جغرافیا و آمایش شهری - منطقه‌ای، شماره ۲۸، پاییز ۱۳۹۷
وصول مقاله : ۱۳۹۶/۷/۵
تأیید نهایی : ۱۳۹۷/۳/۱۴
صفحات : ۲۳۴ - ۲۱۷

پیش‌بینی پاسخ آبخوان دشت آذرشهر به تغییرات اقلیم با استفاده از مدل ترکیبی هوش مصنوعی– پویایی سیستم

دکتر علی‌اکبر تقی‌پور [۱]، دکتر علیرضا دوچشمه گرگیج [۲]، دکتر اصغر اصغری‌مقدم [۳]، دکتر عطاءالله ندیری [۴]

چکیده

هم‌زمان با رشد روزافزون جمعیت و طرح‌های توسعه و تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر و تأثیر آن بر وضعیت سیستم آبخوان دشت آذرشهر، ضرورت مطالعهٔ دقیق و کاربردی پیرامون وضعیت این آبخوان، آشکار می‌شود. بدین منظور، با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی، اقدام به شبیه‌سازی و پیش‌بینی داده‌های سری زمانی بارش، دبی و سطح آب زیرزمینی محدودهٔ مورد مطالعه شد و پس از تعمیم این داده‌ها به کل دشت با استفاده از روش درون‌یابی‌کریجینگ بیزین (EBK)، بیلان کلی آبخوان دشت به‌دست‌آمده و نتایج وارد مدل سیستم پویای آبخوان دشت در محیط نرم‌افزاری WEAP شد. با ایجاد سناریوی مرجع برای بازهٔ زمانی ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۰ و اعمال تنش افزایش جمعیت و میزان آب مصرفی بخش کشاورزی در طی این بازه، پاسخ آبخوان به تنش‌های وارده بررسی شد. سیستم پویای آبخوان دشت در قبال روند افزایشی ۲ درصدی جمعیت و ۱ درصدی آب مصرفی بخش کشاورزی، کاهش حجم مخزن به میزان حدود ۷ درصد در پایان دورهٔ تنش (سال ۱۴۰۰) را نشان داد. پژوهش حاضر بیانگر قابلیت بالای ترکیب هوش مصنوعی و پویایی سیستم در پیش‌بینی پاسخ آیندهٔ سیستم آبخوان به تغییرات اقلیمی است و می‌تواند در راستای مدیریت منابع آب و پیش‌بینی تمهیدات لازم برای آینده به‌کار رود.

کلید واژگان: تغییرات اقلیم، آذرشهر، هوش مصنوعی، کریجینگ بیزین، پویایی سیستم، مدیریت منابع آب.

۱- استادیار دانشگاه دامغان، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران (نویسنده مسؤول) a.taghipour@du.ac.ir
۲- استادیار دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکدهٔ صنعت و معدن خاش، خاش، ایران gorgij.a.d@eng.usb.ac.ir
۳- استاد دانشگاه تبریز، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران moghaddam@tabrizu.ac.ir
۴- استادیار دانشگاه تبریز، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران Nadiri.ata@gmail.com

مقدمه

با رشد روزافزون طرح‌های توسعه و تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر و تأثیر آن بر وضعیت سیستم آبخوان‌های کشور، ضرورت مطالعهٔ دقیق و کاربردی پیرامون وضعیت آبخوان‌ها، آشکار می‌شود؛ از سویی، پیچیدگی در مسائل گوناگون در طبیعت باعث شده تا یک مدل به‌تنهایی نتواند در حل مسائل زیست‌محیطی پاسخی بهینه ارائه کند، درنتیجه در سال‌های اخیر با استفاده از پیشرفت‌های صورت‌گرفته در علوم کامپیوتر و هوش مصنوعی[1]، رویکردی نوین در استفاده از مدل‌ها به‌صورت ترکیبی و همزمان صورت پذیرفته است (عالم تبریز و همکاران، ۱۳۹۰). از سویی دیگر، مدیریت منابع آب نیازمند تصمیم‌گیری آینده‌نگر و طراحی پروژه‌های عمرانی آب با رویکردی جامع و به‌هم پیوسته است. یکی از ابزارهای مدیریتی براساس این نگرش، علم پویایی سیستم است. این علم توانایی شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیدهٔ منابع آب را برای پشتیبانی تصمیم‌گیری دارد (دوچشمه گرگیج، ۱۳۹۴). به کمک این شبیه‌سازی، پیامدهای نامشخص تصمیم‌گیری‌ها آشکار می‌شود.

رویکرد پویایی سیستم به ما این اجازه را می‌دهد که چندین سناریو را با آنالیزهای چند خصوصیتی به هم ارتباط دهیم و به نتایج قطعی در برنامه‌ریزی دست یابیم (Zarghami and Akbariyeh, 2012). محدودیت منابع آب تجدیدشونده و تقاضای روزافزون برای آب در بخش‌های مختلف مصرف، اهمیت و حساسیت مدیریت منابع آب را افزایش داده‌است. این حساسیت به‌ویژه در دوره‌های خشکسالی نمود بیشتری دارد. تجربهٔ کشورهای مختلف در زمینهٔ مدیریت منابع آب نشان می‌دهد که اعمال مدیریت صحیح بر منابع آب به میزان زیادی محدودیت‌ها و مشکلات ناشی از کمبود منابع آب را تعدیل می‌بخشد.

اگرچه کارهای متعددی در زمینهٔ منابع آب با استفاده از هوش مصنوعی یا پویایی سیستم، به‌صورت مجزا انجام پذیرفته است؛ اما در کمتر تحقیقی به ترکیب مدل‌های هوش مصنوعی با پویایی سیستم پرداخته شده است و از این لحاظ مطالعهٔ حاضر جزء معدود مطالعات انجام‌گرفته در این قلمرو است. برخی از کارهای انجام‌شده در زمینهٔ پویایی سیستم منابع آب و هوش مصنوعی در زیر به اختصار آورده شده است:

در سال ۲۰۰۳، لوایت[2] و همکاران با استفاده از نرم‌افزار ویپ[3] به بررسی مدیریت تقاضای آب در سناریوهای مختلفی از تنش‌های آبی در آفریقای جنوبی پرداختند. در سال ۲۰۱۲، ضرغامی و اکبریه[4] برای مدل‌سازی سیستم‌های آب پیچیدهٔ شهر تبریز از پویایی سیستم بهره بردند. در سال ۲۰۱۲، ساسنیک و همکاران[5] با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم، به ارزیابی کمبود آب در منطقهٔ مطالعاتی خود پرداختند. جوردانو و همکاران[6] نیز در سال ۲۰۱۲ به استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم برای بررسی‌های پیچیده در مدیریت آب زیرزمینی پرداختند. آن‌ها دریافتند که در شرایط پیچیدهٔ استفاده از آب زیرزمینی، مدل‌های پویایی سیستم توانایی بالایی در ساده‌سازی شرایط داشته و به مدیریت در آن شرایط یاری می‌رسانند. در سال ۲۰۱۳ میزان تغییرات تقاضای آب کشاورزی و فراهم‌سازی آن در مقابل تغییرات کاربری اراضی و تغییرات اقلیم در کالیفرنیا با استفاده از مدل ویپ توسط مهتا[7] و همکاران مدل شد. در این سال، ژیا و لنگپو[8] به‌منظور مدیریت پایدار منابع آب در سنگاپور از پویایی سیستم بهره بردند. آن‌ها پس از بررسی دریافتند که در سال آینده با روند موجود سنگاپور دچار کمبود منابع آب خواهد شد، مگر اینکه شالودهٔ چاه‌های ازپیش‌حفرشده پی‌ریزی شود تا به تقاضای آب آیندهٔ سنگاپور پاسخ داده شود. در سال ۲۰۱۵، سیواپراگاسام و همکاران[9] به بررسی مناسب‌بودن برنامه‌ریزی ژن برای سطوح آب زیرزمینی پرداختند. آن‌ها دریافتند که با انتخاب

1-Artificial Intelligence

2- Levite
3 -WEAP
4 -Zarghami and Akbariyeh
5- Susnik et al.
6- Giordano et al.
7- Mehta
8- Xia and Lengpoh
9- Sivapragasam

مناسب چاه‌های مجاور مشاهده‌ای، برای یک چاه مشاهده‌ای می‌توان دقت اندازه‌گیری و مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی را بالا برد. همچنین لی‌یو و همکاران[1] درسال ۲۰۱۵، با استفاده از مدل پویایی سیستم، به بررسی مدیریت کیفیت آب دریاچهٔ مورد مطالعه خود در مقیاس حوضهٔ آبریز پرداختند. آن‌ها دریافتند که استفاده از مدل پویایی سیستم می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های موردنیاز در استراتژی‌های حفاظت محیطی کمک شایانی کند. همچنین در سال ۲۰۱۵، لی و همکاران[2] به بررسی کاربرد مدل ویپ در تخمین استراتژی مدیریت منابع آب در یک منطقهٔ ساحلی در چین پرداختند. آن‌ها با استفاده از این مدل پیش‌بینی کردند که در آینده، تنش آبی در حوضه افزایش خواهد یافت و براین اساس پیشنهادهای گوناگونی ارائه کردند که منجر به بهبود در تصمیم‌گیری مدیریتی منطقه در آینده بر مبنای تقاضای آب خواهد شد.

