

بررسی عملکرد مدل مفهومی مادفلو و فرا مدل شبیه ساز بیان ژن در مدل سازی هیدروگراف معرف آبخوان (مطالعه موردی: دشت لور-اندیمشک)

معصومه زینعلی^۱، محمدرضا گلابی^{۲*}، محمدحسین نیک سخن^۳، آرش آذری^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی کرمانشاه

۲- دانشجوی دکتری منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

* نویسنده مسئول: Hamidgolabi65@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۰

چکیده

برای اعمال مدیریت صحیح، نیاز به شناسایی و به مدل درآوردن سطح آب زیرزمینی جهت برنامه ریزی های بلندمدت و استفاده بیشتر و بهتر از پتانسیل های آبی موجود در دشت ها، عمیقاً احساس می شود. در این مطالعه از اطلاعات آماری ماهانه سطح پیزومترها برای ۵ سال آبی (۸۸-۸۹ تا ۹۲-۹۳) مربوط به سطح ایستابی ۸ پیزومتر آبخوان دشت لور-اندیمشک، استفاده شد. در ابتدا با استفاده از روش تیسن، میانگین وزنی هر پیزومتر محاسبه شد و بدین طریق سری زمانی تراز آب زیرزمینی دشت که بیانگر هیدروگراف معرف آبخوان منطقه مورد مطالعه است، به دست آمد. سپس با استفاده از مدل مفهومی آب زیرزمینی مادفلو و فرا مدل شبیه ساز بیان ژن، هیدروگراف معرف آبخوان مدل سازی شد و نتایج با هم مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مدل مفهومی مادفلو با ضریب تبیین ۰/۷۸۳۶ در مرحله تست نسبت به فرا مدل شبیه ساز بیان ژن با ضریب تبیین ۰/۷۳۳۹ با اختلاف بسیار جزئی دارای عملکرد بهتری می باشد.

واژه های کلیدی: فرا مدل شبیه ساز بیان ژن، مدل سازی، مدل مادفلو، هیدروگراف معرف آبخوان.

مقدمه

صحيح در بهره برداری، سواد علمی و فنی بر سیستم منابع آبی هر منطقه است. برای اعمال یک مدیریت صحیح شناسایی، به مدل درآوردن و تخمین سطح آب زیرزمینی جهت برنامه ریزی های بلندمدت و استفاده بیشتر و بهتر از پتانسیل های آبی موجود در دشت ها، عمیقاً احساس می شود. از اساسی ترین موارد در مدیریت کمی منابع آب زیرزمینی تخمین سطح آب با استفاده از داده های برداشت شده از شبکه چاه های مشاهده ای می باشد (زارعی و آخوندعلی، ۱۳۸۶). در کشور ما به علت مسائل

با توجه به کاهش نزولات جوی و خشکسالی های اخیر و در نتیجه کمبود آب در پهنه وسیعی از کشور و افزایش میزان تقاضا برای مصارف مختلف، مدیریت منابع آب های سطحی و زیرزمینی از اهمیت و حساسیت بسیار زیادی برخوردار است. آب های زیرزمینی در بسیاری از کشورها از جمله ایران، یکی از منابع اصلی تأمین آب برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی می باشد. لذا استفاده بهینه از منابع آب های زیرزمینی، مستلزم مدیریت

اقتصادی امکان انجام مطالعات گسترده درباره‌ی شناخت آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف وجود ندارد. بنابراین بهترین گزینه استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز رفتار آب‌های زیرزمینی است. اگر مدل یک سامانه‌ی درست و دقیق آب زیرزمینی، بازگوکننده‌ی واکنش‌های واقعی سامانه در اثر تغییرات باشد، وسیله‌ی با ارزشی برای پیش‌بینی‌ها و برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب زیرزمینی خواهد بود. مدل ریاضی آب زیرزمینی، شبیه‌سازی یک سامانه هیدروژئولوژیکی است که از قوانین فیزیک و ریاضی کمک می‌گیرد. دو مؤلفه اساسی آن، مدل مفهومی و مدل ریاضی می‌باشند. مدل مفهومی در حقیقت تصویر ساده شده‌ای از سامانه می‌باشد. مدل ریاضی، مجموعه‌ای از فرمول‌های ریاضی است که با توجه به فرضیات خاص، به فرآیندهای فیزیکی فعال در درون سامانه آبخوان مقدار می‌بخشد. بدیهی است که مدل به خودی خود جزئیات واقعی سامانه آب زیرزمینی را شامل نمی‌شود، ولی رفتار یک مدل معتبر تقریباً نشان دهنده رفتار آبخوان می‌باشد. در بین مدل‌های مفهومی ارائه شده آب زیرزمینی، مدل *GMS* که خود تلفیقی از چندین مدل است، جامع‌ترین مدل آب زیرزمینی است و روز به روز کاربرد آن در اکثر کشورهای دنیا گسترش می‌یابد و در اکثر کشورهای دنیا، بخصوص در پروژه‌های اجرایی کاربرد فراوان دارد. از طرفی در بین مدل‌های هوشمند، فرا مدل شبیه‌ساز بیان ژن نیز با توجه به اکثر مطالعات اخیر نتایج خوبی در مدل‌سازی داشته است. پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۲) کارایی تکنیک شبکه عصبی مصنوعی و سری‌های زمانی را در پیش‌بینی سطح ایستابی آب زیرزمینی بررسی کردند. نتایج این پژوهش کارایی و دقت بالای هر دو تکنیک شبکه عصبی و سری زمانی را در پیش‌بینی سطح ایستابی چاه‌های منطقه نشان داد. کاوه‌کار و همکاران (۱۳۹۲) از ساختار درختی برنامه‌ریزی بیان ژن و همچنین از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب در مقیاس‌های زمانی مختلف استفاده کردند. نتایج حاصل، حاکی از دقت مطلوب برنامه‌ریزی بیان ژن در شبیه‌سازی نوسانات سطح آب می‌باشد. ملکی نژاد و همکاران (۱۳۹۲) برای

پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی در دشت مروست از مدل‌های سری زمانی و شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند و مدل شبکه عصبی نسبت به سری زمانی تلفیقی برتری جزئی نشان داد. اکبرزاده و همکاران (۱۳۹۵) از مدل شبکه عصبی مصنوعی *RBF* هیبرید برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی دشت شاهرود استفاده کرده‌اند. ایمانی و همکاران (۱۳۹۵) به مقایسه کارایی مدل هیدروژئولوژیکی *WetSpa*، شبکه عصبی مصنوعی و سیستم عصبی- فازی انطباقی، در شبیه‌سازی دبی جریان رودخانه پرداختند و نتیجه گرفتند که بالاترین دقت در بین مدل‌های به کار رفته به ترتیب به مدل‌های *WetSpa*، *ANN* و *ANFIS* متعلق است. نیکبخت و همکاران (۱۳۹۵) سطح آب زیرزمینی دشت تسوج آذربایجان شرقی را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی شبیه‌سازی و برای ۲۴ ماه بعد پیش‌بینی کردند. نتایج بیانگر دقت خوب شبکه عصبی مصنوعی در مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی بود. نیکبخت و نوری (۱۳۹۵) سطح آب زیرزمینی دشت مراغه در آذربایجان شرقی را با استفاده از شبکه موجک- عصبی شبیه‌سازی و با شبکه عصبی مصنوعی مقایسه کردند. نتایج بیانگر دقت نسبتاً بهتر شبکه موجک- عصبی نسبت به شبکه عصبی مصنوعی در مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی بود. ندیری و همکاران (۱۳۹۵) پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی را در یک دشت با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و زمین آمار مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش بازه زمانی، پیش‌بینی خطای مدل ترکیبی (کوکرچینگ عصبی) افزایش می‌یابد. یوون و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از روش‌های شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان بر اساس سری‌های زمانی درازمدت سطح ایستابی را پیش‌بینی کردند. بر اساس نتایج مقایسه عملکرد دو مدل، نشان داده شد که پیش‌بینی عملکرد برگشت‌پذیر مدل ماشین بردار پشتیبان برتر از مدل شبکه عصبی می‌باشد. استانلی راج و همکاران (۲۰۱۷) از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در آبخوان کانیاکومری، تاملیل نادو، هند استفاده کردند. نوروزی و همکاران

