مهندسی عمران شریف (تابستان ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۱۱۱-۱۲۲

Original Article

مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل

محبوبه کلانتری (کارشناس ارشد)
حمیدرضا صفوی* (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
امید بزرگ حداد (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

در پژوهش حاضر، به بهره‌برداری تلفیقی بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی در زیرحوضه‌ی نجف‌آباد که یکی از مهم‌ترین محدوده‌های مطالعاتی در حوضه‌ی آبریز گاوخونی است، پرداخته شده و برای انجام آن از روش اتصال مدل‌های شبیه‌سازی ـ بهینه‌سازی با کمک شبکه‌ی عصبی مصنوعی و الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل استفاده شده است. ضمن اتصال مدل‌های بهینه‌ساز و شبیه‌ساز به یکدیگر، به ارائه‌ی سیاست بهره‌برداری بهینه در ۳ دوره‌ی خشک، نرمال و ترسالی پرداخته شده است. با توجه به نتایج حاصل، مدل شبکه‌ی عصبی منتخب با مقدار ضریب تبیین بیش از ۰٫۹۹ و خطای کمتر از ۶٪ در بخش اعتبارسنجی توانسته است برای پیش‌بینی، عملکرد سطح ایستابی آبخوان را به خوبی شبیه‌سازی کند. در بخش بهره‌برداری تلفیقی، مدل توانسته است میانگین سطح ایستابی در آبخوان را به ترتیب در ۳ دوره‌ی ترسالی، نرمال و خشکسالی در منطقه‌ی چپ مطالعاتی به میزان ۲٫۳، ۰٫۷۵ و ۱٫۳۶ متر و در منطقه‌ی راست مطالعاتی به میزان ۲٫۱۴، ۱٫۱۴ و ۰٫۸ متر بهبود بخشد.

واژگان کلیدی: مدیریت منابع آب، آب سطحی و زیرزمینی، شبیه‌سازی، شبکه‌ی عصبی مصنوعی، بهینه‌سازی، الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل.

m.kalantari@cv.iut.ac.ir
hasafavi@cc.iut.ac.ir
obhaddad@ut.ac.ir

۱. مقدمه

مدیریت تلفیقی منابع آب، عبارت است از بهره‌برداری هم‌زمان از آب‌های سطحی و زیرزمینی که با هدف بهینه‌سازی میزان برداشت، تحت تأثیر قیدهای کمّی و کیفی منابع آب انجام می‌گیرد. برای بهره‌برداری تلفیقی بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی در یک منطقه، اولین قدم شبیه‌سازی حوضه‌ی مورد مطالعه است. شبیه‌سازی در بهره‌برداری تلفیقی به منظور به‌دست آوردن پاسخ سیستم نسبت به برنامه‌های مدیریتی مختلف است. برای مثال در شبیه‌سازی سطح ایستابی آب زیرزمینی در یک آبخوان با اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی، سیستم شبیه‌ساز در هرگام زمانی با داشتن مقادیر بهینه‌ی آب زیرزمینی و آب سطحی برداشتی به‌دست آمده از مدل بهینه‌ساز، به همراه در دست داشتن مقادیر پارامترهای مؤثر در بیلان آب در حوضه‌ی مطالعاتی، سطح ایستابی را شبیه‌سازی می‌کند. در فرایند مذکور، برای به‌دست آوردن مقادیر بهینه‌ی آب سطحی و زیرزمینی بین مدل شبیه‌ساز و بهینه‌ساز اتصال برقرار می‌شود و برای ارضاء قیدهای مسئله، مدل شبیه‌ساز بارها از سوی مدل بهینه‌ساز فراخوانی می‌شود. این مسئله به طور چشم‌گیری محاسبات را برای رسیدن به حل بهینه‌ی عمومی افزایش می‌دهد.[۱] برای کاهش زمان و هزینه‌های محاسباتی برای رسیدن به حل بهینه می‌توان از تقریب مدل شبیه‌ساز، مانند: شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN)، ماشین‌های بردار پشتیبان (SVMs) و یا ماشین‌های بردار ارتباط (RVMs) به‌عنوان شبیه‌سازهای مناسب برای فرایندهای فیزیکی استفاده کرد.[۲] از طرفی دیگر، از آنجا که تجزیه و تحلیل‌ها در نوسان‌های سطوح آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های متعدد در نقاط مختلف جهان نشان می‌دهد که عوامل اقلیمی و هیدرولوژیکی باعث ایجاد تغییرات دینامیک در سطح آب زیرزمینی می‌شوند، لذا با جمع‌آوری داده‌های اشاره شده، در دهه‌های اخیر استفاده از روش‌های رگرسیون داده‌محور، نظیر شبکه‌های عصبی توسعه‌ی قابل توجهی یافته است.[۳-۶]

