SFO است که اگر تأمین شود، مابقی

حال بعد از به دست آوردن مقادیر طرح اولیه، این مقادیر به عنوان حد پایین به الگوریتم بهینه‌سازی تک‌هدفه داده می‌شوند تا الگوریتم بهینه‌سازی، طرحی را به دست آورد که دارای کمینه هزینه است و درعین حال ضرایب اطمینان در آن تأمین شده‌اند. برای بهینه‌سازی تک‌هدفه سد تأخیری پاره‌سنگی ۱۰ مرتبه بهینه‌سازی انجام می‌شود که از بین

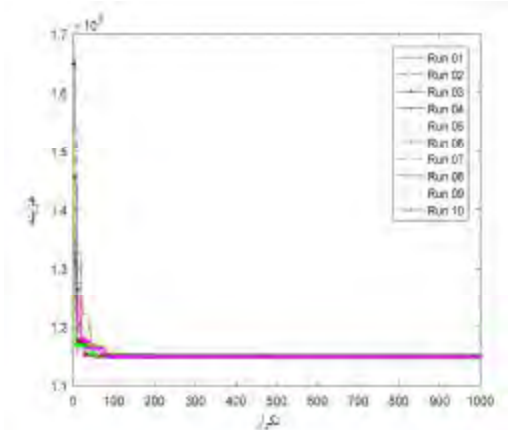
شبیه‌سازی مونت‌کارلو و مدل شبیه‌ساز سد تأخیری پاره‌سنگی استفاده می‌شود. مشخصات پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی به کاررفته در این پژوهش عبارت‌اند از: تعداد جمعیت اولیه: ۵۰، تعداد تکرار: ۱۲۰۰، درصد جهش: ۵ درصد، درصد ترکیب: ۹۵ درصد. خروجی جبهه پارتوی حاصل از این روش در شکل ۸ نشان داده شده است.

ضرایب اطمینان نیز تأمین خواهند شد. برای طراحی مبتنی بر قابلیت اعتماد می‌توان از عدم قطعیت‌های موجود در جدول ۵ استفاده کرد. همچنین از خروجی طراحی اولیه به عنوان مقادیر حد پایین برای الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شود. برای انجام بهینه‌سازی مبتنی بر اعتمادپذیری از لینک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه،

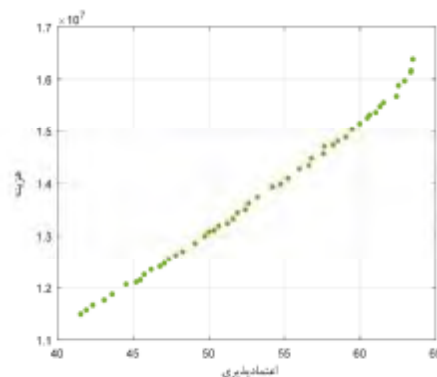
جدول ۹- بهینه‌ترین خروجی بهینه‌سازی تک‌هدفه سد تأخیری پاره‌سنگی رودخانه کرگانرود

SFO	SFF	SFS	هزینه	ارتفاع (متر)	طول (متر)
۱/۵	۵/۸۸۳۸	۲/۹۱۳۰	۱۱۴۷۸۶۹۷	۱۱/۶۸۴۱	۳۸/۴۴۲

مناسب برای احداث سد، طراحی اولیه و طراحی نهایی، تشکیل شده است. برخلاف روش‌های مطرح شده در مطالعات قبلی که بدنه سدهای تأخیری پاره‌سنگی را غیرقابل نفوذ فرض می‌کردند، در این طرح از معادله دبی-اشل جریان غیرداری در سد پاره‌سنگی استفاده شده است که نشأت از بدنه سد را نیز در مدل شبیه‌سازی سد تأخیری پاره‌سنگی دیده است؛ اما متأسفانه تاکنون در هیچ‌یک از پژوهش‌ها از رویکردهای مبتنی بر قابلیت اعتماد برای طراحی این‌گونه سدها استفاده نشده است. در تحقیق حاضر از معادلات هیدروگراف ورودی، رابطه حجم-ارتفاع مخزن، معادله دبی-اشل جریان غیرداری در سد پاره‌سنگی و معادله روندیابی غیرخطی جریان در سدهای تأخیری پاره‌سنگی، برای شبیه‌سازی سد تأخیری پاره‌سنگی استفاده شد. سپس با در نظر گرفتن چهار حالت برای زاویه دیواره سد، به طراحی اولیه این سد پرداخته شد. برای هر یک از طرح‌های اولیه مقادیر ضرایب اطمینان SFS، SFO و SFF محاسبه شد. نشان داده شد که در هیچ‌یک از طرح‌های اولیه مقادیر حداقل ضرایب اطمینان SFS و SFO تأمین نشده‌اند. سپس با استفاده از بهینه‌سازی تک‌هدفه هر یک از طرح‌های اولیه به الگوریتم بهینه‌ساز داده شد تا بهینه‌ترین طرح برای سد تأخیری پاره‌سنگی به‌گونه‌ای به‌دست آید که طرح مورد نظر دارای کمینه‌ترین هزینه باشد و درعین حال نیز ضرایب اطمینان تأمین شوند. برای هر کدام از حالت‌های سد تأخیری پاره‌سنگی ۱۰ مرتبه بهینه‌سازی انجام گرفت. همان‌طور که از خروجی‌های بهینه‌سازی به‌دست آمد، با افزایش مقدار زاویه سد، ارتفاع سد کم می‌شود و مقدار طول آن افزایش می‌یابد. همچنین در همه خروجی‌ها مقدار حداقل ضرایب اطمینان تأمین شده‌اند. نکته دیگر در مورد ضرایب



شکل ۷- خروجی ۱۰ اجرا برای سد تأخیری پاره‌سنگی رودخانه کرگانرود



شکل ۸- خروجی جبهه پارتوی بهینه‌سازی چندهدفه برای سد تأخیری پاره‌سنگی رودخانه کرگانرود

نتیجه‌گیری

سدهای تأخیری پاره‌سنگی، یکی از روش‌های سازه‌ای برای کنترل و کاهش پیک سیلاب است که به دلیل سهولت در اجرا و بهره‌برداری از مقبولیت بالایی برخوردار هستند. طراحی این‌گونه سدها از سه گام، تعیین محل

- Irrigation and Drainage Engineering. 116(4): 527-536.
5. Akan A. O. Al-Muttair F. F. and Al-Turbak AS. 1987. Design aid for de-tention basins. Design of hydraulic structures. Proc. Int. Symp., Fort Collins, Colo. 177-182.
 6. Aksoy H. 2000. Use of gamma distribution in hydrological analysis. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. 24(6): 419-428.
 7. Bhunya P. K. Ghosh N. C. Mishra SK. Ojha CS. and Berndtsson R. 2005. Hybrid model for derivation of synthetic unit hydrograph. Journal of Hydrologic Engineering. 10(6): 458-467.
 8. Chuntian C. and Chau K. W. 2002. Three-person multiobjective conflict decision in reservoir flood control. European Journal of Operational Research. 142(3): 625-631.
 9. Deb K. Pratap A. Agarwal S. and Meyarivan TAMT. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation. 6(2): 182-197.
 10. Deepika R. and Suribabu C.R. 2015. Optimal design of gravity dam using differential evolution algorithm. Iran University of Science & Technology. 5(3): 255-266.
 11. Gray D.M. 1961. Synthetic unit hydrographs for small watersheds. Journal of the Hydraulics Division. 87(4): 33-54.
 12. Hooshyaripor F. and Tahershamsi A. 2015. Effect of reservoir side slopes on dam-break flood waves. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 9(1): 458-468.
 13. Hooshyaripor F. Tahershamsi A. and Razi S. 2017. Dam break flood wave under different reservoir's capacities and lengths. Sādhanā. 42(9): 1557-1569.
 14. Horn D.R. 1987. Graphic estimation of peak flow reduction in reservoirs. J. Hydr. Engrg., ASCE. 113(11): 1441-1450.
 15. Kshirsagar D.Y. 2014. Effect of variation of earthquake intensity on stability of gravity dam. J Indian Water Resour Soc. 34(3): 1-6.
 16. Li X. Y. Chau K. W. Cheng C. T. and Li Y. S. 2006. A web-based flood forecasting system for Shuangpai region. Advances in Engineering Software. 37(3): 146-158.
 17. Lin Y. K. and Yeh C. T. 2012. Multi-objective optimization for stochastic computer networks using NSGA-II and TOPSIS. European Journal of Operational Research. 218(3): 735-746.
 18. Machajski J. and Kostecki S. 2018. Hydrological analysis of a dyke pumping station for the purpose of improving its functioning conditions. Water. 10(6): 737.
- اطمینان برای خروجی‌های بهینه این است که بحرانی‌ترین مقدار برای ضرایب اطمینان، مقدار SFO است که اگر تأمین شود، بقیه ضرایب اطمینان نیز تأمین خواهند شد. همچنین نشان داده شد در حالتی که زاویه سد ۸۰ درجه باشد، این حالت بهینه‌ترین طرح از لحاظ اقتصادی است. در گام آخر این مقاله بعد از اعمال عدم قطعیت روی پارامترهای طراحی با استفاده از توزیع‌های احتمالاتی و با لینک مدل شبیه‌ساز به روش شبیه‌سازی مونت کارلو و همچنین الگوریتم بهینه‌سازی Self-adaptive NSGA-II سد تأخیری پاره‌سنگی بر مبنای اعتمادپذیری، طراحی شد. خروجی این گام جبهه پارتو بود که هزینه سد تأخیری را در برابر اعتمادپذیری نشان می‌داد. با توجه به خروجی‌های حاصل از این گام می‌توان به این نکته پی برد که با کاهش مقدار زاویه در سد تأخیری پاره‌سنگی هزینه ساخت سد تأخیری پاره‌سنگی افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش زاویه بدنه سد در سد تأخیری پاره‌سنگی مقدار طول بدنه سد افزایش و مقدار ارتفاع آن کاهش می‌یابد. به‌منظور تحقیقات آینده می‌توان تأثیرات عدم قطعیت پارامترهای طراحی بر عملکرد هیدرولیکی و سازه‌ای سد تأخیری پاره‌سنگی را با استفاده از روش‌هایی همچون تئوری فازی مطالعه کرد. همچنین می‌توان تأثیرات طراحی اولیه بر عملکرد طراحی بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی را نیز مورد مطالعه قرار داد. یکی از مباحث بسیار کارآمد برای مطالعات آینده، استفاده از روش‌هایی مانند Latin Hypercube Sampling (LHS) و ترکیب آن با روش MCS است. علاوه بر این، کاربرد مدل توسعه‌یافته در طراحی سدهای تأخیری چندگانه (متوالی) و وجود رسوبات نیز قابل توصیه است.

منابع

1. Abedini M. and Fathi Jokadan R. 2016. Flood Risk Zoning in the Karganroud's Catchment Basin Using ArcGIS. Hydrogeomorphology. 3(7): 1-17.
2. Abt S. R. and Grigg N. S. 1978. An Approximate method for sizing detention reservoirs 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 14(4): 956-965.
3. Akan A. O. 1989. Detention pond sizing for multiple return periods. Journal of Hydraulic Engineering. 115(5): 650-664.
4. Akan A. O. 1990. Single-outlet detention-pond analysis and design. Journal of

33. Riyahi M. M. and Riahi-Madvar H. 2022. Uncertainty analysis in probabilistic design of detention rockfill dams using Monte-Carlo Simulation model and probabilistic frequency analysis of stability factors.
34. Samani H. M. Samani J. M. and Shaiannejad M. 2003. Reservoir routing using steady and unsteady flow through rockfill dams. *Journal of Hydraulic Engineering*. 129(6): 448-454.
35. Samani J.M.V. Samani H.M.V. and Shaiannejad M. 2004. Reservoir routing with outflow through rockfill dams. *Journal of Hydraulic Research*. 42(4): 435-439.
36. Sarkhosh P. Salama A. and Jin Y.C. 2020. A one-dimensional semi-implicit finite volume modeling of non-inertia wave through rockfill dams. *Journal of Hydroinformatics*, 22(6), pp.1485-1505.
37. Sedghi-Asl M. and Rahimi H. 2011. Adoption of Manning's equation to 1D non-Darcy flow problems. *Journal of Hydraulic Research*. 49(6): 814-817.
38. Sedghi-Asl M. Rahimi H. Farhoudi J. Hoorfar A. and Hartmann S. 2014. One-dimensional fully developed turbulent flow through coarse porous medium. *Journal of Hydrologic Engineering*. 19(7): 1491-1496.
39. Singh P. K. Mishra S. K. and Jain M. K. 2014. A review of the synthetic unit hydrograph: from the empirical UH to advanced geomorphological methods. *Hydrological Sciences Journal*. 59(2): 239-261.
40. Wang W.C. Chau K.W. Xu D.M. Qiu L. and Liu CC. 2017. The annual maximum flood peak discharge forecasting using hermite projection pursuit regression with SSO and LS method. *Water Resources Management*. 31(1): 461-477
41. Wu C. L. and Chau K. W. 2006. A flood forecasting neural network model with genetic algorithm. *International Journal of Environment and Pollution*. 28(3-4): 261-273.
42. Wycoff R. L. and Singh U. P. 1976. Preliminary hydrologic design of small flood detention reservoirs 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 12(2): 337-349.
43. Yaseen Z. M. Sulaiman S. O. Deo R. C. and Chau KW. 2019. An enhanced extreme learning machine model for river flow forecasting: State-of-the-art, practical applications in water resource engineering area and future research direction. *Journal of Hydrology*. 569: 387-408.
19. Mays LW. 2010. *Water resources engineering*. John Wiley & Sons.
20. McEnroe B. M. 1992. Preliminary sizing of detention reservoirs to reduce peak discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(11): 1540-1549.
21. McEnroe B. M. 1992. Preliminary sizing of detention reservoirs to reduce peak discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(11): 1540-1549.
22. Metropolis N. and Ulam S. 1949. The Monte Carlo Method, *J. Am. Stat. Assoc.* 44: 335–341.
23. Moradi Kia F. Ghafouri H. R. and Riyahi M. M. 2022. Uncertainty analysis and risk identification of the gravity dam stability using fuzzy set theory. *Journal of Hydraulic Structures*. 7(4): 76-92.
24. Mosavi A. Ozturk P. and Chau K.W. 2018. Flood prediction using machine learning models: Literature review. *Water*. 10(11): 1536.
25. Nash J.E. 1959. Systematic determination of unit hydrograph parameters. *Journal of Geophysical Research*. 64(1): 111-115.
26. Nikoo M. R. Khorramshokouh N. and Monghasemi S. 2015. Optimal design of detention rockfill dams using a simulation-based optimization approach with mixed sediment in the flow. *Water Resources Management*. 29(15): 5469-5488.
27. Nowak A. S. and Collins K. R. 2012. *Reliability of structures*. CRC press.
28. Punmia B.C. 1992. *Irrigation and Water Power Engineering*, Laxmi Publications Pvt Limited.
29. Rajabi M. M. Ataie-Ashtiani B. and Janssen H. 2015. Efficiency enhancement of optimized Latin hypercube sampling strategies: application to Monte Carlo uncertainty analysis and meta-modeling. *Advances in Water Resources*. 76: 127-139.
30. Rashki M. 2018. Hybrid control variates-based simulation method for structural reliability analysis of some problems with low failure probability. *Applied Mathematical Modelling*. 60: 220-234.
31. Riahi-Madvar H. Dehghani M. Akib S. Shamshirband S. and Chau KW. 2019. Developing a mathematical framework in preliminary designing of detention rockfill dams for flood peak reduction. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 13(1): 1119-1129.
32. Riyahi M. M. and Bahrami Chegeni I. 2022. Gravity retaining wall stability risk analysis based on reliability using fuzzy set theory. *Journal of Structural and Construction Engineering*.

ارزیابی توسعه‌یافتگی توده‌های کارستی دیمه و پیرغار براساس تحلیل هیدروگراف چشمه

فاطمه گراوند^۱، سید موسی حسینی^{۲*}، مهران مقصودی^۲، مجتبی یمانی^۳ و راضیه لک^۴

چکیده

در این پژوهش، تحلیل کمی از رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی دیمه و پیرغار در استان چهارمحال و بختیاری واقع در زون‌های زاگرس مرتفع و سنج سیرجان با استفاده از داده‌های روزانه دبی و بارش در طول دوره آماری مشترک ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸ مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل سری زمانی بلندمدت چشمه دیمه و پیرغار نشان داد که زمان پاسخ دبی نسبت به بارش به ترتیب حدود ۳ و ۲ ماه است و احتمالاً نشان‌دهنده توسعه بیشتر توده کارستی مرتبط با چشمه پیرغار در مقایسه با دیمه است. برآورد ضرایب فروکش جریان سریع (α_f)، جریان انتقالی (α_i) و جریان پایه (α_b) چشمه‌ها براساس تحلیل ۱۸ منحنی فروکش برابر با $\alpha_f = 0.004 \text{ day}^{-1}$ ، $\alpha_i = 0.016 \text{ day}^{-1}$ و $\alpha_b = 0.042 \text{ day}^{-1}$ برای چشمه دیمه و $\alpha_f = 0.007 \text{ day}^{-1}$ ، $\alpha_i = 0.038 \text{ day}^{-1}$ و $\alpha_b = 0.125 \text{ day}^{-1}$ برای چشمه پیرغار نشان داد که درجه توسعه‌یافتگی چشمه پیرغار ۷ و چشمه دیمه برابر با ۵/۵ (از ۱۰) است؛ برآورد حجم ذخیره دینامیک چشمه‌ها به روش مانجین (۱۹۷۵) نیز نشان داد که به‌طور متوسط در طول دوره مورد بررسی، به ترتیب حدود ۲۷ و ۵۵ درصد از کل حجم ذخیره دینامیک آبخوان چشمه پیرغار و دیمه (معادل ۸/۱ و ۴۷/۷۵ میلیون مترمکعب در سال) مربوط به جریان پایه است. بالابودن میزان جریان انتقالی چشمه پیرغار، تغذیه نقطه‌ای و سیستم مجرای کارستی منطقه را نشان می‌دهد. همچنین طبقه‌بندی آبخوان‌های کارستی مرتبط با چشمه‌ها به روش مانجین (۱۹۷۵) نشان داد که چشمه پیرغار دارای سیستم آبخوان کارستی پیچیده و توسعه‌یافتگی بالاتری نسبت به چشمه دیمه است. نتایج این پژوهش که صرفاً براساس تحلیل هیدروگراف خروجی چشمه‌های کارستی انجام شده است، می‌تواند اطلاعات کمی مهمی را از ذخایر دینامیک، درجه توسعه‌یافتگی، زمان مرگ چشمه و نوع رژیم جریان آبخوان‌های کارستی در شرایط فقدان/کمبود داده‌های هیدروژئولوژیکی، اکتشافی و ردیابی، ارائه کند.

واژه‌های کلیدی: منحنی فروکش، طبقه‌بندی آبخوان، روش مانجین، چشمه‌های کارستی چهارمحال و بختیاری.

ارجاع: گراوند ف.، حسینی س. م.، مقصودی م.، یمانی م. و لک ر. ۱۴۰۱. ارزیابی توسعه‌یافتگی توده‌های کارستی دیمه و پیرغار براساس تحلیل هیدروگراف چشمه. مجله پژوهش آب ایران. ۴۷: ۴۱-۵۵. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13956.2420>

۱- کاندیدای دکتری رشته ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

۲- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

۳- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

۴- پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور.

* نویسنده مسئول: smhosseini@ut.ac.ir

مقدمه

در سطح جهانی، آب‌های زیرزمینی کارستی دومین منبع آب زیرزمینی مورد استفاده برای تأمین آب آشامیدنی هستند (استوانویچ و استوانویچ، ۲۰۲۱). تخمین زده می‌شود که آب‌های زیرزمینی در سفره‌های کارستی در حال حاضر حدود ۲۵ درصد از آب آشامیدنی جهان را تأمین می‌کند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷). در سال ۲۰۱۹، برآورد شده است که حدود ۱/۳ میلیارد نفر از جمعیت جهان در مناطق کارستی زندگی می‌کنند (گلشاید و همکاران، ۲۰۲۰). در ایران، زمین‌های کارستی حدود ۱۳ درصد از مساحت کل کشور را دربرمی‌گیرد (رئییسی و کوثر، ۱۹۹۷). زاگرس مهم‌ترین ناحیه حضور و رخنمون سازندهای کربناته در کشور است و آبخوان‌های کارستی یکی از برجسته‌ترین ویژگی‌های سازندهای کربناته زاگرس هستند (فرزین، ۱۳۹۸). حدود ۵۶ درصد از چشمه‌ها و بیشتر رودخانه‌های بزرگ ایران از این پهنه سرچشمه می‌گیرند (احمدی‌پور، ۱۹۹۹) که برای توسعه اقتصادی، (گوا و همکاران، ۲۰۱۹) و به‌ویژه توسعه و بهره‌برداری زاگرس‌نشینان نقش بسیار مهمی دارند (فرزین، ۱۳۹۸). مطالعه دقیق چشمه‌های کارستی پیش‌نیاز بهره‌برداری پایدار از این منابع آبی است (وایت و همکاران، ۲۰۱۶). روش‌های موجود در بررسی‌های هیدروژئولوژی کارست شامل روش‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، غارشناسی، تکنیک‌های هیدروژئولوژیکی-هیدرولیکی، استفاده از ردیاب‌های طبیعی مانند ایزوتوپ‌ها و پارامترهای هیدروشیمیایی و همچنین استفاده از ردیاب‌های مصنوعی است (گلشاید و درو، ۲۰۰۷). هرچند این روش‌ها برای ارزیابی هیدروژئولوژیکی توده کارستی اطلاعات دقیق‌تری ارائه می‌دهند، اما دارای محدودیت اجرایی و اقتصادی در سطوح وسیع هستند؛ بنابراین به دلیل نبود اطلاعات لازم برای مدل‌سازی‌ها و محدودیت‌های هزینه و زمان، استفاده از تحلیل منحنی فروکش یک روش سریع و کم‌هزینه است که رفتار هیدرودینامیکی آبخوان‌ها، درجه توسعه کارست، زمان مرگ چشمه، نوع رژیم جریان و حجم دینامیکی آبخوان را نیز مشخص کرده و می‌تواند برای تحلیل آبخوان‌های کارستی ایران که اطلاعات دقیق سیستم کارست درونی ندارند، برای تخمین توسعه‌یافتگی کارست درونی استفاده شود. تجزیه و تحلیل منحنی‌های فروکش چشمه‌های کارستی برای تعیین پارامترهای

هیدرولیکی، ویژگی‌های هندسی و مکانیسم‌های انتقالی که ماهیت دینامیکی سیستم‌های آبخوان کارستی را توصیف می‌کنند، ضروری است (اولارینویه و همکاران، ۲۰۲۱)؛ علاوه‌براین، شکل و نرخ منحنی‌های فروکش اطلاعات قابل‌توجهی را درباره ذخیره‌سازی، ترکیب سنگ‌شناسی و ویژگی‌های ساختاری سیستم آبخوان نگهدارنده چشمه ارائه می‌دهد (مومن، ۱۹۹۵).

سوابق پژوهشی مربوط به تحلیل هیدروگراف و تجزیه و تحلیل منحنی فروکش چشمه‌های کارستی در منطقه و سایر نقاط جهان به این صورت است که براساس آنالیزهای سری زمانی انجام‌شده به کمک توابع خودهمبستگی، چگالی طیفی، عملکرد تابع همبستگی متقابل، ماندگاری اثر بارندگی در دبی چشمه‌های پیرغار، برم لردگان و دیمه نشان داد که در سیستم‌های کارستی مورد مطالعه، رژیم‌های مختلف جریان وجود داشته و سیستم کارستی پیرغار نسبت به چشمه‌های برم لردگان و دیمه از توسعه کامل‌تر و پیشرفته‌تری برخوردار است (محمدی و ریاحی‌پور، ۱۳۹۰). بررسی و مقایسه تغییرات آبدی چشمه‌های کارستی معروف در استان چهارمحال و بختیاری در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۸۸، بالا بودن جریان سریع چشمه‌های پیرغار، باباحیدر و پارک فرخشهر، نشان داد که جریان غالب در رژیم جریان سیستم کارستیک آن‌ها از نوع مجرای بوده و دامنه تغییرات کم در میزان آبدی چشمه‌های لردگان، شلمزار، سندگان و دیمه و به دنبال آن کاهش ضریب فروکش این چشمه‌ها در این سال حاکی از تأمین عمده آب چشمه توسط جریان پایه بوده که نشانگر نوع سیستم جریان افشان و تأمین آب توسط درز و شکاف‌های توسعه‌نیافته یا پر شده از خاک است (ریاحی‌پور و خلیلی، ۱۳۹۱). تحلیل سری‌های زمانی، بالا بودن مقدار ضرایب فروکش چشمه پیرغار نسبت به دیمه و بررسی شکل هیدروگراف چشمه و بالا بودن تغییرات نسبت‌های آبدی بیشینه و کمینه و برعکس در چشمه پیرغار نسبت به چشمه دیمه، نشان داد که سیستم آبخوان چشمه پیرغار نسبت به چشمه دیمه از جریان سریع و کارستی‌شدن بیشتری برخوردار است؛ اما چشمه دیمه، سیستم افشان داشته و احتمالاً تخلخل آن بیشتر از نوع ماتریسی (درز و شکاف کوچک) است (مالی و محمدی، ۱۳۹۲).

به تجزیه و تحلیل هیدروگراف چشمه و مدل سازی سیستم کارستی پرداختند. تحقیقات بالا نشان می دهد که شکل هیدروگراف چشمه می تواند تحت تأثیر جهت جریان تبدالی در طول رویدادهای تغذیه و فروکش باشد و تحلیل منحنی فروکش می تواند اطلاعات مهمی در تعیین رفتار دینامیکی آب زیرزمینی ارائه کرده که در مناطق کارستی فاقد اطلاعات اکتشافی و ردیابی، کمک شایانی به شناخت توده کارستی می کند. همچنین می تواند پشتوانه ای علمی برای اتخاذ راه کارهای مناسب در راستای مدیریت بهینه کمی منابع آب کارست و حوضه های آبرگیر بوده و راهنمای مناسبی برای تعیین میزان تکامل کارست باشد.

مواد و روش ها

ویژگی های طبیعی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

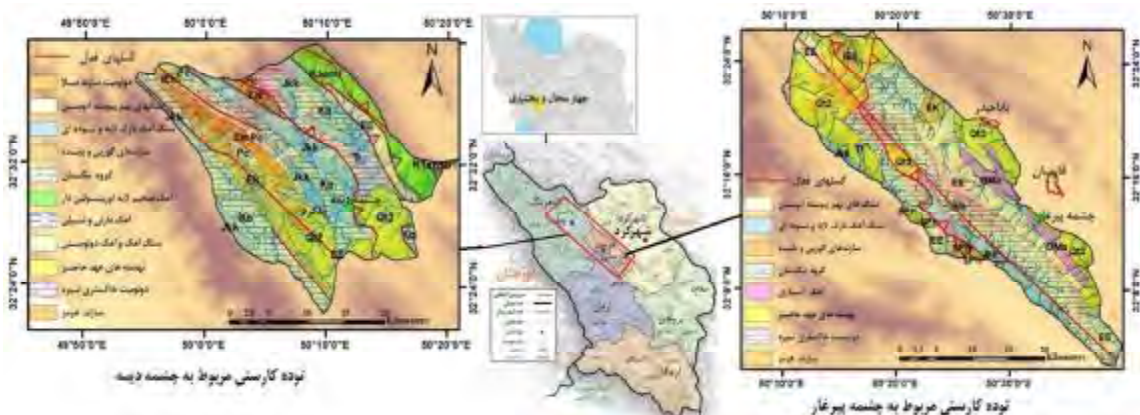
استان چهارمحال و بختیاری با مساحت ۱۶۵۳۲ کیلومتر مربع در بخش مرکزی کوه های زاگرس بین پیش کوه های داخل و استان اصفهان واقع شده است (شکل ۱). این منطقه دارای یک درصد از کل وسعت ایران بوده که با وجود مساحت کم، ده درصد از منابع آب کشور را در اختیار دارد. توده کارستی پیرغار به لحاظ موقعیت جغرافیایی در جنوب و غرب شهرستان فارس و در دامنه شمالی تاق دیس سالدوران با مساحت حوضه آبرگیر ۹۲ کیلومتر مربع، میانگین بارندگی ۵۴۲ میلی متر (در ایستگاه فارس) و در ارتفاع ۲۱۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است و در قسمت زون رسوبی-ساختاری زاگرس مرتفع قرار دارد. در این منطقه، گسلش بر چین خوردگی غلبه دارد و واحدهای رسوبی متعلق به پالئوژئیک و مزوزوئیک با کنتاکت گسله بیرون زدگی دارد. تاق دیس ها و ناودیس های شکل گرفته نیز به تبعیت از روند رشته کوه زاگرس، شمال غرب-جنوب شرق هستند و از نظر زمین ریخت شناسی از سمت غرب به طرف شرق از میزان ارتفاعات کاسته شده و به دره های باز و دشت فارس-جونقان ختم می شود. مرتفع ترین قله در منطقه، کوه سالدوران با ارتفاع ۳۶۲۱ متر است. آهک های سفید، آهک های مارنی و دولومیتی معادل سازند آسماری-جهرم و شهبازان با سن ائوسن-الیگوسن همراه با آهک های کرم رنگ ضخیم لایه بخش فوقانی سازند آسماری، آبخوان اصلی کارستی چشمه پیرغار را تشکیل داده است (شکل

تانگ و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از ۴۹ آزمایش تجربی به مطالعه آبخوان کارستی آزمایشگاهی و مدل سازی هیدروگراف چشمه و تجزیه و تحلیل منحنی فروکش چشمه کارستی پرداختند. نتایج نشان داد که ضخامت اشباع آبخوان تأثیر زیادی بر جریان اولیه منحنی فروکش و مدت زمان فروکش دارد. حسینی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از داده های هواشناسی و دبی روزانه ۲۱ ساله ایستگاه های اقلیمی مرتبط، به مطالعه آبخوان کارستی چشمه ساسان در جنوب غرب ایران پرداختند. در این پژوهش مدل سازی هیدروگراف چشمه کارستی و مدل بیان آب انجام شد؛ نتایج نشان دهنده نقش مهم سیستم جریان انتقالی^۱ در مدل سازی هیدرولوژیکی سیستم های کارستی در دوره مرطوب است. فاجروهمن و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از سری زمانی داده های دبی بلند مدت روزانه چشمه کاکاپ، جاوا مرکزی، در اندونزی به مدل سازی هیدروگراف چشمه و تعیین درجه کارستی توسعه یافتگی آبخوان کارستی پرداختند؛ در این پژوهش از روش جداسازی جریان پایه با کمک روش فیلتر دیجیتال استفاده شد و نتایج نشان داد آبخوان تحت سلطه رژیم جریان آشفته قرار دارد. نورکولیش و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از داده های دبی رودخانه زیرزمینی جاوا، در توده کارستی جونگرانگان اندونزی به مدل سازی هیدروگراف چشمه، تجزیه و تحلیل منحنی فروکش و تعیین درجه کارستی شدن توده کارستی پرداختند. نتایج، جریان های دبی مختلط از نوع مجرای، درز و شکاف و افشان را که در منحنی فروکش اصلی محاسباتی قابل مشاهده بود، تأیید کرد. تورسان و همکاران (۲۰۲۰) به تجزیه و تحلیل هیدروگراف چشمه های کارستی نانتو، موسانو و ویچنزا در ایتالیا پرداختند. نتایج نشان داد که دو مورد از چشمه های مورد بررسی رفتار یکسانی را در نتیجه رویدادهای تغذیه نشان دادند. چانگ و همکاران (۲۰۲۱) آبخوان کارستی غار دایه، چین را با استفاده از داده های بارش و دبی روزانه چشمه مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش آنالیز منحنی فروکش چشمه و تست های ردیاب انجام شد، نتایج نشان داد که شکل منحنی فروکش تحت شرایط مختلف بارندگی تغییر کرده است. شیرافکن و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از آزمایش های آزمایشگاهی مجموعه ای از هیدروگراف های چشمه را به صورت مصنوعی تولید کرده و

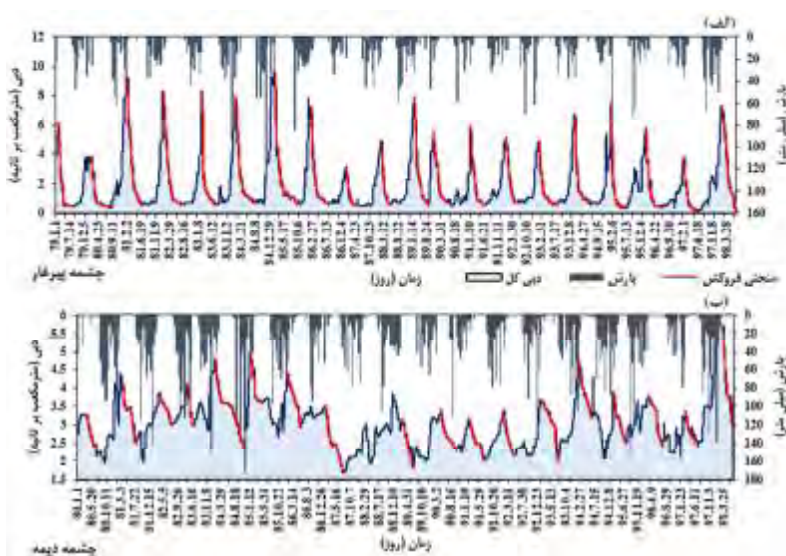
۱). از نظر تکتونیکی رورانگی زاگرس و تحت فشار بودن این ناحیه، سیستم درزه‌ها، توسعه قابل توجهی یافته و محیط مساعدی برای چرخه آب در سنگ‌های کربناته را فراهم آورده است؛ بنابراین این منطقه برای توسعه کارست مساعد بوده و باعث ایجاد پدیده‌های ژئومورفولوژی کارستی متنوعی نظیر غار، سینک‌هول و چشمه شده است. به دلیل مرتفع بودن منطقه، درجه حرارت به‌طور معمول پایین بوده و در برخی از نقاط حتی به چندین درجه زیر صفر می‌رسد. میزان نزولات جوی بیش از ۶۰۰ میلی‌متر در سال بوده و اغلب به‌صورت برف است که عامل مؤثری برای پیشرفت کارست است (کرمی و همکاران، ۱۳۹۷). چشمه دیمه در تقادیس زراب سرچشمه اصلی زاینده‌رود در ۱۲ کیلومتری چلگرد در مجاورت روستای دیمه واقع شده است و ارتفاع قرارگیری این چشمه ۲۱۹۶ متر از سطح دریا است. مساحت حوضه آبرگیر آن ۱۴۰ کیلومتر مربع و میانگین بارندگی ۱۳۲۹ میلی‌متر (در ایستگاه چلگرد) است. آهک‌های سفید، آهک‌های مارنی و آهک‌های دولومیتی معادل سازند آسماری-چهرم و شهبازان با سن ائوسن-الیگوسن همراه با آهک‌های کرم‌رنگ ضخیم لایه بخش فوقانی سازند آسماری به سن الیگوسن و آهک نازک لایه رسی و آهک خاکستری همراه با فسفیل اربیتولین و شیل، مارن و ماسه‌سنگ به سن کرتاسه می‌توانند در تأمین آب چشمه دیمه مؤثر باشند (شکل ۱) (مالی و محمدی، ۱۳۹۳). گسل‌ها و تراس‌های متعددی با راستای شمال غربی-جنوب شرقی از بین واحدهای چینه‌ای این منطقه عبور می‌کند. مهم‌ترین آن‌ها شامل تراس اصلی زاگرس با طول بیش از ۲۰۰۰ کیلومتر بوده که در محدوده مطالعاتی موجب رانده شدن آهک‌های کرتاسه روی واحدهای میوسن و کنگلومرای بختیاری شده است. به موازات این گسل تراس‌های متعددی از جمله گسل زراب، گسل اردل و گسل زردکوه نیز شکل گرفته است. از لحاظ چینه‌شناسی، قدیمی‌ترین رخنمون‌های کوه زراب را هرمز (کمپلکس هرمز) تشکیل داده است که بیشتر در امتداد رانگی‌های بنیادی به سطح زمین رخنمون یافته‌اند و جدیدترین واحد سنگی منطقه کنگلومرای بختیاری است. سازند اصلی

تشکیل‌دهنده تقادیس زراب واحد K معادل سازند سروک است. میانگین ضخامت سازند سروک در محدوده کوه زراب حدود ۵۰۰ متر است (کرمی و راجانی و همکاران، ۱۳۹۴). در این پژوهش به‌منظور بررسی رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه‌ها، داده‌های دبی روزانه ایستگاه‌های هیدرومتری و بارش روزانه ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی مربوط به چشمه‌های کارستی استان چهارمحال و بختیاری و شرکت مدیریت منابع آب ایران تهیه شده است. سپس چشمه‌های کارستی دیمه و پیرغار با توجه به طول دوره آماری مشترک (از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸) برای تحلیل‌های کمی انتخاب شدند. برای چشمه دیمه داده‌های ایستگاه باران‌سجی چلگرد و داده‌های دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری دیمه انتخاب شدند و از داده‌های ایستگاه باران‌سجی فارسان و ایستگاه هیدرومتری ده چشمه برای چشمه پیرغار استفاده شده است. نمودار سری زمانی این داده‌ها در شکل ۲ ارائه شده است، منحنی‌های قرمز رنگ منحنی‌های فروکشی است که در این پژوهش، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. با توجه به تحلیل سری زمانی، اوج بارش در هر دو منطقه در ماه‌های دی و بهمن بوده است، اما اوج دبی برای چشمه پیرغار در فروردین، معمولاً ۹/۲ و در چشمه دیمه معمولاً در اردیبهشت و گاهی خرداد، ۵/۵ مترمکعب بر ثانیه است؛ یعنی زمان پاسخ دبی نسبت به بارش در چشمه دیمه حدود ۳ ماه و در چشمه پیرغار حدود ۲ ماه است. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور برای به‌دست آوردن اطلاعات سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه استفاده شد (شکل ۱).

پس از جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز در مرحله بعد، ابتدا آمار توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار، تعیین میزان تغییرپذیری دبی چشمه مربوط به چشمه‌های کارستی مورد مطالعه با استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری شده محاسبه (جدول ۱) و سپس مراحل اصلی تجزیه و تحلیل‌های کمی که در زیر به آن پرداخته می‌شود، انجام شده است:



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی توده‌های کارستی مورد بررسی که روی آن سنگ‌های آهکی کارستی مشخص شده است (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شهر کرد؛ تهیه‌شده در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)



شکل ۲- نمودار سری زمانی داده‌های دبی و بارش روزانه چشمه‌های مورد مطالعه (از ۱ فروردین ۱۳۷۹ تا ۳۱ شهریور ۱۳۹۸)

ضریب تغییرپذیری چشمه، Q_{10} مقدار دبی در ۱۰ درصد زمان و Q_{90} مقدار دبی در ۹۰ درصد زمان است.

$$SVC = \frac{Q_{10}}{Q_{90}} \quad (2)$$

پارامتر ضریب تغییرات چشمه (SCVP؛ معادله (۳)) نسبت انحراف استاندارد به میانگین حسابی مقادیر دبی است. فلورا (۲۰۰۴) و اشپرینگر و همکاران (۲۰۰۴) محاسبه SCVP را براساس معادله زیر پیشنهاد دادند:

$$SCVP = \frac{\sigma}{\bar{Q}} \quad (3)$$

که در آن SCVP ضریب تغییرپذیری چشمه، σ انحراف استاندارد داده‌های دبی چشمه و \bar{Q} میانگین حسابی مقادیر دبی چشمه است.

محاسبه شاخص تغییرپذیری دبی چشمه

روش‌های ارائه‌شده برای طبقه‌بندی تغییرپذیری آبدهی چشمه‌ها براساس اندازه‌گیری‌های منظم پارامتر آماری دبی انجام شده است. انجمن هیدرومترولوژی اسلواکی، از سال ۱۹۶۰ مسئولیت مشاهدات بیش از ۱۳۰۰ چشمه را برای توصیف پایداری آبدهی آن‌ها برعهده داشت که برای این منظور از شاخص تغییرپذیری I_V استفاده کرده است؛ که ساده‌ترین اندازه‌گیری میزان تغییرپذیری آبدهی چشمه بوده و از نسبت حداکثر و حداقل دبی ثبت‌شده (Q_{max}/Q_{min}) محاسبه می‌شود (معادله (۱)).

$$I_V = \frac{Q_{max}}{Q_{min}} \quad (1)$$

ضریب تغییرپذیری چشمه (SVC؛ معادله (۲)) براساس نسبت دبی ۱۰ درصد به ۹۰ درصد بوده که در آن SVC

که در آن $q^b (m^3/s)$ تابع جریان پایه برون‌یابی شده در ابتدای منحنی فروکش و $q^i (m^3/s)$ تابع جریان بینابینی مطابق با شکل ۳ است. پارامتر $\alpha (day^{-1})$ ، نیز ضریب فروکش جریان پایه مطابق با روش مایلت است. $q^f (m^3/s)$ تابع جریان سریع و نشان‌دهنده اثر تغذیه و نفوذ سطحی از ناحیه غیراشباع کارست است که ممکن است از ناحیه اشباع نیز عبور کند. Q_0 ، مقدار متناظر جریان پایه در زمان شروع فروکش، $t = 0$ مطابق با شکل ۳ است. پارامتر η معکوس زمان شروع دبی پایه $(\frac{1}{t_i})$ یا طول عکس مدت زمان جریان سریع معرفی شده است. ضریب ε که از نظر ریاضی درجه تقعر منحنی جریان سریع را نیز نشان می‌دهد، بیانگر ضریب متوسط منطقه غیراشباع در نفوذ آب از سطح خاک به تشکیلات کارستی است و دارای بُعد عکس زمان $(\frac{1}{t})$ است. مقدار $\frac{(1-\eta.t)}{(1+\varepsilon.t)}$ که با تابع $y(t)$ نیز نشان داده می‌شود، دارای مقدار بین صفر و یک است. این تابع، بی‌بُعد بوده و مستقل از جریان چشمه است و می‌تواند برای مقایسه تغییرات جریان سریع چشمه در طول سال‌های مختلف به کار رود.

تجزیه و تحلیل منحنی فروکش چشمه با استفاده از روش مانجین

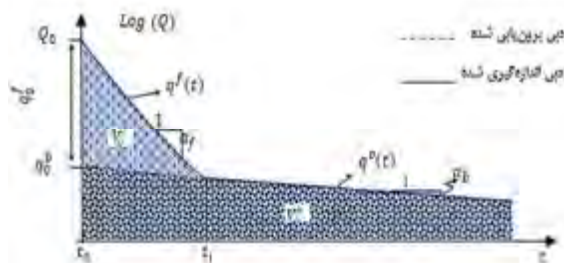
نخستین گام در شناخت یک آبخوان کارستی، بررسی رفتار هیدروگراف چشمه‌های تخلیه‌کننده آن آبخوان است (روحی و کلانتری، ۱۳۹۸). تحلیل منحنی فروکش هیدروگراف روش مهمی در بررسی‌های هیدرولوژیکی است که برای تفسیر ویژگی‌های آبخوان‌های کارستی استفاده می‌شود (کرسبیچ و بوناچی، ۲۰۱۰)؛ مانجین (۱۹۷۵) نشان داد که مجموع دبی چشمه کارستی در هر زمان $Q(t)$ ، در طول دوره فروکش برای منحنی‌های دو مؤلفه‌ای (جریان سریع و جریان پایه) می‌تواند به صورت معادله (۴) و منحنی‌های سه مؤلفه‌ای دارای جریان سریع، جریان بینابینی و جریان پایه به صورت معادله (۵) تعریف می‌شود:

$$Q(t) = q^f(t) + q^b(t) \quad (4)$$

$$Q(t) = q^f(t) + q^i(t) + q^b(t) \quad (5)$$

$$q^b(t) = q_0^b \times e^{-\alpha_b t} \quad (6)$$

$$q^f(t) = q_0^f \times y(t) ; y(t) = \frac{(1 - \eta \cdot t)}{(1 + \varepsilon \cdot t)} \quad (7)$$



شکل ۳- نمودار اجزای منحنی فروکش آب‌دهی چشمه کارستی در روابط مانجین

به‌عنوان حجم جریان سریع در نظر گرفته شد و در نرم‌افزار اکسل با انتگرال‌گیری از توابع دبی جریان‌های سریع، انتقالی و پایه نسبت به زمان، توابع حجم آب ذخیره‌شده در قسمت غیراشباع خاک و همچنین تشکیلات کارستی در هر زمان به صورت معادلات زیر محاسبه شد (مارسو، ۱۹۹۷):

برای محاسبه حجم ذخیره دینامیک جریان پایه (میلیون مترمکعب در سال):

$$V_t^b = \int_{t=0}^{t=+\infty} q_t^b = \int_{t=0}^{t=+\infty} q_0^b e^{-\alpha t} dt \quad (8)$$

$$= \frac{q_0^b}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad t > 0$$

محاسبه حجم ذخایر آب در قسمت غیراشباع خاک و تشکیلات کارستی

به‌منظور ارزیابی میزان توسعه کانال‌های جریان و شناخت رفتار تخلیه هر آبخوان، تعداد دوره‌های فروکش براساس ضرایب فروکش رده‌بندی و همچنین حجم جریان سریع، انتقالی و پایه به‌وسیله جداسازی هیدروگراف محاسبه شد. جداسازی هیدروگراف پایه برای هر سال آبی با استفاده از روش گرافیکی دبی ثابت انجام شد. مساحت زیر منحنی دبی پایه به‌عنوان حجم جریان پایه، مساحت بین منحنی دبی پایه و منحنی دبی انتقالی به‌عنوان حجم جریان بینابینی و مساحت بین منحنی دبی انتقالی و دبی کل

که در آن Q ، متوسط دبی خروجی از چشمه طی دوره فروکش و t_{rec} ، مدت زمان دوره فروکش بر حسب روز است. برای محاسبه پارامتر k آبخوان، مقادیر V_{trans} و V_{dyn} برای منحنی فروکش هر سال محاسبه شده و از تقسیم این دو مقدار، پارامتر k برای سال مورد نظر به دست می‌آید (مارسو، ۱۹۹۷ و گراوند و همکاران، ۲۰۲۲):

$$k = \frac{V_{dyn}}{V_{trans}} \quad (15)$$

پارامتر i آبخوان، طبق تعریف مانجین، همان مقدار تابع بدون بُعد (Y_t) در معادله (۷) به ازای $t = 2 \text{ day}$ است. به عبارتی دیگر $i = Y_{t=2}$.

نتایج و بحث

پایش آبدی چشمه‌ها برای تعیین تغییرپذیری کمی آن‌ها در طول مدت زمان مورد استفاده، قابلیت اعتبار آن‌ها را به عنوان منابع آب قابل اعتماد نشان می‌دهد. آبدی چشمه‌ها هنگام تغذیه و تخلیه شدن طبیعی مخزن تغییر می‌کند. فراوانی و شدت این تغییرات به هندسه آبخوان و خصوصیات فیزیکی آن بستگی دارد و معمولاً تغییرات آبدی و تغذیه چشمه‌های کارستی ناگهانی و قابل توجه است (استوانویچ، ۲۰۱۵). براساس استاندارد فنی اسلوواکی STN 751520 (SÚTN, 2009) که پایداری دبی چشمه را با توجه به شاخص تغییرپذیری (I_v) و ضریب تغییرپذیری (SVC) و فلورا (۲۰۰۴) و اشپیرینگر و همکاران (۲۰۰۴) که طبقه‌بندی چشمه‌ها را با استفاده از ضریب تغییرپذیری SCVP نشان داده‌اند (جدول ۱) و شاخص‌های تغییرپذیری (I_v و SVC) محاسبه شده برای چشمه‌های مورد مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که آبدی چشمه دیمه از درجه اعتمادپذیری بالاتری برخوردار است و تغییرپذیری کمتری نسبت به چشمه پیرگار دارد (جدول ۲). چشمه پیرگار که آبدی آن تغییرپذیری بیشتری دارد، توانایی بالاتری برای نشان دادن ویژگی‌های انتقال آب به آبخوان و پاسخ سریع سیستم به تغذیه دارد (استوانویچ، ۲۰۱۵). همچنین آمار توصیفی پارامترهای اندازه‌گیری شده مربوط به چشمه‌های کارستی مورد مطالعه برای یک دوره آماری ۲۰ ساله محاسبه و همان‌طور که در جدول ۲، نشان داده شده است حداقل دبی برای چشمه پیرگار و دیمه به ترتیب ۰/۰۴۳ و ۱/۷۲، حداکثر دبی در چشمه پیرگار ۵۹/۹ و در چشمه دیمه ۵/۹۱ مترمکعب بر ثانیه است. همان‌طور که

حجم ذخیره دینامیک جریان بینابینی (برحسب میلیون مترمکعب) برای توابع خطی به صورت معادله (۹) و برای توابع نمایی به صورت معادله (۱۰) است:

$$V_t^i = (\Delta t_f + \Delta t_i) \times q_0^i \times \frac{1}{2} \times 86400 \quad (9)$$

$$V_t^i = \int_{t=0}^{t=\Delta t_f + \Delta t_i} q_t^i \times e^{-\alpha_i t} dt = \frac{q_0^i}{-\alpha_i t} \times (e^{-\alpha_i(\Delta t_f + \Delta t_i)} - 1) \times 86400 \quad (10)$$

همچنین به منظور محاسبه حجم ذخیره دینامیک جریان سریع (میلیون مترمکعب) برای توابع خطی از معادله (۱۱) و برای توابع نمایی از معادله (۱۲) استفاده می‌شود:

$$V_t^f = \Delta t_f \times q_0^f \times \frac{1}{2} \times 86400 \quad (11)$$

$$V_t^f = \int_{t=0}^{t=\Delta t_f} q_t^f \times e^{-\alpha_f t} dt = \frac{q_0^f}{-\alpha_f t} \times (e^{-\alpha_f \times \Delta t_f} - 1) \times 86400 \quad (12)$$

طبقه‌بندی آبخوان‌های کارستی

مانجین در سال ۱۹۷۵ یک روش کمی برای طبقه‌بندی آبخوان‌های کارستی، براساس دو پارامتر k که نشان‌دهنده درجه توسعه‌یافتگی منطقه نشستی کارست است و i که شرایط نفوذ آب از سطح به آبخوان را نمایش می‌دهد، تعریف کرد. حد تابع معادله (۹) در بی‌نهایت، مقدار حجم ذخیره دینامیکی در منطقه نشستی (تشکیلات کارست را به دست می‌دهد (مارسو، ۱۹۹۷):

$$V_{dyn} = \lim_{t \rightarrow +\infty} v_t^b = \quad (13)$$

$$\frac{q_0^b}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) = \lim_{t \rightarrow +\infty} C \frac{q_0^b}{\alpha}$$

که در آن V_{dyn} ، حجم ذخیره در ابتدای جریان پایه بر حسب متر مکعب، ضریب c ، ضریب تبدیل و برابر با ۸۶۴۰۰ است. q_0^b دبی در ابتدای منحنی جریان پایه بر حسب متر مکعب بر ثانیه یا جریان چشمه در زمان $t = t_0$ و α_b ، ضریب فروکش جریان پایه بر حسب $(day)^{-1}$ است. هرچه ذخیره نشستی (V_{dyn}) بیشتر باشد، منطقه نشستی آبخوان کارستی نقش بیشتری در تنظیم دبی خروجی از چشمه خواهد داشت. از طرفی دیگر حجم جریان انتقالی آبخوان کارستی (V_{trans}) را می‌توان با انتگرال‌گیری از دبی جریان خروجی چشمه (معادله (۵)) نسبت به زمان برای مدت یک سال محاسبه کرد. به عبارت دیگر V_{trans} ، حجم خروجی از چشمه در هر سال است که به سادگی از معادله زیر قابل محاسبه است:

$$V_{trans} = Q \times t_{rec} \times 86400 \quad (14)$$

تخلیه آب از مجاری، شکستگی‌ها و درزه‌های ریز است (جریان انتقالی) و α_b که کمترین مقدار را دارد نشان‌دهنده جریان افشان (جریان پایه) است (شکل ۵). میانگین مقادیر ضریب α محاسبه‌شده چشمه پیرغار برای جریان پایه، انتقالی و سریع به ترتیب برابر با ۰/۰۰۷، ۰/۰۳۸ و ۰/۱۲۵ است. همچنین میانگین مقادیر ضریب α برای چشمه دیمه نیز برابر با ۰/۰۰۴ برای جریان پایه، ۰/۰۱۶ برای جریان انتقالی و ۰/۰۴۲ برای جریان سریع است. با توجه به اینکه هر چه ضریب α چشمه‌ها بیشتر باشد، شیب منحنی فروکش جریان بیشتر و در نتیجه سرعت تأثیرپذیری دبی جریان از بارش و میزان تخلخل و کارست‌شدگی حوضه بیشتر است و هرچه ضریب فروکش پایین‌تر باشد، کارست‌شدگی حوضه کمتر است (کرسچ و استوانویچ، ۲۰۱۰). بنابراین کارستی چشمه پیرغار نسبت به چشمه دیمه دارای توسعه‌یافتگی بیشتری است. همچنین درجه کارستی‌شدگی در مناطق تغذیه چشمه‌ها براساس پارامترهای منحنی فروکش به روش ملیک و وُجکوا (۲۰۱۲) نشان می‌دهد که درجه توسعه‌یافتگی چشمه پیرغار و چشمه دیمه به ترتیب برابر با ۷ و ۵/۵ است. چشمه دیمه دارای یک مؤلفه جریان خطی و دو مؤلفه جریان نمایی بوده و تحت تأثیر مجاری کوچک به هم متصل تخلیه می‌شود. چشمه پیرغار دارای رژیم جریان ترکیبی از یک مؤلفه جریان نمایی و دو مؤلفه جریان خطی است که توسعه کارستی‌شدگی آبخوان به واسطه گسل‌های بزرگ تکتونیکی آزاد بوده و توسط کانال‌های کارستی تخلیه می‌شود (جدول ۵).

حدود تغییرات حجم آب ذخیره‌شده دینامیکی و انتقالی برای دوره‌های مختلف فروکش جریان طبق $luhngjz$ (۱۳) تا (۱۵) به ترتیب برای چشمه پیرغار در محدوده $12.75 < v_{day} < 53.13$ میلیون مترمکعب و $58.8 < v_{trans} < 287.26$ میلیون مترمکعب در محدوده $19.32 < v_{trans} < 52.7$ میلیون مترمکعب به دست آمد. به‌طور متوسط حدود ۷۳ درصد از حجم آب ذخیره در کل سیستم آبخوان کارستی چشمه پیرغار به‌صورت انتقالی از مظهر چشمه خارج می‌شود که این رقم برای چشمه دیمه کمتر از ۴۵ درصد است و مابقی در تشکیلات کارستی باقی می‌ماند. بیشترین حجم انتقالی آب در آبخوان چشمه پیرغار مربوط به دوره فروکش ۱۳۹۸/۲/۵ تا ۱۳۹۸/۶/۱۰

مشخص شد، مقدار دبی در ۱۰ درصد زمان یا Q_{10} در چشمه پیرغار بیشتر از چشمه دیمه است، اما برعکس مقدار دبی در ۹۰ درصد زمان یا Q_{90} در چشمه دیمه بیشتر از چشمه پیرغار است و انحراف معیار داده‌های دبی برای چشمه پیرغار نیز بیشتر از چشمه دیمه است که همه این عوامل نشان‌دهنده درجه پایداری دبی چشمه دیمه و تغییرپذیری بالاتر چشمه پیرغار است.

برای آشکارسازی بیشتر منحنی تداوم جریان^۱ (FDC) برای این دو چشمه نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. این منحنی معیاری از دامنه و تغییرپذیری جریان آبراهه یا دبی چشمه است و درصدی از زمان را نشان می‌دهد که در طی آن مقدار مشخصی از دبی از یک مکان معین فراتر می‌رود (فاستر، ۱۹۲۴ و ۱۹۳۴؛ سرسی، ۱۹۵۹)؛ و اطلاعات مهمی درباره رژیم جریان چشمه‌های کارستی ارائه می‌دهد. مقدار دبی بین Q_{10} تا Q_{70} (یعنی مقدار دبی در ۱۰ تا ۷۰ درصد زمان) می‌تواند در محدوده دبی متوسط باشد؛ اما مقدار دبی از Q_{70} تا Q_{100} دوره‌های کم‌آبی هستند و با خشکسالی‌های دوره‌های کم‌آبی روبه‌رو خواهیم شد؛ به‌همین دلیل سیستم‌های ذخیره آب به دلیل کمبود جریان شروع به خشک‌شدن می‌کنند؛ بنابراین هنگام نیاز منابع آبی به آب و تأمین مقدار آب زیرزمینی موجود باید این مقادیر را در نظر گرفت. مقدار دبی قابل بهره‌برداری براساس قوانین و تجارب به‌عنوان دبی‌های با احتمال وقوع ۷۰-۹۰ درصد یعنی Q_{70} تا Q_{90} ، معمولاً Q_{80} برای تأمین تضمینی آب در دوره مربوط در نظر گرفته می‌شود (استوانویچ، ۲۰۱۵).

برای طبقه‌بندی آبخوان کارستی چشمه‌های پیرغار و دیمه به روش مانجین و با کمک معادلات (۱۳) تا (۱۵) مقادیر ضریب فروکش جریان (α) حجم ذخیره دینامیکی V_{dyn} و حجم ذخیره آب در بخش نشستی آبخوان V_{trans} ، پارامتر η ، ضریب تعقر منحنی جریان سریع (۸) و دبی اولیه جریان پایه (q_0^b)، دبی اولیه جریان انتقالی (q_0^l)، دبی اولیه جریان سریع (q_0^f)، برای دوره‌های فروکش سال‌های مختلف برای چشمه‌های مورد مطالعه محاسبه و نتایج آن در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. منحنی فروکش چشمه‌ها از سه ضریب α_f و α_b تشکیل شده‌اند که در آن‌ها α_f نشان‌دهنده تخلیه سریع از مجاری کانالی و حفره‌ای است و مقدار عددی آن بزرگ‌تر از α_b بوده و نشان‌دهنده

از توسعه یافتگی کمتر کارست منطقه باشد، یا به عبارت دیگر توسعه کمتر کارست منجر به جابه‌جایی آهسته آب در آبخوان کارستی و بالارفتن حجم ذخیره دینامیکی می‌شود و برعکس (حاتمی‌فرد، ۱۳۹۷). از همین رو چون ذخیره دینامیکی چشمه دیمه نسبت به چشمه پیرغار بیشتر و شبکه کارستی آن به خوبی توسعه نیافته است، کمتر تحت تأثیر بارش قرار می‌گیرد و آب زیرزمینی نیاز به زمان بیشتری برای جابه‌جایی در آبخوان دارد.

