

## مدل‌سازی احتمالاتی شدت و مدت بارش برای مکان‌یابی تغذیه مصنوعی در دشت رفسنجان

مهدی کاشیان<sup>۱</sup>، محمود شفاعی بجمستان<sup>۱،۲\*</sup> و حسین ابراهیمی<sup>۱،۳</sup>

### چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، خشکسالی و افزایش جمعیت، حجم آب ذخیره‌شده در سفره‌های زیرزمینی را به شدت کاهش داده است. هدف اصلی مطالعه حاضر، تحلیل فراوانی هیدرولوژیکی دومتغیره برای ایجاد رابطه بین بارندگی و نوسانات آب زیرزمینی است. حداکثر بارندگی سالانه و شدت بارش در نقطه اوج هیدروگراف دو سری از اطلاعاتی بودند که برای تحلیل فراوانی هیدرولوژیکی دومتغیره استفاده شدند. این سیستم چندمتغیره متشکل از مدل‌سازی احتمالی ویژگی‌های بارندگی با هدف تعیین شدت و عمق بارندگی در دوره بازگشت چندساله توسعه یافته است. خروجی به‌دست‌آمده از مدل احتمالاتی برای اعمال تنش بر آبخوان در جهت تغذیه مصنوعی سطحی در دشت رفسنجان استفاده شد. پیاده‌سازی فرایندهای ذکرشده برای مدل احتمالی به‌صورت کدنویسی در نرم‌افزار متلب انجام شد و برای شبیه‌سازی تغذیه مصنوعی نرم‌افزار GMS 10.6 به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که تغذیه مصنوعی بارندگی با شدت تخمین‌زده‌شده از یک دوره بازگشت ۱۰ ساله می‌تواند یکی از راه‌حل‌های تعادل‌بخشی آب‌های زیرزمینی باشد. بارندگی با دوره بازگشت ۵۰ ساله سطح آب زیرزمینی را به‌طور متوسط حدود ۱۷۰ سانتی‌متر در محل تغذیه افزایش داد. همچنین مقادیر شعاع تأثیر بیش از ۵ کیلومتر در مسیر جریان به‌دست آمده است.

**واژه‌های کلیدی:** منابع آب زیرزمینی، تغذیه مصنوعی، عدم قطعیت احتمالی، هدایت هیدرولیکی.

**ارجاع:** کاشیان م. شفاعی بجمستان م. و ابراهیمی ح. ۱۴۰۲ مدل‌سازی احتمالاتی شدت و مدت بارش برای مکان‌یابی تغذیه مصنوعی در دشت رفسنجان. مجله پژوهش آب ایران. ۴۸: ۹۵-۱۰۵. <https://dx.doi.org/10.22034/TWRJ.2022.13974.2431>

۱- گروه مهندسی عمران، واحد بین‌الملل کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران.

۲- دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- گروه علوم و مهندسی آب، واحد شهربند، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

\* نویسنده مسئول: [m-shafaeibejestan@scu.ac.ir](mailto:m-shafaeibejestan@scu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۴

## مقدمه

یکی از مهم‌ترین اهداف تحلیل رویدادهای هیدرولوژیکی، ارزیابی تأثیر آن بر ذخیره آب زیرزمینی (لاله‌زاری و کراچیان، ۲۰۲۱؛ تائو و همکاران، ۲۰۲۱، کراچیان و همکاران، ۲۰۲۰) و طراحی سازه‌های هیدرولیکی (رحیمی و همکاران، ۲۰۲۱) است. در تجزیه و تحلیل رویدادهای هیدرولوژیکی، به‌طور گسترده‌ای از تکنیک‌های احتمالی استفاده شده است که نتایج نشان داده است که برآورد دوره بازگشت و توابع ریسک توسعه یافته می‌تواند در ارزیابی پروژه‌های مرتبط با هیدرولوژی مؤثر باشد (بازرگان لاری و همکاران، ۲۰۱۹؛ بنی‌بیات و همکاران، ۲۰۲۱).

عدم قطعیت هیدرولوژیکی به‌طور معمول در قالب مدل‌های احتمالی است و منجر به تولید متغیرهایی با تخمین رویداد چندساله می‌شود. رحیمی و همکاران (۲۰۲۱) توابع هیدرولوژیکی را با استفاده از تحلیل فراوانی توزیع کلایتون و شبیه‌سازی مونت کارلو بررسی کردند. بنی‌بیات و همکاران (۲۰۲۱) با مقایسه محدودیت‌های روش احتمالی و نظریه شواهد نشان دادند که نظریه شواهد در مواجهه با عدم قطعیت ذهنی بیشتر از روش احتمالی راه‌حل‌های منطقی ارائه کرده است.

فراوانی هیدرولوژیکی تک‌متغیره نقش حیاتی در تخمین تکرار سیل یا بارندگی دارد که برای طراحی سازه‌هایی مانند پل‌ها، پایه پل‌ها، سدها، بزرگراه‌ها، نقشه‌های مناظر و ساختمان‌های صنعتی استفاده می‌شود. احتمال یک رویداد معین را می‌توان با استفاده از روش تحلیل فراوانی هیدرولوژیکی تک‌متغیره تخمین زد، سپس مقدار بارندگی یا سیل با دوره بازگشت چندساله را برآورد کرد.

دوره‌های بازگشت تک‌متغیره به‌طور سنتی با برازش یک تابع توزیع احتمال به مشاهدات تاریخی، مانند سری‌های حدی هیدرولوژیکی برآورد می‌شوند. روش‌های تجزیه و تحلیل فراوانی هیدرولوژیکی عمدتاً شامل دو مرحله انتخاب توزیع حاشیه‌ای مناسب و تخمین پارامترهای توزیع انتخاب شده است. توزیع برای تجزیه و تحلیل هیدرولوژیکی تک‌متغیره توسط بسیاری از محققان مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. تابع مفصل

چندمتغیره قادر به نمایش ساختار وابستگی بین دو یا چند متغیر تصادفی است؛ بنابراین به‌عنوان یک روش عملی و کارآمد برای مدل‌سازی وابستگی کلی در داده‌های چندمتغیره به‌کار گرفته شده است. مزایای استفاده از این توابع برای مدل‌سازی توزیع‌های مشترک بسیار زیاد است: ۱- انعطاف‌پذیری در انتخاب حاشیه دلخواه و ساختار وابستگی، ۲- گسترش بیش از دو متغیر، و ۳- تجزیه و تحلیل مجزا از توزیع‌های حاشیه و ساختار وابستگی.