شبکه‌های عصبی جزء دسته سیستم‌های هوشمند قرار دارند که با پردازش روی داده‌های تجربی، دانش یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند. برای اولین بار شبکه‌ی عصبی مصنوعی در سال ۱۹۹۲، در زمینه‌ی آب‌های زیرزمینی با هدف تعیین پارامترهای آبخوان استفاده شد.[۷] در سال‌های اخیر، برخی پژوهش‌ها در ایران با موفقیت از شبکه‌ی عصبی برای شبیه‌سازی سطح آبخوان استفاده کرده‌اند.[۸-۱۲]

در دهه‌ی اخیر، به مدل‌های شبیه‌سازی ـ بهینه‌سازی، به علت توانایی در حل

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۳/۹، اصلاحیه ۱۳۹۶/۵/۱۶، پذیرش ۱۳۹۶/۵/۲۴.
DOI:10.24200/J30.2018.2188.2130

مسائل پیچیده‌ی تخصیص آب و تعیین بهترین برنامه‌های مدیریتی تحت قیدهای مشخص توجه شده است.[۱۳] همچنین در طی سال‌های اخیر، پژوهشگران از مدل‌های شبیه‌سازی ـ بهینه‌سازی زیادی برای برنامه‌ریزی صحیح و مدیریت تلفیقی منابع آب درکشاورزی استفاده کرده‌اند. مثلاً در سال ۲۰۱۶، با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی، آبخوان موردمطالعه شبیه‌سازی شده و سپس با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه و اتصال آن به مدل شبیه‌ساز، بهترین سیاست‌های برداشت آب با هدف کاهش کمبود آب به‌دست آمده است.[۹] از دیگر مطالعاتی که توانسته‌اند با موفقیت از مدل‌های شبیه‌سازی ـ بهینه‌سازی استفاده کنند، می‌توان به مطالعاتی در طی سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۶،[۱۷-۱۳و۲،۱] اشاره کرد.

در روش‌های حل مدل‌های بهینه‌سازی می‌توان به الگوریتم‌های فرابتکاری که الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل نیز جزء آن است، اشاره کرد. الگوریتم‌های فرابتکاری با استفاده از مکانیزم خروج از بهینه‌ی محلی، قابلیت کاربرد در طیف وسیعی از مسائل را دارند.[۱۸] با توسعه‌ی الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل در سال ۲۰۰۶، از آن برای حل مسائل غیرخطی با محدودیت یا مدل‌های واقعی ریاضی بدون محدودیت استفاده می‌شود.[۱۹]