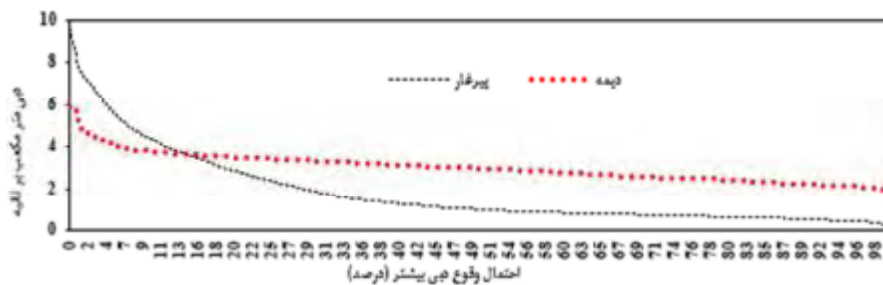
و برابر با ۵۸/۸ میلیون متر مکعب است که نسبت به دوره فروکش سال‌های مورد بررسی بعد از سال ۱۳۹۵ کمترین طول دوره فروکش (۱۳۰ روز) را داراست. همچنین بیشترین حجم انتقالی آب در آبخوان چشمه دیمه مربوط به دوره فروکش ۱۳۸۴/۲/۳ تا ۱۳۸۴/۱۱/۱۶ و برابر با ۵۲/۷ میلیون متر مکعب است که نسبت به دوره فروکش سال‌های مورد بررسی بیشترین طول دوره فروکش (۲۸۹ روز) را داراست (جدول ۶). بالابودن حجم ذخیره دینامیکی یک چشمه، در کنار دیگر عوامل می‌تواند حاکی

جدول ۱- طبقه‌بندی درجه پایداری دبی چشمه براساس شاخص‌های تغییرپذیری دبی چشمه

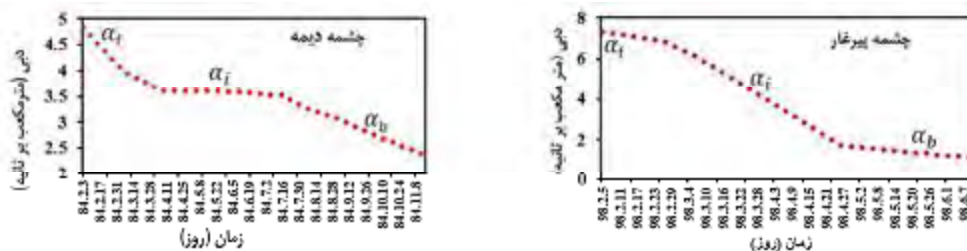
طبقه‌بندی چشمه‌ها با استفاده از ضریب SCVP (فلورا، ۲۰۰۴؛ اشپرینگر و همکاران، ۲۰۰۴)		طبقه‌بندی چشمه‌ها براساس مقدار SVC یا I _v (سوشن، ۲۰۰۹)	
طبقه‌بندی چشمه‌ها	ضریب تغییرپذیری (SCVP)	طبقه‌بندی چشمه‌ها	مقدار SVC یا I _v
کم	۰ - ۴۹	بسیار پایدار	۱ - ۳
متوسط	۵۰ - ۹۹	پایدار	۳/۱ - ۱۰
زیاد	۱۰۰ - ۱۹۹	ناپایدار	۱۰/۱ - ۲۰
بسیار زیاد	> ۲۰۰	بسیار ناپایدار	۲۰/۱ - ۱۰۰
-	-	به شدت ناپایدار	> ۱۰۰

جدول ۲- آمار توصیفی پارامترهای اندازه‌گیری شده در چشمه‌های کارستی مورد مطالعه (واحد تمام پارامترها مترمکعب بر ثانیه است).

پارامتر	Q _{min}	Q ₁₀	Q ₉₀	Q _{Average}	Q _{STDEV}	I _v	SVC	SCVP
پیرغار	۰/۰۴	۴/۲۵	۰/۵۵	۱/۸۱	۱/۷۳	۲۲۳	۷/۶۷	۰/۹۵
دیمه	۱/۷۲	۳/۷۵	۲/۲۳	۳/۰۱	۰/۶۶	۳/۴۳	۱/۶۸	۰/۲۲



شکل ۴- منحنی تداوم جریان (FDC) برای چشمه‌های کارستی پیرغار و دیمه



شکل ۵- نمایش نمونه‌ای از جریان سه مؤلفه‌ای منحنی فروکش چشمه‌ها

جدول ۳- نتایج تحلیل دوره‌های مختلف فروکش چشمه پیرگار

پارامترهای روش مانجین ۱۹۷۵		جریان سریع		جریان انتقالی		جریان پایه		سال
ϵ (day ⁻¹)	η (day ⁻¹)	q_f^f (m ³ /s)	α_f (day ⁻¹)	q_o^i (m ³ /s)	α_i (day ⁻¹)	q_o^b (m ³ /s)	α_b (day ⁻¹)	
۰/۰۱	۰/۰۵	۱/۶	۰/۰۷	۳/۸	۰/۰۵	۰/۶۹	۰/۰۰۳	۱۳۷۹
۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۹۱	۰/۰۴	۱/۹۸	۰/۰۳	۰/۹۵	۰/۰۰۴	۱۳۸۰
۰/۰۰	۰/۲	۰/۲	۰/۴۱	۳/۴۸	۰/۰۴	۵/۳۸	۰/۰۱۵	۱۳۸۱
۰/۰۱	۰/۰۲	۳/۱	۰/۰۶	۳/۶۵	۰/۰۳	۵/۵۳	۰/۰۰۵	۱۳۸۲
۰/۰۰	۰/۰۲	۳/۲۷	۰/۰۸	۲/۳۳	۰/۰۳	۲/۲۶	۰/۰۰۶	۱۳۸۴
۰/۱۲	۰/۰۸	۳/۴۹	۰/۳	۳/۸۶	۰/۰۶	۲/۴	۰/۰۰۵	۱۳۸۵
۰/۰۰	۰/۰۴	۲/۸۹	۰/۱	۲/۳۱	۰/۰۳	۲/۰۳	۰/۰۰۷	۱۳۸۶
۰/۰۴	۰/۰۳	۲/۵۴	۰/۰۸	۱/۰۶	۰/۰۱	۱/۲۹	۰/۰۰۷	۱۳۸۷
۰/۰۰	۰/۰۳	۵/۹۶	۰/۱۲	۱/۴۵	۰/۰۲	۲/۲۵	۰/۰۰۷	۱۳۸۹
۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۴۴	۰/۰۸	۳/۱۸	۰/۰۴	۱/۹۲	۰/۰۰۷	۱۳۹۰
۰/۰۷	۰/۱۳	۰/۷۶	۰/۰۶	۳/۷۶	۰/۰۵	۱/۳۸	۰/۰۰۵	۱۳۹۱
۰/۰۰	۲/۰۲	۱/۳	۰/۰۲	۱/۴	۰/۰۱	۲/۴۳	۰/۰۱۲	۱۳۹۲
۰/۰۰	۰/۰۹	۱/۳۵	۰/۱۲	۰/۵۹	۰/۰۱	۲/۹۱	۰/۰۱۳	۱۳۹۳
۰/۰۰	۰/۰۶	۲/۰۲	۰/۱۲	۲/۷۶	۰/۰۶	۱/۹۶	۰/۰۰۶	۱۳۹۴
۰/۰۰	۰/۱۳	۱/۲۹	۰/۱۶	۱/۰۰	۰/۰۵	۲/۰۱	۰/۰۰۷	۱۳۹۵
۰/۰۰	۰/۱۲	۱/۱۹	۰/۱۴	۱/۱۶	۰/۰۲	۰/۶۳	۰/۰۰۳	۱۳۹۶
۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۷۳	۰/۱۴	۲/۱۹	۰/۰۴	۰/۸۸	۰/۰۱۱	۱۳۹۷
۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۳۲	۰/۰۸	۳/۶۷	۰/۰۲	۳/۹۲	۰/۰۱	۱۳۹۸

جدول ۴- نتایج تحلیل دوره‌های مختلف فروکش چشمه دیمه

پارامترهای روش مانجین ۱۹۷۵		جریان سریع		جریان انتقالی		جریان پایه		سال
ϵ (day ⁻¹)	η (day ⁻¹)	q_f^f (m ³ /s)	α_f (day ⁻¹)	q_o^i (m ³ /s)	α_i (day ⁻¹)	q_o^b (m ³ /s)	α_b (day ⁻¹)	
۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۷۳	۰/۰۴	۲/۴۸	۰/۰۰۳	۱۳۸۰
۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۷۸	۰/۰۴	۰/۲۷	۰/۰۱	۳/۳۴	۰/۰۰۷	۱۳۸۱
۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۴۴	۰/۰۴	۳/۳	۰/۰۰۵	۱۳۸۲
۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۶۲	۰/۰۱	۳/۳۱	۰/۰۰۱	۱۳۸۳
۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۳۹	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۱	۳/۳۴	۰/۰۰۲	۱۳۸۴
۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۱/۱	۰/۰۲	۳/۸۳	۰/۰۰۴	۱۳۸۵
۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۹	۰/۰۳	۳/۳۴	۰/۰۰۷	۱۳۸۶
۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۵۷	۰/۰۳	۰/۴۹	۰/۰۰۸	۲/۴۹	۰/۰۰۶	۱۳۸۷
۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۲۸	۰/۰۵	۰/۵۹	۰/۰۱	۰/۲۹	۰/۰۰۵	۱۳۸۹
۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۳۳	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۰۰۳	۳	۰/۰۰۲	۱۳۹۰
۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۵۵	۰/۰۱	۰/۱۸	۰/۰۱	۲/۴۳	۰/۰۰۶	۱۳۹۱
۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۶	۰/۰۲	۰/۶۹	۰/۰۰۹	۲/۱	۰/۰۰۷	۱۳۹۲
۰/۰۰	۰/۱۷	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۴۴	۰/۰۱	۳/۱۷	۰/۰۰۴	۱۳۹۳
۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۰۴	۴/۶۶	۰/۰۰۳	۱۳۹۴
۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۵۳	۰/۰۲	۰/۲۹	۰/۰۱	۳/۰۷	۰/۰۰۳	۱۳۹۵
۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۳۸	۰/۰۲	۰/۸۷	۰/۰۱	۲/۵	۰/۰۰۳	۱۳۹۶
۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۰۰۵	۳/۲۴	۰/۰۰۳	۱۳۹۷
۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۲۷	۰/۰۸	۱/۸	۰/۰۴	۳/۸۴	۰/۰۰۴	۱۳۹۸

جدول ۵- درجه کارستی‌شدگی چشمه‌های پیرغار و دیمه در مناطق تغذیه براساس پارامترهای منحنی فروکش (ملیک و وُجْکوا، ۲۰۱۲)

ویژگی‌های پارامترهای منحنی فروکش (میانگین‌گیری‌شده از ۱۸ منحنی)	ویژگی‌های درجه کارستی‌شدگی	مشخصه معادله منحنی فروکش (میانگین‌گیری‌شده از ۱۸ منحنی)	نوع مؤلفه جریان آب زیرزمینی	درجه کارستی‌شدگی	چشمه
$\alpha_b = 0.004$ $\alpha_i = 0.016$ $\alpha_f = 0.042$	شکستگی وسیع با درز و شکاف‌های غالباً آزاد و نیمه‌آزاد کارستی‌شده و کارستی‌نشده	$y = 3.09e^{-0.004t}$ $y = -0.016t + 0.59$ $y = 0.292e^{-0.042t}$	رژیم جریان پیچیده، ترکیبی از یک مؤلفه جریان مدل خطی و دو مؤلفه جریان نمایی.	۵/۵	دیمه
$\alpha_b = 0.007$ $\alpha_i = 0.038$ $\alpha_f = 0.125$	توسعه کارستی‌شدگی آبخوان به واسطه گسل‌های بزرگ تکتونیکی توأم با مجاری بزرگ کارستی	$y = 2.07e^{-0.007t}$ $y = -0.038t + 2.42$ $y = -0.125t + 1.85$	رژیم جریان ترکیبی از یک مؤلفه جریان نمایی و دو تا سه مؤلفه جریان خطی است.	۷	پیرغار

جدول ۶- نتایج تحلیل حجم آب ذخیره‌شده دینامیکی و انتقالی برای دوره‌های مختلف فروکش چشمه‌های پیرغار و دیمه

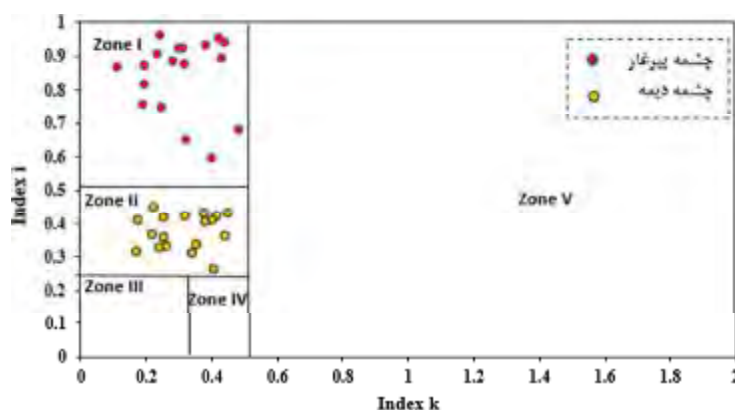
چشمه پیرغار				چشمه دیمه			
سال	Δt (day)	V_{dyn} (MCM)	V_{trans} (MCM)	سال	Δt (day)	V_{dyn} (MCM)	V_{trans} (MCM)
۱۳۷۹	۱۵۸	۳۱/۰۲	۲۲/۸۶	۱۳۸۰	۱۰۱	۶۴/۹۴	۲۳/۱۶
۱۳۸۰	۱۸۸	۲۵/۸۲	۱۵/۱۹	۱۳۸۱	۱۵۱	۴۳/۸۵	۴۵/۰۷
۱۳۸۱	۱۵۶	۴۴/۲۱	۴۶/۹۷	۱۳۸۲	۱۱۷	۵۸/۹۰	۳۵/۲۱
۱۳۸۲	۲۰۸	۴۸/۷۴	۳۲/۸۱	۱۳۸۳	۶۶	۲۸۷/۲۶	۱۹/۳۱
۱۳۸۴	۱۹۴	۴۶/۷۸	۳۴/۵۳	۱۳۸۴	۲۸۸	۱۴۷/۵۶	۵۲/۷
۱۳۸۵	۲۰۰	۵۳/۱۴	۳۲/۷۳	۱۳۸۵	۱۱۹	۸۵/۳۶	۴۱/۲۱
۱۳۸۶	۱۸۰	۳۴/۳۵	۲۸/۰۱	۱۳۸۶	۱۴۰	۴۳/۴۶	۴۵/۴۷
۱۳۸۷	۱۱۶	۲۱/۶	۲۲/۳۹	۱۳۸۷	۱۷۶	۳۸/۲۹	۳۷/۶۷
۱۳۸۹	۱۵۷	۴۲/۱۵	۳۴/۳۶	۱۳۸۹	۱۰۹	۴۱/۵۳	۲۳/۴۸
۱۳۹۰	۱۹۲	۳۳/۰۷	۲۷/۸۹	۱۳۹۰	۱۵۷	۱۳۰/۲۷	۳۶/۵۵
۱۳۹۱	۱۶۴	۳۵/۳۴	۲۶/۶۳	۱۳۹۱	۱۵۳	۳۷/۵	۱۶/۳۴
۱۳۹۲	۱۶۹	۲۶/۷۳	۲۴/۳۶	۱۳۹۲	۱۶۶	۲۹/۵۲	۳۲/۸۸
۱۳۹۳	۱۶۹	۲۱/۶۷	۱۹/۶	۱۳۹۳	۱۷۵	۷۰/۳۲	۴۹/۱۶
۱۳۹۴	۱۳۴	۳۴/۸۲	۲۹/۴۷	۱۳۹۴	۱۳۵	۱۳۴/۳۳	۴۵/۵۱
۱۳۹۵	۸۵	۲۷/۱۳	۱۸/۶۷	۱۳۹۵	۱۲۶	۷۲/۸۹	۳۳/۰۳
۱۳۹۶	۱۰۱	۲۱/۱۹	۱۳/۹۲	۱۳۹۶	۱۴۱	۷۶/۶۳	۳۸/۹۹
۱۳۹۷	۱۶۱	۱۹/۴۹	۱۲/۷۵	۱۳۹۷	۱۰۸	۹۳/۵۸	۲۶/۴۹
۱۳۹۸	۱۳۰	۶۷/۳۵	۵۸/۷۶	۱۳۹۸	۱۳۵	۸۹/۵۹	۴۴/۷۶

Δt : طول تداوم جریان بر حسب روز، V_{dyn} : حجم آب ذخیره‌شده دینامیکی و V_{trans} : حجم آب انتقالی بر حسب میلیون مترمکعب

توسعه‌یافتگی بالا و مخازن مختلفی است. در زون دو: $k < 0.5$ و $0.25 < i < 0.5$: وجود سیستم مجرای در بخش بالایی (منطقه نفوذ) آبخوان کارستی حاکمیت داشته و نسبت به بخش‌های نزدیک به خروجی چشمه، توسعه‌یافته‌تر است. در زون سه: $k < 0.1$ و $0 < i < 0.25$: آبخوان دارای سیستم توسعه‌یافته کارستی، هم در بخش بالایی (نفوذی) و هم در بخش نشتی (نزدیک به

براساس مانجین (۱۹۷۵) حدود تغییرات پارامتر k و i بین صفر و یک است. هرچه پارامتر i به صفر نزدیک شود، نفوذ آب از سطح زمین سریع‌تر و هرچه به عدد یک نزدیک شود، سرعت تغذیه آب به درون آبخوان آهسته‌تر است. براساس مقادیر مختلف پارامترهای k و i ، مانجین پنج ناحیه متمایز را تعریف کرده است: در زون یک: $k < 0.5$ و $i > 0.5$: سیستم آبخوان کارستی پیچیده بوده و دارای

منطقه اشباع آبخوان فعالیت داشته باشد. به این نوع آبخوان‌ها، سیستم‌های غیرفعال از نظر کارستی‌شدن نیز می‌گویند و دارای یک ساختار زهکشی پیچیده با زمان تأخیر بسیار طولانی هستند. میانگین پارامترهای k و i در دوره‌های مختلف فروکش برای چشمه پیرغار به ترتیب برابر با $0/194$ و $0/845$ و برای چشمه دیمه برابر با $0/327$ و $0/500$ است که طبق طبقه‌بندی مانجین و براساس شاخص‌های k و i ، محاسبه شده، چشمه پیرغار در زون یک و چشمه دیمه در زون دو قرار دارند (شکل ۶).



شکل ۶- طبقه‌بندی سیستم‌های کارست مورد مطالعه که براساس تحلیل منحنی‌های فروکش جریان چشمه‌ها و محاسبه شاخص‌های k و i مانجین (۱۹۷۵) به دست آمده است.

داشته و احتمالاً تخلخل آن بیشتر از نوع ماتریکسی است. نتایج این پژوهش در مقایسه با مطالعات مذکور در یک راستا بوده و توسعه‌یافتگی بیشتر توده کارستی پیرغار را نسبت به دیمه نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

شکل و روند فروکش، اطلاعات مهمی را درباره ذخیره و ویژگی‌های هیدروژئومورفولوژیکی توده آبخوان تأمین‌کننده چشمه، فراهم می‌آورد. در این پژوهش به منظور بررسی توسعه‌یافتگی توده‌های کارستی چشمه‌های پیرغار و دیمه، طبقه‌بندی آبخوان کارستی و شبیه‌سازی منحنی فروکش آبدی چشمه کارستی از روش مانجین استفاده شد. با توجه به تحلیل سری‌های زمانی بارش و دبی، زمان پاسخ دبی نسبت به بارش در چشمه دیمه حدود ۳ ماه و در چشمه پیرغار حدود ۲ ماه است که این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده توسعه بهتر کارست این منطقه نسبت به چشمه دیمه باشد. مقادیر

خروجی) است؛ به عبارت دیگر در تمام بخش آبخوان کارست، سیستم مجرای وجود دارد. در زون چهار: $0.1 < k < 0.5$ و $0 < i < 0.25$: سیستم آبخوان دارای منطقه نفوذی با درجه کارستی بالا و یک شبکه مجرای گسترده است که به ناحیه نشی منتهی می‌شود. در زون پنج: $k > 0.5$ سیستم آبخوان کارستی منطقه نشی دارای عمق زیاد و درز و شکاف فراوان به صورت جزء یا تماماً در زیر رسوبات با نفوذپذیری کم محصور شده و توسعه کارست آن عمدتاً مربوط به دوران کارستی‌زایی قبلی است و ممکن است شبکه‌های مجرای پالئو در

با توجه به مطالعات انجام‌شده در مناطق مورد ارزیابی، مانند محمدی و ریاحی‌پور (۱۳۹۰) که توابع خود همبستگی، چگالی طیفی، عملکرد تابع همبستگی متقابل و ماندگاری اثر بارندگی را براساس آنالیز سری‌های زمانی برای چشمه‌های پیرغار، برم، لردگان و دیمه انجام دادند. نتیجه نشان داد که در سیستم‌های کارستی مورد مطالعه، رژیم‌های مختلف جریان وجود داشته و سیستم کارستی پیرغار نسبت به چشمه‌های برم لردگان و دیمه از توسعه کامل‌تر و پیشرفته‌تری برخوردار است. همچنین مطالعه مالی و محمدی (۱۳۹۲) با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی، بالابودن مقدار ضرایب فروکش چشمه پیرغار نسبت به دیمه و بررسی شکل هیدروگراف چشمه، بالابودن تغییرات نسبت‌های آبدی بیشینه و کمینه و برعکس را در چشمه پیرغار نسبت به چشمه دیمه نشان داد. این پژوهشگران بیان کردند که سیستم آبخوان چشمه پیرغار نسبت به چشمه دیمه از جریان سریع و کارستی‌شدن بیشتری برخوردار است؛ اما چشمه دیمه، سیستم افشان

منابع

- ضریب α محاسبه شده برای چشمه‌ها براساس روش ملیک و وُجکوا (۲۰۱۲) نشان داد که درجه توسعه‌یافتگی برای چشمه پیرغار و چشمه دیمه به ترتیب برابر با $5/5$ و $5/5$ است. چشمه دیمه دارای یک مؤلفه جریان خطی و دو مؤلفه جریان نمایی بوده و عمدتاً تحت تأثیر شکاف‌های متصل به هم تخلیه می‌شود و کمتر از سیستم مجاری تأثیر می‌پذیرد. چشمه پیرغار دارای رژیم جریان ترکیبی از یک مؤلفه جریان نمایی و دو مؤلفه جریان خطی است که توسعه کارستی‌شدگی آبخوان به واسطه گسل‌های بزرگ تکنونیک‌ی آزاد بوده و توسط کانال‌های کارستی تخلیه می‌شود. برآورد حجم ذخیره دینامیک به روش مانجین نیز نشان داد که میانگین حجم کلی ذخیره دینامیک آبخوان چشمه‌های پیرغار و دیمه در دوره مورد بررسی به ترتیب برابر با $33/75$ و $86/8$ میلیون مترمکعب در سال بوده که ۲۷ درصد از کل حجم ذخیره دینامیک آبخوان چشمه پیرغار مربوط به جریان پایه و ۷۳ درصد آن مربوط به جریان انتقالی بوده؛ اما برای چشمه دیمه کمتر از ۴۵ درصد از کل حجم ذخیره دینامیک آبخوان به صورت انتقالی از مظهر چشمه خارج شده و مابقی، یعنی تقریباً ۵۵ درصد دیگر در تشکیلات کارستی باقی می‌مانند. بالابودن میزان جریان انتقالی چشمه پیرغار را می‌توان به تغذیه نقطه‌ای و سیستم مجاری کارست منطقه نسبت داد. از طرفی زمین‌شناسی، تکنونیک و وجود گسل‌های فراوان در منطقه، ارتباط آبخوان‌های آهکی کرتاسه و ائوسن الیگوسن، شرایط را برای گسترش کارست در منطقه چشمه پیرغار و همچنین نقش سازنده‌های غیرکربناته در انتقال آب در منطقه چشمه دیمه فراهم کرده است. همچنین با توجه به شاخص‌های k و i محاسبه شده، چشمه پیرغار در زون یک و چشمه دیمه در زون دو این طبقه‌بندی واقع شده‌اند که براین اساس چشمه پیرغار دارای سیستم آبخوان کارستی پیچیده و توسعه‌یافتگی بالا و مخازن مختلف است. نتایج این پژوهش که صرفاً براساس تحلیل هیدروگراف خروجی چشمه‌های کارستی انجام شده است، می‌تواند اطلاعات کمی مهمی را از ذخایر دینامیک، درجه توسعه‌یافتگی، زمان مرگ چشمه و نوع رژیم جریان آبخوان‌های کارستی در شرایط فقدان/کمبود داده‌های هیدروژئولوژیکی، اکتشافی و ردیابی، ارائه کند.
- (۱) روحی ح. و کلانتری ن. ۱۳۹۸. استفاده از هیدروگراف چندساله به منظور مقایسه رژیم هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی تاقدیس کوه سفید، استان خوزستان، هیدروژئولوژی. ۴(۱): ۲۵-۱۴.
- (۲) ریاحی پور م. و خلیلی خ. ۱۳۹۱. بررسی و مقایسه هیدروژئولوژی چشمه‌های کارستی معرف در استان چهارمحال و بختیاری، شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شیراز.
- (۳) فرزین م. ۱۳۹۸. کارست شناسی و اهمیت آن در توسعه پایدار زاگرس، دومین همایش ملی منابع طبیعی و توسعه پایدار در زاگرس، شهرکرد.
- (۴) کریمی وردنجانی ح. چیت‌سازان م. فاضلی‌فارسانی ع. صبا ع. و کریمی ح. ۱۳۹۴. تعیین حریم حفاظتی چشمه کارستی دیمه با استفاده از ردیابی رنگی. سی و چهارمین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، ایران، تهران.
- (۵) کرمی غ. ح. باقری ر. و رحیمی ف. ۱۳۹۷. هیدروژئولوژی چشمه‌های کارستی تاقدیس سالدوران، استان چهارمحال و بختیاری. هیدروژئولوژی. ۳(۱): ۶۹-۷۹.
- (۶) مالی س. و محمدی ض. ۱۳۹۲. بررسی توسعه کارست با استفاده از تحلیل هیدروگراف و سری زمانی بارندگی و دبی چشمه‌ها. هفدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی.
- (۷) مالی س. و محمدی ض. ۱۳۹۳. ارزیابی روش‌های برآورد جریان پایه در چشمه‌های کارستی، مطالعه موردی چشمه‌های پیرغار و دیمه. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته. ۴(۴): ۲۲-۳۷.
- (۸) محمدی ض. و ریاحی پور م. ۱۳۹۰. بررسی رفتار هیدروپدینامیکی سیستم‌های کارستی با استفاده از آنالیز سری‌های زمانی، دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، زنجان.
- 9) Ahmadipour M. R. 1999. Karst terraines in Iran- Examples from Lorestan. Acta carsologica. 28/2(13): 213-224.
- 10) Chang W. Wan J. Tan J. Wang Z. Jiang C. and Huang K. 2021. Responses of Spring Discharge to Different Rainfall Events for

- 23) Malik P. and Vojtkove S. 2012. Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs. *Environ Earth Sci.* 65: 2245-2257.
- 24) Mangin A. 1975. Contribution a l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, 3eme partie. Constitution et fonctionnement des aquifères karstiques. *Ann Spéleol.* 30(1): 21-124.
- 25) Marsaud B. 1997. Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux (Structure and functioning of the saturated zone of karsts from experimental results). Documents du BRGM 268, Editions de BRGM, Orleans.
- 26) Memon P.A. Gleeson B.J. 1995. Towards a new planning paradigm? Reflections on New Zealand's resource management act. *Environment and Planning B: planning and design.* 22(1): 109-124.
- 27) Nurkholis A. Adji T. N. Haryono E. Cahyadi A. Waskito W.A. Fathoni H. Kurniawan I. A. and Agniy R. F. 2019. Analysis of Master Recession Curve (MRC) and flood hydrograph components for karstification degree estimation in Kiskendo Cave, Jonggrangan Karst System, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 256(1): 012011. IOP Publishing.
- 28) Olarinoye T. Gleeson T. and Hartmann A. 2021. Karst spring recession curve analysis: efficient, accurate methods for both fast and slow flow components, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* <https://doi.org/10.5194/hess-2021-249>.
- 29) Raeisi E. Kowsar N. 1997. Development of Shahpour Cave, Southern Iran- Cave and KarstScience. *Nottingham.* 24(1): 27-34.
- 30) Searcy J. K. 1959. Flow-duration curves. manual of hydrology, part 2. Low-flow techniques. Geological survey water-supply paper 1542-A, Methods and practices of the geological survey, United States Government Printing Office, Washington., 33 p.
- 31) Shirafkan M. Mohammadi Z. Sivellev V. and Labat D. 2021. The Effects of Exchange Flow on the Karst Spring Hydrograph under the Different Flow Regimes: A Synthetic Modeling Approach. *Water* 13(9): 1189. <https://doi.org/10.3390/w13091189>.
- 32) Springer A. E. Stevens L. E. Anderson D. E. Parnell R. A. Kreamer D. K. and Flora S. P. 2004. A comprehensive springs classification system: integrating geomorphic, hydrogeochemical and Single-Conduit Karst Aquifers in Western Hunan Province, China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18: 5775. <https://doi.org/10.3390/>
- 11) Fatchurohman H. Adji T. N. Haryono E. and Wijayanti P. 2018. Baseflow index assessment and master recession curve analysis for karst water management in Kakap Spring, Gunung Sewu. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science* 148: 012029.
- 12) Flora S. P. 2004. Hydrogeological characterization and discharge variability of springs in the Middle Verde River watershed, Central Arizona. MSc thesis, Northern Arizona University. 237 p.
- 13) Ford D. C. and Williams P. 2007. *Karst Hydrogeology and geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd 1-562.
- 14) Foster H. A. 1924. Theoretical frequency curves and their application to engineering problems. *Am Soc Civil Eng Trans.* 87:142-303.
- 15) Foster H. A. 1934. Duration curves. *Am Soc Civil Eng Trans.* 99: 1213-1267.
- 16) Geravand F. Hosseini S. M. Maghsoudi M. and Yamani, M. 2022. Characterization of Karst Springs from Zagros Mountain in southwestern Iran. *Environmental Earth Sciences.* 81(23): 1-24.
- 17) Goldscheider N. and Drew D. 2007. *Methods in Karst Hydrogeology.* International Association of Hydrogeologists, Taylor & Francis Group. 264 p.
- 18) Goldscheider N. Chen Z. Auler A. S. Bakalowicz M. Broda S. Drew D. Hartmann J. Jiang G. Moosdorf N. Stevanovic Z. and Veni G. 2020. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeology Journal.* 28: 1661-1677.
- 19) Guo Y. Jim Yeh T. C. and Hao Y. 2019. Investigation of Karst Spring Flow Cessation Using Grey System Models. *Water* 11(9): 1927.
- 20) Hosseini S. M. Ataie-Ashtiani B. and Simmons C. T. 2017. Spring hydrograph simulation of karstic aquifers: Impacts of variable recharge area, intermediate storage and memory effects. *Journal of Hydrology.* 552: 225-240.
- 21) Kresic N. and Bonacci. 2010. Spring discharge hydrograph. In *Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management, and Sustainability.* Elsevier ch. 4: 129-163.
- 22) Kresic N. and Stevanovic Z. (Eds.). 2010. *Groundwater hydrology of springs: engineering, theory, management and sustainability.* Butterworth-heinemann.

- ecological criteria. In: *Aridland springs in North America: ecology and conservation*, pp. 49-75.
- 33) Stevanović Z. (Ed.). 2015. *Karst aquifers-characterization and engineering*. Springer.
- 34) Stevanovic Z. and Stevanovic A. M. 2021. Monitoring as the Key Factor for Sustainable Use and Protection of Groundwater in Karst Environments—an Overview. *Sustainability*. 13(5468): 2–16.
- 35) SÚTN. 2009. Slovak technical standard STN 751520 *Hydrológia, Hydrologické údaje podzemných vôd, Kvantifikácia výdatnosti pramenov*. (Hydrology, hydrological data on groundwater, quantification of spring's discharge; in Slovak), Slovenský ústav technickej normalizácie (SÚTN) Bratislava. 14 p.
- 36) Tang R. Shu L. Lu C. Zhang C. Fan J. and Appiah-Adjei E. K. 2016. Laboratory analog analysis of spring recession curve in a karst aquifer with fracture and conduit domains. *Journal of Hydrologic Engineering*. 21(2): 06015013.
- 37) Torresan F. Fabbri P. Piccinini L. Libera N. D. Pola M. and Zampieri D. 2020. Defining the hydrogeological behavior of karst springs through an integrated analysis: a case study in the Berici Mountains area (Vicenza, NE Italy). *Hydrogeology Journal*. 28: 1229–1247.
- 38) White W. B. Herman E. Rutigliano M. Herman J. Vesper D. and Engel S. 2016. *Karst groundwater contamination and public health*. Leesburg VA Karst Waters Inst. Spec. Publ. 19: 1-347.

بهبود دقت در مدلسازی عمق برف مبتنی بر اثربخشی انتخاب ویژگی‌های شاخص در رگرسیون‌های پارامتریک و غیر پارامتریک

مصطفی آصفی^۱ و علی فتحزاده^{۲*}

چکیده

دستیابی به توزیع مکانی عمق برف می‌بایست از راه مشاهده‌ای و در مقیاسی فشرده صورت گیرد. لیکن به دلیل محدودیت‌های عملی، جمع‌آوری اطلاعات، به‌ویژه در مقیاس‌های مذکور، دشوار و گاهی غیرممکن است. با توجه به مشکلات موجود، استفاده از رویکرد یادگیری ماشین و انتخاب ویژگی می‌تواند سبب افزایش کاربردپذیری پهنه‌بندی عمق برف در مناطق مرتفع شود. در این پژوهش اثربخشی کاهش ویژگی‌های غیر مؤثر در یادگیری مبتنی بر مدل‌های پارامتریک و غیر پارامتریک بررسی شد. نمونه‌های استفاده‌شده برای بررسی فرضیه‌ها از منطقه چلگرد ایران برداشت شده است. به همین منظور ابتدا با استفاده از روش هایپرکیوب محل ۱۰۰ نقطه مشخص و طی یک عملیات صحرایی داده‌های عمق برف در نقاط مورد نظر و همچنین در ۱۹۵ نقطه دیگر به صورت تصادفی و با نمونه‌بردار مدل فدرال برداشت شد. سپس با استفاده از مدل رقومی ارتفاع، ۲۵ پارامتر ژئومورفومتری استخراج و همراه با ۶ باند تصاویر ماهواره لندست ۸ و شاخص NDSI به‌عنوان ورودی‌های مدل‌ها انتخاب شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که روش‌های پارامتریک و ناپارامتریک دقت قابل‌قبولی در مدلسازی عمق برف نداشتند، اما مدل رگرسیون خطی با روش انتخاب ویژگی حریصانه پیش‌رو و بهینه‌ساز جمعیت ذره‌ها با میانگین مربعات خطا برابر با ۲۲/۱۷ و ۲۲/۱۹ توانستند با دقت بهتری تغییرات عمق برف را مدل کنند.

واژه‌های کلیدی: انتخاب ویژگی پیش‌رو، کاهش ویژگی، نمونه‌برداری، عمق برف، یادگیری ماشین.

ارجاع: آصفی م. و فتحزاده ع. ۱۴۰۱. بهبود دقت در مدلسازی عمق برف مبتنی بر اثربخشی انتخاب ویژگی‌های شاخص در رگرسیون‌های پارامتریک و غیر پارامتریک. مجله پژوهش آب ایران. ۴۷: ۵۷-۶۷. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14028.2445>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه اردکان.

۲- دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان.

* نویسنده مسئول: fat@ardakan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۶

مقدمه

یکی از آشکارترین ویژگی‌های پوشش برفی کوهستانی، ناهمگنی مکانی آن است (سلیگمان، ۱۹۳۶؛ مک کی و گری، ۱۹۸۱؛ پومری و گری، ۱۹۹۵). این ناپایداری مکانی، در سطح وسیعی از مقیاس‌ها وجود دارد که از مقیاس کمتر از متر تا صدها کیلومتر رده‌بندی می‌شود. ناهمگنی پوشش برفی کوهستان، تأثیر شگرفی بر شکل‌گیری بهمن (اسچوایزر و همکاران، ۲۰۰۳) و آب‌شناسی دارد (بالک و الدر، ۲۰۰۰؛ لاندکوئیست و دینگر، ۲۰۰۵؛ باوای و همکاران، ۲۰۱۳). با توجه به پیچیدگی فرایند برآورد پارامترهای عمق برف و مشکلات موجود در اندازه‌گیری پارامترهای برف در مناطق کوهستانی و همچنین در مناطق مرتفع استفاده از روش‌های مختلف مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین توصیه می‌شود (طبری و همکاران، ۱۳۸۸).

اساس روش‌های یادگیری ماشین، در واقع یادگیری الگوهای ذاتی بین مقادیر ویژگی‌ها و ارتباطات بین آن‌ها و عمق برف است که می‌تواند برای پیش‌بینی عمق برف در مکانی جدید، استفاده شود (پاندى، ۲۰۱۳). تاکنون متخصصان و کارشناسان زیادی، از روش‌های یادگیری ماشین مختلفی در این زمینه استفاده کرده و به دقت‌های قابل توجهی دست یافته‌اند (اسوار و گوپتا، ۲۰۱۳؛ پاندى، ۲۰۱۳؛ الیش و همکاران، ۲۰۱۳؛ کایرساپ و همکاران، ۲۰۰۲؛ پاپازچاروس و همکاران، ۲۰۱۲). قرایی‌منش و همکاران (۲۰۱۶)، مدلسازی توزیع مکانی عمق برف در یک منطقه نیمه‌خشک در ایران را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و درخت تصمیم انجام دادند و نتایج حاکی از عملکرد بهتر مدل درخت تصمیم بود.

با توجه به عدم امکان نمونه‌برداری عمق برف در ارتفاعات و محل‌های صعب‌العبور، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین، می‌تواند نقش بسزایی در کاربردپذیری پیش‌بینی عمق برف داشته باشد. مزیت‌های این نوع از روش‌های تخمین، شامل توانایی مدل‌های هوش محاسباتی برای مدل‌کردن مجموعه‌های پیچیده از ارتباطات بین عمق برف و ویژگی‌های محل برف با یادگیری از داده‌های مشابه است (الیش و همکاران، ۲۰۱۳).

مدل‌های تخمین عمق برف از مجموعه بزرگی از ویژگی‌ها که تعیین‌کنندگان عمق نامیده می‌شوند، برای تخمین استفاده می‌کنند. همه این ویژگی‌ها برای برآوردی دقیق

تأثیرگذار نیستند؛ از این رو در حوزه تخمین عمق برف، الگوریتم‌های انتخاب زیرمجموعه‌ای از پارامترها، برای بهینه‌کردن دقت مدل‌ها برای نمونه‌های دیده‌نشده، با هدف انتخاب زیر مجموعه‌ای از مؤثرترین پارامترها در برآورد عمق برف، مورد استفاده قرار گرفته‌اند (پاپازچاروس و همکاران، ۲۰۱۲). با توجه به اهمیت فراوان تغییرات عمق برف و برآورد دقیق آن تاکنون از روش‌های زیادی چون زمین آمار، هوش مصنوعی و تصاویر راداری (حق‌زاده و همکاران، ۲۰۱۷؛ تدسکو و همکاران، ۲۰۰۴ و تسی و همکاران، ۲۰۱۹) استفاده شده است. ضرورت محاسبه دقیق‌تر عمق برف می‌طلبد که از روش‌ها، پارامترها و همچنین یک نمونه‌برداری مناسب که گنج خانلو و همکاران (۲۰۲۰)، تکنیک هایپرکیوب را دقیق‌تر دانستند استفاده شود؛ بنابراین در این تحقیق از روش‌های پارامتریک، ناپارامتریک و کاهش ویژگی و همچنین از پارامترهای ژئومورفومتری و تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان ورودی‌ها در برآورد عمق برف بهره گرفته شد و نتایج مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه چلگرد واقع در شهرستان کوهرنگ است که در منطقه غربی استان چهارمحال و بختیاری و کشور ایران است. این منطقه در حد فاصل طول جغرافیایی "۲۹°۵۶'۵۹" تا "۳۷°۲۶'۴۹" شرقی و عرض جغرافیایی "۵۴°۵۹'۳۱" تا "۵°۴۹'۳۲" قرار دارد؛ بنابراین مشخصات اقلیمی این ناحیه به این صورت است که در متوسط دمای سالانه ۹ درجه سانتی‌گراد، بارش ۱۳۰۰ میلی‌متر، طول دوره یخبندان ۱۳۰ روزه و رژیم بارش زمستانه قرار گرفته است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۷).

نمونه‌برداری صحرائی

در این پژوهش ابتدا بررسی‌های اولیه نظیر راه‌های دسترسی، ترتیب نمونه‌برداری و محدودیت‌های نمونه‌برداری انجام و سپس نسبت به تهیه اطلاعات مورد نیاز و محدوده مطالعاتی اقدام شد. در ادامه با به‌کارگیری تکنیک ابرمکعب لاتین یا هایپرکیوب^۱ به‌عنوان یک روش

1- Hypercube

روش‌های یادگیری ماشین^۴

روش‌های یادگیری ماشین، الگوهایی را از داده‌های گذشته یاد می‌گیرند و از این الگوها برای پیش‌بینی بخشی از ویژگی‌های نمونه‌های جدید استفاده می‌کنند. ایده‌آسی استفاده از روش‌های یادگیری ماشین برای تخمین و پیش‌بینی عمق برف، این است که دادگان قدیمی، شامل نمونه‌های مشاهده‌شده زیادی هستند که با ویژگی‌های با ارزششان برای توصیف هر محل نمونه‌برداری، تشریح شده‌اند. محل‌های پوشش برف با ویژگی‌های مشابه، ممکن است شامل عمق‌های مشابهی نیز باشند. کار روش‌های یادگیری ماشین، یادگیری الگوهای ذاتی بین مقادیر ویژگی‌ها و ارتباطات بین آن‌ها و عمق برف است که می‌تواند برای پیش‌بینی عمق برف در مکانی جدید، استفاده شود (پاندی، ۲۰۱۳).

از این رو در این پژوهش سعی شده است با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین برای انجام تخمینی هرچه دقیق‌تر، روشی نو با استفاده از پیاده‌سازی روش انتخاب ویژگی بسته‌بندی براساس رویکرد حرصانه پیش‌رو و آنالیز مؤلفه اصلی مبتنی بر مدل‌های پارامتریک و غیرپارامتریک صورت پذیرد.

مدل‌سازی به روش پارامتریک

تنها روشی که در این مدل‌سازی استفاده شد، روش رگرسیون خطی چندمتغیره است. در روش رگرسیون خطی چندمتغیره، فرض می‌شود که پارامتر حقیقی r به صورت یک تابع خطی (یعنی یک مجموع وزن‌دار) از چندین متغیر ورودی x_1, \dots, x_d به همراه «یک پارامتر نویز» نوشته می‌شود. منظور از پارامتر نویز، متغیرهای اضافی است که ما قادر به مشاهده آن‌ها نیستیم. معادله (۳) مدل رگرسیون خطی چندمتغیره را نشان می‌دهد.

$$r^t = g(x^t | w_0, w_1, \dots, w_d) + \epsilon w_0 + w_1 x_1^t + \dots + w_d x_d^t \epsilon, \quad (3)$$

که در آن r^t عبارت است از پارامتر خروجی مورد نظر با شاخص t پارامتر بهینه‌شده در بهترین برازش در داده‌های آموزش و ϵ پارامتر نویز با توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس ثابت است. در معادله فوق، می‌توان نشان داد که بیشینه‌کردن درست‌نمایی^۵ معادل با کمینه‌کردن

نمونه‌برداری تصادفی و با استفاده از نقشه‌های ارتفاع، شیب و جهت دامنه محل ۱۰۰ نقطه در جهت نمونه‌برداری در منطقه جلگرد انتخاب شد و مختصات جغرافیایی هریک از نقاط پس از تبدیل فرمت به وسیله نرم‌افزار Global Mapper و به کارگیری نرم‌افزار Map source به GPS منتقل شد. تکنیک هایپرکیوب یک روش مدرن است که به‌ندرت در نمونه‌برداری از عمق برف استفاده شده است که در آن نمونه مورد نظر به تعداد n از متغیرهای چندگانه به‌شکلی تعیین می‌شود که نمونه مرتبط با هریک از متغیرها از حداکثر طبقه‌بندی برخوردار باشد (مک‌کی و همکاران، ۱۹۷۹). در ادامه طی یک عملیات میدانی و پیمایش برف سه روزه ۲۷، ۲۸ و ۲۹ اسفند ۱۳۹۲ و به‌وسیله نمونه‌برداری مدل مونت رز عمق برف در هریک از نقاط برداشت شد. علاوه بر این نقاط، ۱۹۵ نقطه دیگر نیز به‌طور تصادفی از منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری شد. بعد از برداشت نمونه‌های برف، سایر نقشه‌ها و اطلاعات مورد نیاز برای پهنه‌بندی که شامل داده‌های مرتبط با تصاویر ماهواره‌ای و پارامترهای مشتق‌شده از مدل رقومی ارتفاع است، در محیط نرم‌افزار ساگا (SAGA^۱) استخراج و در جدول ۱ آورده شده است. مدل رقومی استفاده‌شده با اندازه پیکسل ۱۰ متر است. همچنین تصاویر مورد استفاده، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ است که قبل از استفاده از این تصاویر و همچنین مدل رقومی ارتفاع تصحیحات لازم اعمال شد. در جهت نرمال کردن داده‌ها نیز از روش بزرگ‌ترین-کوچک‌ترین^۲ استفاده شد و مقادیر ویژگی‌ها بین صفر و یک نرمال شدند که در معادله (۱) قابل مشاهده است.

$$\text{MinMax-normalization} = \frac{x_i - \text{Min}(Att_i)}{\text{Max}(Att_i) - \text{Min}(Att_i)} \quad (1)$$

در جهت محاسبه شاخص NDSI^۳ توسط باندهای لندست ۸ از معادله (۲) استفاده شد:

$$\text{Landsat 8 NDSI} = \frac{\text{Band3} - \text{Band6}}{\text{Band3} + \text{Band6}} \quad (2)$$

1- System for Automated Geoscientific Analyses

2- Max-Min Normalization

3- Normalized Difference Snow Index

4- Machine Learning

5- Maximization of likelihood

مجموع مربعات خطای معادله (۴) است.

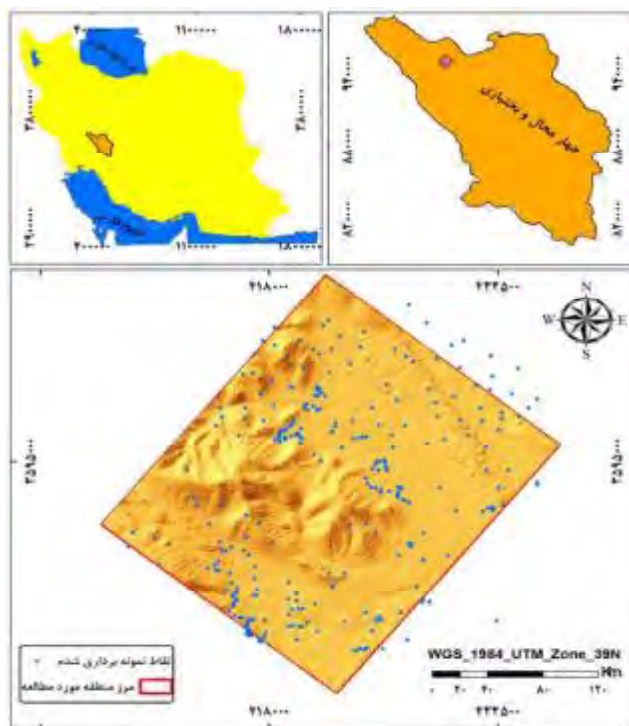
$$E(w_0, w_1, \dots, w_d | X) = \frac{1}{2} \sum_t (r^t - w_0 - w_1 x_1^t - \dots - w_d x_d^t)^2, \quad (4)$$

که با مشتق گرفتن از این رابطه و همچنین بازنویسی عبارات منتج شده از مشتق گیری به فرم برداری و ماتریسی

در نهایت به معادله (۵) برای مدل رگرسیون خطی

چندمتغیره می‌رسیم.

$$X^t X w = X^t r \Rightarrow w = (X^T X)^{-1} X^T r. \quad (5)$$



شکل ۱- موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری شده در استان چهار محال و بختیاری

جدول ۱- پارامترهای کمکی به کاررفته در مدل

پارامترهای مورد استفاده		
ارتفاع نرمال شده	شیب حوضه آبخیز	باندهای (۲.۳.۴.۵.۶.۷)
ارتفاع استاندارد شده	مساحت اصلاح شده حوضه آبخیز	شیب
موقعیت میانی شیب	طول شیب	جهت جغرافیایی
شاخص همواری قله	شاخص قدرت آبراهه	شاخص همگرایی
شاخص همواری دره	نیمرخ عرضی انحنا	سطح ویژه حوضه
شاخص تفاوت نرمال شده برف	نیمرخ طولی انحنا	شاخص رطوبتی توپوگرافی
عمق چاله‌ها	انحنای عمومی	فاکتور طول شیب
ارتفاع حوضه	اثر باد	سطح اساس شبکه زهکشی
مدل رقومی ارتفاع	ارتفاع شیب	تراکم جریان

مدل سازی به روش غیر پارامتریک

در روش‌های پارامتریک فرض بر این است که یک مدل مشخص روی همه نمونه‌ها قابل پیاده‌سازی است، از مزایای این فرضیه این است که مسئله تخمین را به تعدادی پارامترهای کمی تبدیل می‌کنیم، اما این فرضیه همیشه نمی‌تواند درست باشد و همین امر باعث می‌شود که در

صورت درست نبودن آن، با یک خطای بالا مواجه شویم؛ بنابراین باید توابعی داشته باشیم که با خطای کمتری، تخمین را برای ما انجام دهد (آلپادین، ۲۰۱۴). روش‌های غیر پارامتریک به جای برازش دادن یک سری توابع مشخص بر داده‌ها، بر اساس تشخیص الگو و اصل تشابهات عمل می‌کند و در مواردی که ارتباط بین ورودی و خروجی از

رابطه مورد استفاده برای این دسته از روش‌ها به شکل معادله (۸) است. در این معادل، $k(u)$ بیانگر هسته مورد استفاده است. مقدار h در این معادله به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود (آلپادین، ۲۰۱۴).

$$\hat{g}(x) = \frac{\sum_{t=1}^N k\left(\frac{x-x^t}{h}\right)r^t}{\sum_{t=1}^N k\left(\frac{x-x^t}{h}\right)} \quad (۸)$$

رگرسیون k-همسایه نزدیک‌تر^۷

مدل نزدیک‌ترین همسایگی، یکی از روش‌های داده‌کاوی است که هدف کلی آن طبقه‌بندی و تخمین ویژگی‌های یک سری داده‌های مجهول با توجه به بیشترین شباهت این داده‌ها با داده‌های معلومی است که در همسایگی (نزدیکی) آن‌ها قرار دارند (فدایی کرمانی و همکاران، ۱۳۹۳). روال کار این تخمین‌گر به این صورت است که به ازای هر نمونه x از داده‌های تست، فاصله آن نمونه با همه نمونه‌های داده‌های آموزش محاسبه می‌شود. k نمونه‌ای که فاصله کمتری با نمونه x داشته باشد، انتخاب شده و کلاس این k نمونه استخراج می‌شود. هر کلاسی که بیشترین تکرار را میان این k نمونه داشته باشد، به عنوان کلاس پیش‌بینی شده برای نمونه x در نظر گرفته می‌شود. برای بالابردن کارایی این تخمین‌گر باید بهترین k انتخاب شود. روال انتخاب بهترین k همانند دو تخمین‌گر قبل است، در این تخمین‌گر $P(c_i|x)$ به صورت معادله (۹) محاسبه می‌شود:

$$P(c_i|x) = \frac{k_i}{k} \quad (۹)$$

k_i نمایانگر تعداد نمونه‌هایی از k نمونه انتخابی که عضو کلاس i هستند و k نمایانگر تعداد نمونه‌هایی که کمترین فاصله با نمونه x دارند، است.

مدل‌سازی به روش کاهش ویژگی

چالشی که روش‌های یادگیری ماشین با آن مواجه هستند، این است که بسیار به ویژگی‌های تشریح‌کننده نمونه‌ها حساسند. دادگانی که برای آموزش این روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً دربرگیرنده ویژگی‌هایی هستند که نه تنها تأثیری بر افزایش دقت این روش‌ها ندارند، بلکه باعث کاهش دقت آن‌ها نیز می‌شوند. به این

قبل به‌طور کامل مشخص نباشد، مؤثر خواهد بود (شارما و اونیل، ۲۰۰۲ و یاکوویتز، ۱۹۹۳). برای ارزیابی روش‌های غیرپارامتریک در حل مسئله رگرسیون چندمتغیره، سه روش رگرسیون مبتنی بر میانگین^۱، رگرسیون مبتنی بر هسته^۲ و رگرسیون K-همسایه نزدیک‌تر^۳ مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در ادامه به معرفی آن‌ها می‌پردازیم.

رگرسیون مبتنی بر میانگین^۴

در روش‌های غیرپارامتریک، نمونه‌های آموزشی براساس شباهتی که بین‌شان برقرار است، در دسته‌هایی^۵ تقسیم می‌شوند. به هنگام ساختن مدل برای تخمین مقدار هدف نمونه مورد آزمایش، شبیه‌ترین دسته به نمونه به میزان فاصله h معینی مشخص می‌شود و نمونه مورد نظر به آن دسته اختصاص می‌یابد. در ادامه کار اگر از رگرسیون مبتنی بر میانگین برای عمل تخمین استفاده شود، میانگین مقدار هدف نمونه‌های آموزشی دسته‌ای که نمونه به آن اختصاص یافته، به عنوان مقدار هدف آن نمونه در نظر گرفته می‌شود. این روش به صورت فرمولی بیان شده است که در این فرمول $\hat{g}(x)$ میانگین دسته‌ای که براساس $w(u)$ نمونه مورد آزمایش به آن اختصاص یافته را محاسبه می‌کند و t بیانگر نمونه‌های آموزشی مشابه نمونه مورد آزمایش است (آلپادین، ۲۰۱۴).

$$\hat{g}(x) = \frac{\sum_{t=1}^N w\left(\frac{x-x^t}{h}\right)r^t}{\sum_{t=1}^N w\left(\frac{x-x^t}{h}\right)} \quad (۶)$$

$$w(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } |u| < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۷)$$

رگرسیون مبتنی بر هسته^۶

این نوع از روش‌های یادگیری غیرپارامتریک هم مانند روش رگرسیون مبتنی بر میانگین، از شباهت بین نمونه‌های آموزشی و آزمون برای تخمین استفاده می‌کنند. با این تفاوت که به جای تابع فاصله از یک هسته برای بررسی شباهت استفاده می‌کند. هسته گاوسی یکی از نمونه هسته‌های پرکاربرد در این زمینه محسوب می‌شود.

1- Mean Smoother
2- Kernel Smoother
3- k-Nearest Neighbor
4- Mean Smoother
5- Bin
6- Kernel Smoother

7- K-Nearest Neighbor

همسایگی جی‌بست^۵ استفاده می‌شود. یعنی هر ذره بهترین موقعیت قبلی خود و بهترین موقعیت قبلی هریک از ذرات موجود در جمعیت را به خاطر می‌آورد و به عبارت دیگر هر ذره درجهت بهترین موقعیت قبلی خود و به سمت بهترین ذره در حرکت است. هر ذره نماینده یک جواب ممکن است که به صورت تصادفی در فضای مسئله حرکت می‌کند (پولی و همکاران، ۲۰۰۷ و وانگ و همکاران، ۲۰۱۵).

سنجش و ارزیابی

بدین منظور با کمک روش‌های پارامتریک، ناپارامتریک و کاهش ویژگی مدل‌شده عمق برف در نقاط مورد نظر بررسی شد و سپس مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، مقدار میانگین خطای نسبی (MMRE^۶)، و مقدار میانه خطای نسبی (MdMRE) درجهت ارزیابی دقت مدل‌ها محاسبه شدند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Actual_i - Estimated_i)^2} \quad (10)$$

که در آن N به معنای تعداد نمونه‌های تست‌دادگان، $Actual_i$ به معنای مقدار واقعی نمونه i -ام، و $Estimated_i$ به معنای مقدار تخمین‌زده شده برای نمونه i -ام است.

$$MMRE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N MRE_i \quad (11)$$

$$MRE_i = \frac{|Actual_i - Estimated_i|}{Actual_i} \quad (12)$$

$$MdMRE = 100 \times Median(MRE) \quad (13)$$

$$MRE = \{MRE_1, MRE_2, \dots, MRE_N\} \quad (14)$$

در این معادلات MRE با استفاده از معادله (۱۴) و MRE_i با استفاده از معادله (۱۲) محاسبه می‌شود.

نتایج و بحث

در این پژوهش، از روش‌های مختلف پارامتریک و غیرپارامتریک یادگیری ماشین برای تخمین عمق برف منطقه چلگرد شهرستان کوه‌رنگ استفاده شد. براساس اینکه دادگانی که برای آموزش این روش‌ها استفاده

دسته از ویژگی‌ها، ویژگی‌های زائد گفته می‌شود؛ از این رو روش‌های مختلف کاهش بُعد برای کاهش تأثیر این ویژگی‌ها ارائه شده‌اند (آلپادین، ۲۰۱۴). در این پژوهش درجهت کاهش بُعد از سه روش استخراج ویژگی با روش PCA و انتخاب ویژگی با روش پیش‌رو^۱ و الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده است که در ادامه تشریح شده‌اند.

کاهش ویژگی با روش PCA^۲

در الگوریتم PCA هدف این است که واریانس نمونه‌ها را ماکزیم کنیم. اگر نمونه‌ای در فضای دو بُعدی باشد و ابعاد به گونه‌ای تغییر کند که این نمونه در فضای یک بُعدی پخش شود و واریانس آن‌ها بیشتر شود، ممکن است الگوریتم‌های یادگیری دیگر بهتر پاسخ دهند. به منظور حل این مسئله از قضیه لاگرانژ استفاده شد. برای این منظور هدف به دست آوردن بردار ویژه و مقدار ویژه ماتریس کواریانس است؛ بنابراین بردار ویژه‌ای که متناظر با بزرگ‌ترین مقدار ویژه باشد، انتخاب شده و در صورتی که آن را در تک تک نمونه‌ها ضرب کنیم، همه آن‌ها به فضای یک بُعدی منتقل شده و کواریانس بیشتر می‌شود.

کاهش ویژگی با روش پیش‌رو^۳

در این روش درجهت کاهش ویژگی ابتدا از یک ویژگی شروع و هر بار ویژگی‌ها اضافه می‌شود تا زمانی که یا تأثیری در دقت نداشته باشند، یا اینکه دقت را کاهش دهند (پوگینی و مک‌لون، ۲۰۱۷).

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۴

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک تکنیک بهینه‌سازی تصادفی بر مبنای جمعیت است که با الهام از پرواز اجتماعی پرندگان، شنای دسته‌جمعی ماهی‌ها و زندگی اجتماعی آن‌ها مدل شده است (کندی و ابرهات، ۱۹۹۵) و با استفاده از یک سری روابط ساده ترکیب‌بندی شده است. جمعیت (حرکت تجمعی) در PSO، شامل مجموعه‌ای از اعضاست که به هر عضو داخل جمعیت، یک ذره گفته می‌شود. در این تکنیک از مفهوم جانمایی

1- Forward-Selection

2- Principal Component Analysis

3- Forward-Selection

4- Particle Swarm Optimization (PSO)

5- Gbest Neighborhood Topology

6- Root Mean Square Error (RMSE)

7- Mean Magnitude of Relative Error (MMRE)

نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش‌های رگرسیون مبتنی بر میانگین، رگرسیون مبتنی بر هسته و رگرسیون K- همسایه نزدیک‌تر روی دادگان مورد نظر با تقسیم‌بندی داده‌ها به‌صورت: ۸۰ درصد داده آموزشی و ۲۰ درصد داده تست، برای $h = 1/55$ در روش رگرسیون مبتنی بر میانگین، $h = 0/04$ در روش رگرسیون مبتنی بر هسته و $k =$ در روش K- همسایه نزدیک‌تر در جدول ۳ آمده است. در این جدول، نتایج این روش‌ها براساس سه معیار RMSE، MMRE و MdMRE مشاهده می‌شود. انتخاب این مقادیر برای پارامترهای h و k با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل صورت گرفته است. اعتبار متقابل روشی است برای محاسبه ناریب از خطای پیش‌بینی و بیشتر برای برآورد‌گرهایی استفاده می‌شود که دارای توزیع پیچیده هستند. در این روش ابتدا یک مشاهده را حذف کرده و مقدار آماده را برای $n-1$ مشاهده باقیمانده محاسبه می‌کنند و به کمک آن مقدار خطای پیش‌بینی حساب می‌شود. با ادامه‌دادن به این روند، برای سایر مشاهدات و میانگین گرفتن از آن‌ها برآورد خطای متقابل به‌دست می‌آید.