علاوه بر این، در زمینه مطالعات هیدروژئولوژیکی در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی برای بررسی برخی از جنبه‌های خاص شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی در موضوعاتی مانند بهینه‌سازی بهره‌برداری، تغذیه مصنوعی، سد زیرزمینی، شبیه‌سازی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی و مطالعات اقتصادی عرضه و تقاضای آب انجام شده است (سلووم و همکاران، ۲۰۱۶؛ مکی و لطف‌اللهی، ۲۰۱۶؛ لاله‌زاری و همکاران، ۲۰۲۰؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۱). تغییر الگوی بهره‌برداری به‌منظور افزایش بهره‌وری و کاهش برداشت از آب‌های زیرزمینی در دشت‌های ایران تأثیر مثبتی بر بیلان آبی داشته است. برخی از استراتژی‌های مدیریتی، مانند جابه‌جایی چاه، توانسته‌اند افت سطح ایستابی را کاهش دهند.

شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب نقش مؤثری در بررسی اثرات خشکسالی و تعیین محدودیت‌های زمانی و مکانی مدیریت آب دارد. در این راستا مدل‌های شبیه‌سازی متعددی برای تحلیل و ارزیابی طرح‌ها و سیاست‌های مدیریت منابع آب توسعه یافته‌اند. لاله‌زاری و همکاران (۲۰۱۴) اثر تغذیه مصنوعی بر افزایش حجم آب موجود در آبخوان شهرکرد را با استفاده از شبیه‌سازی عددی و پارامترهای هدایت هیدرولیکی، آبدی ویژه و تغذیه واسنجی کردند. همچنین لاله‌زاری و طباطبایی (۲۰۱۵) به بررسی ساخت سازه زیرزمینی و مدیریت آب‌های زیرزمینی با رویکرد حفظ کیفیت آب پرداختند. جوادی و همکاران (۲۰۲۰) از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی برای یافتن مناطق مناسب برای ساخت سازه‌های تغذیه مصنوعی در دشت یاسوج استفاده کردند.

سانتیگراد گزارش شده و متوسط بارندگی و تبخیر از سطح آن نیز به ترتیب ۲۱۵ و ۳۸۴ میلی‌متر در سال است. سه دشت رفسنجان، نوق و انار در این منطقه قرار دارند که رودخانه دائمی ندارد. حجم منابع آب زیرزمینی در منطقه رفسنجان حدود ۴۳۰ میلیون مترمکعب برآورد شده است که سالانه حدود ۱۹۰ میلیون مترمکعب از آن توسط ۱۲۸۹ حلقه چاه موجود تخلیه می‌شود.

این تحقیق از دو بخش شبیه‌سازی جریان در آبخوان و تحلیل هیدرولوژیکی عامل بر آبخوان تشکیل شده است. نخست به معرفی و ارزیابی جریان آب زیرزمینی و تغذیه مصنوعی پرداخته می‌شود و سپس روش تحلیل هیدرولوژیکی تشریح خواهد شد.

### تغذیه مصنوعی

هشت مکان برای ساخت سازه‌های تغذیه مصنوعی سطحی که می‌توانند بارندگی و رواناب بالادست را جمع‌آوری کنند، انتخاب شد. شکل ۱ و جدول ۱ موقعیت و مشخصات این نقاط را نشان می‌دهد. شیب سطحی و گرادیان هیدرولیکی از مؤلفه‌های تأثیرگذار در حرکت و نفوذ آب هستند که با استفاده از نقشه توپوگرافی و جدول آب برآورد شدند. حجم تقاضای آب براساس بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی سالانه در منطقه هر نقطه برآورد شده است. همچنین اولویت تأمین آب براساس جمعیت ساکن در هر منطقه تعیین شد.

برای ایجاد یک سیستم یکپارچه، لازم است یک ساختار به هم پیوسته از مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی ایجاد شود. این سیستم تعاملات بین بارندگی و آب‌های زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌کند. راه‌حل اصلی سازه پیشنهادی آنالیز احتمال هیدرولوژیکی، مدل‌سازی آب زیرزمینی و شبیه‌سازی تعامل بین بارندگی و سطح آب است.

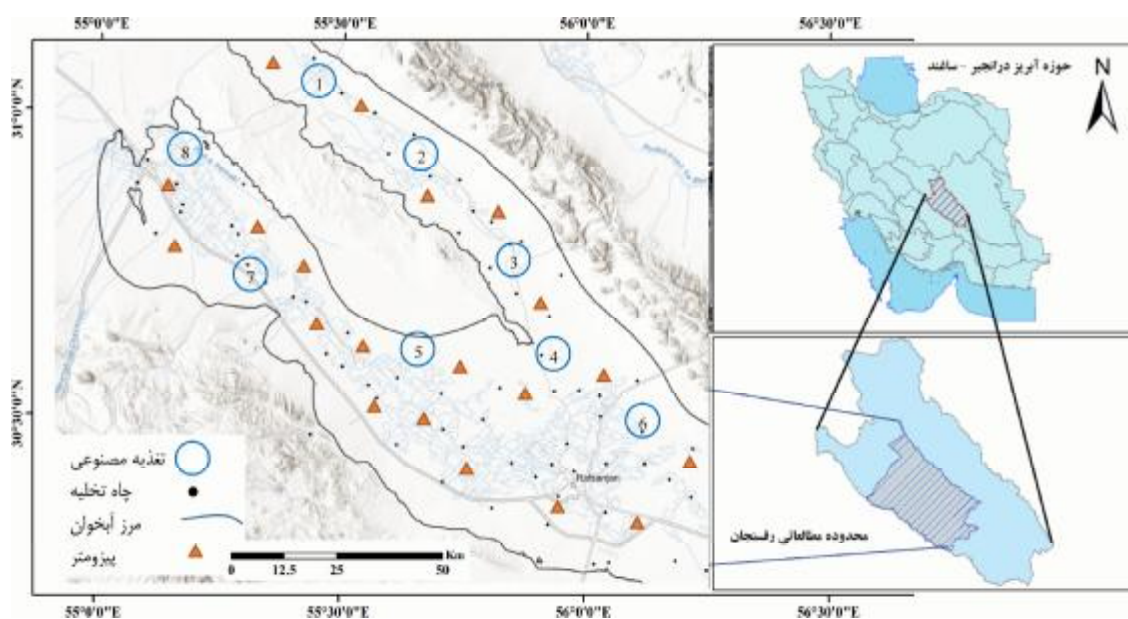
استخراج نتایج یک مدل احتمالی یک پدیده و کاربرد آن در فرایند شبیه‌سازی، چارچوبی از مدل‌سازی را برای یافتن نقاط، مقادیر یا مکان‌های بهینه ایجاد می‌کند. ترکیب مدل‌های غیرقطعی با سیستم آب زیرزمینی ابزار مفیدی برای تصمیم‌گیری مناسب است و توانایی تصمیم‌گیری را افزایش می‌دهد، مدیریت کمی و کیفی منابع را بهبود می‌بخشد و انعطاف‌پذیری بیشتری برای در نظر گرفتن سناریوهای مختلف می‌دهد. کاربرد این روش در منابع آبی به‌ویژه در شرایط خشکسالی (دلاور و همکاران، ۲۰۱۷) و در شناسایی منابع آب بحرانی (مریتن و همکاران، ۲۰۱۷)، تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب (هارالد و همکاران، ۲۰۱۸) و مدیریت آب در فرایند تخصیص (بارساپورمقدم و همکاران، ۲۰۱۵؛ اسچالز و همکاران، ۲۰۲۰) موفق بوده است.

