

بررسی اثر تغییرات اقلیم و کاربری اراضی بر تغذیه منابع آب زیرزمینی منطقه لنجانات با تلفیق ANFIS و WEAP

افروز باقری^۱، بهرام ملک محمدی^{۲*}، بنفشه زهرایی^۳، امیرحسام حسینی^۴ و فرزاد بابایی^۵

^۱ دانشجوی دکتری مدیریت محیط زیست دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ^۲ دانشیار محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ^۳ دانشیار محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران و ^۴ استادیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۷

چکیده

به منظور تدوین و دستورسازی راهبردهای توسعه پایدار منابع آب زیرزمینی، نگاه یکپارچه به تغییرات کاربری اراضی، تغییرات اقلیم، سامانه اجتماعی و پاسخ سامانه هیدرولوژیک به آن‌ها، نیاز است. عدم توجه به ایجاد تعادل بین این متغیرها در تغذیه و تخلیه منابع آب زیرزمینی، منجر به بروز مشکلاتی از جمله فرونشست زمین، پیشروی آب‌های شور، کاهش کیفیت آب‌ها، افزایش هزینه‌های پمپاژ و غیره در بیشتر آبخوان‌های کشور شده است. در این پژوهش، منطقه لنجان‌ات به‌عنوان یکی از مناطق مهم حوزه آبخیز زاینده‌رود به‌دلیل اندرکنش با رودخانه، وجود تغییرات کاربری اراضی و افزایش گسترده برداشت از آبخوان منطقه، به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. نتایج پیش‌بینی دما و بارش در سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه تا سال ۲۰۳۵ به‌وسیله مدل LARS و نتایج بررسی تغییرات کاربری اراضی گذشته و آینده و محاسبه ضریب تاثیر کاربری (ضریب تعدیل) با استفاده از نرم‌افزارهای ENVI، IDRISI SELVA و مدل‌های تلفیقی مارکوف و اتوماتای سلولی، برای بررسی میزان رواناب در آینده و سهم آن در تغذیه آبخوان وارد مدل مورد مطالعه (تلفیق WEAP و ANFIS) شد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات اقلیم و تغییرات کاربری جزء پارامترهای تاثیرگذار بر مطالعات منابع آب زیرزمینی هستند. به‌طوری‌که پیش‌بینی می‌شود، در منطقه مورد نظر به‌دلیل کاهش میزان بارندگی و افزایش دما، میزان رواناب کاهش و به‌دلیل تغییرات کاربری زمین و افزایش برداشت آب‌های زیرزمینی، نفوذ رواناب و به‌دنبال آن تغذیه و تراز آب زیرزمینی کاهش یابد. میانگین حجم بارش در سال‌های مشاهداتی ۱۹۴/۱۷ میلیون مترمکعب برآورد شد که از این مقدار، ۹۹ میلیون مترمکعب آن به آبخوان نفوذ کرده است. میانگین حجم تغذیه آب زیرزمینی پس از تاثیر ضریب تعدیل ۱/۰۵۱ به‌ترتیب در سناریوی خوش‌بینانه ۱۰۷/۰۹ و در سناریو بدبینانه ۹۳/۷۲ میلیون مترمکعب پیش‌بینی شد.

واژه‌های کلیدی: پاسخ سامانه هیدرولوژیک، تغذیه آبخوان، توسعه پایدار، فرونشست زمین، مدل LARS

تغییرات کاربری، رشد اقتصادی-اجتماعی و اثرات
ساختار حکومتی در استفاده از منابع و همچنین،
تغییرات در مقررات و حفاظت از منابع آب، دچار

مقدمه

منابع آب زیرزمینی به‌عنوان ذخیره‌گاه عظیم آب،
در سراسر جهان به‌دلیل تغییرات آب و هوایی،

تغذیه منابع آب خواهد شد. پاسخ هیدرولوژیکی تغییر کاربری زمین همیشه خطی نیست؛ بنابراین، مهم است که هنگام پیش‌بینی الگوهای بلندمدت، در دسترس بودن آب شیرین، کاربری و تغییر پوشش زمین همراه با تأثیرات تغییر آب و هوا در نظر گرفته شود (Pervez و Henebry، ۲۰۱۵).

کشور ایران نیز از جمله کشورهایی است که همواره با پدیده خشک‌سالی و کم‌آبی مواجه بوده، تغییرات کاربری اراضی، بهره‌کشی از خاک، استفاده مداوم و بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی، اثرات منفی معنی‌داری بر محیط زیست آن داشته است، به‌طوری‌که بحران آب و خاک نزدیک به ۹۰ درصد پهنه آن را تهدید می‌کند (Vafaeinejad، ۲۰۱۶؛ Jalili و همکاران، ۲۰۱۶). بنابراین، در این شرایط آگاهی از تغییرات تراز آب و شناخت وضعیت سفره‌های آب زیرزمینی برای تأمین آب قابل اعتماد، مطالعه کمی و کیفی این منابع و رابطه خاص آن با ویژگی‌های سطح زمین، کمترین و کمینه تلاش در مورد حفاظت از این منابع ارزشمند خواهد بود (Bai، ۲۰۱۹؛ Momeneh و همکاران، ۲۰۲۰؛ Ansariyan و همکاران، ۲۰۲۰؛ Mortezaei Frizhandi و Kohandel، ۲۰۱۶). در مطالعات متعددی تغییرات آینده کاربری اراضی و یا اقلیم و اثرات این تغییرات بر منابع آب زیرزمینی، اثر مستقیم و کاهشی را در طول دوره مورد بررسی بر سطح منابع آب زیرزمینی در مناطق مختلف کشور نشان داده است که در مناطق آسیب‌پذیری بالای منابع آب، احتمال بروز خسارات چشم‌گیر به منابع آب و خاک وجود دارد (Shirmohammadi و همکاران، ۲۰۲۰؛ Lamichhane، ۲۰۱۹؛ Eskandari و همکاران، ۲۰۱۶؛ Abbasnejad و Shahidasht، ۲۰۱۳)؛ به گونه‌ای که روند نزولی تغییرات سطح آب زیرزمینی به دلیل برداشت بی‌رویه و مدیریت نامناسب و نظارت ناکافی بر میزان آب استخراجی از آبخوان، عامل افت سطح آب زیرزمینی معرفی شده است. این شرایط بر نیاز آبی و حجم آب در دسترس تأثیر گذاشته، سود حاصل از بهینه‌سازی محصولات کشاورزی در شرایط تغییر اقلیم نسبت به وضعیت کنونی ۹/۳ درصد کاهش یافته است (Jalili و همکاران، ۲۰۱۵). نتایج مطالعات تغییر اقلیم بر

مشکلاتی شده‌اند (Wu و همکاران، ۲۰۲۰؛ Aymen و همکاران، ۲۰۱۵). از طرف دیگر، دمای سطح زمین بین سال‌های ۱۹۰۶ تا ۲۰۰۵ حدود ۰/۷۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته، پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۱۰۰ نیز ۱/۱ تا ۴/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت (IPCC، ۲۰۱۷). مطالعه‌ای در شمال غرب ترکیه در منطقه تریس نشان داد، میانگین تغذیه آب زیرزمینی منطقه ۹۹ میلی‌متر در سال و تحت تاثیر شدید داده‌های اقلیم، خاک، پوشش و هیدرولوژی منطقه است، به‌طوری‌که برای کاربری شهری و جنگلی این میزان به ترتیب ۵۰ و ۲۴۰ میلی‌متر در سال تخمین زده شد (Rukundo و Dogan، ۲۰۱۹). Tenenwurcel و همکاران (۲۰۲۰) نیز پس از مطالعه بر روی حوضه رودخانه پاندریوس برزیل و بررسی تعدادی متغیر فیزیکی و مدیریتی و نیز کاربرد مدل فازی به نتایج مشابهی دست یافتند و محدوده تغییرات تغذیه‌ای منابع آب منطقه تحت تاثیر پارامترهای کاربری اراضی و اقلیم بین صفر تا ۱۲۲/۷ و متوسط ۹۳/۹۹ میلی‌متر در سال تخمین زده شد که بیشترین و کمترین مقدار آن به ترتیب مربوط به پوشش جنگلی و شهری می‌باشد. در نتیجه پژوهش، بهبود روش آبیاری، تغییر سیاست‌های حفاظت خاک و کاربری‌ها توصیه شد. Guerrero-Morales و همکاران در سال ۲۰۲۰ نیز پتانسیل تغییرات تغذیه آب زیرزمینی را بر اساس ارزیابی تغییرات پوشش زمین، هیدرولوژی منطقه و کاربرد سناریوهای تغییر اقلیم تا سال ۲۰۵۰ در مکزیک مطالعه کردند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد، تغذیه آب زیرزمینی بر اساس سناریوهای RCP4.5، 8.5 در منطقه مورد مطالعه، ۳۷ برابر بیشتر از ادامه روند کنونی تغییر اقلیم و حدود ۰/۱ تا ۰/۲۵ درصد در هر کیلومتر مربع در ارتباط با تغییر کاربری اراضی کاهش خواهد داشت. مطالعاتی بر روی منابع آب زیرزمینی حوضه Brahmaputra در هند انجام شد که یا صرفاً از نتایج حاصل از مدل اقلیم استفاده شد (Shi و همکاران، ۲۰۱۱؛ Gain و همکاران، ۲۰۱۱) و یا تأثیرات بالقوه کاربری و تغییر پوشش نیز مورد بررسی قرار گرفته، نشان دادند که افزایش قابل توجه پهنه زراعی و کشاورزی و جنگل ضمن پاکسازی رواناب منجر به افزایش سطح پوشش گیاهی طبیعی و

محصولات باغی (۵۹۹۰ هکتار)، غلات (۳۰۹۰ هکتار)، نباتات علوفه‌ای (۵۸۹ هکتار) است (IANRTC^۱، ۲۰۱۹) و به‌طور معمول در دو فصل زراعی تابستانه و زمستانه انجام می‌گیرد، کشت زراعی تابستانه عمدتاً شامل برنج و علوفه و کشت زمستانه بیشتر شامل گندم و جو است (Riahi و همکاران، ۲۰۱۹).