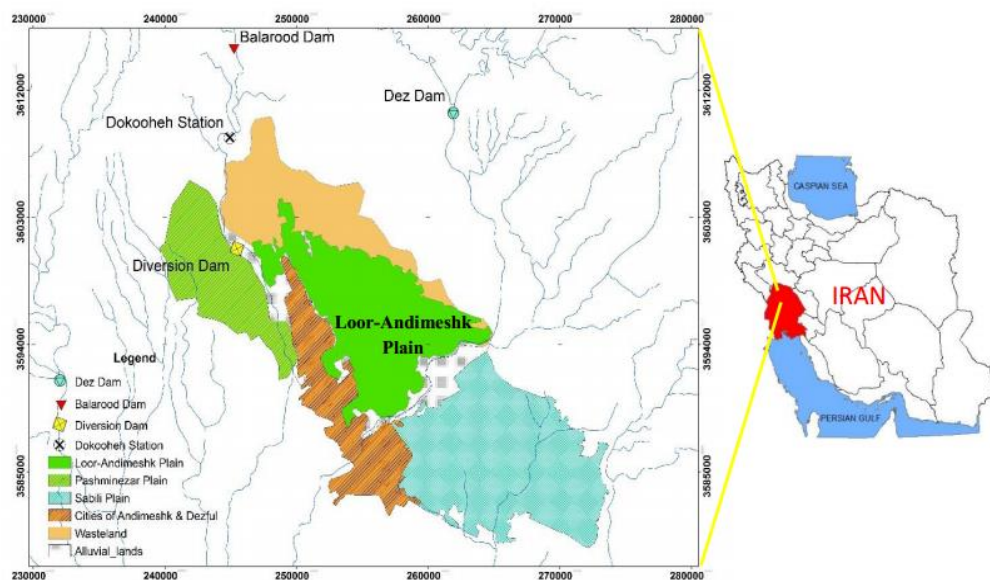
هیدروگراف معرف آبخوان، در شرایط کمبود داده و اطلاعات، فرامدل شبیه‌ساز بیان زن می‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل مفهومی مادفلو باشد.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی، دشت لور- اندیمشک، قسمتی از دشت دزفول-اندیمشک با مساحتی حدود ۲۱۴ کیلومترمربع است که در حوضه آبریز رود دز و در شمال شهرستان اندیمشک، بین طول جغرافیایی $48^{\circ}09'$ تا $48^{\circ}47'$ شرقی و عرض جغرافیایی $32^{\circ}32'$ تا $32^{\circ}36'$ شمالی قرار گرفته و از جمله دشتهای شمال جلگه خوزستان، در دامنه‌های غربی رشته کوه‌های زاگرس می‌باشد. این حوضه جزئی از بخش مرکزی شهرستان اندیمشک محسوب می‌شود و از شمال و شمال شرق به محدوده دریاچه سد دز، از شرق به شهر دزفول و رودخانه دز، از جنوب به شهر اندیمشک و از غرب و جنوب غرب به رودخانه بالارود ختم می‌شود. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل (۱ و ۲) نشان داده شده است.

(۱۳۹۷) با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی و شبکه عصبی، پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی را انجام دادند. استفاده از شبکه‌های تقویت عصبی WA عملکرد بهتری برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در مقایسه با مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی داشته‌اند. رضایی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از ترکیب موجک MARS و مدل درختی M5 سطح آب زیرزمینی را پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که مدل W-MARS دقت بیشتری نسبت به مدل درختی M5 در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی دارد. اکثر مطالعات انجام شده در زمینه آب‌های زیرزمینی مربوط به پیش‌بینی سطح ایستابی است و کمتر به هیدروگراف معرف آبخوان توجه شده است.

لذا هدف از این مطالعه در ابتدا مدل‌سازی هیدروگراف معرف آبخوان با استفاده از مدل مفهومی مادفلو و سپس مقایسه نتیجه با مدل‌سازی به روش فرا مدل شبیه‌ساز بیان زن است که برای اولین بار در این مطالعه برای این هدف مورد استفاده قرار گرفته است و سؤال اساسی این تحقیق این است که آیا برای مدل‌سازی



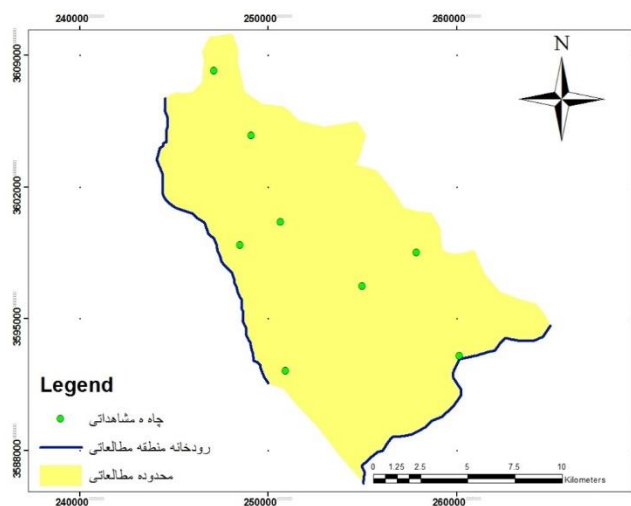
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

ضروری می‌باشد. در منطقه‌ی دشت لور - اندیمشک، ۸ حلقه پیزومتر که پراکنش نسبتاً خوبی در منطقه دارد، شبکه‌ی پیزومتری دشت را تشکیل می‌دهد. برای انجام این مطالعه با

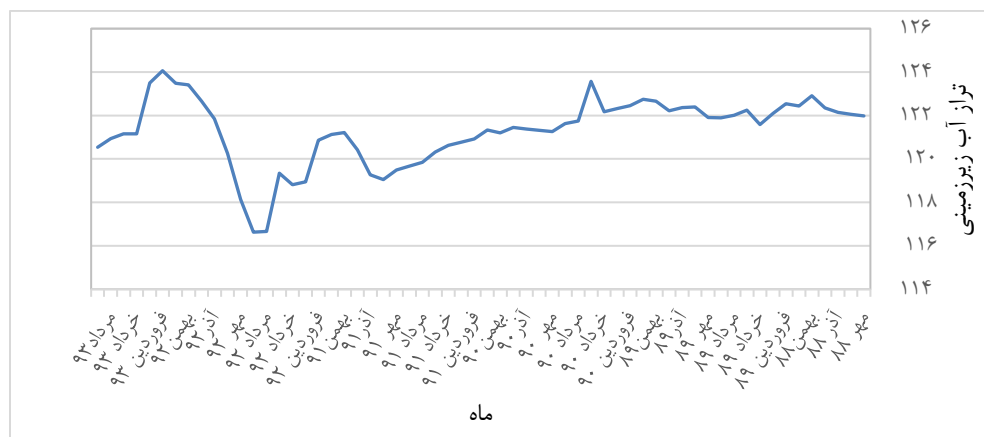
جهت بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی، جهت جریان آب زیرزمینی، نقاط تغذیه و تخلیه و سایر ارزیابی‌های هیدروژئولوژیکی، وجود یک شبکه‌ی پیزومتری مناسب در منطقه

پیزومترها به صورت مترکم و منظم می باشد روش تیسن برای استخراج هیدروگراف واحد آب زیرزمینی مناسب می باشد، زیرا زمانی که شبکه پیزومترها منظم و مترکم باشد، دقت روش تیسن بالا می رود (معصومی و رضایی، ۲۰۱۶). سپس با استفاده از مدل مفهومی آب زیرزمینی مادفلو و فرا مدل شبیه ساز بیان ژن، هیدروگراف معرف آبخوان طی مراحل زیر مدل سازی شد و نتایج با هم مقایسه گردید.