بنابراین در این تحقیق چارچوب یک مدل تصمیم‌گیری چندمتغیره احتمالی مبتنی بر اطلاعات بلندمدت بارندگی و استخراج متغیرهای مؤثر در تغذیه آبخوان در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر، روابط و محدودیت‌های حاکم بر شدت و مقدار بارش با تأکید بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان و همچنین استفاده از سامانه به‌روزرسانی اطلاعات لحظه‌ای، مدل تصمیم‌گیری برای طراحی ساختار تغذیه مصنوعی سطحی توسعه داده شده است. تفاوت اصلی که در این تحقیق در برنامه‌ریزی احتمالی بارندگی به‌عنوان یک هدف بلندمدت برای پایداری مدیریت منابع آب در نظر گرفته شده است، توصیف شرایط و محدودیت‌های ویژه آبخوان است.

### مواد و روش‌ها

#### محدوده مطالعه

دشت رفسنجان در ۱۱۰ کیلومتری کرمان دارای آبخوان نامحدود به وسعت ۴۱۰۸ کیلومترمربع است. این دشت در محدوده جغرافیایی ۳۴ درجه و ۵۶ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۳۱ دقیقه عرض شمالی در ارتفاع ۱۴۰۰ تا ۳۴۴۳ متری از سطح دریا و در شمال شرقی استان کرمان واقع شده است (شکل ۱). بیشینه و کمینه دمای هوا در دشت رفسنجان به ترتیب ۴۲ و ۱۱ درجه



شکل ۱- دشت رفسنجان در استان کرمان، ایران

ازدحام ذرات، کلونی مورچه‌ها و بهینه‌ساز گرگ خاکستری.

شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی در سفره آب دشت رفسنجان از سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۹ با استفاده از ۳۵ داده پیزومتر فعال انجام شد. ۱۷ سال اول برای واسنجی و ۴ سال آخر برای صحت‌سنجی استفاده شد. دوره‌های تنش فصلی و مراحل زمانی روزانه برای محاسبات در نظر گرفته شد.

GMS10.6 یک نرم‌افزار مدل‌سازی عددی آب زیرزمینی و شامل چندین بسته نرم‌افزاری است که هر کدام بخشی از یک سیستم جریان را در محیط متخلخل شبیه‌سازی می‌کنند. در این تحقیق از MODFLOW (version?) مدل تقاضا محدود سه‌بعدی جریان ناپایدار در محیط‌های متخلخل اشباع، غیراشباع، ناهمگن و غیرایزوتروپ برای تعیین خواص فیزیکی و هیدرولیکی آبخوان در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. این مدل به دلیل عملکرد مطمئن و بررسی شرایط مختلف عملیاتی روی سیستم، مهم‌ترین نرم‌افزار برای محققان بوده است. شبیه‌سازی توسط این نرم‌افزار به دلیل استفاده از داده‌های ورودی مختلف از دقت و نتایج مطلوبی برخوردار بوده و امروزه در اکثر نقاط جهان برای تعیین چگونگی و پیش‌بینی نوسانات منابع آب کاربرد فراوانی دارد.

جدول ۱- مکان‌های تغذیه مصنوعی، نیازها و اولویت‌ها

موقعیت	محل	استخراج آب (میلیون مترمکعب)	اولویت	شیب
۱	حسین‌آباد	۵/۲	۷	۰/۰۰۷
۲	بهرمان	۹	۶	۰/۰۰۴
۳	رحمت‌آباد	۷/۱	۸	۰/۰۰۶
۴	عباس‌آباد	۲۴/۹	۱	۰/۰۰۲
۵	بهشت‌آباد	۹/۵	۵	۰/۰۰۴
۶	رفسنجان	۱۸/۵	۲	۰/۰۰۰۶
۷	بیاض	۱۲/۷	۴	۰/۰۱۱
۸	انار	۱۴/۸	۳	۰/۰۰۰۹

### مدل سازی آب های زیرزمینی

مدل‌های شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی دارای پیچیدگی‌های هیدرولوژیکی، فنی و اقتصادی زیاد و نیازمند راه‌حلهایی برای دستیابی به بهترین نتایج با دقت قابل قبول هستند (پارساپور مقدم و همکاران، ۲۰۱۵؛ مدنی و دینار، ۲۰۱۳؛ لاله‌زاری و کراچیان، ۲۰۲۰). این ساختارها با پیوند دادن به مدل‌های احتمالی، شرایط را برای توسعه برنامه‌ریزی بهینه و دستیابی به حداکثر بهره‌وری فراهم می‌کنند. این‌ها شامل الگوریتم‌های فراابتکاری هستند که رایج‌ترین نمونه‌های آن‌ها عبارت‌اند از الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی آنیلینگ، بهینه‌سازی

تصادفی و چندمتغیره هستند و با ویژگی‌های شدت، مدت و بزرگی بیان می‌شوند. این ویژگی‌ها به یکدیگر وابسته هستند، مستقل از یکدیگر تغییر نمی‌کنند و هریک بر دیگری تأثیر می‌گذارد.

بنابراین، با تجزیه و تحلیل پدیده‌های هیدرولوژیکی به صورت تک‌متغیره، نمی‌توان معادله همبستگی بین ویژگی‌های آن را نشان داد و ارزیابی کامل و دقیقی از آن ارائه داد؛ از همین رو برای داده‌های هیدرولوژیکی باید توابع احتمالی مناسبی تعیین شود تا بتوان مقدار متغیر مورد نظر را برای احتمالات مختلف محاسبه کرد که به آن تحلیل عدم قطعیت هیدرولوژیکی می‌گویند.