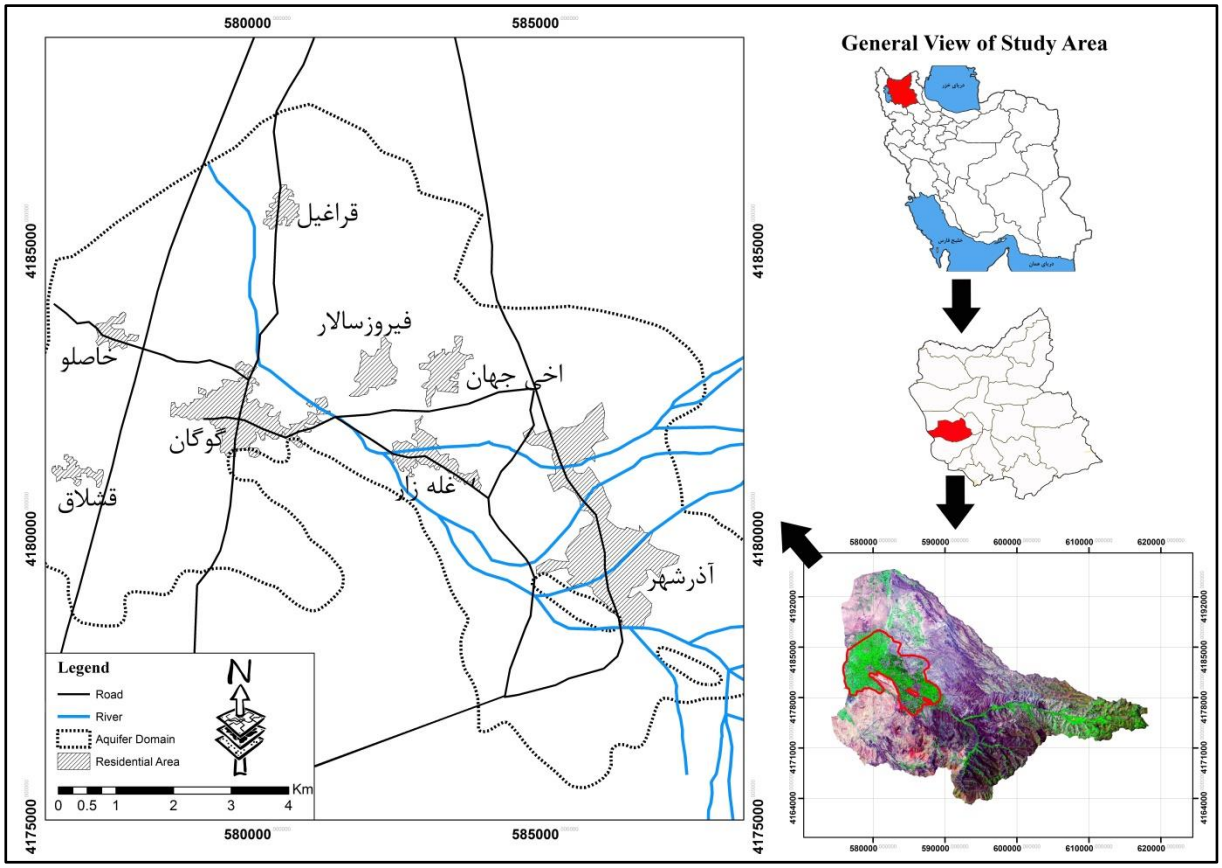
صلوی‌تبار و همکاران در سال ۱۳۸۵ با استفاده از مدل پویایی سیستم، به مدیریت آب شهری تهران پرداختند. مؤمنی و همکاران در سال ۱۳۸۵ به مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن چندمنظوره با استفاده از روش پویایی سیستم پرداختند. قشقایی و همکاران در سال ۱۳۸۷ به بررسی تغییرات متوسط تراز آب زیرزمینی در دشت تهران با استفاده از پویایی سیستم پرداختند. همچنین ناصری و همکاران در سال ۱۳۹۰ به مدل‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب پایاب سد شهرچای (ارومیه) به روش پویایی سیستم پرداختند. در سال ۱۳۹۲، فرتوک‌زاده و همکاران به الگوسازی پویایی سیستم آب منطقه‌ای تهران با هدف مدیریت مؤثر آن پرداختند. مولوی و همکاران در سال ۱۳۹۵ به ارزیابی سیاست‌های اصلاح الگوی کشت و مدیریت کمِ آبیاری با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم در حوضهٔ آبریز ارس پرداختند. در سال ۱۳۹۶ سد مخزن یامچی توسط فتوکیان و همکاران مدل‌سازی شد تا به‌وسیلهٔ آن، سیاست‌های بهره‌برداری الگوی بهینهٔ کشت تدوین شود. علی‌رغم استفادهٔ گسترده از پویایی سیستم در مطالعات پیرامون منابع و مدیریت آب، تاکنون از هوش مصنوعی به‌منظور تلفیق با پویایی سیستم استفاده نشده که در مطالعهٔ حاضر به این امر پرداخته شده است و وجه تمایز این مطالعه، با دیگر مطالعاتِ انجام‌شده در این زمینه است.

مواد و روش‌ها

الف- محدودهٔ مورد مطالعه

محدودهٔ مطالعاتی آذرشهر یکی از محدوده‌های ۲۵گانهٔ حوزهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه است که در ۴۵ کیلومتری جنوب غرب تبریز، بین عرض جغرافیایی ′۴۳ , °۳۷ تا ′۵۲ , °۳۷ و طول جغرافیایی ′۵۰ , °۴۵ تا °۴۶ قرار گرفته‌است. دشت آذرشهر با وسعتی حدود ۱۴۰ کیلومتر مربع، بین ارتفاع ۱۵۲۰ متر در شرق (دامنه‌های غربی کوه سهند که مرتفع‌ترین آن ۲۷۰۰ متر از سطح دریاست) و ۱۲۸۰ متر از سطح دریا در غرب (انتهای دشت و نزدیکی‌های سواحل دریاچهٔ ارومیه) واقع شده‌است. مهم‌ترین رودخانهٔ منطقه، آذرشهرچای است که دارای روند عمومی شرقی- غربی بوده و آب‌های سطحی منطقه را زهکشی می‌کند. این رودخانه ضمن مشروب‌کردن و عبور از وسط دشت به نواحی شوره‌زارها، درنهایت به دریاچهٔ ارومیه ختم می‌شود (دوچشمه گرگیج، ۱۳۹۴). شکل ۱، موقعیت عمومی از منطقهٔ مورد مطالعه را به نمایش می‌گذارد.

1 -Liu
2- Li



شکل ۱. موقعیت محدودهٔ مورد مطالعه

(منبع: دوچشمه گرگیچ، ۱۳۹۴)

در منطقهٔ مورد مطالعه برای به‌دست‌آوردن اطلاعات بارندگی، از آمار ۲۰ سالهٔ ایستگاه‌های موجود استفاده شده است. بیشترین میزان بارش سالیانه مربوط به ایستگاه گمبرف با میانگینی برابربا ۴۸۲/۹۲ میلی‌متر و کمترین میزان بارش سالیانه مربوط به ایستگاه سهند و میانگینی برابر با ۲۳۶/۰۸ میلی‌متر است. درجه حرارت در منطقهٔ مورد مطالعه در ماه‌های تابستان به حداکثر و در ماه‌های زمستان به حداقل می‌رسد. دامنهٔ تغییرات حداکثر مطلق و حداقل مطلق در زمستان زیاد و در تابستان کم است. کمترین حرارت به‌دست‌آمده در آذرشهر ۱۹ درجهٔ سانتی‌گراد زیر صفر و مربوط به دی و بیشترین حرارت ۴۲ درجهٔ سانتی‌گراد بالای صفر و مربوط به مرداد است. نزدیک به ۷۰ درصد مواقع در فصل زمستان، درجه حرارت زیر صفر بوده و یخبندان وجود دارد و بیشترین مقدار مربوط به دی بوده که به‌طور متوسط حدود ۲۹ روز از این ماه یخبندان است. از سویی دیگر، تبخیر و تعرق پتانسیل و اجزاء آن با استفاده از متوسط درجه حرارت ماهیانهٔ ایستگاه آذرشهر در یک دورهٔ بیست ساله از ۱۳۷۱-۱۳۷۰ تا ۱۳۹۱-۱۳۹۰ به روش تورنت وایت میزان ۷۸۰/۳۹۴ میلی‌متر محاسبه شده و تبخیر از تشتک نیز میزان ۱۶۵۹/۸۳۷ میلی‌متر بوده است (دوچشمه گرگیچ، ۱۳۹۴). حداکثر و حداقل رطوبت نسبی متوسط در منطقهٔ مورد مطالعه نیز به‌ترتیب ۷۱/۶ و ۳۲/۸ درصد برای ماه‌های دی و مرداد است (مشاور یکم، ۱۳۸۵). همچنین آب و هوای منطقه با توجه به اقلیم نمای آمبرژه در دشت و ارتفاعات از نوع خشک سرد است (دوچشمه گرگیچ، ۱۳۹۴).

لزوم مطالعهٔ سیستم آبخوان دشت آذرشهر از چند منظر قابل بررسی است؛ ابتدا آنکه دشت به‌علت برداشت مازاد از آب زیرزمینی در سال‌های اخیر، با اُفت سطح آب و کاهش حجم مخزن روبه‌روست. از سویی دیگر، دشت در مجاورت دریاچهٔ ارومیه قرار دارد و احتمال ارتباط هیدرولیکی آن با دریاچه وجود دارد. کاهش کیفیت آب زیرزمینی دشت نیز موضوعی است که اهمیت مطالعهٔ مذکور را دوچندان می‌کند. با درنظر گرفتن موارد فوق، مطالعهٔ دقیق و پایش وضعیت آبخوان دارای ضرورت بالاست.

ب- پیش بینی بیلان آبی منطقهٔ مورد مطالعه

بیلان آب زیرزمینی ارزیابی مقادیر جریان‌های ورودی و خروجی آب‌زیرزمینی دشت برای مشخص‌شدن تغییرات در ذخیرهٔ آب‌زیرزمینی است که تابعی از تغییرات اقلیمی در محدودهٔ مورد مطالعه است. در مطالعهٔ حاضر، با بهره‌گیری از روش‌های هوش مصنوعی و تلفیق آن با روش درون‌یابی کریجینگ بیزین تجربی در پیش‌بینی داده‌های سری زمانی و میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، قنات‌ها و چشمه‌ها و آب برگشتی حاصل از آبیاری اراضی زراعی، صنعتی و مصارف خانگی، بیلان آبی محدودهٔ مورد مطالعه تعیین خواهد شد.

برای تعیین بیلان آبی، پارامترهایی نظیر تغذیهٔ حاصل از بارش، حجم‌های آب سطحی و جریان‌های سطحی و جریان‌های خروجی نظیر جریان چشمه‌ها، سطح مبنای رودخانه‌ها، تبخیر و پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری می‌تواند مؤثر باشد (Anderson and Woessner, 1992). رابطهٔ ۱ فرم کلی محاسبهٔ بیلان را نشان می‌دهد:

رابطهٔ ۱: $$\pm DV = V_{in} - V_{out}$$

در این رابطه، V_{in} ه: مجموع عوامل تغذیهٔ آبخوان؛ V_{out} ه: مجموع عوامل تخلیه؛ $\pm DV$: تغییرات حجم مخزن است که در اثر تفاضل مقادیر V_{in} ه و V_{out} ه به‌دست می‌آید و نمایندهٔ کاهش یا افزایش حجم مخزن در محدودهٔ بیلان و آبخوان دشت آذرشهر است. محدودهٔ بیلان، سطحی در حدود ۸۱ کیلومتر مربع را دربر می‌گیرد. در برآورد بیلان از داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط محاسبات هوش مصنوعی بهره برده شد (پیش‌بینی تغذیهٔ ناشی از سیلاب‌ها و جریانات سطحی و بارش در محدودهٔ بیلان) و بیلان منطقه برای سال آبی ۱۳۹۲-۱۳۹۱ محاسبه و پیش‌بینی شده و نتیجهٔ این پیش بینی وارد مدل پویایی سیستم منطقه شد.