استفاده از مختصات جغرافیایی هر پیزومتر و اطلاعات آماری ماهانه مربوط به سطح ایستابی ۸ پیزومتر آبخوان دشت لور- اندیمشک، برای ۵ سال آبی (۸۹-۸۸ تا ۹۳-۹۲) و با استفاده از روش تیسن در محیط GIS، میانگین وزنی هر پیزومتر به دست آمد و سری زمانی تراز آب زیرزمینی دشت که بیانگر هیدروگراف معرف آبخوان منطقه مورد مطالعه است، محاسبه گردید (شکل ۳). (با توجه به اینکه مساحت منطقه مطالعاتی کم و شبکه



شکل ۲- موقعیت چاه های مشاهداتی



شکل ۳- هیدروگراف واحد دشت لور- اندیمشک از مهر ۱۳۸۸ تا شهریور ۱۳۹۳

تفاضلات محدود است که توسط سازمان زمین شناسی ایالت متحده آمریکا (USGS) تهیه شده است. در ابتدا برای تهیه مدل مفهومی از فرضیات لازم (فرم هندسی مرزها و محدوده سفره،

مدل مفهومی آب زیرزمینی مادفلو
ارزیابی کمی آب های زیرزمینی از مدل مادفلو استفاده می شود. مادفلو یک ماژول سه بعدی مدل جریان آب زیرزمینی

دارند، اما محدوده‌ای که می‌خواهیم آن را مدل‌سازی کنیم غالباً به این اشکال نمی‌باشند (اندرسون و همکاران، ۱۹۹۲).

شرایط مرزی و اولیه: انتخاب سطح و شرایط مرزی را شاید بتوان مهم‌ترین گام در تهیه مدل مفهومی دانست. انتخاب سطح و شرایط مرزی نامناسب ممکن است باعث کاهش دقت مدل گردد و پاسخ مدل به استرس‌های وارده را متفاوت از پاسخ سیستم واقعی به استرس‌ها نماید (لوو و همکاران ۲۰۱۳). در حالت ماندگار مرزها تأثیر زیادی روی الگوی جریان آب‌های زیرزمینی دارند ولی در حالت غیر ماندگار مرزها در صورتی بر روی جواب های مدل تأثیر خواهند گذاشت که اثر استرس‌های وارده به سیستم جریان، به مرزها برسد. هفت نوع مرز می‌توان برای مدل‌های جریان در نظر گرفت که عبارت‌اند از: مرز بار ثابت، مرز بار مشخص، خط جریان، مرز با جریان مشخص، مرز جریان وابسته به بار هیدرولیکی، سطح آزاد و سطح تراوش.

شرایط اولیه: توزیع بار هیدرولیکی دشت در آغاز شبیه‌سازی شرایط اولیه می‌باشد. بنابراین شرایط اولیه نوعی مرز زمانی برای سیستم مورد مطالعه است.

تعیین سقف و کف لایه آبدار: با استفاده از مقاطع ژئوفیزیکی تهیه شده دشت و اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای که به سنگ کف برخورد کرده‌اند، نقشه ارتفاع سنگ کف تهیه می‌گردد.

تغذیه: تغذیه دشت یکی از پارامترهای مهم در مدل آب زیرزمینی می‌باشد. برای در نظر گرفتن تغذیه در منطقه مطالعاتی از بسته تغذیه با پسوند *RCH* استفاده می‌گردد. معمولاً به دلیل ویژگی‌های مختلف خاک‌شناسی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، شدت بارندگی و شیب زمین، در نقاط مختلف میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی متفاوت می‌باشد. در مدل آب زیرزمینی از آنجا که معمولاً اطلاعات کمی از میزان تغذیه در مناطق مختلف در دسترس است، پارامتر تغذیه برای محدوده وسیعی در نظر گرفته می‌شود و در طول کالیبراسیون بهینه می‌گردد (اندرسون و وسنر، ۱۹۹۲).

جریان حاکم بر سفره، نوع تشکیلات زمین‌شناسی و نوع رژیم جریان) استفاده می‌شود و با وارد کردن داده‌های ورودی به فرمت خاص، مدل مادفلو اجرا می‌شود که معادله‌ی حرکت جریان، به روش عددی تفاضل محدود حل می‌شود. در نهایت مدل تهیه شده کمی آبخوان با پارامترهای ورودی و اسنجی، آنالیز حساسیت و در نهایت صحت‌سنجی می‌شود. در این صورت می‌توان در پیش‌بینی‌های آینده از آن‌ها استفاده کرد. روند مدل‌سازی کمی آبخوان توسط این مدل در شکل ۴ نمایش داده شده است. در این تحقیق از کد مادفلو در نرم‌افزار *GMS* جهت مدل‌سازی آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است.



شکل ۴- روند مدل‌سازی کمی آبخوان یک منطقه (اندرسون و همکاران، ۱۹۹۲).

انتخاب جهت و اندازه شبکه مدل: در مدل‌های تفاضل محدود باید توجه داشت که تعداد گره‌هایی که در خارج از مرزهای محدوده مدل‌سازی قرار می‌گیرند، حداقل باشد. اگرچه بارهای هیدرولیکی در این گره‌ها که گره‌های غیرفعال نامیده می‌شوند، محاسبه نمی‌گردد، اما در آرایه‌ای که مدل از آن استفاده می‌کند فضایی را اشغال می‌کنند. مشکل گره‌های غیرفعال از آنجا منشأ می‌گیرد که شبکه تفاضلات محدود شکلی مربعی یا مستطیلی

آن‌ها تأثیرگذارند به درستی در نظر گرفته شده است (بیر، ۲۰۱۰).

فرامدل شبیه‌ساز بیان ژن: برنامه‌ریزی بیان ژن که در ادامه‌ی سیر تکاملی مدل‌های هوشمند به وجود آمده است، جزء روش‌های الگوریتم تکاملی محسوب می‌شود که مبنای تمامی آن‌ها بر اساس نظریه تکامل داروین استوار است (داننده‌مهر و همکاران، ۲۰۱۰). مزیت فرامدل شبیه‌ساز بیان ژن نسبت به مدل‌های دیگر از جمله شبکه عصبی مصنوعی این است که در فرامدل شبیه‌ساز بیان ژن، ابتدا ساختار (متغیرهای ورودی، هدف و مجموع توابع) تعریف شده و سپس ساختار بهینه مدل و ضرایب طی فرایند آموزش تعیین می‌شوند، در حالی که در شبکه‌های عصبی، ابتدا باید ساختار تعیین شود و فقط ضرایب مدل طی فرایند آموزش حاصل می‌شوند. همچنین الگوریتم شبیه‌ساز بیان ژن به‌طور خودکار می‌تواند متغیرهای ورودی که در مدل بیشترین تأثیر را دارند، انتخاب کند. در این روش کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، (مشابه با آنچه که در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود) و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت، (مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک) ترکیب می‌شوند. اولین مرحله در الگوریتم مدل، تولید جمعیت اولیه از راه حل‌هاست. این امر می‌تواند به وسیله فرآیند تصادفی و یا در نظر گرفتن اطلاعات ورودی درباره مسئله انجام شود. سپس کروموزوم‌ها به صورت ساختار درختی ارائه شده و توسط تابع برازش ارزیابی می‌گردند. در صورت دستیابی به راه‌حل مطلوب و یا رسیدن نسل‌ها به تعداد معین، تکامل متوقف شده و بهترین راه‌حل ارائه می‌شود. اگر شرایط توقف یافت نشود، نخبه‌گزینی انجام می‌شود و باقی راه‌حل‌ها به فرآیندی گزینشی واگذار می‌شوند. این فرآیند برای چندین نسل تکرار می‌شود و با پیش رفتن نسل به جلو کیفیت جمعیت نیز به‌طور نسبی بهبود می‌یابد (فریرا، ۲۰۰۶). فرامدل شبیه‌ساز بیان ژن نیز همانند الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی ژنتیک، یک الگوریتم ژنتیکی است (اعلمی و همکاران، ۱۳۹۳)،

پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان: در این مرحله تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان با روش زون‌بندی بر اساس لوگ حفاری چاه‌های مشاهداتی، اکتشافی و پیژومتری و همچنین مقاطع ژئوفیزیکی تهیه شده از منطقه انجام می‌گیرد. با توجه به جنس خاک و رسوبات هر زون مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه تخمین زده می‌شود و در نهایت در مرحله‌ی کالیبراسیون برای هر زون مقدار بهینه شده هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه لحاظ می‌گردد.

واسنجی مدل در حالت ماندگار: بعد از تکمیل اطلاعات و ساخت بسته‌های مورد نیاز و اجرای مدل، واسنجی مدل با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی و با استفاده از MODFLOW-2000 انجام گرفت. در این روش برای هر پارامتر مقادیر اولیه تخمین زده شد و با روش سعی و خطا واسنجی انجام شد با این هدف که اختلاف مقادیر محاسباتی و مشاهداتی کمتر از یک متر باشد. در واسنجی حالت ماندگار هدایت هیدرولیکی دشت و ضریب گذردهی مرزها بهینه می‌گردد.

در حالت غیر ماندگار: این مرحله از کار پس از واسنجی مدل برای حالت ماندگار، انجام می‌شود و دوره‌های تنش حالت غیر ماندگار به تدریج به مدل اضافه شده و مدل در هر مرحله واسنجی می‌گردد. در حالت ماندگار بعد از کالیبره شدن مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب گذردهی^۹، سلول‌های مرزی^{۱۰} GHB را که بهینه شدند در مدل غیر ماندگار ثابت در نظر گرفته و از همین مقادیر بهینه برای واسنجی کردن مدل در حالت غیر ماندگار استفاده می‌شود و مدل با استفاده از پارامترهای آبدهی ویژه و تغذیه واسنجی مجدد می‌گردد.

صحت سنجی مدل: در صحت‌سنجی مدل، کلیه پارامترهای دوره واسنجی ثابت می‌باشد و هدف از این کار این است که مدل استرس‌های دوره صحت سنجی را تخمین بزند. در واقع صحت سنجی فرآیندی است که طی آن اطمینان حاصل می‌شود کلیه فرایندهایی که در ارتباط بین استرس‌های وارده و پاسخ مدل به

¹⁰- General Head Boundary

⁹- Conductance

طول ثابت (ژنوم یا کروموزومها) کدگذاری شده و سپس به شکل نهادهای غیرخطی با اندازه‌ها و اشکال متفاوت (یعنی نمایش دیگرام ساده یا ساختار درختی) بیان می‌شوند (فریرا، ۲۰۰۱). جهت کسب اطلاعات بیشتر با این مدل به منبع (اعلمی و همکاران، ۱۳۹۳) مراجعه شود.

ساختارهای مختلف برای مدل‌سازی: برای اجرای فرامدل شبیه ساز بیان ژن، ۱۰ نوع ترکیب به عنوان پارامترهای ورودی مطابق جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفت.

به‌طوری که از جمعیتی از افراد استفاده می‌کند که آن‌ها را مطابق برازندگی انتخاب می‌کند و تغییرات ژنتیکی را با استفاده از یک یا چند عملگر ژنتیکی اعمال می‌نماید. تفاوت اساسی بین این سه الگوریتم، مربوط به ماهیت افراد آن‌ها می‌باشد به‌طوری که در الگوریتم ژنتیک، افراد رشته‌های خطی با طول ثابت (کروموزومها) و در برنامه‌ریزی ژنتیک، نهادهای غیرخطی با اندازه‌ها و اشکال متفاوت (درختان تجزیه) می‌باشند، در حالی که در فرامدل شبیه‌ساز بیان ژن، افراد به صورت رشته‌های خطی با

جدول ۱- ترکیب‌های مختلف مدل GEP

ترکیب	ورودی	خروجی
۱	L_{t-1}	L_t
۲	L_{t-1}, L_{t-2}	L_t
۳	$L_{t-1}, L_{t-2}, L_{t-3}$	L_t
۴	$L_{t-1}, L_{t-2}, L_{t-3}, L_{t-4}$	L_t
۵	$L_{t-1}, L_{t-2}, L_{t-3}, L_{t-4}, L_{t-5}$	L_t
۶	$L_{t-1}, L_{t-2}, L_{t-3}, L_{t-4}, L_{t-5}, L_{t-6}$	L_t
۷	$L_{t-1}, L_{t-2}, L_{t-3}, L_{t-4}, L_{t-5}, L_{t-6}, L_{t-7}$	L_t
۸	$L_{t-1}, L_{t-2}, L_{t-3}, L_{t-4}, L_{t-5}, L_{t-6}, L_{t-7}, L_{t-8}$	L_t
۹	$L_{t-1}, L_{t-2}, L_{t-3}, L_{t-4}, L_{t-5}, L_{t-6}, L_{t-7}, L_{t-8}, L_{t-9}$	L_t
۱۰	$L_{t-1}, L_{t-2}, L_{t-3}, L_{t-4}, L_{t-5}, L_{t-6}, L_{t-7}, L_{t-8}, L_{t-9}, L_{t-10}$	L_t

شاخص کلی عملکرد مدل (OI) استفاده شد. در زیر روابط این معیارها ارائه شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Q_{obs} - Q_{pre})^2}{n}} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{pre})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \bar{Q})^2} \quad (3)$$

$$OI = \frac{1}{2} \left(2 - \frac{RMSE}{Q_{max} - Q_{min}} + \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{pre})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \bar{Q})^2} \right) \quad (4)$$

در روابط فوق، n تعداد داده‌ها، Q_{obs} داده‌های مشاهداتی، $\bar{Q}$ میانگین داده‌های مشاهداتی، Q_{pre} داده‌های محاسباتی، Q_{max} : حداکثر داده‌ها، Q_{min} : حداقل داده‌ها می‌باشد. ضریب R^2 میزان انطباق داده‌هایی که توسط مدل به وجود می‌آید و داده‌های واقعی را نشان می‌دهد. $RMSE$ جذر میانگین مربع خطاهای داده‌های محاسباتی و مشاهداتی را بیان می‌کند. واضح است که

تراز آب زیرزمینی در دوره‌های زمانی ماهانه گذشته می‌باشد. به منظور هماهنگ‌تر شدن بهتر داده‌ها و افزایش سرعت اجرای مدل، داده‌ها با استفاده از روش استانداردسازی به اعدادی بین صفر تا یک تبدیل شدند و از رابطه زیر برای نرمال سازی (استانداردسازی) استفاده شده است (گلایی و همکاران، ۱۳۹۲).

$$y = 0.1 + (0.8 \times \left(\frac{X - \hat{X}}{X_{max} - X_{min}} \right)) \quad (1)$$

که در این روابط X داده مورد نظر، $\hat{X}$ میانگین داده‌ها، X_{max} حداکثر داده‌ها، X_{min} حداقل داده‌ها و y داده استاندارد شده می‌باشد. در این تحقیق از ۷۰ درصد داده‌ها برای مرحله آموزش و ۳۰ درصد برای مرحله تست استفاده شده است.