شده‌اند، دارای ویژگی‌هایی با محدوده‌های مختلف هستند، در ابتدای امر این دادگان را با استفاده از روش نرمال‌سازی بزرگ‌ترین-کوچک‌ترین، نرمال کرده و سپس روش‌های معرفی‌شده را مورد استفاده قرار دادیم. نتایج حاصل از پیاده‌سازی هریک از روش‌ها در ادامه آمده است.

نتایج حاصل از روش پارامتریک

نتایج پیاده‌سازی روش رگرسیون خطی روی دادگان مورد نظر با تقسیم‌بندی داده‌ها به‌صورت: ۸۰ درصد داده آموزشی و ۲۰ درصد داده تست در جدول ۲ آمده است. در این جدول، نتایج روش رگرسیون خطی براساس سه معیار RMSE، MMRE، MdMRE مشاهده می‌شود.

جدول ۲- نتایج به‌دست آمده از روش رگرسیون خطی روی

دادگان			
MdMRE	MMRE	RMSE	روش نرمال‌سازی
۳۸۵۷۲۰	۴۹۰۰۵۰	۲۷۱۳۵۰	نرمال‌سازی بزرگ‌ترین-کوچک‌ترین
			کوچک‌ترین

نتایج روش‌های ناپارامتریک

جدول ۳- نتایج به‌دست آمده از روش‌های ناپارامتریک

MdMRE	MMRE	RMSE	روش نرمال‌سازی	روش
۵۳/۶۴	۵۳/۴	۴۶/۶۷	نرمال‌سازی بزرگ‌ترین-کوچک‌ترین	رگرسیون مبتنی بر میانگین
۳۹/۷۱	۴۱/۵۹	۳۹/۲۹	نرمال‌سازی بزرگ‌ترین-کوچک‌ترین	رگرسیون مبتنی بر هسته
۴۳/۳۴	۴۱/۰۲	۳۷/۵۷	نرمال‌سازی بزرگ‌ترین-کوچک‌ترین	رگرسیون k- همسایه نزدیک‌تر

نتایج کاهش ویژگی‌ها

در این پژوهش درجهت استخراج و کاهش ویژگی‌ها از سه روش تجزیه مؤلفه اصلی، حریصانه پیشرو و الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شد که نتایج حاصل از پیاده‌سازی این روش‌ها روی روش‌های پارامتریک و ناپارامتریک در جدول ۴، آورده شده است.

با توجه به روش‌های مورد استفاده در این پژوهش، مشخص شد روش پارامتریک که در آن رگرسیون خطی پیاده‌سازی شده بود، نتیجه مناسبی نداشت و میزان جذر میانگین مربعات خطای ۲۷۱۳۵۰ را ارائه کرد که نسبت به پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه برف قابل قبول نیست؛ زیرا قرایی منش و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای به مقایسه روش شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندمتغیره در مدل‌سازی عمق برف پرداختند و نشان دادند که مدل

رگرسیونی ۷۴ درصد از تغییرات عمق برف را با میزان جذر میانگین مربعات خطای ۱۷ محاسبه کرده و شبکه عصبی با آرایش ۱-۱۱-۳۰، ۸۵ درصد از تغییرات عمق برف را با میانگین مربعات خطای ۱۲/۱ حساب کرده است و همچنین طبری و همکاران (۱۳۸۸) به مقایسه سه روش رگرسیون غیرخطی، شبکه عصبی مصنوعی و روش تلفیق شبکه عصبی-الگوریتم ژنتیک درجهت برآورد ضخامت برف و آب معادل برف پرداختند. از میان روش‌های به‌کاررفته، روش شبکه عصبی تلفیق‌یافته با الگوریتم ژنتیک بهترین نتیجه را دربرداشته است؛ اما روش‌های ناپارامتریک نسبت به روش‌های پارامتریک نتایج قابل قبول‌تری را ارائه کردند؛ به‌طوری‌که روش K- همسایه نزدیک‌تر کمترین میزان میانگین مربعات خطا را دارد. دادگانی که برای آموزش این روش‌ها مورد استفاده قرار

می‌گیرند، معمولاً دربرگیرنده ویژگی‌هایی هستند که نه تنها تأثیری بر افزایش دقت این روش‌ها ندارند، بلکه باعث کاهش دقت آن‌ها نیز می‌شوند؛ بنابراین درجهت کاهش و استخراج ویژگی‌ها از روش‌های تجزیه مؤلفه اصلی، حریصانه پیشرو و الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شد و کمترین میزان جذر میانگین مربعات خطا را روش‌های حریصانه پیشرو و ازدحام ذرات به دست آوردند. شکل ۲ رابطه همبستگی مقادیر عمق برف برآوردشده با استفاده از روش‌های مذکور را نسبت به عمق برف اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. با توجه به اینکه دو روش حریصانه پیشرو و ازدحام ذرات کمترین میزان خطا را داشتند، اقدام به تهیه نقشه پهنه‌بندی عمق برف با استفاده از این دو روش شد، (شکل ۳). همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در هر دو روش بیشترین میزان عمق برف در مناطق غربی منطقه مورد مطالعه است که علت آن را می‌توان وجود ارتفاعات و بادهای غالب با جهت شرقی-غربی دانست. تأثیر جهت روی عمق برف به‌ازای جهت‌های مختلف، متفاوت است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان به این موضوع پی برد که جهت‌های غربی به دلیل بادپناهی عمق برف بیشتر و جهت‌های شرقی به دلیل بادروبی عمق برف کمتری دارند که این نتایج همسو با نتایج گنج خانلو و همکاران (۱۳۹۶) و مارچاند و کلینگویت (۲۰۰۱) است. به‌گونه‌ای که آن‌ها ذکر کرده‌اند که در شیب‌های رو به باد، همبستگی بیشتری بین عمق برف و جهت شیب برقرار است. قرایی منش و همکاران (۲۰۱۶)، معتقدند که پارامتر انحنای ارتفاعات و دامنه‌ها در تله‌اندازی و تجمع برف تأثیرگذار است که شامل انحنای مسطح و قائم است. خط‌الفرهای موجود در ارتفاعات که قاعدتاً محل مناسبی برای انباشت برف است، اما رابطه معکوس عمق برف و عمق دره در حوضه مورد مطالعه مشهود است که نتایج آن حاکی از تأثیر تابش خورشید و شیب بر خط‌الرأس ارتفاعات است که باعث ذوب، ایجاد رواناب و کاهش عمق برف در این مناطق شده است. کم‌بودن عمق برف در مناطق شرقی و تا حدودی جنوبی و شمالی، علاوه بر وجود بادهای غالب منطقه می‌تواند تحت تأثیر کاربری کشاورزی و مسکونی مناطق پست و هموار، رابطه معکوس ارتفاع و دمای سطح و همچنین رابطه مستقیم سطح پوشش برف و ارتفاع (حلبیان و صلحی، ۱۳۹۹؛ اصغری سراسکانرود و همکاران،

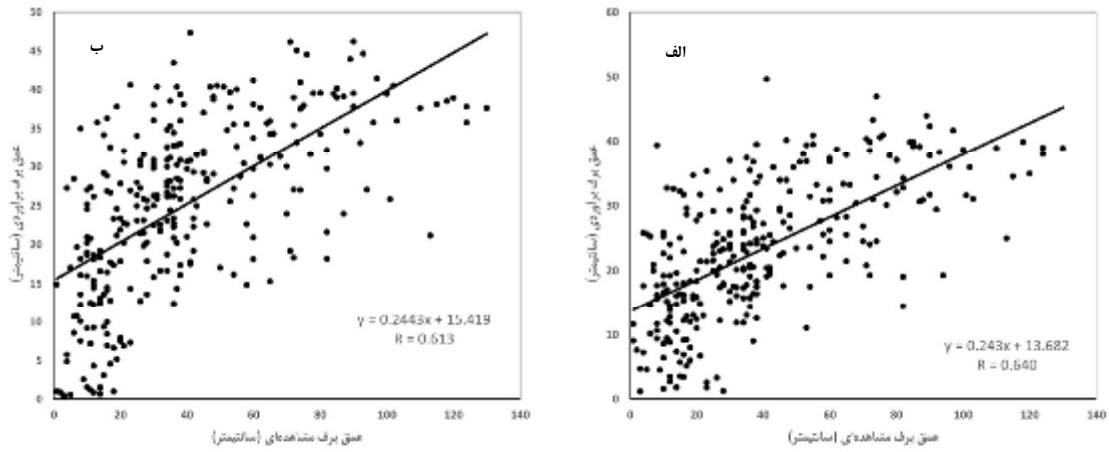
۱۴۰۰) باشد. رابطه عمق برف با ارتفاع در حوضه مورد مطالعه، متأثر از ترازهای ارتفاعی است. عمق برف این حوضه در ارتفاعات پایین کمتر و در ارتفاعات بالاتر بیشتر است. اهمیت نتایج پژوهش پیش‌رو از آن جهت است که بلوچل و همکاران (۱۹۹۱) و مارچاند و کلینگویت (۲۰۰۱)، در مطالعات خود به معنی‌داربودن رابطه خطی عمق برف با ارتفاع دست یافته‌اند؛ اما برخی محققان از جمله شابان و همکاران (۲۰۰۴) این رابطه را کلاً مستقیم و برخی دیگر مانند اریکسون و همکاران (۲۰۰۵) آن را معکوس دانسته‌اند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات حوضه مورد نظر در مقایسه با نتایج سایر محققان از جمله بلوچل و همکاران (۱۹۹۱) و شابان و همکاران (۲۰۰۴) که رابطه بین عمق برف و زاویه شیب را معکوس ذکر کرده‌اند و همچنین نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش‌های اریکسون و همکاران (۲۰۰۵) و مارچاند و کلینگویت (۲۰۰۱) که این رابطه را مستقیم بیان کرده‌اند و همان‌طور که قرایی منش و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه خود شیب را در عمق برف مناسب دانسته‌اند، می‌توان به این نتیجه رسید که علت تفاوت بین نتایج محققان مختلف، تأثیر شرایط منطقه‌ای متفاوت در نتایج مربوط به عمق برف بوده است.

نتیجه‌گیری

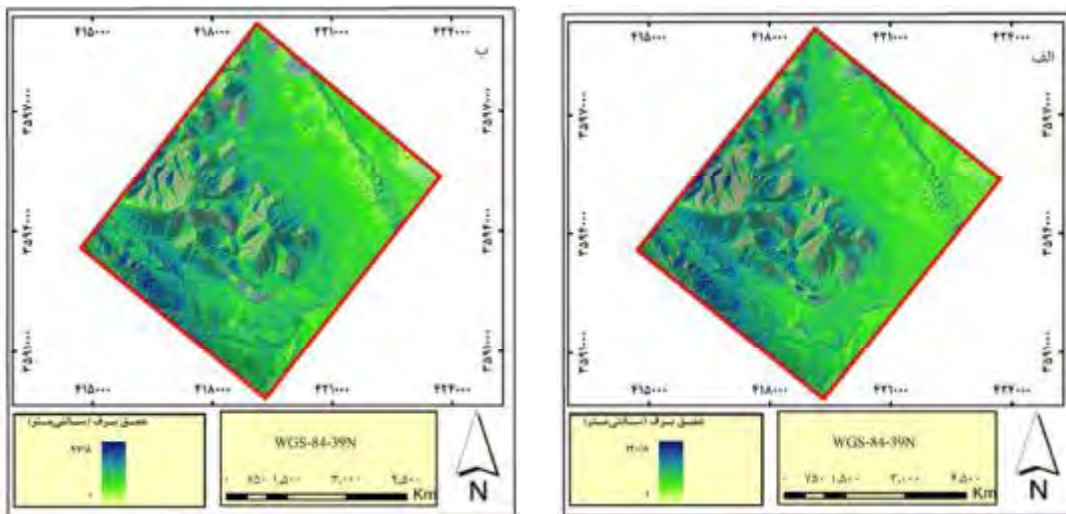
در این پژوهش به‌منظور برآورد توزیع مکانی عمق برف، از روش‌های پارامتریک (رگرسیون خطی چندمتغیره)، ناپارامتریک (رگرسیون مبتنی بر میانگین، رگرسیون مبتنی بر هسته و رگرسیون K- همسایه نزدیک‌تر) و انتخاب ویژگی (استخراج ویژگی PCA، انتخاب ویژگی پیش‌رو و انتخاب ویژگی بهینه‌ساز جمعیت ذره‌ها) استفاده شد. پس از بررسی روش‌های ذکرشده و با توجه به آماره‌های مورد استفاده درجهت ارزیابی مدل‌ها، کمترین میزان مجذور میانگین مربعات خطا مربوط به روش انتخاب ویژگی حریصانه پیش‌رو و بیشترین مجذور میانگین مربعات خطا مربوط به روش رگرسیون خطی چندمتغیره است؛ بنابراین، بی‌شک ویژگی‌های تشریح‌گر نمونه‌ها تأثیر فوق‌العاده‌ای روی دقت روش‌های یادگیری ماشین داشته است و با کاهش و انتخاب پارامترهای مؤثرتر توانسته است عمق برف را با دقت خیلی خوبی برآورد کند.

جدول ۴- نتایج به دست آمده از روش کاهش ویژگی‌ها

MdMRE	MMRE	RMSE	روش یادگیری	مدل
۳۹/۷۱	۴۰/۹۷	۳۷/۵۵	رگرسیون خطی	PCA
۵۳/۶۶	۵۲/۰۱	۴۵/۸۸	رگرسیون مبتنی بر میانگین	
۴۱/۸۷	۴۱/۶۳	۳۹/۰۴	رگرسیون مبتنی بر هسته	
۴۱/۸۳	۴۰/۱۸	۳۷/۳۱	رگرسیون k-همسایه نزدیک‌تر	
۳۷/۹۹	۳۹/۱۷	۲۲/۱۷	رگرسیون خطی	انتخاب ویژگی پیش‌رو
۳۹/۳۱	۴۱/۱۵	۴۴/۸۱	رگرسیون مبتنی بر میانگین	
۳۵/۰۶	۳۶/۴۸	۳۶/۰۴	رگرسیون مبتنی بر هسته	
۳۵/۸۹	۳۷/۰۹	۴۹/۳۵	رگرسیون k-همسایه نزدیک‌تر	
۲۷/۹۳	۳۰/۸۳	۲۲/۱۹	رگرسیون خطی	انتخاب ویژگی ازدحام ذرات
۴۶/۳۰	۴۷/۰۱	۴۳/۱۸	رگرسیون مبتنی بر میانگین	
۳۷/۰۲	۳۷/۱۲	۳۵/۰۲	رگرسیون مبتنی بر هسته	
۳۶/۸۵	۳۵/۰۵	۳۴/۴۷	رگرسیون k-همسایه نزدیک‌تر	



شکل ۲- رابطه رگرسیونی بین عمق برف اندازه‌گیری شده با برآورد شده با استفاده از روش‌های الف- پیش‌رو، ب- ازدحام ذرات



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی عمق برف با استفاده از روش‌های الف (پیش‌رو ب) ازدحام ذرات

10. Blöschl G. Kirnbauer R. and Gutknecht D. 1991. Distributed Snowmelt Simulations in an Alpine Catchment: 1. Model Evaluation on the Basis of Snow Cover Patterns," Water Resources Research. 27(12): 171-179.
11. Elish M. O. Helmy T. and Hussain M. I. 2013. Empirical study of homogeneous and heterogeneous ensemble models for software development effort estimation, Math. Probl. Eng.
12. Erickson T. A. Williams M. W. and Winstral A. 2005. Persistence of topographic controls on the spatial distribution of snow in rugged mountain, Colorado, United States. Water Resources Research. 41(4):1-17.
13. Ganjkhani H. Vafakhah M. Zeinivand H. and Fathzadeh A. 2020. The effect of different sampling schemes on estimation precision of snow water equivalent (SWE) using geo statistics techniques in a semi-arid region of Iran. Geocarto International. 35(16): 1-14
14. Gharaei-Manesh S. Fathzadeh A. and Taghizadeh-Mehrjardi R. 2016. Comparison of artificial neural network and decision tree models in estimating spatial distribution of snow depth in a semi-arid region of Iran. Cold Regions Science and Technology. 122: 26-35.
15. Haghizadeh A. Keiani A. and Keiani M. 2017. Evaluating the efficiency of geostatistical methods in order to estimate the spatial distribution of snow depth and density in mountainous areas (case study: Gosh Bala watershed of Mashhad). Journal of Hydrogeomorphology. 4(12): 45-66.
16. Kennedy J. and Eberhart R. 1995. Particle Swarm Optimization. pp. 1942-1948.
17. Kirsopp C. Shepperd M. J. and Hart J. 2002. Search heuristics, case-based reasoning and software project effort prediction.
18. Lundquist J. D. and Dettinger M. D. 2005. How snowpack heterogeneity affects diurnal streamflow timing. Water Resour.
19. Marchand W. D. and Killingtveit A. 2001. Analyses of the Relation Between Spatial Snow Distribution and Terrain Characteristics, 58th Estern Snow Conference Ottawa, Ontario, Canada.
20. McKay G. A. and Gray D. M. 1981. The distribution of the snow cover, in: Handbook of Snow, edited by: Gray D. and Hale D. Pergamon Press Canada Ltd. 153-190.
21. McKay M. D. Beckman R. J. Conover W. J. 1979. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. Technometrics. 1: 239-245.
22. Pandey P. 2013. Analysis of the techniques for software cost estimation, in Advanced

منابع

۱. اصغری سراسکانرود ص. صفری ش. و ملانوری ا. ۱۴۰۰. اندازه‌گیری عمق برف و ارزیابی ارتباط مؤلفه دما با ویژگی‌های برف در حوزه آبخیز ليقوان. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۸(۴): ۱۸۷-۲۰۶.
۲. حلبیان ا. ح. و صلحی س. ۱۳۹۹. بررسی ارتباط برف‌پوش (SC) و دمای سطح زمین (LST) با مؤلفه توپوگرافیکی ارتفاع در ارتفاعات البرز مرکزی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۹(۲): ۲۴۹-۲۲۹.
۳. حیدری م. هنربخش ا. پژوهش م. و زنگی‌آبادی م. ۱۳۹۷. توسعه مدل بهینه برای استفاده صحیح از منابع زیست‌محیطی در حوزه آبخیز چلگرد. فصلنامه علوم محیطی. ۱۶(۱): ۲۹-۴۶.
۴. طبری ح. معروفی ص. زارع ابیانه ح. امیری چایجان ر. شریفی م. و آخوندعلی ع. ۱۳۸۸. مقایسه روش رگرسیون غیرخطی با روش‌های هوش محاسباتی در برآورد توزیع مکانی آب معادل برف در سراب کارون. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱۳(۵۰): ۲۹-۴۰.
۵. فدایی کرمانی ا. خانجانی م. ج. و بارانی غ. ع. ۱۳۹۳. کاربرد الگوریتم K- نزدیک‌ترین همسایگی در پایش خشکسالی بر مبنای شاخص بارش استاندارد (SPI) (مطالعه موردی: شهرستان بم). فصلنامه بین‌المللی پژوهش تحلیلی منابع آب و توسعه. ۱: ۱۳۱-۱۳۸.
۶. گنج‌خانلو ح. وفاخواه م. فتح‌زاده ع. و زینی‌وند ح. ۱۳۹۶. مدل‌سازی، تغییرات مکانی آب معادل برف براساس عوامل توپوگرافی و اقلیمی حوضه آبخیز سهرورد استان زنجان. اکوهیدرولوژی. ۴(۳): ۶۸۶-۶۷۳.
7. Alpaydin E. 2014. Introduction to machine learning. MIT press.
8. Balk b. and Elder k. 2000. Combining binary decision tree and geostatistical methods to estimate snow distribution in a mountain watershed. Water. Resour. Res. 36:13-26.
9. Bavay M. Gr'unewald T. and Lehning M. 2013. Response of snow cover and runoff to climate change in high Alpine catchments of Eastern Switzerland, Adv. Water Resour. 55: 4-16.

- Computing and Communication Technologies (ACCT), Third International Conference on. pp. 16-19.
23. Papatheocharous E. Papadopoulos H. and Andreou A. S. 2014. feature subset selection for software cost modelling and estimation, arXiv Prepr. arXiv1210.1161, 2012.
 - Alpaydin E., Introduction to machine learning.
 24. Poli R. Kennedy J. and Blackwell T. 2007. Particle Swarm Optimization. *Swarm Intelligence*. 1(1): 33-57.
 25. Pomeroy J. W. and Gray D. M. 1995. Snowcover Accumulation, Relocation and Management. National Hydrology Research Institute Science Report No. 7, Environment Canada, Saskatoon.
 26. Puggini L. and McLoone S. 2017. Forward Selection Component Analysis: Algorithms and Applications, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 39(12).
 27. Sarwar S. and Gupta M. 2013. Proposing effort estimation of COCOMO II through perceptron learning rule, *Int. J. Comput.* 70(1): 29-32.
 28. Schweizer J. Jamieson J. B. and Schneebeli M. 2003. Snow avalanche formation, *Rev. Geophys.* 41: 10-16.
 29. Seligman G. 1936. Snow Structure and Ski Fields. International Glaciological Society. Cambridge. UK.
 30. Shaban A. Faour G. Khawlie M. and Abdallah C. 2004. Remote sensing application to estimate the volume of water in the form of snow on Mount Lebanon. *Hydrological Sciences Journal*. 49(4): 643-653.
 31. Sharma A. and O'Neill R. 2002. A nonparametric approach for representing interannual dependence in monthly streamflow sequences. *Water Resour. Res.* 38: 5-15.
 32. Tedesco M. Pulliainen J. Takala M. Hallikainen M. and Pampaloni P. 2004. Artificial neural network-based techniques for the retrieval of SWE and snow depth from SSM/I data. *Remote Sens. Environ.* 90: 76-85.
 33. Tsai Y. Dietz A. Oppelt N. and Kuenzer C. 2019. Remote sensing of snow cover using Spaceborne SAR: A review. *Remote Sensing*. 11(1456): 1-44.
 34. Wang S. Tang J. and Liu H. 2015. Embedded unsupervised feature selection *Proc. Natl. Conf. Artif. Intell.* 1: 470-476.
 35. Yakowitz S. 1993. Nearest-neighbor estimation for null-recurrent Markov time series. *Stoch. Proc. Appl.* 48: 311-318.

تصفیه آلودگی‌های پساب شهری با استفاده از گیاهان وتیور و گل اختر

مرتضی محمدی دیلمانی^۱، محدثه مؤمن‌زاده^۲، صاحبه حاجی‌پور^۳ و منصور افشار محمدیان^{۴*}

چکیده

حذف آلاینده‌ها از خاک و آب‌های آلوده به کمک گیاهان از طریق جذب و انباشت در ریشه، ساقه و برگ، به‌عنوان یکی از روش‌های پالایش برای حذف آلاینده‌های فلزی مطرح است. در این فرایند، انتخاب گیاه مناسب، نقش بسیار مؤثری در میزان پالایش آلاینده‌ها دارد. در این راستا، آزمایشی در قالب طرح کامل تصادفی با سه تکرار در گیاه وتیور و گل اختر انجام شد. گیاهان تحت تیمار با پساب شهری و گیاهان شاهد با آب شهری آبیاری شدند. همچنین گلدانی فاقد گیاه برای سنجش میزان عناصر جمع‌شده در خاک در نظر گرفته شد و به‌طور منظم همراه با گلدان‌های دیگر با پساب شهری آبیاری شد. سپس فلزهای روی و کروم در گیاهان وتیور و گل اختر، طی یک دوره شش‌ماهه آبیاری با پساب شهری، ارزیابی شدند. فاکتورهای انتقال و تجمع که دو فاکتور مهم در سنجش توانایی گیاه برای گیاه‌پالایی محسوب می‌شوند، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که روی و کروم، به‌عنوان بیشترین فلزات سنگین موجود در پساب شهری، بیشترین انباشت را در ریشه و سپس در بخش‌های هوایی گیاه وتیور و بیشترین انتقال را به بخش‌های هوایی گیاه گل اختر داشتند. بررسی فاکتورهای انتقال و تجمع زیستی نیز نشان داد که گیاه وتیور، توانایی جذب فلزات روی و کروم را از طریق تثبیت گیاهی دارد و گیاه گل اختر این دو فلز را از طریق استخراج گیاهی جذب می‌کند. نتایج بررسی‌های فیزیولوژیکی نشان داد که میزان قندهای محلول برگ در گیاهان وتیور و گل اختر نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش نشان داد. همچنین غلظت مالون دی‌آلدئید و محتوای پرولین در گیاهان وتیور و گل اختر نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. نتایج مطالعات آناتومیکی ریشه در گیاهان وتیور و گل اختر نیز نشان داد که تحت تیمار پساب شهری، قطر ریشه، تعداد دستجات آوندی، قطر استوانه مرکزی، قطر متازایلیم و پروتوزایلیم نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در مجموع، نتایج این تحقیق نشان داد که در فرایند جذب فلزات سنگین، تغییراتی در برخی از عملکردهای آناتومیکی و فیزیولوژیکی گیاهان تحت تیمار ایجاد شد.

واژه‌های کلیدی: پساب، فلزات سنگین، گل اختر، گیاه پالایی، وتیور.

ارجاع: محمدی دیلمانی م. مؤمن‌زاده م. حاجی‌پور ص. و افشار محمدیان م. ۱۴۰۱. تصفیه آلودگی‌های پساب شهری با استفاده از گیاهان وتیور و گل اختر. مجله پژوهش آب ایران. ۴۷: ۶۹-۷۹. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14054.2451>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان.

۳- دانشجوی دکتری، گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گلستان، گلستان، گرگان.

۴- دانشیار گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان.

* نویسنده مسئول: afshar@guilan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۷

مقدمه

بشر در عین دستیابی به علوم مختلف و با وجود پیشرفت سریع فناوری، متأسفانه هنوز نتوانسته محیطی را که در آن زندگی می‌کند، مدیریت کند و این مسئله منجر به بحران‌های جدی در محیط‌زیست شده است (حسین‌نژاد، ۲۰۰۶). یکی از مهم‌ترین دلایل آلودگی‌های زیست‌محیطی در جهان با توجه به صنعتی‌شدن جوامع، فلزات سنگین هستند. تولید پساب یکی از معضلات انباشت پسماند در دفن‌گاه است، به طوری که مدیریت پساب باید به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی و بهره‌برداری از اماکن انباشت پسماند محسوب شود. پساب شهری تقریباً حاوی همه عناصر شیمیایی شناخته‌شده و آلاینده‌های پایدار در محیط، مانند فلزات سنگین است که قابلیت تجزیه زیستی ندارند (دی‌مورا و همکاران، ۲۰۰۴). به دلیل قابلیت تجمع فلزات سنگین و ایجاد سمیت در موجودات زنده، این نوع آلودگی یک مشکل جدی و اساسی به حساب می‌آید. انباشت فلزات سنگین در بافت‌های بدن موجب بروز بیماری‌ها و عوارض متعددی از جمله اختلالات عصبی، انواع سرطان‌ها و ... می‌شود. همچنین فلزات سنگین می‌توانند جایگزین دیگر املاح و مواد معدنی مورد نیاز در بدن شوند (طباطبایی و همکاران، ۲۰۲۰). فلزات سنگین هزاران سال در خاک باقی مانده و تأثیر منفی آن‌ها بر رشد گیاهان و جانوران و نیز بر میکروفلور خاک و آب به خوبی شناخته شده است. فلزات سنگین سرب، کبالت، کادمیم را می‌توان از دیگر آلاینده‌ها متمایز کرد، چون نه تنها تجزیه زیستی نمی‌شوند، بلکه می‌توانند در ساختار موجودات زنده انباشته شده و سبب ایجاد بیماری‌های مختلف، حتی در غلظت‌های بسیار پایین شوند (پنلیوان، ۲۰۰۹). استفاده از گیاهان برای حذف آلاینده‌های فلزی از خاک‌ها و آب‌های آلوده به‌عنوان یک روش جدید، مؤثر، مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست به جای اقدامات پرهزینه دیگر توصیه شده است. این تکنولوژی مبتنی بر محیط‌زیست، دارای مزایای اقتصادی، زیبایی‌شناختی و فنی بیشتری نسبت به روش‌های دیگر برای پالایش محیط‌زیست است. از آنجایی که فلزات سنگین در خاک معمولاً به‌عنوان رسوبات غیرمحلول حضور دارند، مقدار زیادی از آلاینده‌های فلزی توسط ریشه گیاهان در حال رشد جذب نمی‌شوند؛ بنابراین افزایش قابلیت دسترسی بیولوژیکی عناصر سنگین در خاک و نیز انتقال آن‌ها به

بخش‌های هوایی گیاه، برای موفقیت بیشتر در زمینه گیاه‌پالایی بسیار مهم است (زو آباگا و همکاران، ۲۰۱۴). گیاه وتیور (*Vetiveria zizanioides*) توانایی جذب بسیاری از آلاینده‌های محیط‌زیست مانند فلزات سنگین، حشره‌کش‌ها، علف‌کش‌ها و ترکیبات هیدروکربنی را بدون تأثیر بر رشد خود دارد. از طریق این ویژگی‌ها، گیاه وتیور می‌تواند در پالایش محل‌های آلوده مورد استفاده قرار گیرد. میزان استخراج مواد آلوده، به عمق ریشه بستگی دارد، زیرا ریشه می‌تواند به‌عنوان جاذب و نیز انباشتگر فلزات سنگین عمل کند (حسن و همکاران، ۲۰۱۷). گیاه گل اختر از دیگر گیاهان توصیه شده برای گیاه‌پالایی است. گل اختر با نام علمی *Canna indica* معروف به گلوله هندی در تالاب‌ها، برای بهبود کیفیت آب دریاچه‌ها و رودخانه‌های آلوده‌شده توسط فاضلاب‌ها، به دلیل راندمان جذب نسبتاً زیاد مواد مغذی و نیز ارزش زیبایی‌شناختی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ بنابراین شناخت و ارزیابی پاسخ گیاه گل اختر برای سنجش میزان تصفیه آلاینده‌های زیست‌محیطی اهمیت قابل توجهی دارد. گل اختر پتانسیل خوبی برای تصفیه فاضلاب‌های آلوده به فلزات مختلف دارد (سوتاپا و همکاران، ۲۰۰۸). هدف از این تحقیق، بررسی جذب برخی از فلزات سنگین موجود در پساب شهری توسط گیاهان وتیور و گل اختر و تأثیر آن بر برخی خصوصیات فیزیولوژیکی و آناتومیکی و نیز ارزیابی مقاومت گیاه وتیور و گل اختر در برابر فلزات سنگین موجود در پساب شهری بود.

مواد و روش‌ها

تهیه گیاهان

بوته‌های گیاه وتیور به تعداد ۲۴ عدد از بوته مادر از ناحیه یقه ریشه جدا شدند. در حین جداکردن گیاهان از پاجوش، دقت شد تا گیاهان از نظر اندازه یکسان باشند، سپس برای اطمینان کار، همه آن‌ها با ترازو وزن شدند. ریزوم‌های گیاه گل اختر که بخش تکثیری این گیاه محسوب می‌شود نیز از گیاه جدا شد و ریزوم‌های هم‌اندازه در اواخر فصل زمستان، یعنی اسفند، برای کشت گلدانی مورد استفاده قرار گرفت.

آماده‌سازی گلدان‌ها

گلدان دیگر شاهد بود. یک گلدان حاوی ۱۰ کیلوگرم خاک بدون گیاه نیز برای آبیاری با پساب شهری جمع‌آوری شده از محل دفن زباله واقع در منطقه سراوان رشت در نظر گرفته شد. گلدان‌های آماده شده بلافاصله آبیاری شدند تا فواصل خالی بین خاک و ریشه پر شود و ریشه‌ها آسیب نینند. اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) خاک اولیه (کنترل) مورد استفاده در تحقیق و پس از ترکیب خاک با پساب شهری قبل از کاشت گیاهان در جدول ۱ آمده است.

در محوطه دانشگاه زیر سقف شیشه‌ای، ۱۲ عدد گلدان ۳۰×۳۰ با ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر در ۴ ردیف با طرح کامل تصادفی با فاصله ۳۰ سانتی‌متری نسبت به هم قرار داده شدند. گلدان‌ها هر کدام با ۱۰ کیلوگرم خاک الک شده پر شده و در ۶ گلدان ۳ گیاه وتیور تقریباً هم‌وزن و در ۶ گلدان دیگر نیز سه عدد ریزوم هم‌وزن گیاه گل اختر با فاصله ۱۰ سانتی‌متری از هم کاشته شدند. از ۶ گلدان کاشته شده برای هر یک از گیاهان، ۳ گلدان تیمار و ۳

جدول ۱- اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) خاک اولیه (کنترل) مورد استفاده در تحقیق و پس از ترکیب خاک با پساب شهری قبل از کاشت گیاهان

خاک	pH	EC	خاک	pH	EC
خاک کنترل	۷/۳۱	۲/۷۷	ترکیب خاک و پساب	۷/۲۴	۲/۵۵

همکاران انجام شد (ریوز و همکاران، ۲۰۰۷). پس از ۶ ماه آبیاری، بخش‌های مختلف گیاه وتیور و گل اختر پس از جداسازی ابتدا با آب معمولی و سپس با آب مقطر شست‌وشو شده و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند. پس از آسیاب کردن، نمونه‌ها از الک مش ۲۰۰ عبور داده شدند. ۲۰۰ میلی‌گرم از پودر الک شده هر نمونه درون لوله‌های آزمایش قرار داده شد و ۵ میلی‌لیتر تیزاب سلطانی (مخلوط ۳:۱، HCL: HNO₃) به آن‌ها اضافه شد. سپس نمونه‌ها روی هیتر به مدت ۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد حرارت دیدند تا هضم کامل انجام شود. پس از آن، نمونه‌ها به مدت ۱۲ ساعت در دمای آزمایشگاه قرار داده شدند و محتوای لوله‌ها به کمک کیف شیشه‌ای و کاغذ واتمن ۴۲ صاف شد. سپس میزان فلزات سنگین در بخش‌های مختلف گیاهان مورد سنجش قرار گرفت و خاک آن‌ها با استفاده از دستگاه ICP (Inductively Coupled Plasma) مدل Spectro Arcos اندازه‌گیری شد.

مطالعه ساختار تشریحی ریشه گیاه گل اختر و گیاه

وتیور

به‌منظور ارزیابی ساختار رویشی گیاهان و ارتباط آن‌ها با میزان پالایش فلزات سنگین، ریشه گیاهان گل اختر و وتیور پس از اتمام دوره تیماردهی، از گلدان‌های شاهد و تیمار جمع‌آوری شد. همچنین برای بررسی ساختار بافتی، ابتدا نمونه‌های جمع‌آوری شده شست‌وشو و به قطعات ۲ تا

گلدان‌ها از زمان کاشته شدن (۱۵ اسفند ۱۳۹۵) به مدت یک ماه با آب شهری (هفته‌ای دو بار، هر بار ۲۰۰ میلی‌لیتر) آبیاری شدند تا تنش‌هایی که بر اثر کندن و جداکردن بوته‌ها به گیاه رسیده، کاهش یابد. از ماه دوم، با افزایش دما، گلدان‌های کنترل با ۵۰۰ میلی‌لیتر آب شهری و گلدان‌های تحت تیمار با ۵۰۰ میلی‌لیتر پساب شهری هفته‌ای دو بار آبیاری شدند. این روند برای گلدان‌های کنترل و تحت تیمار به مدت ۶ ماه ادامه یافت. علاوه‌براین‌ها، گلدان حاوی ۱۰ کیلوگرم خاک الک شده فاقد گیاه نیز در طول ۶ ماه، همانند نمونه‌های تحت تیمار، با پساب شهری آبیاری شد. میانگین دما و رطوبت در طول مدت آزمایش در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- میانگین رطوبت و دمای منطقه رشت از اسفند ۱۳۹۵ تا مرداد ۱۳۹۶

ماه‌ها	میانگین دما (°C)	میانگین رطوبت (%)
اسفند	۱۰/۸	۸۳
فروردین	۱۲/۴	۸۵
اردیبهشت	۱۸/۱	۷۸
خرداد	۲۴/۷	۷۰
تیر	۲۶/۴	۶۹
مرداد	۲۵/۴	۷۸

ارزیابی فلزات سنگین

اندازه‌گیری میزان فلزات سنگین (روی و کروم) اندام‌های مختلف گیاه وتیور و گل اختر با استفاده از روش ریوز و

هاون چینی توسط ازت مایع پودر شد و در فالكون ریخته شد. به هر فالكون ۱۰ میلی‌لیتر محلول سولفوسالیسیلیک ۳ درصد اضافه و محلول با کاغذ واتمن شماره ۲ صاف شد. ۲ میلی‌لیتر از عصاره صاف‌شده با ۲ میلی‌لیتر محلول نین هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک مخلوط شد و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه در بن‌ماری قرار گرفت. پس از سپری‌شدن این مدت، لوله‌های آزمایش به ظرف حاوی یخ‌های خردشده منتقل شدند تا سرد شوند. به لوله‌های آزمایش، ۶ میلی‌لیتر تولوئن اضافه شد و لوله‌ها به‌خوبی تکان داده شدند تا دو فاز تشکیل شود. از لایه فوقانی که حاوی تولوئن و پرولین بود، برای اندازه‌گیری میزان پرولین در طول موج ۵۲۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر، استفاده شد. از محلول پرولین با غلظت‌های صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰، ۲۰۰، ۲۲۰ و ۲۴۰ میکرومولار برای رسم منحنی استاندارد و از کووت با غلظت صفر پرولین به‌عنوان شاهد برای تنظیم دستگاه اسپکتروفتومتر استفاده شد.

اندازه‌گیری قندهای محلول برگ

قندهای محلول در برگ به روش ابریگین اندازه‌گیری شد (ابریگین و همکاران، ۱۹۹۲). ۰/۱ گرم بافت تازه فریزشده توسط ازت مایع در هاون چینی پودر شد و با ۵ میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد ساییده شد و سپس عصاره رویی را در فالكون ریخته و ته‌مانده برگی دوباره با ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۷۰ درصد ساییده و به فالكون اضافه و در دستگاه سانتریفیوژ با ۳۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس یک میلی‌لیتر عصاره الکلی را برداشته و در لوله فالكون ریخته و سه میلی‌لیتر انترن تازه‌تهیه‌شده (۱۵۰ میلی‌گرم انترن + ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۷۲ درصد) به آن افزوده شد. برای ایجاد فاز رنگی، لوله‌های فالكون به مدت ده دقیقه در حمام آب گرم ۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده شدند و بعد از سرد شدن، ۱/۵ میلی‌لیتر فاز رویی با ۱/۵ میلی‌لیتر محلول حاوی ۱ میلی‌لیتر اتانول ۷۰ درصد و ۳ میلی‌لیتر انترن، در کووت ریخته و میزان جذب در طول موج ۶۲۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. منحنی کالیبراسیون با استفاده از استاندارد گلوکز با غلظت‌های ۰، ۲۵، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ تهیه و رسم شد و میزان قندهای محلول نمونه نیز بر حسب میلی‌گرم بر لیتر محاسبه شد.

۳ سانتی‌متری برش داده شدند و سپس به مدت یک ماه در محلول فیکساتور F.A.A قرار گرفتند. بعد از گذشت یک ماه، با استفاده از تیغ، برش‌های عرضی نازکی به روش دستی از نمونه‌ها تهیه شد. نمونه‌ها با استفاده از روش متداول رنگ‌آمیزی مضاعف، رنگ‌آمیزی شدند و در نهایت نمونه‌ها را روی لام گذاشته و با استفاده از میکروسکپ نوری NIKON، ساختار تشریحی آن‌ها بررسی شد (برکو و جیانو، ۲۰۰۳).

اندازه‌گیری پراکسیداسیون لیپیدی غشا (مالون دی آلدید)

به‌منظور بررسی پراکسیداسیون لیپیدی غشای سلول‌ها، میزان MDA (Malondialdehyde) به روش هیث و پکر اندازه‌گیری شد (هیث و پکر، ۱۹۶۸). ۰/۱ گرم بافت تازه فریزشده برگ با استفاده از ازت مایع در هاون چینی پودر شد. نمونه‌های پودر شده در فالكون ریخته و به هر فالكون ۱ میلی‌لیتر تری کلرو استیک اسید ۵ درصد (۵ گرم Tca در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب) اضافه‌شد و با دستگاه ورتکس مدل Labtron به‌خوبی مخلوط شد. فالكون‌های حاوی نمونه به مدت ۱۵ دقیقه در ۱۲۰۰۰ دور سانتریفیوژ شدند. هم‌حجم سوپرناتانت بالا، تیوباربیوتوریک اسید ۰/۵ درصد در Tca ۲۰ درصد (۰/۵ گرم Tba در Tca ۲۰ درصد) به فالكون‌ها اضافه شد. نمونه‌ها را به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه در بن‌ماری قرار داده و سپس بلافاصله فالكون‌ها به ظرف حاوی یخ‌های خردشده منتقل شد (یخ از دستگاه یخ‌ساز مدل Scotsman تهیه شد). پس از سرد شدن، نمونه‌ها در ۷۵۰۰ دور به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند. جذب محلول در طول موج‌های ۶۰۰ و ۵۳۲ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. مقدار MDA هر نمونه با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد.

$$MDA \left(\frac{\mu\text{mol}}{g} \cdot F.W. \right) = \left(\frac{A_{532nm}}{155} \right) - \left(\frac{A_{600nm}}{0.1} \right) \quad (1)$$

A₅₃₂: جذب در ۵۳۲ نانومتر، A₆₀₀: جذب در ۶۰۰ نانومتر، ۰/۱: گرم وزن تر نمونه هستند.

اندازه‌گیری میزان پرولین برگ

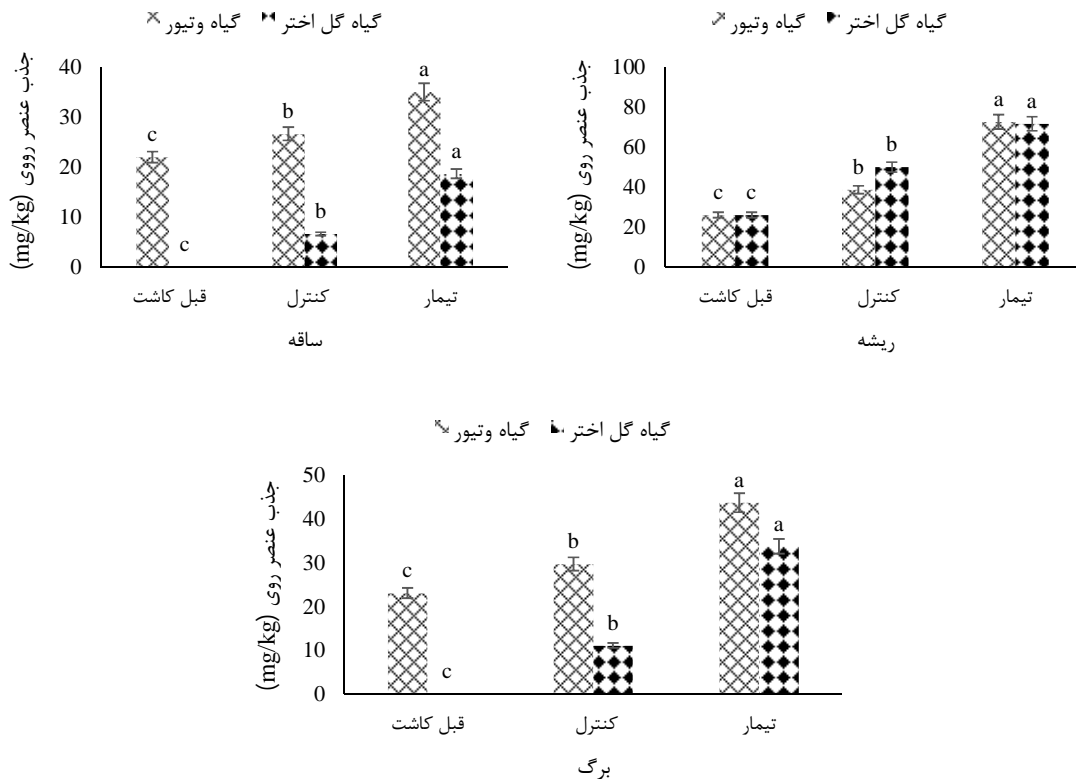
به‌منظور اندازه‌گیری پرولین از روش بی‌تس استفاده شد (بی‌تس و همکاران، ۱۹۷۳). ۰/۱ گرم بافت تازه برگ در

نتایج و بحث

بررسی تجمع فلز روی (Zn) در قسمت‌های مختلف گیاه وتیور و گل اختر

بررسی تأثیر ۶ ماه آبیاری با پساب شهری و آب شهری بر میزان تجمع فلز روی در ریشه، ساقه و برگ گیاه وتیور و گل اختر در شکل ۱ نشان داده شده است. استاندارد آلودگی عنصر روی در خاک کشاورزی و اسیدی برابر با ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که در این مطالعه در خاک خالص، میزان روی بیش از حد استاندارد بود. فاکتور انتقال (TF) برای عنصر روی (Zn) ۰/۷۲ محاسبه شد که بیانگر تجمع عنصر روی در ریشه وتیور تحت تیمار بود. با وجود جذب زیاد روی -حدود ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم توسط گیاهان تحت تیمار- مقدار قابل توجهی از عنصر روی در خاک نهایی مشاهده شد که بیانگر آلودگی بالای پساب شهری به عنصر روی بود. تجمع زیستی عنصر روی در تحقیق حاضر ۲/۴۵ بود و این موضوع نشان‌دهنده این است که گیاه وتیور یک تجمع‌دهنده گیاهی خوب برای

عنصر روی در ریشه است؛ به‌علاوه، بیشترین میزان تجمع عنصر روی، در ریشه گیاه گل اختر وجود داشت. همچنین با وجود جذب زیاد عنصر روی در حدود ۱۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم توسط گیاهان تحت تیمار و تجمع ۱۶۵ میلی‌گرم در کیلوگرم این عنصر در گیاه، مقدار قابل توجهی از عنصر روی در خاک نهایی مشاهده شد که بیانگر آلودگی بالای پساب شهری رشت به عنصر روی است. فاکتور انتقال برای عنصر روی ۱/۵۲ به دست آمد که بیانگر قابلیت انتقال آلاینده به اندام‌های هوایی (Phytoextraction) توسط گیاه گل اختر است. همچنین فاکتور تجمع زیستی رسوب (BASF) بیشتر از یک، نشان‌دهنده توانایی جذب بالای این فلز توسط گیاه گل اختر است. در پژوهشی دیگر که توسط سباشنی و سوامی (۲۰۱۴) انجام شد، میزان انباشت فلز روی در ریشه گیاه *C. indica* بیشتر از فلزات دیگر بود که نتایج تحقیق حاضر با نتایج این محققان همخوانی دارد.



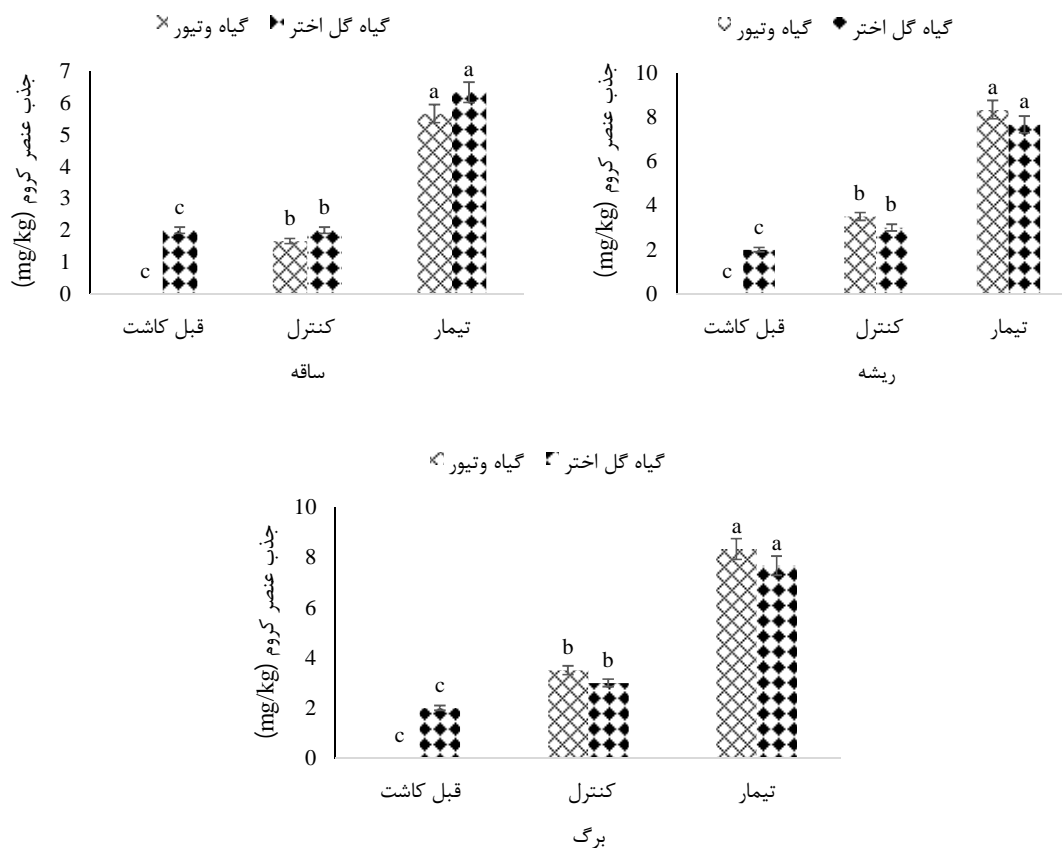
شکل ۱- میزان تجمع فلز روی در ریشه، ساقه و برگ گیاهان وتیور و گل اختر (mg/kg) شاهد و تحت تیمار پساب شهری

برای کروم است. فاکتور انتقال (TF) که نسبت غلظت فلز کروم در وزن خشک اندام هوایی به ریشه است، برای گیاه گل اختر ۱/۶۴ شد. این میزان نشان می‌دهد که انتقال کروم به اندام‌های هوایی بیشتر اتفاق افتاده است، هرچند عنصر کروم در ریشه‌ها نیز تجمع قابل توجهی داشت. در پژوهش سباشنی و سوامی (۲۰۱۴)، انباشت فلز کروم در ریشه گیاه *C.indica* بیشتر از بخش‌های هوایی بود، درحالی‌که در این گیاه، فاکتور انتقال فلز به بخش‌های هوایی گیاه بالاتر از یک بود که نتایج ما با یافته‌های این محققان مطابقت دارد. همچنین در این تحقیق، میزان کروم در خاک نهایی نسبت به کنترل، افزایش معنی‌داری داشت. تجمع کروم در خاک خالص که بدون کشت گیاه بود و تنها با هر بار آبیاری به همراه سایر گلدان‌ها با پساب آبیاری می‌شد، کمتر از حد استاندارد آلودگی تعریف شده برای کروم در خاک اسیدی (۱۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود.

احتمالاً گیاه از طریق فعال کردن سیستم‌های دفاعی در ریشه، باعث رسوب دادن روی در ریشه می‌شود یا مسیرهایی که امکان انتقال روی از این طریق امکان‌پذیر باشد را مسدود می‌کند. در واقع این واکنش نشان‌دهنده مقاومت گیاه در برابر انتقال روی از ریشه به اندام هوایی است و به نوعی می‌تواند نشانگر نوعی سازوکار دفاعی و مقاومت به غلظت زیاد روی باشد (جایانته و همکاران، ۲۰۱۵).

بررسی تجمع فلز کروم (Cr) در قسمت‌های مختلف گیاه وتیور و گل اختر

نتایج بررسی تأثیر ۶ ماه آبیاری با پساب شهری و آب شهری بر میزان تجمع فلز کروم در ریشه، ساقه و برگ گیاه وتیور و گل اختر در شکل ۲ آمده است. میزان تجمع زیستی کروم در گیاه گل اختر تحت تیمار ۴/۴۳ شد و می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که گل اختر جاذب خوبی



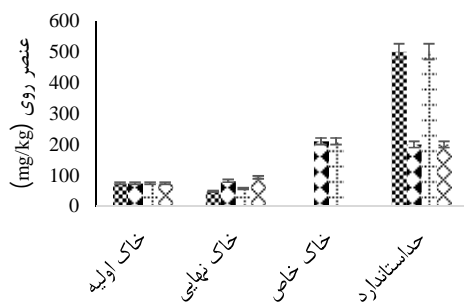
شکل ۲- میزان تجمع فلز کروم (Cr) در ریشه، ساقه و برگ گیاهان وتیور و گل اختر (mg/kg) شاهد و تحت تیمار پساب شهری

ریشه‌های گیاه *Nelumbo cifer*، اتصال یون کروم به جایگاه‌های تبادل کاتیونی ریشه و در نتیجه غیرمتحرک شدن آن است (واجبایی و همکاران، ۲۰۰۰). در مطالعه حاضر، بیشترین مقدار کروم جذب شده توسط گیاه در ریشه‌ها باقی ماند و تنها مقدار کمی از آن به اندام‌های هوایی منتقل شد؛ بنابراین ریشه‌های وتیور تحت تیمار، دارای تجمع کروم بسیار بیشتری نسبت به اندام هوایی بودند که با نتایج گزارش شده در مورد گیاهان گندم، ذرت و گل کلم نیز مطابقت دارد (شارما، ۲۰۰۳).

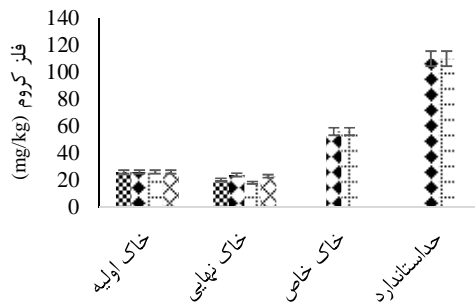
با توجه به شکل ۳، فلز روی و کروم در هر دو خاک تیمار با پساب شهری و شاهد وجود داشت. وجود عناصر مذکور در خاک شاهد سبب شد تا در گیاهان شاهد نیز تجمعی از این عناصر مشاهده شود. با توجه به اسیدی شدن خاک پس از شش ماه آبیاری با پساب شهری و حد استاندارد تعیین شده برای فلز روی، مشاهده شد که فلز روی در خاک خالص (خاک فاقد گیاه که در هر دوره آبیاری با پساب آبیاری می‌شد) بیشتر از حد استاندارد بود.

دانگ و همکاران (۲۰۰۷) بیان کردند که مقادیر بالاتر از یک برای فاکتور تجمع بیولوژیکی (BCF) نشان‌دهنده گیاه تجمع‌دهنده است. میزان تجمع زیستی کروم در گیاه وتیور تحت تیمار ۵/۵۵ شد که می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که این گیاه تجمع‌دهنده خوبی برای کروم است. فاکتور انتقال (TF) برای گیاه وتیور ۰/۸۳ شد. این میزان نشان می‌دهد که در غلظت‌های بالای کروم در خاک، انتقال این فلز به اندام‌های هوایی کمتر بوده و بیشتر تجمع در ریشه‌ها صورت می‌گیرد. کروم یک عنصر سمی و غیرضروری برای گیاهان است و مکانیسم خاصی برای جذب آن وجود ندارد. جذب کروم توسط حامل‌های عناصر آهن و گوگرد و پتاسیم انجام می‌شود. در واقع این عناصر در جذب با کروم رقابت می‌کنند. کاهش نیتروژن، فسفر و پتاسیم و عناصر دیگر می‌تواند منجر به کاهش رشد ریشه و توسعه آسیب‌دیدگی ریشه‌ها در داخل خاک به دلیل اثر سمی کروم شود (شانکر و همکاران، ۲۰۰۵). در بررسی صورت گرفته مشخص شد که دلیل تجمع زیستی کروم در

تیمار وتیور ✕ کنترل وتیور † تیمار اختر † کنترل اختر ✖



تیمار وتیور † کنترل وتیور † تیمار اختر † کنترل اختر ✖



شکل ۳- میزان تجمع فلز روی و کروم در نمونه‌های مختلف خاک (mg/kg) کنترل و تحت تیمار پساب شهری

جذب و تجمع فلزات در غلظت‌های بالا منجر به تغییرات ساختاری در ریشه گیاهان مختلف شده است. مطابق با بررسی صورت گرفته، تنش کادمیم و مس، سبب کاهش ضخامت پارانشیم پوست، بافت پارانشیم مغز و سیستم آوندی ریشه در گونه *Sorghum bicolor* شد (کاسم، ۲۰۰۶). در مطالعه دیگری روی گونه *Origanum vulgare* تحت تنش مس مشخص شد که سمیت مس، کاهش قطر ریشه و افزایش قطر آوند چوبی را در پی داشت، اما بر قطر آوند آبکش تأثیری نداشت (بوساوالیدیس و فیلوتو، ۲۰۰۴). در مطالعه فرازد و همکاران (۲۰۱۹)، درباره اثر

تأثیر آبیاری با پساب شهری بر آناتومی ریشه گیاه

وتیور

نتایج بررسی تأثیر ۶ ماه آبیاری با پساب شهری بر آناتومی ریشه گیاه گل اختر و وتیور در جدول ۳ آمده است. با توجه به جدول ۳، نتایج بررسی‌های آناتومیکی گیاهان تحت تیمار و شاهد با استفاده از نرم‌افزار *Imaga* نشان داد که قطر ریشه و قطر استوانه مرکزی در گیاهان تیمار نسبت به گیاهان شاهد و همچنین تعداد دستجات آوندی در گیاهان تیمار نسبت به شاهد کاهش یافت. فلزات سنگین تأثیرات متفاوتی بر آناتومی ریشه گیاهان دارند و

کاهش داشت. مقایسه ساختار تشریحی ریشه در گیاهان وتیور شاهد با گیاهان تحت تیمار نشان داد که تراکم بافت آبکش و چوب گیاهان تحت تیمار با پساب شهری کاهش یافت و تعداد عناصر متنازایلمی و قطر آن‌ها کمتر شد.

غلظت‌های مختلف روی بر ساختار تشریحی فلفل دلمه‌ای، مشاهده شد که در تیمارهای ۱۰ و ۱۵ میلی‌مول روی، پیوستگی بافت چوب و مقدار آن کاهش یافت، ولی تعداد و قطر متنازایلم‌ها افزایش داشت. در پژوهش حاضر، وسعت محدوده مغز ریشه گیاه وتیور و تراکم بافت آبکش و چوب

جدول ۳- بررسی برخی صفات آناتومیکی ریشه گیاه وتیور (قطر بر حسب μm) و گل اختر (قطر بر حسب μm)

ردیف	نوع صفت	وتیور		گل اختر	
		کنترل	تیمار	کنترل	تیمار
۱	قطر ریشه	۲۸۸۸/۷±۳۰	۱۶۸۰/۷±۴۳/۷*	۳۰۹۲/۲±۶۰/۴	۲۴۰۱/۷±۴۳/۷*
۲	قطر استوانه مرکزی	۷۷۳/۶±۴۱/۹	۶۵۹/۲±۳۳/۳*	۵۳۸/۲±۴۴/۵	۴۳۵/۷±۳۷/۷*
۳	قطر متنازایلم	۷۰/۳±۳	۵۶/۷±۵/۶*	۵۷/۳±۱/۴	۴۵/۹±۱/۵*
۴	قطر پروتوزایلم	۱۱/۴±۰/۸۶	۸/۲±۱*	۱۷/۶±۱/۲	۱۱/۷±۱/۱*
۵	تعداد دستجات آوندی	۱۴-۱۶	۸-۱۰*	۹-۱۱	۸-۶

* به منزله معنی دار بودن داده‌هاست.