مدل هوش مصنوعی هیبرید عصبی موجکی برای شبیه‌سازی سری زمانی پارامترهای هیدرولوژیکی مؤثر بر بیلان و پرکردن خلأهای داده‌ای موجود در برخی از ماه‌ها برای دورهٔ بلندمدت آماری (در اینجا داده‌های آماری سال آبی ۱۳۴۲-۱۳۴۱ الی ۱۳۹۱-۱۳۹۰) استفاده شد.

در این مطالعه برای مدل هیبرید عصبی موجکی، از الگوریتم مالات (۱۹۹۸)[1] برای تجزیه‌کردن سیگنال‌های سری زمانی استفاده شده است. این الگوریتم برای سیگنال موجود سری زمانی (در اینجا دبی آذرشهرچای، بارش یا نوسانات سطح آب در پیزومترهای محدودهٔ مطالعه)، دو پارامتر تقریب[2] و جزئیات[3] را می‌سازد.

نورانی و همکاران (۲۰۰۹) رابطه‌ای[4] را برای انتخاب سطح تجزیه پیشنهاد کردند که در آن L، سطح تجزیه[5] است و N، تعداد داده‌های سری زمانی است. موجک گسسته‌شده دارای N سطح، سیگنال X(t) را به D_1, D_2...D_N و A_N تبدیل می‌کند که D_1 تا D_N جزئیات و A_N تقریب هستند و این موارد به‌عنوان ورودی مدل شبکهٔ عصبی به‌منظور آموزش و تست استفاده می‌شوند.

پس از شبیه‌سازی سری‌های زمانی ذکرشده به‌وسیلهٔ مدل هوش مصنوعی هیبرید عصبی موجکی، نتایج برای پیش‌بینی به نرم‌افزار جنکس پرو۴[6] وارد شد و

1- Mallat
2- Approximation
3-Details
4- L=int[log(N)]
5- Decomposition Level
6- GenexPro4

سری‌های زمانی مؤثر در بیلان آبی آبخوان به‌وسیلهٔ مدل برنامه‌ریزی ژن برای سال آبی ۱۳۹۲-۱۳۹۱ پیش‌بینی شد.

سپس نتایج بیلان پیش‌بینی‌شده وارد مدل پویای سیستم شد و برای تنظیم پارامترهای عمومی مدل پویای آبخوان دشت آذرشهر، سال آبی ۱۳۹۲- ۱۳۹۱ (۲۰۱۳-۲۰۱۲) به‌عنوان شرایط موجود[1] و درنظرگرفتن ۱۲ گام زمانی انتخاب شد. این سال درواقع سال پایه برای مدل است که تمام اطلاعات سیستم مانند نیاز آبی بخش‌ها، منابع و غیره به آن وارد می‌شود. شرایط موجود، مجموعه‌ای از اطلاعات است که سناریوهای تغییرات اقلیمی براساس آن ساخته می‌شوند. دورهٔ زمانی سناریو برای بازهٔ سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ انتخاب شد. سناریوها تغییرات محتمل سیستم را در سال‌های آتی و بعد از سال پایه را در اثر تغییرات اقلیمی مورد بررسی قرار می‌دهند.

مبنای داده‌های ورودی، بیلان آبی پیش‌بینی‌شده برای آبخوان دشت آذرشهر با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی و آمار و اطلاعات ارائه‌شده براساس سالنامهٔ آماری استان آذربایجان شرقی بوده است (شکل ۲). این اجزاء از دو بخش اساسی تشکیل می‌شوند که هر یک از این بخش‌ها به زیربخش‌های مرتبط تقسیم می‌شود؛ بخش‌های اصلی عبارت‌اند از: ۱- بخش نیاز، ۲- بخش منابع.

برای دشت آذرشهر زیرقسمت‌های حوزهٔ آبریز، سایت‌های نیاز آب شهری و روستایی، نیاز آب صنعتی و نیاز آب کشاورزی ایجاد شد و تغییرات زمانی هریک از این واحدهای نیاز براساس گام‌های زمانی سال آبی پایه تعریف شد؛ به‌عنوان مثال برای حوزهٔ دشت آذرشهر میزان بارش و تبخیر و تعرق محاسبه‌شده در بخش‌های قبل وارد مدل شده و به‌صورت گام‌های زمانی تقسیم‌بندی شد. ایستگاه‌های موجود در منطقه شامل ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری می‌باشند که مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌است.

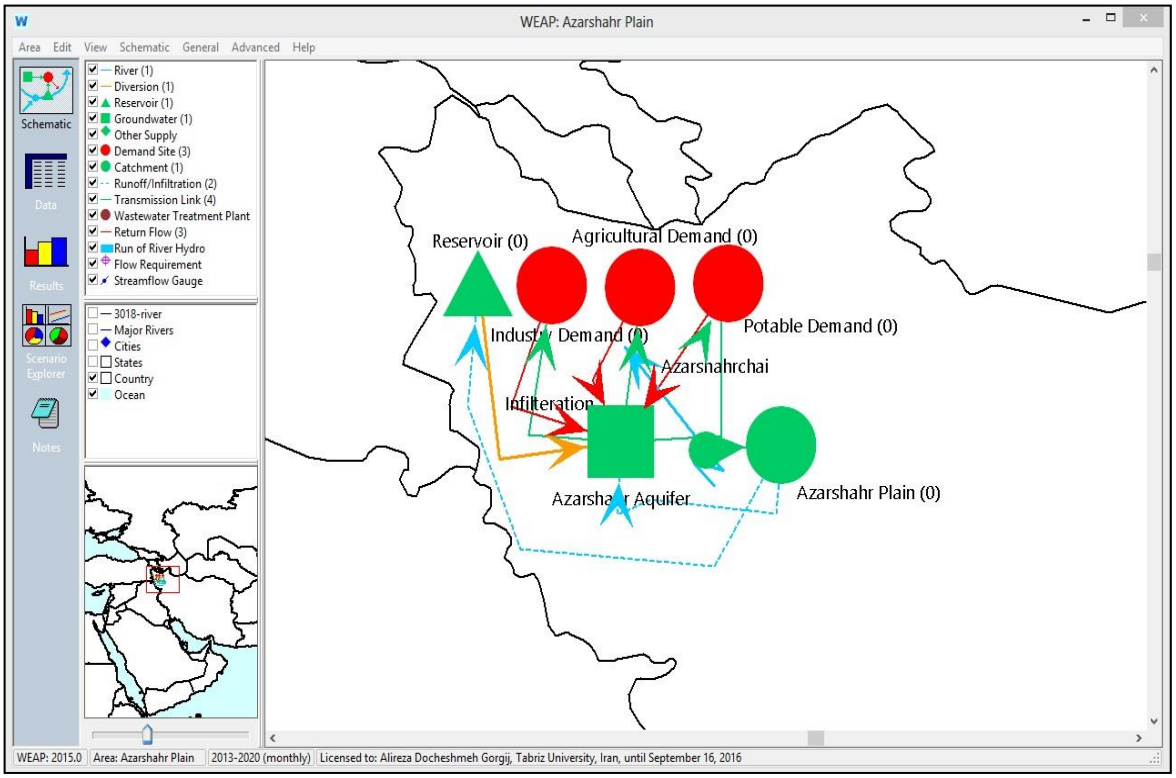
جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منطقه (دوچشمه گرگیج، ۱۳۹۴)

ردیف	ایستگاه	حوزهٔ آبریز	رودخانه	نوع ایستگاه	موقعیت جغرافیایی			تأسیس
					طول	عرض	ارتفاع	
۱	آذرشهر	دریاچه ارومیه	آذرشهر چای	تبخیرسنجی	۴۵-۵۷	۳۷-۴۷	۱۳۴۰	۱۳۷۰
۲	گمبرف	دریاچه ارومیه	آذرشهر چای	باران‌سنجی	۴۶-۱۴	۳۷-۴۴	۱۹۵۵	۱۳۷۴
۳	قرمزی‌گل	دریاچه ارومیه	آذرشهر چای	باران‌سنجی	۴۶-۰۶	۳۷-۷۳	۱۷۷۵	۱۳۴۱
۴	لوله‌سازی	دریاچه ارومیه	آذرشهر چای	باران‌سنجی	۴۵-۵۸	۳۷-۴۷	۱۳۴۰	۱۳۷۰
۵	آذرشهر	دریاچه ارومیه	آذرشهر چای	باران‌سنجی	۴۵-۵۷	۳۷-۴۸	۱۳۵۵	۱۳۵۲
۶	تبریز	دریاچه ارومیه	آجی چای	سینوپتیک	۴۶-۱۷	۳۸-۰۸	۱۳۶۴	۱۳۲۹
۷	سهند	دریاچه ارومیه	-	سینوپتیک	۴۶-۰۷	۳۷-۵۶	۱۶۴۱	۱۳۷۸

(منبع: دوچشمه گرگیج، ۱۳۹۴)

1- Current Accounts

همچنین داده‌های مربوط به نیازهای آبی بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی با توجه به گام‌های زمانی و تنش‌های فصلی وارد مدل شد؛ به این صورت که درصد مصرف ماهیانه هریک از بخش‌ها از میزان آب تخصیص‌داده‌شده مشخص و به بخش مربوط وارد شد.



شکل ۲. شماتیک سیستم پویای آب زیرزمینی منطقهٔ مورد مطالعه

(منبع: نتایج پژوهش ، ۱۳۹۶)

سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ یا به‌عبارتی ۲۰۲۰ میلادی، زمان انتهای سناریوی پیش‌بینی مدل موردنظر بوده است. تقاضای آبی برای بخش‌های شرب، کشاورزی، صنعت و آب موردنیاز برای کل دشت که حاصل از بارش و جریانات سطحی است، وارد سیستم مدل شده تا رابطهٔ تغییرات حجم مخزن آب زیرزمینی دشت با تغییرات بارش و رواناب سطحی که معلول تغییرات اقلیمی است، بررسی شود.

نتایج و بحث

مهم‌ترین عوامل تغذیهٔ آبخوان عبارت‌اند از: تغذیهٔ حاصل از رواناب سطحی و بارش و دیگر پارامترهای تغذیه‌ای متأثر از این دو پارامتر اساسی هستند. با شناسایی روند تغییرات این دو پارامتر، امکان پیش‌بینی پاسخ سیستم آبخوان به تغییرات آتی اقلیمی ساده‌تر بوده و در مدیریت منابع آب کارگشاتر خواهد بود.