معیارهای ارزیابی مدل‌ها: برای ارزیابی مدل‌ها از سه معیار، ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و

هر چه مقدار این عدد کمتر باشد به تبع، آموزش و شبیه سازی داده ها بهتر صورت گرفته است. OI شاخص کلی عملکرد مدل است. هر چه $RMSE$ کمتر باشد، پیش بینی دقیق تر است. OI

بین مقادیر $-\infty$ تا یک تغییر می کند. هر چه مقدار شاخص کلی عملکرد مدل به یک نزدیک تر باشد نشان دهنده یک تناسب کامل بین مقادیر تجربی و پیش بینی می باشد (ماتار و همکاران، ۲۰۱۵).

نتایج و بحث

مدل مفهومی MODFLOW

در این مطالعه، جهت شبکه بندی در راستای شمال غربی و با زاویه ۱۲ منحرف شد و ابعاد سلول های شبکه 500×500 متر در نظر گرفته شد. لذا شبکه بندی مدل با تعداد ۲۳۴۰ سلول (۵۲ ردیف و ۴۵ ستون) با فواصل ۵۰۰ متر ساخته شد که شامل ۸۱۶ سلول فعال و ۱۵۲۴ سلول غیرفعال بود. در این مطالعه برای شبیه سازی مرزهای ورودی و خروجی دشت لور- اندیمشک از بسته مرز بار عام^{۱۱} استفاده شده است. برای تعیین شرایط اولیه با بررسی هیدروگراف واحد دشت لور- اندیمشک مشخص شد که نوسان سطح آب در سال آبی ۹۱-۱۳۸۹۰

حالت ماندگاری نسبت به سایر سال ها دارد، بنابراین در مدل آب زیرزمینی آذرماه سال ۱۳۹۰، به عنوان ماه ماندگار در نظر گرفته شد. مدل حالت ماندگار، برای دوره ماندگار آذر ۹۰ کالیبره شده و به عنوان اولین دوره تنش مدل غیر ماندگار انتخاب گردید. مدل حالت ماندگار به سطح آب اولیه حساس نمی باشد. اما در صورتی که معادله جریان در منطقه غیرخطی باشد، ممکن است به ازای سطح آب اولیه مختلف جواب های مدل متفاوت باشند. به همین خاطر در این تحقیق از بسته های $PCG2$ و یا $DE4$ ^{۱۲} برای در نظر گرفتن این حالت استفاده شد. در این بسته ها متغیرهایی وجود دارد که با تنظیم آن ها می توان معادله های جریان غیرخطی را به درستی حل کرد. کد

ابتدا در محیط اتوکد ۲۰۰۷ با توجه به مختصات مقاطع مقادیر مربوط به هر مقطع به دست آمد و سپس اطلاعات مکانی و مقادیر ارتفاع سنگ کف در محیط *ARCGIS* وارد شده و نقشه سنگ کف استخراج گردید. چون در مدل آب زیرزمینی معمولاً اطلاعات کمی از میزان تغذیه در مناطق مختلف در دسترس است، پارامتر تغذیه برای محدوده وسیعی در نظر گرفته شد و در موقع کالیبراسیون بهینه گردید. بعد از اینکه تمام بسته ها ساخته شد و اطلاعات مورد نیاز مدل تکمیل شد، مدل به اجرا گذاشته شد. اما مقادیر محاسبه شده و مشاهداتی اختلاف چشم گیری داشتند، بنابراین در این مرحله از کار عملیات واسنجی مدل انجام شد و در حالت ماندگار مدل کالیبره شد.

کالیبراسیون مدل از روش رگرسیون غیرخطی و با استفاده از *MODFLOW-2000* انجام گرفت.

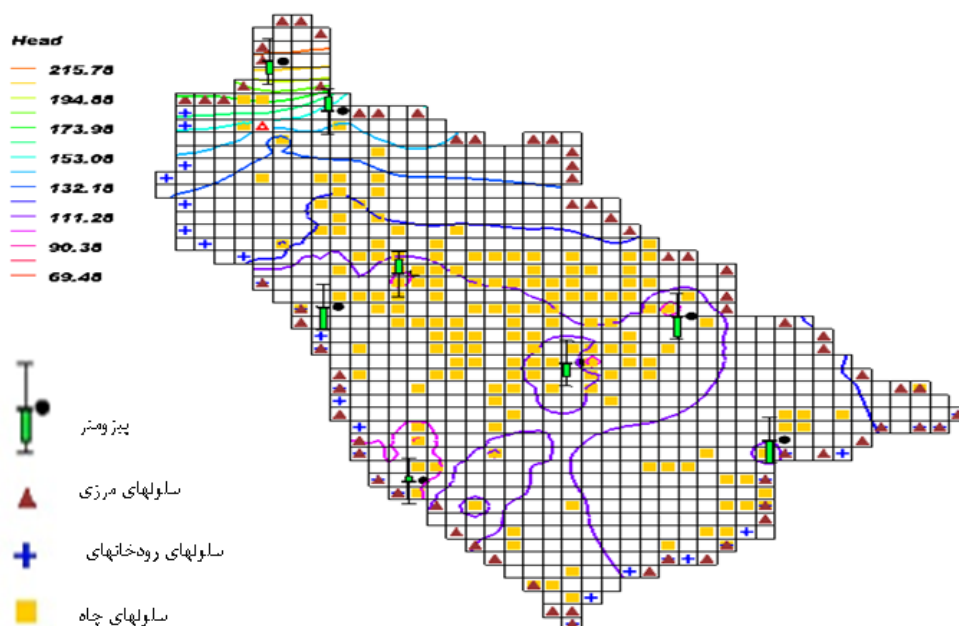
در این روش با این هدف که اختلاف مقادیر محاسباتی و مشاهداتی سطح هر یک از پیژومترها در همراه کمتر از یک متر باشد و با توجه به نقشه رقومی ارتفاعی منطقه مطالعاتی، افت یکنواختی در کل محدوده ایجاد شود، کالیبراسیون انجام شد. در واسنجی حالت ماندگار هدایت هیدرولیکی دشت و ضریب گذردهی مرزها بهینه گردید.