مطالعه وضعیت منابع آب زیرزمینی منطقه لنجانان برای دوره ۲۰۱۵-۱۹۹۰، بر اساس محاسبه ضریب تعدیل حاصل از مطالعات تغییر کاربری زمین و بررسی تغییرات در پارامترهای آب و هوایی، انجام شد. سپس، وضعیت سطح تراز آب زیرزمینی و نفوذ رواناب به آبخوان در منطقه برای دوره ۲۰۳۵-۲۰۱۹ بر اساس محاسبات تعامل بین رودخانه و سفره تحت تأثیر آن و با در نظر گرفتن ویژگی‌های منطقه، با کاربرد مدلی شامل ANFIS و WEAP مطالعه شد. به‌طور کلی، مدل مفهومی این پژوهش روابط اصلی بین سامانه آب و هوا، سامانه کاربری اراضی را نشان می‌دهد (شکل ۲).

پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و تعیین ضریب تعدیل: در این پژوهش، برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی، تصاویر ماهواره لندست ۴، ۵، ۷ و ۸ با نوارهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ سنجنده TM با تعداد هفت نوار، لندست ۷، نوارهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ سنجنده ETM⁺ با تعداد هشت نوار و لندست ۸، نوارهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ سنجنده OLI با تعداد ۱۱ نوار در سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۱۵ از پایگاه داده‌های سازمان هوا و فضای ایالات متحده^۲ و اداره کل منابع طبیعی استان اصفهان اخذ و نقشه‌های کاربری اراضی و تغییرات آن با استفاده از نرم‌افزار ENVI، برای پنج گروه مختلف کاربری زمین تهیه شد. برای ارزیابی صحت طبقه‌بندی از ضریب کاپا و نیز صحت کلی استفاده شد. برای پیش‌بینی تغییر کاربری اراضی در آینده منطقه (سال ۲۰۳۵) نرم‌افزار IDRISI Kilimanjaro و مدل CA-Markov استفاده شد. از آنجایی که حجم و شدت نفوذ رواناب سطحی با تغییر پارامترهایی مانند نوع کاربری اراضی، پوشش، مساحت

مناطق مختلف کشور نیز نشان داد که این حوضه‌ها در آینده نزدیک با افزایش دما و تغییرات بارش روبرو خواهد بود. به‌عنوان مثال، در اصفهان دما ۴/۴۹ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارش به میزان ۴/۶۸ درصد کاهش خواهد یافت که باعث کاهش منابع آبی در بخش‌های مختلف می‌شود (Soltani Mohammadi و همکاران، ۲۰۱۹). بررسی داده‌های ایستگاه سینوپتیک بیرجند نیز نشان داد تا سال ۲۱۰۰ منطقه مورد مطالعه شاهد کاهش بارندگی به میزان ۱۲۰ میلی‌متر و روند افزایشی دما خواهد بود (Yaghoubzadeh و Rahmani، ۲۰۱۹). Jahanbakhsh Asl و همکاران (۲۰۱۶) با مطالعه حوضه شهرچای ارومیه، کاهش نه میلی‌متری بارش و افزایش ۰/۸۷ تا ۱/۰۵ درجه را پیش‌بینی کردند و Zareian و همکاران (۲۰۱۵) نیز با مطالعه حوضه زاینده رود، نشان دادند که دما در آینده حدود ۲/۵۳ درجه و تغییرات بارش بین ۱۴/۳۵- تا ۳۲/۸۲- درصد خواهد بود. در این پژوهش، با هدف بررسی اثرات متغیرهای اقلیم و کاربری اراضی بر منابع آب زیرزمینی منطقه لنجانان، از WEAP و ANFIS و ضریب تعدیل در محاسبات هیدرولوژی استفاده شد که با توجه به بررسی سوابق مطالعاتی، نوآوری آن در کاربرد ضریب تعدیل و استفاده از مدل تلفیقی ذکر شده در منطقه مورد نظر می‌باشد. انجام این مطالعه و تعیین وضعیت آبخوان تحت سناریوهای مختلف می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه منابع آب منطقه موثر باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: منطقه لنجانان یکی از زیرحوضه‌های تالاب گاوخونی در قسمت مرکزی فلات ایران به طول جغرافیایی ۵۱° تا ۵۱° ۴۵' شرقی و به عرض جغرافیایی ۳۲° تا ۳۲° ۲۴' شمالی است (شکل ۱). این منطقه حدود ۱۱۰۵/۱۴ کیلومتر مربع مساحت دارد که شامل آبخوان ۳۹۱ کیلومتر مربع، مناطق مرتفع ۴۲۱/۶۱ کیلومتر مربع و دشت ۶۸۳/۵۳ کیلومتر مربع می‌شود و ۸۲ درصد از کل نیاز آب در بخش کشاورزی از آب‌های زیرزمینی و مابقی از آب‌های سطحی استخراج می‌شود (Afraz Peymayesh Co، ۲۰۱۹). الگوی کشت غالب با کشت

¹ Isfahan Agricultural and Natural Resources and Training Center

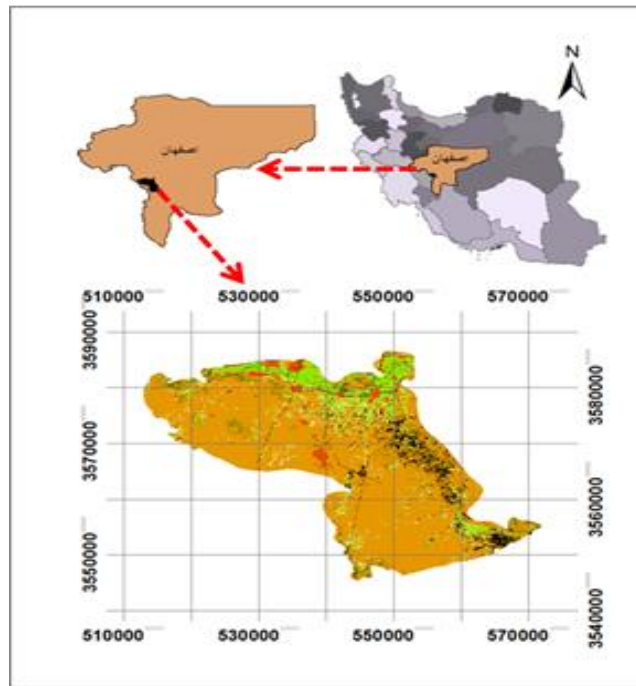
² <http://earthexplorer.usgs.gov>

$$Re = \frac{\sum(C_i * X_i)}{100} \quad (1)$$

$$A_e = \frac{Re_p}{Re_b} \quad (2)$$

که در آن‌ها، Re ضریب رواناب کاربری در دوره زمانی مورد نظر، C_i ضریب ثابت رواناب کاربری مورد نظر، X_i درصد کاربری در دوره زمانی مورد نظر، A_e ضریب تعدیل، Re_p ضریب رواناب کاربری در دوره پیش‌بینی، Re_b ضریب رواناب درصد تغییرات کاربری در گذشته است (Safavi, ۲۰۰۹).

و غیره در حوزه آبخیز تغییر می‌کند، تخمین ناصحیح مقدار ضریب رواناب، خطای محاسبات هیدرولوژیک حوزه مطالعاتی را افزایش می‌دهد، پس با محاسبه ضریب تعدیل، می‌توان دقت محاسبات را به مقدار قابل قبولی رساند (Necati, ۲۰۱۶؛ Safavi, ۲۰۰۹). در این پژوهش، پس از مشخص شدن درصد تغییرات کاربری اراضی، ضریب تعدیل از تقسیم ضریب رواناب کاربری‌ها در دوره پیش‌بینی بر ضریب رواناب تغییرات کاربری‌ها در گذشته، محاسبه شد.



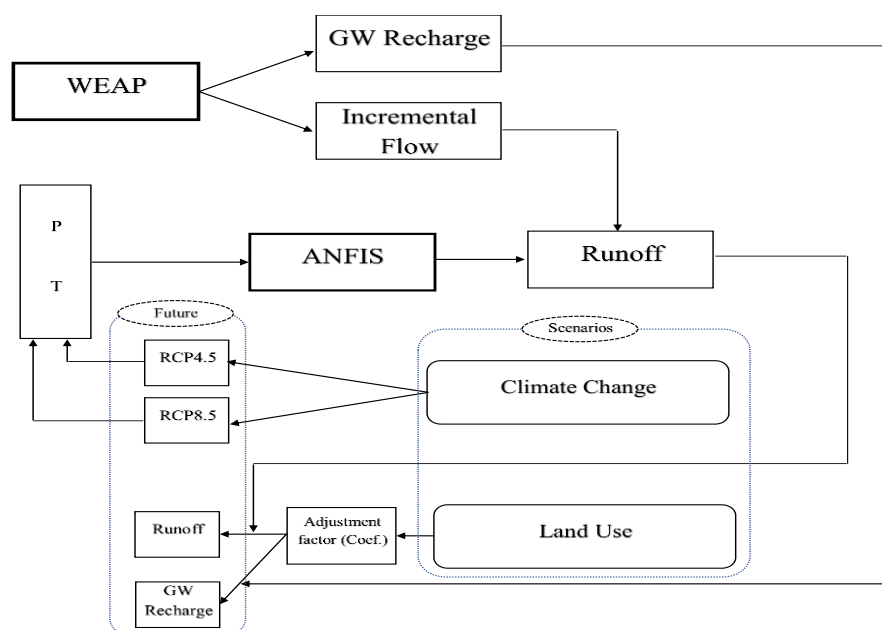
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه لنجانات

جدول ۱- خصوصیات اقلیمی منطقه مطالعاتی لنجانات دوره ۲۰۱۹-۱۹۹۰ (Afras Peymayesh Co., ۲۰۱۹؛ ANRTC, ۲۰۱۹).