یکی از مهم‌ترین مراحل در تجزیه و تحلیل توزیع فراوانی و برازش داده‌ها، آزمون برازندگی توابع احتمال است. برای این منظور، آزمون‌های مبتنی بر توزیع تجربی، تفاوت بین تابع توزیع فرض شده صفر و تابع توزیع آزمایشی را اندازه‌گیری می‌کنند. در این تحقیق برای تعیین توابع توزیع تک‌متغیره، از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. پس از انتخاب بهترین توابع توزیع تک‌متغیره، همبستگی بین متغیرها محاسبه شد. سپس تابع مفصل ترکیب توزیع‌های تک‌متغیره را برای ساختن یک توزیع چندمتغیره با در نظر گرفتن همبستگی بین متغیرها ممکن کرد. در واقع تابع مشترک یک تابع توزیع تجمعی است که دارای توزیع‌های حاشیه‌ای یک متغیر یکنواخت است.

در تحلیل تک‌متغیره، توابع توزیع رایج شامل لوگ نرمال، نرمال، گاما، مقادیر حدی تعمیم یافته، لوگ پیرسون، گامبل، لوگ لوجیستیک، ویبول، گوسی معکوس و پارتو تعمیم یافته به مقادیر متغیرهای بارندگی برازش داده شده‌اند؛ علاوه بر این، سری ماکزیمم سالانه شامل حداکثر شدت و ارتفاع بارش سالانه برای یک دوره ۳۵ ساله منتهی به سال ۱۴۰۰ از ایستگاه هواشناسی رفسنجان تهیه شده است. سپس توابع مفصل دومتغیره ارزیابی و براساس آزمون برآورد حداکثر درست‌نمایی تابع علی-میخائیل-حق به عنوان بهترین تابع مشترک برای سری داده‌های بارندگی گزینش شد. همچنین تخمین ضریب همبستگی قبل از اعمال تابع مفصل توسط ضریب

اولین گام، مدل‌سازی مفهومی است که منجر به شناسایی منطقه و تهیه اطلاعات و نقشه‌های اولیه می‌شود. به منظور شناسایی و برآورد شرایط فیزیکی و مساحت دشت، داده‌های توپوگرافی آبخوان پس از رقوم‌سازی به مدل وارد و مرزهای دشت براساس این نقشه و خطوط هم‌تراز جریان آب تعیین شدند. منابع تغذیه آبخوان شامل بارندگی، آب‌های زیرزمینی ورودی از مرزها و جریان برگشتی از مصرف بود؛ علاوه بر این، زهکشی، قنات، چشمه و آب‌های زیرزمینی منابع تخلیه بودند. ارتباط هیدرولیکی آبخوان با سفره‌های زیرزمینی در بازدهی‌های منطقه‌ای و همچنین سطح آب زیرزمینی تعیین شد.

برای شبیه‌سازی مدل جریان آب زیرزمینی، هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی، آبدی ویژه، تغذیه سطحی و ارتفاع سطح ایستابی در مرزهای ورودی/خروجی کالیبره شد. ارزیابی خطا بین مقادیر مشاهده شده و برآورد شده با ریشه میانگین مربعات خطا (معادله (۱)) و ضریب جرم باقیمانده (معادله (۲)) انجام شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_s - x_o)_i^2}{n}} \quad (1)$$

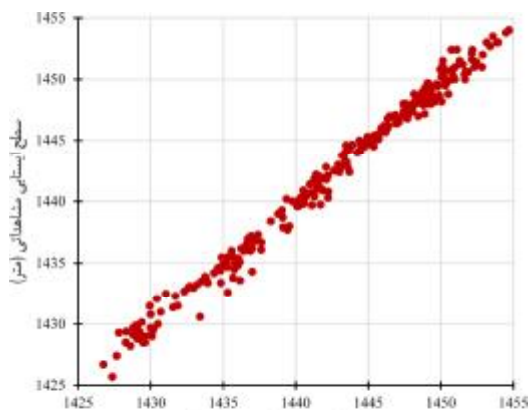
$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n x_o - \sum_{i=1}^n x_s}{\sum_{i=1}^n x_o} \quad (2)$$

که در آن  $x_s$ ،  $x_o$  به ترتیب سطح ایستابی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در هر دوره تنش،  $x_s$  و  $x_o$  به ترتیب میانگین این مقادیر هستند و  $n$  تعداد دوره‌های تنش است. ضریب جرم باقیمانده که بیانگر بیش برآوردی یا کم‌برآوردی مدل نسبت به مقادیر واقعی است، به ترتیب با علائم مثبت و منفی محاسبه می‌شود.

### تجزیه و تحلیل احتمالاتی بارش

مشکل اصلی که باعث ایجاد خطا در مدل‌های هیدرولوژیکی گذشته شده است، استفاده از مدل‌های احتمالی تک‌متغیره برای پیش‌بینی رویدادها بوده است؛ اما امروزه نشان داده شده است که پدیده‌های هیدرولوژیکی مانند بارش، رواناب، سیل و خشکسالی،

است. مقایسه بیشتر در محل های تغذیه مصنوعی در جدول ۲ آمده است. مطابق با جدول، بیشترین مجذور میانگین مربعات خطا در مرحله واسنجی مربوط به نقطه ۵ با حدود ۴۰ سانتی متر اختلاف در پیش بینی بوده است که با توجه به ضریب جرم باقیمانده دچار بیش برآوردی شده است. کمترین خطا در مجموع نتایج واسنجی و صحت سنجی به نقطه ۸ - در مجاورت شهر راور - تعلق دارد که به دلیل نزدیکی به پیژومتر و فاصله داشتن از اراضی کشاورزی تخمین زده شده است.



شکل ۲- نمودار پراکندگی سطح ایستابی شبیه سازی شده (متر) مشاهده شده در فرایند واسنجی

همبستگی کندال انجام شد. برای ارزیابی برازش توابع مفصل از ریشه میانگین مربعات خطا، معیارهای اطلاعات بیزی و معیار اطلاعات آکائیک به عنوان سه روش رایج استفاده شد. جزئیات این روش ها در مطالعه رحیمی و همکاران (۲۰۲۱) وجود دارد. این معیارها را می توان با محاسبه حداکثر احتمال یا با محاسبه میانگین مربع خطای مدل به دست آورد. تابع مفصل با مقادیر ضرایب کوچک تر بهتر است؛ از این رو این سه مقدار می توانند در انتخاب تابع نقش راهنما داشته باشند.