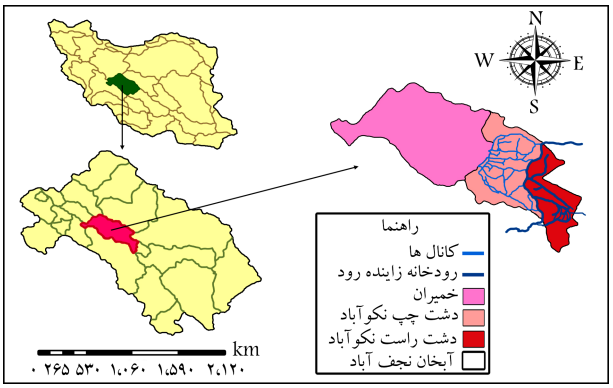
در طی سال‌های اخیر، پژوهشگران بسیاری توانسته‌اند با موفقیت از الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل برای بهینه‌سازی مسائل مرتبط با مهندسی آب (عملکرد مخازن آب، راهبرد پمپاژ بهینه، طراحی بهینه‌ی سریزها، شبکه‌های آبرسانی، برنامه‌ی ایستگاه‌های پمپاژ و طراحی و توسعه‌ی شبکه‌ی توزیع آب) استفاده کنند. برای نمونه، برای اولین بار در سال ۲۰۰۶، از الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل برای حل مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سدها استفاده کردند و الگوریتم مذکور برای عملکرد ۶۰ دوره‌ی یک مخزن مستقل به منظور کمینه‌سازی انحراف مربع کل از اهداف خواسته شده به‌کار برده شد و نتایج امیدوارکننده‌یی در قیاس با دیگر الگوریتم‌های اکتشافی به‌دست آمد.[۱۹] از دیگر مطالعات انجام شده در زمینه‌ی ذکر شده، می‌توان به پژوهش‌هایی در طی سال‌های ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۵،[۲۰-۳۱] اشاره کرد. هدف از پژوهش حاضر، بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی جهت تأمین نیاز آبی کشاورزی با فرض محدودیت در تأمین آب سطحی با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی و الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل است.

۲. مواد و روش‌ها

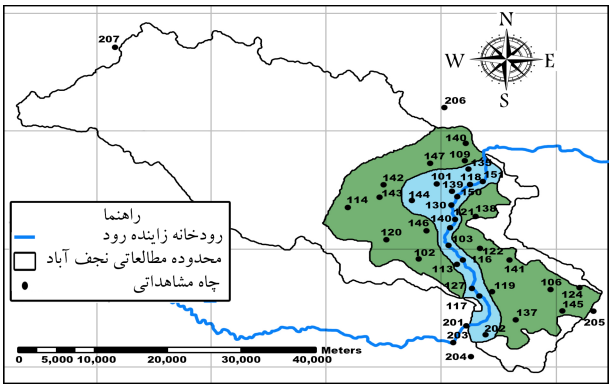
۱.۲. منطقه‌ی مطالعاتی

مطالعه‌ی موردی پژوهش حاضر، زیرحوضه‌ی نجف‌آباد در حوضه‌ی گاوخونی بوده است. حوضه‌ی گاوخونی که در تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران جزء حوضه‌ی آبریز فلات مرکزی ایران است، به ۲۱ زیرحوضه تقسیم‌بندی شده است، که نجف‌آباد یکی از آن‌هاست. وسعت زیرحوضه‌ی نجف‌آباد، ۱۷۱۲ کیلومترمربع است که آبخوان آبرفتی، ۹۴۰٫۹ کیلومترمربع از مساحت آن را شامل می‌شود.[۳۲] میانگین سالانه‌ی دما، بارش و پتانسیل تبخیر در منطقه‌ی مطالعاتی به ترتیب برابر با ۱۵٫۰۸ درجه‌ی سانتی‌گراد، ۱۷۲ و ۲۳۶۸ میلی‌متر است. در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی زیرحوضه‌ی نجف‌آباد در حوضه‌ی گاوخونی و همچنین موقعیت حوضه‌ی گاوخونی در ایران مشاهده می‌شود.

دلیل انتخاب زیرحوضه‌ی نجف‌آباد به علت اهمیت بخش کشاورزی آن است. به نحوی که محدوده‌ی زیرحوضه‌ی مذکور عهده‌دار تأمین بخش به‌سزایی از محصولات کشاورزی کل حوضه‌ی زاینده‌رود است. آبخوان نجف‌آباد در بخش‌های مختلف،



شکل ۱. محدوده‌ی مطالعاتی نجف‌آباد در حوضه‌ی آبریز گاوخونی در ایران.