نوع اقلیم	ضریب اقلیمی	معمولاً	مجموع بارندگی (mm)	مجموع دما (mm)	بارندگی سالانه (mm)	مجموع دما (mm)	مجموع دما (mm)	مجموع دما (mm)	مجموع دما (mm)
خشک	۷/۵	۵۸/۵	۳۲۹	۱۸۷/۲	۴۱/۵	-۱۵/۵	۱۴/۸	۷۶۶	۷۶۶

جدول ۲- بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی لنجانات دوره آماری ۲۰۱۹-۱۹۹۰ (Afras Peymayesh Co., ۲۰۱۹؛ ANRTC, ۲۰۱۹)

تغییرات حجم ذخیره	تخلیه - میلیون مترمکعب					تغذیه - میلیون مترمکعب					وسعت محدوده بیلان (km ²)
	جمع تخلیه	خروجی آب زیرزمینی	تبخیر از آبخوان	زهکشی	تخلیه از چاه، چشمه و قنات	جمع تغذیه	نفوذ از آب شرب و صنعت	نفوذ از آب زراعی	نفوذ از جریان-های سطحی	نفوذ از بارندگی	
-۴/۲	۱۴۸/۳۴	۵/۴	۰/۸	۵/۱۶	۱۳۶/۹۸	۱۴۴/۱۴	۲۶/۸۹	۴/۹۶	۳/۵۹	۱۵/۶	۳۹۱



شکل ۲- مدل مفهومی مطالعه هیدرولوژی منطقه لنجان

دما و بارش در WEAP و ANFIS برای بررسی تغییرات کمی آبخوان استفاده شد.

مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب (WEAP):

مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب یکی از قدرتمندترین مدل‌های تصمیم‌یار است که تلاش می‌کند، هم‌زمان به هیدرولوژی حوزه آبخیز و مدیریت تخصیص آب موجود میان تقاضاهای مختلف بپردازد (Kermanshahi و همکاران، ۲۰۱۳). واسنجی مدل به دو صورت خودکار و دستی قابل انجام است (Golmohammadi، ۲۰۱۵؛ Lane، ۱۹۹۹). برای در نظر گرفتن نفوذ به آبخوان در آینده، نفوذ به آبخوان وابسته به ورودی خروجی‌های هر بازه از رودخانه بین دو ایستگاه هیدرومتری و برداشت‌ها و جریان‌های ورودی در طول این بازه می‌باشد. در این نرم‌افزار، چنانچه اولویت تخصیص برای نیازها برابر باشد، درصد تخصیص هم یکسان در نظر گرفته می‌شود و بر اساس تعادل جرمی در هر نقطه از رودخانه، تخصیص‌ها محاسبه می‌شود. برای ساخت مدل با بررسی گزارش‌های مطالعاتی شرکت آب منطقه‌ای اصفهان و شرکت مشاور این شرکت و خروجی ArcGIS، اطلاعات مربوط به منابع و مصارف و نقشه مرز منطقه تهیه شد و به کمک نرم‌افزار WEAP نیاز آب شرب، کشاورزی، صنعت و غیره منابع آب، سد مخزنی و خروجی مربوط به مقدار آب اضافه شده به رودخانه

پیش‌بینی تغییرات اقلیم: به‌منظور پیش‌بینی فرایندهای آب و هوایی موثر بر رواناب منطقه، از خروجی مدل‌های آب و هوای جهانی^۱ و داده‌های مشاهده‌ای برای تولید سری داده‌های بعدی آب و هوا استفاده و ریزمقیاس‌سازی داده‌های GCM به‌دلیل مقیاس بزرگ، وضوح پایین و مدل‌سازی دوره‌های خشک و مرطوب، بارش روزانه، دما و ساعت آفتابی از داده‌های آب و هوایی پایه در یک مکان مشخص، با استفاده از مولد آب و هوایی LARS-WG انجام شد (Ildermi و همکاران، ۲۰۱۶؛ Goodarzi و همکاران، ۲۰۱۵). تولید داده به‌وسیله مدل مذکور در سه مرحله واسنجی، ارزیابی داده‌ها و تولید داده‌های هواشناسی برای دوره مورد نظر در آینده صورت گرفت. بر این اساس، برای اجرای این مدل، ابتدا با در نظر گرفتن دوره ۲۰ ساله ۲۰۱۵-۱۹۹۰ به‌عنوان دوره پایه، داده‌های روزانه بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعت آفتابی ایستگاه هواشناسی پل کله، از سازمان آب منطقه‌ای اصفهان، مرکز توزیع داده IPCC^۲ و CCDS^۳ اخذ شد. دقت داده‌های گذشته مورد استفاده برای پیش‌بینی آینده در نرم‌افزار LARS-WG مورد ارزیابی قرار گرفت. تنها داده‌های

^۱ GCM

^۲ Intergovernmental Panel on Climate Change

^۳ Canadian Climate Data and Scenarios

$$O_h^1 = \mu_{B_{h-2}}(y) \quad O_h^1 = \mu_{A_h}(x) \quad (3)$$

لایه دوم (گره‌های قاعده): هر گره در این لایه درجه فعالیت یک قانون را محاسبه می‌کند.

$$O_h^2 = w = \mu_{A_h}(x) * \mu_{B_h}(y) \quad h = 1,2 \quad (4)$$

لایه سوم (گره واسط): در این لایه گره h ام نسبت درجه فعالیت قانون h ام را به مجموع درجه فعالیت کلیه قوانین به صورت زیر نرمال‌سازی می‌کند.

$$O_h^3 = \bar{w}_h = \frac{w}{\sum_{h=1}^N w_h} \quad h = 1,2 \quad (5)$$

لایه چهارم (گره‌های نتیجه): در این لایه خروجی هر گره برابر است با:

$$O_h^4 = \bar{w}_h f_h = \bar{w}_h (p_h^x + q_h^y + r_h) \quad h = 1,2 \quad (6)$$

لایه پنجم (گره‌های خروجی): در آن، هر گره مقدار نهایی خروجی را محاسبه می‌کند و تعداد گره‌ها برابر تعداد خروجی‌ها است.

$$O_h^3 = \bar{w}_h f_h \quad (7)$$

که در آن‌ها، $\mu_{A_h}(X)$ درجه عضویت x در مجموعه فازی A_h ، $\mu_{B_{h-1}}(y)$ درجه عضویت y در مجموعه فازی B_{h-2} ، $\mu_{B_h}(y)$ درجه عضویت y در مجموعه فازی B_h و w_h درجه فعالیت قانون h ام و w_h درجه فعالیت نرمال شده قانون h ام می‌باشد. عملگرهای ضرب و جمع فازی در روابط فوق عملگرهای فازی هستند. در این پژوهش، برای تخمین جریان‌های طبیعی منطقه از مدل بارش-رواناب توسعه داده شده با نرم‌افزار ANFIS، استفاده شد چرا که ANFIS با بهره‌گیری از دو سامانه فوق‌الذکر، عدم قطعیت‌های ناشی از داده‌های مربوط به دوره آموزش و پیش‌بینی و شبیه‌سازی را نیز مدل می‌کند. داده‌های خروجی مربوط به سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، برای محاسبه دوره پیش‌بینی استفاده و رواناب ناشی از بارش‌ها از ANFIS اخذ شد (جدول ۳). از ۲۰ سال داده‌های ماهانه بارش و دما (۷۵ درصد داده‌ها) برای آموزش هر کدام از سامانه‌های توسعه یافته ANFIS و از چهار سال آن برای تست و اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد. از آنجایی که استفاده ANFIS برای تخمین رواناب ناشی از بارش و با توجه به دما، کاملاً مستقل از توسعه مدل برنامه‌ریزی WEAP است، بنابراین، پس از توسعه کامل سامانه ANFIS برای هر جریان طبیعی و آزمایش آن‌ها و سنجش اعتبار هر کدام، به مدل برنامه‌ریزی WEAP اضافه می‌شود. طبق

(IFs) در حد فاصل رودخانه که در محدوده مطالعاتی لنجانان قرار گرفته، استخراج شد.

سامانه استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی

تطبیقی (ANFIS): در سال ۱۹۹۳، Roger Jang با

ارائه سامانه استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی، دو سامانه فازی و شبکه عصبی را ترکیب و تطبیق کرد که به سامانه ANFIS معروف است، به طوری که ضعف‌های دو سامانه را پوشش می‌دهد و توانایی آن‌ها را دارا است و قابلیت بالایی در آموزش، ساخت و طبقه‌بندی دارد. برای ساخت FIS^1 از مجموعه‌های فازی، عملگرهای فازی و برای ساخت شبکه عصبی، ساختار و الگوریتم یادگیری (ANN^2) مشخص می‌شود (Fili و همکاران، ۲۰۱۳). این سامانه تطبیقی دارای پنج لایه است که هر لایه از آن با دو ورودی و دو قانون نمایش داده می‌شود (شکل ۳) و هر لایه آن یکی از مراحل محاسباتی مدل فازی تاکاگی-سوگنو-کانگ را شامل می‌شود. از توابع عضویت مثلثی، دوزنقه‌ای، گوسین، سیگموند و زنگوله‌ای در محاسبات فازی استفاده می‌شود که در سال‌های اخیر در مطالعات منابع آب بیشتر از توابع زنگوله‌ای استفاده شده است. عملیات جبری نیز در مجموعه‌های فازی بر روی توابع فازی اعمال می‌شود. آموزش این سامانه با استفاده از داده‌های آموزشی، پارامترهای غیرخطی مربوط به توابع عضویت فازی در لایه اول و پارامترهای خطی لایه چهارم طوری تعیین می‌شود که به ازای ورودی دلخواه، خروجی مطلوب حاصل شود که روش آموزش هیبرید یکی از مهمترین روش‌های آموزشی در این سامانه‌ها است که در لایه اول، از روش پسانتشار خطا و در لایه چهارم، از روش تخمین کمترین مربعات استفاده می‌شود. اگر خروجی هر لایه به صورت O_h^m (خروجی n امین گره از لایه m) باشد، ساختار مدل ANFIS با دو قانون و ورودی x و y هر کدام با دو تابع عضویت توصیف می‌شوند که روابط لایه‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شوند (Golmohammadi، ۲۰۱۵).