¹²-Direct Solver

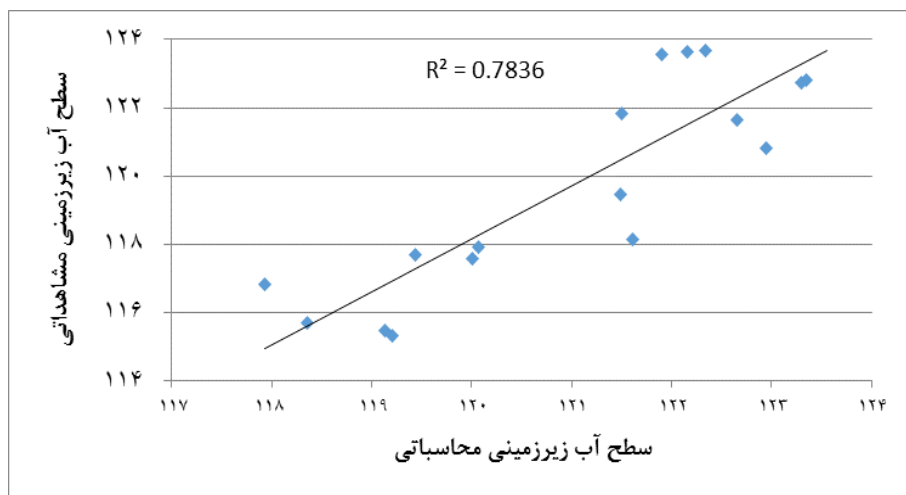
¹¹- General Head Boundry

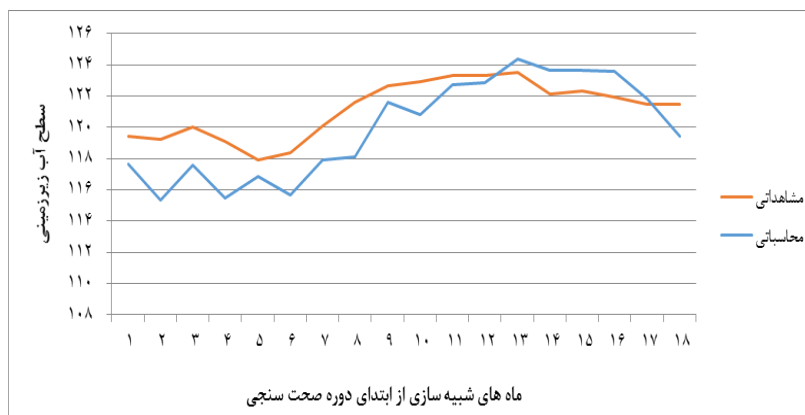
۹۳ انجام شد. نتیجه حاصل از بررسی مدل نشان داد که مدل مفهومی مادفلو دارای ضریب تبیین $0/9128$ در مرحله آموزش و ضریب تبیین $0/7836$ در مرحله تست و جذر میانگین مربعات خطا در مرحله آموزش $0/337$ و جذر میانگین مربعات خطا در مرحله تست $0/449$ بوده است. شکل ۶ مقایسه مقادیر مشاهداتی را با مقادیر برآوردی برای مدل مفهومی مادفلو در مرحله تست نشان می‌دهد. با توجه به این شکل عملکرد مدل مناسب بوده است.

در شکل ۵ اجزای مدل عددی تهیه شده و تراز آب زیرزمینی دشت در حالت ماندگار بعد از عملیات واسنجی نشان داده شده است. در مرحله بعد، واسنجی مدل در حالت غیر ماندگار به مدت $3/5$ سال (مهرماه سال ۸۸ تا اسفند ۹۱) انجام شد و دوره‌های تنش حالت غیر ماندگار به تدریج به مدل اضافه شده و مدل در هر مرحله واسنجی شد و در نهایت بعد از واسنجی حالت غیر ماندگار، یک سال و نیم دیگر به دوره شبیه‌سازی اضافه شد تا مدل برای این دوره ۱۸ ماهه صحت‌سنجی گردد. صحت‌سنجی مدل به مدت $1/5$ سال و از فروردین ۹۲ تا شهریور



شکل ۵- اجزای مدل عددی تهیه شده و تراز آب زیرزمینی دشت در حالت ماندگار





شکل ۶- مقایسه نتایج مدل سازی با مدل مفهومی مادفلو با مقادیر مشاهده‌ای (بر حسب متر)، مرحله تست (فروردین ۹۲ تا شهریور ۹۳).

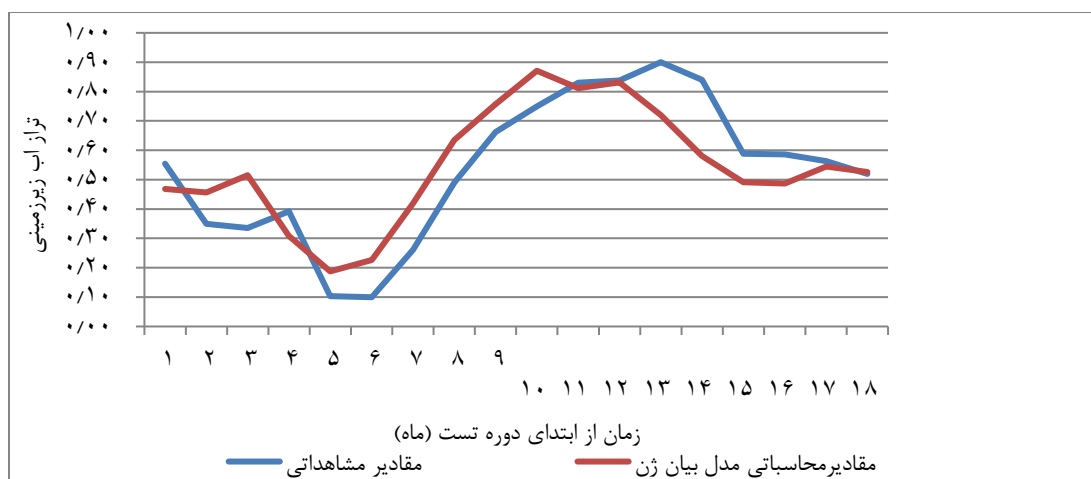
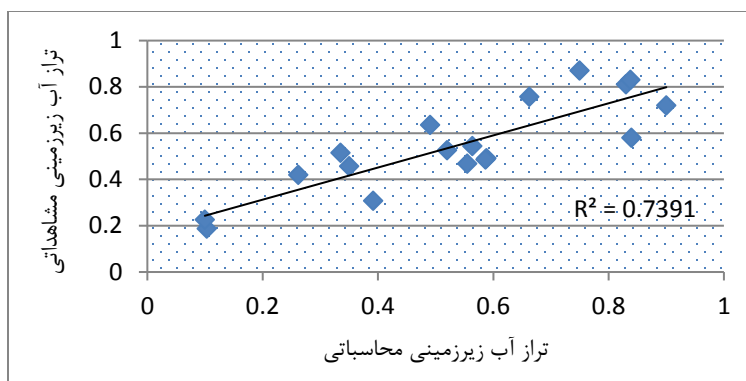
نتایج فرامدل شبیه‌ساز بیان ژن

ترتیب برابر 0.739 ، 0.721 و 0.636 می‌باشد و همچنین جذر میانگین مربعات خطای ترکیب شماره ۵ برابر 0.122 و ترکیب ۹ برابر 0.128 و ترکیب ۱۰ برابر 0.49 می‌باشد. در کل ترکیب ۵ با ۵ تأخیر زمانی، عملکرد بهتری نسبت به سایر ترکیب‌ها داشته است و بعد از آن ترکیب ۹ با افزایش تأخیر زمانی با اندکی اختلاف نسبت به ترکیب ۵ عملکرد بهتری داشته است. با توجه به نتایج ترکیب‌های مختلف می‌توان به این نتیجه رسید که تقریباً با ۵ تأخیر زمانی می‌توان به نتایج قابل قبولی در آموزش و تست فرامدل شبیه‌ساز بیان ژن رسید. شکل ۷ مقایسه مقادیر مشاهداتی با مقادیر برآوردی برای ساختار برتر فرامدل بیان ژن در مرحله تست را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل عملکرد مدل مناسب بوده است.