آدهید در گیاه وتیور تحت تیمار، به‌طور قابل توجهی افزایش نشان داد. افزایش محتوای MDA نشانگر آن است که این فلزات موجب تنش‌های اکسیداتیو شدید با تحریک تولید ROS می‌شوند که با نتایج پژوهش آیبی‌بو و همکاران (۲۰۱۰) در خصوص بررسی تجمع کادمیم در وتیور و اثرات فیزیولوژیک آن همخوانی دارد. در تحقیق دیگری که تأثیر تنش کادمیم بر صفات فیزیولوژیک گیاه *Melissa officinalis* بررسی شده بود، غلظت مالون دی آدهید برگ در گیاهان تحت تیمار به‌طور معنی‌داری نسبت به گیاهان شاهد افزایش یافت (رضایی و همکاران، ۲۰۱۹). به‌علاوه، گیاهانی که تحت تیمار با پساب شهری بودند، میزان پرولین در برگ آن‌ها نسبت به گیاهان شاهد بیشتر بود (شکل ۴). پرولین یکی از مهم‌ترین آنتی اکسیدان‌های سیستم دفاعی گیاهان تحت تنش محسوب می‌شود و به مقدار زیادی در گیاهان آلی دیده می‌شود و به دلیل آن که بیشترین حساسیت را نسبت به سایر آنتی اکسیدان‌ها به تنش‌های محیطی دارد، به مقدار بسیار بیشتری از سایر آنتی اکسیدان‌ها، در شرایط تنش تجمع پیدا می‌کند. پرولین یک اسید آمینه قابل‌حل در آب و یکی از محافظت‌کننده‌های غشاهای سلولی است. یکی از شایع‌ترین پاسخ‌های گیاهان به تنش فلزات سنگین، تجمع پرولین آزاد است (کشتگر و همکاران، ۲۰۱۴). گیاه با تجمع پرولین، پلی آمین، ترهالوز، افزایش ذخیره‌سازی کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌سازی می‌تواند در برابر تنش

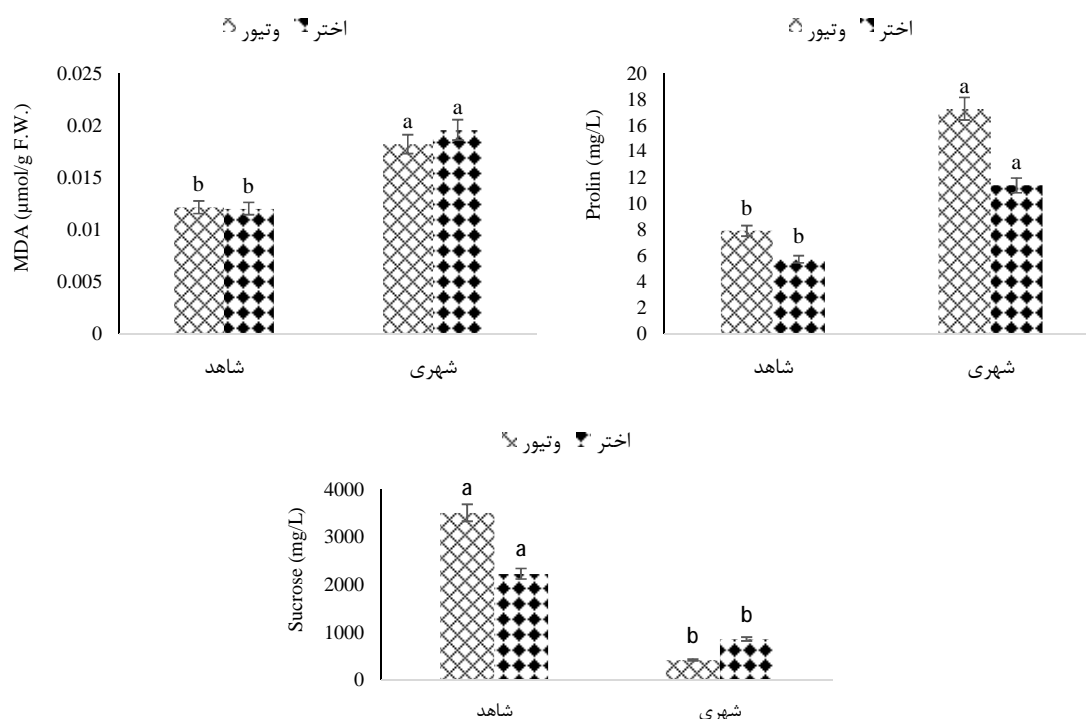
مسمومیت گیاهان با فلز روی، مهار رشد و کاهش زی‌توده را در پی دارد. براساس گزارش‌های وان‌آسه و کلاسترز (۱۹۸۶) مقادیر بالای فلز روی از طریق تخریب ساختار میتوکندریایی در سلول‌ها، سبب مهار بسیاری از فعالیت‌های متابولیکی در گیاه می‌شود.

تأثیر آبیاری با پساب شهری بر میزان مالون دی آدهید، پرولین و قندهای محلول برگ

تأثیر ۶ ماه آبیاری با پساب شهری بر میزان مالون دی آلدئید، پرولین و قند محلول برگ وتیور و گل اختر در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴، گیاهانی که تحت تیمار با پساب شهری بودند، میزان مالون دی آدهید در برگ آن‌ها نسبت به گیاهان شاهد بیشتر بود. در این مطالعه، غلظت‌های بالای روی و کادمیم منجر به افزایش پراکسیداسیون لیپیدی در گیاه وتیور شد. یکی از محصولات پراکسیداسیون لیپیدی MDA است که به‌عنوان شاخص آسیب‌های اکسیداتیو در نظر گرفته می‌شود (مونی و همکاران، ۲۰۰۰). پراکسیداسیون لیپیدی با استرس‌های اکسیداتیو مرتبط است و شامل شکسته‌شدن تمامیت غشاهای بیولوژیکی، عملکردی و ساختاری است که باعث افزایش نفوذپذیری غشای پلاسمایی می‌شود و نشت یون K^+ و سایر محلول‌ها مثل قندهای محلول را در پی داشته و نهایتاً منجر به مرگ سلولی می‌شود. در مطالعه حاضر، محتوای مالون دی

در گیاهان تحت تیمار که با پساب آلوده به فلزات سنگین روی و کادمیم آبیاری شده بودند، تجمع پرولین افزایش یافت که احتمالاً به دلیل افزایش فعالیت تخریبی پروتئین سینتاز و کاهش تبدیل پرولین به پروتئین (در پروتئین‌های حاوی پرولین) اتفاق افتاده بود؛ زیرا در شرایط تنش، بعضی از پروتئین‌های گیاه صرف تولید پرولین می‌شود. تحریک تولید پرولین از گلوتامیک اسید و افزایش مقدار آن در گیاه در خاک‌های آلوده به عناصر سنگین توسط دیگر پژوهشگران نیز گزارش شده است (آندراد و همکاران، ۲۰۰۹).

ایجاد شده مقاومت کند. به نظر می‌رسد افزایش میزان پرولین به مقدار زیادی بر کاهش اثرات تنش نقش دارد. پرولین تحمل گیاهان به تنش را از طریق مکانیسم‌هایی مانند تنظیم اسمزی، حفاظت آنزیم‌ها در برابر دناتوره شدن و تثبیت سنتز پروتئین، افزایش می‌دهد (کشتگر و همکاران، ۲۰۱۴). هرچه گیاه مقاوم‌تر باشد، پرولین بیشتری را در خود ذخیره می‌کند. سنتز تعدادی از متابولیت‌های محافظ اسمزی مانند پرولین، بتائین و کربوهیدرات‌های احیاکننده در گیاهانی که توان مقاومتی بالایی نسبت به تنش دارند، افزایش می‌یابد. در این تحقیق،



شکل ۴- غلظت مالون دی آلدئید، پرولین و قندهای محلول برگ گیاهان شاهد و تحت تیمار پساب شهری گل اختر و وتیور

برخی مطالعات گزارش شده است. در این تحقیق، مقدار فلز روی در خاک و تجمع آن در اندام‌های گیاه وتیور نسبت به کنترل افزایش معنی‌داری داشت. این فلز در متابولیسم کربوهیدرات‌ها در گیاهان نیز شرکت دارد، اما مقدار زیاد آن، ضمن تخریب ساختار کلروپلاست و ناپایداری کمپلکس‌های رنگدانه-پروتئین، سبب تجزیه کلروفیل‌ها توسط آنزیم تخریب‌کننده کلروفیل (کلروفیلاز) و در نتیجه موجب کاهش میزان کلروفیل و میزان قند می‌شود (برتراند و شوفر، ۱۹۹۹). اگرچه گیاه تحت تنش تا حدی در کوتاه‌مدت مقاومت می‌کند، اما احتمالاً آبیاری

میزان قندهای محلول در برگ گیاهانی که تحت تیمار با پساب شهری بودند، نسبت به گیاهان شاهد کمتر بود (شکل ۴). مطالعات بیوشیمیایی نشان داده که در گیاهان تحت تنش، تعدادی از ترکیبات آلی (محلول‌های سازگارکننده) تجمع می‌یابند که تداخلی با فرایندهای شیمیایی ندارند. از این ترکیبات می‌توان به انواعی از کربوهیدرات‌های محلول و ترکیباتی از قبیل: اسید آمینه، پرولین، گلیسین و بتائین اشاره کرد (گود و زاپلاچینیسکی، ۱۹۹۴). افزایش قندهای محلول در شرایط تنش ناشی از شوری، خشکی، سرما و فلزات سنگین در

3. Bates L. S. Waldren R. P. and Teare I. D. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and soil*. 39(1): 205-207.
4. Bercu R. and Jianu L. D. 2003. *Practicum de Morfologia și anatomia plantelor*. Ovidius University Press.
5. Bertrand M. and Schoefs B. 1999. Photosynthetic pigment metabolism in plants during stress, In: *Handbook of plant and crop stress* (ed. Pessaraki, M.), Marcel Dekker, New York. 527-543.
6. Bosabalidis A. M. and Filotheou H. P. 2004. Root structural aspects associated with copper toxicity in oregano (*Origanum vulgare* subsp. *Hirtum*). *Plant Science*. 166: 1497-1504.
7. De Mora S. Fowler S. W. Wyse E. and Azemard S. 2004. Distribution of heavy metals in marine bivalves, fish and coastal sediments in the Gulf and Gulf of Oman. *Marine Pollution Bulletin Journal*. 49: 410-424.
8. Dong Y. He K. Yin L. and Zhang A. 2007. A facile route to controlled synthesis of Co3O4 nanoparticles and their environmental catalytic properties. *Nanotechnology*. 18(43): 435602.
9. Farahzadi H. Arbabian P. Majd A. and Tajdad G. 2019. The effect of different concentrations of zinc nitrate on the anatomical structure of bell pepper. *Scientific Research Quarterly*. 2: 22-9.
10. Good A. and Zaplachinski S. 1994. The effects of drought on free amino acid accumulation and protein synthesis in *Brassica napus*. *Physiology Planta*. 90: 9-14.
11. Hasan S. N. M. S. Kusin F. M. Lee A. L. S. Ukang T. A. Yusuff F. M. and Ibrahim Z. Z. 2017. Performance of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) for phytoremediation of contaminated water. In *MATEC web of conferences*. 103: 06003.
12. Heath R. L. and Packer L. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of biochemistry and biophysics*. 125(1): 189-198.
13. Hossein nezhad M. 2006. Study Carbon monoxide contamination in the tunnel axis Haraz. *Journal Environmental Studies*. 38: 11-18.
14. Irigoyen J. J. Einerich D. W. Sánchez-Díaz M. 1992. Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiologia plantarum*. 84(1): 55-60.
15. Jayanthi P. Senthilkumar P. and Sivasankar S. 2015. Interactive effects of copper and

طولانی مدت و مقادیر بیش از حد استاندارد عناصر روی و کادمیم سبب تأثیرات مخربی بر گیاهان تحت تیمار می‌شود.

نتیجه‌گیری

گیاه‌پالایی فرایندی سازگار با محیط‌زیست است که در آن گیاه از توانایی‌های طبیعی خود برای بازیابی محیط استفاده می‌کند. در طول شش ماه آبیاری گیاه وتیور با پساب سراوان حاوی عناصر سنگین روی و کروم، تجمع بالای روی در گیاه وتیور مشاهده شد که نشان می‌دهد گیاه وتیور جاذب خوبی برای روی است. در گیاه گل اختر آبیاری شده با پساب سراوان آلوده به عناصر سنگین روی و کروم نیز تجمع بالای روی مشاهده شد که نشان می‌دهد گیاه گل اختر جاذب خوبی برای عنصر روی است؛ اما از آنجایی که مقدار زیاد این عناصر غیرضروری برای این گیاهان تنش‌زا است، شواهد ناشی از تنش‌های فیزیولوژیکی و آناتومیکی در گیاه وتیور مشاهده شد. بیشترین میزان آلودگی پساب شهری استفاده‌شده در این تحقیق، به عنصر روی اختصاص داشت. با توجه به فاکتور تجمع زیستی و نتایج حاصل از این تحقیق، گیاه گل اختر و گیاه وتیور جاذب خوبی نسبت به عناصر روی و کروم هستند، به نحوی که هر دو عنصر روی و کروم در ریشه گل اختر بیشترین تجمع را داشتند؛ اما بررسی فاکتور انتقال نشان داد که عناصر روی و کروم، انتقال بیشتری را به بخش‌های هوایی گیاه گل اختر داشتند و گیاه گل اختر توانایی جذب این دو فلز را از طریق استخراج گیاهی داشت. همچنین اگرچه گیاه وتیور انتقال قابل توجهی را در بخش‌های هوایی گیاه نشان نداد، اما توانایی جذب این دو فلز را از طریق تثبیت گیاهی نشان داد.

منابع

1. Aibibu D. Houis S. Harwoko M. S. and Gries T. 2010. Textile Scaffolds for Tissue Engineering—Near Future or Just Vision? In *Medical and Healthcare Textiles*, pp. 353-356. Woodhead Publishing.
2. Andrade S. A. Gratao P. L. Schiavinato M. A. Silveira A. P. Azevedo R. A. and Mazzafera P. 2009. Zn uptake, physiological response and stress attenuation in mycorrhizal jack bean growing in soil with increasing Zn concentrations. *Chemosphere*. 75: 1363-1370.

- accumulation reduces chlorophyll biosynthesis, nitrate reductase activity and protein content in *Nymphaea alba* L. Chemosphere. 41: 1075-1082.
28. Van Assche F. and Clijsters H. 1986. Inhibition of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* by treatment with toxic concentration of zinc: effect on ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase. Journal of plant physiology. 125(3-4): 355-360.
29. Zue Abaga N. O. Dousset S. Mbengue S. and Munier-Lamy C. 2014. Is Vetiver Grass of Interest For The Remediation of Cu And Cd To Protect Marketing Gardens In Burkina Faso? Chemosphere. 113: 42-47.
- zinc accumulation in *Portulaca olearcestem* cuttings, through hydroponics. Advances in Applied Science Research. 6: 54-61.
16. Kasim W. A. 2006. Changes induced by copper and cadmium stress in the anatomy and grain yield of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. International Journal of Agriculture and Biology. 8(1): 123-128.
17. Koshtegar M. Safipour Afshar A. and Saeed Nematpour F. 2014. Effect of heavy metals copper and lead on some growth traits, proline content and lipid peroxidation in two mung bean cultivars, Journal of Crop Ecophysiology. 3(31): 374-363.
18. Monni S. Salemaa M. and Millar N. 2000. The tolerance of *Empetrum nigrum* to copper and nickel. Environmental Pollution. 109: 221-229.
19. Pehlivan E. O. zkan A. M. Dinc S and Parlayici S. 2009. Adsorption of Cu²⁺ and Pb²⁺ ion on dolomite powder. Journal of Hazardous Materials. 167(1-3): 1044-1049.
20. Reeves R. D. Baker A. J. M and Romero R. 2007. The ultramafic flora of the Santa Elena peninsula, Costa Rica: a biogeochemical reconnaissance. Journal of Geochemical Exploration. 93(3): 153-159.
21. Rezaei S. R. N. Shabani L. Rostami M. and Abdoli M. 2019. The Effect of Different Concentrations of Cadmium Chloride on Oxidative Stress in Shoot Cultures of Lemon Balm, Plant Productions. 42(4): 509-522.
22. Shanker A. K. Cervanters C. Loza-Tavera H. and Avudainayagam S. 2005. Chromium toxicity in plants. Environment International. 31: 739-753.
23. Sharma D. C. Sharma C. P. and Tripathi R. D. 2003. Phytotoxic lesions of chromium in maize. Chemosphere. 51(1): 63-68.
24. Subhashini V. and Swamy A. V. V. S. 2014. Phytoremediation of Metal (PB, NI, ZN, CD and CR) Contaminated Soils Using *Canna Indica*. Current World Environment. 9(3): 780-784.
25. Sutapa B. Anshul J. Vivek R. and Ramanathana A. L. 2008. Chemical Fractionation and Translocation of Heavy Metals in *Canna Indica* L. Grown on Industrial Waste Amended Soil. Journal of Hazardous Materials. 160: 187-193.
26. Tabatabaei S. H. Nourmahnad N. Kermani S. G. Tabatabaei S.A. Najafi P. and Heidarpour M. 2020. Urban wastewater reuse in agriculture for irrigation in arid and semi-arid regions-A review. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture. 9(2): 193-220.
27. Vajpayee P. Tripathi R. D. Rai U. N. Ali M. B. and Singh S.N. 2000. Chromium (VI)

تأثیر کاربرد زغال‌زیستی پوسته برنج و سطوح مختلف کاربرد آب بر پتانسیل ماتریک خاک، ویژگی‌های بیوشیمیایی و کارایی مصرف آب گیاه گوجه‌فرنگی در خاک آلوده‌شده به کادمیوم

تارا جمیلی^۱، افسانه عالی‌نژادبان بیدآبادی^{۲*}، عباس ملکی^۳، محمد فیضیان^۴ و امید علی اکبرپور^۵

چکیده

زغال‌زیستی به‌عنوان ماده‌آلی اصلاح‌کننده خاک، می‌تواند در کاهش آثار جانبی کمبود آب و تغییر فعالیت آنزیم‌های گیاه رشد کرده در محیط آلوده به فلزات سنگین به‌ویژه کادمیوم مؤثر باشد. هدف از این تحقیق، تأثیر زغال‌زیستی سبوس برنج و کم‌آبیاری بر پتانسیل ماتریک و برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه گوجه‌فرنگی در خاک آلوده به کادمیوم بود. در این راستا آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور سطح آبیاری (L) بر پایه تخلیه رطوبتی خاک در هفت سطح شامل سطح ۵۰ تا سطح ۱۱۰ درصد (L_{50} تا L_{110}) و زغال‌زیستی (B) در سه سطح شاهد (B_0)، ۳ (B_3) و ۶ (B_6) تُن بر هکتار با چهار تکرار به‌صورت گلدانی انجام شد. بررسی پتانسیل ماتریک خاک تحت تأثیر تیمارهای زغال‌زیستی نشان داد که پتانسیل ماتریک با افزایش مصرف زغال‌زیستی در تیمار B_6 در رطوبت‌های ظرفیت مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی دائم افزایش یافت. مقدار کادمیوم قابل جذب خاک با کاربرد زغال‌زیستی و در سطوح رطوبتی بالا کاهش یافت. نتایج نشان داد که ویژگی‌های مواد جامد محلول و ویتامین ث میوه گوجه‌فرنگی با کاهش سطوح آبیاری و افزایش کاربرد زغال‌زیستی به‌صورت معنی‌داری افزایش یافتند. درمقابل، فعالیت آنزیم کاتالاز با افزایش سطوح آبیاری و کاربرد زغال‌زیستی به‌صورت معنی‌داری کاهش یافت. بیشترین مقادیر کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ در $L_{110}B_6$ مشاهده شد که نسبت به $L_{110}B_0$ به ترتیب ۲۹/۴ و ۹۳/۸ درصد بیشتر بودند. بهترین کارایی مصرف آب با ۶۵/۲۳ و ۶۳/۱۴ کیلوگرم بر مترمکعب، به ترتیب در تیمارهای $L_{60}B_6$ و $L_{100}B_6$ مشاهده شد که با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند؛ بنابراین کاربرد زغال‌زیستی می‌تواند راه‌حل خوبی برای بهبود نگاه‌داشت آب در خاک، ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه و کارایی مصرف آب در شرایط کم‌آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک و خاک آلوده‌شده به کادمیوم باشد.

واژه‌های کلیدی: بیوجار، پتانسیل ماتریک، کارتنوئید، کاتالاز، کلروفیل.

ارجاع: جمیلی ت. عالی‌نژادبان بیدآبادی ا. ملکی ع. فیضیان م. و اکبرپور ا. ع. ۱۴۰۱. تأثیر کاربرد زغال‌زیستی پوسته برنج و سطوح مختلف کاربرد آب بر پتانسیل ماتریک خاک، ویژگی‌های بیوشیمیایی و کارایی مصرف آب گیاه گوجه‌فرنگی در خاک آلوده‌شده به کادمیوم. مجله پژوهش آب ایران. ۴۷:

۸۱-۹۱. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14007.2439>

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی خاک (گرایش فیزیک و حفاظت خاک) گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه لرستان.

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

۵- استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

* نویسنده مسئول alinezhadian.a@lu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹

مقدمه

تنش خشکی یکی از شدیدترین تهدیدهای غیرزیستی برای امنیت غذایی جهان محسوب می‌شود و روش‌های مدیریتی حفظ آب آبیاری مانند کم‌آبیاری در حال توسعه هستند که از جمله راهکارهای بهبود کارایی مصرف آب به‌شمار می‌روند (اسماعیل پور و اکبری، ۱۳۹۲؛ موسوی رحیمی و همکاران، ۱۳۹۳). تغییرات در صفات بیوشیمیایی مانند افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان یکی از مکانیسم‌های مقاومت گیاهان در برابر تنش خشکی است. از طرفی مقادیر آلاینده‌ها و فلزات سنگین و به‌ویژه عنصر کادمیوم در خاک به دلیل افزایش فعالیت‌های صنعتی در کشور ایران رو به افزایش است. کادمیوم در بین فلزات سنگین میل ترکیبی کمی برای اتصال به فازهای تثبیت‌کننده خاک، نظیر اکسیدها و فازهای جامد آلی خاک دارد؛ بنابراین قابلیت جذب این عنصر توسط گیاه و انتقال به اندام هوایی گیاه زیاد است (بقائی، ۱۳۹۷).

گوجه‌فرنگی به دلیل داشتن ارزش غذایی بالا، منبع آنتی‌اکسیدان‌ها، فیبر، ویتامین‌ها، پتاسیم، ترکیبات فنولیک، لیکوپن و بتاکارتن از محبوب‌ترین و اصلی‌ترین محصولات کشاورزی در جهان است که به تغذیه مناسب و سالم کمک می‌کند (مهام و همکاران، ۲۰۲۰؛ داد و همکاران، ۲۰۲۱؛ گو و همکاران، ۲۰۲۱). این گیاه دارای بیش از ۲۸۰۰ رقم است و در مقایسه با دیگر سبزی‌ها دارای بیشترین سطح زیر کشت است (کلونکلین و ساواج، ۲۰۱۷). کشور ایران با تولید ۶/۱۷ میلیون تن، رتبه ششم جهانی تولید گوجه‌فرنگی را به خود اختصاص داده است. در سال ۲۰۱۷ میزان کل سطح زیر کشت گوجه‌فرنگی در ایران ۱۵۳۷۳۵ هکتار بود که با عملکرد متوسط ۴۰/۱۸ تن در هکتار، دارای تولید سالانه ۶۱۷۷۲۹۰ تن است (اصلانی و همکاران، ۱۳۹۸).

زغال‌زیستی یک ماده جامد، متخلخل و غنی از کربن است که از تجزیه حرارتی زیست‌توده‌های آلی (مانند چوب، پسماندهای گیاهی و حیوانی) طی فرایند پیرولیز در شرایط بدون اکسیژن یا اکسیژن محدود تهیه می‌شود (جمیلی و همکاران، ۱۴۰۱؛ پندی و همکاران، ۲۰۲۰). زغال‌زیستی به دلیل داشتن سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و همچنین داشتن گروه‌های عاملی سطحی، به‌عنوان یک جاذب آلی برای مدیریت خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و همچنین بهبود نگهداشت آب در خاک و

رشد گیاهان، مورد توجه قرار گرفته است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ منصور و همکاران، ۲۰۲۰).

بررسی پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که افزودن زغال‌زیستی به خاک، موجب تغییر در ویژگی‌های هیدرولیکی اشباع و غیراشباع خاک و سرعت نفوذ آب در خاک می‌شود (یعقوبی و همکاران، ۱۳۹۸). به‌طوری که قربانی و امیراحمدی (۱۳۹۷) گزارش کردند که کاربرد زغال‌زیستی شلتوک برنج با کاهش وزن مخصوص خاک، افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع، تخلخل کل و مقدار آب قابل‌دسترس خاک سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک لومی شد. از دیگر سو، عبید و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که افزودن زغال‌زیستی به میزان ۱۰ تن در هکتار، موجب افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی و کاهش تجمع روی و کادمیوم در میوه گوجه‌فرنگی شد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مزرع‌ای آن‌ها نشان داد که اصلاح خاک با این مقدار زغال‌زیستی باعث افزایش کلروفیل و کاروتنوئیدها در برگ‌های گوجه‌فرنگی به میزان ۵۱ و ۳۵ درصد بالاتر از خاک شاهد شد. باقری و همکاران (۱۴۰۰) با بررسی تأثیر چهار سطح زغال‌زیستی برگ خرما (صفر، ۰/۱۹، ۰/۲۴ و ۰/۳۶ کیلوگرم در مترمربع) و سه سطح تنش کم‌آبی (۰، ۶۰، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی) گزارش کردند که کاربرد ۰/۲۴ کیلوگرم زغال‌زیستی خرما در مترمربع باعث افزایش رشد، کلروفیل و کارایی مصرف آب در خربزه در شرایط تنش خشکی ۸۵ درصد نیاز آبی شد. تنش خشکی باعث افزایش میزان پرولین گیاه شد؛ اما با کاربرد زغال‌زیستی، اثر تنش کم‌آبی کمتر شد و میزان پرولین برگ کاهش یافت. گو و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی کاربرد چهار سطح زغال‌زیستی (صفر، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ تن در هکتار) تهیه‌شده از تنه و شاخه درختان میوه در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد را بر رشد گیاه گوجه‌فرنگی در کشور چین بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان از افزایش عملکرد و کیفیت محصول گوجه‌فرنگی (اعم از محتوای ویتامین ث و نسبت قند به اسید میوه) با افزایش مقدار استفاده از زغال‌زیستی بود.

بر این اساس، با توجه به کمبود منابع آب در کشور و ضرورت اعمال مدیریت صحیح در آبیاری گوجه‌فرنگی به منزله یک محصول اصلی و خارج از فصل و همچنین استفاده از زغال‌زیستی به‌عنوان ماده آلی در خاک و کمک به مدیریت ضایعات اراضی شالی‌کاری، پژوهش حاضر با

برای تهیه زغال‌زیستی از بقایای سبوس برنج موجود در کارخانجات شالیکوبی استفاده شد. نمونه‌ها پس از چندین بار شست‌وشو با آب مقطر و خشک‌شدن، از الک چهار میلی‌متری عبور داده شد و زغال‌زیستی آن در درجه حرارت ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت در کوره الکتریکی در شرایط بدون اکسیژن قرار داده شد تا فرایند گرماکافت انجام شود (کنترال، ۲۰۱۲). زغال‌زیستی تولیدی از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و در تیمارهای آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. مقدار اسیدیته و شوری آب آبیاری به ترتیب ۸/۴۶ و ۴۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر بود. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و بیوجار در جدول ۱ و ۲ آورده شده است.

اهداف ارزیابی تأثیر رژیم‌های مختلف آبی و سطوح زغال‌زیستی بر پتانسیل ماتریک خاک، مقدار کادمیوم قابل جذب خاک، بررسی برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی و کارایی مصرف آب میوه گوجه‌فرنگی می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان در سال ۱۳۹۸ به صورت گلدانی اجرا شد. برای انجام تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌های خاک هوا خشک شده از الک دو میلی‌متری، عبور داده و به آزمایشگاه منتقل شدند. خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم رسی شنی بود.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

Cd (mg/kg)	K (mg/kg)	P (mg/kg)	N (%)	OC (%)	EC _e (dS/m)	pH	ρ _b (g/cm ³)	θ _s (%)	PWP (w/w %)	FC (w/w %)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)
۰/۰۰۹ >	۱۴۴/۰	۱/۱	۰/۰۳	۰/۲۵	۰/۷۹	۷/۶۱	۱/۴۰	۴۲	۹/۳۳	۲۳	۵۸/۳	۱۵	۲۶/۷

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال‌زیستی حاصل شده مورد استفاده در آزمایش

K (g/kg)	P (g/kg)	N (%)	CEC (cmol _e /kg)	OC (%)	EC (dS/m)	pH
۲۰/۰۳	۰/۴	۱/۱۹	۳۴/۰۱	۳۳/۵۸	۱/۰۱	۸/۵۱

کادمیوم بر کیلوگرم خاک استفاده شد. گلدان‌ها در گلخانه به مدت ۶۰ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت براساس ۷۰ درصد ظرفیت زراعی نگهداری شدند. با بررسی مشخصات خاک تجزیه‌شده برای کشت، میزان کمبود عناصر غذایی مورد نیاز شامل کودهای اوره، سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم به ترتیب به میزان ۵۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار با افزودن به خاک جبران شد. نشاهای گیاه گوجه‌فرنگی (رقم هیراد) در مرحله چهار برگی به گلدان‌های مورد نظر منتقل شد.

نحوه اعمال تیمارهای آبیاری

آبیاری همه گلدان‌ها براساس تخلیه رطوبتی انجام شد. به این صورت که پس از استقرار گیاه و برای اعمال تیمارهای آبیاری، مقدار آب مورد نیاز گیاه تا رسیدن به شرایط ظرفیت زراعی (رطوبت ۲۳ درصد) به‌عنوان تیمار آبیاری کامل (L₁₀₀) در نظر گرفته شد و میزان آب مورد نیاز در سایر تیمارهای آبیاری (L₅₀، L₆₀، L₇₀، L₈₀، L₉₀ و L₁₀₀) به ترتیب با اعمال ضرایب ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹

طرح آزمایش

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور شامل: ۱- سطوح آبیاری (در هفت سطح ۵۰ (L₅₀)، ۶۰ (L₆₀)، ۷۰ (L₇₀)، ۸۰ (L₈₀)، ۹۰ (L₉₀)، ۱۰۰ (L₁₀₀) و ۱۱۰ (L₁₁₀) درصد، براساس تخلیه رطوبتی خاک) و ۲- زغال‌زیستی سبوس برنج (در سه سطح صفر (شاهد) (B₀)، ۳ (B₃) و ۶ (B₆) تن در هکتار) در چهار تکرار در خاک آلوده به کادمیوم انجام شد. با توجه به تعداد تیمارها (۲۱ تیمار) از ۸۴ گلدان پلاستیکی ۱۰ کیلوگرمی استفاده شد. در کف گلدان‌ها سوراخ‌هایی برای زهکشی ایجاد و فیلتر شنی به ضخامت دو سانتی‌متر در کف گلدان تعبیه شد. مقادیر زغال‌زیستی مطابق با تیمارهای آزمایشی به خاک‌های توزین شده اضافه شد.

با توجه به اینکه میانگین جهانی کادمیوم در خاک ۰/۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک گزارش شده است (ترکیان و ودپول، ۱۹۶۱)، برای آلوده کردن خاک از محلول نمک نیترات کادمیوم (Cd(NO₃)₂) با غلظت ۵ میلی‌گرم

رویی با دستگاه اسپکتروفتومتر برای کلروفیل به ترتیب در طول موج‌های ۶۴۵، ۶۶۳ و برای کاروتنوئید در طول موج ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. استون به‌عنوان محلول شاهد برای تنظیم صفر جذب نوری اسپکتروفتومتر استفاده شد. میزان کلروفیل کل (Chl_{total}) و کاروتنوئید (Car) بر حسب میلی‌گرم در گرم برگ تازه محاسبه شدند (لیختن‌هالر و بوشمن، ۲۰۰۱).

آنزیم کاتالاز

برای استخراج آنزیم کاتالاز، به ۰/۳ بافت برگ پودر شده، بافر فسفات پتاسیم اضافه و سوسپانسیون حاصل سانتریفیوژ شد. سنجش آنزیم نیز در طول موج ۲۴۰ نانومتر قرائت شد. مقدار کمی فعالیت کاتالاز بر حسب میزان آب‌اکسیژنه غیرفعال شده در یک دقیقه در هر گرم بافت برگ محاسبه شد (چنس و مهلی، ۱۹۹۵).

کارایی مصرف آب

برای تعیین کارایی مصرف آب بر پایه تعداد و وزن میوه گوجه‌فرنگی، ابتدا مقدار عملکرد برای هر تیمار به‌طور جداگانه محاسبه و سپس با تقسیم عملکرد در واحد سطح (Kg/ha) به مقدار آب مصرفی در واحد سطح (m^3/ha)، کارایی مصرف آب (Kg/m^3) تعیین شد (دین‌آباد و همکاران، ۱۴۰۱). تحلیل‌های آماری داده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۲) انجام و نمودارها توسط نرم‌افزار Excel رسم شدند. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد محاسبه شد.

نتایج و بحث

پتانسیل ماتریک

بررسی پتانسیل ماتریک خاک تحت‌تأثیر تیمارهای زغال‌زیستی نشان داد که پتانسیل ماتریک با افزایش مصرف زغال‌زیستی افزایش می‌یابد (شکل ۱) که این می‌تواند به دلیل افزایش قابلیت نگهداری آب در خاک در حضور زغال‌زیستی باشد. مطابق با نتایج، اختلاف رطوبت خاک در پتانسیل ماتریک ۰/۱ و ۱ اتمسفر در تیمارهای B_0 ، B_3 و B_6 به ترتیب ۰/۲۹، ۰/۱۶ و ۰/۱۴ بود؛ بنابراین در عدم کاربرد زغال‌زیستی، سرعت کاهش رطوبت خاک با افزایش پتانسیل ماتریک خاک در حداکثر مقدار خود و در

و ۱/۱ نسبت به تیمار (L_{100}) محاسبه و به گلدان‌ها اضافه شد. هر سه روز یک مرتبه عمل آبیاری گلدان‌ها انجام شد تا کمبود آب نسبت به سطوح مختلف آبیاری مورد نظر تأمین شود.

پتانسیل ماتریک خاک

پتانسیل ماتریک خاک توسط نمونه‌های خاک اشباع‌شده تیمارهای شاهد (B_0)، ۳ تن در هکتار (B_3) و ۶ تن در هکتار (B_6) زغال‌زیستی و دستگاه صفحات فشاری، در مکش‌های مختلف تعیین شد. همچنین مقدار آب قابل دسترس گیاه (AWC) در تیمارهای مختلف از تفاضل مقدار آب نقطه ظرفیت مزرعه‌ای (θ_{FC}) در مکش ۰/۳ اتمسفر و نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) در مکش ۱۵ اتمسفر محاسبه شد (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۵). در پایان فصل رشد و رسیدگی فیزیولوژیک، میوه‌های هر گلدان به‌طور کامل برداشت شده و صفات بیوشیمیایی و کارایی مصرف آب مورد ارزیابی قرار گرفت.

ویتامین ث

محتوای ویتامین ث یا اسید آسکوربیک میوه به روش تیتراسیون با یدور پتاسیم ۰/۲ نرمال اندازه‌گیری و بر حسب میلی‌گرم ویتامین ث در هر ۱۰۰ میلی‌لیتر آب میوه محاسبه شد.

مواد جامد محلول

میزان مواد جامد محلول در میوه که بر حسب درجه بریکس گزارش می‌شود، توسط رفراکتومتر دستی (ATAGO Brix-%32) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد (احتشام‌نیا و همکاران، ۲۰۲۱).

لیکوپن

لیکوپن میوه با روش عصاره‌گیری از میوه و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (اواک، ۱۹۹۰).

کلروفیل و کاروتنوئید

برای سنجش محتوای کلروفیل و کاروتنوئید ۰/۱ گرم از برگ با ازت مایع خرد و با ۱۰ میلی‌لیتر استون خالص مخلوط و عصاره به‌دست‌آمده در فالكون ۱۵ میلی‌لیتری ریخته و سانتریفیوژ شد. سپس شدت جذب محلول شفاف

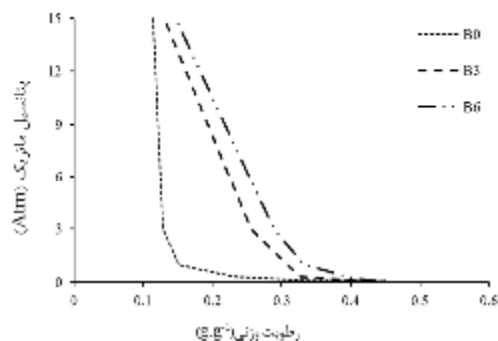
ایکولباش و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که حتی افزایش اندک در سطح ویژه خاک و تخلخل خاک با کاربرد زغال‌زیستی نیشکر در خاک، می‌تواند زمینه‌ساز افزایش پتانسیل ماتریک خاک شود. نتایج آن‌ها نشان داد که بسته به نرخ مصرف زغال‌زیستی، پتانسیل ماتریک خاک متفاوت است. به طوری که در یک مکش معین، مقدار رطوبت خاک در تیمارهای حاوی زغال‌زیستی بیشتر بود و با افزایش مقدار زغال‌زیستی مصرفی آب قابل‌دسترس گیاه به ویژه در خاک‌های سبک افزایش یافت. به صورت مشابه، لی و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان دادند که کاربرد زغال‌زیستی ترکیب چوب درختان سدر، سرو و بامبو، سبب افزایش مکش خاک و کاهش سرعت تخلیه رطوبتی خاک نسبت به تیمارهای بدون زغال‌زیستی شد.

کادمیوم قابل جذب خاک

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار فراهمی کادمیوم در خاک در اثر افزایش کاربرد زغال‌زیستی و افزایش سطح آب آبیاری بود (شکل ۲). به طوری که کمترین غلظت کادمیوم خاک در تیمار B₆ در سطح آبیاری ۱۱۰ درصد دیده شد. همچنین مقادیر کادمیوم قابل جذب خاک در تیمارهای L₁₀₀B₆ و L₁₁₀B₆ فاقد اختلاف معنی‌دار بودند. مطابق با نتایج مقدار کادمیوم در تیمار B₆ در شرایط ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درصد در مقایسه با تیمار B₆ در شرایط ۵۰ درصد، به ترتیب، ۲۴/۳، ۲۷/۹ و ۳۴/۲ درصد کاهش یافت. تبادل یونی می‌تواند یکی از دلایل تثبیت فلزات سنگین در خاک در اثر کاربرد زغال‌زیستی باشد (زو و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه، دلیل کاهش غلظت کادمیوم در تیمارهای کاربرد زغال‌زیستی و سطوح رطوبتی بالا را می‌توان به تبادل یونی نسبت داد. در این مطالعه، کاربرد زغال‌زیستی و افزایش سطح رطوبت خاک، سبب افزایش غلظت قابل‌استفاده پتاسیم، کلسیم، آهن، منگنز، روی و مس در خاک شده است؛ بنابراین احتمالاً افزایش آزادسازی این عناصر در خاک، تثبیت کادمیوم و کاهش غلظت قابل‌استفاده آن را در خاک به دنبال داشته است.

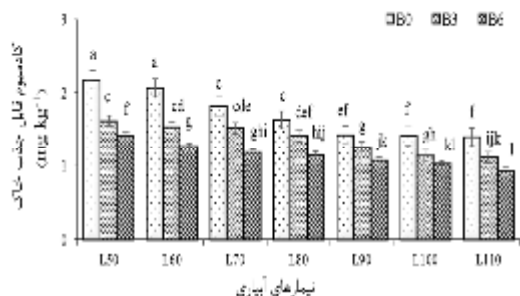
این بخش از نتایج با نتایج پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت داشت. آن‌ها نیز کاهش کادمیوم قابل جذب خاک را با کاربرد زغال‌زیستی سبوس برنج در

تیمار B₆ در کمترین مقدار خود بود. همچنین مطابق با شکل ۱، میانگین مقادیر رطوبت در وضعیت FC برای خاک در سه سطح B₀، B₃ و B₆ به ترتیب ۰/۲۲۹، ۰/۳۲۷ و ۰/۳۹۶ و برای رطوبت در وضعیت PWP نیز ۰/۱۱۴، ۰/۱۲۷ و ۰/۱۳۹ به دست آمد که نشان می‌دهد با افزایش کاربرد سطوح زغال‌زیستی در خاک، مقادیر رطوبت در نقاط مختلف منحنی رطوبتی (از نقطه ظرفیت زراعی تا نقطه پژمردگی دائم) افزایش یافت. همچنین میزان رطوبت تیمار B₆ نسبت به B₃ و B₀ در وضعیت PAWC، به ترتیب ۲۸/۵۰ و ۱۲۳/۴۸ درصد افزایش پیدا کرد. با وجود اینکه مدت زمان پژوهش کوتاه بود و آزمایش‌ها بلافاصله بعد از پایان فصل رشد گوجه‌فرنگی (پس از ۴ ماه) انجام گرفت، زغال‌زیستی حاصل از سبوس برنج سبب بهبود شرایط فیزیکی خاک شد. یافته‌های پژوهش حاضر به وضوح تأثیر زغال‌زیستی روی حفظ رطوبت و نگه‌داشت آب در خاک را نشان می‌دهد. مطالعات نشان داده است که خواص ماتریکس خاک‌ها بر اساس نوع خاک، توسعه و مدیریت خاک می‌تواند تغییر کند و همگی این عوامل می‌توانند بر کل محتوای آب خاک و آب در دسترس گیاه تأثیر بگذارند (اتکینسون و همکاران، ۲۰۱۸). نوروزی و همکاران (۱۳۹۷) در نتایج خود بیان کردند که کاربرد زغال‌زیستی برگ خرما توانست میزان رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و آب قابل‌دسترس گیاه را نسبت به تیمار بدون کاربرد افزایش دهد و همچنین داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی نشان داد که زغال‌زیستی باعث افزایش منافذ بزرگ‌تر از ۰/۲ μm شد که به لحاظ ذخیره رطوبت قابل‌دسترس گیاه حائز اهمیت است.



شکل ۱- تغییرات پتانسیل ماتریک خاک تحت تأثیر تیمارهای زغال‌زیستی

(B₀، B₃ و B₆ به ترتیب سطوح صفر (شاهد)، ۳ و ۶ تن زغال‌زیستی در هکتار هستند.)



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و زغال‌زیستی بر کادمیوم قابل جذب خاک

خاک گزارش کردند. همچنین، نتایج پژوهش مرادی و کریمی (۲۰۲۱) نیز نشان داد کاربرد زغال‌زیستی بقایای ذرت و سبوس برنج سبب کاهش فراهمی کادمیوم در خاک شد.

صفات بیوشیمیایی گوجه‌فرنگی

نتایج نشان داد رژیم‌های مختلف آبیاری و زغال‌زیستی بر تغییرات ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه گوجه‌فرنگی مانند ویتامین ث، مواد جامد محلول، کلروفیل کل و کارتنوئید برگ و همچنین لیکوپن و کاتالاز میوه گوجه‌فرنگی در سطح یک درصد اثر معنی‌دار داشتند (جدول ۳).

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر سطوح آبیاری و زغال‌زیستی بر مقادیر صفات بیوشیمیایی گیاه گوجه‌فرنگی

مقادیر F							
منابع تغییرات	درجه آزادی	ویتامین ث	مواد جامد محلول	کلروفیل کل	کارتنوئید برگ	لیکوپن	کاتالاز
بلوک	۳	۰/۹۵ ^{ns}	۰/۵۳ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۴۳ ^{ns}	۱/۸۸ ^{ns}	۱/۳۱ ^{ns}
سطوح آبیاری	۶	۲۳۶/۳۳ ^{**}	۳۹۲/۴۵ ^{**}	۱۳۲۰۰۰/۰۰ ^{**}	۸۱۷۶/۰۰ ^{**}	۹۵۰/۹۲ ^{**}	۸۴۸/۶۷ ^{**}
زغال‌زیستی	۲	۸۹/۰۶ ^{**}	۸۰/۳۴ ^{**}	۲۴۴۲۰۰/۰۰ ^{**}	۷۷۶۲/۰۰ ^{**}	۱۰۱/۲۸ ^{**}	۵۰/۷۶ ^{**}
سطوح آبیاری × زغال‌زیستی	۱۲	۹/۲۳ ^{**}	۲/۱۷ [*]	۵۲۳/۹۹ ^{**}	۲۲۰۲۰/۰۰ ^{**}	۵/۱۹ ^{**}	۴/۴۷ ^{**}
خطا	۶۰						
ضریب تغییرات (درصد)		۰/۳۹	۰/۳۵	۰/۰۱۷	۰/۲۶	۰/۱۴	۰/۲۷

^{ns}، * و ^{**} به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

مواد جامد محلول و ویتامین ث در میوه گوجه‌فرنگی

نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های مواد جامد محلول و ویتامین ث میوه گوجه‌فرنگی نشان داد که این ویژگی‌ها با کاهش سطوح آبیاری و افزایش کاربرد زغال‌زیستی به صورت معنی‌داری افزایش یافتند (جدول ۴).

البته در هریک از سطوح آبیاری با افزایش مقدار کاربرد زغال‌زیستی، ویتامین ث افزایش معنی‌داری نشان نداد. مواد جامد محلول و ویتامین ث میوه گوجه‌فرنگی در تیمار L₅₀B₆ بیشترین مقدار و در تیمار L₁₁₀B₀ کمترین مقدار را داشتند؛ به طوری که ویژگی‌های مواد جامد محلول و ویتامین ث میوه گوجه‌فرنگی در تیمار L₅₀B₆ نسبت به تیمار L₁₁₀B₀، به ترتیب ۶۸/۹ و ۶۵/۳ درصد بیشتر بود.

از طرفی در تیمارهای شاهد بدون کاربرد زغال‌زیستی (B₀)، کادمیوم احتمالاً بر میزان مواد جامد محلول و ویتامین ث اثر منفی گذاشته است، به طوری که در همه سطوح مختلف آبیاری این تیمار (B₀)، میانگین مقادیر این دو صفت بیوشیمیایی از سایر تیمارهای دریافت‌کننده

زغال‌زیستی کمتر به دست آمد. درحقیقت حضور عناصر غذایی موجود در ترکیب زغال‌زیستی توانسته است از اثر منفی کادمیوم بکاهد و ویژگی‌های گیاه را بهبود بخشد. هنگامی که گیاه گوجه‌فرنگی طی رشد آب کمتری دریافت کند، این گیاه برخی از فعالیت‌های متابولیک مانند تنظیم اسمزی را کنترل می‌کند و به طور ترجیحی ساکارز بیشتری را به اندام‌های گیاهی برگ و میوه اختصاص می‌دهد، نرخ تبدیل اسید آلی را افزایش می‌دهد، عناصر غذایی بیشتری به میوه‌ها هدایت شده و بدین ترتیب محتوای مواد جامد محلول و ویتامین ث افزایش می‌یابد. این نتایج در میوه گوجه‌فرنگی با افزایش میزان مصرف زغال‌زیستی دیده شد که می‌توان آن را به بهبود رشد ریشه در لایه‌های عمیق‌تر خاک نسبت داد؛ به گونه‌ای که باعث جذب بیشتر مواد مغذی و آب (شکل ۱)، تغییرات پتانسیل ماتریک خاک تحت تأثیر تیمارهای زغال‌زیستی) توسط گیاهان شده است (آگبنا و همکاران، ۲۰۱۷).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و زغال‌زیستی بر مواد جامد محلول و ویتامین ث در میوه گوجه‌فرنگی

ویتامین ث (mg/100 g)			مواد جامد محلول (°Brix)			
B ₆	B ₃	B ₀	B ₆	B ₃	B ₀	
۴۵/۵۶ ^a	۴۵/۴۸ ^a	۴۰/۴۵ ^b	۶/۸۶ ^a	۶/۵۷ ^b	۶/۲۵ ^c	L ₅₀
۴۵/۶۰ ^a	۴۴/۱۲ ^a	۳۸/۹۵ ^b	۵/۸۴ ^d	۵/۲۳ ^e	۵/۰۷ ^e	L ₆₀
۴۵/۷۵ ^a	۴۳/۸۱ ^a	۳۴/۴۲ ^{cd}	۵/۱۱ ^e	۴/۷۹ ^f	۴/۳۳ ^{gh}	L ₇₀
۳۵/۳۴ ^c	۳۴/۷۵ ^{cd}	۳۳/۹۰ ^{cde}	۴/۵۵ ^g	۴/۲۴ ^{hi}	۴/۰۷ ⁱ	L ₈₀
۳۳/۶۷ ^{cde}	۳۳/۴۱ ^{cde}	۳۲/۷۶ ^{def}	۴/۳۸ ^{gh}	۴/۱۶ ^{hi}	۴/۰۸ ⁱ	L ₉₀
۳۱/۸۵ ^{efg}	۳۱/۹۷ ^{efg}	۳۰/۱۰ ^g	۴/۳۴ ^{gh}	۴/۱۶ ^{hi}	۴/۰۶ ⁱ	L ₁₀₀
۳۱/۰۸ ^g	۳۰/۳۳ ^g	۲۷/۵۶ ^h	۴/۵۵ ^g	۴/۲۵ ^{hi}	۴/۰۶ ⁱ	L ₁₁₀

میانگین‌هایی که حروف مشترک کوچک دارند، در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

فلزات سنگین از جمله کادمیوم، کلروفیل و کاروتنوئیدها را در محصول گوجه‌فرنگی کاهش می‌دهند و در نهایت باعث تأثیر بر متابولیسم گیاه و کاهش فتوسنتز می‌شوند (زیشان و همکاران، ۲۰۲۰). با کاربرد زغال‌زیستی در خاک، دسترسی ریشه گیاه به مواد غذایی از جمله نیتروژن افزایش می‌یابد که این امر به بهبود محتوای کلروفیل گیاه کمک می‌کند. گزارش شده است که مصرف زغال‌زیستی در خاک سبب بهبود تولید کلروفیل، کاروتنوئید، فتوسنتز و تسهیل انتقال الکترون می‌شود (لیو و همکاران، ۲۰۱۶؛ زیشان و همکاران، ۲۰۲۰). در مطالعه‌ای که توسط منیر و همکاران (۲۰۲۰) انجام شد، بوته‌های خیار که در زغال‌زیستی برگ و ساقه نخل خرما رشد کردند، ۱۵ درصد کلروفیل بیشتری نسبت به گیاهان شاهد تولید کردند. این می‌تواند به دلیل کارایی نگهداری آب و ویژگی‌های منحصر به فرد زغال‌زیستی (شکل ۱) باشد که آب کافی و مواد مغذی محلول گیاه را در طول مراحل مختلف رشد گیاه فراهم می‌کند و موجب بهبود پارامترهای رشد محصولات زراعی می‌شود (دانش و همکاران، ۲۰۲۰).

این نتایج همچنین مطابق با مطالعات المرادی و عیسی (۲۰۲۰) است که گزارش کردند با کاربرد ۱۰ تن در هکتار زغال‌زیستی ساقه ذرت، مواد جامد محلول و ویتامین ث میوه گوجه‌فرنگی در مقایسه با شاهد به میزان ۳۳، ۲۹ و ۳۹ درصد افزایش یافت. همچنین ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) به ترتیب با کاربرد زغال‌زیستی کاه گندم در شرایط تنش خشکی، افزایش مواد جامد محلول و ویتامین ث را در میوه گوجه‌فرنگی نسبت به تیمار شاهد گزارش کردند.

رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ)

میانگین مقادیر کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ گیاه با افزایش مقدار زغال‌زیستی مصرفی و سطوح آبیاری به صورت معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۵). بیشترین مقدار کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ در تیمار L₁₁₀B₆ مشاهده شد که نسبت به تیمار L₁₁₀B₀ به ترتیب ۲۹/۴ و ۹۳/۸ درصد بیشتر بود. این مقادیر در L₁₁₀B₆ نسبت به L₁₁₀B₃ به ترتیب ۱۵/۵ و ۳۳/۸ درصد افزایش نشان داد (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و زغال‌زیستی بر کلروفیل کل، کاروتنوئید برگ و کاتالاز (µg/g FW)

کاتالاز (µg/g FW)			کاروتنوئید برگ (mg/kg FW)			کلروفیل کل (mg/kg FW)			
B ₆	B ₃	B ₀	B ₆	B ₃	B ₀	B ₆	B ₃	B ₀	تیمارها
۰/۴۵ ^c	۰/۴۷ ^b	۰/۵۱ ^a	۰/۱۱ ^r	۰/۰۹ ^s	۰/۰۹ ^s	۴/۷۰ ^q	۴/۱۸ ^s	۳/۴۱ ^t	L ₅₀
۰/۴۳ ^d	۰/۴۴ ^c	۰/۴۷ ^b	۰/۳۰ ⁱ	۰/۱۳ ^q	۰/۱۰ ^{rs}	۵/۷۳ ^j	۵/۰۸ ^o	۴/۲۸ ^r	L ₆₀
۰/۳۹ ^e	۰/۳۹ ^e	۰/۴۱ ^d	۰/۳۲ ^k	۰/۲۴ ⁿ	۰/۱۵ ^p	۶/۳۳ ^e	۵/۷۳ ^j	۴/۸۹ ^p	L ₇₀
۰/۳۴ ^f	۰/۳۵ ^f	۰/۳۵ ^f	۰/۴۵ ^h	۰/۴۳ ⁱ	۰/۱۹ ^o	۶/۶۲ ^d	۵/۹۷ ⁱ	۵/۲۳ ^m	L ₈₀
۰/۲۷ ^{hi}	۰/۲۸ ^h	۰/۳۰ ^g	۰/۸۵ ^c	۰/۴۸ ^g	۰/۲۶ ^m	۶/۸۴ ^c	۶/۱۸ ^h	۵/۴۶ ^m	L ₉₀
۰/۲۶ ^{hij}	۰/۲۶ ^{hij}	۰/۲۷ ^{hi}	۰/۸۸ ^b	۰/۵۹ ^e	۰/۳۷ ^j	۷/۱۷ ^b	۶/۲۳ ^g	۵/۵۳ ^l	L ₁₀₀
۰/۲۴ ^j	۰/۲۵ ^{ij}	۰/۲۶ ^{hij}	۰/۹۵ ^a	۰/۷۱ ^d	۰/۴۹ ^f	۷/۲۰ ^a	۶/۲۶ ^f	۵/۵۶ ^k	L ₁₁₀

میانگین‌هایی که حروف مشترک کوچک دارند، در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

آنزیم کاتالاز

نتایج مقایسه میانگین فعالیت آنزیم کاتالاز (جدول ۵) در میوه گوجه‌فرنگی نشان داد که با افزایش سطوح آبیاری و کاربرد زغال‌زیستی از شدت فعالیت این آنزیم به صورت معنی‌داری کاسته شد. بیشترین مقدار آنزیم کاتالاز در تیمار $L_{50}B_0$ دیده شد که با میزان این آنزیم در تیمارهای B_6 و B_3 در سطح آبیاری مشابه با $۸/۵$ و $۱۳/۳$ درصد و به صورت معنی‌داری بیشتر بود. میزان افزایش آنزیم کاتالاز در تیمار $L_{50}B_0$ نسبت به تیمار $L_{110}B_6$ به حداکثر خود رسید و $۲/۱$ برابر شد.

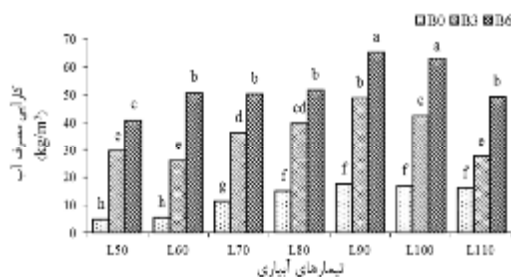
گزارش شده است که ژن‌های فعال در طول تنش خشکی با سنتز آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات ردوکتاز، گلوتاتیون ردوکتاز و ... با ایجاد سیستم آنتی‌اکسیدانی کارآمد در حفاظت گیاه نقش دارند (جانگید و دوپودی، ۲۰۱۷)؛ بنابراین در پژوهش حاضر با افزایش تنش خشکی، افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز مشاهده شد و از آنجا که کاربرد زغال‌زیستی بر کاهش تنش خشکی مؤثر است، از شدت فعالیت این آنزیم در حضور زغال‌زیستی کاسته شد؛ اما با این وجود مقدار این آنزیم بیش از تیمارهایی بود که در آبیاری مناسب و بدون زغال‌زیستی رشد کرده بود. ابراهیمی و همکاران (۲۰۲۱) بیان کردند که در شرایط کم‌آبیاری و مصرف زغال‌زیستی تهیه‌شده از شاخه و برگ درختان خرما و پسته، غلظت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برگ گیاه بادمجان از جمله گایاکول پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز برگ تحت تأثیر قرار گرفتند. آن‌ها گزارش کردند که بیشترین مقدار این آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهانی مشاهده شد که در شرایط آبیاری ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک و بدون اضافه‌شدن زغال‌زیستی به خاک رشد کرده بودند و در مقابل گیاهانی که در شرایط آبیاری کامل خاک و افزودن زغال‌زیستی به خاک رشد کردند، غلظت پایینی از این آنزیم‌ها داشتند.

کارایی مصرف آب (WUE)

کارایی مصرف آب در همه تیمارهای زغال‌زیستی در سطح آبیاری L_{90} نسبت به دیگر سطوح آبیاری بالاتر بود (شکل ۳). در سطح آبیاری L_{90} ، بیشترین مقدار کارایی مصرف آب مربوط به تیمار B_6 بود که نسبت به تیمارهای B_3 و B_0 به ترتیب $۳/۸$ و $۱/۳$ برابر افزایش یافت. قابل توجه است که

در تیمارهای B_3 و B_6 در سطح آبیاری L_{110} نسبت به سطح آبیاری L_{90} ، کارایی مصرف آب به ترتیب $۴۳/۶$ و $۲۴/۶$ درصد به صورت معنی‌داری کاهش داشت. همچنین کاهش شدید کارایی مصرف آب در تیمار L_{50} نیز مشاهده شد. کارایی مصرف آب از نسبت عملکرد میوه گوجه‌فرنگی بر مقدار آب مصرفی به دست آمد؛ بنابراین، با وجود اینکه در تیمار B_6 در سطح آبیاری L_{110} نسبت به سطح آبیاری L_{90} ، افزایش عملکرد میوه گوجه‌فرنگی و مقدار آب مصرفی مشاهده شد؛ اما نسبت افزایش میزان آب مصرفی بیش از مقدار افزایش عملکرد بود و این امر سبب کاهش کارایی مصرف آب در تیمار L_{80} و L_{110} نسبت به L_{90} شد.

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کارایی مصرف آب با افزایش مصرف زغال‌زیستی به صورت معنی‌داری افزایش یافت. زغال‌زیستی با وجود تخریب بالا و بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک سبب نگهداشت بیشتر آب در محیط ریشه گیاه می‌شود و از این رو می‌تواند در کاهش مصرف آب مؤثر باشد.