شکل ۲. تقسیم‌بندی زیرحوضه‌ی نجف‌آباد به چپ و راست نکوآباد.

به طور طبیعی و مصنوعی تحت تأثیر پارامترهای مختلفی، از جمله: تخلیه‌ی آب زیرزمینی، آب سطحی در شبکه‌های آبیاری، بارندگی، نفوذ از بستر رودخانه و ... قرار دارد. همچنین شرایط فیزیوگرافی متنوع در دشت نجف‌آباد موجب شده است تا تأثیر هر کدام از پارامترها در مناطق مختلف متفاوت باشد. در نوشتار حاضر، از دو منطقه‌ی راست و چپ نکوآباد (واقع در زیرحوضه‌ی نجف‌آباد) که در آن‌ها پارامترهای برداشت از آب زیرزمینی و آب توزیع شده در شبکه‌های آبیاری نکوآباد، پارامترهای تعیین‌کننده هستند، استفاده شده است.[۱۰] منطقه‌ی راست نکوآباد، ۸ پیزومتر مشاهده‌یی و منطقه‌ی چپ ۱۰ پیزومتر دارند. در شکل ۲ می‌توان محدوده‌ی مناطق چپ و راست نکوآباد را مشاهده کرد.

۲.۲. مدل شبیه‌ساز

در حالی که ساختارهای متنوعی از شبکه‌ی عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های آموزش وجود دارد، شبکه‌های عصبی پیش‌خور با قاعده‌ی آموزش پس انتشار خطا همچنان بیشترین کاربرد را در حل مسائل فنی ـ مهندسی دارند.[۳۳] در همین راستا، برخی پژوهشگران (۲۰۰۵) با هدف پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی به ارزیابی توانایی شبکه‌های عصبی مختلف پرداخته و اظهار کرده‌اند که بهترین نتایج مربوط به شبکه‌های عصبی پیشرو با الگوریتم پس‌انتشار خطاست،[۳۴] که از ساختار مذکور در شبیه‌سازی سطح ایستابی در نوشتار حاضر استفاده شده است.

۳.۲. مدل بهینه‌ساز

اخیراً استفاده از هوش الهام گرفته از طبیعت در مسائل بهینه‌سازی بسیار مرسوم شده

جدول ۱. نیاز خالص آبی محصولات غالب کشاورزی در زیر حوضه‌ی نجف‌آباد (مترمکعب بر هکتار).

نوع محصول	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
گندم	۰	۹۰	۴۰	۱۸۰	۴۱۰	۶۹۰	۱۲۳۰	۱۴۱۰	۲۲۰	۰	۰	۰
جو	۰	۴۰	۴۰	۱۵۰	۴۰۰	۶۸۰	۱۲۳۰	۱۰۵۰	۰	۰	۰	۰
برنج	۶۸۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷۵۰	۲۱۶۰	۲۳۱۰	۱۸۴۰
سیب‌زمینی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۲۰	۱۰۵۰	۲۲۳۰	۲۱۴۰	۵۰۰	۰
پیاز	۶۵۰	۴۱۰	۱۷۰	۲۷۰	۴۳۰	۶۲۰	۱۱۱۰	۱۶۱۰	۱۷۵۰	۰	۰	۰
علوفه	۷۵۰	۴۸۰	۰	۰	۰	۰	۷۸۰	۱۲۸۰	۱۵۶۰	۱۶۳۰	۱۵۵۰	۱۲۵۰

جدول ۲. نیاز خالص آبیاری محصولات کشاورزی در منطقه‌ی راست نکوآباد (میلیون مترمکعب).

مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۱۵	۵٫۲۵	۱٫۴۳	۰٫۹	۲٫۸۳	۵٫۶۱	۱۸٫۲۵	۲۹٫۷۶	۵۴٫۳۷	۴۲٫۰۹	۳۷٫۹۱	۲۸٫۴۲

جدول ۳. نیاز خالص آبیاری محصولات کشاورزی در منطقه‌ی چپ نکوآباد (میلیون مترمکعب).

مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۳۳٫۱	۱۱٫۵۹	۳٫۱۵	۱٫۱۵	۶٫۲۶	۱۲٫۳۸	۴۰٫۲۸	۶۵٫۶۵	۱۱۹٫۹۷	۹۲٫۸۶	۸۳٫۶۵	۶۲٫۷۲

است. الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبورعسل که در گروه روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر هوش دسته‌جمعی قرار می‌گیرد، یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی است که شامل: الگوریتم ژنتیک، جست‌وجوگر محلی و شبیه‌ساز حرارتی است. ویژگی‌های ذکر شده با هم در روشی مؤثر ترکیب شده‌اند، تا توانایی‌های هر یک را بهبود بیخشند و یک الگوریتم بهبودیافته را ایجاد کنند. فرایند الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل از ۳ ویژگی تکراری انتخاب، تولید مثل و بهبود تشکیل شده است. به‌طور کلی می‌توان الگوریتم بهینه‌ساز جفت‌گیری زنبورعسل را در ۵ گام اساسی خلاصه کرد:

۱. الگوریتم با پرواز جفت‌گیری آغاز می‌شود که در آن ملکه (جواب برتر) به‌طور احتمالاتی جفت‌های خود را از بین زنبورهای نر جهت پرکردن محفظه‌ی اسپرم خود و درنهایت تولید نسل جدید انتخاب می‌کند.

۲. بچه زنبورهای جدید (جواب‌های آزمایشی) با جابه‌جایی ژن‌های زنبورهای نر با ژن‌های ملکه ایجاد می‌شوند.

۳. از کارگرها (توابع کاوشی) جهت جستجوی موضعی (پرورش و ارتقاء نسل بچه زنبورها) استفاده می‌شود.

۴. تابع برازش کارگرها با توجه به میزان ترقی که در نسل زنبورها ایجاد می‌کنند، مرتب می‌شوند.

۵. بچه زنبور برتر در این فرایند در صورت برتری نسبت به ملکه‌ی موجود برای جایگزینی با ملکه و انجام پرواز جفت‌گیری بعدی انتخاب می‌شود.[۲۴]

۴.۲. تعیین نیاز آبی محدوده‌ی مطالعاتی نجف‌آباد

براساس گزارش سازمان جهاد کشاورزی استان اصفهان، کل اراضی تحت کشت در دو منطقه‌ی راست و چپ نکوآباد به ترتیب ۱۴۶۰۰ و ۳۳۰۰۰ هکتار است. برای محاسبه‌ی نیاز آبی خالص هر محصول در ماه‌های مختلف از نرم‌افزار netwat استفاده شده است. نیاز آبی محصولات مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین با توجه به تقویم زراعی و الگوی کشت پیشنهادی ارائه شده توسط جهاد کشاورزی استان اصفهان در سال ۸۶-۱۳۸۵ (که به‌عنوان سالی پر آب در سوابق زیرحوضه‌ی نجف‌آباد یاد می‌شود)، نیاز خالص آبی محصولات کشاورزی در دو منطقه‌ی راست و چپ نکوآباد در ماه‌های مختلف نیز در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

۳. ایجاد مدل مدیریتی و تحلیل نتایج

در جهت ایجاد مدل مدیریتی، نیاز به یک مدل جایگزین شبیه‌سازی برای محاسبه‌ی میانگین سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی و سپس اتصال آن به مدل بهینه‌ساز است. ارائه‌ی سناریوهای مختلف بهره‌برداری برای شرایط خشک‌سالی، نرمال و ترسالی و اجرای مدل بهینه‌ساز برای هر سناریو انجام می‌شود، تا مقادیر بهینه‌ی تخصیص منابع آب سطحی و زیرزمینی برای هر منطقه به دست آید. در بخش حاضر، ابتدا ساختار مدل شبیه‌ساز و سپس بهینه‌ساز و نحوه‌ی اتصال و الگوریتم بهینه‌ساز توضیح داده شده است.