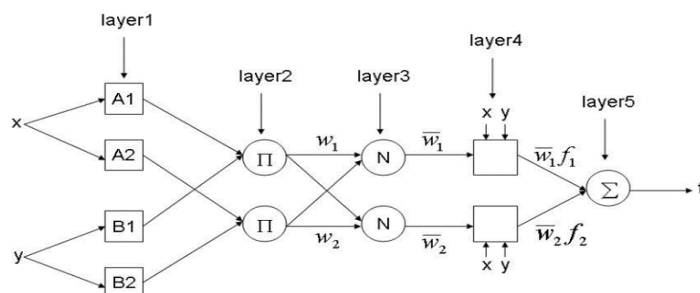
لایه اول (گره‌های ورودی): در این لایه درجه عضویت گره‌های ورودی به بازه‌های مختلف فازی با استفاده از تابع عضویت مشخص می‌شود.

¹ Fuzzy Inference System

² Artificial Neural Network

بنابراین، برای مدل‌سازی بارش-رواناب انتخاب شد.

جدول ۳ مدل ANFIS با هفت تابع عضویت زنگوله‌ای و ۵۰۰ دوره آموزشی بهترین پاسخ را ارائه داده و



شکل ۳- ساختار ANFIS

محاسبه شده است. محاسبات برای آینده مربوط به دوره سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۳۵ است. همچنین، دوره آماری پایه برای مدل از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۱ می‌باشد (شکل ۲). داده‌های ورودی این مدل شامل اطلاعات دما، بارش، دبی ورودی، دبی رواناب طبیعی به رودخانه و درصد روانابی که به رودخانه می‌رسد، در بازه زمانی مورد نظر، بر اساس آمار موجود در گزارش‌های آب منطقه‌ای اصفهان و نیز یافته‌های همین پژوهش استفاده شد و حجم تغذیه و تبخیر و رواناب (MVM)، دبی رواناب مشاهداتی و پیش‌بینی شده به‌وسیله ANFIS و دبی رواناب و حجم آن پس از تاثیر ضریب کاربری و تغذیه آبخوان در برنامه اکسل محاسبه و خروجی به‌صورت نمودار و جدول نمایش داده شد.

مدل تاثیر متغیرهای کاربری و اقلیم بر آبخوان:
 برای محاسبه مقدار نفوذ به آب زیرزمینی مدل نمایش داده شده در شکل ۲، ترسیم شد. با استفاده از مدل WEAP خروجی مربوط به مقدار آب اضافه شده به رودخانه (IFs) در حدفاصل رودخانه که در محدوده مطالعاتی لنجان‌ات قرار گرفته است، استخراج و پس از بررسی داده‌ها، به‌عنوان دبی طبیعی ناشی از بارش در نظر گرفته شد. سپس، مدل ANFIS با استفاده از خروجی مدل WEAP، مقدار درصد ماهانه میانگین نفوذ ناشی از بارش را محاسبه و بر اساس بارش‌های مربوط به سناریوهای تغییر اقلیم RCP4.5 و RCP8.5، مقدار نفوذ به آب زیرزمینی برای آینده پیش‌بینی شد. همچنین، مقدار نفوذ پیش‌بینی شده پس از اعمال تغییرات کاربری اراضی نیز با استفاده از ضریب تعدیل

جدول ۳- نتایج اجرای مدل بارش رواناب ANFIS در منطقه مطالعاتی

بارش-رواناب لنجان‌ات (مدل ANFIS)		حالت	ضریب تعیین (Coefficient of Determination)	شاخص توافق (Willmott)	ضریب عملکرد (Nash)
MF	Epoch				
زنگوله‌ای ۷	۵۰۰	آموزش	۰/۸۸۸	۰/۹۶۹	۰/۸۸۸
		تست	۰/۹۲۶	۰/۹۷۸	۰/۹۱۱
		اعتبارسنجی	۰/۷۴۷	۰/۸۹۵	۰/۵۴۷
زنگوله‌ای ۵	۵۰۰	آموزش	۰/۸۲۰	۰/۹۴۸	۰/۸۲۰
		تست	۰/۸۵۹	۰/۹۵۸	۰/۸۳۸
		اعتبارسنجی	۰/۴۸۰	۰/۷۱۷	-۰/۷۸۶
مثلی ۷	۵۰۰	آموزش	۰/۷۶۵	۰/۹۳۱	۰/۷۶۴
		تست	۰/۶۴۱	۰/۸۸۰	۰/۴۵۳
		اعتبارسنجی	۰/۸۱۲	۰/۹۳۷	۰/۷۶۷

$$d = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (O_t - P_t)^2}{\sum_{t=1}^n (|P_t - \bar{O}| + |O_t - \bar{O}|)^2} \quad (11)$$

که در آن‌ها، $Cov(OP)$ کوواریانس داده‌های مشاهداتی نسبت به داده‌های شبیه‌سازی شده یا پیش‌بینی شده، $\sigma_O \sigma_P$ انحراف معیار استاندارد این دو مجموعه از داده‌ها، ضریب R^2 میزان همبستگی و واریانس داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل و \bar{O} میانگین داده‌های مشاهداتی یا ثبت شده در طول دوره می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\bar{O} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n O_t \quad (12)$$

واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵ و ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۱ که آمار و اطلاعات آبخوان در این بازه زمانی در دسترس می‌باشد، انجام شد.

نتایج و بحث

پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و محاسبه ضریب تعدیل: بعد از اخذ تصاویر ماهواره‌ای لندست ۴ و ۵ مربوط به سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۱۵ میلادی، داده‌ها مورد پردازش، صحت‌سنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت و در نهایت، نقشه‌های کاربری اراضی در دوره‌های زمانی مختلف تهیه و برای سال ۲۰۳۵ پیش‌بینی شد (شکل ۴). با توجه اعتبارسنجی مدل از طریق مقایسه نتایج حاصل از تغییرات کاربری اراضی واقعی و پیش‌بینی شده در سال ۲۰۱۵، تطابق و عدم تطابق بین نقشه‌های واقعی و پیش‌بینی شده به‌ترتیب برابر ۰/۸۳ و ۰/۲ و همین‌طور توافق و عدم توافق مکانی به‌ترتیب ۰/۲۴ و ۰/۱۴ برآورد و تطابق کلی مدل بر اساس محاسبه شاخص کاپا برابر ۰/۷۹ و توانایی مدل در پیش‌بینی تعداد پیکسل‌ها، حدود یک تعیین شد. با توجه به اعداد به‌دست آمده، می‌توان گفت که مدل توانایی خوبی برای پیش‌بینی آینده داشته و مساحت کاربری‌های سال ۲۰۳۵، قابل اعتماد است. با در نظر گرفتن درصد تغییرات کاربری در سال پیش‌بینی (۲۰۳۵) نسبت به سال پایه (۲۰۰۵) و ضرایب ثابت رواناب برای هر کاربری (جدول ۱)، ضریب تعدیل کل برای محدوده مطالعاتی ۱/۰۵۱ تعیین شد (جدول ۴).

واسنجی و اعتبارسنجی مدل: مجموعه ورودی‌ها و خروجی‌های محاسبه نشده در حوضه، برای محاسبه جریان‌های افزایش یا کاهش^۱ (IF_s) استفاده می‌شوند. این جریان‌ها که در محدوده نام رودخانه که بین ایستگاه‌های آب‌سنجی z و $z+I$ یا در آبخوان نام قرار دارد، می‌تواند به تعیین میزان عدم قطعیت موجود در داده‌های ثبت شده و واسنجی مدل کمک کند که از رابطه زیر به‌دست می‌آید (Golmohammadi, ۲۰۱۵).

$$\Delta Storage_t^i = Inflow_t^i - Outflow_t^i + IF_t^i \quad (8)$$

که در آن، $\Delta Storage_t^i$ تغییرات مخزن قرار گرفته در بازه نام رودخانه یا آبخوان i در گام زمانی t می‌باشد. $Inflow_t^i$ همان ورودی‌ها به بازه نام یا آبخوان i در گام زمانی t است. $Outflow_t^i$ جریان‌های خروجی از بازه نام یا آبخوان i در گام زمانی t است. IF_t^i میزان آب اضافه شده به بازه نام رودخانه یا آبخوان و یا کم شده از بازه i رودخانه یا آبخوان در گام زمانی t است. مسلماً هر چه اطلاعات و داده‌های موجود از سامانه مورد بررسی کامل‌تر و دقیق‌تر باشد، مقادیر IF_t^i بسیار کمتر خواهد بود. بنابراین، به‌نحوی نمایانگر عدم قطعیت داده‌های موجود در سامانه می‌باشد.