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و زغال‌زیستی بر کارایی مصرف آب

نوروزی و همکاران (۱۳۹۷) با کاربرد زغال‌زیستی برگ خرما به نسبت سه درصد وزنی در خاک لوم شنی در کشت گیاه گندم بیان کردند که زغال‌زیستی با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شرایط رطوبتی خاک می‌تواند کارایی مصرف آب را در شرایط تنش افزایش دهد. اوبادی و همکاران (۲۰۲۰) و لیو و همکاران (۲۰۲۱) به ترتیب از زغال‌زیستی بقایای هرس درخت انگور در کشت ذرت و زغال‌زیستی کاه گندم در کشت تنباکو استفاده و گزارش کردند که زغال‌زیستی با بهبود شرایط رطوبتی خاک سبب افزایش کارایی مصرف آب می‌شود. بایمونت و همکاران (۲۰۲۰) نیز با بررسی سه گیاه گندم، سورگوم و گوجه‌فرنگی در شرایط کاهش مصرف آب و کاربرد زغال‌زیستی چند نوع درخت کاج جنگلی اظهار داشتند که

- عملکرد گوجه‌فرنگی تحت شرایط کم‌آبایی. مجله به‌زراعی کشاورزی. ۲۱(۲): ۲۲۱-۲۳۲.
۳. باقری م.، جوانمرد ح.، و نادری م. ر. ۱۴۰۰. واکنش رشد گیاه بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla L.*) به آلودگی کادمیوم و سرب در شرایط گلخانه و مزرعه. دوفصلنامه علوم به‌زراعی گیاهی. ۱۱(۱): ۱۹-۳۴.
۴. بقائی ا. ح. ۱۳۹۷. اثر برهمکنش کمپوست زباله شهری و بیوچار بقایای پسته بر کاهش تنش کادمیوم در گیاه شاهی (مطالعه موردی: کمپوست زباله شهری زرنديه). مجله سلامت و بهداشت. ۹(۳): ۲۷۷-۲۹۰.
۵. جمیلی ت.، عالی نژادیان بیدآبادی ا.، ملکی ع.، فیضیان م. و اکبرپور ا. ع. ۱۴۰۱. بررسی کاربرد بیوچار و سطوح مختلف آبیاری بر ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی و تنفس میکروبی خاک آلوده به کادمیوم در کشت گوجه‌فرنگی. تحقیقات آب و خاک ایران.
۶. دین‌آباد ا. ف.، بیگلویی م. ح.، مجد سلیمی ک. و حسن پور اصل م. ۱۴۰۱. بررسی اثر متقابل رژیم‌های آبیاری تحت فشار بر عملکرد و کارایی مصرف آب گیاه چای در منطقه فومن. مجله پژوهش آب در ایران. ۱۶(۱): ۹-۱.
۷. قربانی م. و امیراحمدی ا. ۱۳۹۷. اثر بیوچار پوسته برنج بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک و رشد ذرت در یک خاک لومی. پژوهش‌های خاک. ۳۲(۳): ۳۰۵-۳۱۸.
۸. موسوی رحیمی م.، دلشاد م. و لیاقت ع. ۱۳۹۳. عملکرد و کیفیت میوه گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum L., Cv. Synda*) در کشت بدون خاک تحت تأثیر خشکی‌دهی قسمتی از ریشه و پلیمر هیدروژل. تولیدات گیاهی (مجله علمی کشاورزی). ۳۷(۳): ۲۳-۳۶.
۹. نوروزی م. طباطبائی س. ح.، نوری م. و متقیان ح. ر. ۱۳۹۵. اثرات کوتاه‌مدت بیوچار حاصل از برگ خرما بر حفظ رطوبت در خاک لوم شنی. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۲: ۱۳۷-۱۵۰.
۱۰. نوروزی م.، طباطبائی س. ح. و نوری م. ر. ۱۳۹۷. کارایی مصرف آب گندم تحت شرایط تنش همزمان شوری و رطوبتی با کاربرد بیوچار برگ خرما. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۷(۳): ۲۲-۳۷.
۱۱. یعقوبی م.، طباطبائی س. ح.، رئیسی ط. و شادنیار.

در شرایط کم‌آبایی، کاربرد زغال‌زیستی سبب شد که نیاز آبی گیاه کاهش یافته، کاهش عملکرد گیاه تحت تنش آبی به حداقل برسد و کارایی مصرف آب بهبود یابد. در آزمایش آن‌ها، تأثیر زغال‌زیستی بر افزایش کارایی مصرف آب و افزایش عملکرد در گیاه گندم و گوجه‌فرنگی بیشتر از سورگوم بود.

نتیجه‌گیری

مطابق با نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت در شرایط رطوبتی یکسان، تیمارهای حاوی زغال‌زیستی پتانسیل ماتریک خاک را افزایش دادند و از این طریق در نگاه‌داشت آب در خاک مؤثر بودند. مقدار کادمیوم قابل‌جذب خاک در تیمار B_6L_{110} در مقایسه با تیمار B_0L_{50} کاهش یافت. همچنین رنگدانه‌های فتوسنتزی کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ در تیمارهای کاربرد زغال‌زیستی و سطوح آبیاری بالا، افزایش یافتند و در نتیجه مقدار فتوسنتز افزایش یافت. ویژگی‌های بیوشیمیایی میوه گوجه‌فرنگی نیز با افزایش کاربرد زغال‌زیستی و سطوح آبیاری بهبود یافتند و سبب افزایش کیفیت میوه گوجه‌فرنگی شدند. تیمارهای حاوی زغال‌زیستی بویژه در سطوح بالاتر آبیاری (L_{90} ، L_{100} و L_{110})، دارای محتوای ویتامین ث بیشتری بودند، اما آنزیم آنتی‌اکسیدانی کاتالاز در تیمارهای سطح آبیاری پایین (به‌ویژه ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک) و عدم مصرف زغال‌زیستی به‌دلیل وجود شرایط تنش‌زا افزایش یافت که این مربوط به سیستم آنتی‌اکسیدانی کارآمد گیاه برای حفاظت گیاه در شرایط تنش است. کارایی مصرف آب به‌صورت مؤثری تحت‌تأثیر مصرف زغال‌زیستی قرار گرفت. بیشترین کارایی مصرف آب در تیمار $L_{90}B_6$ قرار داشت.

منابع

۱. اسماعیل‌پور ب. و اکبری م. ۱۳۹۲. ارزیابی تأثیر کم‌آبایی بر خصوصیات رشدی، عملکرد و کیفیت پس از برداشت دو رقم گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum mill*) در شرایط آب‌وهوایی میاندوآب. نشریه بوم‌شناسی کشاورزی. ۵(۲): ۱۷۸-۱۸۷.
۲. اصلانی ش.، برزگر ط. و نیکبخت ج. ۱۳۹۸. اثر اسید هیومیک بر شاخص‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و

22. Ebrahimi M. Souri M. K. Mousavi A. and Sahebani N. 2021. Biochar and vermicompost improve growth and physiological traits of eggplant (*Solanum melongena* L.) under deficit irrigation. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*: 8(1): 1-14.
23. Ehtesham Nia A. Taghipour Sh. and Siahmansour S. 2021. Pre-harvest application of chitosan and postharvest Aloe vera gel coating enhances quality of table grape (*Vitis vinifera* L. cv. 'Yaghouti') during postharvest period. *Food Chemistry*. 347: 129012.
24. Eykelbosh A. J. Johnson M. S. Santos de Queiroz E. Dalmagro H. J. and Guimarães Couto E. 2014. Biochar from sugarcane filtercake reduces soil CO₂ emissions relative to raw residue and improves water retention and nutrient availability in a highly-weathered tropical soil. *PLoS one*. 9(6): e98523.
25. Guo L. Yu H. Kharbach M. Zhang W. Wang J. and Niu W. 2021. Biochar Improves Soil-Tomato Plant, Tomato Production, and Economic Benefits under Reduced Nitrogen Application in Northwestern China. *Plants*. 10: 759.
26. Jangid K. K. and Dwivedi P. 2017. Physiological and biochemical changes by nitric oxide and brassinosteroid in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under drought stress. *Acta Physiologiae Plantarum*. 39(3): 1-10.
27. Klunklin W. and Savage G. 2017. Effect on quality characteristics of tomatoes grown under well-watered and drought stress conditions. *Foods*. 6: 1-10.
28. Li L. Zhang Y. J. Novak A. Yang Y. and Wang J. 2021. Role of Biochar in Improving Sandy Soil Water Retention and Resilience to Drought. *Water*. 13: 407.
29. Lichtenthaler H. K. and Buschmann C. 2001. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. In: *Current protocols in food analytical chemistry*, F4.3.1-F4.3.8. John Wiley and Sons, Inc. New York.
30. Liu X. Wei Z. Manevski K. Liu J. Ma Y. Andersen M. N. and Liu F. 2021. Partial root-zone drying irrigation increases water-use efficiency of tobacco plants amended with biochar. *Industrial Crops and Products*. 166: 113487.
31. Lyu S. Du G. Liu Z. Zhao L. and Lyu D. 2016. Effects of biochar on photosystem function and activities of protective enzymes in *Pyrus ussuriensis* Maxim. Under drought stress. *Acta Physiol. Plant*. 38(9): 220.
۱۳۹۸. بررسی اثر قرارگیری لایه بایوچار در محیط متخلخل بر منحنی رخنه و پروفیل توزیع نیترات. *مجله پژوهش آب ایران*. ۳۵: ۱۵۷-۱۶۷.
12. Abid M. Danish S. Zafar-Ul-Hye M. Shaaban M. Iqbal M. M. Rehim A. Qayyum M. F. and Naqqash M. N. 2017. Biochar increased photosynthetic and accessory pigments in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants by reducing cadmium concentration under various irrigation waters. *Environ. Sci. Pollut. Res*. 24: 22111-22118.
13. Agbna G. H. D. Dongli S. Zhipeng L. Elshaikh N. A. Guangcheng Sh. and Timm L. C. 2017. Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato. *Scientia Horticulturae*. 222: 90-101.
14. Almaroai Y. A. and Eissa M. A. 2020. Effect of biochar on yield and quality of tomato grown on a metal-contaminated soil. *Scientia Horticulturae*. 265: 109210.
15. AOAC. 1990. Association of Official Analytical Communities. *Official Method of Analysis*. (18th ed.), Washington DC: USA.
16. Atkinson C. J. 2018. How good is the evidence that soil-applied biochar improves water-holding capacity? *Soil Use and Management*. 34(2): 177-186.
17. Baiamonte G. Minacapilli M. and Crescimanno G. 2020. Effects of biochar on irrigation management and water use efficiency for three different crops in a desert sandy soil. *Sustainability*. 12(18): 7678.
18. Cantrell K. B. Hunt P. G. Uchimiya M. Novak J. M. and Ro K. S. 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource technology*. 107: 419-428.
19. Chance B. and Maehly A. C. 1995. Assay of catalase and peroxidase. In: *Culowic, S.P. and Kaplan, N.O. (eds.), Methods in enzymology*, Vol. 2. pp. 764-765. Academic Press. Inc. New York, USA.
20. Dad K. Nawaz M. Hassan R. Javed K. Shaheen A. Zhao F. Imran M. Shah S. Anwar M. and Aurangzaib M. 2021. Impact of biochar on the growth and physiology of tomato grown in the cadmium contaminated soil. *Pakistan Journal of Agricultural Research*. 34(2): 454-462.
21. Danish S. Zafar-ul-Hye M. Mohsin F. and Hussain M. 2020. ACC-deaminase producing plant growth promoting rhizobacteria and biochar mitigate adverse effects of drought stress on maize growth. *PLoS One*: 15(4): e0230615.

42. Zeeshan M. Ahmad W. Hussain F. Ahamd W. Numan M. Shah M. and Ahmad I. 2020. Phytostabilization of the heavy metals in the soil with biochar applications, the impact on chlorophyll, carotene, soil fertility and tomato crop yield. *Journal of Cleaner Production*. 255: 120318.
43. Zhang Q. Song Y. Wu Z. Yan X. Gunina A. Kuzyakov Y. and Xiong Z. 2020. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation. *Journal of Cleaner Production*. 242: 118435.
32. Maham S. G. Rahimi A. Subramanian S. and Smith D. L. 2020. The environmental impacts of organic greenhouse tomato production based on the nitrogen-fixing plant (*Azolla*). *J Clean Prod*. 245: 1-9.
33. Mansoor S. Kour N. Manhas S. Zahid S. Wani O. A. Sharma V. Wijaya L. Alyemini N. M. Alshhi A. A. El-Serehy H. A. Paray B. A and Ahmad P. 2020. Biochar as a tool for effective management of drought and heavy metal toxicity. *Chemosphere*. 129458.
34. Moradi N. and Karimi A. 2021. Fe-modified common reed biochar reduced cadmium (Cd) mobility and enhanced microbial activity in a contaminated calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 21(1): 329-340.
35. Munir M. Alhajhoj M. R. Mohammed M. E. Ghazzawy H. S. Elgarawany M. M. El-Habbab M. S. and Al-Bahigan A. M. 2020. Effects of Date Palm Biochar on Growth, Yield and Photosynthetic Capacity of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Under Glasshouse Conditions. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*. 18(1).
36. Obadi A. AlHarbi A. Abdel-Razzak H. and Al-Omran, A. 2020. Biochar and compost as soil amendments: effect on sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) growth under partial root zone drying irrigation. *Arabian Journal of Geosciences*. 13(13): 1-12.
37. Pandey D. Daverey A. and Arunachalam K. 2020. Biochar: production, properties and emerging role as a support for enzyme immobilization. *Journal of Cleaner Production*. 255: 1-9.
38. Turkian K. K. and Wedepohl K. H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. *Geol Soc Am Bull*, 72: 175-192.
39. Wang L. Wang Y. Ma F. Tankpa V. Bai S. Guo X. and Wang X. 2019. Mechanisms and reutilization of modified biochar used for removal of heavy metals from wastewater: A review. *Science of the Total Environment*. 668: 1298-1309.
40. Wang Y. Zheng K. Zhan W. Huang L. Liu Y. Li T. Yang Z. Liao Q. Chen R. and Zhang C. 2021. Highly effective stabilization of Cd and Cu in two different soils and improvement of soil properties by multiple-modified biochar. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 207: 111294.
41. Xu C. Zhao J. Yang W. He L. Wei W. Tan X. Wang J. and Lin A. 2020. Evaluation of biochar pyrolyzed from kitchen waste, corn straw, and peanut hulls on immobilization of Pb and Cd in contaminated soil. *Environmental Pollution*. 261: 114133.

اثر روش‌های آبیاری تناوبی و غرقابی بر عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری برنج در شهرستان آمل

مهسا رحیمی پول^۱، داود اکبری نوده‌ی^{۲*}، رضا اسدی^۳، علی باقری^۴ و فضل شیردل شه‌میری^۵

چکیده

کشت برنج در ایران به عنوان دومین غله مهم در سبد غذایی مردم بعد از گندم، دارای اهمیت اقتصادی و اجتماعی زیادی است. استان مازندران یکی از قطب‌های اصلی تولید برنج کشور است. در سال‌های اخیر، کاهش نزولات جوی، وقوع کم‌آبی و تقلیل منابع آب سطحی در استان، به‌ویژه در شرق و مرکز مازندران که عمده زمین‌های شالیزار را به خود اختصاص داده‌اند، موجب بروز مشکلاتی در کشت برنج شده است. برای ارزیابی روش‌های مختلف کشت و آبیاری و با هدف کاهش مصرف آب در کشت برنج، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار با چهار تیمار (رقم طارم هاشمی) طی سال زراعی ۱۳۹۹ در معاونت مؤسسه تحقیقات برنج کشور-آمل اجرا شد. تیمارها شامل: کشت نشایی در بستر گل‌خراش شده با آبیاری تناوبی (T1)، کشت نشایی در بستر گل‌خراش شده با آبیاری غرقابی (کشت رایج) (T2)، کشت نشایی در بستر گل‌خراش نشده با آبیاری غرقابی (T3) و کشت مستقیم با آبیاری غرقابی (T4) بود. نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر روش‌های کشت و آبیاری بر ارتفاع، عملکرد، آب کاربردی، آب آبیاری، بهره‌وری آب کاربردی و بهره‌وری آب آبیاری مؤثر و از نظر آماری در سطح یک درصد معنی‌دار بود. بیشترین و کمترین عملکرد به ترتیب متعلق به تیمارهای T2 و T4 با ۴۰۷۹/۲ و ۲۹۴۱/۷ کیلوگرم در هکتار بود. بیشترین و کمترین آب آبیاری نیز به ترتیب متعلق به تیمارهای T4 و T1 با ۱۰۳۰۱ و ۶۵۳۷ مترمکعب در هکتار بود. همچنین بیشترین و کمترین بهره‌وری آب آبیاری به ترتیب متعلق به تیمارهای T1 و T4 با ۰/۶۱ و ۰/۲۹ کیلوگرم در مترمکعب بود. براساس نتایج این آزمایش، کشت رایج با آبیاری تناوبی (T1) کاهش عملکرد زیادی نسبت به تیمار کشت رایج با آبیاری غرقابی نداشت و با کاهش ورودی آب، میزان بهره‌وری آب را افزایش داد؛ از این رو به‌عنوان تیمار برتر در این پژوهش شناخته شد.

واژه‌های کلیدی: روش آبیاری، کارایی مصرف آب، کشت مستقیم، گل‌خراشی.

ارجاع: رحیمی پول م.، اکبری نوده‌ی د.، اسدی ر.، باقری ع. و شیردل شه‌میری ف. ۱۴۰۱. اثر روش‌های آبیاری تناوبی و غرقابی بر عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری برنج در شهرستان آمل. مجله پژوهش آب ایران. ۴۷: ۹۳-۱۰۲. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14086.2456>

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.

۳- گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران، استادیار سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه تحقیقات برنج کشور - معاونت مازندران، آمل، ایران.

۴- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.

۵- استادیار گروه زراعت، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.

* نویسنده مسئول: d.akbari@qaemiu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳

مقدمه

کشت برنج در ایران دارای اهمیت اقتصادی و اجتماعی زیادی بوده و بعد از گندم، دومین غله مهم در سبد غذایی مردم است (اسدی، ۱۳۹۵). سطح زیرکشت برنج در ایران حدود ۶۰۰ هزار هکتار بوده و ۷۰ درصد از اراضی شالیزاری منحصر به دو استان گیلان و مازندران است (کریمی‌فرد و همکاران، ۱۳۹۹). در استان مازندران، سه شهرستان آمل، بابل و ساری، بیشترین سطح زیرکشت برنج استان را به خود اختصاص داده‌اند (رحیمی پول، ۱۳۹۶). در سال‌های اخیر، کاهش نزولات جوی، وقوع کم‌آبی و تقلیل منابع آب سطحی و پایین‌بودن بهره‌وری در مازندران موجب بروز مشکلاتی در کشت برنج، به‌ویژه در شرق و مرکز استان شده است (عباسی و همکاران، ۲۰۱۱)؛ از این رو اعمال مدیریت صحیح آبیاری و استفاده بهینه از آب موجود برای حفظ امنیت غذایی، امری ضروری است. سیستم کشت مرسوم برنج در مازندران، مبتنی بر استفاده از ارقام برنج آبی با آبیاری غرقابی است. در این سیستم کشت، نشاکاری در زمین گلخراب شده است و برنج در بیش از ۸۰ درصد از طول دوره رشد به‌صورت غرقاب دائم است (اسدی، ۱۳۹۵). در این شیوه، بهره‌وری آب آبیاری پایین بوده و سبب مصرف آب بیش از نیاز واقعی گیاه می‌شود؛ از این رو، استفاده از روش سنتی غرقابی دائمی برای آبیاری شالیزارها، با توجه به مشکلات جدی کمبود آب، از نظر مدیریت آب قابل‌توجه نیست (بی و همکاران، ۲۰۱۳). استفاده از روش‌های جایگزین تولید برنج با استفاده از آب کمتر شامل کشت در بستر گلخراب نشده (کار و همکاران، ۲۰۱۸)، کشت مستقیم بذر (فاروق و همکاران، ۲۰۱۱) و مرطوب و خشک کردن متناوب (کریجو و همکاران، ۲۰۱۷)؛ لامپایان و همکاران، ۲۰۱۵) می‌تواند تقاضای آب برای تولید برنج را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهند و کارایی استفاده از آب را بهبود بخشند (داتا و همکاران، ۲۰۱۷). حوسن و همکاران (۲۰۱۸) بیان کردند که حذف عملیات گلخرابی می‌تواند هزینه‌های کار، سوخت و ورودی آب آبیاری را برای آماده‌سازی زمین به منظور استقرار برنج کاهش دهد. بیهانداریا و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که کشت مستقیم برنج به‌عنوان جایگزینی مناسب برای کشت سنتی نشایی به‌منظور کاهش آب آبیاری، کاهش نیروی کار و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. باستلا

(۲۰۲۰) با بیان اینکه عملیات گلخرابی موجب شکسته‌شدن ساختار خاک و مصرف آب بیشتر برای آماده‌سازی زمین می‌شود، کشت مستقیم را به‌جای کشت در بستر گلخراب شده به کشاورزان توصیه کرد. اکومارا و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند کشت مستقیم بذر ضرورت پرورش نشا و نشاکاری را از بین می‌برد. کار و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند کشت مستقیم یا کشت نشایی در بستر غیر گلخراب می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای کشت نشایی در بستر گلخراب‌شده برنج استفاده شود. در برخی از مطالعات نشان داده شده است که استفاده از آبیاری تناوبی عملکردی مشابه عملکرد سیستم‌های مداوم غرقاب را فراهم می‌کند (یانو و همکاران، ۲۰۱۲). آریف و همکاران (۲۰۱۳) طی تحقیقی با مقایسه دو روش آبیاری تناوبی و غرقاب دائم، نشان دادند که آبیاری تناوبی در مقایسه با غرقاب دائم، با کاهش آب ورودی به میزان ۲۶/۰۷ درصد، بهره‌وری آب را به میزان ۳۷/۶ درصد افزایش می‌دهد؛ از این رو به این نتیجه دست یافتند که آبیاری متناوب راهی مناسب برای افزایش کارایی مصرف آب بدون کاهش عملکرد در اندونزی است. کریجو و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که استفاده از آبیاری متناوب برنج موجب کاهش بهره‌وری آب خواهد شد. ایشفق و همکاران (۲۰۲۰) مطالعه‌ای با عنوان استفاده از سیستم تناوبی در تولید برنج به‌منظور کاهش آب آبیاری و سازگار با محیط‌زیست انجام دادند. آن‌ها بیان کردند که روش مرسوم کشت سهم عمده‌ای در تولید برنج دارد، اما به مقدار زیادی آب ورودی نیازمند است. این پژوهشگران سیستم آبیاری تناوبی را به‌عنوان یک جایگزین مناسب، برای کاهش آب آبیاری (به مقدار ۲۵-۷۰ درصد) پیشنهاد دادند. هی و همکاران (۲۰۲۰) برای مدیریت آب آبیاری با هدف تولید پایدار برنج در چین، مطالعه‌ای انجام دادند. آن‌ها گزارش کردند مدیریت آبیاری متناوب موجب کاهش ۴۰ درصد ورودی آب و افزایش ۳۴ درصد بهره‌وری آب آبیاری شد. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده توسط محققان فوق، کشت سنتی برنج با آبیاری غرقابی دائم کاربرد آب بالایی داشته و فرض بر این است که مصرف آب در کشت برنج، با تغییر سیستم کشت سنتی به کشت مستقیم یا کشت در بستر غیرگلخراب و تغییر روش آبیاری غرقابی دائم به روش آبیاری تناوبی کاهش یابد. به‌دلیل کاهش بارندگی‌ها در استان مازندران،

صورت خشک زده شد. در سه تیمار T1، T2 و T3 ابتدا بذور را در فضای کوچک‌تری (خزانه) تحت شرایط خاص کشت کرده و پس از ۳۰ تا ۳۵ روز بعد از کاشت (در مرحله ۳-۴ برگی و ارتفاع ۲۵-۲۰ سانتی‌متر)، نشاها از خزانه کنده و در دسته‌های کوچک و بزرگ تقسیم و سپس به زمین اصلی انتقال داده شدند. نشاکاری با فاصله ۲۵×۲۵ سانتی‌متر به روش دستی و به صورت تک‌بوته و یکنواخت و در بستر گلخراش شده و گلخراش نشده انجام شد. تاریخ کاشت هر سه تیمار ۸ خرداد ۱۳۹۹ بود. تاریخ برداشت در هر دو تیمار T1 و T2، ۵ شهریور ۱۳۹۹ و در تیمار T3، ۳۱ مرداد ۱۳۹۹ بود. در سه تیمار T1، T2 و T3، ۱۰۰ کیلوگرم کود فسفر از منبع سوپر فسفات تریپل در مرحله آماده‌سازی زمین (پیش از نشاکاری) در یک مرحله به صورت پایه، ۱۰۰ کیلوگرم کود پتاسیم از منبع کلرید پتاسیم و ۱۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن از منبع اوره مصرف شد. کود نیتروژن و پتاسیم در سه مرحله شامل ۴۰ درصد در مرحله آماده‌سازی زمین، ۳۰ درصد در مرحله پنجه‌زنی (۲۰ روز بعد نشاکاری) و ۳۰ درصد در مرحله ظهور خوشه (۴۰ روز بعد از نشاکاری) استفاده شد. برای کنترل علف‌های هرز، ضمن سم‌پاشی با سم ماچیتی با نام تجاری بوتاکلر به میزان ۳-۲/۵ لیتر بر هکتار، یک مرتبه و جین دستی نیز انجام شد. در روش کشت مستقیم (T4) همه مراحل تهیه خزانه و نشاکاری حذف و شخم سوم به صورت خشک زده شد. در این تیمار، بذور بعد از جوانه‌دار کردن مستقیماً در سطح مزرعه پخش شد. مقدار بذر در کشت مستقیم ۸۰ کیلوگرم در هکتار و فاصله بین ردیف‌ها ۲۰-۲۳ سانتی‌متر و عمق کشت ۲-۱/۵ سانتی‌متر بود. تاریخ کاشت و برداشت در این تیمار به ترتیب ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۹ و ۱۲ شهریور ۱۳۹۹ بود. در این تیمار ۱۰۰ کیلوگرم کود فسفر از منبع سوپر فسفات تریپل، ۱۰۰ کیلوگرم کود پتاس و ۱۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن از منبع اوره مصرف شد. ۱۰۰ کیلوگرم کود فسفر از منبع سوپر فسفات تریپل و ۴۰ درصد از کود اوره و پتاسیم پیش از بذریاشی با خاک مخلوط، ۳۰ درصد در مرحله پنجه‌زنی گیاه و ۳۰ درصد در مرحله ظهور خوشه استفاده شد. برای کنترل علف‌های هرز از سم تریفلورالین ۴۸ درصد امولسیون با نام تجاری ترفلان (۳-۳/۵) لیتر در هکتار) و سم ماچیتی با نام تجاری بوتاکلر (۳-۴) لیتر در هکتار) استفاده شد. در تیمارهای آبیاری غرقابی آب در

سطح کشت برنج و میزان تولید آن کاهش یافته است. وقوع چنین شرایطی می‌تواند بر تولید کلان برنج استان و اقتصاد معیشتی زارعان برنجکار خسارت جبران‌ناپذیری داشته باشد؛ از این رو تولید برنج در استان مازندران که از نظر استراتژیک و اقتصادی بسیار حائز اهمیت است، نیازمند تغییر مدیریت آبیاری و روش سنتی کشت است تا تقاضای آب برای تولید برنج کاهش یابد. پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر روش‌های کشت و آبیاری جایگزین با هدف بهره‌وری و عملکرد بیشتر برنج در یکی از شالیزارهای استان مازندران انجام شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش در مزرعه معاونت مؤسسه تحقیقات برنج کشور (امل) به وسعت ۵۰۰ مترمربع در سال زراعی ۱۳۹۹ اجرا شد. استان مازندران در شمال ایران با حدود ۲۳۳۲۲ کیلومتر مربع مساحت بین مختصات جغرافیایی ۳۳ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲ دقیقه عرض شمالی و ۲۱ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۲۲ درجه و ۱۲ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. میانگین بارندگی سالانه این استان ۸۰۰ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت سالانه آن، ۱۶ درجه سانتی‌گراد است. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل: کشت نشایی در بستر گلخراش شده با آبیاری تناوبی (T1)، کشت نشایی در بستر گلخراش شده با آبیاری غرقابی (رایج) (T2)، کشت نشایی در بستر گلخراش نشده با آبیاری غرقابی (T3) و کشت مستقیم با آبیاری غرقابی (T4) بودند. رقم برنج انتخابی طارم هاشمی بود. تعداد کرت‌های آزمایشی ۱۲ و مساحت هر کدام ۳۰ مترمربع بود. به منظور جلوگیری از تلفات ناشی از نشت، محدوده کرت‌ها تا عمق ۳۰ سانتی‌متر با پلاستیک پوشانده شد. نمونه‌برداری از خاک مزرعه در دو نوبت قبل از کشت و برداشت محصول در دو عمق ۲۵-۵۰ و ۵۰-۲۵ سانتی‌متر از هر کرت انجام شد. مشخصات فیزیکی-شیمیایی خاک محل آزمایش در جدول ۱ آمده است. براساس جدول ۱، بافت خاک موجود در مزرعه از نوع سیلتی لوم بود. آماده‌سازی زمین شامل مراحل شخم اول و شخم دوم، تسطیح و کرت‌بندی قبل از کشت برای همه تیمارها به صورت یکسان انجام گرفت. در دو تیمار T1 و T2 شخم سوم به همراه عملیات گلخراشی و در تیمار T3 به

هکتار) و R بارندگی مؤثر (روش سرویس حفاظت خاک آمریکا) (مترمکعب در هکتار) است. مقدار آب کاربردی برابر با مجموع آب آبیاری و بارندگی مؤثر است؛ به عبارتی، چنانچه مقدار بارش مؤثر و آب زیرزمینی جذب‌شده توسط ریشه گیاه برای رشد محصول ناکافی باشد، باقیمانده نیاز آب مصرفی که به آن نیاز خالص آبیاری اطلاق می‌شود، از طریق آبیاری تأمین می‌شود (مجرد و همکاران، ۱۳۸۳).

$$WP_1 = \frac{Y}{I} \quad (2)$$

WP_1 بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم در مترمکعب) و Y عملکرد (کیلوگرم در هکتار) است. تجزیه واریانس داده‌های به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار SAS و میانگین تیمارها از طریق آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح پنج و یک درصد مقایسه شدند.

سطح خاک جاری و همه سطح زمین با لایه‌ای از آب به ارتفاع ۵ سانتی‌متر غرقاب (با دور آبیاری ۵ روز) شد. در تیمارهای آبیاری تناوبی پس از غرقاب کردن زمین، آبیاری قطع شد و بعد از ناپدید شدن آب از سطح خاک و با مشاهده اولین نقطه از سطح مزرعه، آبیاری مجدد (دور آبیاری ۶-۸ روز) صورت گرفت. در این آزمایش با نصب کنتورهای حجمی در مبادی ورودی آب به هر کدام از کرت‌های آزمایشی، حجم دقیق آب آبیاری اندازه‌گیری شد. آب آبیاری مورد نیاز برای گلخانه‌ای براساس تحقیقات اسدی (۱۳۹۵)، ۲۰۰۰ مترمکعب در هکتار در نظر گرفته شد. بهره‌وری آب مصرفی و بهره‌وری آب آبیاری از معادلات (۱) و (۲) به‌دست آمد (لوپز، ۲۰۱۸):

$$WP_{I+R} = \frac{Y}{I+R} \quad (1)$$

WP_{I+R} بهره‌وری آب کاربردی (کیلوگرم در مترمکعب)، Y عملکرد (کیلوگرم در هکتار)، I آب آبیاری (مترمکعب در

جدول ۱- نتایج تجزیه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه معاونت مؤسسه برنج-آمل

هدایت الکتریکی	واکنش خاک	فسفر قابل دسترس	پتاسیم قابل دسترس	مواد خنثی‌شونده	رس	سیلت	شن	کربن آلی	کلاس بافت خاک
m/dS	-	kg/mg	mg/kg	%	%	%	%	%	-
۰/۶۰۶	۷/۶۸	۱۰	۱۸۰	۵	۲۸	۵۱	۲۱	۱/۳۶	Si-L

نتایج و بحث

صفت ارتفاع منعکس‌کننده واکنش رشد رویشی گیاه به عملیات‌های مختلف مدیریتی است (صالحی و همکاران، ۱۳۹۶) و از جمله صفات گیاهی است که نسبت به اجزای عملکرد راحت‌تر تحت تأثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرد. براساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه (جدول ۴)، اعمال روش‌های کشت و آبیاری بر صفت ارتفاع مؤثر بوده و از نظر آماری در سطح یک درصد دارای اختلاف معنی‌داری بود ($p < 0/01$). با توجه به نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها (جدول ۵)، دو تیمار T1 و T2 به ترتیب با ارتفاعی معادل ۱۳۱/۵۳ و ۱۲۴/۷۳ سانتی‌متر در گروه a قرار گرفتند. تیمارهای T3 و T4 به ترتیب با ارتفاعی معادل ۱۰۶/۵۷ و ۱۰۰/۸۷ سانتی‌متر در گروه b قرار گرفتند. با توجه به نمودار شکل ۱، تیمار T1 بیشترین ارتفاع را به خود اختصاص داد و تفاوت کمی با تیمار T2 داشت. شرایط بهتر استقرار، تهیه مناسب‌تر زمین و فراهمی سایر شرایط مطلوب را می‌توان دلیل بالابودن ارتفاع در تیمارهای کشت نشایی در بستر گلخراش‌شده نسبت به تیمارهای کشت نشایی در بستر گلخراش‌نشده و

کشت مستقیم دانست. تیمار T4 نیز کمترین ارتفاع را داشت (شکل ۱). تفاوت رشد بین نشای ۴ تا ۵ برگی در کشت نشایی و بذر جوانه‌دار شده کشت مستقیم در زمان کاشت را می‌توان از دلایل ارتفاع بیشتر در نشاکاری دانست. اسلام و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیقی روی اثر روش کشت (کشت نشایی و مستقیم) بر عملکرد و اجزای عملکرد برنج در پاکستان بیان کردند که اثر روش کشت بر ارتفاع بوته معنی‌دار بوده و ارتفاع بوته در نشاکاری (۱۳۰/۲ سانتی‌متر) بیشتر از کشت مستقیم (۱۲۶/۶ سانتی‌متر) بود که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. نتایج تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه (جدول ۴) نشان داد که اثر روش کشت و آبیاری بر صفت عملکرد در سطح یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0/01$) که مشابه با نتایج ورش و همکاران (۲۰۱۱) است. با توجه به نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها (جدول ۵)، تیمار T1 و T2 به ترتیب با عملکردی معادل ۴۰۳۱/۲ و ۴۰۷۹/۲ (کیلوگرم در هکتار) در گروه a قرار گرفتند و تفاوت ناچیزی باهم داشتند که مشابه با یافته‌های پورغلام و همکاران (۲۰۲۱) و چائو و همکاران (۲۰۱۵) است. تیمار T3 و T4 به ترتیب با

اول شهریور بارندگی زیادی بود؛ اما به دلیل نزدیکی به زمان برداشت محصول، تأثیری بر میزان عملکرد نداشت.

جدول ۲- مقادیر بارش در طول فصل رشد برنج

تاریخ بارندگی	بارش روزانه (mm)
۱۳۹۹/۰۳/۱۵	۰/۳
۱۳۹۹/۰۴/۰۶	۱۲
۱۳۹۹/۰۴/۰۸	۱/۹
۱۳۹۹/۰۴/۲۱	۱/۶
۱۳۹۹/۰۴/۲۲	۳/۲
۱۳۹۹/۰۴/۲۳	۰/۳
۱۳۹۹/۰۴/۲۵	۱۹/۴
۱۳۹۹/۰۵/۰۱	۰/۲
۱۳۹۹/۰۵/۰۲	۲/۴
۱۳۹۹/۰۵/۰۳	۰/۳
۱۳۹۹/۰۵/۰۹	۱۴/۹
۱۳۹۹/۰۵/۱۳	۱۲/۶
۱۳۹۹/۰۵/۱۴	۲/۰
۱۳۹۹/۰۵/۱۶	۰/۶
۱۳۹۹/۰۵/۱۷	۰/۲
۱۳۹۹/۰۵/۲۵	۲/۰
۱۳۹۹/۰۵/۲۶	۰/۷
۱۳۹۹/۰۵/۲۷	۱/۲
۱۳۹۹/۰۵/۲۸	۱/۵
۱۳۹۹/۰۵/۳۱	۰/۲
۱۳۹۹/۰۶/۰۱	۲۲/۶
۱۳۹۹/۰۶/۰۲	۷/۴
۱۳۹۹/۰۶/۰۳	۲۶/۶

جدول ۳- مقادیر بارش مؤثر

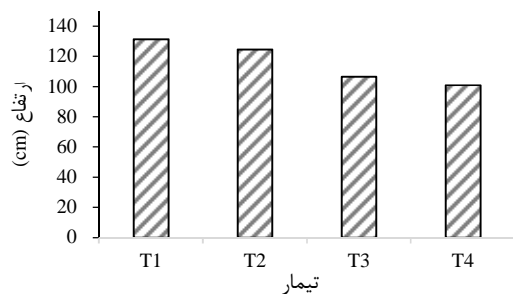
ماه	بارش ماهانه (mm)	بارش مؤثر (mm)
خرداد	۰/۳	۰/۳
تیر	۱۹/۱	۱۸/۵
مرداد	۳۸/۸	۳۶/۴
شهریور	۵۶/۶	۵۱/۵

در ۱۳ مرداد ۱۳۹۹، یعنی در انتهای دوره غرقاب مزرعه به میزان ۱۲/۶ میلی‌متر بارش وجود داشت که سبب تعویق دوره خشکی مزرعه و افزایش دور آبیاری به ۱۰ روز شد. اگرچه بارش در این تاریخ، موجب افزایش دور آبیاری تناوبی شد، باتوجه به اینکه در طول دوره رشد گیاه فقط یک بار این اتفاق افتاد، تأثیر زیادی بر میزان عملکرد و انتخاب تیمار برتر نداشت. سایر بارندگی‌ها نیز در زمان

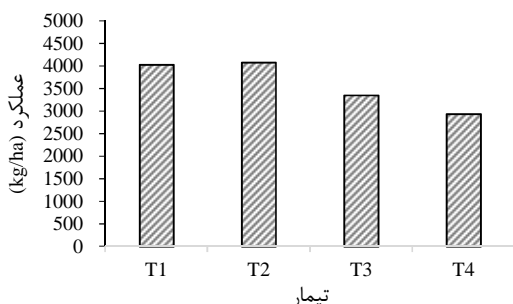
عملکردی معادل ۳۳۵۱/۷۰ و ۲۹۴۱/۷۰ (کیلوگرم در هکتار) در گروه b قرار گرفتند. براساس نمودار شکل ۲، بیشترین محصول زمانی به‌دست آمد که کشت در بستر گلخراپ شده با آبیاری غرقابی دائم بود؛ به عبارتی این تیمار نقش تأثیرگذاری بر میزان عملکرد دانه داشت و بیشترین استفاده را از عوامل محیطی رشد کسب کرد. از طرفی عدم احتمال بروز تنش رطوبتی و آب کافی و جذب بهتر عناصر غذایی توسط گیاه موجب بالارفتن عملکرد در این تیمار شد. در تیمار T2، تأمین رطوبت کافی و دور آبیاری مناسب در روش آبیاری تر و خشک کردن موجب بالارفتن عملکرد و تفاوت ناچیزش با تیمار T1 شد، زیرا دور مناسب در روش آبیاری تناوبی موجب عدم شکل‌گیری شکاف‌های عریض و عمیق در بستر سیستم کشت شد. به‌همین دلیل آب آبیاری از محیط ریشه خارج نشد و آب مورد نیاز برای تبخیر و تعرق به میزان کافی از طریق ریشه جذب شده و تنش آبی به گیاه برنج وارد نشد؛ از این رو کاهش معنی‌دار عملکرد رخ نداد (شکل ۲). عملکرد در تیمارهای T3 و T4 به ترتیب ۱۸ و ۲۸ درصد نسبت به تیمار کشت رایج با آبیاری غرقابی کاهش داشت. عدم توانایی در تأمین رطوبت کافی، کاهش فتوسنتز و کاهش انتقال مواد پرورده به دانه‌ها باعث تأثیر منفی بر تولید و عملکرد و راندمان عملکردی گیاه شده است. برخلاف نتیجه این تحقیق، دوکتا و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که کشت مستقیم موجب بالارفتن مقدار عملکرد می‌شود. ژو و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که عملکرد در کشت مستقیم حدود ۱۲ درصد کمتر از کشت نشایی بود که با نتایج این آزمایش مطابقت دارد. در جداول ۲ و ۳ تاریخ روزهای بارندگی و مقادیر بارش و بارش مؤثر در طول فصل رشد برنج آورده شده است. مقادیر بارش‌ها در دو ماه فروردین و اردیبهشت به دلیل هم‌زمانی با آماده‌سازی زمین و خزانه‌گیری و عدم تأثیر بارش‌ها بر عملکرد، در جدول ۲ ذکر نشد. (در کشت مستقیم نیز بذور در اواخر اردیبهشت در زمین اصلی کشت شده بود و مزرعه دو هفته اول غرقاب بود و بارش بر عملکرد مؤثر نبود). براساس جدول ۲، از نظر تأثیر بارندگی می‌توان گفت، در تیمارهای آبیاری غرقابی مزرعه در طول فصل رشد تا ۱۰ روز قبل از برداشت محصول، به‌طور دائم غرقاب بود و بارش تأثیری بر عملکرد نداشت. در تیمار آبیاری تناوبی، براساس جدول ۲ و ۳ در روزهای

غرقاب مزرعه اتفاق افتاده بود. نتایج حاصل از تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه (جدول ۴) نشان داد که اثر سیستم‌های کشت و آبیاری بر صفت آب کاربردی در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0/01$). با توجه به نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها (جدول ۵)، تیمار T4 با آب کاربردی معادل ۱۱۴۳۵/۶۷ مترمکعب در هکتار در گروه a قرار گرفت. تیمار T3 با ۹۶۳۸ مترمکعب در هکتار در گروه b و تیمار T2 با آب کاربردی معادل ۸۴۴۱/۳۳ مترمکعب در هکتار در گروه c قرار گرفت. تیمار T1 با ۷۱۰۵/۳۳ مترمکعب در هکتار در گروه d قرار گرفت. با توجه به نمودار شکل ۳ مشاهده می‌شود که تیمار T1 کمترین مقدار آب کاربردی را به خود اختصاص داد و نسبت به تیمار T2، ۱۶ درصد کاهش داشت. پایین‌بودن مقدار آب کاربردی در تیمار T1 را می‌توان، حداقل تا حدودی، به کاهش نفوذ و نشت نسبت داد؛ علاوه‌براین، در آبیاری تناوبی مزرعه به‌طور دائم غرقاب نیست. یک رویداد باران در طول دوره‌ای که خاک‌ها غرقاب نمی‌شوند، کمتر منجر به روان‌آب سطحی می‌شود و می‌تواند زمان مورد نیاز را تا زمانی که ممکن است برای آبیاری مجدد مزرعه نیاز به آبیاری باشد به تأخیر بیندازد. کشت نشایی در بستر گلخراب‌نشده به دلیل عدم انجام عملیات گلخرابی، نفوذ عمقی بالایی داشت، در نتیجه مقدار آب کاربردی افزایش یافت؛ زیرا عملیات گلخرابی ضمن نرم و آماده کردن زمین، تلفات نفوذ عمقی را کاهش می‌دهد. بالاترین آب کاربردی متعلق به تیمار T4 بود؛ زیرا در کشت مستقیم طول دوره‌ای که گیاه در زمین اصلی قرار گرفت، بالاتر از سایر تیمارها بود و حدود ۲۵ روز بیشتر آبیاری انجام شد. از طرفی به دلیل انجام آبیاری غرقابی در بستر خشک، نفوذ به مقدار زیادی افزایش یافت؛ از این رو آب کاربردی در این سیستم بیشتر از سایر تیمارها بود. پورغلام و همکاران (۲۰۲۱) میزان ورودی آب مورد نیاز در آبیاری تناوب برنج را ۵۶/۰۷ درصد کمتر از آبیاری غرقابی محاسبه کردند که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. براساس تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه (جدول ۴)، صفت آب آبیاری ناشی از اعمال سیستم‌های کشت و آبیاری در سطح یک درصد دارای اختلاف معنی‌دار بود ($p < 0/01$). نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۵) بیانگر این است که هرکدام از تیمارها در گروهی متفاوت قرار گرفتند. براساس جدول ۵، تیمار T4 با آب آبیاری ۱۰۳۰۱

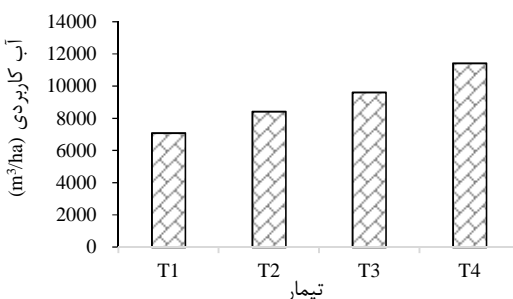
مترمکعب در هکتار بیشترین مقدار آب آبیاری را به خود اختصاص داد و در گروه a قرار گرفت. تیمار T3 با آب آبیاری معادل ۹۱۱۱ مترمکعب در هکتار در گروه b و تیمار T2 با آب آبیاری معادل ۷۸۶۷ مترمکعب در هکتار در گروه c قرار گرفت. تیمار T1 با آب آبیاری معادل ۶۵۳۷ مترمکعب در هکتار در پایین‌ترین گروه، یعنی d قرار گرفت و در مقایسه با تیمار کشت رایج با آبیاری غرقابی ۱۷ درصد کمتر بود. در تحقیقات دیگر گزارش شده است که استفاده از روش آبیاری تناوبی با حفظ عملکرد مشابه یا افزایش عملکرد دانه، ورودی آب را ۱۴ تا ۱۸ درصد (بلدر و همکاران، ۲۰۰۴) و ۲۵ درصد (کریجو و همکاران، ۲۰۱۶) کاهش داد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه (جدول ۴) نشان داد که اثر سیستم‌های کشت و آبیاری بر صفت بهره‌وری آب کاربردی در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0/01$) که مشابه با نتایج تحقیقات بویان و همکاران (۲۰۱۲) است. با توجه به نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها (جدول ۵)، تیمار T1 با بهره‌وری آب کاربردی معادل ۰/۵۷ کیلوگرم در مترمکعب در گروه a قرار گرفت. تیمار T2 با ۰/۴۹ کیلوگرم در مترمکعب در گروه bc و تیمار T3 با ۰/۳۵ کیلوگرم در مترمکعب در گروه c قرار گرفت. تیمار T4 کمترین مقدار را به خود اختصاص داده که بر بهبود بهره‌وری اثر گذاشت. تیمار T4 کمترین بهره‌وری را در بین تیمارها به خود اختصاص داد و با ۰/۲۶ کیلوگرم در مترمکعب در گروه d قرار گرفت. براساس شکل ۳، تیمار T1 بیشترین مقدار بهره‌وری آب کاربردی را داشت. از طرفی این تیمار بیشترین ارتفاع، کمترین مقدار آب کاربردی و عملکرد انتخابی را داشت. عملکرد پایین و بالابودن میزان آب کاربردی در این تیمار موجب کاهش بهره‌وری شد. در راستای نتایج این تحقیق، بومن و تانگ (۲۰۰۱) طی تحقیقی گزارش کردند که در صورت اعمال آبیاری تناوبی در فصل زراعی به‌جای غرقاب دائم می‌توان بهره‌وری را افزایش داد، به‌طوری‌که با اعمال تناوب اگرچه عملکرد ۶ درصد کاهش داشت، اما بهره‌وری تا ۱/۹ گرم محصول بر کیلوگرم افزایش یافت. نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر سیستم‌های کشت و آبیاری بر صفت بهره‌وری آب آبیاری در سطح یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0/01$) که مشابه با نتایج ساندهو و همکاران (۲۰۱۲) است. با توجه به مقایسه میانگین‌ها



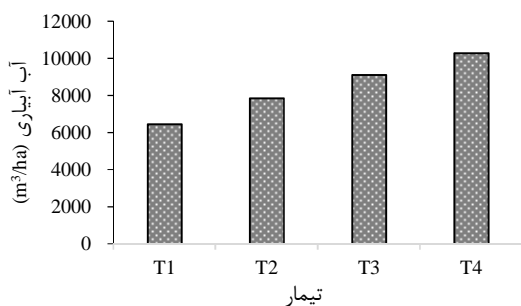
شکل ۱- مقایسه میانگین اثر تیمارها بر ارتفاع



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر تیمارها بر عملکرد

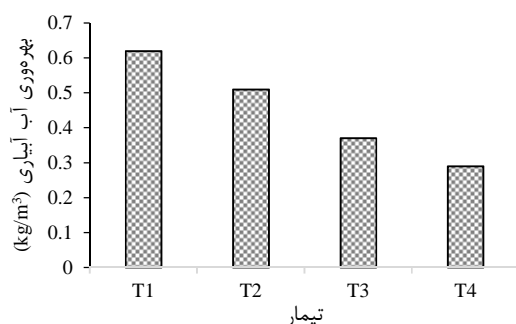


شکل ۳- مقایسه میانگین اثر تیمارها بر آب کاربردی

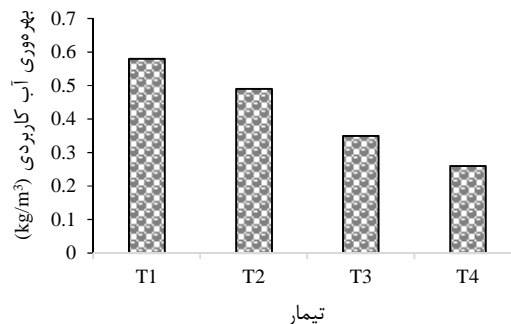


شکل ۴- مقایسه میانگین اثر تیمارها بر آب آبیاری

(جدول ۵) تیمار T1 با مقدار بهره‌وری آب آبیاری معادل ۰/۶۱ کیلوگرم در مترمکعب در گروه a قرار گرفت. تیمار T2 با ۰/۵۱ کیلوگرم در مترمکعب در گروه b و تیمار T3 با ۰/۳۷ کیلوگرم در مترمکعب در گروه c قرار گرفت. تیمار T4 کمترین مقدار بهره‌وری آب آبیاری را به خود اختصاص داد و با ۰/۲۹ کیلوگرم در مترمکعب در گروه d قرار گرفت. نمودار شکل ۴ نشان می‌دهد که بالاترین بهره‌وری آب آبیاری متعلق به تیمار کشت رایج با آبیاری تناوبی بود. از مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ با شکل‌های ۵ و ۶، می‌توان دریافت که آب کاربردی و آبیاری با بهره‌وری آب کاربردی و بهره‌وری آب آبیاری رابطه عکس دارد؛ به عبارتی هرچه مقدار آب کاربردی و آب آبیاری در تیمارهای کشت بالاتر رفت، میزان بهره‌وری‌ها پایین آمده است. نتایج در روند آب کاربردی و بهره‌وری آب برنج نشان داد که سیستم‌های مختلف کشت و آبیاری نقش بسیار مهمی در کاهش آب کاربردی و همچنین بهره‌وری آب داشتند. کشت رایج با رژیم آبیاری تر و خشک کردن (متناوب) در مقایسه با آبیاری هر روزه باعث افزایش بهره‌وری آب آبیاری به میزان ۱۷ درصد شد که نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق مشابه با نتایج تحقیقات پورغلام و همکاران (۲۰۲۱) و یائو و همکاران (۲۰۱۲) است. کاهش آب کاربردی و بالابودن بهره‌وری در روش کشت رایج با آبیاری متناوب (T2) نشان داد که برنج را می‌توان با اتخاذ یک رژیم آبیاری بهینه با موفقیت و بدون کاهش عملکرد کشت کرد. در این پژوهش، شوری خاک مزرعه مقدار پایینی (۰/۶۰۶ دسی‌زیمنس بر متر) داشت. برای استفاده از روش آبیاری تناوبی، مناسب‌ترین میزان شوری خاک، کمتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر است (رضایی و اسدی، ۱۳۸۹). در مناطقی که شوری آب آبیاری بالاتر از این مقدار باشد، کاهش عملکرد شروع می‌شود، به طوری که هرچه تنش شوری افزایش یابد، کاهش عملکرد بیشتر خواهد شد؛ زیرا شوری خاک موجب کاهش جذب آب توسط ریشه از خاک و اختلال در جذب مواد مغذی می‌شود. در این آزمایش، آماربرداری از آفات انجام نشد و علف‌های هرز با مبارزه مکانیکی و شیمیایی به‌خوبی کنترل شدند.



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر تیمارها بر بهره‌وری آب آبیاری



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر تیمارها بر بهره‌وری آب کاربردی

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات‌های اندازه‌گیری برنج در چهار روش کشت

منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع cm	عملکرد (kg/ha)	آب آبیاری (m³/ha)	آب مصرفی (m³/ha)	بهره‌وری آب مصرفی (kg/m³)	بهره‌وری آب آبیاری (kg/m³)
بلوک	۲	۱۰/۴۳ ^{ns}	۸۱۲۱۸/۲۵ ^{ns}	۳۱۹۲/۵۸ ^{ns}	۳۱۹۲/۵۸ ^{ns}	۰/۰ ^{ns}	۰/۰ ^{ns}
روش کشت	۳	۶۳۵/۵۳ ^{**}	۹۵۳۹۱۷/۱۱ ^{**}	۷۸۰۲۷۴۶/۳۱ ^{**}	۱۰۱۵۹۵۳۲/۹۷ ^{**}	۰/۰۶ ^{**}	۰/۰۷ ^{**}
خطای a	۶	۱۱/۳۲	۴۸۵۹۵/۳۶	۱۰۳۶۹/۴۷	۱۰۳۶۹/۴۷	۰/۰۰	۰/۰۰
%CV	-	۲/۹	۶/۱	۱/۲	۱/۱	۵/۴۴	۵/۰۵

تجزیه واریانس مربوط به صفات اندازه‌گیری شده * و ** اختلاف معنی‌دار در سطوح ۵ و ۱ درصد، ns عدم معنی‌دار بودن اختلاف

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده در تیمارهای روش کشت

منابع تغییرات	ارتفاع (cm)	عملکرد (kg/ha)	آب آبیاری (m³/ha)	آب کاربردی (m³/ha)	بهره‌وری آب کاربردی (kg/m³)	بهره‌وری آب آبیاری (kg/m³)
T1	۱۳۱/۵۳ ^a	۴۰۳۱/۲۰ ^a	۶۵۳۷/۰۰ ^d	۷۱۰۵/۳۳ ^d	۰/۵۷ ^a	۰/۶۱ ^a
T2	۱۲۴/۷۳ ^a	۴۰۷۹/۲۰ ^a	۷۸۶۷/۰۰ ^c	۸۴۴۱/۳۳ ^c	۰/۴۹ ^{bc}	۰/۵۱ ^b
T3	۱۰۶/۵۷ ^b	۳۳۵۱/۷۰ ^b	۹۱۱۱/۰۰ ^b	۹۶۳۸/۰۰ ^b	۰/۳۵ ^c	۰/۳۷ ^c
T4	۱۰۰/۸۷ ^b	۲۹۴۱/۷۰ ^b	۱۰۳۰۱/۰۰ ^a	۱۱۴۳۵/۶۷ ^a	۰/۲۶ ^d	۰/۲۹ ^d

حروف مشابه، نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار در آزمون دانکن است.

نتیجه‌گیری

که مدیریت مناسب آب تا حد زیادی به عملکرد دانه در اواخر مرحله پرشدن دانه کمک می‌کند. در تیمار T3 با وجود اینکه آب کاربردی در مرحله آماده‌سازی زمین حذف شد، به دلیل عدم انجام عملیات گلخوابی و نفوذ عمقی زیاد خاک، مقدار آب کاربردی قابل قبول نبود. در تیمار T4 به دلیل استفاده از آبیاری غرقابی در بستر خشک مزرعه و بالابودن زمان استقرار گیاه در زمین اصلی نسبت به تیمارهای دیگر، میزان ورودی آب بالا و بهره‌وری پایین بود. در نهایت براساس مقایسه‌های انجام شده، در شرایط نرمال منطقه و شوری پایین خاک (۰/۶۰۶) دسی‌زیمنس بر متر) و بدون تأثیر بارش، روش کشت نشایی در بستر گلخواب شده با آبیاری تناوبی به‌عنوان تیمار برتر انتخاب شد. این تیمار می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیستم کشت رایج با آبیاری غرقابی برنج و

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که در شرایط نرمال منطقه (در صورتی که شوری خاک مزرعه پایین‌تر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر باشد)، ضرورتی به غرقاب دائم کرت در طول دوره رشد برنج وجود ندارد و تغییر در روش آبیاری اگر همراه با کمبود شدید آب در دسترس ریشه گیاه نباشد، موجب کاهش عملکرد نشده و از طرفی بهره‌وری آب را نیز افزایش می‌دهد. در این پژوهش عملکرد در روش کشت رایج با آبیاری تناوبی (T1) تفاوت ناچیزی با عملکرد تیمار کشت رایج با آبیاری غرقابی (T2) داشت (بدون تأثیر بارندگی). از طرفی نسبت به تیمارهای کشت نشایی در بستر غیرگلخواب با آبیاری غرقابی (T3) و کشت مستقیم با آبیاری غرقابی (T4) عملکرد بیشتری داشت. بالابودن میزان عملکرد در این سیستم نشان داد

7. Abbasi M. R. and Sepaskhah A. R. 2011. Effects of water-saving irrigations on different rice cultivars (*Oryza sativa* L.) in field conditions. *International Journal of Plant Production*. 5(2): 153-166.
8. Arif C. Setiawan B. I. Sofiyuddin H. A. and Martief L. M. 2013. Enhanced Water Use Efficiency by Intermittent Irrigation for Irrigated Rice in Indonesia. *Journal of Islamic Perspective on Science. Technology and Society*. 1(1): 12-17.
9. Aslam S. Hussain S. Ramazan M. and Akhter M. 2008. Effect of different stand establishment techniques of rice yields and its attributes. *Anim. Pl. Sci.* 18(2-3): 80-82.
10. Bastola A. 2020. A Review on Effect of Establishment Methods on Growth, Yield and Yield Attributes of Rice and on Succeeding Crops after Rice. *International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*. 7(6): 134-139.
11. Belder P. Bouman B. A. M. Cabangon R. Guoan L. Quilang E. J. P. Yuanhua L. and Tuong T. P. 2004. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. *Agricultural water management*. 65(3): 193-210.
12. Bhandaria S. Khanala S. and Dhakal S. 2020. Adoption of Direct Seeded Rice (DSR) over puddled-transplanted rice (TPR) for resource conservation and increasing wheat yield. *Rev. Food Agric.* 1(2): 44-51.
13. Bhuyan M. H. M. Ferdousi M. S. T. R. and Iqbal T. 2012. Yield and growth response to transplanted Aman rice under raised bed over conventional cultivation method. *International Scholarly Research Network* 2012: 1-8.
14. Bouman B. A. M. and Tuong T. P. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agricultural Water Management*. 49: 11-30.
15. Cao X. Wang Y. Wu P. and Zhao X. 2015. Water productivity evaluation for grain crops in irrigated regions of China. *Ecological Indicators*. 55: 107-117.
16. Carrijo D. R. Lundy M. E. and Linquist B. A. 2017. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. *Field Crops Res.* 203:173-180.
17. Datta A. Ullah H. and Ferdous Z. 2017. Water management in rice. In *Rice production worldwide*. Springer. 255-277.
18. Devkota K. P. Khanda C. M. Beebout S.J. Mohapatra B.K. Singleton G.R. and Puskur R. 2020. Assessing alternative crop establishment methods with a sustainability

گزینه مناسبی برای مقابله با کم‌آبی در سال‌های اخیر باشد. به‌طورکلی کاربرد فناوری کاهش ورودی آب در تولید برنج می‌تواند اثرات کمبود آب در سطح مزرعه را تعدیل کند، بهره‌وری آب را افزایش دهد و امنیت غذایی را تأمین کند.