۱.۳. مدل شبیه‌سازی

۱.۱.۳. ورودی‌ها و خروجی شبکه‌ی عصبی

از آنجا که معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی بر مبنای قانون بقای جرم هستند، از این رو تعیین ورودی و خروجی‌های مؤثر در تغییرات سطح ایستابی امری ضروری است. ورودی‌ها و خروجی‌ها در طی گام‌های زمانی ماهانه در منطقه‌ی موردمطالعه عبارت‌اند از: میزان برداشت از آب زیرزمینی در گام زمانی جاری، میزان مصرف آب

توسط شبکه‌های آبیاری مدرن نکوآباد در گام زمانی جاری، میزان بارندگی در گام زمانی جاری، میانگین دمای ماهانه در گام زمانی جاری، تفاوت حجم آب ورودی و خروجی توسط رودخانه (تفاوت دبی ایستگاه‌های هیدرومتری) در گام زمانی جاری، میانگین تراز آب هر منطقه در گام زمانی قبل به منظور وارد کردن شرایط اولیه، میانگین تراز آب مناطق مجاور آن (بالادست و پایین‌دست) در گام زمانی قبل به منظور وارد کردن شرایط مرزی آبخوان (در واقع تأثیر تغییرات سطح آب زیرزمینی در هر منطقه در شرایط مناطق مجاور نیز در نظرگرفته خواهد شد)، تأخیر زمانی برخی از ورودی‌ها که با این کار ناهمسانی زمانی آب سطحی و زیرزمینی و تأثیر درازمدت پارامترهای هواشناسی در آب زیرزمینی مشاهده خواهد شد.درنهایت، خروجی شبکه‌ی عصبی نیز میانگین تراز آب زیرزمینی در هر منطقه در انتهای گام زمانی جاری است. لذا مجموعاً برای هر منطقه‌ی راست و چپ نکوآباد ۱۵ ورودی برای شبکه‌ی عصبی و یک خروجی وجود دارد.[۱۰]

برای تعیین ورودی‌هایی که نیاز به درنظرگرفتن تأخیر زمانی دارند و همچنین تعیین تعداد ماه‌های تأخیر هر یک، در نوشتار حاضر از آزمون و خطا استفاده شده است. به گونه‌یی که تمامی پارامترها ابتدا بدون تأخیرشان در نظرگرفته شدند و شبکه، آموزش‌دیده شد. در ادامه، هر بار تأخیر یک پارامتر به ورودی‌های شبکه اضافه می‌شد و شبکه آموزش می‌دید. درنهایت با توجه به هدفی که از مدل شبیه‌ساز در به‌کارگیری در مدل مدیریت تلفیقی وجود دارد، به مقایسه‌ی معیارهای سنجش شبکه، آنالیز حساسیت و توانایی هر یک از شبکه‌ها در پیش‌بینی پرداخته شد تا درنهایت ورودی‌های مؤثر و مناسب به‌دست آمدند. به‌علاوه برای تأیید ورودی‌های منتخب، از نتایج تحلیل حساسیت نوشتاری در سال ۱۳۹۲،[۱۰] نیز استفاده شده است.

۲.۱.۳. دسته‌بندی الگوهای آموزشی

از کل داده‌های دوره‌ی آماری ۲۳ ساله‌ی موجود (۹۳-۱۳۷۰) که ۲۷۶ ماه است، ۶۰٪ از آن برای آموزش شبکه‌ی عصبی، ۱۵٪ برای اعتبارسنجی و ۲۵٪ دیگر برای آزمایش شبکه استفاده شد. نحوه‌ی انتخاب آن‌ها به‌صورت تصادفی بود و برای اطمینان از این موضوع که داده‌ها در هر قسمت به خوبی انتخاب شوند تا از تمام شرایط آب و هوایی (خشکسالی، پرآبی و نرمال) نماینده‌یی داشته باشند، هر ساختار شبکه ۲۰ بار متوالی آموزش داده شد و درنهایت میانگین معیارهای سنجش خطای آن‌ها برای مقایسه با دیگر شبکه‌ها استفاده شد.