پس از واسنجی، نیاز به انجام اعتبارسنجی مدل است. به این مفهوم که بخشی از داده‌های تاریخی به‌عنوان آینده نامعلوم برای مدل تعریف شده، سپس، مدل واسنجی شده بر اساس پیش‌بینی‌ها و داده‌های مورد نیاز، برای آن مدت اجرا می‌شود. در این پژوهش، برای اعتبارسنجی مدل و تطابق آن‌ها با داده‌های ثبت شده از سه معیار مختلف استفاده شده است که عبارتند از: ضریب تخمین (R^2)، ضریب تاثیر کارایی ناش-ساتکلیف (E) (Moriasi و همکاران، ۲۰۰۷) و شاخص تطابق (d). اگر Pt و Ot به‌ترتیب نشان‌دهنده مقادیر ثبت شده یا مشاهداتی و مقادیر پیش‌بینی شده یا شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل در زمان t باشد، آن‌گاه ضرایب فوق از روابط زیر به‌دست می‌آیند (Golmohammadi, ۲۰۱۵).

$$R^2 = \left(\frac{Cov(OP)}{\sigma_O \sigma_P} \right)^2 \quad (9)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (O_t - P_t)^2}{\sum_{t=1}^n (|O_t - \bar{O}|)^2} \quad (10)$$

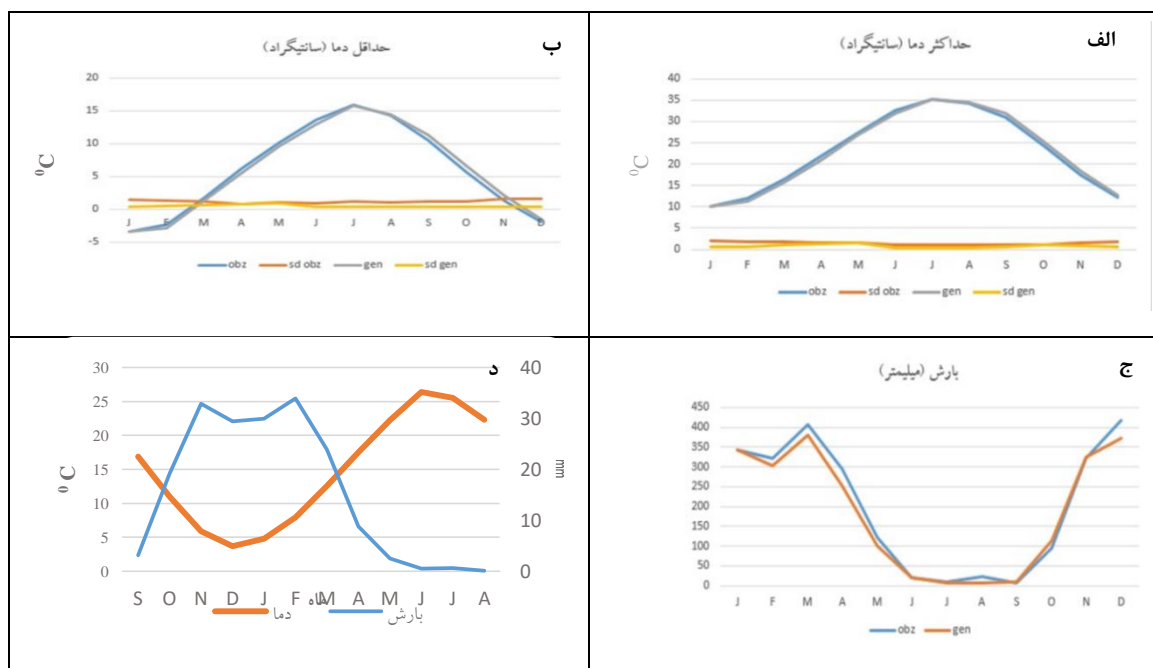
¹ Flows Incremental

جدول ۶- مقادیر آماره‌های واسنجی برای ارزیابی مدل LARS-WG5 در دوره پایه ۲۰۱۹-۱۹۹۱

ایستگاه	آماره	بارش	دمای کمینه	دمای بیشینه	ساعت آفتابی
	R^2	۰/۹۸۹۲	۰/۹۹۴۵	۰/۹۹۳۶	۰/۹۹۹۹
پل کله	RMSE	۲/۱۵۳۵	۰/۶۵۲۶	۰/۷۱۴۵	۰/۱۳۱۵
	MAE	۱/۶۷	۰/۵۸۰۸	۰/۶۰۷۵	۰/۱۲۳۳

مطابق با شکل ۵، بیشترین دقت و صحت داده‌ها برای بارش در ماه‌های ژانویه، ژوئن و نوامبر و برای دما در ماه ژانویه و در مورد تابش خورشیدی در ماه می رخ داده است. بارش و دما با هم رابطه عکس دارند، به طوری که بیشترین میزان بارش و کمترین دما در ماه‌های نوامبر تا مارس و کمترین بارش و بیشترین دما در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر رخ خواهد داد (شکل ۵-د). نتایج حاصل از LARS-WG در شکل ۶ در سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب افزایش دمایی ۰/۶ و ۰/۹ درجه سانتی‌گراد و کاهش

بارشی برابر ۱۷ و ۲۵ درصد تا سال ۲۰۳۵ نشان می‌دهد. روند افزایش و یا کاهش باران در سال‌های مختلف متغیر خواهد بود، به طوری که در هر دو سناریو از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ روند کاهشی خواهد داشت از ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۱ افزایش و سپس، تا ۲۰۳۵ روند کاهشی خواهد داشت. مسلماً میزان کاهش بارش در سناریوی خوش‌بینانه به دلیل پیاده‌سازی سیاست‌های کاهش تغییرات اقلیمی کمتر از سناریوی بدبینانه است.



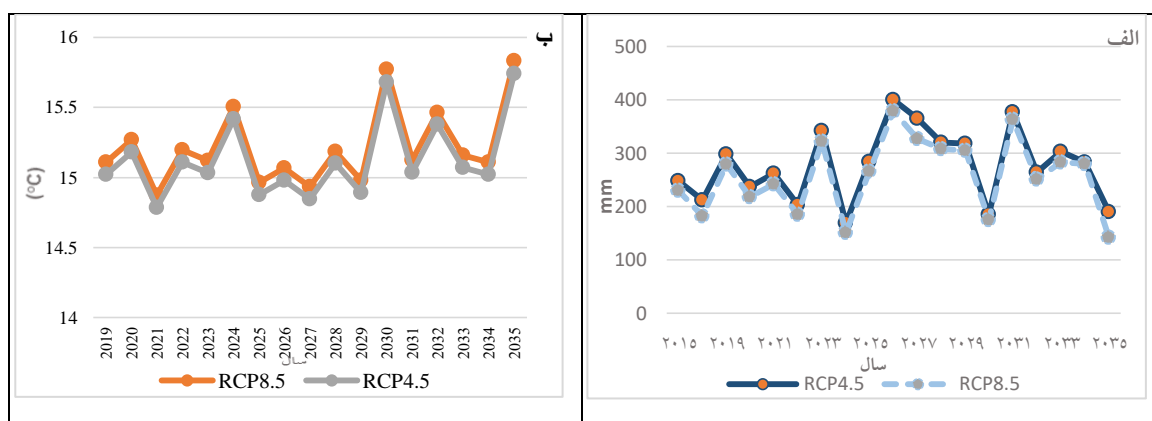
شکل ۵- مقایسه داده‌های الف) بیشینه دما، ب) کمینه دما، ج) بارش مشاهده شده و تولید شده و انحراف معیار آن‌ها، د) نمودار مقایسه‌ای میانگین دما و بارش ماهانه در بازه مطالعاتی

مدل تاثیر متغیرهای کاربری و اقلیم بر آبخوان واسنجی و اعتبارسنجی مدل: واسنجی در دو ایستگاه بالادست و پایین‌دست منطقه از طریق واسنجی I_f انجام شد که مقادیر R^2 و E و d برای آب

تامین شده کل مصارف و کارایی آبخوان نسبت به آمار ثبت شده در بازه ۰/۹ تا یک قرار گرفت که حاکی از کارایی بسیار خوب مدل در مرحله واسنجی می‌باشد. همچنین، برای سنجش اعتبار مدل واسنجی

کاملاً از مدل WEAP متفاوت است. بنابراین، پس از توسعه مدل ANFIS برای جریان‌های طبیعی منطقه، نتایج اعتبارسنجی شده به مدل WEAP وارد شد. بر اساس آموزش و تست سامانه‌های مختلف، مدل با پنج و هفت تابع زنگوله‌ای و ۵۰۰ دوره آموزش بهترین پاسخ را ارائه داد. به گونه‌ای که دبی رواناب ماهانه شبیه‌سازی شده ۲/۷۵ مترمکعب بر ثانیه و دبی ثبت شده ۲/۷۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. بنابراین، مدل توسعه یافته می‌تواند برای بررسی وضعیت آینده حوضه تحت سناریوهای مختلف به کار گرفته شود.