## نتایج و بحث

### واسنجی و صحت سنجی

ارتفاع سطح ایستابی شبیه سازی شده در فاز واسنجی با مقادیر مشاهده شده در دوره تنش از سال ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۷ در شکل ۲ مقایسه شده است. دقت واسنجی در نقاط میانی دشت بیشتر از نواحی نزدیک به ورودی و خروجی هیدرولیکی است. در وسط آبخوان تعادل آب، نوسانات مصرف و تنش های محیطی کمتر بوده و واسنجی با دقت بیشتری انجام خواهد شد؛ اما در نقاط ورودی و خروجی دشت به دلیل تبادل هیدرولیکی آبخوان و وجود منابع مصرف شهری، صنعتی و کشاورزی که در شکل ۱ نشان داده شده است، پیش بینی سطح ایستابی پیچیده تر شده

جدول ۲- مقادیر خطا در محل های تغذیه مصنوعی در مرحله واسنجی

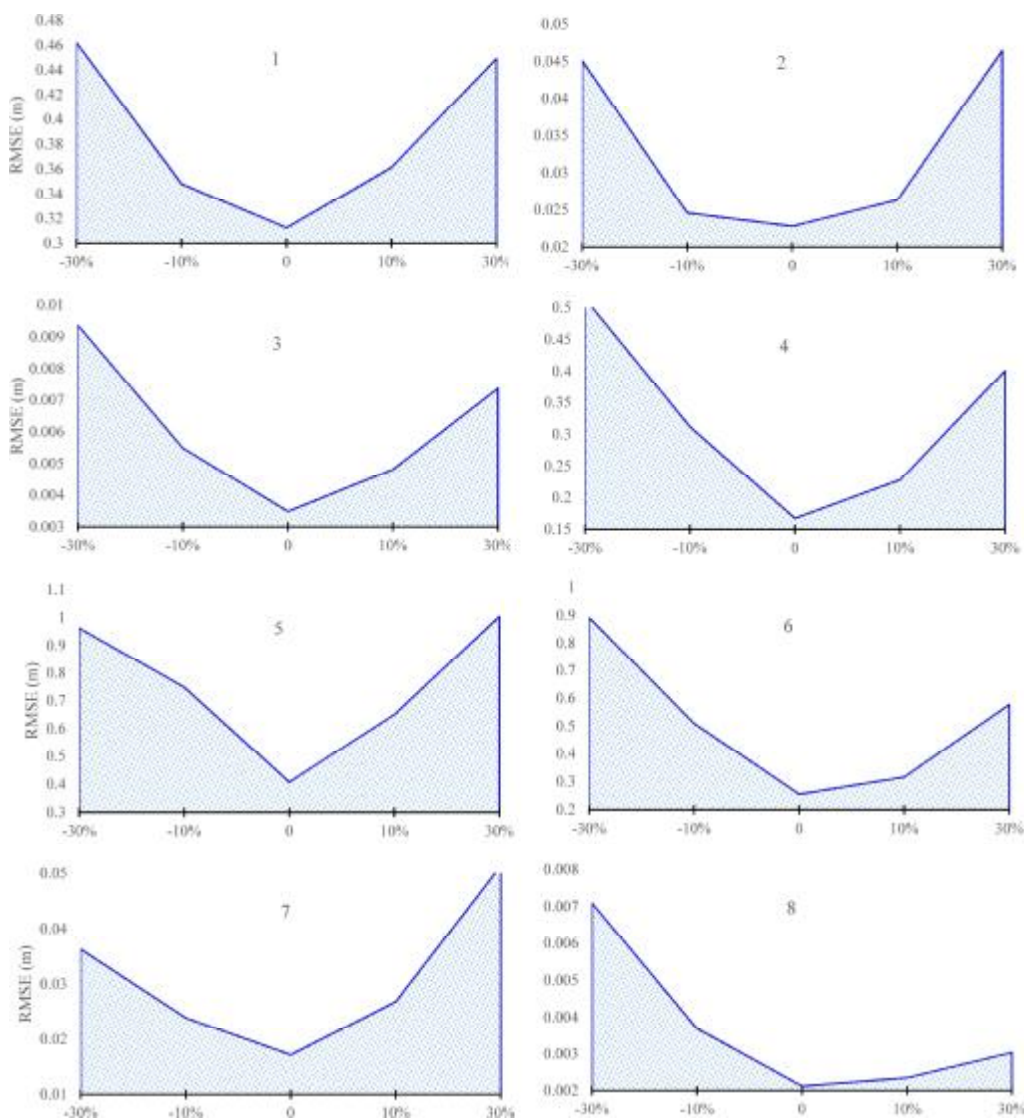
نقاط تغذیه مصنوعی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
مجذور میانگین مربعات خطا (متر)	۰/۳۱۲	۰/۰۲۳	۰/۰۰۳	۰/۱۱۷	۰/۴۱	۰/۲۵	۰/۱۱۷	۰/۰۰۲
ضریب جرم مانده	-۰/۵۶	-۰/۱۵	-۰/۰۶	-۰/۴۱	۰/۶۴	-۰/۵۱	-۰/۱۳	۰/۰۵
مجذور میانگین مربعات خطا (متر)	۰/۹۰۳	۰/۲۰۷	۰/۰۴۶	۰/۱۶	۱/۰	۰/۹۵	۰/۶۳	۰/۰۳
ضریب جرم مانده	-۰/۹۵	-۰/۴۶	-۰/۲۱	-۰/۴۰	۰/۷۰	۰/۹۷	۰/۷۹	۰/۱۶

درصدی هدایت هیدرولیکی در نقاط تغذیه مصنوعی در شکل ۳ نشان داده شده است. نقاط ۳، ۴، ۶ و ۸ به کاهش برآورد هدایت هیدرولیکی واکنش بیشتری نشان دادند؛ بنابراین اگر هدایت هیدرولیکی در مرحله واسنجی از مقدار مشاهده شده بیشتر شود، خطای مدل در محاسبه حجم ورودی سطحی به آب های زیرزمینی افزایش می یابد. حساسیت نقطه ۲ در نقاط بحرانی ۱۰ درصد، تغییر زیادی در محاسبات ایجاد نمی کند؛ اما در سطح ۳۰ درصد خطای مدل را به بیش از ۹۰ درصد افزایش داده است.