نتایج حاصل از بررسی ترکیب‌های مختلف مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در جدول ۲ ارائه شده است. در بین این ترکیب‌ها، ترکیب شماره ۷ و ۵ و ۹ به ترتیب با ۷ تأخیر زمانی و ۵ تأخیر زمانی و ۹ تأخیر زمانی در مرحله آموزش به ترتیب نسبت به بقیه ترکیب‌ها عملکرد بهتری داشته‌اند و ضریب تبیین آن‌ها به ترتیب برابر 0.82 ، 0.812 و 0.775 می‌باشد و همچنین جذر میانگین مربعات خطای ترکیب شماره ۷ برابر 0.47 و ترکیب ۵ برابر 0.48 و ترکیب ۹ برابر 0.53 می‌باشد. از طرفی در بین این ترکیب‌ها در مرحله تست ترکیب شماره ۵ و ۹ و ۱۰ با ۵ تأخیر زمانی و ۹ تأخیر زمانی و ۱۰ تأخیر زمانی به ترتیب نسبت به بقیه ترکیب‌ها عملکرد بهتری داشته‌اند و ضریب تبیین آن‌ها به

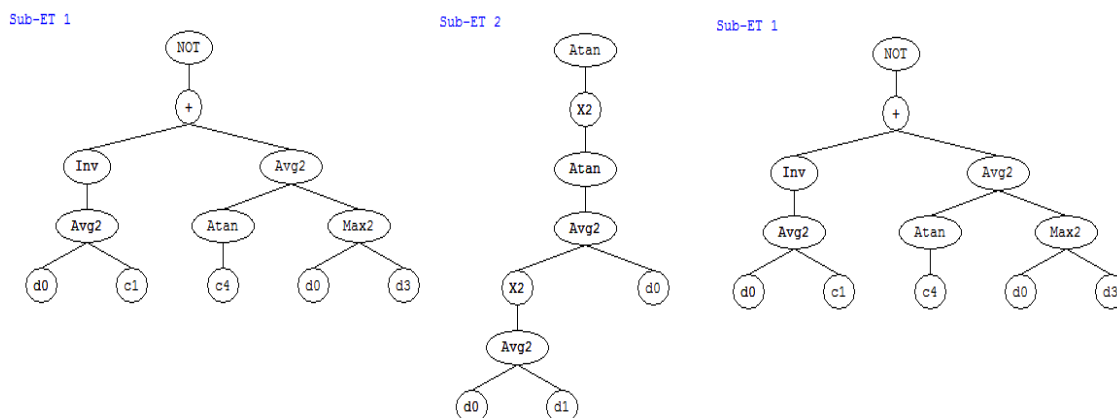
جدول ۲- بهترین ساختار مدل برنامه‌ریزی بیان ژن

ترکیب	R ²		RMSE	
	آموزش	تست	آموزش	تست
۱	۰/۷۵۰	۰/۶۱۷	۰/۰۵۷	۰/۱۷۳
۲	۰/۷۲۰	۰/۶۲۰	۰/۰۵۸	۰/۱۶۴
۳	۰/۵۴۹	۰/۵۴۱	۰/۰۷۴	۰/۱۷۷
۴	۰/۷۵۱	۰/۵۸۶	۰/۰۵۷	۰/۱۵۵
۵	۰/۸۱۲	۰/۷۳۹	۰/۰۴۸	۰/۱۲۲
۶	۰/۶۰۱	۰/۲۵۷	۰/۰۶۹	۰/۲۱۰
۷	۰/۸۲۰	۰/۵۱۸	۰/۰۴۷	۰/۱۶۶
۸	۰/۷۶۶	۰/۲۱۹	۰/۰۵۳	۰/۲۲۳
۹	۰/۷۷۵	۰/۷۲۱	۰/۰۵۳	۰/۱۲۸
۱۰	۰/۶۳۰	۰/۶۳۶	۰/۰۹۸	۰/۴۹۰



شکل ۷- مقایسه نتایج مدل سازی با برنامه ریزی بیان ژن با مقادیر مشاهده ای (بر حسب متر)، مرحله تست (فروردین ۹۲ تا شهریور ۹۳).

در شکل ۸ ساختار درختی برای ترکیب برتر فرامدل شبیه ساز بیان ژن نشان داده شده است. این ساختار در هر مرحله جمعیت اولیه را به صورت ساختار خطی ساده نشان می دهد و تمامی تغییرات فقط بر روی ساختارهای ساده انجام می گیرد، در نتیجه نیازی به ساختارهای نسبتاً پیچیده برای گسترش در هر مرحله نخواهد بود. در این شکل مقادیر C مربوط به ضرایب فرامدل شبیه ساز بیان ژن و مقادیر d مربوط به پارامترهای ورودی می باشد که با تأخیرهای مختلف ارائه شده است.



شکل ۸- ساختار درختی ترکیب برتر مدل برنامه ریزی بیان ژن

مقایسه نتایج مدل‌های استفاده شده

مرحله تست مقدار ضریب تبیین هر دو مدل در یک سطح می باشد و اختلاف بسیار جزئی دارد. از طرفی با توجه به پارامتر جذر میانگین مربعات خطا، مشاهده می شود که فرامدل شبیه ساز بیان ژن دارای جذر میانگین مربعات خطای کمتری بوده است. بر اساس معیار OI که هرچه مقادیر به یک نزدیک تر باشد، مدل عملکرد بهتری دارد، مشاهده می شود که مدل مادفلو با اختلاف کمی دارای معیار OI بیشتری نسبت به فرامدل شبیه ساز بیان ژن بوده است و می توان با مشاهده مقادیر جدول به این نتیجه رسید که در شرایط کمبود داده و اطلاعات، برای مدل سازی هیدروگراف معرف آبخوان با استفاده از مدل مفهومی مادفلو، فرامدل شبیه ساز بیان ژن می تواند جایگزین مناسبی باشد.

در این قسمت به منظور این که مقایسه مناسبی بین عملکرد دو مدل صورت گیرد، مقایسه کمی بین دو مدل صورت گرفته است. برای مقایسه کمی بین دو مدل از سه معیار ارزیابی به نام های ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و شاخص کلی عملکرد مدل استفاده شد. نتایج این بررسی در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول ۳ و مقایسه مدل های مادفلو و فرامدل شبیه ساز بیان ژن مشاهده می شود که در مرحله آموزش ضریب تبیین مدل مادفلو با اختلاف کمی از ضریب تبیین فرامدل شبیه ساز بیان ژن بیشتر می باشد که ناشی از ورودی های متعدد و داده های مختلف در مرحله آموزش این مدل می باشد. ولی در

جدول ۳- مقایسه مدل های استفاده شده در این تحقیق

مدل	R ²		RMSE		OI شاخص کلی عملکرد مدل	
	آموزش	تست	آموزش	تست	آموزش	تست
MODFLOW	۰/۹۲۰۵	۰/۸۲۶۶	۰/۳۳۷۳	۰/۴۴۹۱	۰/۹۲۰۵	۰/۸۲۶۶
GEP	۰/۸۵۱۷	۰/۷۹۰۷	۰/۰۴۸۹	۰/۱۲۲۷	۰/۸۵۱۷	۰/۷۹۰۷

منابع

اعلمی، م. ت.، صادق فام، س.، فاضلی فرد، م. ح. ۱۳۹۳. مدل سازی سری داده ها: راهنمای کاربردی مدل های برنامه ریزی بیان ژن، سیستم استنتاج فازی، شبکه بیزین، شبکه عصبی مصنوعی. موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تبریز، ۳۰۴ صفحه.

اکبرزاده، ف.، حسن پور، ح.، امام قلی زاده، ص. ۱۳۹۵. پیش بینی تراز آب زیرزمینی دشت شاهرود با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی تابع پایه شعاعی. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز سال هفتم. شماره ۱۳: ۱۱۸-۱۰۴.