منابع

۱. اسدی ر. ۱۳۹۵. مطالعه بهره‌وری مصرف آب و کود ازته در تنش‌های مختلف رطوبتی و سیستم‌های متفاوت کشت در برنج رقم کشوری در استان مازندران. رساله دکتری تخصصی رشته آبیاری و زهکشی. دانشکده کشاورزی. گروه مهندسی آب. دانشگاه فردوسی مشهد. ۱۷۶ ص.
۲. رحیمی پول م. ۱۳۹۶. محاسبه اجزای ردپای آب محصول برنج در استان مازندران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی کشاورزی. دانشکده علوم محیطی. گروه مهندسی آب. مؤسسه غیرانتفاعی آموزش عالی آبان هراز. ۹۸ ص.
۳. رضایی م. و اسدی ر. ۱۳۸۹. اثر به‌کارگیری آب شور در شرایط تنش خشکی بر عملکرد برنج. گزارش نهایی. معاونت مؤسسه تحقیقات برنج کشور-آمل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. ۳۹ ص.
۴. صالحی هیکویی م. درزی نفت چالی ع. شاه‌نظری ع. و جعفری تلوکلایی م. ۱۳۹۶. بررسی اثر مدیریت آبیاری در شالیزارهای مجهز به زهکشی زیرزمینی بر ارتفاع بوته، تعداد پنجه و عملکرد دانه برنج. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۱۹-۱۰۷: (۳)۷.
۵. کریمی‌فرد م. ذاکری‌نیا م. کیانی ع. ر. و فیض‌بخش م. ت. ۱۳۹۹. تأثیر سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی بر عملکرد برنج و بهره‌وری آب در دو روش کشت نشایی و کشت مستقیم بذر. نشریه آب و خاک. ۱۰۳۲-۱۰۱۹: (۵)۴.
۶. مجرد ف. و قمرنیا ه. ۱۳۸۳. برآورد بارش مؤثر و نیاز آبی برای کشت برنج در جلگه مازندران. نشریه پژوهش‌های جغرافیایی. ۳: ۷۶-۵۹.

- levels of nitrogen and irrigation in northwest India. *Agricultural Water Management*. 104: 32-29.
29. Veeresh D. B Vishwanatha S. Anilkumar S. N. Rao S. and Halepyati A.S. 2011. Growth and Yield of Rice (*Oryza sativa* L.) Varieties as Influenced by Different Methods of Planting under Aerobic Method of Cultivation. *Research Journal of Agricultural Sciences*. 2(2): 298-300.
 30. Xu L. Li X. Wang X. Xiong X. and Wang F. 2019. Comparing the grain yields of direct-seeded and transplanted rice: A meta-analysis. *Agronomy*. 9(11):767.
 31. Yao F. Huang J. Cui K. Nie L. Xiang J. Liu X. Wu W. Chen M. and Peng S. 2012. Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crops Research*. 126: 16-22.
 32. Ye Y. Liang X. Chen Y. Liu J. Gu J. Guo R. and Li L. 2013. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, Water and nitrogen use. *Field Crops Research*. 144: 212-224.
 - lens in rice production systems of Eastern India. *Journal of cleaner production*. 244: 118835.
 19. Farooq M. Siddique K. H. M. Rehman H. Aziz T. Lee D. and Wahid A. 2011. Rice direct seeding: experiences, challenges and opportunities. *Soil Tillage Res*. 111: 87-98.
 20. He G. Wang Z. and Cui Z. 2020. Managing irrigation water for sustainable rice production in China. *Journal of Cleaner Production*. 245: 118928.
 21. Hossen M. A. Hossain M. M. Haque M. E. and Bell R. W. 2018. Transplanting into non-puddled soils with a small-scale mechanical transplanter reduced fuel. Labour and irrigation water requirements for rice (*Oryza sativa* L.) establishment and increased yield. *Journal of Field Crops Research*. 225: 141-151.
 22. Ishfaq M. Farooq M. Zulfiqar U. Hussain S. Akbar N. Nawaz A. and Anjum S.A. 2020. Alternate wetting and drying: A water-saving and ecofriendly rice production system. *Agricultural Water Management*. 241: 106363.
 23. Kar I. Mishra A. Behera B. Khanda C. Kumar V. and Kumar A. 2018. Productivity trade-off with different water regimes and genotypes of rice under non-puddled conditions in Eastern India. *Field crops research*. 222: 218-229.
 24. Lampayan R. M. Samoy-Pascual K. C. Sibayan E. B. Ella V. B. Jayag O. P. Cabangon R. J. and Bouman B. A. M. 2015b. Effects of alternate wetting and drying (AWD) threshold level and plant seedling age on crop performance, water input, and water productivity of transplanted rice in Central Luzon, Philippines. *Paddy and Water Environment*. 13(3): 215-227.
 25. López-López R. Jiménez-Chong J. A. Hernández-Aragón L. and Inzunza Ibarra M. A. 2018. Water productivity of rice genotypes with irrigation and drainage. *Irrigation and Drainage*. 67(4): 508-515.
 26. Okamura N. Yasumoto S. Kojima M. Okamura M. and Ohshita Y. 2018. Establishment rate of direct-seeded rice in the relay-intercropping system in Kanto region of Japan. *Plant Production Science*. 21(3): 278-285.
 27. Pourgholam-Amiji M. Liaghat A. Khoshravesht M. and Azamathulla H.M. 2021. Improving rice water productivity using alternative irrigation (case study: north of Iran). *Water Supply*. 21(3): 1216-1227.
 28. Sandhu S. S. Mahal S. S. Vashist K. K. Buttar G. S. Brar A. S and Singh M. 2012. Crop and water productivity of bed transplanted rice as influenced by various

مطالعه اثر آلودگی کادمیوم و آبیاری با آب مغناطیس بر رشد و آنتی‌اکسیدان‌های گیاه وتیور

الهه جعفری هفشجانی^۱، مهران هودجی^{۲*}، فائزه قناتی^۳، یعقوب حسینی^۴ و ولی علیپور^۵

چکیده

کادمیوم یک آلاینده مهم زیست‌محیطی محسوب می‌شود که آثار نامطلوب آن بر تهدید سلامت عمومی در مطالعات گذشته گزارش شده است. به‌منظور ارزیابی قابلیت گیاه وتیور در برداشت کادمیوم در شرایط آبیاری با آب مغناطیس، این مطالعه به‌صورت طرح فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به‌صورت آزمایش‌گلدانی اجرا شد. فاکتورهای مورد مطالعه شامل کادمیوم در چهار سطح (۰، ۰.۵، ۱ و ۲ میلی‌گرم در لیتر) و آبیاری در سه سطح (کاملاً مغناطیس، نیمه‌مغناطیس و غیرمغناطیس) بودند. نتایج نشان داد که استفاده از آب مغناطیس در آبیاری به‌طور معنی‌داری پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی و برداشت کادمیوم توسط گیاه را تحت‌تأثیر قرار داد. به‌طوری‌که بیشترین غلظت کادمیوم ریشه و شاخساره، فاکتور انتقال و شاخص تجمع زیستی به تیمار آب کاملاً مغناطیس اختصاص داشت و با تغییر غلظت کادمیوم، اثرگذاری آب مغناطیس بر پاسخ‌های گیاهی نیز تغییر کرد. فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی نیز با افزایش آلودگی کادمیوم افزایش نشان داد؛ اما به‌طور نسبی میزان این افزایش در حضور آبیاری با آب کاملاً مغناطیس بیشتر از سطوح دیگر آبیاری بود. به‌طور کلی، یافته‌های این تحقیق نشان داد که استفاده از آب مغناطیس برای افزایش مقاومت گیاهان به تنش آلودگی کادمیوم مفید بوده و روشی کارآمد برای کاهش آلودگی فلزات سنگین در محیط‌زیست محسوب می‌شود؛ با این‌وجود، برای تأیید این نتایج، انجام مطالعات بیشتر روی سایر گیاهان و در سطوح بیشتر آلودگی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، فلزات سنگین، رشد و پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه.

ارجاع: جعفری هفشجانی ا.، هودجی م.، قناتی ف.، حسینی ی. و علیپور و. ۱۴۰۱. مطالعه اثر آلودگی کادمیوم و آبیاری با آب مغناطیس بر رشد و آنتی‌اکسیدان‌های گیاه وتیور. مجله پژوهش آب ایران. ۴۷: ۱۰۳-۱۱۳. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14086.2456>

۱- گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان، واحد خوراسگان، اصفهان، ایران.

۲- گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان، واحد خوراسگان، اصفهان، ایران.

۳- گروه زیست‌شناسی گیاهی، دانشکده زیست‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۴- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.

۵- گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان، بندرعباس، ایران.

* نویسنده مسئول: mehranhoudaji1@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹

مقدمه

فلزات سنگین مهم‌ترین آلاینده‌های معدنی در محیط‌زیست محسوب می‌شوند که آثار ناشی از مسمومیت آن‌ها بر سلامت عمومی، به‌عنوان چالشی مهم محسوب می‌شود (موسوی و همکاران، ۲۰۲۲؛ موسوی و همکاران، ۲۰۱۸). فلزات سنگین در نتیجه فعالیت‌های مختلف انسانی به محیط‌زیست وارد می‌شوند که در مطالعات گذشته به‌طور مفصل به آن‌ها پرداخته شده است (موسوی، ۲۰۲۲؛ موسوی و احمدآبادی، ۱۳۹۲؛ موسوی و همکاران، ۱۳۹۰). کادمیوم یک آلاینده مهم معدنی محسوب می‌شود که به‌طور جدی برای سلامتی گیاه، دام و انسان، سمی محسوب می‌شود. کادمیوم با اثرگذاری منفی بر جوانه‌زنی، رشد ریشه و اندام هوایی، فتوسنتز، تقسیم سلولی و تعرق گیاهان، باعث کاهش معنی‌دار عملکرد شده و در سطوح پیشرفته، مرگ گیاه را به‌دنبال دارد (موسوی و همکاران، ۲۰۱۰؛ موسوی و همکاران، ۲۰۱۳). روش‌های متعددی برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین وجود دارد که اکثر آن‌ها ضمن اینکه ناپایدار بوده و از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیستند، می‌توانند به میزان زیادی شرایط و خصوصیات توده خاک را تحت‌تأثیر قرار دهند (جیلانی و همکاران، ۲۰۱۷؛ مشیری و همکاران، ۲۰۱۹؛ موسوی و نصرآبادی، ۲۰۱۸؛ موسوی و همکاران، ۲۰۲۲؛ سیار و همکاران، ۲۰۲۰). در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی درباره ارزیابی کارایی تکنیک گیاه‌پالایی در حذف فلزات بالقوه سمی از خاک انجام شده است (گراوند و همکاران، ۲۰۲۱؛ موسوی و همکاران، ۲۰۱۱؛ سیار و همکاران، ۲۰۲۰). در گیاه‌پالایی معمولاً از گونه‌های گیاهی استفاده می‌شود که زیست‌توده بالایی تولید می‌کنند و در برابر مسمومیت فلزات سنگین نیز مقاوم هستند (بان و همکاران، ۲۰۲۰). گیاه وتیور (*Vetiver Zizanioides*) یکی از این گونه‌های گیاهی است که به‌دلیل سرعت رشد بالا، قدرت سازگاری با طیف وسیعی از تنش‌های محیطی و مقاومت در برابر آلودگی‌های فلزات سنگین در خاک و آب شناخته شده است (گراوند و همکاران، ۲۰۲۱؛ پیداتالا و همکاران، ۲۰۱۸). راهبردهای متعددی برای کمک به افزایش کارایی گیاه‌پالایی استفاده شده است، از جمله استفاده از کلات‌ها، اصلاح ژنتیکی، تلقیح باکتریایی و کشت مخلوط که نه تنها هزینه‌ها را افزایش می‌دهند، بلکه خطرات زیست‌محیطی

را نیز افزایش می‌دهند (تانگ و همکاران، ۲۰۱۹). یکی از روش‌هایی که اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از میدان مغناطیسی است. مغناطیس برای افزایش جوانه‌زنی بذر، فعال‌کردن متابولیسم، تولید زیست‌توده و عملکرد، و افزایش مقاومت گیاه به فلزات سنگین استفاده شده است (عبداللهی و همکاران، ۲۰۱۹؛ قناتی و همکاران، ۲۰۱۵؛ سورندران و همکاران، ۲۰۱۶). لیو و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که میدان مغناطیسی خارجی ۱۲۰ مگاتسلا به‌طور قابل‌توجهی کارایی *N. caerulea* را برای برداشت کادمیوم و روی بهبود می‌بخشد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که در مقایسه با شاهد، مقدار قابل‌توجهی کادمیوم (۲۳/۶ درصد) در برگ‌های مرده گیاه تحت تیمار مغناطیسی اندازه‌گیری شد.

گزارشات بسیاری مبنی بر افزایش پاسخ دفاعی گیاهان در شرایط حضور میدان مغناطیسی وجود دارد (گروال و ماهشواری، ۲۰۱۱؛ رزمجو و علینیان، ۲۰۱۷؛ سورندران و همکاران، ۲۰۱۶). اینکه تیمار مغناطیسی باعث تنش اکسیداتیو یا افزایش فعالیت آنزیم‌های دفاعی گیاه، افزایش غلظت و طول عمر رادیکال‌های آزاد می‌شود، نشان‌دهنده ارتباط مغناطیس درمانی با اثرات آن بر گیاهان است (صاحب‌جامعی و همکاران، ۲۰۰۷). از طرف دیگر، مغناطیس‌درمانی می‌تواند جذب فلزات سنگین را افزایش دهد که باعث افزایش تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌پذیر در گیاهان و نیز منجر به استرس اکسیداتیو مانند پراکسید هیدروژن می‌شود. حسن‌الزمان و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که با افزایش تولید رادیکال‌های آزاد، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز^۱ (SOD)، پراکسیداز^۲ (POD)، کاتالاز^۳ (CAT) و غیر آنتی‌اکسیدان‌ها شامل آنتوسیانین‌ها، فلاونوئیدها و فنل‌ها نیز افزایش می‌یابد.

آب مغناطیسی در مطالعات بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، تا به امروز مطالعات کمی درباره اثرات آب مغناطیسی بر کارایی گیاه‌پالایی و پاسخ‌های بیوشیمیایی گیاهان انجام شده است؛ بنابراین، هدف از این مطالعه، بررسی اثرات آب مغناطیسی بر پاسخ‌های بیوشیمیایی گیاه وتیور در شرایط آلودگی کادمیوم و کارایی گیاه‌پالایی آن است.

1- Superoxide dismutase

2- Peroxidase

3- Catalase

مواد و روش‌ها

مورد استفاده در این پژوهش از پساب فاضلاب شهری بندرعباس بود که از منطقه تصفیه‌خانه دوراهی ایسینی با مختصات طول ۵۶ درجه و ۱۸ دقیقه و عرض ۲۷ درجه و ۲۱ دقیقه تهیه و با استفاده از روش‌های استاندارد خصوصیات آن تعیین شد (جدول ۲).

این پژوهش در سال ۱۳۹۹ در محل نهالستان مرکزی سازمان پارک‌ها و فضای سبز شهرداری بندرعباس (طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۳۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۲۷ درجه و ۲۱ دقیقه) به صورت فاکتوریل و در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. برای این منظور، از خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متری) واقع در دهستان باغو شهرستان بندرعباس، نمونه خاک تهیه شد. پس از هواخشک کردن خاک و عبور از الک دو میلی‌متری، برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی از جمله بافت خاک به روش هیدرومتر (گی و اور، ۲۰۰۲)، ماده آلی به روش اکسایش با اسید کرومیک و سپس تیتراسیون با فروآمونیم سولفات (والکی و بلک، ۱۹۳۴)، pH خاک در خمیر اشباع (کلوت، ۱۹۸۶)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (برمنر، ۱۹۹۶)، نیتروژن کل به روش کجلدال (برمنر، ۱۹۹۶)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی توسط اسید کلریدریک (اسپارکس، ۲۰۲۰) و فسفر قابل استفاده توسط عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم (السون، ۱۹۵۴) تعیین شد. برای اندازه‌گیری شکل قابل جذب عناصر آهن، منگنز، سرب و کادمیوم از عصاره‌گیر دی‌اتیلن‌تری‌آمین پنتااستیک اسید (لیندسی و نورول، ۱۹۷۸) استفاده و غلظت آن‌ها به وسیله دستگاه جذب اتمی تعیین شد (جدول ۱).

در این مطالعه از گیاه وتیور (*Vetiver Zizanioides*)، به‌عنوان گونه گیاهی مقاوم به شرایط آب‌وهوایی شهر بندرعباس استفاده شد. گیاه مورد نظر به صورت قلمه، از پایه‌های مادری تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. پساب

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مورد آزمایش

مقدار	خصوصیات
۷۸	شن (%)
۱۲	سیلت (%)
۱۰	رس (%)
شن لومی	بافت خاک
۲۹/۷۷	رطوبت ظرفیت زراعی (%v)
۱/۴۱۸	جرم مخصوص ظاهری خاک (gr/cm ³)
۱/۱۸	ماده آلی (%)
۷/۵۲	pH
۱/۹	قابلیت هدایت الکتریکی (dS/m)
۵۴/۲۵	کربنات کلسیم معادل (%)
۱۳/۱	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol ⁺ /kg)
۶/۵	فسفر قابل جذب (mg/kg)
۶/۱	منگنز قابل جذب (mg/kg)
۳۰	پتاسیم (mg/kg)
۴/۳	آهن قابل جذب (mg/kg)
۰/۰۸	نیتروژن کل (%)
۰	کادمیوم قابل جذب (mg/kg)
۰	سرب قابل جذب (mg/kg)

جدول ۲- خصوصیات اولیه پساب خروجی تصفیه‌خانه شهر بندرعباس

مقدار	واحد	پارامتر
۷/۵	-	pH
۴۰/۷	NTU	کدورت
۴۳۰۰	µs/cm	قابلیت هدایت الکتریکی
۶۳/۲	mg/L	کل جامدات محلول (TSS)
۳۴۳۶	mg/L	نیاز بیوشیمیایی اکسیژن (BOD)
۸۴/۷	mg/L	نیاز شیمیایی اکسیژن (COD)
۳/۳۶	mg/L	فسفات
۰	mg/L	سرب
۰	mg/L	کادمیوم

مغناطیده‌کردن آب

به‌منظور مغناطیده‌کردن آب، در این مطالعه از روش مورد استفاده توسط قناتی و همکاران (۲۰۱۵) استفاده شد. براین اساس، یک دستگاه هم‌زن یون مغناطیس ساخت شرکت فناوری ایرانیان پژوهش نصیر (فاپن) برای مغناطیده‌کردن آب مورد استفاده قرار گرفت. دستگاه مذکور شامل یک لوله نسبتاً بلند پارامغناطیس است. در این قسمت از لوله که بخش فعال آن است، میدان مغناطیسی متناوب وجود دارد. هنگام عبور آب از این قسمت، نیروی مغناطیسی متناوب به یون‌ها در طول محور اعمال می‌شود. میدان مغناطیسی سینوسی در داخل لوله از یک‌سری آهن‌ربا ساخته شده که با دقت در کنار هم چیده شده‌اند. بعد از تهیه پساب فاضلاب مورد نظر، با اضافه‌کردن حجم مشخصی از نیترات کادمیوم به آن، غلظت‌های مورد نظر تهیه شد. دستگاه هم‌زن یون مغناطیس در مسیر آب قرار داده شد و براساس نوع تیمار آبیاری (مغناطیس، نیمه‌مغناطیس و غیرمغناطیس) جریان مغناطیس در مدار قرار گرفته شد.

تیمارهای مورد استفاده و روش اجرای تحقیق

این آزمایش به‌صورت گلدانی در گلدان‌هایی با ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و قطر دهانه ۴۲ سانتی‌متر انجام گرفت. هر گلدان از ۱۰ کیلوگرم خاک و ۲ کیلوگرم زهکش پر شد. عناصر غذایی مورد نیاز رشد گیاهان براساس نتایج آزمون خاک، به خاک همه گلدان‌ها به‌صورت محلول اضافه و خاک و عناصر غذایی به‌صورت فیزیکی نیز به‌طور کامل و یکنواخت مخلوط شد. قبل از پرکردن گلدان‌ها، به تعداد مناسب سوراخ در کف گلدان‌ها به‌منظور اطمینان از زهکشی مناسب ایجاد شد. تیمارهای مورد آزمایش در این تحقیق شامل آبیاری (در سه سطح آبیاری با آب مغناطیده در کل دوره آزمایش (W_1) ، آبیاری با آب نیمه‌مغناطیس (یک‌بار استفاده از آب غیرمغناطیده و یک‌بار استفاده از آب مغناطیده) (W_2) و آبیاری با آب غیرمغناطیده در کل آزمایش) و کادمیوم (در چهار سطح صفر (Cd_0) ، ۰/۵ (Cd_1) ، ۱ (Cd_2) و ۲ (Cd_3) میلی‌گرم کادمیوم در لیتر آب آبیاری) بودند. کادمیوم از منبع نیترات کادمیوم تأمین شد. دور آبیاری براساس رساندن رطوبت خاک به رطوبت ظرفیت مزرعه از طریق وزن‌کردن گلدان‌ها انجام شد

(بصیرت و همکاران، ۲۰۱۹). پس از استقرار اولیه گیاه، آبیاری اعمال شد. مدت زمان اعمال تیمارها در یک بازه ۵ ماهه در نظر گرفته شد.

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

بعد از حدود ۵ ماه از تاریخ کشت، اقدام به برداشت گیاهان از گلدان‌ها شد. جداسازی ریشه‌ها و اندام هوایی با دقت انجام و پس از شست‌وشو با آب مقطر، به‌منظور خشک‌شدن در آون (در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و به مدت ۷۲ ساعت) قرار گرفته و وزن خشک آن‌ها تعیین شد. برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی از روش‌های استاندارد (بیچ، ۱۹۸۲) استفاده و با دستگاه جذب اتمی مدل Trace AII200 قرائت انجام شد. برای اندازه‌گیری پراکسیداز از روش استاندارد استفاده شد (صاحب‌جمعی و همکاران، ۲۰۰۷) و با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول زمان یک دقیقه در طول موج ۴۷۰ نانومتر قرائت انجام شد. به‌منظور اندازه‌گیری فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) بعد از تهیه عصاره مورد نیاز (قناتی و همکاران، ۲۰۱۵) قرائت با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر انجام شد. فعالیت آنزیم کاتالاز نیز از روش استاندارد مورد استفاده توسط عبدالملکی و همکاران (۲۰۰۷) اندازه‌گیری شد. برای سنجش فلاونوئیدها، بعد از تهیه عصاره مورد نظر، میزان جذب نمونه‌ها پس از سردشدن، توسط اسپکتروفتومتر در سه طول موج ۲۷۰، ۳۰۰ و ۳۳۰ نانومتر خوانده شد (کریزک و همکاران، ۱۹۹۳). به‌منظور سنجش آنتوسیانین، بعد از تهیه محلول مورد نظر، میزان جذب آن در طول موج ۵۵۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد (هاری و همکاران، ۲۰۰۳). به‌منظور استخراج فنل کل در نمونه‌ها، از روش استاندارد سینگلتن (۱۹۹۹) استفاده شد. سپس، مقدار کل ترکیبات فنلی با اندازه‌گیری جذب نمونه‌ها در طول موج ۷۳۰ نانومتر با استفاده از منحنی استاندارد گالیک اسید محاسبه شد (سینگلتن، ۱۹۹۹)؛ همه محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام گرفت و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد و به‌منظور رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای اعمال شده بر وضعیت برداشت کادمیوم، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی گیاه و تیور

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که استفاده از سطوح مختلف آب مغناطیس و آلودگی کادمیوم به‌طور معنی‌داری انباشت کادمیوم در ریشه و اندام هوایی، شاخص تجمع زیستی و فاکتور انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی را تحت‌تأثیر قرار داد (جدول ۳). همچنین، اثر متقابل سطوح مختلف آب آبیاری و غلظت کادمیوم بر آن‌ها معنی‌دار شد ($P < 0.05$). تولید زیست‌توده، فعالیت

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی گیاه و تیور به‌طور معنی‌داری تحت‌تأثیر تیمارهای اعمال شده قرار گرفت. براساس نتایج تجزیه واریانس مربوط به این صفات (جدول ۴)، اثر سطوح مختلف کادمیوم بر فاکتورهای ذکر شده معنی‌دار شد؛ درحالی‌که سطوح مختلف آب مغناطیس تنها بر فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)، آنتوسیانین و وزن خشک بوته معنی‌دار نشد. اثر متقابل تیمارهای مورد مطالعه نیز به استثنای فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز (SOD)، آنتوسیانین و وزن خشک بوته، بر بقیه موارد معنی‌دار شد ($P < 0.05$).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر وضعیت غلظت، انباشت و انتقال کادمیوم در گیاه و تیور

منبع تغییر	درجه آزادی	کادمیوم ریشه	کادمیوم اندام هوایی	شاخص تجمع زیستی	فاکتور انتقال
آب مغناطیس (A)	۲	۰/۰۴**	۰/۰۱**	۱/۲۳**	۰/۰۳*
غلظت کادمیوم (B)	۳	۰/۴۷**	۰/۱۷**	۲/۵۲**	۰/۸۹**
اثر متقابل AB	۶	۰/۰۰۱*	۰/۰۰۴*	۰/۲۱**	۰/۰۳**
خطا	۲۴	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۱
ضریب تغییرات C.V.%	۱۶/۲	۱۹	۲۷/۸	۱۶/۵	۱۱

ns و * ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر صفات رشدی و آنزیمی گیاه و تیور

منبع تغییر	درجه آزادی	CAT	POD	SOD	فلاونوئید	فنول	آنتوسیانین	وزن خشک بوته
آب مغناطیس (A)	۲	۰/۵۴ns	۴۳۴۳**	۱۵۰۸**	۴۴۸۰**	۸۰۳**	۹/۶ns	۸۴ns
غلظت کادمیوم (B)	۳	۷/۸۹**	۱۰۰۷**	۹۳۰۸**	۱۱۹۲۹**	۱۷۷۹**	۱۸۱/۲*	۲۷۵۱**
اثر متقابل AB	۶	۱/۱۰**	۱۱۶۴**	۴۶۰ns	۳۲۵۱**	۳۳۱**	۲۵/۲ns	۳۸ns
خطا	۲۴	۰/۲۸	۱۸۷	۴۸۹	۵۵۷	۸۵	۵۳/۲	۱۲۸
ضریب تغییرات C.V.%	۵/۵	۵/۳	۷/۹	۱۹/۶	۱۴/۰	۱۷/۷	۸/۷	۸/۷

ns و * ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد

مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر وضعیت برداشت کادمیوم، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی گیاه و تیور

نتایج مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف آب مغناطیس حکایت از نبود اثر معنی‌دار بر فعالیت آنتوسیانین و وزن خشک بوته داشت؛ درحالی‌که به‌طور معنی‌داری فعالیت SOD را تحت‌تأثیر قرار داد (جدول ۵). استفاده از آب مغناطیس به‌طور معنی‌داری فعالیت SOD را افزایش داد (حدود ۲۸/۷۳ درصد افزایش در مقایسه با تیمار آب بدون مغناطیس). این میزان افزایش در تیمار آب

نیمه‌مغناطیس حدود ۱۲/۳۱ درصد در مقایسه با تیمار آب نیمه‌مغناطیس بود.

با افزایش غلظت کادمیوم از صفر به ۲ میلی‌گرم در لیتر، فعالیت SOD نیز افزایش یافت که تنها در سطح ۲ میلی‌گرم در لیتر افزایش معنی‌داری در مقایسه با سایر سطوح مشاهده شد (حدود ۹۲/۴ درصد افزایش در مقایسه با تیمار شاهد). وضعیت کاملاً معکوسی برای وزن خشک بوته مشاهده شد که حکایت از اثر منفی آلودگی کادمیوم بر تولید زیست‌توده است (جدول ۶). آثار منفی آلودگی کادمیوم بر رشد و عملکرد گیاهان به ایجاد اختلال در

اندازه‌گیری شد که اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند؛ به‌طور کلی این‌گونه برداشت می‌شود که گیاه در پاسخ به سطوح بالای آلودگی کادمیوم اقدام به افزایش سطح SOD و آنتوسیانین می‌کند که به نوعی مکانیسمی دفاعی برای تعدیل آثار تنش محیطی محسوب می‌شود که با نتایج حسن‌الزمان و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد.

جوانه‌زنی، رشد ریشه و اندام هوایی، فتوسنتز، تقسیم سلولی و تعرق گیاه و ایجاد اختلال در جذب عناصر غذایی ضروری مورد نیاز گیاهان مربوط می‌شود که در سطوح پیشرفته آلودگی می‌تواند مرگ گیاه را به دنبال داشته باشد (لنگ و همکاران، ۲۰۲۱). بیشترین میزان آنتوسیانین به ترتیب در سطوح ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر

جدول ۵- مقایسه اثر آب مغناطیس بر صفات مورد مطالعه گیاه وتیور

صفت	آب کاملاً مغناطیس	آب نیمه مغناطیس	آب غیرمغناطیس
SOD	۳۱۶/۸ ^a	۲۷۶/۴ ^b	۲۴۶/۱ ^c
آنتوسیانین	۴۰/۳ ^a	۴۱/۶ ^a	۴۱/۷ ^a
وزن خشک بوته	۱۲۷/۵ ^a	۱۲۹/۱ ^a	۱۳۳/۷ ^a

میانگین‌های موجود در هر ردیف که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، در سطح ۵ درصد آزمون LSD اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

جدول ۶- مقایسه اثر غلظت‌های مختلف کادمیوم بر صفات مورد مطالعه گیاه وتیور

صفت غلظت کادمیوم	SOD	آنتوسیانین	وزن خشک بوته
شاهد	۲۲۴/۶ ^b	۳۹/۳ ^b	۱۵۴/۶ ^a
کادمیوم ۰/۵	۲۲۹/۳ ^b	۴۰/۸ ^{ab}	۱۲۸/۱ ^b
کادمیوم ۱	۲۳۳/۰ ^b	۳۷/۰ ^b	۱۲۱/۷ ^{bc}
کادمیوم ۲	۴۳۲/۳ ^a	۴۷/۵ ^a	۱۱۴/۶ ^c

میانگین‌های موجود در هر ستون که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، در سطح ۵ درصد آزمون LSD اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

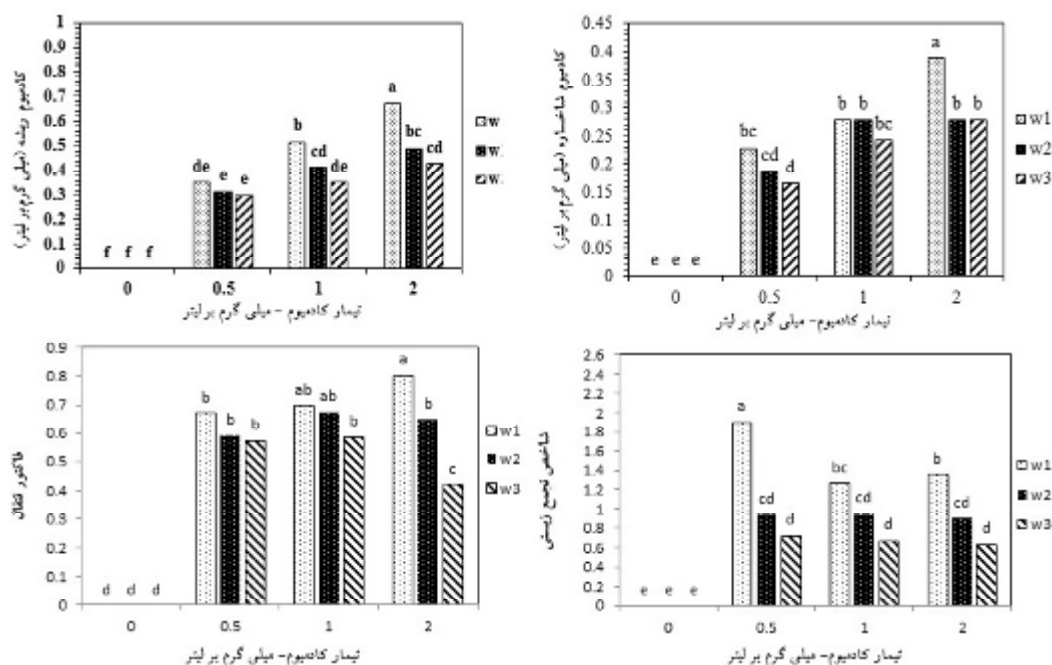
کادمیوم به اندازه‌ای بود که در مقایسه با تیمار شاهد، حدود ۲۴ درصد افزایش غلظت کادمیوم در برگ اندازه‌گیری شد. اثرگذاری بر فعل و انفعالات متابولیسمی، پاسخ‌های تعرقی و سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه در شرایط بروز تنش (در اینجا آلودگی کادمیوم)، از عوامل اثرگذار بر افزایش مقاومت گیاه و جذب عناصر در شرایط حضور میدان مغناطیسی گزارش شده است (رزمجو و علینیان، ۲۰۱۷؛ سورندران و همکاران، ۲۰۱۶).

استفاده از آب مغناطیس اثر معنی‌داری بر شاخص تجمع زیستی و فاکتور انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی داشت. بیشترین فاکتور انتقال کادمیوم به تیمار آب کاملاً مغناطیس در سطح آلودگی ۲ میلی‌گرم کادمیوم در لیتر اختصاص داشت که با کاهش سطح آلودگی کادمیوم، میزان این فاکتور نیز کاهش نشان داد. بیشترین شاخص تجمع زیستی در تیمار آب کاملاً مغناطیس و سطح غلظتی ۰/۵ میلی‌گرم کادمیوم در لیتر آب آبیاری اتفاق افتاد که دارای اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها بود و با افزایش سطح آلودگی کادمیوم از ۰/۵ به ۲ میلی‌گرم در لیتر، شاخص تجمع زیستی در سطوح مختلف آب

وضعیت برداشت، انباشت و انتقال کادمیوم در بافت‌های گیاهی وتیور نیز به‌طور معنی‌داری تحت‌تأثیر تیمارهای اعمال‌شده قرار گرفت (شکل ۱). با افزایش غلظت کادمیوم در کنار استفاده از آب مغناطیس به‌منظور آبیاری، میزان تجمع کادمیوم هم در ریشه و هم در اندام هوایی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. به‌طوری‌که بیشترین انباشت کادمیوم، هم در ریشه و هم در اندام هوایی به کاربرد آب کاملاً مغناطیس به‌همراه سطح غلظتی ۲ میلی‌گرم کادمیوم در لیتر اختصاص داشت و با کاهش سطح آلودگی کادمیوم در سطوح مختلف آب آبیاری، این میزان انباشت در ریشه و اندام هوایی کاهش یافت (شکل ۱). اینکه گیاه جذب انتخابی نداشته و با افزایش غلظت عناصر شامل ضروری و غیرضروری در محیط ریشه، میزان جذب و انباشت آن نیز در بافت‌های گیاهی افزایش پیدا می‌کند، امری کاملاً بدیهی در علم تغذیه گیاهی است. با این‌وجود، نکته قابل‌توجه اثر میدان مغناطیسی در افزایش قابلیت گیاه در جذب عناصر است که در مطالعه اخیر توسط لیو و همکاران (۲۰۱۹) گزارش شده است. اثر میدان مغناطیسی در افزایش قابلیت گیاه *N. caerulea* در جذب

الکتریکی بیولوژیکی طبیعی که در گیاهان مانع مهاجرت یون‌ها است را خنثی می‌کنند (لیو و همکاران، ۲۰۱۹). ضمن اینکه باید توجه داشت که اثر میدان‌های مغناطیسی و آب مغناطیس در افزایش قابلیت گیاهان در برداشت فلزات سنگین، به رقم و گونه گیاهی وابستگی معنی‌داری دارد (میشرا و همکاران، ۲۰۱۷).

مغناطیس از روند کاهشی تبعیت می‌کرد (شکل ۱). اثرگذاری آب مغناطیس بر افزایش فاکتور انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی و نیز شاخص تجمع زیستی کادمیوم به این یافته مهم اشاره دارد که میدان‌های مغناطیسی نه تنها انرژی لازم برای عبور کادمیوم از موانع بین شاخه‌ها و برگ‌ها را فراهم می‌کنند، بلکه میدان



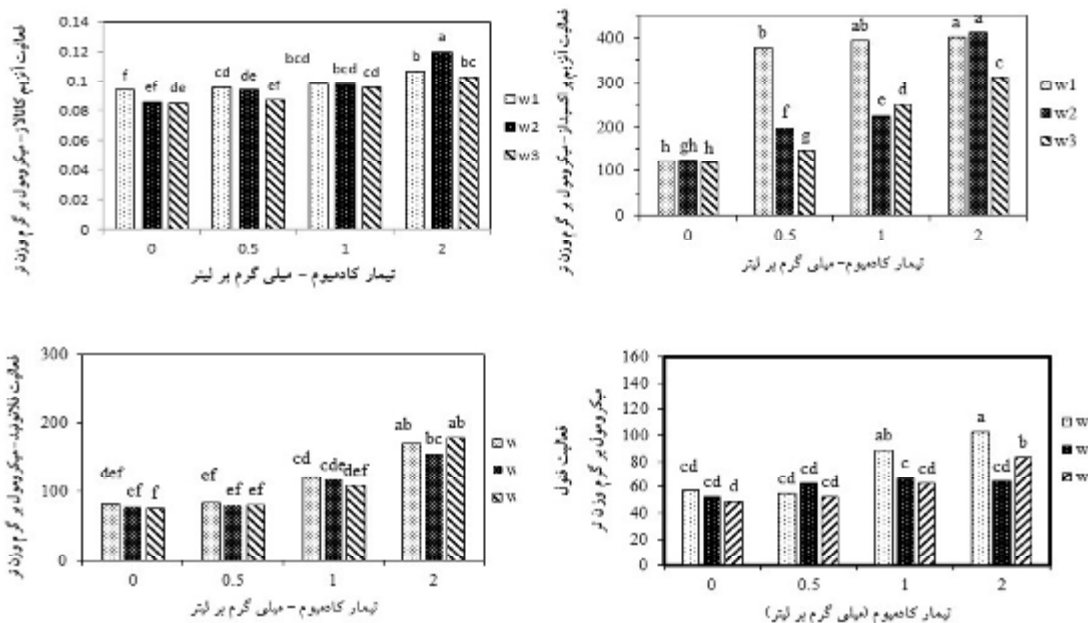
شکل ۱- اثر متقابل سطوح کادمیوم و آب مغناطیس بر غلظت، فاکتور انتقال و شاخص تجمع زیستی کادمیوم
W1: آب کاملاً مغناطیس؛ W2: آب نیمه مغناطیس؛ W3: آب بدون مغناطیس

افتاد که دارای اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها بود ($P < 0.05$). با کاهش سطح آلودگی کادمیوم، فعالیت CAT در سطوح مختلف آب آبیاری از روندی تقریباً نزولی تبعیت می‌کرد (شکل ۲) که با نتایج گائو و همکاران (۲۰۱۹) و کین و همکاران (۲۰۱۸) مبنی بر افزایش فعالیت POD و SOD در سطوح بالای آلودگی کادمیوم مطابقت دارد. وضعیت تقریباً مشابهی برای فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی اتفاق افتاد. با افزایش سطح آلودگی کادمیوم، فعالیت فلاونوئید و فنول نیز در سطوح مختلف آب آبیاری افزایش یافت. به نحوی که به‌طور میانگین، اثر آبیاری با آب کاملاً مغناطیس بر میزان فعالیت فلاونوئید و فنول در مقایسه با تیمارهای آب نیمه مغناطیس و غیرمغناطیس بیشتر بود (شکل ۲). قناتی و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که قابلیت گیاه در

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی نیز در سطوح مختلف آب آبیاری با افزایش سطح آلودگی کادمیوم از روند تقریباً صعودی تبعیت می‌کرد (شکل ۲). بیشترین فعالیت آنزیم پروکسیداز (POD) در سطح ۲ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم و در شرایط آبیاری با آب کاملاً مغناطیس و آب نیمه مغناطیس اتفاق افتاد که با سطح ۱ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم و در شرایط آبیاری با آب کاملاً مغناطیس فاقد اختلاف معنی‌داری بود. بررسی‌ها نشان داده که فعالیت آنزیم POD به‌شدت توسط کادمیوم در ریشه‌ها، ساقه‌ها و برگ‌ها افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد POD نقشی اساسی در حذف گونه‌های اکسیژن واکنش‌پذیر دارد (عباس و همکاران، ۲۰۱۷). بیشترین فعالیت CAT نیز در سطح ۲ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم و در شرایط آبیاری با آب نیمه مغناطیس اتفاق

در شرایط رویارویی با آلودگی کادمیوم اقدام به بروز یک سری پاسخ‌های بیوشیمیایی نظیر تغییر در میزان فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیر آنزیمی می‌کند که استفاده از آب مغناطیس با تشدید این فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه را در مقابله با بروز آثار تنش یاری می‌کند.

جذب بیشتر عناصر غذایی در شرایط آبیاری با آب مغناطیس افزایش می‌یابد؛ زیرا آب مغناطیس سنتز پلی‌فنل‌ها، به‌ویژه آنتوسیانین و فلاونوئیدها را در گیاه تسریع می‌کند و این اثری مثبت بر ارتقای سلامتی، رشد و عملکرد گیاهان در حضور میدان مغناطیسی است. به‌طور کلی، داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داد که گیاهان



1

شکل ۲- اثر متقابل سطوح کادمیوم و آب مغناطیس بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی گیاه وتیور W1: آب کاملاً مغناطیس؛ W2: آب نیمه‌مغناطیس؛ W3: آب بدون مغناطیس

به‌دست‌آمده از این تحقیق، انجام مطالعات بیشتر در سطوح بیشتر آلودگی، سایر فلزات سنگین و گیاهان مختلف پیشنهاد می‌شود.

منابع

- موسوی س. م. و احمدآبادی ز. ۱۳۹۲. مقایسه پتانسیل لجن فاضلاب با کمپوست زباله شهری از نظر غنی‌کردن خاک با برخی عناصر ریزمغذی به زراعی کشاورزی (مجله کشاورزی پردیس ابوریحان). ۱۵(۳): ۵۳-۶۳.
- موسوی س. م. بهمنیار م. ع. و پیردشتی ه. ا. ۱۳۹۰. وضعیت نیکل و کروم در خاک و گیاه برنج تحت تیمار با ورمی کمپوست. مجله الکترونیک مدیریت خاک و تولید پایدار. ۱(۱): ۴۳-۶۲.
- Abbas G. Saqib M. Akhtar J. and Murtaza G. 2017. Physiological and biochemical

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان داد که استفاده از آب مغناطیس برای افزایش مقاومت گیاهان به تنش آلودگی کادمیوم می‌تواند مفید واقع شود. گیاه وتیور در شرایط رویارویی با افزایش سطح آلودگی کادمیوم، اقدام به بروز پاسخ‌های رشدی و آنتی‌اکسیدانی می‌کند که گیاهان برای مقابله با آثار نامطلوب محیطی محسوب می‌شود. درمقابل، استفاده از تکنیک آب مغناطیس در آبیاری گیاهان در شرایط آلودگی کادمیوم می‌تواند ضمن اثرگذاری معنی‌دار بر نوع پاسخ‌های گیاهی، به گیاه در تحمل تنش‌های محیطی (در اینجا آلودگی کادمیوم) کمک کند. استفاده از آب مغناطیس اثر معنی‌داری بر شاخص تجمع زیستی و فاکتور انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی داشت. باین‌وجود، برای تأیید نتایج

- oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*. 9(8): 681.
- 15) Jeelani N. Yang W. Xu L. Qiao Y. An S. and Leng X. 2017. Phytoremediation potential of *Acorus calamus* in soils co-contaminated with cadmium and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Scientific reports*. 7(1): 1-9.
 - 16) Klute A. 1986. *Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods.* Soil Science Society of America, Inc. Publisher, Madison, WI.
 - 17) Krizek D. T. Kramer G. F. Upadhyaya A. and Mirecki R. M. 1993. UV-B response of cucumber seedlings grown under metal halide and high-pressure sodium/deluxe lamps. *Physiologia Plantarum*. 88(2): 350-358.
 - 18) Leng Y. Li Y. Ma Y. H. He L. F. and Li S. W. 2021. Abscisic acid modulates differential physiological and biochemical responses of roots, stems, and leaves in mung bean seedlings to cadmium stress. *Environmental Science Pollution Research*. 28(5): 6030-6043.
 - 19) Lindsay W. L. and Norvell W. A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*. 42(3): 421-428.
 - 20) Luo J. He W. Yang D. Wu J. and Gu X. S. 2019. Magnetic field enhance decontamination efficiency of *Noccaea caerulea* and reduce leaching of non-hyperaccumulated metals. *Journal of hazardous materials*. 368: 141-148.
 - 21) Mishra S. Mishra A. and Küpper H. 2017. Protein biochemistry and expression regulation of cadmium/zinc pumping ATPases in the hyperaccumulator plants *Arabidopsis halleri* and *Noccaea caerulea*. *Frontiers in plant science*. 8: 835.
 - 22) Moshiri F. Ebrahimi H. Ardakani M. R. Rejali F. and Mousavi S. M. 2019. Biogeochemical distribution of Pb and Zn forms in two calcareous soils affected by mycorrhizal symbiosis and Alfalfa rhizosphere. *Ecotoxicology and environmental safety*. 179: 241-248.
 - 23) Mousavi S. M. 2022. Silicon and nano-silicon mediated heavy metal stress tolerance in plants Silicon and Nano-silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement. pp. 181-191. Elsevier.
 - 24) Mousavi S. M. Bahmanyar M. and Pirdashti H. 2011. Phytoextraction of nickel and chrome in paddy soil amended with characterization of *Acacia stenophylla* and *Acacia albida* exposed to salinity under hydroponic conditions. *Canadian Journal of Forest Research*. 47(9): 1293-1301.
 - 4) Abdollahi F. Amiri H. Niknam V. Ghanati F. and Mahdigholi K. 2019. Effects of static magnetic fields on the antioxidant system of almond seeds. *Russian Journal of Plant Physiology*. 66(2): 299-307.
 - 5) Abdolmaleki P. Ghanati F. Sahebamei H. and Sarvestani A. S. 2007. Peroxidase activity, lignification and promotion of cell death in tobacco cells exposed to static magnetic field. *The Environmentalist*. 27(4): 435-440.
 - 6) Basirat M. Mousavi S. M. Abbaszadeh S. Ebrahimi M. and Zarebanadkouki M. 2019. The rhizosphere: a potential root trait helping plants to tolerate drought stress. *Plant and Soil*. 445(1): 565-575.
 - 7) Bremner J.M. 1996. Nitrogen-total. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*. 5: 1085-1121.
 - 8) Gee G.W. and Or D. 2002. Particle-size analysis. *Methods of soil analysis. Part 2.4* 4(598): 255-293.
 - 9) Ghanati F. Mohamadalkhani S. Soleimani M. Afzalzadeh R. and Hajnorouzi A. 2015. Change of growth pattern, metabolism, and quality and quantity of maize plants after irrigation with magnetically treated water. *Electromagnetic biology medicine*. 34(3): 211-215.
 - 10) Gravand F. Rahnavard A. and Pour G. M. 2021. Investigation of Vetiver Grass Capability in Phytoremediation of Contaminated Soils with Heavy Metals (Pb, Cd, Mn, and Ni). *Soil Sediment Contamination: An International Journal*. 30(2): 163-186.
 - 11) Grewal H. S. and Maheshwari B. L. 2011. Magnetic treatment of irrigation water and snow pea and chickpea seeds enhances early growth and nutrient contents of seedlings. *Bioelectromagnetics*. 32(1): 58-65.
 - 12) Guo J. Qin S. Rengel Z. Gao W. Nie Z. Liu H. Li C. and Zhao P. 2019. Cadmium stress increases antioxidant enzyme activities and decreases endogenous hormone concentrations more in Cd-tolerant than Cd-sensitive wheat varieties. *Ecotoxicology environmental safety*. 172: 380-387.
 - 13) Hara M. Oki K. Hoshino K. and Kuboi T. 2003. Enhancement of anthocyanin biosynthesis by sugar in radish (*Raphanus sativus*) hypocotyl. *Plant Science*. 164(2): 259-265.
 - 14) Hasanuzzaman M. Bhuyan M. Zulfiqar F. Raza A. Mohsin S.M. Mahmud J.A. Fujita M. and Fotopoulos V. 2020. Reactive

- biochar: an updated analysis. Archives of Agronomy and Soil Science. 1-26.
- 34) Olsen S. R. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate: US Department of Agriculture.
- 35) Page A. L. 1982. Methods of Soil Analysis, Part 2-Chemical and Microbiological Properties. . Soil Science Society of America.
- 36) Pidatala V. R. Li K. Sarkar D. Wusirika R. and Datta R. 2018. Comparative metabolic profiling of vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) and maize (*Zea mays*) under lead stress. Chemosphere. 193: 903-911.
- 37) Qin S. Liu H. Nie Z. Gao W. Li C. Lin Y. and Zhao P. 2018. AsA–GSH cycle and antioxidant enzymes play important roles in Cd tolerance of wheat. Bulletin of environmental contamination toxicology. 101(5): 684-690.
- 38) Razmjoo J. and Alinian S. 2017. Influence of magnetopriming on germination, growth, physiology, oil and essential contents of cumin (*Cuminum cyminum* L.). Electromagnetic biology and medicine. 36(4): 325-329.
- 39) Sahebamei H. Abdolmaleki P. and Ghanati F. 2007. Effects of magnetic field on the antioxidant enzyme activities of suspension-cultured tobacco cells. Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology Medicine, The European Bioelectromagnetics Association. 28(1): 42-47.
- 40) Singleton V. L. 1999. Lamuela-Raventos: Analysis of Total Phenoles and Other Oxidation Substares and Antioxidants by Means of Folin-Ciocalteu Reagent. Methods in enzymology. 299: 152.
- 41) Siyar R. Ardejani F. D. Farahbakhsh M. Norouzi P. Yavarzadeh M. and Maghsoudy S. 2020. Potential of Vetiver grass for the phytoremediation of a real multi-contaminated soil, assisted by electrokinetic. Chemosphere. 246: 125802.
- 42) Sparks D. L. Page A. L. Helmke P. A. and Loeppert R. H. 2020. Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods (Vol. 14): John Wiley & Sons.
- 43) Surendran U. Sandeep O. and Joseph E. 2016. The impacts of magnetic treatment of irrigation water on plant, water and soil characteristics. Agricultural Water Management. 178: 21-29.
- 44) Tang L. Hamid Y. Zehra A. Sahito Z. A. He Z. Hussain B. Gurajala H. K. and Yang X. 2019. Characterization of fava bean (*Vicia faba* L.) genotypes for phytoremediation of municipal solid waste and sewage sludge. Journal of Environmental Science and Engineering. 5(5).
- 25) Mousavi S. M. Bahmanyar M. A. and Pirdashti H. 2010a. Lead and cadmium availability and uptake by rice plant in response to different biosolids and inorganic fertilizers. American Journal of Agricultural and Biological Sciences. 5(1): 25-31.
- 26) Mousavi S. M. Bahmanyar M. A. and Pirdashti H. 2013. Phytoavailability of some micronutrients (Zn and Cu), heavy metals (Pb, Cd), and yield of rice affected by sewage sludge perennial application. Communications in soil science plant analysis. 44(22): 3246-3258.
- 27) Mousavi S. M. Bahmanyar M. A. Pirdashti H. and Gilani S. S. 2010b. Trace metals distribution and uptake in soil and rice grown on a 3-year vermicompost amended soil. African Journal of Biotechnology. 9(25): 3780-3785.
- 28) Mousavi S.M. Brodie G. Payghamzadeh K. Raiesi T. and Kumar A. 2022a. Lead (Pb) bioavailability in the environment, its exposure and effect. Journal of Advances in Environmental Health Research. 10(1).
- 29) Mousavi S. M. Moshiri F. and Moradi S. 2018a. Mobility of heavy metals in sandy soil after application of composts produced from maize straw, sewage sludge and biochar: Discussion of Gondek et al. (2018). Journal of environmental management. 222: 132-134.
- 30) Mousavi S. M. Motesharezadeh B. Hosseini H. M. Alikhani H. and Zolfaghari A. A. 2018b. Geochemical fractions and phytoavailability of zinc in a contaminated calcareous soil affected by biotic and abiotic amendments. Environmental geochemistry health. 40(4): 1221-1235.
- 31) Mousavi S. M. Motesharezadeh B. Hosseini H. M. Alikhani H. and Zolfaghari A. A. 2018c. Root-induced changes of Zn and Pb dynamics in the rhizosphere of sunflower with different plant growth promoting treatments in a heavily contaminated soil. Ecotoxicology and environmental safety. 147: 206-216.
- 32) Mousavi S. M. and Nasrabadi M. 2018. Discussion of Remediation of Heavy Metals Contaminated Silty Clay Loam Soil by Column Extraction with Ethylenediaminetetraacetic Acid and Nitro Triacetic Acid by Dariush Naghipour, Jalil Jaafari, Seyed Davoud Ashrafi, and Amir Hossein Mahvi. Journal of Environmental Engineering. 144(5): 07018003.
- 33) Mousavi S. M. Srivastava A. and Cheraghi M. 2022b. Soil health and crop response of

- cadmium and lead co-contaminated soils coupled with agro-production. *Ecotoxicology environmental safety*. 171: 190-198.
- 45) Walkley A. and Black I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*. 37(1): 29-38.
- 46) Yan A. Wang Y. Tan S. N. Yusof M. L. M. Ghosh S. and Chen Z. 2020. Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Frontiers in Plant Science* 11.

حذف ناپیوسته سرب و کادمیم از محلول‌های آبی با استفاده از نانولوله‌های کربنی چنددیواره

محمدجواد امیری^{۱*}، صابر جمالی^۲ و حسن زنگنه^۳

چکیده

آلودگی منابع آب به فلزات سنگین، یکی از معضلات زیست‌محیطی در سطح جهانی است. به دلیل بالابودن سطح سمیت سرب و کادمیم و تمایل آن‌ها به تجمع در بافت‌های زنده، حذف آن‌ها از آب‌های آلوده ضروری است. امروزه جاذب‌های نانو مواد، نظیر نانولوله کربن چنددیواره به دلیل سطح مخصوص بالا، اندازه کوچک، و پایداری شیمیایی، کاربرد وسیعی در محیط‌زیست دارند. بدین‌منظور، عملکرد این جاذب در حذف فلزات سنگین سرب و کادمیم با استفاده از روش ناپیوسته مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور بررسی فرایند جذب، اثر متغیرهای مختلف، مانند زمان تماس، دما، غلظت اولیه، دوز جاذب و pH محلول مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی داده‌های سینتیک جذب، داده‌های آزمایشگاهی به مدل‌های شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم برازش داده شد و همچنین به‌منظور ارزیابی داده‌های ایزوترم جذب مدل‌های لانگمویر، فروندلیچ و فروندلیچ-لانگمویر مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات جاذب توسط روش‌های مختلفی نظیر طیف‌سنج مادون‌قرمز، میکروسکوپ الکترونی روبشی، سطح مخصوص و بار صفر بستر تعیین شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که بیشترین جذب فلزات سرب و کادمیم توسط جاذب مورد مطالعه در pH بین ۶ تا ۸، زمان تماس ۵ دقیقه و دوز جاذب برابر با ۰/۰۵ گرم است. مدل شبه مرتبه دوم ($R^2=1$) داده‌های سینتیک آزمایشگاهی را بهتر توصیف می‌کند. همچنین معادلات ایزوترم جذب نشان می‌دهد که ایزوترم فروندلیچ-لانگمویر فرایند جذب را بهتر توصیف می‌کند و مطابقت بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی دارد (برای فلز سرب $SEE=4/42$ و $R^2=0/984$ و برای فلز کادمیم $SEE=5/27$ و $R^2=0/969$). حداکثر میزان جذب سرب و کادمیم در آزمایش‌های ناپیوسته ۱۳۷/۸۶ و ۱۱۰/۸۲ میلی‌گرم بر گرم به دست آمد. نتایج به‌دست آمده از تکنیک طیف‌سنج مادون‌قرمز نشان داد که گروه‌های عاملی O-H بر سطح جاذب نانولوله کربن چنددیواره نقش مهمی در جذب فلزات سنگین دارد.

واژه‌های کلیدی: سرب، کادمیم، کارایی جذب سطحی، مدل ایزوترم، مدل سینتیک جذب

ارجاع: امیری م. ج. جمالی ص. و زنگنه ح. ۱۴۰۱. حذف ناپیوسته سرب و کادمیم از محلول‌های آبی با استفاده از نانولوله‌های کربنی چنددیواره. مجله پژوهش آب ایران. ۴۷: ۱۱۵-۱۲۹. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14016.2442>

۱- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا، فسا، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی استهبان.

* نویسنده مسئول: mj_amiri@fasau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۱

مقدمه

توسعه روزافزون جوامع شهری و افزایش فعالیت‌های اقتصادی و صنعتی در سال‌های اخیر سبب تولید و انتشار آلاینده‌های مختلفی در محیط شده که اثرات زیان‌بار آن بر سلامت انسان، موجودات زنده و محیط‌زیست به‌وضوح قابل‌رویت است (دانائی‌فر، ۱۳۹۸؛ خمسه مهابادی و همکاران، ۱۳۹۹؛ یاشیکا و همکاران، ۲۰۲۱؛ گنگ و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین محدودیت منابع آب، کمبود بارندگی، خطر بحران آب در کشور و اهمیت بازیابی مجدد آب از یک‌سو و افزایش آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی از سوی دیگر، یافتن راه‌حل‌های زیست‌محیطی را برای حذف این آلاینده‌ها از منابع آبی ضروری می‌کند (پیری و همکاران، ۱۳۹۸؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ بلحسن، ۲۰۲۱؛ عبدالعطی و همکاران، ۲۰۲۲). در چند دهه اخیر، آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی به انواع فلزات سنگین به‌دلیل توسعه سریع صنایع شیمیایی و پتروشیمی دارای رشد گسترده‌ای بوده است (طیبی و نوایی دیوا، ۱۳۹۷؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۸). اکثر ضایعات شیمیایی حاوی ترکیبات شیمیایی متنوعی هستند که توسط روش‌های متداول تصفیه، به‌سختی حذف شده و بعضاً غیرقابل تصفیه هستند؛ بنابراین از چند دهه قبل، تحقیقات زیادی برای توسعه روش‌های نوین تصفیه برای رفع مشکلات زیست‌محیطی ناشی از این‌گونه ترکیبات شیمیایی انجام‌شده و هدف عمده آن‌ها، شناسایی روش‌های کارآمد و ارزان است. سرب به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین فلزات سنگین شناخته شده است که در طی فعالیت‌های معدن‌کاوی، ساخت باتری‌های اسیدی، آب‌کاری فلزات، صنعت چاپ، صنایع نساجی و صنایع سرامیک و شیشه وارد پساب می‌شود. سرب بر اندام‌های مختلف بدن از قبیل کبد، کلیه، ترکیب خون، سیستم عصبی و دستگاه تناسلی تأثیر می‌گذارد. کادمیم معمولاً در فاضلاب‌های صنعتی به‌ویژه صنایع آبکاری فلزات، باتری‌سازی، کودهای فسفاته، معدن‌کاری، صنایع تولید رنگ، تثبیت‌کننده‌ها و صنایع آلیاژ یافت می‌شود. کادمیم برای سلامتی انسان بسیار مضر است، زیرا شدیداً به کلیه‌ها آسیب می‌رساند و باعث اختلالات کلیوی و آسیب به استخوان می‌شود و همچنین موجب افزایش فشار خون، ناقص‌شدن اسکلت‌بندی، و گرفتگی عضلات می‌شود (استفیج و پیرزینسکا، ۲۰۰۸، برومند جازیه و همکاران،

۲۰۱۴). در این ارتباط، پژوهش‌های مختلفی برای بررسی جذب سرب و کادمیم در ایران و جهان با استفاده از جذب‌های مختلف انجام شده که در ادامه، برخی از این پژوهش‌ها ارائه شده است. پیری و همکاران (۱۳۹۸) از جذب سپیولیت برای حذف سرب و کادمیم استفاده کرده و نشان دادند که افزایش pH در جذب سرب و کادمیم نقش مؤثری داشته و سبب حذف بیشتر آن می‌شود. در پژوهشی از جذب کامپوزیت پلی‌اکریلیک اسید-بنتونیت استفاده شده و نتایج نشان داد که افزایش pH سبب افزایش جذب سرب توسط جذب شده و در pHهای برابر با ۴ و ۶، به‌ترتیب میزان جذب سرب ۸۳/۲۹ و ۱۰۳/۳ میلی‌گرم بر گرم بود (خمسه مهابادی و همکاران، ۱۳۹۹). سلیمی و همکاران (۱۳۹۹) به‌منظور زیست‌پالایی پساب‌های آلوده، از جذب زیستی *Bacillus sp. strain STG-۸۳* برای حذف سرب استفاده کرده و نشان دادند که در pH=4.5 حداکثر ظرفیت جذب سرب توسط جذب ۱۴۹/۶ میلی‌گرم بر گرم بود. نتایج پژوهش محققان نشان داد که حداکثر ظرفیت جذب سرب و کادمیم با استفاده از بیوجار خاکاره صنوبر در pH=5 به‌ترتیب برابر با ۶۲/۶۸ و ۴۹/۳۲ میلی‌گرم در گرم بوده و بهترین ایزوترم برای برآزش داده‌ها ایزوترم لانگمویر بود (چنگ و همکاران، ۲۰۲۱). براساس نتایج مطالعه وصالی ناصح و همکاران (۲۰۲۱)، pH بهینه برای جذب حداکثری سرب از محلول‌های آبی با استفاده از نانولوله‌های کربنی برابر با ۶ تا ۷ بوده است؛ همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که بهترین برآزش نتایج براساس مدل سینتیکی و ایزوترم جذب بر داده‌های تجربی جذب سرب با نانولوله‌های کربنی به‌ترتیب مربوط به شبه مرتبه دوم و لانگمویر بود. ژانگ و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای به بررسی جذب سرب و کادمیم از محلول‌های آبی با استفاده از جذب فسفات آهن اصلاحی ($\text{FePO}_4@\text{pollen}$) پرداخته و نشان دادند که حداکثر ظرفیت جذب سرب و کادمیم در pH=5.92 برابر با ۶۱/۳۵ و ۴/۶۲۳ میلی‌گرم در گرم بوده و مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم و ایزوترم لانگمویر با داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. نتایج پژوهش لی و همکاران (۲۰۲۱) نیز حاکی از تطابق خوب داده‌های تجربی جذب سرب و کادمیم (به‌وسیله جذب NZVI-SH-HMS) با مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم و ایزوترم لانگمویر است.