نقاط انتخاب شده برای تغذیه مصنوعی دارای قابلیت های هیدرولیکی متفاوتی هستند؛ بنابراین، تأثیر هر یک از متغیرهای بارندگی بر تأمین آب زیرزمینی باید به طور جداگانه ارزیابی شود. جدول ۳ مقادیر کالیبره شده هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه را در ۸ نقطه انتخاب شده نشان می دهد. علاوه بر این، حساسیت مدل توسعه یافته به تغییرات هدایت هیدرولیکی کالیبره شده باید ارزیابی شود. این ارزیابی میزان خطای ناشی از مرحله واسنجی را مشخص می کند. خطای تخمینی تغییرات ۱۰ و ۳۰

جدول ۳- ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان رفسنجان

نقاط تغذیه مصنوعی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
هدایت هیدرولیکی افقی (متر بر روز)	۷/۲	۸/۴	۸/۵	۱۰/۳	۱۰/۱	۱۲/۷	۷/۹	۷/۴
نسبت هدایت هیدرولیکی افقی به عمودی	۸/۹	۶/۸	۹/۳	۶/۴	۵/۹	۸/۸	۹/۴	۷/۱
آبدهی ویژه	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۱/۰۱۱	۰/۰۱	۰/۰۱۴	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷

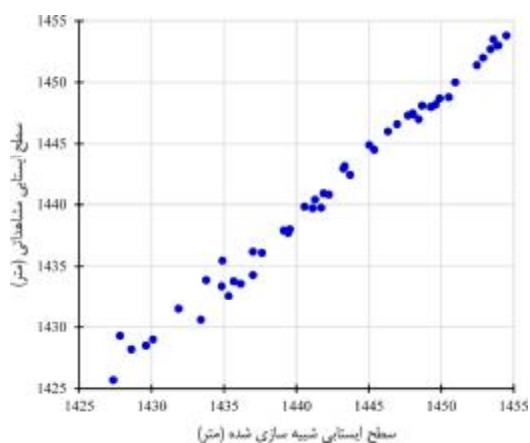


شکل ۳- تحلیل حساسیت هدایت هیدرولیکی در نقاط تغذیه مصنوعی

### آنالیز هیدرولوژیکی

توابع حاشیه‌ای مناسب برای تحلیل فراوانی تک‌متغیره براساس شاخص کولموگروف-اسمیرنوف انتخاب شدند. کمترین مقدار به‌دست‌آمده برای شاخص ارزیابی نشان‌دهنده بهترین برازش برای پیش‌بینی متغیرهای بارندگی است؛ بنابراین پس از برازش حداکثر شدت و عمق بارش سالانه، توابع لوگ پیرسون و گاما به‌ترتیب

صحت‌سنجی مدل جریان از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ همان روند واسنجی را داشت (شکل ۴). نتایج مطالعات قبلی نشان داده است که برآورد ضرایب هیدرودینامیکی در دوره تنش ماهانه یا فصلی می‌تواند خطای کمتری در دوره صحت‌سنجی داشته باشد (لاله‌زاری و همکاران، ۲۰۱۴). تغییرات فصلی در مصرف آب و تأثیر جبهه خروجی باعث کاهش دقت مدل در شهر رفسنجان شده است.



شکل ۴ - مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و اندازه‌گیری شده سطح ایستابی برای صحت‌سنجی مدل

بهترین نتایج را داشتند (جدول ۴). علاوه بر این، روش مقادیر حدی تعمیم‌یافته می‌تواند یک روش رایج برای تخمین هر دو ویژگی بارش باشد. در مطالعات مشابه، روش مقادیر حدی تعمیم‌یافته یک گزینه پیشنهادی برای بارندگی و سیل بوده است (رحیمی و همکاران، ۲۰۲۱). تناسب توابع مشترک با دخالت توابع توزیع حاشیه‌ای در جدول ۳ مقایسه شده‌اند. حداقل مقدار محاسبه شده برای هر یک از شاخص‌ها، معیار اولویت و نشان‌دهنده تناسب با کمترین خطای اطمینان است. علاوه بر این، در شکل ۵ مقایسه‌ای برای دستیابی به یک شاخص اطمینان برای انتخاب عملکرد مفصل مناسب، ارائه شده است؛ بنابراین مطابق با جدول ۵ و شکل ۶، تابع علی-میخائیل-حق تابع فراوانی دومتغیره مناسب برای تخمین ویژگی‌های بارندگی بود.

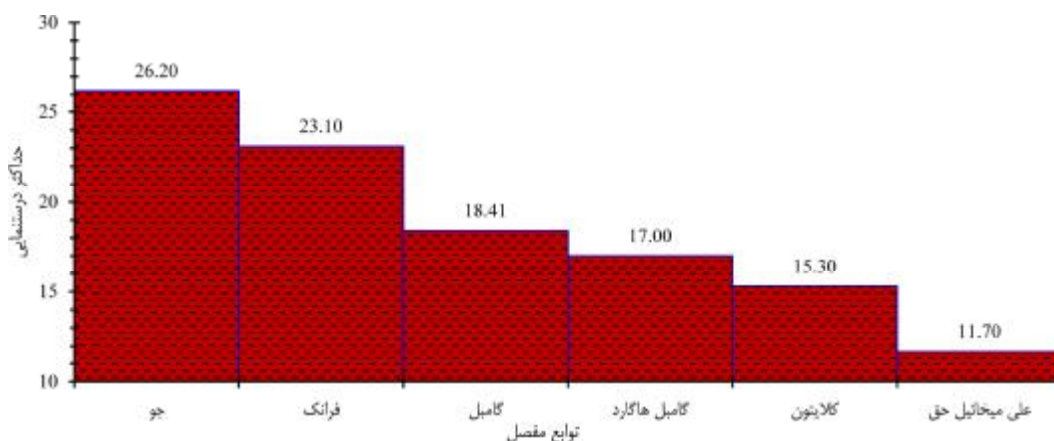
جدول ۴ - رتبه‌بندی توابع حاشیه‌ای توسط کولموگروف - سمیرنوف