ایمانی، ر.، قاسمیه، ه.، اسمعیلی عوری، ا. ۱۳۹۵. مقایسه کارایی مدل هیدروژئولوژیکی WetSpa، شبکه عصبی مصنوعی و سیستم عصبی- فازی انطباقی در شبیه سازی دبی جریان رودخانه (مطالعه موردی: حوضه آبخیز بالوخلوچای استان اردبیل). نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۱: ۹۹-۱۱۶.

پورمحمدی، س.، ملکی نژاد، ح.، پورشرعیاتی، ر. ۱۳۹۲. مقایسه کارایی روش های شبکه عصبی و سری های زمانی در پیش بینی سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: زیر حوزه بختگان). نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک. شماره ۴: ۲۵۱-۲۶۲.

نتیجه گیری

در این تحقیق از دو مدل به نام های مدل مفهومی مادفلو و فرامدل شبیه ساز بیان ژن جهت مدل سازی هیدروگراف معرف آبخوان استفاده شده است. هدف از این مطالعه نشان دادن تفاوت های بین دو مدل و همچنین بررسی توانایی آن ها برای مدل سازی نوسانات سطح ایستابی دشت لور- اندیمشک بوده است. نتایج نشان داد که مدل مفهومی مادفلو با ضریب تبیین ۰/۷۸۳۶ در مرحله تست نسبت به فرامدل شبیه ساز بیان ژن با ضریب تبیین ۰/۷۳۹۱ با اختلاف بسیار جزئی دارای عملکرد بهتری می باشد و می توان به این نتیجه رسید که در شرایط کمبود داده و اطلاعات برای مدل سازی نوسانات سطح ایستابی آب های زیرزمینی (هیدروگراف معرف آبخوان) با استفاده از مدل مفهومی مادفلو می توان از فرامدل شبیه ساز بیان ژن استفاده کرد و این فرامدل شبیه ساز توانایی مدل سازی آب های زیرزمینی را در سطح مدل مفهومی مادفلو تحت شرایط کمبود داده و اطلاعات دارد.

- Anderson, M.P., Woessner, W.W. 1992. Applied groundwater modeling flow and adjective Transport. Academic Press, Inc.
- Barzegar, R., Fijani, E., Asghari Moghaddama, A., Tziritis, E. 2017. Forecasting of groundwater level fluctuations using ensemble hybrid multi-wavelet neural network-based models. *Science of the Total Environment*. 60: 20–31.
- Bear, J. 2010. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. Springer Verlag. Vol.23. 834 P.
- Danandeh Mehr, A., Majdzadeh Tabatabai, M.R. 2010. Prediction of Daily Discharge Trend of River Flow Based on Genetic Programming. *Journal of water and soil*. 24(2): 325-33.
- EMRL. 2010. Groundwater Modeling System v7.1 Tutorials. Brigham Young University: Environmental Modeling Research Laboratory.
- Ferreira, C. 2006. Gene Expression Programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence (Studies in Computational Intelligence). ed n, editor. Springer-Verlag New York, Inc. Secaucus, NJ, USA.
- Ferreira, C. 2001. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *Complex Syst*. 13: 87-129.
- Lu, C., Chen, Y., Zhang, C., Luo, J. 2013. Steady-state freshwater-seawater mixing zone in stratified coastal aquifers, *Journal of Hydrology*. 505: 24-34.
- Mattar, M.A., Alamoud, A.I. 2015. Artificial neural networks for estimating the hydraulic performance of labyrinth-channel emitters. *Computers and Electronics in Agriculture*. 114: 189-201.
- Norouzi, H., Asghari Mogaddam, A. and Nadiri, A.A. 2016. Determining vulnerable areas of Malikan Plain Aquifer for Nitrate, Using Random Forest method. *Journal of Environmental Studies*. 41(4): 923-94.
- Norouzi, H., Nadiri, A.A., Moghaddam, A.A., Gharekhani, M. 2018. Comparing Performans of Fuzzy Logic, Artificial Neural Network and Random Forest Models in Transmissivity Estimation of Malekan Plain Aquifer, *Journal of ecohydrology*. 5(3): 739-751. doi.org/10.22059/ije.2018.239914.707
- Rezaie-balf, M., Naganna, S.R., Ghaemi, A., Deka, P.C. 2017. Wavelet coupled MARS and M5 model tree approaches for groundwater level forecasting. *Journal of Hydrology*. 553: 356-373.
- Stanley Raj, A., Hudson Oliver, D., Srinivas, Y., Viswanath, J. 2017. Wavelet based analysis on rainfall and water table depth forecasting using Neural Networks in Kanyakumari district, Tamil Nadu, India. *Groundwater for Sustainable Development*. 5: 178–186.
- Yoona, H., Hyunb, Y., Ha, K., Leec, K. K., Kimd, G. B. 2016. A method to improve the stability and accuracy of ANN- and SVM-based time series models for long-term groundwater level predictions. *Computers and Geosciences*. 90: 144-155.
- زارعی، ح.، آخوندعلی، ع. م. ۱۳۸۶. مقایسه روش‌های زمین آماری و آمار کلاسیک در ترسیم هیدروگراف واحد آب زیرزمینی. طرح پژوهشی سازمان آب و برق خوزستان. ۷۱ صفحه.
- سینگ، وی پی.، ترجمه: نجفی، م. ر. ۱۳۸۱. سیستم‌های هیدرولوژیکی مدل‌سازی بارندگی - رواناب. جلد اول. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ اول. ۵۷۸ صفحه.
- کاوه کار، ش.، قربانی، م. ع.، اشرف زاده، ا.، دربندی، ص. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی نوسانات تراز آب با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست (دانشکده فنی). ۴۳: ۶۹-۷۵.
- گلایی، م. ر.، آخوندعلی، ع. م.، رادمنش، ف. ۱۳۹۲. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی در مدل‌سازی بارندگی فصلی (مطالعه موردی: ایستگاه‌های منتخب استان خوزستان). نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۳۰: ۱۵۱-۱۶۹.
- مشکانی، ع.، ناظمی، ع.، ۱۳۸۸. مقدمه‌ای بر داده‌کاوی. موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه فردوسی، مشهد. ۴۵۶ صفحه.
- معصومی، ز.، رضایی، ا. ۱۳۹۵. روش تیسن یا تکنیک‌های درون‌یابی: برآورد هیدروگراف واحد آب زیرزمینی. سی و چهارمین گردهمایی و دومین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، تهران، ایران.
- ملکی نژاد، ح.، پورشرعیاتی، ر. ۱۳۹۲. کاربرد و مقایسه مدل سری زمانی تجمعی و مدل شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت مروست). علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی) / جلد ۳۶، شماره ۳: ۸۱-۹۲.
- ندیری، ع.، نادری، ک.، اصغری مقدم، ا.، حبیبی، م. ح. ۱۳۹۵. پیش‌بینی زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و زمین آمار (مطالعه موردی: آبخوان دشت دزدوزان). نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی. دوره ۲۰، شماره ۵۸ (۲): ۲۸۱-۳۰۱.
- نیکبخت، ج.، نوری، س. ۱۳۹۵. پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی با کمک شبکه‌های موج-عصبی (مطالعه موردی: دشت مراغه - آذربایجان شرقی). نشریه هیدروژئولوژی. ۱(۱): ۱-۱۶.
- نیکبخت، ج.، ذوالفقاری، م.، نجیب، م. ۱۳۹۵. پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی دشت تسوج - آذربایجان شرقی با کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی. نشریه هیدروژئولوژی. ۱(۲): ۹۹-۱۱۵.