سلسیوس، ۴۰ دقیقه و ۷ بوده و حداکثر ظرفیت جذب نیز ۶۴۹/۹ میلی‌گرم بر گرم بوده و مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم و ایزوترم لانگمویر بهترین برازش را بر داده‌های تجربی داشتند. در مطالعه‌ای که با هدف بررسی جذب سرب و کادمیم از پساب با استفاده از بیوجار پوست موز اصلاح‌شده با کیتوزان انجام شد، نتایج نشان داد که حداکثر ظرفیت جذب سرب و کادمیم به ترتیب برابر با ۴۶/۹ و ۵۷/۱ میلی‌گرم در گرم است (راموتشانتشا ماخوذا و همکاران، ۲۰۲۲)؛ همچنین این محققان ادعان داشتند که مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم و ایزوترم لانگمویر برازش خوبی بر نتایج تجربی دارد. نتایج پژوهش لیو و همکاران (۲۰۲۲) برای جذب کادمیم و سرب با استفاده از جاذب بیوجار اصلاح‌شده با هیدروکسید دولایه، ظرفیت جذب کادمیم و سرب را به ترتیب ۱۸۱/۵۳ و ۳۶۸/۷۵ میلی‌گرم بر گرم نشان داد. نانولوله‌های کربنی به دلیل داشتن مساحت سطحی و نفوذپذیری زیاد و همچنین پایداری مکانیکی و گرمایی خوب، ظرفیت بسیار زیادی برای جذب آلودگی دارند. این نانولوله‌ها دارای خواص بی‌نظیر مکانیکی-الکتریکی، نوری و حرارتی هستند و در انواع بخش‌ها نظیر مواد ذخیره‌ساز هیدروژن، ابررساناها، حسگرها، صنایع نساجی، مراکز تصویربرداری، افزایش ظرفیت پیل‌های سوختی و ازبین‌بردن تومورهای سرطانی کاربرد دارند. در مطالعات گذشته، نانولوله‌های کربنی چنددیواره به‌طور موفقیت‌آمیز در جذب آلاینده‌های نوظهور مانند کافئین (بهرامی و همکاران، ۲۰۱۷)، علف‌کش توفوردی (امیری و همکاران، ۲۰۱۸) و آنتی‌بیوتیک آزیترومایسین (امیری و همکاران، ۲۰۲۲) به‌کار برده شده است.

از آنجایی‌که ضرورت و اهمیت آب سالم در چرخه زیست‌محیطی براساس منابع علمی ذکر شده و همچنین بحران و تنش آبی موجود در کشور، واقعیتی غیرقابل چشم‌پوشی است، این مهم هدف پژوهش‌های بسیاری از محققان قرار گرفته است؛ از این‌رو، در این پژوهش، هدف اصلی حذف فلزات سنگین سرب و کادمیم موجود در محیط‌های آبی آلوده با بهره‌گیری از جاذب نانولوله‌های کربنی چنددیواره در محیط ناپیوسته بوده است.

محققان در پژوهشی کارایی جذب سرب و کادمیم فاضلاب صنعتی با استفاده از نانولوله کربنی چنددیواره را موردبررسی قرار داده و نشان دادند که حداکثر ظرفیت جذب سرب و کادمیم به ترتیب برابر با ۴۸۱/۰ و ۴۱۵/۸ میلی‌گرم بر گرم و بهترین مدل سینتیکی و ایزوترم برای برازش داده‌ها، مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم و ایزوترم لانگمویر بود (آگوسیا و همکاران، ۲۰۲۲). نتایج پژوهش پلالک و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که راندمان جذب سرب و کادمیم در محلول آبی با استفاده از نانو کامپوزیت خاکستر چوب بلوط مغناطیسی اصلاح‌شده با اکسید گرافن (Ash/GO/Fe3O4) به ترتیب برابر با ۹۹/۷ و ۹۸/۷ درصد بود؛ همچنین نتایج مدل‌سازی سینتیک ایشان نیز نشان داد که مکانیسم فرایند جذب سرب و کادمیم با مدل شبه مرتبه دوم تطابق بالایی (با ضریب تبیین ۹۹/۷ درصد) داشته و داده‌های تعادلی نیز به‌خوبی توسط ایزوترم لانگمویر غیرخطی برازش یافته است (بالاترین ظرفیت جذب سرب و کادمیم به ترتیب برابر با ۴۷/۱۶ و ۴۳/۶۶ میلی‌گرم بر گرم بود). ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) پژوهشی را با هدف بررسی کارایی کامپوزیت جدید CS-PEI-nGT در حذف سرب و کادمیم محلول‌های آبی، انجام دادند که نتایج آن‌ها نشان داد حداکثر ظرفیت جذب سرب و کادمیم به ترتیب برابر با ۱۹۲/۷۸ و ۹۹/۴۶ میلی‌گرم در گرم بود. همچنین مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم و ایزوترم لانگمویر بهترین برازش را بر داده‌های تجربی جذب سرب (با ضریب تبیین ۹۹/۱ درصد) و کادمیم (با ضریب تبیین برابر با ۹۶/۴ درصد) نشان دادند. محققان دیگری برای بررسی جذب کادمیم از پساب صنعتی از جاذب نانومینریم‌اکسید-بنتونیت استفاده کرده و نشان دادند که جذب کادمیم روی نانوکامپوزیت‌ها با افزایش دما، افزایش یافته است (الخطیب و همکاران، ۲۰۲۲)؛ همچنین آن‌ها نشان دادند که تعادل جذب کادمیم و داده‌های سینتیکی به ترتیب با ایزوترم لانگمویر و مدل توانی بهترین برازش را داشته است. حمزه و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای نشان دادند که ظرفیت جذب کادمیم از محلول آبی با نانوذرات کیتوزان مغناطیسی، ۲۰۰ میلی‌گرم بر گرم و راندمان جذب ۹۸ درصد بود. ژو و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی با استفاده از منیزیم اکسید اصلاح‌شده با بیوجار برای جذب کادمیم پساب، نشان دادند که دما، زمان و pH بهینه برابر با ۸۰۰ درجه

مواد و روش‌ها

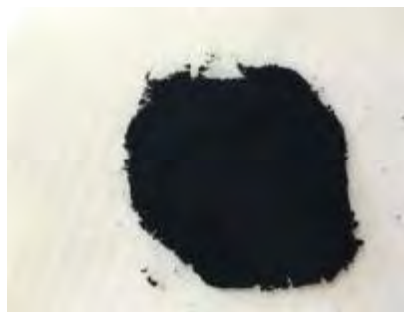
در پژوهش حاضر برای جذب فلزات سنگین سرب و کادمیم از محلول‌های آبی از جاذب نانولوله‌های کربنی چنددیواره استفاده شد و اثر متغیرهای کاربردی از جمله زمان، دما، غلظت اولیه آلودگی، دوز جاذب و pH بر فرایند جذب مورد بررسی قرار گرفت. از روش‌های BET، pH_{ZPC}، FTIR و SEM^۱ برای مشخصه‌یابی جاذب‌ها استفاده شد.

دستگاه و مواد آزمایشی مورد استفاده

مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق (نظیر اسیدکلریدریک HCl، هیدروکسید سدیم NaOH، نیترات کادمیم Cd(NO₃)₂، نیترات سرب Pb(NO₃)₂) و نانولوله‌های کربنی چنددیواره همگی دارای خلوص آزمایشگاهی بوده و از شرکت مرک تهیه شدند (شکل ۱، جدول ۱). در این پژوهش برای تعیین مشخصات بستر جاذب از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM، طیف‌سنجی مادون قرمز FTIR و تخلخل‌سنج با روش BET (برای محاسبه مساحت سطح و متوسط اندازه و حجم منافذ جاذب‌های مورد استفاده توسط جذب نیتروژن) استفاده شد. برای تعیین میزان مواد مورد استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰.۰۱، تعیین مقدار pH بهینه از pH متر، آون، برای هم‌زدن نمونه‌ها به منظور انحلال کامل مواد شیمیایی از شیکر و برای تعیین یون‌های باقی‌مانده در پساب خروجی از دستگاه جذب اتمی استفاده شد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی نانولوله‌های کربن چنددیواره

درصد خلوص	>95 wt%
Ash	<1.5 wt%
SSA	200 m ² /g
چگالی واقعی	2.1 g/cm ³



شکل ۱- تصویر نانولوله‌های کربنی چنددیواره

اندازه‌گیری بار صفر بستر (pH_{ZPC})

۵۰ میلی‌لیتر از محلول نیترات پتاسیم با غلظت ۰/۱ مول بر لیتر در ۱۲ ارلن ۱۰۰ میلی‌لیتری ریخته و pH اولیه آن‌ها به وسیله HCl/NaOH یک مولار، بین ۱ تا ۱۲ تنظیم شد. سپس ۰/۱ گرم از جاذب به هر ارلن اضافه و محلول‌های حاصل با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه روی شیکر برای مدت‌زمان ۲۴ ساعت و دمای ۲۵ درجه سلسیوس به هم زده شد. در ادامه pH نهایی محلول‌ها اندازه‌گیری و اختلاف بین pH ابتدایی و نهایی (pH = ΔpH_{final} - pH_{initial}) در مقابل pH ابتدایی رسم شد. نقطه‌ای که محور افقی را قطع می‌کند، به‌عنوان بار صفر بستر شناخته می‌شود (امیری و همکاران، ۲۰۱۶).

آزمایش‌های جذب ناپیوسته

برای انجام آزمایش‌های ناپیوسته، ابتدا محلول حاوی فلزات در غلظت‌های ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تهیه شد. برای تهیه این محلول‌ها در غلظت‌های ذکر شده ۱ گرم از فلزات با ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر در بالن حل شد تا محلول مادر تهیه شود؛ بنابراین محلول اصلی برای آزمایش‌های موردنظر بعدی آماده شد. محلول‌های موردنظر از رقیق‌سازی محلول مادر تهیه شد. برای آزمایش‌های جذبی، ۰/۱ گرم جاذب به ۵۰ میلی‌لیتر محلول ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر محلول یون موردنظر اضافه و توسط دستگاه همزن با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه به مدت ۲۴ ساعت مخلوط شد. پس از عبور نمونه‌ها از کاغذ صافی واتمن ۴۲، محلول حاوی یون‌های فلزی با استفاده از سانتریفیوژ با دور ۶۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۵ دقیقه از جاذب جدا و میزان یون باقیمانده در محلول‌ها توسط دستگاه جذب اتمی (Perkin Elmer-1100B) قرائت شد. همه آزمایش‌ها با دو بار تکرار و همراه با محلول شاهد (محلول یون موردنظر بدون جاذب) انجام و تغییر غلظت نسبت به شاهد سنجیده شد. آزمایش‌ها در دمای ثابت و در محدوده ۲۵ ± ۲ درجه سلسیوس انجام شد. در نهایت راندمان جذب و مقدار یون جذب‌شده با استفاده از معادلات (۱) و (۲) محاسبه شد.

$$E_a = \frac{C_0 - C_s}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$$q = \frac{C_0 - C_s}{m} \times V \quad (2)$$

تنظیم شد. به منظور تعیین هم‌دماهای جذب ۰/۱ گرم از جذب در سه تکرار در ظروف موردنظر توزین و به هر کدام ۱۰ میلی‌لیتر اضافه شد. محلول‌ها با سرعت ۱۲۰ دور بر دقیقه و زمان ۶۰ دقیقه تکان داده شدند. پس از برداشتن نمونه‌ها از روی شیکر و عبور دادن آن‌ها از کاغذ صافی، غلظت نمونه‌ها توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

بررسی سینتیک جذب سرب و کادمیم

از سینتیک جذب برای تعیین مکانیسم کنترل فرایندهای جذب سطحی استفاده می‌شود. مکانیسم فرایند جذب به خواص فیزیکی و شیمیایی جاذب بستگی دارد. مدل‌های سینتیک جذب به دو گروه مدل‌های بر پایه واکنش و مدل‌های بر پایه نفوذ تقسیم می‌شوند. مدل‌های بر پایه واکنش، شامل مدل‌های شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم و الویچ است و مدل‌های بر پایه نفوذ شامل مدل‌های نفوذ درون‌ذره‌ای، نفوذ غشای خارجی و نفوذ درون‌حفره‌ای است. در این مطالعه به منظور بررسی رفتار سینتیکی و مکانیسم جذب سرب و کادمیم به وسیله جاذب نانولوله‌های کربنی چنددیواره از مدل‌های سینتیکی شبه مرتبه اول و دوم استفاده شد (معادله (۳) و (۴)؛ کمالی و همکاران، ۱۴۰۱).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

که در معادله (۳)، q_e مقدار سرب و/یا کادمیم جذب شده در حالت تعادل به‌ازای هر گرم جاذب (mg/g)، q_t مقدار یون فلز جذب شده در زمان t (mg/g)، k ثابت نرخ جذب (1/min) و t زمان (min) است. نمودار مقادیر $\ln(q_e - q_t)$ در مقابل t رابطه‌ای خطی را ارائه می‌دهد که k_1 و q_e به ترتیب از شیب خط و عرض از مبدأ این معادله محاسبه می‌شود. در رابطه ۴، k_2 و t به ترتیب بیانگر ثابت تعادل سینتیک شبه درجه دوم (g/mg.min) و زمان (min) است. در رابطه ۴، از شیب و عرض از مبدأ نمودار t/q_t در مقابل t ، به ترتیب متغیرهای q_e و k_2 محاسبه می‌شوند (ارشدی و همکاران، ۲۰۱۴؛ ظلی‌پوری آبادی و همکاران، ۱۳۹۹). در این پژوهش از ایزوترم‌های لانگمویر، فروندلیچ و لانگمویر-فروندلیچ استفاده شده است (معادلات (۵) تا (۷)).

که در آن E_a راندمان جذب، q مقدار یون جذب شده، C_0 غلظت اولیه یون موردنظر در محلول برحسب میلی‌گرم بر لیتر، C_s غلظت ثانویه یون فلز در محلول برحسب میلی‌گرم بر لیتر، m دوز جاذب برحسب گرم و V حجم محلول برحسب لیتر است.

تعیین pH، زمان تعادل بهینه جذب و تعیین مقدار و دمای بهینه جاذب

به منظور تعیین pH بهینه برای حذف فلزات سرب و کادمیم با غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، از pHهای ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ استفاده شد. سپس مقدار ۰/۰۵ گرم جاذب به محلول‌ها افزوده و ارلن‌های مربوط روی شیکر با دور اختلاط ۱۲۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۲۰ دقیقه قرار داده شد. پس از اتمام اختلاط، نمونه‌ها از کاغذ صافی عبور داده شده و محلول حاوی یون‌های فلزی با استفاده از سانتیفریوژ با دور ۶۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۵ دقیقه از جاذب جدا و در نهایت غلظت نمونه‌های حاصل از آزمایش با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Perkin Elmer-1100B) اندازه‌گیری شد. برای تعیین زمان تعادل بهینه، نمونه روی شیکر در زمان‌های ۵، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۱۲۰ دقیقه قرار داده شد و پس از اتمام اختلاط، نمونه‌ها آنالیز شدند. پس از تعیین زمان تعادل و مقدار pH بهینه جذب، برای تعیین دوز بهینه جاذب به منظور حذف فلزات سرب و کادمیم از محلول‌های با غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر از مقادیر مختلف جاذب (۰/۰۱، ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱ و ۰/۱ گرم) استفاده شد. پس از گذشت ۱۲۰ دقیقه که محلول‌ها روی شیکر با دور اختلاط ۱۲۰ دور بر دقیقه قرار گرفت، نمونه‌ها از کاغذ صافی عبور داده شد و محلول حاوی یون‌های فلزی با استفاده از سانتیفریوژ با دور ۶۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۵ دقیقه از جاذب جدا و در نهایت غلظت نمونه‌های حاصل از آزمایش با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Perkin Elmer-1100B) اندازه‌گیری شد. همه آزمایشات سه بار تکرار و میانگین نتایج گزارش شد. منحنی کالیبراسیون دستگاه با استفاده از رابطه بین عدد جذب دستگاه و غلظت‌های مختلف فلزات که در آزمایشگاه تعیین شده بود، به دست آمد. نتایج نشان داد که رابطه فوق خطی و با ضریب تبیین ۰/۹۹۸ است. آزمایش‌های هم‌دما در دو دمای مختلف (۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس) انجام شد. دما توسط دستگاه شیکر انکوباتور

نانولوله‌ها با وضوح کامل قبل از جذب مشاهده می‌شوند، اما بعد از جذب همان‌گونه که در شکل ۲-ب دیده می‌شود، سطح کدر شده است که نشان‌دهنده جذب یک لایه نازک از فلزات روی سطح نانولوله‌ها است؛ با این حال تغییری در مورفولوژی نانولوله‌های کربن ایجاد نشده است.

سطح مخصوص جاذب نانولوله‌های کربنی چنددیواره ۲۰۰ مترمربع بر گرم به‌دست آمد که عدد قابل توجهی است. متوسط قطر منافذ جاذب ۷/۲ نانومتر است که برای جذب فلزات سنگین مناسب است. حجم منافذ جاذب ۰/۳۴۸ سانتی‌متر مکعب بر گرم به‌دست آمد که توانایی استفاده از آن را در تصفیه آب نشان می‌دهد. به‌منظور تعیین گروه‌های عاملی موجود در هر جاذب، از دستگاه FTIR استفاده شد. از آنجاکه هر پیوند در یک فرکانس خاص به ارتعاش درمی‌آید، با توجه به فرکانس ارتعاشی می‌توان به نوع پیوند و گروه‌های عاملی موجود در یک ترکیب پی برد (امیری و همکاران، ۲۰۱۳). شکل ۳، طیف IR نانولوله‌های کربن چنددیواره را قبل و بعد از جذب فلزات نشان می‌دهد. همان‌طور که از طیف IR قبل از جذب مشخص است، هیچ‌گونه پیک واضحی مشاهده نمی‌شود و این نشان‌دهنده خالص بودن نانولوله‌های کربن است. طیف IR بعد از جذب دارای چند پیک است. پیک بسیار تیز به‌وجودآمده در عدد موج ۱۸۰۰-۱۳۰۰ مربوط به پیوند کششی C=O گروه کربونیل است. این پیک به‌وضوح جذب فلزات را روی سطح CNTs مطابق با طیف IR نشان می‌دهد. پیک وسیع در عدد موج ۳۴۰۰-۳۵۰۰ مربوط به پیوند کششی O-H و پیوند کششی N-H در گروه آمین است. پیک ضعیف در عدد موج ۲۸۰۰-۳۰۰۰ مربوط به پیوند کششی C-O در کربوکسیلیک اسید و پیوند کششی C-H در آلکیل است. این دو پیک نشان‌دهنده واکنش‌های شیمیایی جزئی است که بین فلزات و سطح CNTs به‌وجود آمده است و پیک ایجادشده در عدد موج ۱۳۸۶ مربوط به پیوند آروماتیک C-H است. بعد از جذب فلزات، پیک گروه هیدروکسیل بسیار پهن‌تر و وسیع‌تر شده که نشان‌دهنده ایجاد گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار روی سطح جاذب است. این امر موجب افزایش خصوصیات آبدوست سطح جاذب بوده و به‌عنوان عامل جذب‌کننده فلزات عمل می‌کند (امیری و همکاران، ۲۰۲۲).

$$q_e = \frac{q_m k_1 c_e}{1 + k_1 c_e} \quad (5)$$

$$q_e = k_f c_e^n \quad (6)$$

$$q_e = \frac{b q_m c_e^{\frac{1}{n}}}{(1 + b c_e^{\frac{1}{n}})} \quad (7)$$

در مدل لانگمویر q_m حداکثر ظرفیت جذب تعادلی برای تکمیل یک لایه (mg/g) و k_1 ثابت وابسته به انرژی جذب، و نشان‌دهنده آنتالپی فرایند جذب است. k_f نمایه‌ای برای توصیف انرژی پیوندی جذب سطحی است. در مدل فروندلیچ k_f و n ضرایبی هستند که به‌ترتیب به ظرفیت جذب و شدت جذب جاذب نسبت داده می‌شوند. در مدل لانگمویر-فروندلیچ، b ثابت تعادلی جذب و $1/n$ توان و شاخصی از ناهمگنی است (ظلی‌بوری آبادی و همکاران، ۱۳۹۹).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پس از انجام آزمایش‌های ناپیوسته و پیوسته، داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار Excel بررسی شدند. مدل‌های سینتیک جذب (مدل‌های شبه مرتبه اول و دوم) و ایزوترم‌های جذب (ایزوترم‌های فروندلیچ، لانگمویر، فروندلیچ-لانگمویر) با استفاده از نرم‌افزار Minitab بر داده‌ها برازش داده شد و از بین آن‌ها یک مدل انتخاب و معرفی شد. به‌منظور ارزیابی مدل‌های ایزوترم، از معیار میزان خطای استاندارد تخمین (standard error of estimate) که توسط معادله (۸) تعیین گردید، استفاده شد.

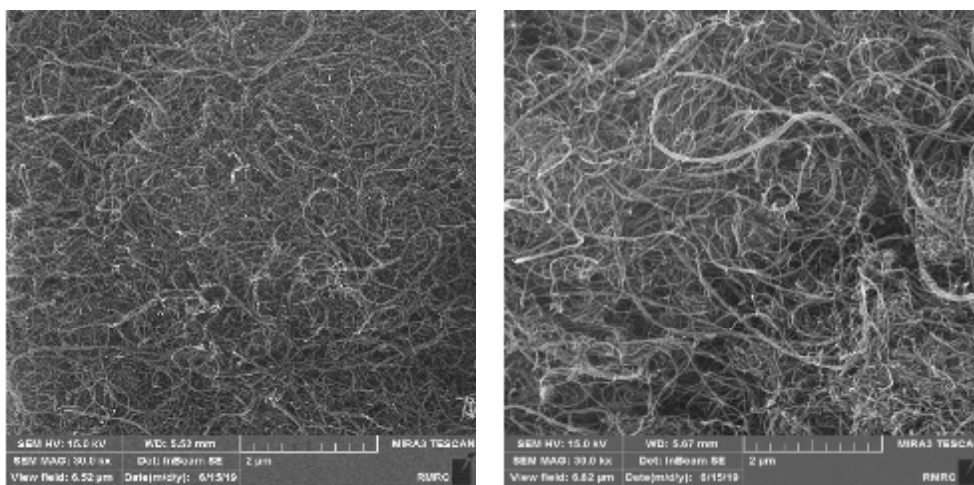
$$SEE = 1 - \left(\frac{\sum_i^n (q_e - q_p)^2}{n - 2} \right) \quad (8)$$

در این معادله q_e و q_p به‌ترتیب میزان فلز اندازه‌گیری‌شده و تخمین‌زده‌شده جذب‌شده روی سطح جاذب و n تعداد مشاهدات است.

نتایج و بحث

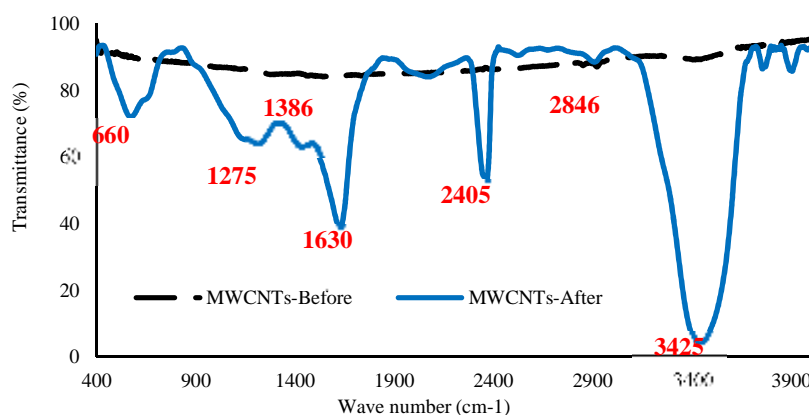
مشخصات بستر جاذب

مورفولوژی سطح و بافت نانولوله‌های کربن در تصویر SEM با بزرگنمایی ۲ میکرون در شکل ۲، ارائه شده است. قطر نانولوله‌ها در محدوده ۲۰-۱۰ نانومتر و طول آن‌ها تقریباً ۳۰ میکرومتر است. در این شکل ساختار بسیار متخلخل نانولوله‌ها، قابل مشاهده است. در شکل ۲-الف،



الف ب

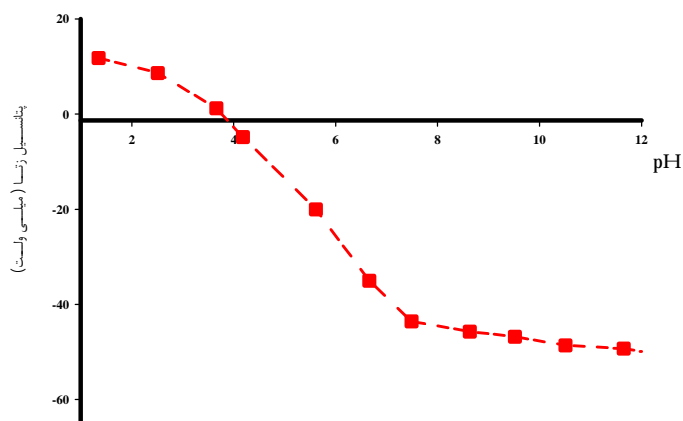
شکل ۲- تصویر SEM از جاذب قبل (الف) و بعد (ب) از جذب با بزرگنمایی دو میکرون



شکل ۳- طیف مادون قرمز نانولوله‌های کربن چنددیواره قبل و پس از جذب

۳/۸۲ محلول، منفی است. تعیین pH محلول نه‌تنها گونه غالب در محلول، بلکه بار خالص روی مواد کربنی را نیز تعیین می‌کند. این ویژگی توسط آیرانسی و همکاران (۲۰۰۵) درباره اسید فتالیک و جذب استرهای آن روی کربن فعال مورد مطالعه قرار گرفت. پژوهشی به‌منظور روشن‌شدن مکانیسم جذب بسیاری از مولکول‌ها روی جاذب‌های مختلف انجام شده است که نشان می‌دهد جذب مولکول‌های آلی از محلول‌های آبی رقیق روی مواد کربنی، به روابط پیچیده میان فعل و انفعالات الکترواستاتیک و غیرالکترواستاتیک مربوط به ویژگی‌های جاذب و جذب‌شونده و همچنین خواص محلول شیمیایی بستگی دارد (مورونو-کاستیا، ۲۰۰۴). با توجه به اینکه بار بستر در بیشتر pH‌های مورد مطالعه منفی و بار فلزات مثبت است، می‌توان بیان کرد که نیروی جذب الکترواستاتیک مکانیسم مؤثری در جذب فلزات است.

به‌طور کلی سطح یک جاذب دارای ترکیبی از مکان‌های مثبت و خنثی روی طرف اسیدی $pZPC$ و ترکیبی از مکان‌های منفی و خنثی روی طرف بازی است. وابستگی جذب به pH می‌تواند به دلیل هر دو عامل غیرالکترواستاتیک و الکترواستاتیک باشد. درباره جذب آلاینده‌های آلی بر نانولوله‌های کربنی چنددیواره عمدتاً یک تعامل غیرالکترواستاتیک شامل پیوند هیدروژنی نقش دارد. برای فهم بهتر از بار خالص، از سطح جاذب در pH‌های مختلف محلول، نقطه صفر بار (pH_{ZPC}) جاذب اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از تعیین pH_{ZPC} در شکل ۴، نشان داده شده است. بار بستر صفر در pH تعریف شده است که در آن کل بار بستر صفر می‌شود. برآورد pH_{ZPC} جاذب در حدود ۳/۸۲ نشان می‌دهد که بار سطحی جاذب در pH بیش از



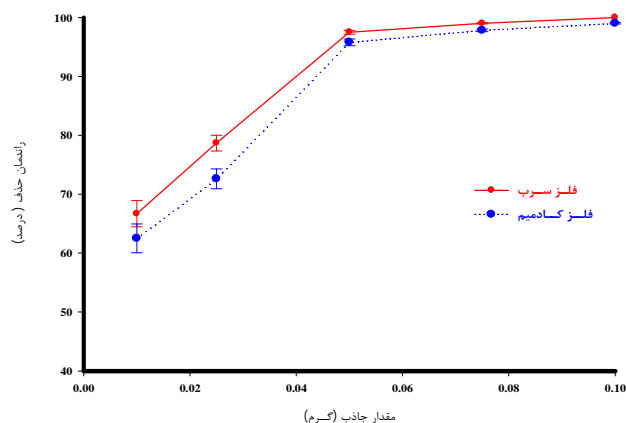
شکل ۴- بار سطحی جاذب در pHهای مختلف

یونی گروه‌های عاملی و همچنین خاصیت شیمیایی فلز در محلول بستگی دارد. همان‌طور که در قسمت‌های قبل اشاره شد، راندمان جذب فلزات در محدوده اسیدیته ۲ تا ۱۲ مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۶، نشان داده شده است. مطابق این شکل، میزان حذف فلزات با افزایش pH از ۲ تا ۶ افزایش یافت و از اسیدیته ۶ به بعد روند افزایشی شیب بسیار ملایمی داشت. با توجه به اینکه در محیط‌های شدیداً اسیدی غلظت پروتون‌ها بسیار بالاست، رقابت بین این یون‌ها و یون‌های فلزی برای اشغال سایت‌های فعال موجود روی جاذب، می‌تواند منجر به کاهش راندمان جذب شود. در pHهای بالاتر به دلیل کاهش رقابت بین پروتون و یون‌های فلزی از طریق کم‌شدن غلظت پروتون و در نتیجه کاهش دافعه بین سطح جاذب و این یون‌ها، راندمان جذب افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر بار مثبت سطح جاذب در این pH، موجب دفع یون فلزی و در نتیجه کاهش ظرفیت جذب فلزات می‌شود. با توجه به شکل ۶، بیشترین میزان حذف فلزات در محدوده اسیدیته ۶ تا ۸ رخ داده است که این مورد به دلیل عدم رقابت بین فلزات سرب و کادمیم و H^+ موجود در محلول به منظور تصاحب سایت‌های جاذب است. این محدوده، pH بهینه آزمایش است. بعد از اسیدیته ۶ فلزات سرب و کادمیم به صورت $Pb(OH)_2$ و $Cd(OH)_2$ رسوب می‌کنند که مقداری از حذف آن‌ها به دلیل رسوب فلزات است؛ بنابراین در ادامه آزمایش‌ها $pH = 6$ به عنوان نقطه بهینه انتخاب شد.

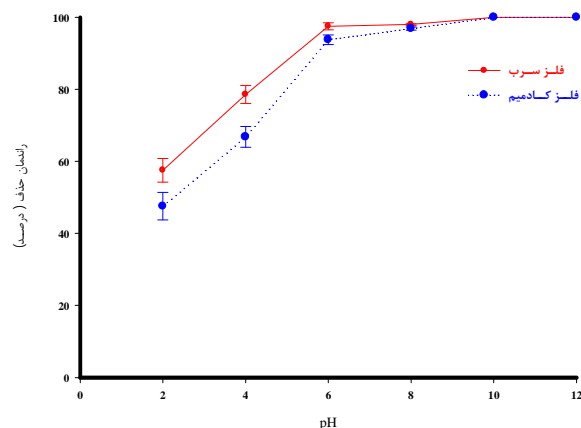
اثر متغیرهای کاربردی بر میزان جذب فلزات سنگین سرب و کادمیم

با توجه به اینکه عوامل مختلفی مانند زمان تماس جاذب با محلول فلزی، pH محلول، غلظت اولیه آلاینده، دوز جاذب و دما در جذب فلزات توسط جاذب نانولوله کربنی چنددیواره تأثیرگذار هستند، اثر تغییرات هر یک از این عوامل بر میزان حذف سرب و کادمیم از محلول مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۵، تغییرات راندمان جذب را با افزایش دوز جاذب نانولوله کربن چنددیواره نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، با افزایش دوز جاذب نانولوله کربن چنددیواره از ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ گرم، راندمان جذب برای سرب از ۶۶/۶۸ تا ۹۷/۵ درصد و برای کادمیم از ۶۲/۵ تا ۹۵/۷۸ درصد افزایش یافته است. دلیل افزایش شدید راندمان جذب با افزایش دوز جاذب، افزایش سطح ویژه و مکان‌های جذب بیشتر بوده است (امیری و همکاران، ۲۰۱۳؛ امیری و همکاران، ۲۰۱۶). با افزایش دوز جاذب از ۰/۰۵ تا ۰/۱ گرم، راندمان جذب سرب و کادمیم با یک شیب بسیار ملایم افزایش یافت؛ به گونه‌ای که از ۹۷/۵ تا ۱۰۰ درصد و از ۹۵/۷۸ تا ۹۹ درصد تغییر کرد. افزایش ناچیز راندمان جذب پس از دوز ۰/۰۵ گرم جاذب احتمالاً به دلیل رسیدن به ظرفیت تعادلی جذب در مقادیر بیشتر است (امیری و همکاران، ۲۰۱۳؛ امیری و همکاران، ۲۰۱۶)؛ بنابراین ۰/۰۵ گرم دوز جاذب به عنوان جرم بهینه انتخاب شد.

یکی از مهم‌ترین متغیرها در فرایند جذب متغیر pH است. وابستگی جذب فلزات به pH تا حد زیادی به نوع و حالت



شکل ۵- راندمان جذب سرب و کادمیم در مقادیر مختلف جاذب نانولوله کربنی چنددیواره (دما: 25 ± 2 درجه سلسیوس، غلظت آلاینده: 10 mg L^{-1} ، pH: بدون کنترل، زمان تماس: ۱۲۰ دقیقه)



شکل ۶- راندمان جذب فلزات سرب و کادمیم به صورت تابعی از pH (دما: 25 ± 2 درجه سلسیوس، غلظت آلاینده: 10 mg L^{-1} ، دوز جاذب: 0.5 gr ، زمان تماس: ۱۲۰ دقیقه)

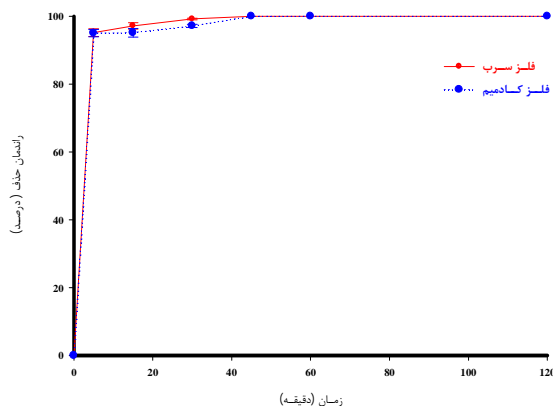
شکل ۷، تغییرات راندمان و میزان جذب فلزات سرب و کادمیم را برای جاذب نانولوله کربن چنددیواره در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، فرایند جذب به دو بازه زمانی تقسیم می‌شود. در ابتدای تماس جاذب با محلول فلزی سرعت جذب بالاست که این امر را می‌توان به فراوانی سایت‌های فعال در ابتدای فرایند نسبت داد. با گذشت زمان و پر شدن سایت‌های جذبی موجود روی جاذب، این فرایند کندتر می‌شود و در نهایت تقریباً به مقدار ثابتی میل می‌کند؛ به طوری که گذشت بیشتر زمان تأثیر چندانی روی بالارفتن جذب ندارد (امیری و همکاران، ۲۰۱۳؛

امیری و همکاران، ۲۰۱۶). سرعت جذب در مراحل ابتدایی بسیار سریع بوده و مقدار جذب بعد از ۵ دقیقه به حداکثر مقدار خود می‌رسد و پس از آن تغییر چندانی نمی‌کند؛ بنابراین زمان ۵ دقیقه به عنوان زمان بهینه در نظر گرفته می‌شود. غلظت اولیه محلول فلزی عاملی تأثیرگذار در راندمان حذف از محلول توسط جاذب است. شکل ۸، تغییرات راندمان حذف فلزات سرب و کادمیم را به صورت تابعی از غلظت اولیه محلول نشان می‌دهد. مکانیسم جذب فلزات سنگین سرب و کادمیم در غلظت‌های کم و زیاد تا حدودی باهم متفاوت است. در غلظت‌های کم سایت‌های خاصی مسئولیت جذب فلزات را برعهده دارند که در غلظت‌های زیاد این سایت‌ها اشباع می‌شوند (ارشدی و همکاران، ۲۰۱۴). همان‌طور که شکل ۸ نشان می‌دهد، راندمان حذف فلزات با افزایش غلظت اولیه محلول کاهش

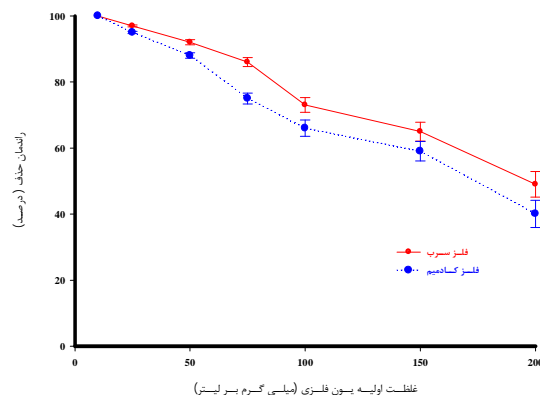
می‌کند؛ بنابراین زمان ۵ دقیقه به عنوان زمان بهینه در نظر گرفته می‌شود. غلظت اولیه محلول فلزی عاملی تأثیرگذار در راندمان حذف از محلول توسط جاذب است. شکل ۸، تغییرات راندمان حذف فلزات سرب و کادمیم را به صورت تابعی از غلظت اولیه محلول نشان می‌دهد. مکانیسم جذب فلزات سنگین سرب و کادمیم در غلظت‌های کم و زیاد تا حدودی باهم متفاوت است. در غلظت‌های کم سایت‌های خاصی مسئولیت جذب فلزات را برعهده دارند که در غلظت‌های زیاد این سایت‌ها اشباع می‌شوند (ارشدی و همکاران، ۲۰۱۴). همان‌طور که شکل ۸ نشان می‌دهد، راندمان حذف فلزات با افزایش غلظت اولیه محلول کاهش

مقدار جذب یا q ، اما چون نسبت جاذب به محلول ثابت است، به دلیل اشباع‌بودن مکان‌های جذبی توسط ماده جذب‌شونده، راندمان جذب کاهش یافته است (آرشدی و همکاران، ۲۰۱۴)؛ بنابراین به دلیل ثابت‌بودن مقدار جاذب (0.5 گرم) درصد جذب با افزایش غلظت فلزی، کاهش یافته است.

می‌یابد، به‌گونه‌ای که بالاترین کارایی حذف فلزات فوق در غلظت 10 mgL^{-1} (با راندمان حذف ۱۰۰ درصد) مشاهده شد. در غلظت‌های کم، سطح ویژه و مکان‌های جذب جاذب بالا بوده و فلزات سنگین سرب و کادمیم قادر به برهم‌کنش با موقعیت‌های جذب موجود بر سطح جاذب هستند؛ بنابراین راندمان جذب بیشتر است. با افزایش غلظت اولیه، هرچند مقدار وزنی جذب بالا رفته (منظور



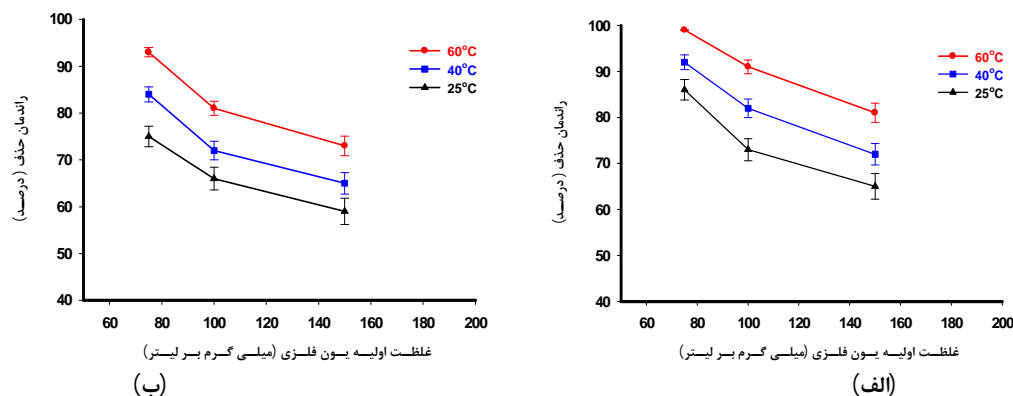
شکل ۷- راندمان جذب فلزات سرب و کادمیم به صورت تابعی از زمان (دما: 25 ± 2 درجه سلسیوس، غلظت آلاینده: 10 mg L^{-1} ، دوز جاذب: 0.5 gr ، $\text{pH}=6$)



شکل ۸- راندمان جذب فلزات سرب و کادمیم به صورت تابعی از غلظت اولیه محلول حاوی فلزات (دما: 25 ± 2 درجه سلسیوس، زمان تماس: ۵ دقیقه، دوز جاذب: 0.5 gr ، $\text{pH}=6$)

بالا مربوط دانست. این اثر همچنین به دلیل افزایش تحرک یون‌های فلز از توده محلول به سمت سطح جاذب و افزایش نفوذ به داخل جاذب نسبت داده می‌شود. افزایش دما نه تنها باعث پخشیدگی یون‌های فلزی موجود در توده محلول به سمت جاذب‌ها می‌شود، بلکه افزایش سرعت تشکیل کمپلکس فلزات با گروه‌های عامل سطح جاذب‌ها را نیز به دنبال دارد.

شکل ۹، تغییرات میزان جذب سرب و کادمیم را با افزایش درجه حرارت از ۲۰ به ۶۰ درجه سلسیوس برای جاذب نانولوله کربن چنددیواره نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌ها، با افزایش میزان دما از ۲۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، میزان جذب سرب و کادمیم توسط جاذب نانومتری افزایش یافته است. افزایش جذب فلزات ناشی از ازدیاد دما را می‌توان به در دسترس‌بودن بیشتر مکان‌های فعال جاذب، توسعه اندازه خلل و فرج یا فعال‌سازی سطح جاذب در دماهای



شکل ۹- میزان راندمان جذب فلزات سرب (الف) و کادمیم (ب) به صورت تابعی از دما و غلظت اولیه آلاینده

توصیف و پیش‌بینی میزان جذب به کار می‌روند (امیری و همکاران، ۲۰۱۳؛ ارشدی و همکاران، ۲۰۱۴؛ امیری و همکاران، ۲۰۱۶). در این تحقیق داده‌های به دست آمده از جذب سرب و کادمیم توسط جاذب نانولوله کربن چنددیواره به معادلات فروندلیچ، لانگمویر و لانگمویر-فروندلیچ برازش داده شد. ثابت‌های تخمین زده شده برای هر مدل و فاکتورهای آماری R^2 و SEE در جدول ۳، نشان داد که هر سه مدل به طور کلی قادر به توصیف داده‌های آزمایشگاهی جذب سرب و کادمیم توسط جاذب نانولوله کربن چنددیواره هستند. شکل ۱۱ مقایسه بین داده‌های تعادل مشاهده شده و تخمین زده شده را برای فلزات سرب و کادمیم نشان می‌دهد.

مقایسه مقادیر SEE و R^2 در بین مدل‌های مختلف نشان می‌دهد که مدل فروندلیچ-لانگمویر در برآورد مقادیر سرب و کادمیم توسط جاذب نانولوله کربن چنددیواره از عملکرد بهتری نسبت به ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیچ برخوردار است. مقدار R^2 در مدل فروندلیچ-لانگمویر برای جذب یون‌های سرب و کادمیم به ترتیب ۰/۹۸۴ و ۰/۹۶۹ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت مدل فوق است. به طور مشابه خطای SEE برای مدل فروندلیچ-لانگمویر برای جذب یون‌های سرب و کادمیم به ترتیب ۴/۴۲ و ۵/۲۷ به دست آمد که نسبت به مدل‌های دیگر بسیار کمتر است. متغیری که در هر دو مدل لانگمویر و لانگمویر-فروندلیچ به کار گرفته شده q_m است که نشان‌دهنده حداکثر ظرفیت جذب است (ارشدی و همکاران، ۲۰۱۴). میزان q_m تخمین زده شده به وسیله مدل فروندلیچ-لانگمویر در جذب سرب و کادمیم توسط جاذب نانولوله کربن چنددیواره به ترتیب

برازش مدل‌های سینتیک جذب

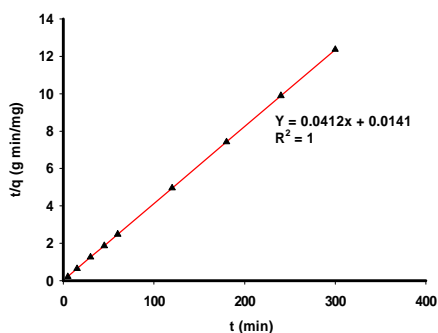
برای انجام آزمایش‌های سینتیک جذب، ۰/۰۵ گرم جاذب به ۵۰ میلی‌لیتر محلول ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر فلز سرب و کادمیم اضافه و در زمان‌های ۵، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰ و ۳۰۰ دقیقه فیلتر شد. سپس غلظت فلز باقیمانده در محلول توسط جذب اتمی قرائت شد. جدول ۲، نتایج حاصل از آزمایش‌های جذب سینتیک سرب و کادمیم را توسط جاذب‌های نانولوله کربن چنددیواره نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲، مدل شبه مرتبه دوم با R^2 بزرگ‌تر ($R^2=1$)، برای هر دو فلز سنگین مورد آزمایش برازش بهتری بر داده‌های آزمایشگاهی داشته است. مدل شبه مرتبه دوم مقدار سرب و کادمیم جذب شده توسط جاذب نانولوله کربن چنددیواره را به ترتیب $24/27 \text{ mg g}^{-1}$ و $23/8 \text{ mg g}^{-1}$ محاسبه کرد که تطابق بسیار خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد. نتایج مشابه توسط دیگر محققان گزارش شده است (ارشدی و همکاران، ۲۰۱۴؛ ارشدی و همکاران، ۲۰۱۶). نتایج حاصل از سینتیک شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم برای فلزات سرب (شکل الف و ج) و کادمیم (شکل ب و د) در شکل ۱۰، ارائه شده است. برازش کامل مدل شبه مرتبه دوم توسط جاذب نانولوله کربن چنددیواره نشان می‌دهد که جذب فلزات توسط این جاذب به صورت شیمیایی صورت می‌گیرد.

برازش مدل‌های ایزوترم جذب

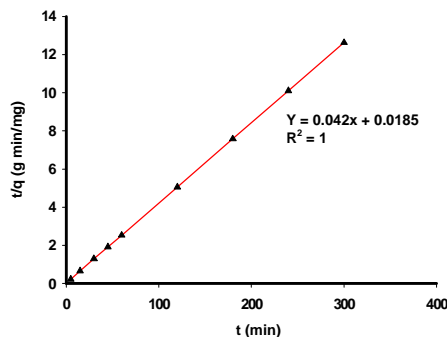
ایزوترم‌های جذب، معادلات ریاضی هستند که رابطه بین یک یون در فاز جامد و غلظت آن در محلول تعادلی را در دمای ثابت نشان می‌دهند و به عنوان ابزارهایی برای

کادمیم 0.23 نانومتر و شعاع هیدراته فلز سرب 0.265 نانومتر است) (ارشدی و همکاران، ۲۰۱۱). مقدار $1/n$ در مدل فروندلیچ-لانگمویر برای هر دو فلز است کمتر از یک و نشان‌دهنده جذب مطلوب هر دو فلز توسط نانولوله کربن چنددیواره است.

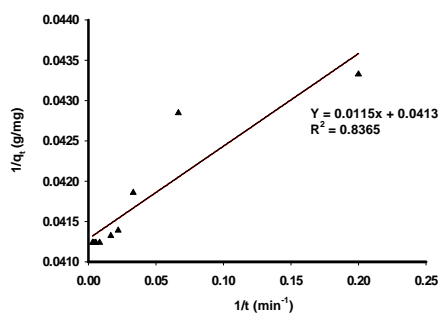
برابر با $137/86 \text{ mg g}^{-1}$ و $110/82 \text{ mg g}^{-1}$ است که با نتایج حاصل از آزمایشگاه تطابق نزدیکی دارد. از طرفی میزان جذب فلز سنگین سرب بیشتر از میزان جذب فلز کادمیم است که این به دلیل شعاع هیدراته کمتر فلز کادمیم در مقایسه با فلز سرب است (شعاع هیدراته فلز



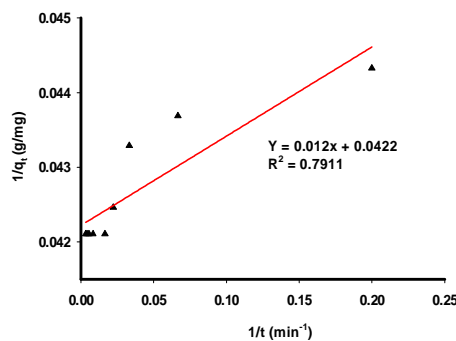
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

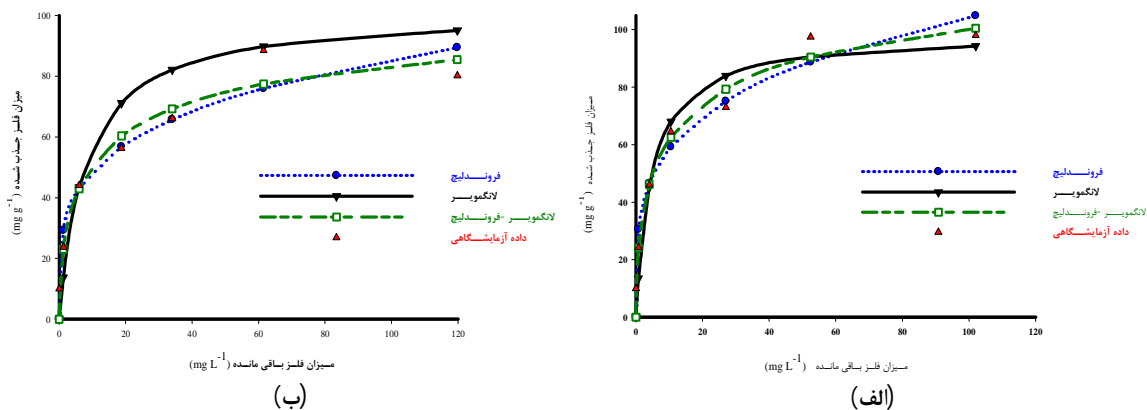
شکل ۱۰- برازش مدل سینتیکی شبه مرتبه اول روی داده‌های اندازه‌گیری شده فلزات سرب (الف) و کادمیم (ب) و مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم روی فلزات سرب (ج) و کادمیم (د)

جدول ۲- ثابت‌ها، ضرایب تبیین و خطاهای استاندارد مدل‌های سینتیک جذب

مدل سینتیک جذب						آلاینده
شبه مرتبه دوم			شبه مرتبه اول			
R^2	$q_e (\text{mg g}^{-1})$	$K_2 (\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1})$	R^2	$q_e (\text{mg g}^{-1})$	$K_1 (\text{min}^{-1})$	
۱	۲۴/۲۷۰	۰/۰۱۲	۰/۸۳۶	۲۴/۲۱۰	۰/۲۷۸	سرب
۱	۲۳/۸۰۰	۰/۰۹۵	۰/۷۹۱	۲۳/۶۹۰	۰/۲۸۴	کادمیم

جدول ۳- نتایج حاصل از برازش مدل‌های ایزوترم بر جذب سرب و کادمیم

مدل ایزوترم													آلاینده
لانگمویر-فروندلیچ						لانگمویر			فروندلیچ				
SEE	R^2	$1/n$	b	q_m	SEE	R^2	b (L mg^{-1})	$q_m (\text{mg g}^{-1})$	SEE	R^2	$1/n$	K_f	
۴/۴۲۰	۰/۹۸۴	۰/۵۱۶	۰/۲۴۶	۱۳۷/۸۶۰	۵/۶۲۰	۰/۹۷۴	۰/۲۱۱	۹۸/۶۶۰	۴/۷۶۰	۰/۹۸۱	۰/۲۵۱	۳۲/۸۲۰	سرب
۵/۲۷۰	۰/۹۶۹	۰/۵۵۸	۰/۲۳۲	۱۱۰/۸۲۰	۵/۶۳۰	۰/۹۶۴	۰/۱۷۶	۸۴/۳۴۰	۵/۳۶۰	۰/۹۶۷	۰/۲۴۵	۲۷/۷۰۰	کادمیم



شکل ۱۱- مقایسه بین داده‌های ایزوترم مشاهده شده و تخمین زده شده برای فلزات سرب (الف) و کادمیم (ب)

نشان‌دهنده واکنش‌پذیری سریع جاذب با آلاینده و به‌منزله مشخصه اقتصادی آن برای توسعه تکنولوژی نانولوله کربن چنددیواره برای تصفیه آب است. مقایسه مقادیر SEE و R^2 در بین مدل‌های مختلف نشان داد که مدل فروندلیج-لانگمویر در برآورد مقادیر سرب و کادمیم توسط جاذب نانولوله کربن چنددیواره از عملکرد بهتری نسبت به ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیج برخوردار است. مطالعات سینتیک نشان داد که مدل شبه مرتبه دوم نسبت به مدل شبه مرتبه اول از عملکرد بهتری برخوردار است. حداکثر میزان جذب سرب و کادمیم توسط جاذب به ترتیب $۱۳۷/۸۶$ و $۱۱۰/۸۲$ میلی‌گرم بر گرم به دست آمد.

منابع

۱. پیری م. سپهر ا. صمدی ع. فرهادی خ. و علیزاده خالدآباد م. ۱۳۹۸. مدل‌سازی جذب کادمیم و سرب توسط سپیولیت با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM). آب و خاک. ۳۳(۶): ۸۳۳-۸۴۴.
۲. خمسه مهابادی م. شیروانی م. و صدقی م. ۱۳۹۹. توانایی کمپوزیت پلی‌اکریلیک اسید- بنتونیت در حذف سرب از محلول‌های آبی در شرایط بسته و ستون. علوم آب و خاک. ۲۴(۱): ۱۲-۱.
۳. دانائی فر ا. ۱۳۹۸. بررسی رابطه آلودگی هوا با رشد اقتصادی بر مبنای فرضیه منحنی زیست‌محیطی کوزنتس (مطالعه موردی: کشورهای آسیایی). انسان و محیط‌زیست. ۱۷(۴): ۱۲-۱.