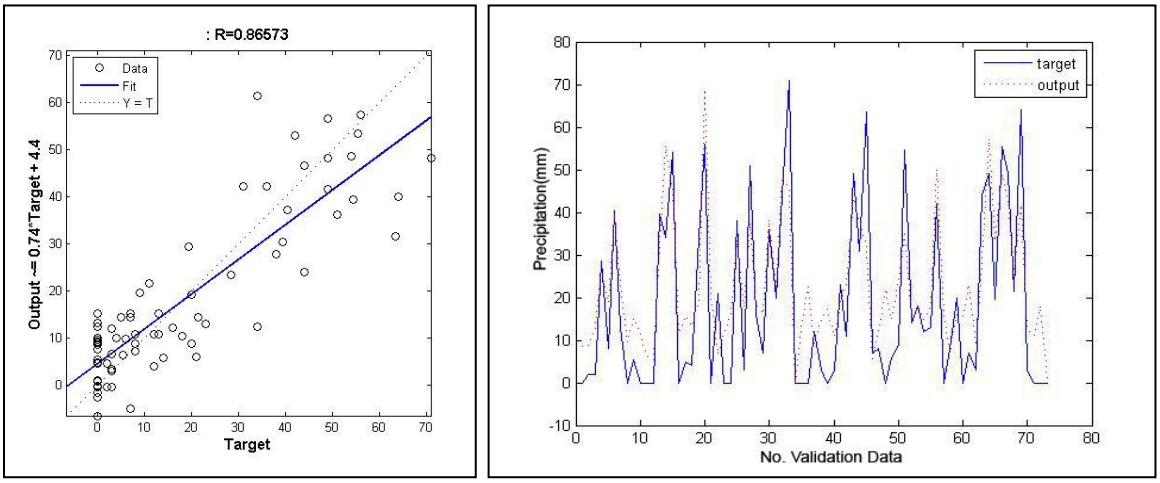
بارش شاید مهم‌ترین پارامتر اثرگذار بر روی بیلان آب باشد و شناسایی روند سری زمانی آن دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای است. بارندگی یک پدیدهٔ کاملاً تصادفی است که در یک منطقه در نقاط و در زمان‌های مختلف، متغیّر است. در منطقهٔ مورد مطالعه برای به‌دست‌آوردن اطلاعات بارندگی از آمار ۲۰ سالهٔ ایستگاه‌های موجود استفاده شده است. مقدار ریزش‌های جوّی سالانهٔ دشت آذرشهر در دورهٔ زمانی بیلان از پیش‌بینی میزان بارش ماهیانه با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی به‌دست آمده است. مدل هوش مصنوعی هیبرید عصبی موجکی برای شبیه‌سازی سری زمانی بارش و پرکردن خلأهای داده‌ای موجود در برخی از ماه‌ها برای دورهٔ بلندمدت

آماری استفاده شد. جدول ۲ پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی داده‌های سری زمانی بارش منطقهٔ مورد مطالعه را نشان می‌دهند. شکل ۳ میزان ضریب تطابق دورهٔ اعتبارسنجی شبیه‌سازی و سری زمانی‌های شبیه‌سازی‌شده را برای هیبرید عصبی موجکی نشان می‌دهد.

جدول ۲. پارامترهای مربوط به مدل هیبرید عصبی موجکی برای شبیه‌سازی بارش منطقهٔ مورد مطالعه

Wavelet Type	Level	Hidden Layer Size	Training
db4	3	8	Levenberg-Marquardt

(منبع: نتایج پژوهش ، ۱۳۹۶)



شکل ۳. ضریب تطابق و سری زمانی شبیه‌سازی‌شدهٔ دورهٔ اعتبارسنجی مدل هیبرید عصبی موجکی بارش

(منبع: نتایج پژوهش ، ۱۳۹۶)

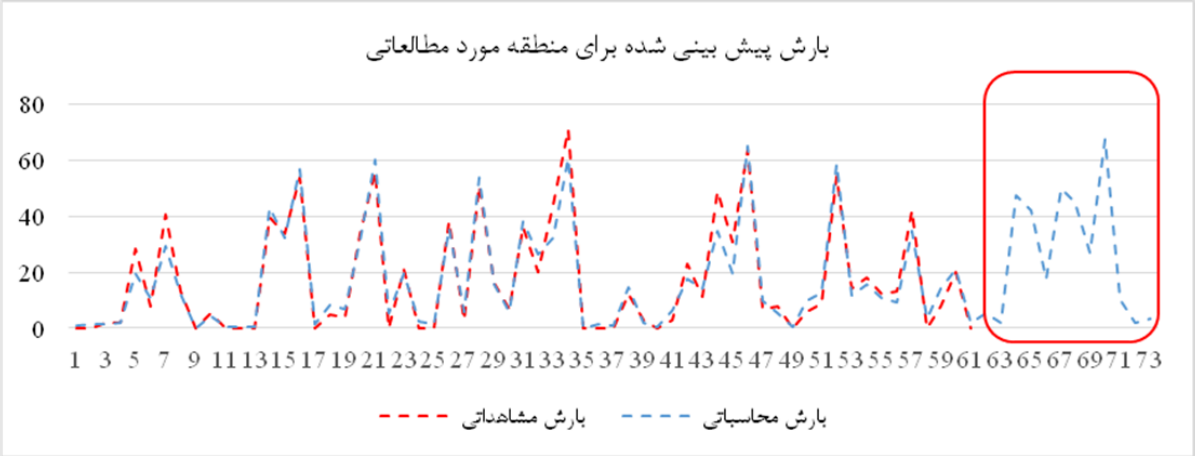
از نتایج شبیه‌سازی آن برای پیش‌بینی بارش در سال آبی ۱۳۹۲-۱۳۹۱ به‌وسیلهٔ مدل برنامه‌ریزی ژن استفاده شد. جدول ۳ و شکل ۴ نتایج مربوط به دورهٔ اعتبارسنجی و پیش‌بینی بارش برای منطقهٔ مورد مطالعاتی را نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج مدل‌سازی بارش ماهیانه برای دورهٔ صحت‌سنجی در منطقهٔ مورد مطالعه

دبی	مدل هوش مصنوعی شبیه‌سازی		مدل هوش مصنوعی پیش‌بینی	
	Wavelet-ANN		Genetic Programming	
	R	MSE	R	MSE
	۰/۸۶۵۷	۱۰۰/۷۶	۰/۸۳۴۷	۱۸۰/۳۰

(منبع: نتایج پژوهش ، ۱۳۹۶)

مجموع بارش پیش‌بینی‌شدهٔ سالیانه برای دورهٔ بیلان با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی، میزان ۲۴۹/۹۶ میلی‌متر بوده است که با احتساب مساحت محدودهٔ بیلان (۸۱/۶۵ کیلومترمربع)، مقداری در حدود ۲۰/۴۱ میلیون مترمکعب را به‌دست می‌دهد که با استفاده از روش پیشنهادی سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) (رابطه‌های ۲ و ۳) محاسبه می شود.



شکل ۴. نتیجهٔ مقایسهٔ بارش محاسباتی با مشاهده‌هایی در منطقهٔ مورد مطالعه و بارش پیش‌بینی‌شده

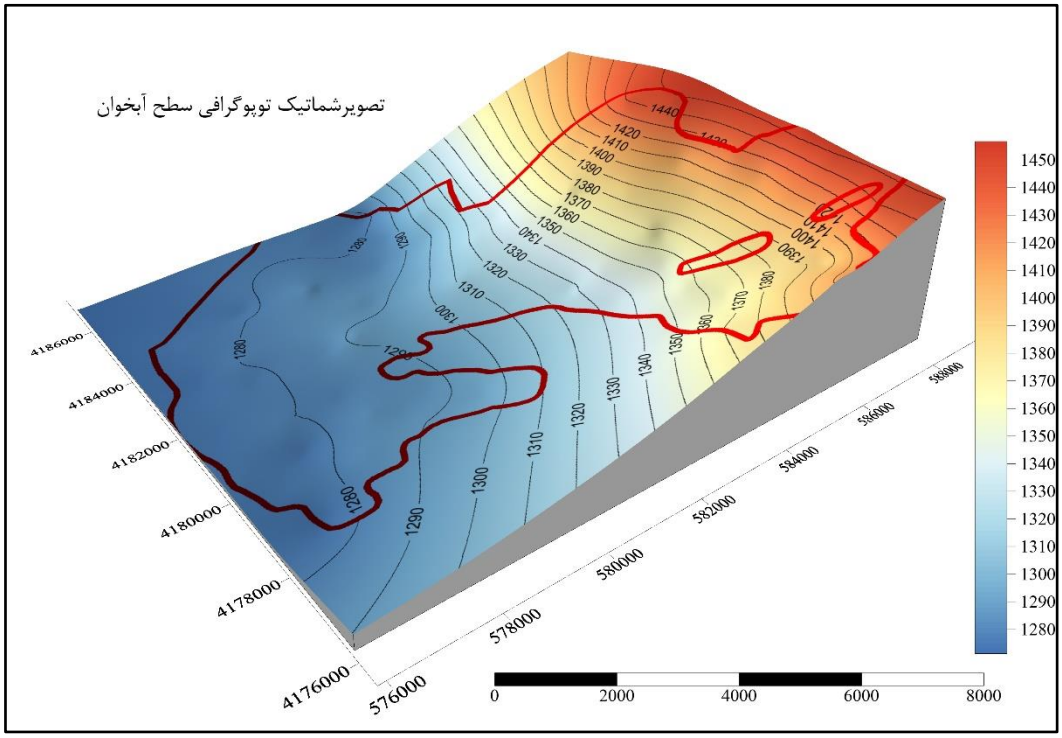
(منبع: نتایج پژوهش ، ۱۳۹۶)

رابطهٔ ۲:
$$R = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

که در آن R: ارتفاع رواناب، P: میزان بارش و S: ضریبی است که براساس رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