عمق			شدت		
مقدار	تابع	رتبه	مقدار	تابع	رتبه
۰/۰۳۷	گاما	۱	۰/۰۴۵	لوگ پیرسون	۱
۰/۰۴۲	لوگ نرمال	۲	۰/۰۴۶	مقادیر حدی تعمیم‌یافته	۲
۰/۰۴۷	مقادیر حدی تعمیم‌یافته	۳	۰/۰۵۳	لوگ لوجستیک	۳
۰/۰۵۶	گوسی معکوس	۴	۰/۰۶۲	گاما	۴
۰/۰۷۸	لوگ پیرسون	۵	۰/۰۷۱	لوگ نرمال	۵
۰/۰۹۹	گامیل	۶	۰/۰۹۸	نرمال	۶
۰/۱۱۴	لوگ لوجستیک	۷	۰/۱۰۹	ویبول	۷
۰/۱۲۶	پارتو تعمیم‌یافته	۸	۰/۱۷۳	گوسی معکوس	۸
۰/۱۵۷	نرمال	۹	۰/۲۰۴	گامیل	۹
۰/۱۸۴	ویبول	۱۰	۰/۳۱۲	پارتو تعمیم‌یافته	۱۰

جدول ۵ - مقایسه توابع چندمتغیره

معیار اطلاعات بیزی	معیار اطلاعات آکائیک	حداکثر درست‌نمایی	تابع
-۷۳/۵	-۷۴/۷	۱۴/۷	کلایتون
-۶۸/۳	-۶۶/۳	۱۸/۸۳	فرانک
-۶۴/۹	-۶۴/۶	۲۱/۰۳	جو
-۷۰/۸	-۶۸/۲	۱۸/۰۲	گامیل
-۷۲/۶	-۷۱/۱	۱۵/۴۱	گامیل-هاگارد
-۷۴/۵	-۷۷/۱	۱۲/۳۵	علی-میخائیل-حق





شکل ۵- مقایسه توابع مفصل دومتغیره

هریک از نقاط از پیش تعیین شده در شکل ۱ است. نتایج نشان داد که حداکثر عمق بارندگی در یک رویداد با دوره بازگشت ۵۰ ساله حدود ۱۰۱ میلی‌متر خواهد بود؛ درحالی‌که تابع مفصل یک رویداد را با ۹۶/۵ میلی‌متر یا ۴۴ میلی‌متر در روز در همان دوره بازگشت تخمین زده است.

### دوره بازگشت بارش

خروجی مدل احتمالی برای کاربرد در سیستم شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی، مقادیر شدت و عمق بارندگی در دوره‌های بازگشت مختلف است (جدول ۶). به عبارت دیگر مقادیر پیش‌بینی‌شده در جدول، مبنای طراحی ساختار تغذیه مصنوعی و معیاری برای مقایسه بازده

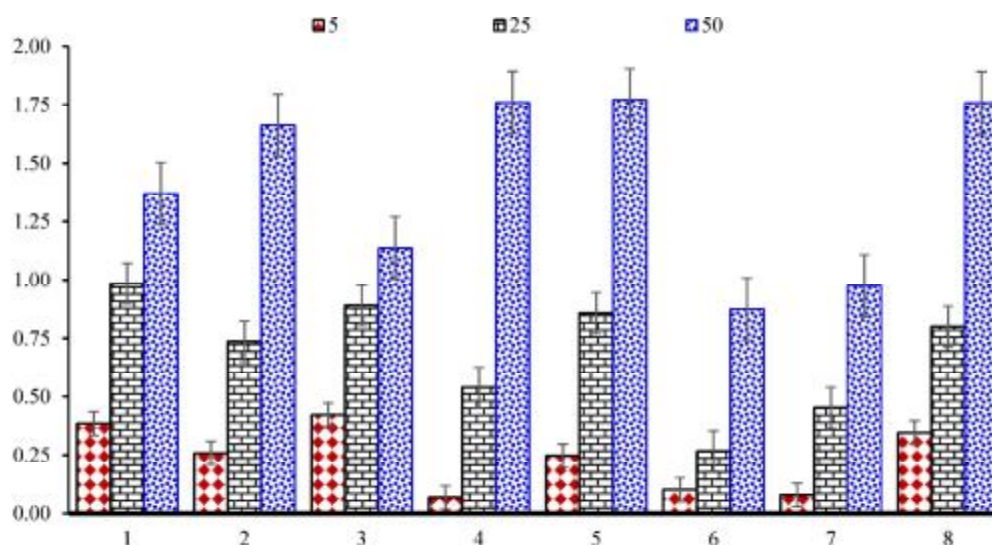
جدول ۶- برآورد احتمالی شدت و عمق بارندگی

گاما	لوگ پیرسون	علی-میخائیل-حق	دوره‌های بازگشت
عمق بارندگی (میلی‌متر)	شدت بارندگی (میلی‌متر در روز)	عمق بارندگی (میلی‌متر)	شدت بارندگی (میلی‌متر در روز)
۲۸/۶	۱۴/۱	۲۳/۸	۲
۳۴/۹	۱۶/۵	۳۱/۶	۵
۴۲/۶	۲۳/۳	۳۹/۴	۱۰
۵۳/۱	۳۱	۴۸/۸	۲۰
۶۷/۲	۳۴/۶	۶۳/۲	۲۵
۱۰۱/۴	۴۹/۶	۹۶/۵	۵۰
۱۲۱/۳	۷۷/۲	۱۱۴/۴	۱۰۰

بیشتر (دوره بازگشت ۱۰ سال یا بیشتر)، نمی‌تواند از لایه سطحی خاک نفوذ کند و باعث تغذیه آبخوان شود؛ اما بارندگی با شدت کمتر باعث افزایش بیشتر سطح آب زیرزمینی می‌شود. نقاط ۴، ۵ و ۸ که در شهرهای رفسنجان و انار قرار دارند، می‌توانند در دوره بازگشت ۵۰ ساله، سطح ایستابی را بیش از ۱۷۵ سانتی‌متر (با دامنه احتمال ۲۰ سانتی‌متر) افزایش دهند. بارندگی با شدت کمتر و عمق بیشتر تأثیر بیشتری بر آبخوان داشت. برای افزایش راندمان مصرف آب باید شدت بارندگی با دوره بازگشت حداکثر ۲۵ ساله و عمق بارندگی با دوره بازگشت ۲۵ ساله یا بالاتر در نظر گرفته شود.