شده، پس از بارگذاری نیاز کل مصارف، جریان‌های طبیعی حوضه با مدل ANFIS برآورد شد. ابتدا، دو ورودی و یک خروجی برای مدل تعریف شد. ورودی‌ها شامل داده‌های نرمال شده میانگین دمای ماهانه و ارتفاع بارش در سطح منطقه و خروجی شامل داده‌های نرمال شده رواناب یا دبی جریان طبیعی در محل ایستگاه‌ها می‌باشد. از ۱۶ سال داده‌های آماری برای آموزش مدل و از شش سال آن برای اعتبارسنجی استفاده شد. باید توجه کرد که سامانه ANFIS برای تخمین رواناب ناشی از بارش و دما



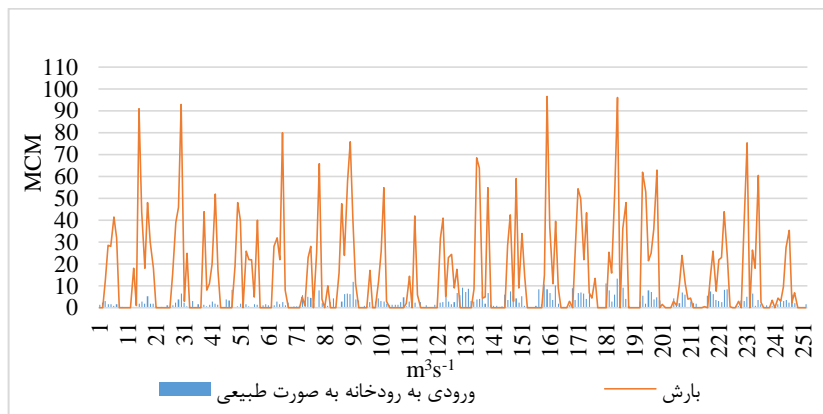
شکل ۶- پیش‌بینی (الف) میانگین بارش و (ب) میانگین دما در دوره ۲۰۱۹-۲۰۳۵

۶۰/۸۹ درصد از آب سطحی به کشاورزی و حدود پنج درصد آب زیرزمینی و ۲۳ درصد آب سطحی به بخش شرب و ۰/۰۷ درصد آب زیرزمینی و نه درصد آب سطحی به صنعت اختصاص یافته است که در سال‌های آخر در بخش صنعت و کشاورزی مصرف آب به دلیل کاهش کاربری کشاورزی و بازگردانی پساب در صنایع میزان مصرف، کاهش یافته است. در نتیجه، منطقه، وابستگی بالایی به منابع آب سطحی داشته و هرگاه به دلیل خشک‌سالی‌ها یا تغییر سیاست‌ها، منابع آب سطحی با کمبود روبرو می‌شوند، با بارگذاری‌های متعدد و عدم کنترل بر برداشت، منابع آب زیرزمینی فرصت جایگزینی نداشته و منجر به نابودی و افت شدید آن‌ها می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، حجم بارش در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶ و نسبتاً در سال ۲۰۰۹، در منطقه افزایش داشته، سپس کاهش یافته و به نسبت آن حجم تغذیه به آب زیرزمینی نیز تغییر داشته است.

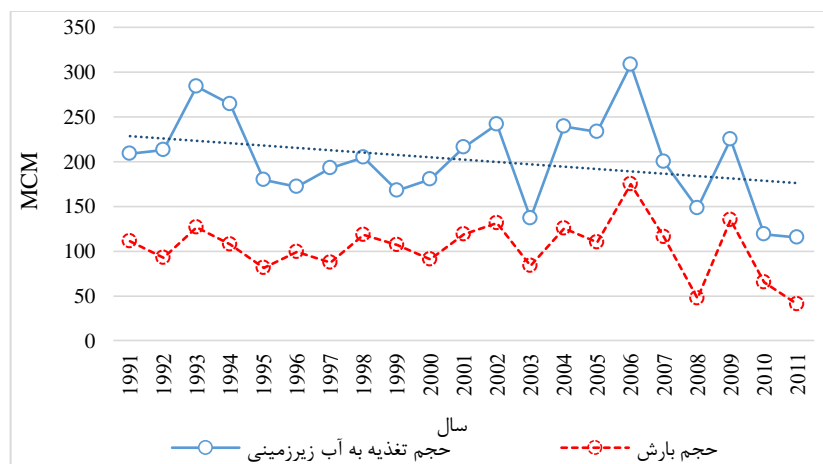
خروجی مدل WEAP و ANFIS: یکی از پارامترهای مهم در مطالعات هیدرولوژیک و وضعیت آبخوان، پیش‌بینی وضعیت کمی آب‌های زیرزمینی است که در این پژوهش بر اساس مدل مفهومی طراحی شده (شکل ۲) مطالعه شد. با استفاده از مدل WEAP رودخانه و گره‌های تقاضا، نیاز و مخازن و روابط بین آن‌ها ایجاد شد. بر اساس مقایسه و مطالعه بین حجم بارش و رواناب در منطقه (شکل ۷)، خروجی مربوط به مقدار آب اضافه شده به رودخانه موجود (IFs) در محدوده مطالعاتی لنجان، استخراج و پس از بررسی داده‌ها، به‌عنوان دبی طبیعی ناشی از بارش، در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد، رواناب در دسترس و قابل استفاده در دوره آماری در منطقه ۱۹۴/۱۷ میلیون مترمکعب می‌باشد که این مقدار در سال‌های پایانی دوره کاهش پیدا می‌کند. میانگین رواناب سالانه معادل ۹۹/۱۰ میلیون مترمکعب به آبخوان نفوذ کرده است. به‌طور میانگین حدود ۶۳ درصد منابع آب زیرزمینی و

است (شکل‌های ۸ و ۹). میانگین حجم بارش و حجم تغذیه آب زیرزمینی به ترتیب در سناریوی خوش‌بینانه و ۲۱۰/۰۷ و ۱۱۱/۵۰ و در سناریوی بدبینانه ۱۸۳/۸۵ و ۹۷/۵۸ میلیون مترمکعب پیش‌بینی شد. پس از تاثیر ضرب تعدیل شارژ آب زیرزمینی به ترتیب ۱۰۷/۰۹ و ۹۳/۷۲ میلیون مترمکعب تصحیح می‌شوند.

پس از بارگذاری خروجی‌های مدل بارش-رواناب ANFIS در مدل WEAP و اعمال شرایط ناشی از سناریوهای مختلف، کارایی سامانه مورد ارزیابی قرار گرفت. حجم بارش و به‌دنبال آن دبی و حجم رواناب در سال‌های گذشته روند کاهشی داشته، این روند از سال ۲۰۰۰ شروع شده است. متاثر از این تغییر، حجم رواناب نفوذ کرده به آبخوان نیز روند کاهشی داشته



شکل ۷- رواناب ماهانه منطقه مورد مطالعه در ارتباط با بارش بازه زمانی ۱۹۹۱-۲۰۱۵ (میلیون مترمکعب)



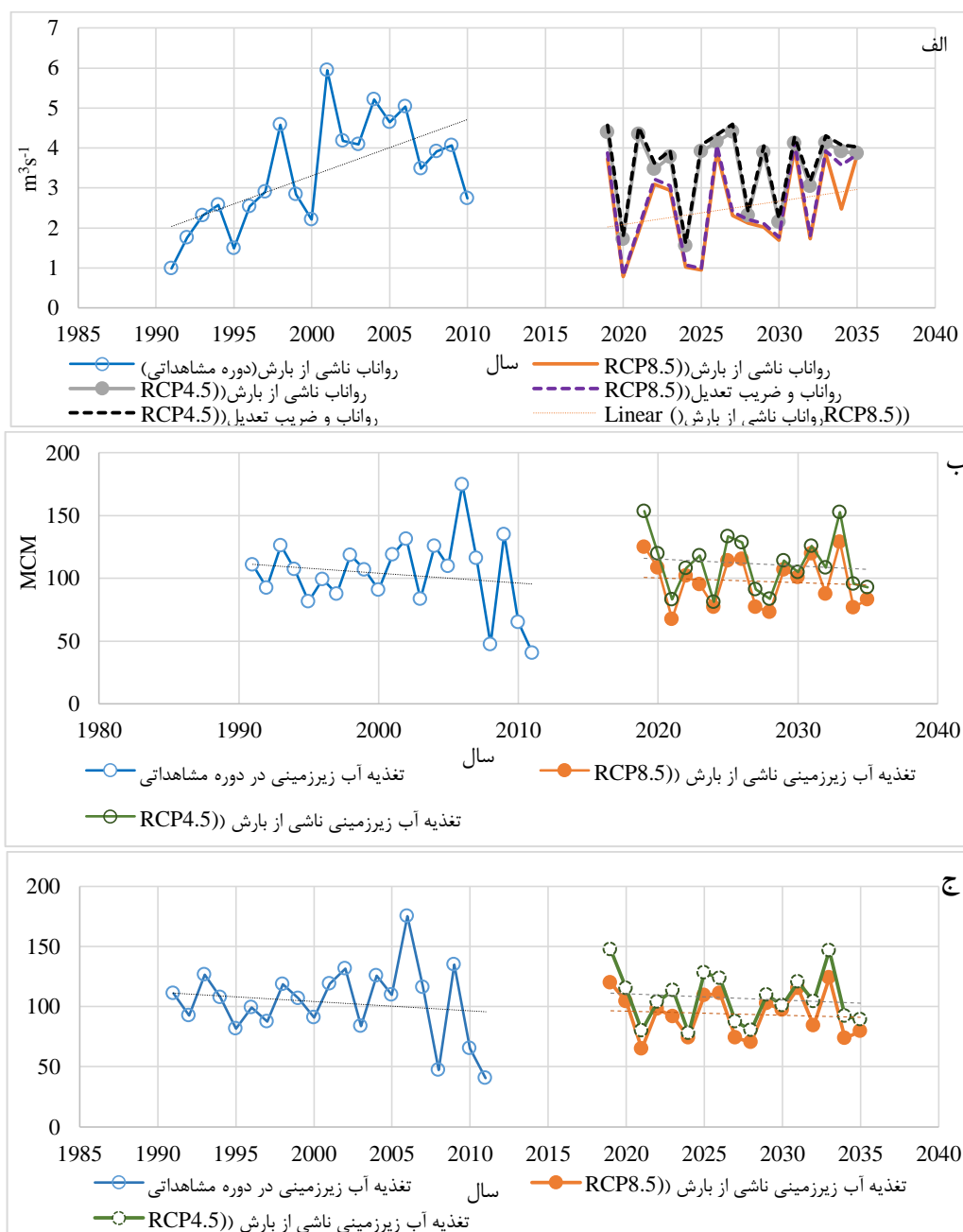
شکل ۸- مقایسه روند حجم بارش و حجم تغذیه آبخوان در گذشته مشاهداتی در محدوده مطالعاتی