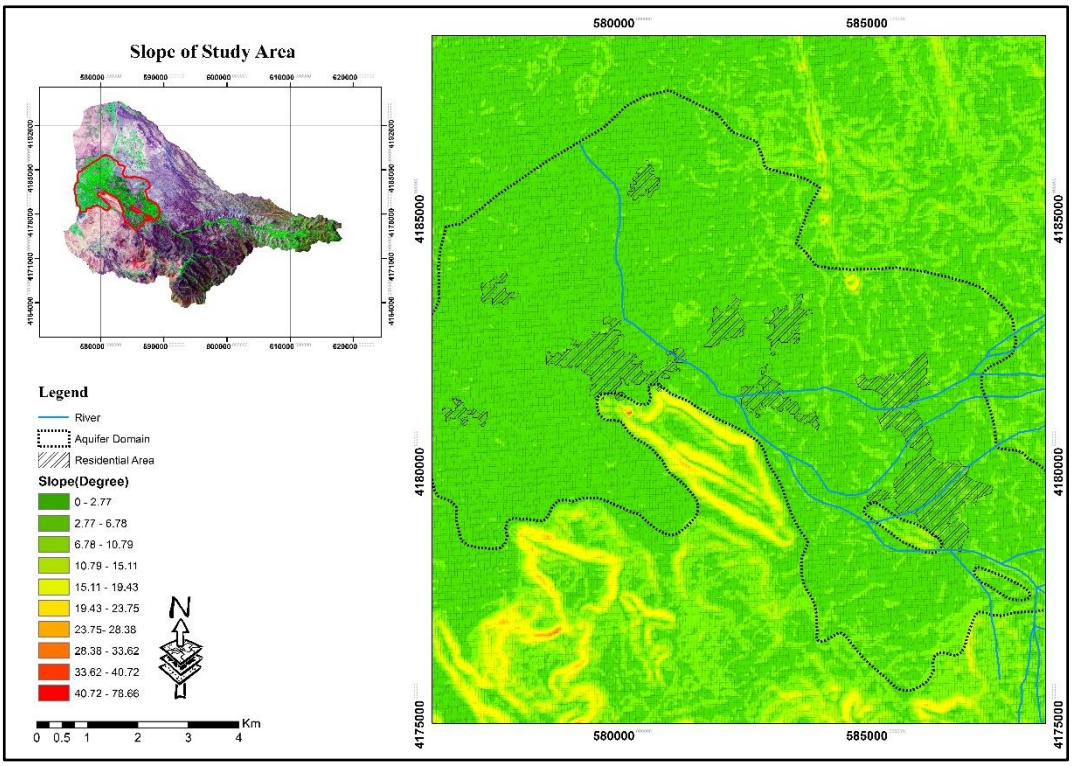
رابطهٔ ۳:
$$S = (\frac{25400}{CN} - 254)$$

که در این رابطه، CN: ضریبی است که به خصوصیات خاک، پوشش گیاهی و شیب سطح زمین وابسته است. ضریب نفوذ برابر با ۱۳٪ محاسبه شد که در حدود ۲/۶۵۳ میلیون‌مترمکعب تغذیهٔ آبخوان را درپی داشته است. میزان نفوذ در کل پهنهٔ دشت یکسان نیست و بنابراین میزان نفوذ حاصل از بارش محاسبه‌شده با توجه به توپوگرافی سطحی (شکل ۵)، شیب سطح زمین و پوشش گیاهی منطقه به هر قسمت داده شده است. هرچه شیب سطح زمین کمتر باشد، میزان نفوذ بیشتر بوده و با افزایش شیب، میزان نفوذ کاهش خواهد یافت. در محدودهٔ آبخوان شیب سطح زمین از ۰ تا حدود ۷ درجه متغیّر است که البتّه در ارتفاعات این شیب افزایش می‌یابد (شکل ۶). بدیهی است در مناطق انتهایی دشت به‌علت کم‌شدن شیب سطح زمین، احتمال نفوذ و تغذیهٔ حاصل از بارش بیشتر است. همچنین با افزایش پوشش گیاهی میزان بارشِ مؤثر افزایش یافته و از سویی دیگر از حجم رواناب کاسته شده و به مقدار نفوذ سطحی افزوده خواهد شد. با درنظر گرفتن پوشش گیاهی که در محدودهٔ مدل بیشتر از نوع زمین‌های زراعی است، امکان نفوذ سطحی هم از بارش و هم از آب برگشتی کشاورزی افزایش می‌یابد (شکل ۷). با توجه با زراعی‌بودن زمین‌های منطقه، میزان CN برای خاک‌های نوع C و D درنظر گرفته شد. میزان CN برای رابطهٔ ۳ بین ۸۴ تا ۸۸ درنظر گرفته شده است؛ زیرا جدول‌های استاندارد سازمان حفاظت خاک آمریکا این عدد را برای زمین‌های زراعی پیشنهاد می‌کنند. همچنین این میزان به‌صورت متوسط درنظر گرفته شده است که خود متوسطی از شرایط مرطوب و خشک منطقهٔ مورد مطالعه است.



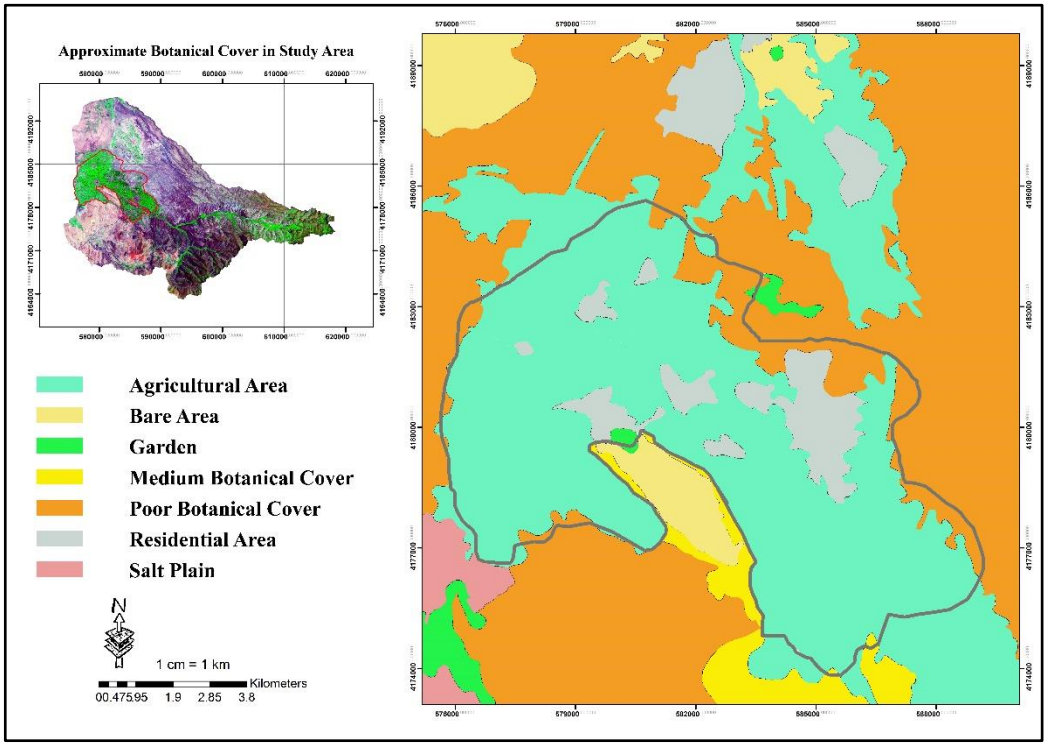
شکل ۵. تصویر شماتیک توپوگرافی سطحی محدودهٔ مورد مطالعه

(منبع: دوچشمه گرگیج، ۱۳۹۴)



شکل ۶. نقشهٔ شیب سطح زمین در منطقهٔ مورد مطالعه

(منبع: دوچشمه گرگیج، ۱۳۹۴)



شکل ۷. نقشهٔ کاربری اراضی در منطقهٔ مورد مطالعه

(منبع: دوچشمه گرگیج، ۱۳۹۴)

نتایج شبیه‌سازی به‌وسیلهٔ دو پارامتر ضریب تطابق (R) و متوسط میانگین خطاها (MSE) مورد سنجش قرار گرفت (جدول ۴ و شکل ۸). جدول ۴ پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی داده‌های سری زمانی دبی رودخانهٔ آذرشهر چای را نشان می‌دهد.

جدول ۴. پارامترهای مربوط به مدل هیبرید عصبی موجکی برای شبیه‌سازی دبی منطقهٔ مورد مطالعه

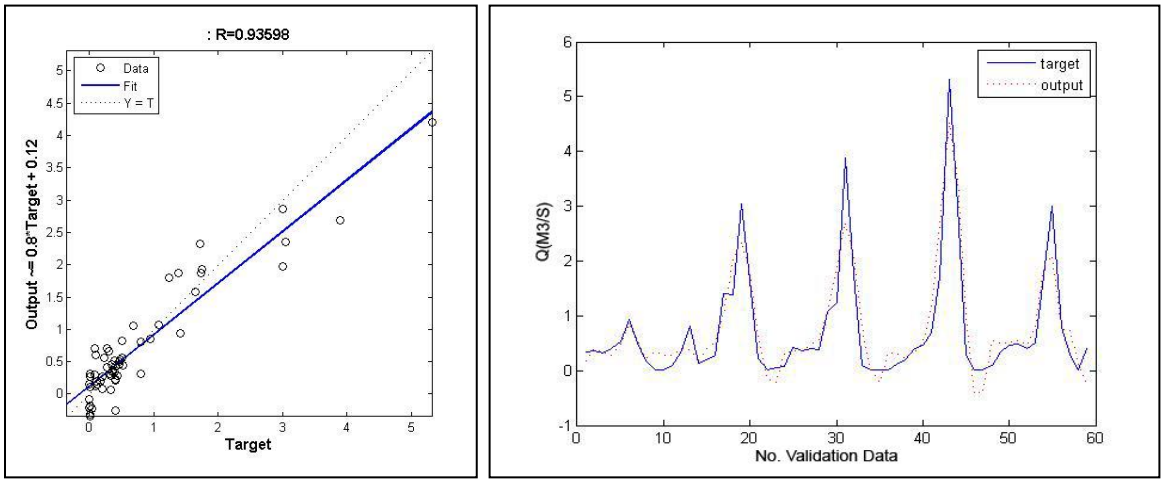
Wavelet Type	Level	Hidden Layer Size	Training
db4	3	6	Levenberg-Marquardt

(منبع: نتایج پژوهش ، ۱۳۹۶)

جدول ۵. نتایج مدل‌سازی دورهٔ اعتبارسنجی و شبیه‌سازی دبی ماهیانهٔ آذرشهرچای در منطقهٔ مورد مطالعه

دبی	مدل هوش مصنوعی شبیه‌سازی		مدل هوش مصنوعی پیش‌بینی	
	Wavelet-ANN		Genetic Programming	
	R	MSE	R	MSE
	۰/۹۳۵	۰/۱۴۰	۰/۹۲۰	۰/۹۶۵

(منبع: نتایج پژوهش ، ۱۳۹۶)