### پیش‌بینی سطح ایستابی در دوره‌های بازگشت مختلف

شکل ۶ افزایش سطح آب زیرزمینی را در دوره‌های بازگشت ۵ ساله، ۲۵ ساله و ۵۰ ساله نشان می‌دهد؛ علاوه بر این، نقاط انتهایی تصمیم احتمال با نوار خطا نشان داده شده است. بهترین موقعیت برای تغذیه مصنوعی در دشت رفسنجان به ترتیب نقاط ۳، ۱ و ۵ است. این نتیجه براساس یک دوره بازگشت ۵ ساله به دست آمد. اقلیم خشک این منطقه نیازمند برنامه‌ریزی بلندمدت برای متعادل‌سازی آبخوان است. در منطقه ۳، بارندگی با شدت



شکل ۶- افزایش سطح ایستابی در هر یک از نقاط مورد مطالعه برای تغذیه مصنوعی در دوره‌های بازگشت ۵، ۲۵ و ۵۰ ساله

### نتیجه‌گیری

شناخت دقیق تغییرات چرخه آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند بیانگر خطرات تغییرات اقلیم، مانند سیل و خشکسالی در هر منطقه باشد. در این مطالعه، یک چارچوب تصمیم برای ترکیب داده‌های احتمالی هیدرولوژیکی و مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی برای ارزیابی نقش تغذیه مصنوعی در افزایش سطح آب‌های زیرزمینی ایجاد شد. نتایج نشان داد که این روش می‌تواند یک استراتژی مدیریتی برای تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی در صورت بارش‌های فصلی و پراکنده باشد. قابلیت انتقال آبخوان که به بیش از ۴۰۰ مترمربع در روز می‌رسد، نشان‌دهنده ظرفیت ذخیره‌سازی و حرکت آب است. تجزیه و تحلیل فراوانی دومتغیره نشان داد که در یک دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، احتمال بارندگی با عمق حدود ۱۱۵ میلی‌متر یا با شدت بالاتر از ۷۰ میلی‌متر در روز وجود دارد. این بارندگی سطح آب زیرزمینی را در مرکز سفره به‌طور متوسط ۲ متر افزایش داد؛ علاوه‌براین، بهره‌برداران می‌توانند با برنامه‌ریزی بهینه، تنش‌های خشکی را کاهش داده و مدیریت خود را به میزان قابل توجهی کنترل کنند.

### منابع

- Banibayat A. Ghorbanizadeh Kharazi H. Eslami H. Khoshnavaz S. and Dahanzadeh B. 2021. Drought monitoring in bivariate probabilistic framework for the maximization of water use efficiency. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng.* <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00589-9>
- Bazargan-Lari M. R. Kerachian R. and Mansoori A. 2019. A conflict-resolution model for the conjunctive use of surface and groundwater resources that considers water-quality issues: a case study. *Environmental Management.* 43: 470-482.
- Delavar M. Moghadasi M. and Morid S. 2017. A real-time model for optimal water allocation in irrigation systems during droughts. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE.* 138(6): 517-524.
- Harald K. Gerlinde J. Sven W. and Clotey H. 2018. Integration of atmospheric sciences and hydrology for the development of decision support systems in sustainable water management, *Physics and Chemistry of the Earth.* 33: 165-174.
- Javadi S. Saatsaz M. and Hashemy Shahdany S. M. Neshat A. Ghordoyee Milan S. Akbari S. 2020. A new hybrid framework of site selection for groundwater recharge, *Geoscience Frontiers.* 12(4): 101144. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101144>.
- Kerachian R. Mahsa Fallahnia M. Bazargan-Lari M. R. Mansoori A. and Sedghi H. 2020. A fuzzy game theoretic approach for groundwater resources management: Application of Rubinstein Bargaining Theory. *Resources Conservation and Recycling.* 54(10): 673-682.

- <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00427-4>
18. Schulz S. Darehshouri S. Hassanzadeh E. Tajrishy M. and Schüth C. 2020. Climate change or irrigated agriculture – what drives the water level decline of Lake Urmia. *Sci Rep.* 10: 236. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57150-y>
  19. Selvam S. Dar F. A. and Magesh N. S. 2016. Application of remote sensing and GIS for delineating groundwater recharge potential zones of Kovilpatti Municipality, Tamil Nadu using IF technique. *Earth Science Informatics.* 9: 137-150.
  20. Tao Z. Cui Z. Yu J. and Khayatnezhad M. 2021. Finite Difference Modeling of Groundwater Flow for Constructing Artificial Recharge Structures. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering.* <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00698-5>
  7. Kruskal W. H. 1958. Ordinal measures of association. *J Am Stat Assoc.* 53(284): 814-861.
  8. Lalehzari R. and Kerachian R. 2020. Developing a framework for daily common pool groundwater allocation to demands in agricultural regions. *Agric Water Manag.* 241: 106278
  9. Lalehzari R. and Kerachian R. 2021. An integrated framework for optimal irrigation planning under uncertainty: application of soil, water, atmosphere and plant modeling. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng.* <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00442-5>
  10. Lalehzari R. and Tabatabaei S. H. 2015. Simulating the impact of subsurface dam construction on the change of nitrate distribution. *Environmental Earth Science.* 74: 3241-3249. DOI 10.1007/s12665-015-4362-2.
  11. Lalehzari R. Tabatabaei S. H. Kholghi M. Yarali N. and Saba A. A. 2014. Evaluation of Scenarios in artificial recharge with treated wastewater on the quantity and quality of Shahrekord aquifer. *Journal of Environmental Studies.* 40(1): 52-55.
  12. Lyu H. M. Shen S. L. Wu Y. X. and Zhou A. N. 2021. Calculation of groundwater head distribution with a close barrier during excavation dewatering in confined aquifer. *Geoscience Frontiers.* 12(2): 791-803. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.002>.
  13. Madani K. and Dinar A. 2013. Exogenous regulatory institutions for sustainable common pool resource management: Application to groundwater. *Water Resources and Economics.* 2-3: 57-76.
  14. Mekki O. and Laftouhi N. E. 2016. Combination of a geographical information system to map groundwater recharge potential in arid to semi-arid areas: the Haouz Plain, Morocco. *Earth Science Informatics.* 9: 465-479.
  15. Merabtene T. Kawamura A. Jinno K. and Olson J. 2017. Risk assessment for optimal drought management of an integrated water Resources system using a GA. *Hydrological process.* 16: 2189-2208.
  16. Parsapour-Moghaddam P. Abed-Elmdoust A. and Kerachian R. 2015. A heuristic evolutionary game theoretic methodology for conjunctive use of surface and groundwater resources. *Water Resources Management.* 29(11): 3905-3918.
  17. Rahimi Y. Saghafian B. and Banihashemi M. A. 2021. Hydrological and hydraulic uncertainty analysis in probabilistic design of flood diversion systems using NSGAII and bivariate frequency analysis. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng.*