نتیجه‌گیری

یکی از منابع آلوده‌کننده آب فلزات سرب و کادمیم و مشتقات آن است. در این میان جاذب‌های نانومتری نظیر نانولوله کربن چنددیواره به‌عنوان راهکاری نوین و نویدبخش در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش از جاذب نانولوله کربن چنددیواره برای حذف فلزات سرب و کادمیم در محیط ناپیوسته استفاده شد. با توجه به آنالیز SEM مشخص شد که قطر نانولوله‌ها در محدوده ۲۰-۱۰ نانومتر و طول آن‌ها تقریباً ۳۰ میکرومتر است. آنالیز FTIR جاذب بعد از جذب نشان‌دهنده تغییر وسیع در گروه‌های عاملی بود که نشان‌دهنده حضور فلزات در ساختار آن است. آنالیز BET نشان داد که سطح ویژه و حجم منافذ جاذب نانولوله کربن چنددیواره قابل توجه و به ترتیب برابر با $۲۰۰ \text{ m}^2/\text{g}$ و $۰/۳۴۸ \text{ cm}^3/\text{g}$ است. این موضوع توانایی جذب بالای نانولوله کربن چند دیواره را به‌خوبی توجیه می‌کند. دوز جاذب $۰/۰۵$ گرم به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. بررسی‌ها نشان داد که اسیدیته بین ۶ تا ۸ بهینه‌ترین محدوده برای جذب فلزات است. در pH پایین به‌دلیل رقابت بین H^+ و یون فلزی بر سر تصاحب سایت‌های جذب نسبت به ناحیه خنثی، جذب کمتر است و در pH بالاتر از ۸، یون فلزی رسوب کرده و عملاً جزو محدوده فرایند جذب محسوب نمی‌شود. با توجه به اینکه pH آب‌های طبیعی در این محدوده قرار دارد؛ بنابراین نیازی به تغییرات pH در حین کار با جاذب نیست. این امر باعث کاهش هزینه‌ها در استفاده از جاذب در صنعت خواهد شد. میزان زمان تعادل جذب ۵ دقیقه به دست آمد که

- of azithromycin antibiotic removal by multi-wall carbon nanotubes in a fixed-bed column system. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 71(4): 533-545.
14. Arshadi M. Amiri M. J. and Mousavi S. 2014. Kinetic, equilibrium and thermodynamic investigations of Ni(II), Cd(II), Cu(II) and Co(II) adsorption on barley straw ash, *Water Resour. Ind.* 6: 1-17.
 15. Arshadi M. Ghiaci M. and Gil A. 2011 Schiff base ligands immobilized on a nanosized SiO₂-Al₂O₃ mixed oxide as adsorbents for heavy metals. *Ind. Eng. Chem. Res.* 50(24): 13628-13635.
 16. Arshadi M. Mousavinia F. Amiri M. J. and Faraji A. R. 2016. Adsorption of methyl orange and salicylic acid on a nano-transition metal composite: kinetics, thermodynamic and electrochemical studies. *J. Colloid Interface Sci.* 483: 118-131.
 17. Ayranci E. Hoda N. and Bayram E. 2005. Adsorption of benzoic acid onto high specific area activated carbon-cloth. *J. Colloid Interf. Sci.* 284: 83-88.
 18. Bahrami M. Amiri M. J. and Koochaki S. 2017. Removal of caffeine from aqueous solution using multi-wall carbon nanotubes: kinetic, isotherm, and thermodynamics studies. *Pollution*. 3: 539-552
 19. Belhassan K. 2021. Water scarcity management. In *Water Safety, Security and Sustainability* (pp. 443-462). Springer, Cham.
 20. Boroumand Jazia M. Arshadi M. Amiri M. J. and Gil A. 2014. Kinetic and thermodynamic investigations of Pb(II) and Cd(II) adsorption on nanoscale organo-functionalized SiO₂-Al₂O₃. *Journal of Colloid and Interface Science.* 422: 16-24.
 21. Cheng S. Liu Y. Xing B. Qin X. Zhang C. and Xia H. 2021. Lead and cadmium clean removal from wastewater by sustainable biochar derived from poplar saw dust. *Journal of Cleaner Production.* 314: 128074.
 22. Egboosiuba T. C. Ekwunye M. C. Tijani J. O. Mustapha S. Abdulkareem A. S. Kovo A. S. and Lisak G. 2022. Activated multi-walled carbon nanotubes decorated with zero valent nickel nanoparticles for arsenic, cadmium and lead adsorption from wastewater in a batch and continuous flow modes. *Journal of Hazardous Materials.* 423: 126993.
 23. Elkhatib E. A. Moharem M. L. Saad A. F. and Attia F. A. 2022. Using nano-magnesium oxide/bentonite composite for cadmium removal from industrial wastewater. *Environmental Engineering Research.* 28(2): 210545.
 ۴. سلیمی س. تاجرمحمد قزوینی پ. دباغ ر. و عیوضی ا. ۱۳۹۹. بهینه‌سازی حذف کارآمد سرب توسط *Bacillus sp. Strain STG-83* با استفاده از روش رویه پاسخ جهت زیست‌پالایی پساب‌های آلوده. *علوم و فنون هسته‌ای.* ۴۱(۴): ۱۰۲-۱۱۱.
 ۵. صالحی ا. گودرزی م. سنایی‌پور ح. و خادمیان ع. ۱۳۹۸. مروری بر حذف یون سرب از محلول‌های آبی توسط عملیات جذب سطحی. *پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی-پلیمر.* ۳(۱): ۳-۲۸.
 ۶. طیبی ح. و نوایی دیوا ط. ۱۳۹۷. مطالعه جذب سطحی یون مس (II) از محلول‌های آبی با استفاده از نانولوله‌های کربنی اصلاح سطح شده. *نانو مواد.* ۱۰(۳): ۱۸۹-۱۹۹.
 ۷. ظلی‌بوری آبادی م. حسینی س.ع. هدایتی س.ع.ا. عادل‌ا. و رضائی ح. ۱۳۹۹. مطالعه ایزوترم و سینتیک جذب فلز سنگین روی از محلول‌های آبی با استفاده از میکروجلبک سندسموس. *علوم و تکنولوژی محیط‌زیست.* ۲۲(۹): ۵۹-۷۱.
 ۸. کمالی ب ستوده‌نیا ع. و مهدوی مزده ع. ۱۴۰۱. سینتیک و ترمودینامیک جذب فسفر در یک خاک رسی تحت تأثیر پارامترهای محیطی مختلف. *آب و خاک.* ۳۶(۲): ۲۵۱-۲۶۶.
 9. Abd-Elaty I. Kuriqi A. and Shahawy A. E. 2022. Environmental rethinking of wastewater drains to manage environmental pollution and alleviate water scarcity. *Natural Hazards.* 110(3): 2353-2380.
 10. Amiri M. J. Abedi-Koupai J. Eslamian S. S. and Arshadi M. 2016. Adsorption of Pb(II) and Hg(II) ions from aqueous single metal solutions by using surfactant-modified ostrich bone waste. *Desalin. Water Treat.* 57: 16522-16539.
 11. Amiri M. J. Abedi-Koupai J. Eslamian S. S. Mousavi S. F. and Hasheminejad H. 2013. Modeling Pb(II) adsorption from aqueous solution by ostrich bone ash using adaptive neural-based fuzzy inference system, *J. Environ. Sci. Health Part A.* 48: 543-558.
 12. Amiri M. J. Bahrami M. Beigzadeh B. and Gil A. 2018. A response surface methodology for optimization of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid removal from synthetic and drainage water: a comparative study. *Environmental Science and Pollution Research.* 25(34): 34277-34293.
 13. Amiri M. J. Bahrami M. and Rajabi S. 2022. Assessment of M5 model tree for prediction

- removal mechanism and future outlook. *Journal of Hazardous Materials*. 420: 126596.
35. Zhang S. Wang J. Zhang Y. Ma J. Huang L. Yu S. and Wang X. 2021a. Applications of water-stable metal-organic frameworks in the removal of water pollutants: A review. *Environmental Pollution*. 291: 118076.
36. Zhang X. Liu H. Yang J. Zhang L. Cao B. Liu. L. and Gong W. 2021b. Removal of cadmium and lead from aqueous solutions using iron phosphate-modified pollen microspheres as adsorbents. *Reviews on advanced materials science*. 60(1): 365-376.
37. Zhang Y. Haris M. Zhang L. Zhang C. Wei T. Li X. and Li X. 2022. Amino-modified chitosan/gold tailings composite for selective and highly efficient removal of lead and cadmium from wastewater. *Chemosphere*. 136086.
24. Gong Y. Wang Y. Lin N. Wang R. Wang M. and Zhang X. 2022. Iron-based materials for simultaneous removal of heavy metal (loid)s and emerging organic contaminants from the aquatic environment: Recent advances and perspectives. *Environmental Pollution*. 118871.
25. Hamza M. F. Abdel-Rahman A. A. H. Negm A. S. Hamad D. M. Khalafalla M. S. Fouda A. and Goda A. E. S. 2022. Grafting of Thiazole Derivative on Chitosan Magnetite Nanoparticles for Cadmium Removal—Application for Groundwater Treatment. *Polymers*. 14(6): 1240.
26. Li S. Li S. Wen N. Wei D. and Zhang Y. 2021. Highly effective removal of lead and cadmium ions from wastewater by bifunctional magnetic mesoporous silica. *Separation and Purification Technology*. 265: 118341.
27. Liao W. Zhang X. Shao J. Yang H. Zhang S. and Chen H. 2022. Simultaneous removal of cadmium and lead by biochar modified with layered double hydroxide. *Fuel Processing Technology*. 235: 107389.
28. Moreno-Castilla C. 2004. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. *Carbon*. 42: 83–94.
29. Pelalak R. Heidari Z. Khatami S. M. Kurniawan T. A. Marjani A. and Shirazian S. 2021. Oak wood ash/GO/Fe₃O₄ adsorption efficiencies for cadmium and lead removal from aqueous solution: Kinetics, equilibrium and thermodynamic evaluation. *Arabian Journal of Chemistry*. 14(3): 102991.
30. Ramutshatsha-Makhwedzha D. Mbaya R. and Mavhungu M. L. 2022. Application of Activated Carbon Banana Peel Coated with Al₂O₃-Chitosan for the Adsorptive Removal of Lead and Cadmium from Wastewater. *Materials*. 15(3): 860.
31. Stafiej A. and Pyrzynska K. 2008. Extraction of metal ions using carbon nanotubes. *Microchemical Journal*. 89: 29-33.
32. Vesali-Naseh M. Naseh M. R. V. and Ameri P. 2021. Adsorption of Pb (II) ions from aqueous solutions using carbon nanotubes: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*. 291: 125917.
33. Xu Y. Xia H. Zhang Q. Jiang G. Cai W. and Hu W. 2022. Adsorption of cadmium (II) in wastewater by magnesium oxide modified biochar. *Arabian Journal of Chemistry*. 15(9): 104059.
34. Yaashikaa P. R. Kumar P. S. Saravanan A. and Vo D. V. N. 2021. Advances in biosorbents for removal of environmental pollutants: A review on pretreatment,

groups on the MWCNTs surface have an important role in Pb(II) and Cd(II) adsorption. The removal of heavy metal ions was found to increase with increasing solution pH, with maximum values being reached at about 6-8. The observed lower uptake in an acidic medium may be due to partial protonation of the functional groups and the competition between H^+ and metal ions for binding to adsorption sites on the MWCNTs. The results showed that the maximum metal adsorption occurred at contact time of 5 minutes, and adsorbent dosage of 0.05 gram. As the adsorbent dose increased, metal removal increased, while the adsorption capacity decreased. Indeed, the fast adsorption during the initial stages was probably due to the high concentration gradient between the adsorbate in solution and that on the adsorbent as there are a high number of vacant sites available during this period. The increase in the temperature of solutions of Pb(II) and Cd(II) from 25 to 60°C led to an increase in the adsorption capacity of the adsorbent. This may indicate that adsorption of metal cations on active sites of the MWCNTs surface are endothermic and may be elucidated by availability of more active sites of adsorbent, the enlargement and activation of the adsorbent surface at higher temperatures. The pseudo-second-order type model satisfactorily ($R^2=1$) described the experimental metal data. Also, the comparison of the adsorption isotherm equations showed that the Freundlich-Langmuir model [$R^2=0.984$, $SEE=4.42$) for Pb (II) ions and ($R^2=0.969$, $SEE=5.27$) for Cd (II)] was more proper in describing adsorption process. The maximum adsorption capacities of Pb (II) and Cd (II) ions were obtained at 137.86 and 110.82 $mg\ g^{-1}$, respectively. The removal of heavy metals in this study followed the order Cd(II) < Pb(II), thus mirroring the trend of the hydrated radius (0.230 and 0.265 nm) for Cd(II) and Pb(II), respectively.

Keywords: Cd (II), Isotherm model, Pb (II), Surface adsorption efficiency, Kinetic model.

Citation: Amiri M. J. Jamali S. and Zanganeh H. 2023. Batch removal of Pb (II) and Cd (II) from aqueous solutions using multi-wall carbon nanotubes. Iranian Water Research Journal. 47: 115-129. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14016.2442>

Research paper

Batch removal of Pb (II) and Cd (II) from aqueous solutions using multi-wall carbon nanotubes**M. J. Amiri^{1*}, S. Jamali² and H. Zanganeh³****Extended Abstract**

Water resource pollution with heavy metals is one of the most environmental problems at the global level. Among the heavy metals, removal of Pb (II) and Cd (II) ions from contaminated water is essential due to their high toxicity and tendency to accumulate in living organisms. In light of this, it is vital to develop simple, rapid, and efficient methods for monitoring metal ions in the environment. Various physical and chemical methods, including coagulation, chemical precipitation, flotation, ion exchange, membrane filtration, and adsorption are used to remove Pb (II) and Cd (II) ions from contaminated waters. Adsorption process has been reported to be low-cost alternative for the treatment of Pb (II) and Cd (II) ions in wastewater. Today, nanomaterials such as multi-wall carbon nanotubes (MWCNTs) have wide environmental applications due to their high surface area, small size, and chemical stability.

Laboratory batch experiments were carried out to study the adsorption of Pb (II) and Cd (II) ions on MWCNTs. The experiments were performed at different temperatures (25, 40 and 60 °C) using several bottles under various experimental variables including pH (2-12), the reaction time (5–120 min), the adsorbent mass (0.01–0.1 g), and the initial caffeine concentration (10–200 mg L⁻¹). The adsorption efficiency (R, %) and the adsorption capacity (q, mgg⁻¹) of metal ions using MWCNTs were calculated. In this study, among all kinetic models, two most usual models including pseudo-first-order and pseudo-second-order models were applied to fit the experimental data of metal ions removal using MWCNTs. Adsorption of metal ions was also modelled using three widely used isotherm models including Freundlich, Langmuir, and Langmuir-Freundlich models. The MWCNTs were characterized by several techniques including BET, FT-IR spectroscopy, scanning electron microscopy, and zeta potential. The pH of solution was adjusted using 0.1 M HCl/NaOH using a pH meter (Metrohm, 827 pH Lab). The pH at the point of zero charge (pH_{ZPC}) of different adsorbents was obtained by the solid addition method. The concentrations of Pb(II) and Cd(II) solutions were measured by atomic absorption spectrophotometry using a Perkin-Elmer 1100B instrument. The specific surface area of the adsorbent was measured using the Bunnauer–Emmett–Teller (BET) method.

The surface and textural morphology of MWCNTs by SEM image indicated that these particles had a well-developed porous structure with the range of 10-20 nm in diameter and about 30 μm in length. The results obtained from the FTIR technique confirmed that the O–H

1- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Fasa University, Fasa, Iran.

2- Ph.D. Candidate, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran.

3- M.Sc. Graduate of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Engineering, Estahban Islamic Azad University, Estahban, Iran.

* Corresponding Author: mj_amiri@fasau.ac.ir

Received: 2022/09/12

Accepted: 2022/11/08

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14016.2442>

software was used, and in order to compare the means, Duncan's multiple-range test (DMRT) ($P < 0.05$) was used and graphs were drawn using Excel software.

The results of variance analysis showed that use of different levels of magnetized water and Cd pollution significantly affected the accumulation of Cd in roots and shoots, the bioaccumulation index (BF) and the translocation factor (TF) of Cd from the roots to the shoots. Also, the interaction effects of irrigation water and Cd concentration on them was significant ($P < 0.05$). Biomass production, activity of antioxidant enzymes and non-enzymatic antioxidants of vetiver plant were significantly affected by the applied treatments, as well. The interaction effect of the studied treatments was also significant except for the activity of superoxide dismutase (SOD), anthocyanin and plant dry weight ($P < 0.05$). Based on the results of means comparison, the highest concentration of Cd in roots and shoots, and BF were allocated to the magnetized water treatment, and by changing the concentration of Cd, the effect of magnetized water on plant responses changed, as well. The activity of enzymatic and non-enzymatic antioxidants also increased with increasing the concentration of Cd, but the treatment of magnetized water was a superior treatment. In general, the results obtained from this study showed that the use of magnetized water can be useful for increasing the resistance of plants to the stress of Cd pollution. Vetiver plant, in the conditions of facing with increasing the concentration of Cd pollution, initiates growth and antioxidant responses, which antioxidant responses are actually a defense mechanism of plants to deal with adverse environmental effects. Moreover, the use of magnetized water technique in irrigating plants under Cd pollution conditions can have a significant effect on the type of plant responses and help the plant to withstand environmental stress (here Cd pollution). The use of magnetized water had a significant effect on the bioaccumulation index and the transfer factor of cadmium from the roots to the shoots. Nevertheless, to confirm the results obtained from this research, it is suggested to conduct more studies on higher levels of pollution, other heavy metals and different plants.

Keywords: Cadmium, Magnetized water, Soil pollution, The growth and antioxidant responses of plant.

Citation: Jafari Hafshajani E. Hoodaji M. Ghanati F. Hosseini Y. and Alipour V. 2023. Investigation of the effect of Cadmium pollution and irrigation with magnetized water on the growth and antioxidants of vetiver grass. Iranian Water Research Journal. 47: 103-113. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13986.2432>

Research paper

Investigation of the effect of Cadmium pollution and irrigation with magnetized water on the growth and antioxidants of vetiver grass

E. Jafari Hafshajani¹, M. Hoodaji^{2*}, F. Ghanati³, Y. Hosseini⁴ and V. Alipour⁵

Extended Abstract

Heavy metals (such as Cadmium, Cd) are one of the main pollutants in the environment, and their toxicities has caused concern due to their adverse effects on public health. Cd is a mineral pollutant for soil and a toxic element for plants. It has negative effects on plant growth and yield. The anthropogenic activities such as farming, manufacturing, transporting etc. cause Cd accumulation in the environment. In order to control the entry of the pollutants into the food chains and also to improve the growth and yield of plants under pollution conditions, different management methods are used. One of the new methods is using of magnetized water in order to increase the plant's resistance to the pollution condition and also to control the uptake of this pollutant into plant tissues. Previous studies have solely reported on the phytoextraction and Phyto stabilization effects of heavy metals uptake in Vetiver grass. Also, magnetized water has been studied by researchers. However, there has been little studies about the effects of magnetized water on efficiency of phytoremediation and biochemical responses of plants. Therefore, the objective of this study was to investigate the effects of magnetized water on biochemical responses of *vetiver* plant and its phytoremediation efficiency under Cd pollution conditions.

In order to study the effect of magnetic field on Cadmium (Cd) removal by vetiver grass (*Vetiver Zizanioides*), a study was conducted in the central nursery of Green Area and Parks Organization Bandar Abbas Municipality, Bandar Abbas, Iran, from March 20, 2020 to February 18, 2021. This pot experiment was conducted as a factorial arrangement based on a completely randomized design with three replications. The studied soil was sampled (surface layer, 0-30 cm) from an agricultural soil where located in Baghu village, Bandar Abbas, Iran. After air-drying of the soil, it was sieved (2 mm) to measure some important physical and chemical properties. The studied factors were Cd in 4 levels (0, 0.5, 1, and 2 mg L⁻¹) and irrigation water in 3 levels (magnetized water, semi-magnetized water, and non-magnetized water). At the end of the experiment, the concentration of Cd in root and shoot of vetiver grass, translocation and bioaccumulation factors and some growth and antioxidants of the plant was measured, included activity of Superoxide Dismutase (SOD), Catalase (CAT), and Peroxidase (POD), phenol, flavonoid and anthocyanin. Some phytoremediation indexes were calculated included translocation factor (TF), bioaccumulation factor (BF), and uptake index of Pb in root and shoot (UI). Finally, in order to statistical analysis of the data, SAS 9.1

1- Department of Soil Science, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

2- Department of Soil Science, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

3- Department of Plant Biology, Faculty of Biological Science, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.

4- Department of Soil and Water Research, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran.

5- Department of Environmental health, University of Medical Sciences of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

* Corresponding Author: Mehran.hoodaji@gmail.com

Received: 2022/08/18

Accepted: 2022/09/10

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13986.2432>

productivity was calculated as the amount of yield produced per unit of irrigation water. Finally, variance analysis of the obtained data was done using SAS software. Also, the mean of the treatments were compared through the least significant difference (LSD) test at the level of five and one percent.

The results showed that the cultivation method was effective on yield, plant height, water consumption and irrigation water, water productivity and water use efficiency and was statistically significant at 1% level of probability. The highest and lowest yields belonged to T2 and T4 treatments with 4079.2 and 2941.7 kg/ha, respectively. The highest and lowest irrigation water belonged to T4 and T1 treatments with 10301 and 6537 m³/ha, respectively. The highest and lowest irrigation water productivity belonged to T1 and T4 with 0.61 and 0.29 kg/m³, respectively. Based on the results of this experiment, the treatment of conventional planting with periodic irrigation (T1) did not have a significant reduction in yield in compared with the treatment of conventional planting with flood irrigation (T2). The treatment of conventional planting with periodic irrigation (T1) saved irrigation water by 17% compared with the common cultivation treatment with flood irrigation (T2), and increased irrigation water productivity by 17%. Finally, the results of this research showed that there is no need to flood create during the rice growth period. conventional planting system with periodic irrigation (T1) was chosen as the superior treatment and it can be a suitable alternative to the common cultivation system with flood irrigation of rice. Therefore periodic irrigation of rice can be a suitable option to deal with water shortages in recent years.

Keywords: Direct seeding, Irrigation method, Puddling, Water use efficiency.

Citation: Rahimi M. Akbari nodehi D. Asadi R. Bagheri A. and Shirdel shahmiri F. 2023. The effect of periodic and flood irrigation methods on yield and irrigation water productivity of rice in Amol city. Iranian Water Research Journal. 47: 93-102. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14086.2456>

Research paper

The effect of periodic and flood irrigation methods on yield and irrigation water productivity of rice in Amol city

M. Rahimi pool¹, D. Akbari nodehi^{2*}, R. Asadi³, A. Bagheri⁴ and F. Shirdel-shahmiri⁵

Extended Abstract

In many countries of the world, water shortage has become a serious and worrying issue. Studies show that the agriculture sector is the largest consumer of water resources in the world. Therefore, scarce of water resources is considered the biggest challenge of agricultural development and ultimately food security. Rice is the largest consumer of fresh water worldwide, and in terms of importance, it is the second most important edible grain after wheat which constitutes the food of two-thirds of the world's population. Therefore, need to increase productivity to feed the growing population by using efficient water management practices and water saving technologies, water saving technologies. Due to the decrease in rainfall in Mazandaran province, Iran, The area of rice cultivation and its production has decreased. These conditions can cause irreparable damage to the large production of rice in the province and the subsistence economy of the rice farmers will suffer irreparable damage. For the reason that rice production in Mazandaran Province is very important strategically and economically, it is necessary to change irrigation management and traditional cultivation method to reduce the water demand for rice production.

The experiment was conducted in the form of a complete block-design with three replications and four treatments using, during the 2020 crop year in the Rice Research Institute of Iran-Amol. The selected rice variety was Tarem Hashemi. Treatments included conventional planting with periodic irrigation (T1), conventional planting with flood irrigation (T2), transplanting in un-puddled bed with flood irrigation (T3), and direct seed cultivation in dry bed with flood irrigation (T4). The number of experimental plots was 12 and the area of each was 30 square meters. Based on soil decomposition test and according to soil experts, three types of phosphorus, potassium and nitrogen fertilizers were used to all the treatments. In the two treatments (T1 and T2), the land was prepared with puddling. While in the two treatments (T3 and T4), the field was plowed dry. Transplanting in puddled and un-puddled bed as transplants and in direct cultivation was germinated as seeds. In flood irrigation treatments, water flowed on the soil surface and the entire surface of the earth was flooded by a layer of five cm water-height (with a 5-day irrigation cycle). In periodic irrigation treatments, after flooding the land, Irrigation was stopped, and then after the water disappeared from the soil surface (observation of the first dry spot on the field surface) the irrigation was done again (irrigation cycle of 6-8 day). In this experiment, the exact volume of irrigation water was measured by installing volumetric meters in each of the experimental plots. Irrigation water

1- Ph.D. Student, Department of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.

3- Department of Water Science and Engineering, Ghaemshahr Branch, Islamic Azad University, Ghaemshahr, Iran, Assistant Professor, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Rice Research Institute, Mazandaran, Amol, Iran.

4- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.

5- Assistant Professor, Department Of Agronomy, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.

* Corresponding author: d.akbari@qaemiau.ac.ir

Received: 2022/10/13

Accepted: 2022/12/04

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14086.2456>

application of different irrigation levels started three weeks after transplanting the seedlings to the main pots, after ensuring the complete establishment of the plants; it continued once every three days for 120 days until the end of the growth period. Then, the results of rice husk biochar application and different levels of water application on soil matric potential, biochemical characteristics and water use efficiency of tomato plants in cadmium contaminated soil were investigated. The data were analyzed using version 9.2 of SAS and the graphs were drawn in Excel software. Duncan's test was used to compare means, and the significance level was set at 0.05.

Studying the matric potential of the soil under the influence of biochar treatments showed that the matric potential increases FC, PWP and PAWC with the increase of biochar application in the B₆ treatment. The moisture content of treatment B₆ increased by 28.50% and 123.48%, respectively, compared to B₃ and B₀ in PAWC. The results showed that the concentration of Cd that absorbed to the soil decreased with increasing irrigation and biochars application. The lowest cadmium concentration was observed in the B₆ treatment at the irrigation level of 110 %. However, soil available cadmium values in the L₉₀B₆, L₁₀₀B₆, and L₁₁₀B₆ treatments were not significantly different. According to the results, the amount of cadmium in treatment B₆ in L₉₀, L₁₀₀, and L₁₁₀ decreased by 24.3%, 27.9%, and 34.2%, respectively, compared with treatment B₆ in L₅₀. Ion exchange can be one of the reasons for the stabilization of heavy metals in the soil due to biochar application. In addition, properties of soluble solids and vitamin C of tomato fruit increased significantly by reducing irrigation levels and increasing of biochar application. So, the properties of soluble solids and vitamin C of tomato fruit were 68.9% and 65.3% higher in L₅₀B₆ treatment compared to L₁₁₀B₀ treatment, respectively. On the other hand, catalase enzyme activity decreased significantly with increasing irrigation levels and biochar application. The catalase enzyme increase in L₅₀B₀ treatment compared to L₁₁₀B₆ treatment reached its maximum and was 1.2 times. The highest values of total chlorophyll and carotenoid were obtained in L₁₁₀B₆ treatment, which were 29.4% and 93.8% higher than L₁₁₀B₀, respectively. The best water use efficiency was observed in L₉₀B₆ and L₁₀₀B₆ treatments with 65.23 and 63.14 kg/m³, respectively, and the difference between them was not significant. Although the duration of the research was short and the experiments were conducted immediately after the end of the tomato growing season (after 4 months), the biochar obtained from rice husk improved the physical conditions of the soil. Actually by reducing soil cadmium toxicity, especially in the B₆ treatment, the biochar made the plant immune to cadmium stress. The B₆ treatment at the irrigation level of 90% (L₉₀B₆) was recognized as the best treatment in terms of optimal maintain soil moisture, minimum cadmium concentration in the soil, and minimum water consumption during stages of the plant growth. Therefore, biochar application can be an economic solution to improve soil water retention, plant biochemical characteristics, and water use efficiency under water stress conditions in arid and semi-arid regions and cadmium contamination of soil.

Keywords: Biochar, Catalase, Carotenoid, Chlorophyll, Matric potential.

Citation: Jamili T. Alinejadian Bidabadi A. Maleki A. Feizian M. and Akbarpour O. A. 2023. The effect of rice husk biochar application and different levels of irrigation regimes on matric potential, biochemical characteristics and water use efficiency of cadmium contaminated soil in tomato plant. Iranian Water Research Journal. 47: 81-91. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14007.2439>

Research paper

The effect of rice husk biochar application and different levels of irrigation regimes on matric potential, biochemical characteristics and water use efficiency of cadmium contaminated soil in tomato plant

T. Jamili¹, A. Alinejadian Bidabadi^{2*}, A. Maleki³, M. Feizian⁴ and O. A. Akbarpour⁵

Extended Abstract

In recent decades, the widespread use of chemical fertilizers, pesticides, and urban and industrial wastewater for irrigation has caused growing concern about heavy metals pollution in the environment and agricultural soils. Soil pollution with heavy metals and moisture stress are the main threats to food security in the world. So, management methods to conserve irrigation water, such as deficit irrigation, are being developed and are among the solutions to improve the efficiency of water consumption. Tomato is one of the most popular agricultural products in the world due to its high nutritional value, as well as being a source of antioxidants, fiber, vitamins, potassium, phenolic compounds, lycopene, and beta-carotene. Given its high water requirement, it is necessary to use strategies in arid and semi-arid regions of the world to compensate for water scarcity and the resulting drought stress without reducing yield. Biochar, as an organic soil amendment, can reduce the effects of water deficiency and change the activity of plant enzymes grown in an environment contaminated with heavy metals, especially cadmium. The aim of this study was to investigate the effect of rice husk biochar and deficit irrigation on matric potential and biochemical characteristics of tomato plants in soil contaminated with cadmium.

The soil sample was collected at a depth of 30 cm from the Faculty farm. Rice husk was used to prepare biochar. To produce biochar, oven-dried remains of the rice husk were placed in an electric furnace at a temperature of 400°C for 4 hours with a temperature increase rate of 5°C per minute. This research was performed in a factorial-based experiment in a randomized complete block design, using three levels of rice husk (0 (B₀), 3 (B₃), and 6 (B₆) ton/ha), and seven irrigation levels (50 (L₅₀), 60 (L₆₀), 70 (L₇₀), 80 (L₈₀), 90 (L₉₀), 100 (L₁₀₀), and 110 (L₁₁₀) percent) with four replications in cadmium-contaminated soil, with a total of 21 treatments in 84 pots. Tomato seedlings (Hirad variety) were cultivated in the greenhouse. After 21 days, the seedlings were transplanted to the main pots. Later than mixing soil and biochar and adding the mixture to the pots, the pots were fully saturated. Soil moisture was adjusted at the field capacity level, then two tomato seedlings, 10 cm tall in the aerial part, were planted in each. In order to prevent nutritional stress, the amounts of required nutrient elements of nitrogen, phosphorus, and potassium were calculated based on the soil test results, and 500, 150, and 200 kg per hectare of urea, triple superphosphate, and potassium sulfate were added, respectively, to the soil of the pots before transplanting tomato seedlings. The

1- Ph.D. Student, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran.

2- Assistant Professor, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran.

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran.

4- Associate Professor, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran.

5- Assistant Professor, Agronomy and Plant Breeding Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran.

* Corresponding Author: alinezhadian.a@lu.ac.ir

Received: 2022/08/31

Accepted: 2022/10/24

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14007.2439>

of urban wastewater with zinc element. The bioaccumulation of zinc element in the present research was 2.45 and this shows that vetiver plant is a good plant accumulator for zinc element in the root. In addition, the highest concentration of zinc element was found in the root of canna plant. The results of irrigation with urban wastewater and city water on the amount of chromium metal accumulation in the roots, stems and leaves of vetiver and canna plants showed that the bioaccumulation rate of chromium in the treated canna plant was 4.43, indicated that canna is an appropriate absorber for chromium. The transfer factor (TF), which is the ratio of chromium metal concentration in the dry weight of shoot to root, was 1.64 for canna plant. This amount shows that the transfer of chromium to the aerial organs happened more, although the chromium element was also significantly accumulated in the roots. The results of effect of urban wastewater on the root anatomy of canna and vetiver plants showed that the diameter of the root and the diameter of the central cylinder in the treated plants were reduced compared with the control plants, as well as the number of vascular vessels in the treated plants. Heavy metals have different effects on the anatomy of plant roots, and the absorption and accumulation of metals in high concentrations has led to structural changes in the roots of various plants. According to the outcomes, the stress of cadmium and copper decreased the thickness of the mentioned parenchyma. According to the acidification of the soil after six months of irrigation with urban wastewater and the standard limit set for zinc metal, it was observed that zinc metal in the pure soil (soil without plants that was irrigated with urban wastewater) was higher than the standard level. The effect of irrigation with urban wastewater on the amount of malondialdehyde, proline and soluble sugar in leaves of vetiver and canna showed that the plants treated with urban wastewater had higher levels of malondialdehyde in their leaves than the control plants, so that high concentrations of zinc and cadmium led to an increase in lipid peroxidation in treated plants.

Based on the outcomes of this research, 6 months of watering vetiver and canna plants with urban wastewater containing heavy elements of zinc and chromium, a high accumulation of zinc was observed in the plants revealed that vetiver and canna plants are appropriate absorbers for zinc. Also, the highest level of urban wastewater pollution was attributed to zinc. Since the large amount of heavy metals is stress-producing, the evidence of physiological and anatomical stress was observed in the treated plants, which indicated that the vetiver suffered more stress. According to the bioaccumulation factor and the results, the canna and vetiver plants are both good absorbers for zinc and chromium. Both elements were mostly accumulated in the roots of canna, but the investigation of the transfer factor showed that zinc and chromium elements were more transferred to the aerial parts of the canna plant, so canna has the ability to absorb these two metals through plant extraction. While, the vetiver plant which did not show significant transfer in the aerial parts of the plant, has the ability to absorb these two metals through plant stabilization.

Keywords: *Canna indica*, Heavy metals, Phytoremediation, *Vetiveria zizanioides* L., Wastewater.

Citation: Mohammadi Deylamani M. Momen Zadeh M. Hajipour S. and Afshar Mohammadian M. 2023. Refinement of urban wastewater using *Vetiveria zizanioides* L. and *Canna indica* plants. Iranian Water Research Journal. 47: 69-79. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14054.2451>

Research paper**Refinement of urban wastewater using *Vetiveria zizanioides* L. and *Canna indica* plants****M. Mohammadi Deylamani¹, M. Momen Zadeh², S. Hajipour³ and M. Afshar Mohammadian^{4*}****Extended Abstract**

Heavy metals are among the most important causes of environmental pollution worldwide, due to the industrialization of societies. Wastewater production is one of the problems of waste accumulation in waste collection sites. Urban wastewater contains almost all known chemical elements and persistent pollutants in the environment such as heavy metals that are not biodegradable. Due to the ability of heavy metals to accumulate and cause toxicity in living organisms, this type of pollution is considered a serious and fundamental problem. Use of plants as an effective and cost-effective technology to remove metal pollutants from contaminated soils and waters has been recommended as a new environmentally friendly method instead of other costly measures.

The purpose of this research was to investigate the absorption of some heavy metals in urban wastewater by vetiver and canna plants and its effect on some physiological and anatomical characteristics, as well as to evaluate the resistance of vetiver and oleander plants against heavy metals in urban wastewater. For this purpose, an experiment was conducted in the form of a randomized complete design with three replications using vetiver and canna plants. The plants at the same size and the same weight including vetiver plant and the rhizomes of canna plants were obtained from their cultivation places in Guilan province and placed in the pots containing 10 kg of sifted soil. The control pots were irrigated with 500 ml of urban water and the treated pots with 500 ml of urban wastewater twice a week, and this process continued for 6 months. In addition, 3 pots without plants were also irrigated with urban wastewater during 6 months, like the treated samples. After 6 months, the amount of heavy metals in different organs of vetiver and canna plants was evaluated and the anatomical structure of the roots of vetiver and canna plants treated with urban wastewater was compared with the control plants. Also, the amount of lipid peroxidation of the cell membrane, the amount of proline and soluble sugars in the leaves of the plants treated with urban wastewater were measured in comparison with the control plants. The results of investigating the effect of 6 months of irrigation with urban wastewater and urban water on the amount of zinc metal accumulation in the roots, stems and leaves of vetiver and canna plants showed that the amount of zinc was more than the standard level (200 mg/kg). The transfer factor (TF) for zinc element (Zn) was calculated as 0.72, which indicated the accumulation of zinc element in vetiver roots under treatment. Despite the high absorption of about 150 mg/kg zinc by treated plants, a significant amount of zinc element was observed in the final soil, which indicated the high contamination

1- M.Sc. Student, Department of Biology, Faculty of Science, University of Guilan, Rasht, Guilan, Iran

2- M.Sc. Student, Department of Biology, Faculty of Science, University of Guilan, Rasht, Guilan, Iran

3- Ph.D. Student, Department of Biology, Faculty of Science, University of Golestan, Golestan, Gorgan, Iran

4- Associate Professor, Department of Biology, Faculty of Science, University of Guilan, Rasht, Guilan, Iran

* Corresponding Author: afshar@guilan.ac.ir

Received: 2022/05/17

Accepted: 2022/10/09

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14054.2451>

sample with all samples from the training data is calculated. Then, k samples that have a smaller distance with sample x are considered and the class related to these k samples is extracted. Also, three methods of feature reduction were used in this research to reduce dimensions: principal component analysis (PCA) method, feature selection & forward selection, and particle swarm optimization (PSO). In the PCA algorithm, the aim is to maximize the variance of the samples. This method is useless when a sample is in two-dimensional space or the dimensions are changed in a way that this sample spreads in one-dimensional space and their variance increases. To overcome this problem, Lagrange's theorem is used. The forward selection method, to reduce the feature, starts with one feature and keeps adding more features continuously until they either have no effect on the accuracy or reduce it. The population in PSO consists of a set of members, and each member of the population is called a particle. In this technique, the concept of "G-best neighborhood placement" is used. That means each particle knows its previous best position and the previous best position of each particle in the population. In other words, each particle moves in the direction of its previous best position and towards the best particle. Each particle indicates a possible solution that moves randomly in the feasible space.

In this paper, to estimate snow depth in terms of spatial distribution, different methods were employed included: parametric methods (like multivariate linear regression), non-parametric methods (mean-based regression, kernel-based regression, and K-nearest neighbor regression), and feature selection methods (PCA, forward selection, and particle swarm optimization). After investigation of the mentioned methods and given the statistics used to evaluate the models, the lowest amount of mean squared error (MSE) was related to the forward feature selection method (22.17) and the highest one was for the multivariate linear regression method (271350). Consequently, the descriptive features of the samples, undoubtedly effected the accuracy of the machine learning methods considerably, so by reducing and choosing more effective parameters, it could estimate the snow depth accurately.

Keywords: Feature reduction, Forward feature selection, Machine learning, Sampling, Snow depth.

Citation: Asefi M. and Fathzadeh A. 2023. Improving accuracy in snow depth modeling based on the effectiveness of selecting index features in parametric and non-parametric regressions. Iranian Water Research Journal. 47: 57-67. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14028.2445>

Research paper**Improving accuracy in snow depth modeling based on the effectiveness of selecting index features in parametric and non-parametric regressions****M. Asefi¹ and A. Fathzadeh^{2*}****Extended Abstract**

One of the most, if not the most, notable features of snow cover in mountain areas has to do with its spatial heterogeneity. This spatial instability exists on variety of scales, ranging from one meter to hundreds of kilometers. The heterogeneity of snow cover in mountains also highly effects avalanche formation and hydrology cycles. Snow depth estimation-related models make use of depth features for calculating snow depth. These features, however, do not give rise to accurate estimation. Hence, in snow depth estimation issues, parameter subset selection algorithms have been utilized to optimize the accuracy of models when it comes to unseen samples, with the aim of selecting a subset of the most influential parameters in snow estimation. Thus in this study, parametric, non-parametric and feature reduction techniques was used for snow depth estimation. Also, geomorphometric parameters and satellite-based data was considered as inputs.

The selected case study was Chalgerd region, located in Kohrang city, the western region of Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran. This area is located between longitude 49° 56' 29" to 50° 26' 37" and latitude 31° 59' 54" to 32° 49' 5". Using the Latin hypercube or hypercube technique which is a random sampling method, 100 points were chosen for sampling in the area. Then, by the field operation and snow survey for three days on March 18, 19 and 20, 2014, the snow depth was recorded in each sample using the Monte Rose model sampler. Apart from these points, 195 other points were randomly collected from the area. Then, 25 geomorphometric-related parameters was extracted using Digital elevation model (DEM) in the Saga software, and these parameters along with 6 bands related to Landsat 8 satellite imagery and the NDSI index were selected as model inputs. To estimate snow depth in terms of spatial distribution in the current study, three types of methods was employed: parametric methods, non-parametric methods, and feature selection methods (PCA, forward selection, and particle swarm optimization). In this research only multivariate linear regression was used among the parametric modeling methods. However, to evaluate performance of non-parametric methods in solving multivariate regression, three methods were applied: regression to the mean (RTM), kernel-based regression, and K-nearest neighbor regression. In RTM method, the average target value of the training samples to which the sample is assigned is considered as the target value of that sample. The Kernel regression like the mean-based regression, benefits from the similarity between training and test samples for estimation issues. However, instead of the distance function, it uses a kernel to check the similarity. The Gaussian kernel is one of the most widely used kernels in the studied area. In the method of K-Nearest Neighbors, first of all, for each x sample from the test data, the distance of that

1- M.Sc. of Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran.

2- Associate Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran.

* Corresponding Author: fat@ardakan.ac.ir

Received: 2022/09/17

Accepted: 2022/11/26

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14028.2445>

Discharge variability indices (I_v , SVC, and SCVP) calculated for the springs showed that Dimeh spring water has a higher degree of reliability and less variability than Pirghar spring. The Pirghar spring, whose discharge is more variable, has a higher ability to show the characteristics of water transfer to the aquifer and the quick reaction of the system to the charge. Analysis of the long-term time series of Dimeh and Pirghar springs revealed that the discharge response time to rainfall is about 3 and 2 months, respectively. Also, it probably indicates more karstification of the karst system associated with Pirghar spring, compared with Dimeh. Estimation of the coefficients of recession components of fast flow (α_f), transfer flow (α_{if}) and base flow (α_b) of springs based on the analysis of 18 recession curves obtained $\alpha_f = 0.004$, $\alpha_{if} = 0.016$, and $\alpha_b = 0.042$ for Dime spring and $\alpha_f = 0.007$, $\alpha_{if} = 0.038$ and $\alpha_b = 0.125$ for Pirghar spring. Thus it revealed that the degree of development of Pirghar spring is 7 and Dime spring is 5.5. The estimation of the dynamic storage volume of the springs by the Mangin method also showed that on average, during the period under review, about 27 and 55% of the total dynamic storage volume of the Pirghar and Dime springs (equivalent to 8.1 and 47.75 million cubic meters) is related to the base flow. The high transfer flow rate of Pirghar spring shows the point charging and karst conduit system of the region. Also, the classification of karst aquifers related to springs according to the method of Manjin (1975) revealed that Pirghar karst formations has a complex karst aquifer system and higher karstification degree than Dime spring.

Keywords: Chaharmahal and Bakhtiari karst springs, Karst aquifer classification, Mangin method, Recession curve.

Citation: Geravand F. Hosseini S. M. Maghsoud M. Yamani M. and Lak R. 2023. Evaluation of the Karstification of Dimeh and Pirghar karst systems based on spring hydrograph analysis. Iranian Water Research Journal. 47: 41-55. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13956.2420>

Research paper**Evaluation of the Karstification of Dimeh and Pirghar karst systems based on spring hydrograph analysis****F. Geravand¹, S. M. Hosseini^{2*}, M. Maghsoud³, M. Yamani⁴ and R. Lak⁵****Extended Abstract**

Karstic water resources are in the second rank of importance in drinking water resources, worldwide. It is estimated that water within the karstic water resources included 25% of the total drinking water in the world. This resources provide drinking water of 1.3 milliard people approximately. Thus despite of technical limits for gathering data and modeling, accurate analysis of Karstic springs is of importance to sustainable supply of drinking water. In this research, a quantitative analysis of the hydrogeological behavior of Dimeh and Pirghar karst springs in was conducted. The springs are in Chaharmahal and Bakhtiari province, Iran, located in the high and folded zones of Zagros. Nearly, 56% of springs and most of rivers in Iran originate from Zagros Mountains. The research was conducted during the common statistical period from 2000 to 2019. The analysis includes classification of karst aquifer, modeling of hydrograph recession curve and estimation of water volume stored in the saturated and unsaturated parts of karst aquifer by Mangin method. The analysis of the time series results showed that the discharge of Dimeh spring is under influence of the majority of open, medium-sized fissures and with a smaller influence of connected conduits. The Pirghar spring has a system developed karstification of the aquifer, formed by large open tectonic faults and karstic channels. The high transfer flow rate of the Pirghar spring showed the point charge and channel system of the karst region.

In this research, to investigate the hydrogeological behavior of the karst springs of Dimeh and Pirghar, the daily discharge data of the hydrometric stations and the daily precipitation of the climatological stations related to the karst springs were gathered. The data were prepared from the Regional Water Company of Chaharmahal and Bakhtiari province. Then, the 1:250,000 geological map (prepared by the Geological Survey and Mineral Exploration of Iran) was used to obtain the lithological information of the studied area. In the next step after collecting the required data and information, the descriptive statistics included mean, standard deviation, and determination of the variability of spring discharge related to the studied karst springs were calculated using the measured parameters. Then, the main stages of quantitative analysis included the calculation of spring discharge variability indices were performed using I_v , SVC, and SCVP methods. Afterward, the analysis of the hydrograph recession curve of the spring, calculation of the volume of water reserves in the unsaturated part of the soil and karst formations, and the classification of karst aquifers have been done using the Mangin method.

1- Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Department, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- Professor, Physical Geography Department, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

4- Physical Geography Department, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

5- Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Iran.

* **Corresponding Author:** smhosseini@ut.ac.ir

Received: 2022/07/26

Accepted: 2022/10/20

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13956.2420>

was simulated, and then the preliminary design was gained for four different angles of the dam wall which were equal to 90, 80, 75, and 70 degrees. Then these preliminary designs were redesigned to satisfy the reliability constraints in the optimization module. Based on the preliminary designs, the optimum design derived using Monte-Carlo simulation for uncertainty and Genetic Algorithm for multi objective self-adaptive optimization.

According to the results, the stability criteria in preliminary designs were not satisfied based on the calculated factors of SFS, SFO and SFF; so, these dimensions were considered as the lowest limits in the optimal designs. The uncertainty analysis in the input parameters and the hydraulic performance of the dam under uncertainty was determined, and reliable designs were selected. For this purpose Monte-Carlo simulation and multi-objective algorithm were applied. The output results of the multi-objective algorithm had a wide range of different kinds of designs that help the decision be made based on them. The output results of single-objective and multi-objective optimization showed that the optimal situation between four different situations occurred when the angle of the dam wall was equal to 80 degrees. The balance point of costs versus reliability provided the final design of the dam regrading selected reliability. In this situation, the cost of construction was reduced by 20%. Also, the results confirmed that with reducing the angle of slopes, the construction cost reduced round 40%. Consequently, the developed model in the current study (by using uncertainty, optimization and reliability) was capable in redesigning of detention rockfill dams in applied flood control plants.

Keywords: Detention rockfill dam, Monte Carlo Simulation, Reliability-based design optimization, Self-adaptive NSGA-II algorithm.

Citation: Riyahi M. M. Riahi-Madvar H. and Bahrami Chegeni I. 2023. A model for reliability-based design optimization of detention rockfill dams using self-adaptive multi-objective optimization. Iranian Water Research Journal. 47: 23-40. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14015.2441>

Research paper**A model for reliability-based design optimization of detention rockfill dams using self-adaptive multi-objective optimization****M. M. Riyahi¹, H. Riahi-Madvar^{2*} and I. Bahrami Chegeni³****Extended Abstract**

Recently, flood crisis due to the extreme rainfall events and climate changes are increased. There are several structural and non-structural methods for flood control and mitigation. The detention dams are structures used to attenuate the flood peak and reduce flood damages. The detention rockfill dams constructed by natural rockfill with porous media have interesting applicability for flood mitigation. The design approach for the detention rockfill dams include three main steps: 1- In the first step, the location of the dam is done to regulate the reservoir volume required to decrease the flood peak with specified return period, in such a way that provide the safe deplete flood condition in the downstream.; 2-In the second step, the preliminary designs are done to design the detention rockfill dam and derive the preliminary dimensions and sizing the dam. 3-In the third stage, the optimum dimension of the dam is determined using the preliminary designs and single or multi objective optimizations. Based on these steps, there are several graphical or mathematical methods for preliminary designing of detention rockfill dams. The graphical methods are developed and used in early studies. In these studies (1990-1978), the designs were created using single or double output pipes, without any infiltration form the dam body. In these studies, the depth-storage relation of dam was assumed linear, while in the detention rockfill dams this relation is nonlinear. The graphical method of SCS uses two curves of peak storage ration to total flood volume and ration of peak flood discharge to beak inlet discharge. Also, in some studies simple design equations were developed. In the current study a simulator-optimizer model used for detention rockfill dams to optimize the design based on reliability. By the results of the model, optimum angel of the wall in which the cost would be minimum was obtained. Moreover, the introduced model had the ability to be developed.

In this paper, using a simulator-optimizer model, the detention rockfill dam was optimized based on reliability. The case study of the paper was the design of detention rockfill dams for flood control in Karganroud River in the west of Gilan province, north of Iran. The model was developed based on hydrometric data 1957-2017, in order to reduce the peak of flood based on preliminary design, single optimization, and reliability-based design optimization. Therefore, the model could be considered as multi-level. The hydrological equation of nonlinear flood routing with non-Darcian flow inside the rockfills was applied for preliminary designs. The structural stability analyses was used for the safety factor calculation and reliability determination. The optimization techniques was employed to derive the optimal design regarding the stability and reliability analysis. Using the governing equations, the dam

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Associated Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rasanjan, Iran

3- Department of Civil Engineering. Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

* Corresponding Author: H.riahi@vru.ac.ir

Received: 2022/09/10

Accepted: 2022/10/29

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14015.2441>

number of responses in each cell of the provided matrices, the values of the fuzzy spectra assigned to the nine different speech spectra were averaged. Then, these fuzzy values were classified into three spectra: L (lower), M (modal), and U (upper). The minimum values were utilized to calculate the lower limit of fuzzy numbers. In addition, geometric averaging from the intermediate fuzzy numbers was performed, and the maximum numbers were selected for the upper limit of fuzzy numbers.

Apply of combined morphometric indicators in the current research lead to better understand of the model and improve the ability to recognize the flood pattern in the final model. Apply of morphometric factors (height, slope and direction), soil features and geology (soil texture, geology) and environmental-man-made factors (land use and land cover) helped to form of an effective model. Results of weighting the classification of each factor revealed that among the adopted flood controlling factors, the proximity to streams as the mainstream and as the key driver to flood events plays the most critical role in the study area. Other important factors are flow accumulation, curve number, and normalized difference vegetation index (NDVI) (topo-hydrologic, edaphic, and botanic, accordingly) with the respective fuzzified weights of 0.072, 0.071, 0.07, 0.068, and 0.067. The results of flood susceptibility zoning attest that 27.5% (1873 ha) of the entire study area falls within the very high and high susceptibility classes. The spatial distribution of high flood susceptibility classes in upstream and downstream sectors indicates that soft engineering techniques (biologic and biomechanical measures) in upstream, and hard mechanical engineering measures in downstream areas should be concurrently considered. Additionally, educating the local communities about the concepts of flood hazard and risk should be considered across the entire area, from the lowest to the highest susceptible parts of the study area.

Keywords: Ensemble flood modeling, Flood hazard; Flood risk; Morphometric index.

Citation: Davary K. Shamkoueyan H. and Fereshtehpour M. 2022. Assessing Flood Susceptibility by Adopting Remote Sensing Techniques and Fuzzy-AHP Method (Case Study: Zoshk Watershed, Shandiz). Iranian Water Research Journal. 47: 11-22. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13882.2401>

Research paper**Assessing flood susceptibility by adopting remote sensing techniques and Fuzzy-AHP method (Case study: Zoshk watershed, Shandiz)****H. Shamkoueyan¹, K. Davary^{2*} and M. Fereshtehpour³****Extended Abstract**

Natural catastrophes, such as floods, are the leading sources of death and destruction worldwide, costing billions of dollars and affecting countless lives. Stressing and paying attention to the country's vulnerability and, more significantly, the vulnerability of elements at risk of natural catastrophes is an essential feature of development planning. In order to mitigate flood damage, it is important first to pinpoint vulnerable regions and understand the conditions that make them so. In times of crisis, decision makers and managers can weigh the pros and drawbacks for development and implementation of quick-response procedures supported by reliable expert judgments. Weaknesses in documenting and completing organizational archives in registering areas, affected by flood events, have also become the cause of decrease in the acceptability of probabilistic data-driven methods, such as data-mining models for predicting and extracting the flooding pattern in watersheds. Therefore, this research evaluated the spatial flood potential of the Zoshk watershed, Khorasan Razavi, Iran, based on the integrated method of Hierarchical-Fuzzy Analysis (FAHP). Reviewing the literature, it was found that the research gap includes: non-use of the fuzzy integration method-hierarchical analysis as a suitable management method for scenario creation in the study area, and consideration of limited set of factors for flood potential modeling, which hinders the current research.

This study assessed flood susceptibility using the coupled fuzzy-AHP method. The case study was determined Zoshk watershed, Khorasan Razavi, North East of Iran. The applied method incorporated different stages including rate assignment to criteria and sub-criteria based on expertise, fuzzification of rates, fuzzified weight assignment, and ultimately superimposing the layers. In this regard, fifteen thematic maps of different characteristics were generated and used as inputs to the modeling process, included: morphometric (DEM, slope, aspect, planar and profile curvatures, RSP, TRI), topo-hydrologic (flow accumulation, proximity to streams, HAND, TWI, SPI), edaphic (curve number), vegetation (NDVI), and climatic (precipitation) factors. Following the preparation of maps for the factors, they were classified. The inter-factor and intra-factor pairwise comparison matrix was made, using twelve expert's opinions. The experts were selected from research and executive organizations which were familiar with flood issues and the specific situations of the studied basin. The opinions was recorded through a questionnaire. In order to rank the experts opinions, 9-point Saati scale was used. Regarding this scale, the preference range from one (equal preference) to nine (extremely high preference) was applied to determine the pairwise comparison scores. Due to the high

1- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3- Postdoctoral Associate at University of Western Ontario, Canada.

* Corresponding author: k.davary@um.ac.ir

Received: 2022/06/06 Accepted: 2022/09/18

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13882.2401>

irrigation water was 13880 m³/ha. The difference in irrigation water volume between Shiraz and Sepidan was not statistically significant at 5% level. However, the difference between the volume of irrigation water in Kazerun region and the other two regions was more than 4000 m³/ha, which became significant at the level of 1%. By applying 118, 327 and 195 mm of effective rainfall for the three investigated regions, the average amount of applied water in the fields of the three regions was 17028, 18158 and 12457 m³/ha, respectively. The average volume of applied water in the three investigated areas was 16054 m³/ha. In terms of crop yield, the minimum, maximum, and average yield of the product in the three studied areas were about 34, 86, and 58 tons per hectare, respectively. The difference between Shiraz and Sepidan was less than one ton per hectare, which was not significant. However, the yield of Kazerun region was about 16 t/ha less than the yield of Sepidan and Shiraz regions, and these differences were significant at the level of 1%. The productivity of irrigation water in selected onion fields varied from 2.12 to 8.51 kg/m³ and on average was 28.4 kg/m³. The highest and the lowest irrigation water productivity were in Kazerun and Shiraz, respectively. The highest and lowest total water productivity was obtained in Shiraz and Sepidan regions. The difference in irrigation water productivity in the studied areas was not significant at the level of 5%. In Shiraz region, the amount of irrigation water given was 1003 and 723 m³/ha, respectively, less than the annual and long-term gross water requirements, and these differences were not significant at the 5% level. In Sepidan region, these differences were 1460 and 150 m³/ha, respectively, which was not statistically significant at the 5% level. In Kazerun region, the volume of irrigation water was 8427 and 7309 m³/ha, respectively, less than the gross water requirement, and these differences were significant at the 1% level; that means the onion fields in this area did not receive the required water. Generally in the selected onion farms, the volume of irrigation water was less than the annual and long-term gross water-requirement by 3419 and 2511 cubic meters per hectare, respectively, and these differences were significant at the 1% level. Comparison of irrigation water volume with gross water requirement showed that drip irrigation systems were most in line with gross water requirement and on average 5% more irrigation was done. However, in the fields under sprinkler and surface irrigation, 17 and 45% of water was given less than the gross water requirement, respectively. Therefore, the yield in onion fields under surface irrigation was about 28% lower than the yield in fields under drip irrigation system. The difference in irrigation water productivity between drip and surface irrigation systems was not significant.

Keywords: Applied water volume, Irrigation system, Water requirement, Yield.

Citation: Shahrokhnia M. A. Akbari M. and Abbasi F. 2023. Measuring the volume of irrigation water and water productivity of onion fields in three regions of Fars province. Iranian Water Research Journal. 47: 1-10. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13937.2412>

Research paper**Measuring the volume of irrigation water and water productivity of onion fields in three regions of Fars province****M. A. Shahrokhnia^{1*}, M. Akbari² and F. Abbasi³****Extended Abstract**

Onion, similar to most vegetables, is sensitive to inadequate irrigation. Onion has a shallow root and should be irrigated frequently with a small amount. Uniform and constant soil moisture during the growth period is very useful for onion growth. Excessive irrigation, in addition to reducing crop growth, increases costs, wastes water, reduces water productivity, and lessens product storability. Onion is among the important agricultural products in Fars province, Iran. However, little information has been published on the irrigation status and water productivity of onion fields. Knowing the amount of water required for irrigation and the water productivity of onion farms can help national and provincial planners and managers to increase production and save water, more effectively. Therefore, the purpose of this research is to investigate the condition of onion farms in Fars province in terms of the amount of irrigation water and water productivity and the factors affecting them in agricultural conditions.

Yield, irrigation water volume and water productivity were measured and studied in 30 farms in three major onion production regions Shiraz, Sepidan and Kazerun in Fars province. T-test was used for statistical comparison of the obtained results. Three studied areas and three types of surface, sprinkler and drip irrigation systems were considered as experimental treatments. The daily meteorological information needed to estimate the water requirement was obtained from the synoptic weather stations of the regions, using the Penman-Monteith method. Three scenarios were considered to estimate the water requirement of onion: 1- Water demand from the Penman-Monteith method, using the meteorological data of the year of conducting the research (2020); 2- Water demand from the Penman-Monteith method, using the meteorological data of 10 years leading up to the time of the research; 3- Water demand from the National Water Document. The average efficiency of surface, rain and drip irrigation systems was considered to be 60, 75 and 90%, respectively, and the gross water requirement was calculated. The farm water flow rates were measured with suitable instruments. The amount of irrigation water per hectare of the field was obtained by multiplying the amount of field discharge by the total duration of irrigation during the growing season. Finally, by summarizing the results obtained from the difference in yield values, irrigation water and water productivity, suggestions were made to improve onion production and irrigation.

The average volume of onion irrigation water in the three regions Shiraz, Sepidan and Kazerun was 15848, 14888 and 10507 m³/ha, respectively. The average total volume of

1- Associate Professor, Agricultural Engineering Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran..

2- Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

3- Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

* Corresponding Author: m.shahrokhnia@areeo.ac.ir

Received: 2022/07/13

Accepted: 2022/10/10

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13937.2412>

Iranian Water Research Journal

Scientific Journal

Volume 16/ Number 4/ Serial Number 47/ Winter 2023

ISSN (Print): 2008-1235

ISSN (Online): 2345-6655

Proprietor: Shahrekord University

Director in Charge: Nasr-Esfahany M. A.

Editor-in-Chief: Heidarpour M.

CoEditor-in-Chief:: Tabatabaei S. H.

Editorial Board:

Abbasi F.	Irrigation and Drainage	Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Karaj, Alborz, Iran
Eslamian S. S.	Hydrology	Professor, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
Fatahi Nafchi R.	Hydraulic	Associate Professor, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
Ghasemi A. R.	Climatology	Associate Professor, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
Ghazavi R.	Watershed management	Professor, University of Kashan, Kashan, Iran
Heidarpour M.	Hydraulic	Professor, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
Jhajharia D.	Water Resources Engineering	Professor, Central Agricultural University, Nirjuli, India
Kumar R.	Irrigation and Drainage	Professor, Sher-e-Kashmir University of Agricultural Sciences & Technology, Kashmir, India
Mirabbasi R.	Water Resources	Associate Professor, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
Mousavi S.F.	Water Resources	Professor, Semnan University, Semnan, Iran
Pessarakli M.	Soil and Water Relationship	Professor, University of Arizona, Arizona, America
Shayannejad M.	Irrigation and Drainage	Associate Professor, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
Tabatabaei S. H.	Soil and Water Contamination	Associate Professor, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
Zareabyaneh H.	Water Engineering	Professor, Hamadan University, Hamadan, Iran

Manager in Charge: Ghasemi A.

Scientific Editor: Saeedi P. , Abbasi F.

Editor of Persian Language: Savab F.

Editor of English Language: Sharifnia R.

Administrative Executor: Ghorbanizadeh F.

Typesetting: Ghany F.

Publisher: Shahrekord University

Circulation: 200 Copies

Publishing Period: Seasonal

The papers of Iranian Water Research Journal is indexed by:
ISC, SID, Magiran, CIVILICA, Google Scholar

Address: Iranian Water Research Journal, Publication Office for Scientific Journals, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Postal Code: 88186-34141 **P.O.Box:** 115 **Tel:** 038-32324401-7 **Fax:** 038-32321669

Website: <http://iwrj.sku.ac.ir>

E-mail: iwrj@journals.sku.ac.ir

Contents of Research Papers:

Measuring the volume of irrigation water and water productivity of onion fields in three regions of ...	1
M. A. Shahrokhnia, M. Akbari and F. Abbasi	
Assessing flood susceptibility by adopting remote sensing techniques and Fuzzy-AHP method ...	11
H. Shamkoueyan, K. Davary and M. Fereshtehpour	
A model for reliability-based design optimization of detention rockfill dams using self-adaptive ...	23
M. M. Riyahi, H. Riahi-Madvar and I. Bahrami Chegeni	
Evaluation of the Karstification of Dimeh and Pirghar karst systems based on spring hydrograph ...	41
F. Geravand, S. M. Hosseini, M. Maghsoud, M. Yamani and R. Lak	
Improving accuracy in snow depth modeling based on the effectiveness of selecting index ...	57
M. Asefi and A. Fathzadeh	
Refinement of urban wastewater using <i>Vetiveria zizanioides</i> L. and <i>Canna indica</i> plants	69
M. Mohammadi Deylamani, M. Momen Zadeh, S. Hajipour and M. Afshar Mohammadian	
The effect of rice husk biochar application and different levels of irrigation regimes on matric ...	81
T. Jamili, A. Alinejadian Bidabadi, A. Maleki, M. Feizian and O. A. Akbarpour	
The effect of periodic and flood irrigation methods on yield and irrigation water productivity of ...	93
M. Rahimi pool, D. Akbari nodehi, R. Asadi, A. Bagheri and F. Shirdel-shahmiri	
Investigation of the effect of Cadmium pollution and irrigation with magnetized water on the ...	103
E. Jafari Hafshajani, M. Hoodaji, F. Ghanati, Y. Hosseini and V. Alipour	
Batch removal of Pb (II) and Cd (II) from aqueous solutions using multi-wall carbon nanotubes	115
M. J. Amiri, S. Jamali and H. Zanganeh	