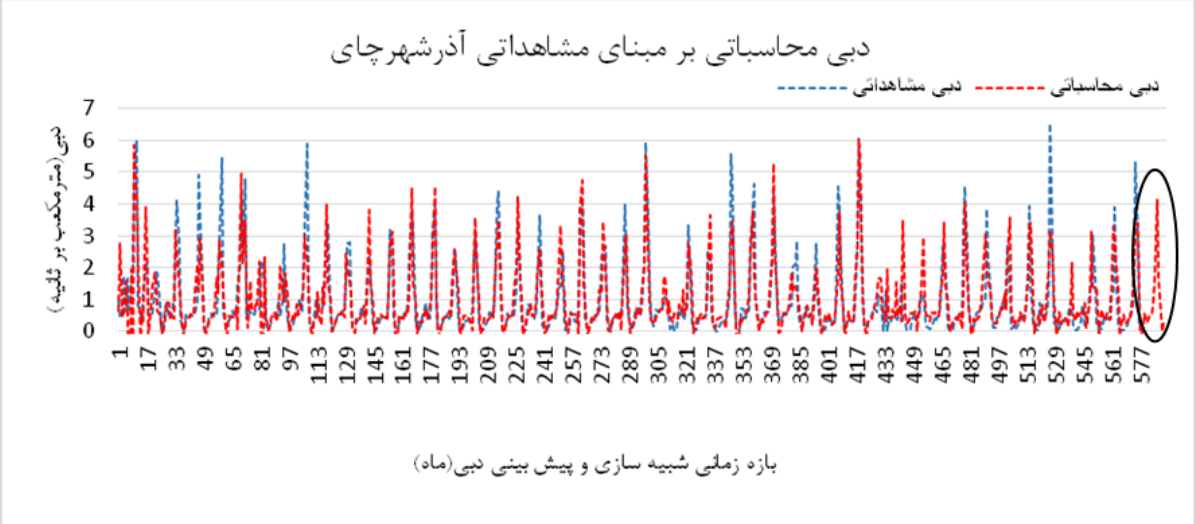


شکل ۸. ضریب تطابق و سری زمانی شبیه‌سازی‌شدهٔ دورهٔ اعتبارسنجی به‌وسیلهٔ مدل هیبرید عصبی موجکی

(منبع: نتایج پژوهش ، ۱۳۹۶)

شکل ۸ سری زمانی دبی تجزیه‌شده به‌وسیلهٔ موجک db4 به سطح ۳ با استفاده از موجک گسسته‌شده را نشان می‌دهد. موج اصلی براساس رابطهٔ مطرح‌شده توسط نورانی و همکاران (۲۰۰۹) به سه قسمت جزییات و یک قسمت تقریب، تجزیه شد.

پس از شبیه‌سازی سری زمانی دبی ماهیانهٔ رودخانهٔ آذرشهرچای، نتایج مدل هیبرید عصبی موجکی برای ورود به مدل برنامه‌ریزی ژن به‌منظور پیش‌بینی دبی صورت پذیرفت (جدول ۵). شکل ۹ نتیجهٔ مدل برنامه‌ریزی ژن در شبیه‌سازی و پیش‌بینی دبی رودخانهٔ آذرشهرچای را نشان می‌دهد. منطقهٔ مشخص‌شده بیضی دبی پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد.

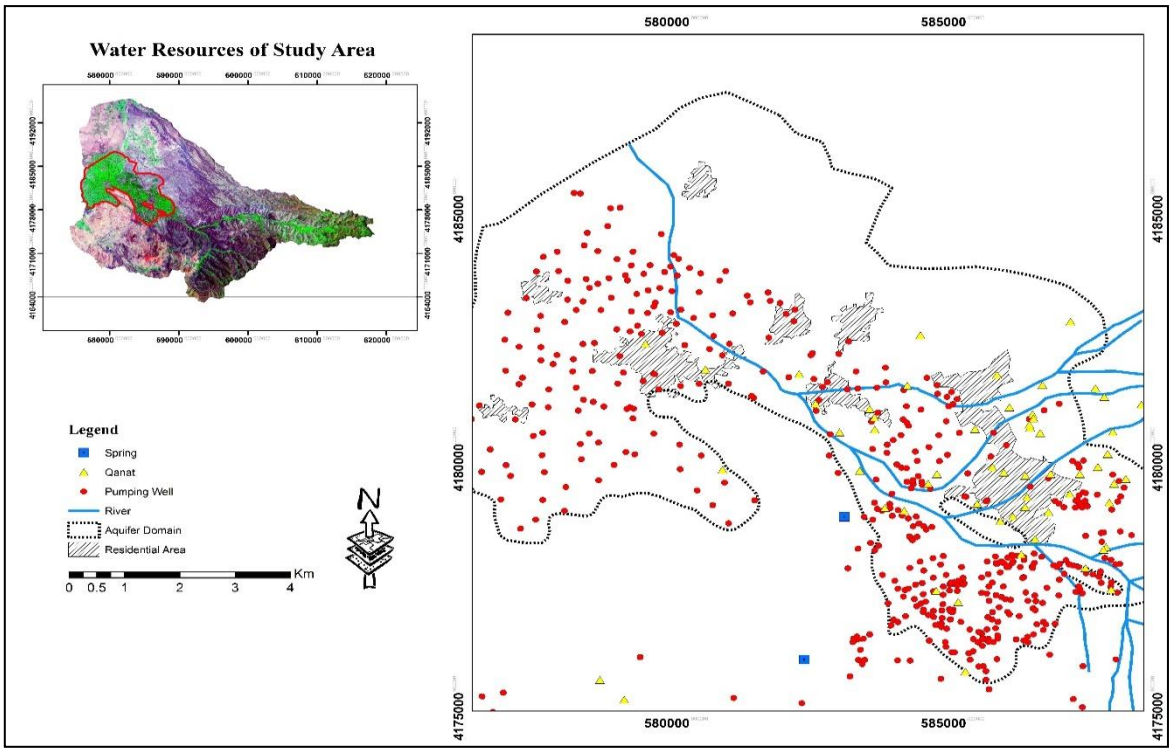


شکل۹. دبی محاسباتی و مشاهداتی در منطقهٔ مورد مطالعه و دبی پیش‌بینی‌شده به‌وسیلهٔ مدل برنامه‌ریزی ژن

(منبع: نتایج پژوهش ، ۱۳۹۶)

نتایج مدل‌سازی آورد ماهیانهٔ رودخانهٔ آذرشهرچای در ایستگاه قرمزی‌گل نشان داد که در طی دورهٔ بیلان به‌طور میانگین مقدار ورودی آب به محدودهٔ بیلان در حدود ۲۳/۰۹۵ میلیون‌مترمکعب بوده است و با احتساب ضریب نفوذ ۲۵٪ (مشاور یکم، ۱۳۸۵)، مقدار نفوذ از جریانات و رواناب‌های سطحی برابربا ۵/۸۶ میلیون‌مترمکعب در سال به‌دست می‌آید.

از سویی دیگر و با توجه به محدودهٔ بیلان و براساس آمار و اطلاعات ارائه‌شده توسط سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی، تعداد ۷۵۰ حلقه چاه عمیق و نیمه‌عمیق، ۸۸ رشته قنات و ۱۱دهنه چشمه در محدودهٔ مورد مطالعه واقع‌اند که مجموع تخلیهٔ سالانهٔ آن‌ها برابربا ۲۷/۶۵ میلیون مترمکعب است. شکل ۱۰ پراکنش منابع بهره‌برداری‌کنندهٔ محدودهٔ مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. منابع تخلیهٔ آب زیرزمینی منطقهٔ مورد مطالعاتی

(منبع: دوچشمه گرگیج، ۱۳۹۴)

مدل‌سازی پویای سیستم آبخوان

بسیاری از مناطق کشور با چالش‌های قابل‌توجه در مدیریت آب‌های شیرین روبه‌رو هستند و البتّه دشت آذرشهر نیز از این قاعده مستثنی نیست. تخصیص منابع محدود آب، کیفیت محیط زیست و سیاست‌های استفادهٔ پایدار از آب، مسائلی هستند که نگرانی دربارهٔ آن‌ها رو به افزایش است. در دههٔ اخیر، رویکرد یکپارچه‌نگری دربارهٔ توسعهٔ آب مطرح شده است و درنظرگرفتن طرح‌های تأمین آب را در چارچوب مسائل مربوط به مدیریت مصرف، کیفیت آب و حفاظت از اکوسیستم‌ها ضروری ساخته است (شریف، ۱۳۸۷).

جدول های ۶ و ۷ به‌ترتیبِ میزان آب ورودی به سیستم آبخوان و آب موردنیاز برای مصارف گوناگون در منطقهٔ مورد مطالعه و مجموع مصرف و جریان‌های ورودی به سیستم آبخوان را برای ماه‌های سال پایه مدل نشان می‌دهد.

جدول ۶. میزان آب ورودی به سیستم در ماه‌های مختلف سال مبنای مدل

جریان‌های ورودی به محدوده (مترمکعب)					
تمام نقاط ورودی، سناریو: مرجع، همهٔ ماه‌ها (۱۲)، میانگین ماهانه					
ماه	آبخوان	دشت آذرشهر	آذرشهرچای	مخزن	جمع
فروردین	۴۷۶۲۰۰	۶۳۳۲۲۰۰	۴۱۶۶۱۲۰	۱۲۹۶۰۰۰	۱۲۲۷۰۵۲۰
اردیبهشت	۲۸۱۴۰۰	۳۷۴۲۲۰۰	۴۱۶۶۱۲۰	۱۳۳۹۲۰۰	۱۶۴۵۳۳۰۰
خرداد	۷۱۰۵۰۰	۹۴۴۷۲۰۰	۴۲۷۳۹۴۰	۰	۱۴۴۳۱۶۴۰
تیر	۱۰۷۵۰۰	۱۴۲۹۴۰۰	۱۲۲۳۲۲۰	۰	۲۷۶۰۱۲۰
مرداد	۲۰۰۹۹۹	۲۶۷۴۰۰	۳۴۵۵۱۳	۰	۳۲۲۰۵۱۲
شهریور	۳۷۳۰۰	۴۹۷۰۰۰	۷۷۱۱۲۰	۰	۱۳۰۵۴۲۰
مهر	۵۸۱۲۵	۷۷۲۸۰۰	۱۵۰۴۶۷۰	۰	۲۳۳۵۵۹۵
آبان	۲۲۷۰۰	۳۰۲۲۶۰	۶۴۹۰۶۲	۰	۹۷۴۰۲۲
آذر	۵۰۰۸۰۰	۶۶۵۸۴۰۰	۹۸۵۹۴۵	۰	۸۱۴۵۱۴۵
دی	۴۴۴۴۷۰	۵۹۰۹۴۰۰	۱۳۳۹۲۰۰	۱۳۳۹۲۰۰	۹۰۳۲۲۷۰
بهمن	۱۸۷۵۳۹	۲۴۹۳۴۰۰	۱۳۰۹۶۰۰	۱۲۰۹۶۰۰	۹۰۳۲۲۷۰
اسفند	۵۲۵۱۳۱	۶۹۸۱۸۰۰	۲۵۷۸۳۰۰	۱۳۳۹۲۰۰	۱۱۴۲۴۴۳۱
جمع	۳۳۷۱۷۶۵	۴۴۸۳۳۴۶۰	۲۹۹۲۶۲۲۸	۶۵۲۳۲۰۰	۸۴۶۵۴۶۵۳