۲/۷۳ و در بدبینانه ۳/۰۶ مترمکعب بر ثانیه برآورد شد (شکل ۹). بررسی سناریوها در مدل WEAP نشان می‌دهد تا زمانی که دسترسی به آب وجود دارد، برداشت در راستای تامین نیاز صورت خواهد گرفت. نیاز شرب و بهداشت مثل گذشته از اولویت تخصیص بوده، به‌طور کامل تامین می‌شود. نیاز کشاورزی به آب زیرزمینی شدیداً وابسته و نیازهای صنعت وابسته به آب سطحی است. در سناریوی ادامه روند فعلی، تخصیص آب به نیازها تا حد قابل قبولی انجام خواهد

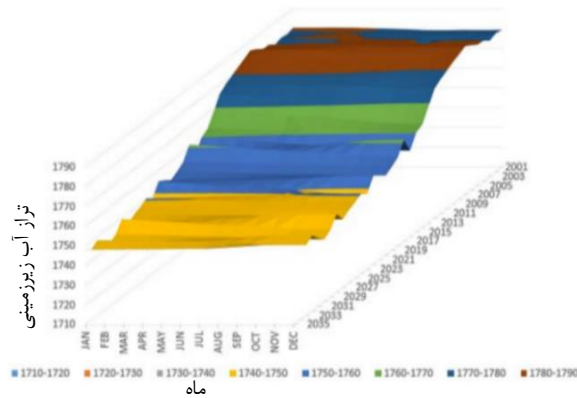
حجم رواناب نفوذ کرده در آبخوان به جز در سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۶ که به دلیل افزایش حجم بارندگی در آن دو سال جهش داشته، از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ روند کاهشی داشته است. طبق نتایج پیش‌بینی انجام شده میانگین حجم تغذیه آبخوان نسبت به گذشته در سناریوی خوش‌بینانه نسبت به گذشته افزایش و در سناریوی بدبینانه کاهش خواهد داشت. دبی رواناب به خاطر تغییرات کاربری روند افزایشی دارد که با لحاظ ضرب تعدیل در سناریوی خوش‌بینانه

خاک، نشست زمین و در نهایت، نابودی آبخوان خواهد شد. در سناریوی خوش‌بینانه اقلیم و با مدیریت اصولی کنترل جمعیت، کاربری اراضی و برداشت آب زیرزمینی، می‌توان این میزان را به ۱۷ متر کاهش داد، ولی در سناریوی بدبینانه در سال ۲۰۳۵، تراز آب زیرزمینی با افت ۳۷ متری مواجه می‌شود (شکل ۱۱).

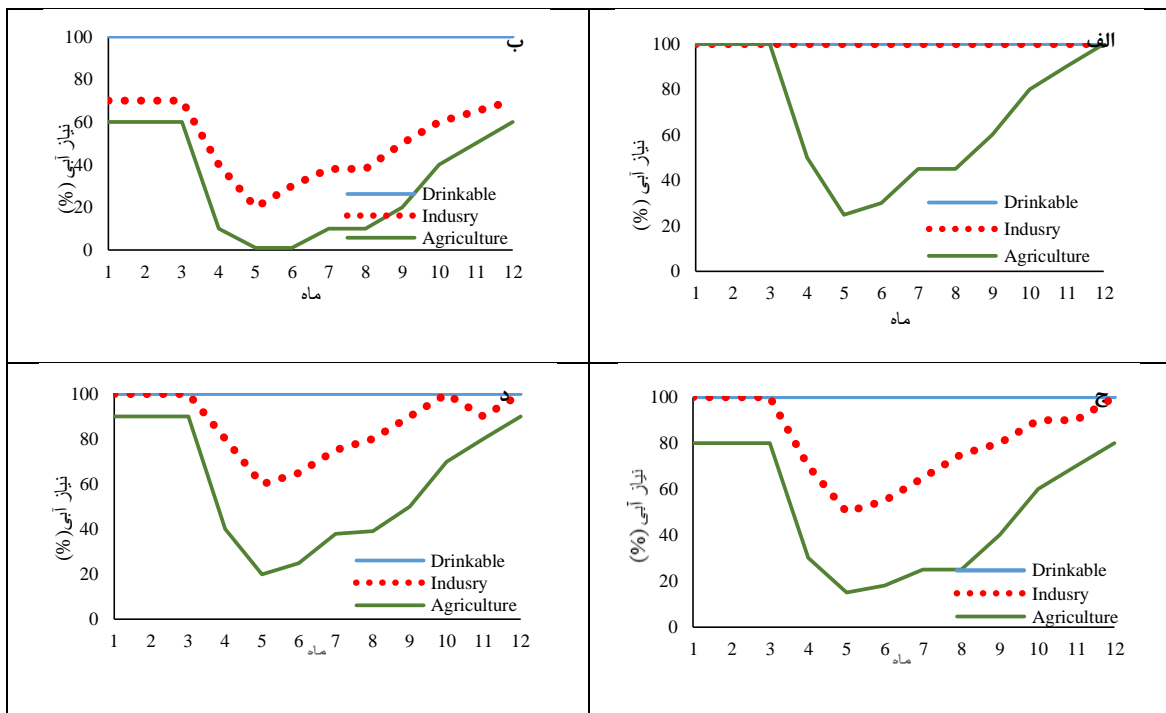
شد (شکل ۱۰)، اما باید در نظر داشت که سیاست‌ها و قوانین، ادامه روند منطبق بر سیاست‌های فعلی مدیریتی است و با ادامه روند برداشت فعلی در سال ۲۰۳۵ تراز آب زیرزمینی با افتی حدود ۳۰ متر و افت شدید سطح آب در پیرومترها مواجه خواهد بود. یقیناً برداشت بیشتر منجر به مشکلات و چالش‌های غیرقابل جبرانی چون پیشروی آب شور، از بین رفتن تخلخل



شکل ۹- مقایسه الف) دبی رواناب ناشی از بارش، ب) تغذیه ناشی از بارش بدون اعمال ضریب تعدیل و ج) تغذیه ناشی از بارش با اعمال ضریب تعدیل



شکل ۱۰- تراز آب زیرزمینی از گذشته تا دوره پیش‌بینی شده



شکل ۱۱- درصد تامین نیاز آبی شرب، صنعت و کشاورزی منطقه لنجان، (الف) در سال پایه، (ب) آینده، سناریوی بدبینانه، (ج) آینده، سناریوی خوش‌بینانه و (د) ادامه روند فعلی

نتیجه‌گیری

به‌منظور بررسی و ارزیابی اثر متغیرهای کاربری اراضی و اقلیم بر حجم و مقدار نفوذ رواناب به آبخوان منطقه لنجان، ابتدا داده‌های دما و بارش در دوره های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ میلادی مطالعه و در سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه تا سال ۲۰۳۵ به‌وسیله مدل LARS-WG ریزمقیاس‌نمائی و پیش‌بینی و با استفاده از شاخص‌های ارزیابی کارایی مانند ضریب همبستگی و ریشه دوم میانگین مربعات خطا مقایسه شدند. سپس، تغییرات کاربری اراضی به‌وسیله نرم‌افزارهای ENVI، IDRISI SELVA و مدل‌های تلفیقی مارکوف

و اتوماتای سلولی در دوره زمانی موردنظر با ضریب کاپای برابر ۰/۷۹، آشکارسازی و پیش‌بینی و ضریب تاثیر کاربری (ضریب تعدیل) بر رواناب تحت عنوان ضریب تعدیل، محاسبه شد. در نهایت، خروجی مطالعات اقلیم و کاربری در مدل تلفیقی WEAP و ANFIS وارد شد و پس از واسنجی در دو ایستگاه بالادست و پایین‌دست منطقه از طریق واسنجی IF_s و محاسبه مقادیر R^2 ، E و al میزان رواناب و حجم نفوذ آن به آبخوان در سناریوهای مختلف و با دقت بالا به-دست آمد. یافته‌های این پژوهش بیانگر، افزایش دمای حدوداً ۰/۸ تا ۰/۹ درجه سانتی‌گراد، بارندگی حدود

۲۰۱۱) نیز تایید شده؛ برای مطالعات منابع آب و محاسبه بارش-رواناب از دقت بالائی برخوردار است. بررسی سناریوها در مدل WEAP نشان می‌دهد، مصارف بالای دشت و برداشتهای مدیریت نشده، اجازه بازگشت به تراز طبیعی آبخوان را نمی‌دهد؛ به طوری که در صورت ادامه روند فعلی هر چند ممکن است در تامین نیاز کارآمد باشد؛ ولی منجر به نابودی منابع آب منطقه خواهد شد. به گونه‌ای که سطح تراز آب زیرزمینی تا ۳۰ متر نسبت به سال پایه و در صورت اجرای مدیریت اصولی منابع، این میزان به ۱۷ متر خواهد رسید. این مطالعه نیز، یافته‌های دیگر محققان از جمله Tenenwurcel و همکاران (۲۰۲۰)، Rukundo و Doğan (۲۰۱۹) و Jalili و همکاران (۲۰۱۵) را مبنی بر لزوم انجام مطالعات اقلیم و کاربری اراضی در مطالعات هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز تاکید می‌کند. به طور کلی، برای مهار نابودی منابع آب و بهبود پایداری این منابع، مدیریت اصولی منابع آب منطقه بر پایه مطالعات پارامترهای کلیدی کاربری و اقلیم و از طریق احیاء آبخوان با کنترل برداشتهای، تغذیه مصنوعی و انتقال آب، ضروری است.