(منبع: دوچشمه گرگیج، ۱۳۹۴)

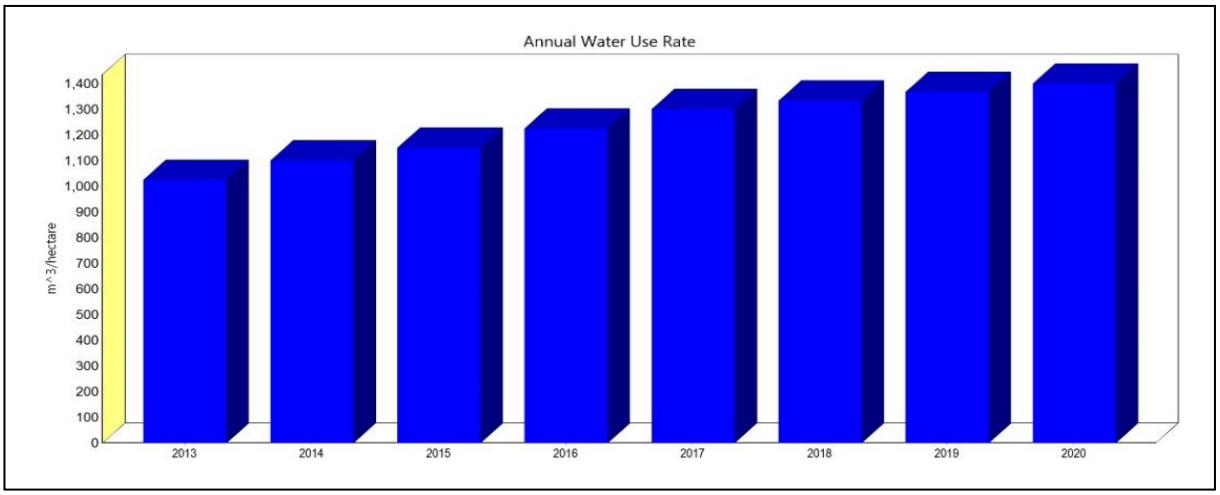
جدول ۷. میزان آب موردنیاز در بخش‌های مختلف برای ماه‌های مختلف سال مبنای مدل

نیازهای آبی (شامل آب مصرفی، برگشتی و چرخش‌یافته) (مترمکعب)					
شاخه: سایت‌های تقاضا و حوضهٔ آبریز، همهٔ شاخه‌ها، سناریو: مرجع، همهٔ ماه‌ها (۱۲)، میانگین ماهانه					
ماه	کشاورزی	دشت آذرشهر	صنعت	آب مشروب	جمع
فروردین	۱۴۲۴۳۹۰/۵	۱۱۷۹۰۸۱۴	۳۷۲۴	۱۲۷۲۹۳/۷	۱۳۳۴۶۲۲۲/۲
اردیبهشت	۲۸۴۸۷۸۱/۱	۲۰۴۴۳۵۱۴	۴۹۷۹/۵۲	۱۳۱۷۸۶/۴	۲۳۴۲۹۰۶۱
خرداد	۲۸۴۸۷۸۱/۱	۳۳۶۴۵۸۶۴	۴۹۷۹/۵۲	۱۳۱۷۸۶/۴	۳۶۶۳۱۴۱۱
تیر	۵۶۹۷۵۶۲/۲	۵۸۶۲۸۱۷۸	۴۹۷۹/۵۲	۱۳۱۷۸۶/۴	۶۴۴۶۲۵۰۶/۱
مرداد	۸۵۴۶۳۴۳/۳	۴۶۴۸۷۲۳۸	۴۹۷۹/۵۲	۱۳۱۷۸۶/۴	۵۵۱۷۰۳۴۷/۳
شهریور	۷۱۲۱۹۵۲/۷	۳۵۵۳۷۳۹۰	۴۹۷۹/۵۲	۱۳۱۷۸۶/۴	۴۲۷۹۶۱۰۸/۷
مهر	۰	۱۸۳۷۹۵۳۶	۴۰۹۶/۴	۱۱۵۳۱۳/۱	۱۸۴۹۸۹۴۵/۵
آبان	۰	۹۱۴۴۷۰۶/۲	۴۰۹۶/۴	۱۱۵۳۱۳/۱	۹۲۶۴۱۱۵/۷
آذر	۰	۰	۴۰۹۶/۴	۱۱۵۳۱۳/۱	۱۱۹۴۰۹/۵
دی	۰	۰	۴۰۹۶/۴	۱۱۵۳۱۳/۱	۱۱۹۴۰۹/۵
بهمن	۰	۰	۴۰۹۶/۴	۱۱۵۳۱۳/۱	۱۱۹۴۰۹/۵
اسفند	۰	۰	۴۰۹۶/۴	۱۳۴۷۸۱/۵	۱۳۸۸۷۷/۹
جمع	۲۸۴۸۷۸۱۱/۱	۲۳۴۰۵۷۲۴۰/۲	۵۳۲۰۰	۱۴۹۷۵۷۲/۹	۲۶۴۰۹۵۸۲۴/۳

(منبع: نتایج پژوهش، ۱۳۹۶)

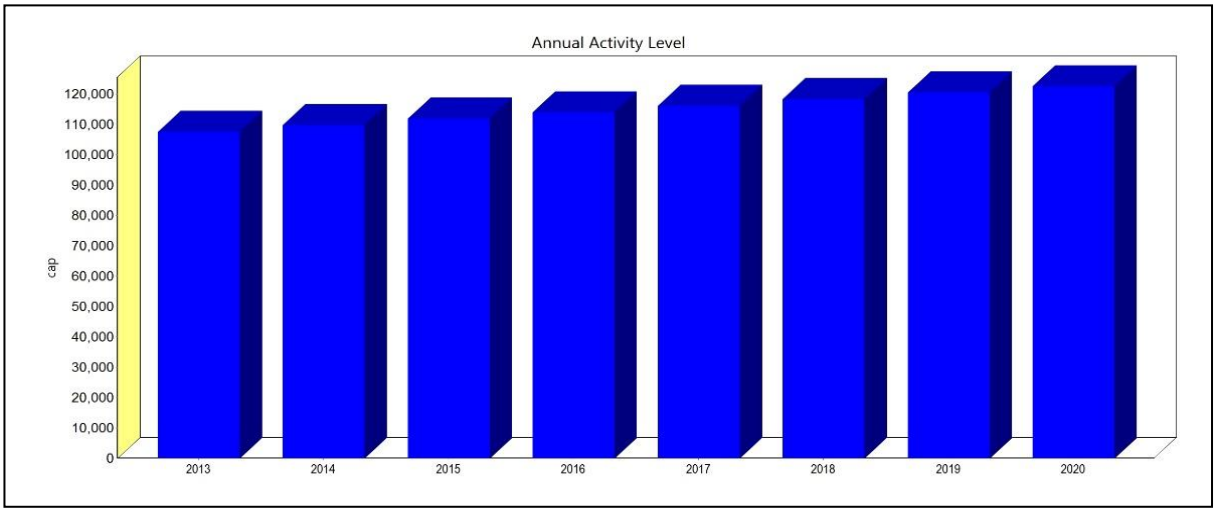
سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ یا به‌عبارتی ۲۰۲۰ میلادی، زمان انتهای سناریوی پیش‌بینی مدل موردنظر بوده است. تقاضای آبی برای بخش‌های شرب، کشاورزی، صنعت و آب موردنیاز برای کل دشت که حاصلِ بارش و جریانات سطحی است، وارد سیستم مدل شده تا رابطهٔ آن با آب‌زیرزمینی بررسی شود.

اگرچه ویپ قابلیت بسیار بالایی در اجرای سناریوهای متعدد در منطقهٔ مورد مطالعه را دارد، برای آبخوان دشت آذرشهر یک سناریو با افزایش ۲ درصدی در جمعیت و ۱ درصدی در آب مصرفی کشاورزی از سال ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۰، طراحی شد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به‌ترتیب میزان رشد آب مصرفی کشاورزی و رشد جمعیت را تا سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. میزان آب مصرفی کشاورزی پیش‌بینی‌شده در سناریوی مرجع

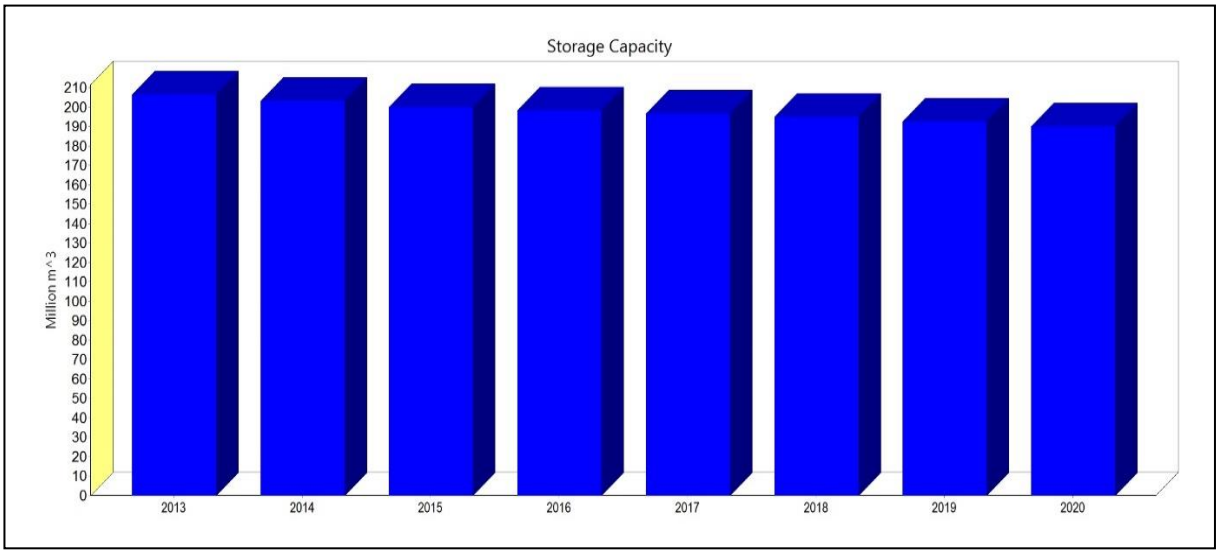
(منبع: نتایج پژوهش، ۱۳۹۶)



شکل ۱۲. میزان رشد جمعیت در بازهٔ سناریوی مرجع

(منبع: نتایج پژوهش، ۱۳۹۶)

با اجرای سناریوی مرجع و تنها تغییر ۲ درصدی در جمعیت و ۱ درصدی در مصرف کشاورزی، میزان ظرفیت آبخوان دچار کاهشی در حدود ۷/۷ درصد می‌شود (شکل ۱۳)؛ یعنی از ۲۰۶ میلیون‌مترمکعب به حدود ۱۹۰ میلیون‌مترمکعب کاهش می‌یابد (جدول ۸) که نشان می‌دهد باید در میزان آب مصرفی کشاورزی با استفاده از طرح‌های آبیاری بهینه، مدیریت دقیق انجام شود. این سناریو میزان بارش، تبخیر، جریان سطحی و دیگر پارامترهای سیستم را با روند مدل‌سازی‌شده در بیلان آبخوان درنظر گرفته است.