۱۷ و ۲۵ درصد کاهش و حجم نفوذ رواناب و تغذیه آبخوان ۱۱۱/۵۰ و ۹۷/۵۸ میلیون مترمکعب به ترتیب در سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه RCP، نسبت به دوره پایه است که طبق بررسی پیشینه پژوهش، در مطالعات دیگر نیز روند افزایش دما و کاهش بارش و به دنبال آن کاهش تغذیه آبخوان‌ها برای بیشتر نقاط ایران قابل مشاهده است. حجم نفوذ رواناب و تغذیه آبخوان پس از اعمال ضریب تاثیر کاربری (تعدیل) به ترتیب ۱۰۷/۰۹ و ۹۳/۷۲ میلیون مترمکعب بارش تصحیح می‌شوند. در مطالعات Shirmohammadi و همکاران (۲۰۲۰)، Eskandari و همکاران (۲۰۱۶) و Shahidasht (۲۰۱۳) نیز نشان داده شد، تغییرات آینده کاربری و اثرات آن بر منابع آب زیرزمینی اثر مستقیم، کاهشی و تخریبی است. پس از توسعه مدل ANFIS برای جریان‌های طبیعی منطقه، نتایج اعتبارسنجی شده به مدل WEAP وارد شد. بر اساس آموزش و تست سامانه‌های مختلف، مدل با پنج و هفت تابع زنگوله‌ای و ۵۰۰ دوره آموزش بهترین پاسخ را ارائه داد. عملکرد ANFIS چنانچه در نتایج پژوهش را (۲۰۱۵) Golmohammadi و Nabizadeh و همکاران

منابع مورد استفاده

1. Abbasnejad, A. and W. Shahidasht. 2013. Investigate the susceptibility of Sirjan Plain due to excessive withdrawals from the aquifer area. *Geography and Urban Planning Region*, 2: 85-96 (in Persian).
2. Afraz Peymayesh Consulting Engineers Company. 2019. Report of surface and groundwater resources and uses in Lenjanat area (4209). Regional Water Company of Isfahan. Ministry of Energy.
3. Ansariyan, S., M. Moghaddasi and M. Moradi. 2020. Site selection for artificial groundwater recharge using GIS, case study: Meghan River Basin. *Watershed Engineering and Management*, 12(4): 1122-1132 (in Persian).
4. Avand, M.T., S. Janizadeh, D.T. Bui, V.H. Pham, T. Ngo, P. Thao and V.H. Nhu. 2020. A tree-based intelligence ensemble approach for spatial prediction of potential groundwater. *International Journal of Digital Earth*, 9: 1408-1429.
5. Aymen, F., D. Boubaker, A. Chebil and K.G. Villholth. 2015. Performance evaluation of groundwater management instruments: The case of irrigation sector in Tunisia. *Groundwater for Sustainable Development*, 1: 23-32.
6. Bai, T., W. Tsai, P. Chiang, Y.M. Chang, F.J. Chang, W.Y. Chang and L.C. Chang. 2019. Modeling and investigating the mechanisms of groundwater level variation in the Jhuoshui River Basin of Central Taiwan. *Water*, 11: 1554-1573.
7. Cao, L., Y. Zhang and Y. Shi. 2011. Climate change effect on hydrological processes over the Yangtze River Basin. *Quaternary International*, 244: 202-210.
8. Eskandari, T., M. Sadat, M. Mashnaghi and B. Malek Mohammadi. 2016. Investigating the effect of land-use change on groundwater level drop using regional statistics function, case study: Ardabil Plain. 5th Iranian Water Resources Management Conference, Tehran (in Persian).
9. Gain, A.K., W.W. Immerzeel, F.C. Sperna and M.F.P. Bierkens. 2011. Impact of climate change on the stream flow of the lower Brahmaputra: trends in high and low flows based on discharge-weighted ensemble modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5): 1537-1545.

10. Goodarzi, M., J. Khosravanian and S. Assadollah Hejazi. 2015. Application of LARS-WG Model in predicting meteorological parameters of Qarasu Basin. *Journal of Geographic Space*, 51(15): 263-279 (in Persian).
11. Guerrero-Morales, J., C.R. Fonseca, M.A. Gómez-Albores, M.L. Sampedro-Rosas and S.E. Silva-Gómez. 2020. Proportional variation of potential groundwater recharge as a result of climate change and land-use: a study case in Mexico. *Land*, 9(10): 364-376.
12. Ildermi, A., H. Nouri and M. Karami. 2016. Drought assessment and climate change in the future period using general climate models Joe, case study: Qarasu River Watershed, Gorgan, Iran. *Quarterly Journal of Geographical Studies of Dry Areas*, 7(26): 12-31 (in Persian).
13. IPCC. 2017. Climate change and land. <https://www.ipcc.ch/report/srcl>. Accessed 25, April 2019.
14. Jahanbakhsh, S., A. Khorshiddoust, M.H. Alinejad and F. Pourasghr. 2016. Impact of climate change on precipitation and temperature by taking the uncertainty of models and climate scenarios, case study: Shahrchay Basin in Urmia. *Hydromorphology*, 2(7): 107-122 (in Persian).
15. Jalili, Kh., H.R. Moradi and O. Bozorg Haddad. 2016. Assessment of climate change impacts on water resources in Islamabad Aquifer and land allocation optimization. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 11: 117-131 (in Persian).
16. Jalili, Kh., H.R. Moradi and O. Bozorg Haddad. 2015. Analysis of aquifer water level drawdown in Islamabad due to the allocation of groundwater resources. *Water Harvesting and Watershed Management Congress, Birjand* (in Persian).
17. Kermanshahi, S., K. Arbitration, S.M. Hasheminia and A. Farid Hosseini. 2013. Application of WEAP model in evaluating the effect of irrigation water consumption management on water resources of Neishabour Plain. *Water and Soil*, 27(3): 549-505 (in Persian).
18. Lamichhane, S. and Sh. Man Narendra. 2019. Integrated assessment of climate change and land use change impacts on hydrology in the Kathmandu Valley Watershed, Central Nepal. *Water*, 11(10): 2059-2071.
19. Lane, M.E., P.H. Kirshen and R.M. Vogel. 1999. Indicators of impact of global climate change on U.S. water resources. *Journal of Water Resource Planning and Management*, 125(4): 194-204.
20. Momeneh, S., A. Azari and A. Eghbalzadeh. 2020. Assessing the effect of climate change on groundwater levels in the upcoming periods, case study: Chamchamal Plain. *Watershed Engineering and Management*, 12(4): 913-928 (in Persian).
21. Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel and T.L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions on American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3): 885-900.
22. Mortezaei Frizhandi, Gh. and A. Kohandel. 2016. Evaluation of the impact of land use changes on groundwater resources using satellite imagery, case study: Chaharmahal Bakhtiari. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 31: 1-9 (in Persian).
23. Nabizadeh, M., A. Masaedi, M. Hesam, A.A. Dehghani, M. Zakerinia and M. Moftah Halaqi. 2011. River flow prediction using Fuzzy Inference System (FIS) and Adaptive Neural-Fuzzy Inference System (ANFIS). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 5(17): 7-14 (in Persian).
24. Necati, G. 2016. A comparison study of some flood estimation methods in terms of design of water structures. *International Journal of Engineering Technologies*, 2(1): 20-33 (in Persian).
25. Pervez Shahriar, M.D. and M. Henebry Geoffrey. 2015. Assessing the impacts of climate and land use and land cover change on the freshwater availability in the Brahmaputra River Basin. *Journal of Hydrology*. 3: 285-311.
26. Riahi, V., P. Ziaian Firoozabadi, F. Azizpour and P. Darouei. 2019. Factors affecting the instability of cultivation pattern in Lenjanat area. *Space Economics and Rural Development*, 8(30): 139-168.
27. Rukundo, E. and A. Doğan. 2019. Dominant influencing factors of groundwater recharge spatial patterns in Ergene River Catchment, Turkey. *Water*, 11(4): 653-667.
28. Shi, Y., X. Gao, D. Zhang and F. Giorgi. 2011. Climate change over the Yarlung Zangbo-Brahmaputra River Basin in the 21st century simulated by a high resolution regional climate model. *Quaternary International*, 244(2): 159-168.
29. Shirmohammadi, B., A. Malekian, A. Salajegheh, B. Taheri, H. Azarnivand, Z. Malek and P.H. Verburg. 2020. Impacts of future climate and land-use change on water yield in a semi-arid basin in Iran. *Land Degradation and Development*, 31(10): 1252-1264 (in Persian).
30. Soltani Mohammadi, A., M.R. Mollaienia and A. Ajamzadeh. 2017. Assessment of climate change effect on temperature and precipitation based on fourth and fifth IPCC reports, case study: Isfahan Province. *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(2): 1-16 (in Persian).

31. Vafaeinejad, A.R. 2016. Cropping pattern optimization by using TOPSIS Method and genetic algorithm based on GIS capabilities, case study: land of the plain, Isfahan. *Journal of Ecohydrology*, 2016: 69-82 (in Persian).
32. Wu, W.Y., M.H. Lo, Y. Wada, J. Famiglietti, S. Reager, T. John Yeh, J. Pat, F. Ducharne, Y. Agnès and Z. Liang. 2020. Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers. *Nature Communications*, 11(3710): 29-42.
33. Yaghoobzadeh, M. and Y. Rahmani. 2019. Evaluation of models and scenarios of the fifth climate change report in estimating temperature and precipitation of Birjand. *Journal of Climatological Research*, 37: 87-100 (in Persian).
34. Zareian, M.J., S. Eslamiana and H.R. Safavi. 2015. A modified regionalization weighting approach for climate change impact assessment at watershed scale. *Theoretical and Applied Climatology*, 122: 497-516 (in Persian).