شکل ۱۳. تغییرات حجم مخزن آب زیرزمینی منطقهٔ مورد مطالعه در بازهٔ سناریوی مرجع

(منبع: نتایج پژوهش، ۱۳۹۶)

جدول ۸. تغییرات سالانهٔ حجم مخزن در بازهٔ اجرای سناریو (برحسب میلیون‌مترمکعب)

سال	سال مبنا (۲۰۱۳)	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۲۰
حجم مخزن آبخوان	۲۰۶/۵۵	۲۰۳/۲۷	۲۰۰/۰۰	۱۹۸/۳۳	۱۹۶/۶۷	۱۹۵/۰۰	۱۹۲/۵۰	۱۹۰/۰۰

(منبع: نتایج پژوهش، ۱۳۹۶)

لازم به ذکر است که مدل ارائه‌شده در مطالعهٔ حاضر دقت و صحت پیش‌بینی خود را مدیون داده‌های ورودی به مدل است که این داده‌ها خود نتیجهٔ استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی هستند. دقت مدل هوش مصنوعی در پیش‌بینی سری‌های زمانی در مطالعهٔ حاضر به‌وسیلهٔ ضریب تطابق و میانگین مجذور خطاهای به‌دست‌آمده در مدل‌های شبیه‌سازی و پیش‌بینی‌شده سنجیده شده است که نشان از دقت بالای این مدل‌هاست. این امر نشان می‌دهد که داده‌های ورودی دقیق به یک مدل مدیریتی نظیر ویپ پاسخ‌هایی دقیق را درپی خواهد داشت. علاوه‌بر آن، از آنجا که مدل ارائه‌شده یک مدل پیش‌بینی است و میزان پیش‌بینی‌شده متعلق به سال ۲۰۲۰ میلادی است، در گذر زمان و با به‌دست‌آمدن داده‌های جدید می‌توان از صحت و دقت مدل مطلع شد. از سویی دیگر، با توجه به این نکته که این مطالعه برای نخستین بار انجام شده است، نتایج آن قابل مقایسه با کارهایی از این دست نیست و بررسی کارایی مدل منوط به گذر زمان و تطابق نتایج مدل با داده‌های مشاهداتی آتی است.

نتیجه‌گیری

استفاده از مدل ترکیبی هوش مصنوعی و پویایی سیستم در پیش‌بینی پاسخ سیستم آبخوان به تغییرات محتمل اقلیمی برای نخستین بار در مطالعهٔ حاضر صورت پذیرفته است. با توجه به معیارهای سنجش خطا، نظیرِ ضریب تطابق و میانگین مربعات خطا، می‌توان نتیجه گرفت که مدل هوش مصنوعی شبیه‌سازی و پیش‌بینی از عملکرد بالایی برخوردار بوده و درنتیجه قابلیت اطمینان بالای مدل را نشان می‌دهد. از سویی دیگر و با درنظر گرفتن روند پیش‌بینی‌شدهٔ بارش و رواناب سطحی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل بیلان، می‌توان پاسخ سیستم آبخوان به تغییرات آتی اقلیمی را به‌درستی پیش‌بینی کرد. پیش‌بینی تغییرات در روند بارش و رواناب و ورود آن به سیستم پویای آبخوان نشان‌دهندهٔ ۱۶

میلیون‌مترمکعب کاهش در حجم مخزن آبخوان است که تنها با تغییرات یک و دو درصدی در جمعیت و آب مصرفی بخش کشاورزی به‌وجود می‌آید. دیگر تغییرات اقلیمی را می‌توان در مطالعات آتی درنظر گرفته و پاسخ سیستم را به‌صورت سناریوهای مختلف بررسی کرد.

منابع

دوچشمه گرگیج، علیرضا. (۱۳۹۴). هیدروژئولوژی آبخوان دشت آذرشهر و مدل‌سازی کمّی آن با استفاده از مدل‌های ترکیبی و پویایی سیستم. پایان‌نامهٔ دورهٔ دکتری، دانشگاه تبریز.

شرکت مهندسان مشاور مشاور یکم. (۱۳۸۵). مطالعات آب زیرزمینی دشت آذرشهر، جلد اول.

شریف، بهزاد. (۱۳۸۷). ترجمهٔ خودآموز WEAP، مهاب قدس.

صلوی‌تبار، عبدالرحیم؛ ضرغامی، مهدی؛ ابریشم‌چی، احمد. (۱۳۸۵). مدل پویایی سیستم در مدیریت آب شهری تهران، آب و فاضلاب، صاحب امتیاز: مهندسین مشاور طرح و تحقیقات آب و فاضلاب، ۵۹، ۱۲-۲۸.

عالم تبریز، اکبر؛ زندیه، مصطفی؛ محمدرحیمی، علیرضا. (۱۳۹۰). الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی ترکیبی، چاپ دوم، انتشارات صفار-اشراقی، تهران.

فتوکیان، محمدرضا؛ صفاری، نسیم؛ ضرغامی، مهدی. (۱۳۹۶). مدل‌سازی پویایی سیستم سد مخزن یامچی با اعمال الگوی بهینهٔ کشت درجهت تدوین سیاست بهره‌برداری، تحقیقات منابع آب ایران، صاحب امتیاز: انجمن علوم و مهندسی منابع آب ، ۱۳، ۱-۱۶.

فرتوک‌زاده، حمیدرضا؛ قجاوند، سمیه؛ رجبی نهوجی، میثم. (۱۳۹۲). الگوسازی پویایی سیستم آب منطقه‌ای تهران با هدف مدیریت مؤثر، آب و فاضلاب، صاحب امتیاز: مهندسین مشاور طرح و تحقیقات آب و فاضلاب، ۲۶، ۲۳-۳۶.

قشقایی، مریم؛ طوفان تبریزی، نسیم؛ حسینی صفا، حمیده. (۱۳۸۷). بررسی تغییرات متوسط تراز آب زیرزمینی در دشت تهران با استفاده از پویایی سیستم، چهارمین کنگرهٔ ملی مهندسی عمران، تهران.

مولوی، حسین؛ لیاقت، عبدالمجید؛ نظری، بیژن. (۱۳۹۵). ارزیابی سیاست‌های اصلاح الگوی کشت و مدیریت کم آبیاری با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز ارس)، مدیریت آب و آبیاری، صاحب امتیاز: دانشگاه تهران، دورهٔ ۶، شمارهٔ ۲، ۲۱۷-۲۳۶.

مؤمنی، ابراهیم؛ تجریشی، مسعود؛ ابریشم‌چی، احمد. (۱۳۸۵). مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن چندمنظوره با استفاده از روش پویایی سیستم، آب و فاضلاب، صاحب امتیاز: مهندسین مشاور طرح و تحقیقات آب و فاضلاب، ۵۷، ۴۷-۵۸.

ناصری، حمیدرضا؛ احمدی، سیما؛ صلوی تبار، عبدالرحیم. (۱۳۹۰). مدل‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب پایاب سد شهرچای (ارومیه) به روش پویایی سیستم، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، صاحب امتیاز: دانشگاه علوم پزشکی کرمان ، ۴، ۹۷-۱۰۸.

Anderson M.P. and Woessner W.W., 1992, Applid groundwater modeling flow and advective transport, Academic press, Inc.

Giordano R., Brugnach M. and Vurro M., 2012, System Dynamic Modelling for conflicts analysis in groundwater management, International Congress on Environmental Modelling and Software Managing Resources of a Limited Planet, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany.

Levite H., Sally H. and Cour J., 2003, Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: application of the WEAP model, Physics and Chemistry of the Earth 28: 779–786.

Li X., Zhao Y., Shi Ch., Sha J., Wang Z., and Wang Y., 2015, Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China. Ocean & Coastal Manage. 106: 97-109.

Liu H., Benoit G., Liu T., Liu Y., Guo H., 2015, An integrated system dynamics model develops for managing lake water quality at the wa tershed scale. J Environ Manage. 155:11 -23.

Mallat S.G., 1998, A Wavelet Tour of Signal Processing, second ed. Academic Press, San Diego.

Mehta V., Haden V., Joyce B., Purkey D., and Jackson L., 2013, Irrigation demand and supply, given projections of climate and land use change, in Yolo County, California, Agricultural Water Management, 117:70-82.

Nourani V., Alami M. and Aminfar M., 2009, A combined neural-wavelet model for prediction of Ligvanchai watershed precipitation. Eng. Appl. Artif. Intell. 22: 466–472.

Sivapragasam C., Kannabiran K., Karthik G., Raja S., 2015, Assessing Suitability of GP Modeling for Groundwater Level. Aquatic Procedia, 4:693 – 699.

Sušnik J., Lydia S., Lyroudia V., Savić D. and Kapelan Z., 2012, Integrated System Dynamics Modelling for water scarcity assessment: Case study of the Kairouan region, Science of the Total Environ. 440:290– 306.

Xia X. and Leng Poh K., 2013, Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore, Procedia Computer Science. 16: 157–166.

Zarghami M. and Akbariyeh S., 2012, System dynamics modeling for complex urban water systems: Application to the city of Tabriz, Iran. Resources, Conservation and Recycling. 60: 99– 106.