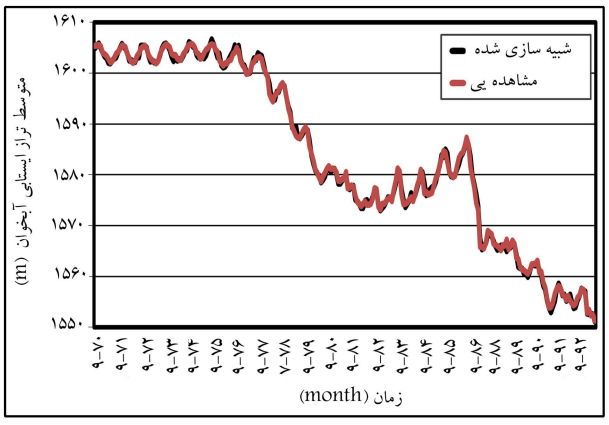
لازم به ذکر است در مواردی که مدل شبیه‌ساز قرار است به مدل بهینه‌ساز متصل شود تا یک مدل مدیریتی را ایجاد کند، نیاز است علاوه بر مقداری که برای اعتبارسنجی خود شبکه‌ی عصبی اختصاص داده می‌شود، مقداری هم برای اعتبارسنجی نهایی مدل شبکه‌ی عصبی ایجاد شده به منظور استفاده در قسمت پیش‌بینی اختصاص داده شود. زیرا مقدار ۱۵ درصدی داده‌ها، که برای قسمت اعتبارسنجی مدل شبکه‌ی عصبی اختصاص داده شده است، در حین فرایند آموزش در جهت انتخاب وزن‌های بهینه استفاده می‌شود ولی اعتبارسنجی نهایی، برای سنجش عملکرد شبکه و ساختار منتخب در حالت پیش‌بینی است. منظور از پیش‌بینی در مطالعه‌ی حاضر به این معناست که برای تعیین میزان تغییر تراز آب زیرزمینی در یک سال با توجه به میزان برداشت‌های بهینه‌ی آب زیرزمینی و سطحی به‌دست آمده از مدل بهینه‌ساز نیاز است که از خروجی مدل شبیه‌ساز در ماه قبل (تراز آب زیرزمینی در انتهای ماه قبل) به عنوان یکی از ۱۵ ورودی ماه بعد استفاده شود. وجود اعتبارسنجی نهایی به این دلیل ضروری است که گاهی شبکه از نظر معیارهای سنجش خطا موردقبول واقع می‌شود، ولی در روند پیش‌بینی ضعیف عمل می‌کند که این امر موجب عملکرد ضعیف مدل مدیریتی نهایی می‌شود.

۳.۱.۳. نحوه‌ی انتخاب بهترین شبکه

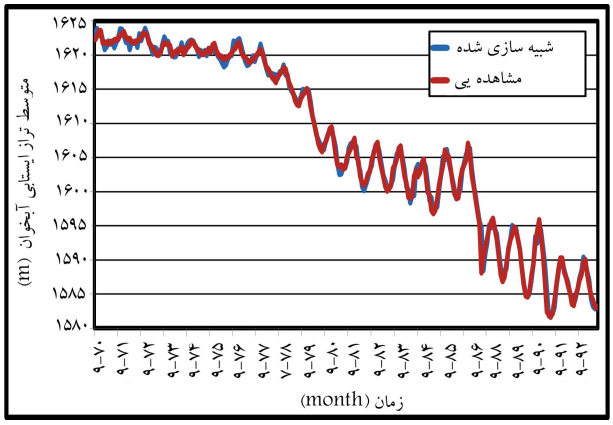
در طراحی شبکه‌ی عصبی، تعداد نرون‌های ورودی و لایه‌ی خروجی با توجه به‌صورت مسئله تعیین می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر برای هر منطقه ۱۵ ورودی و یک خروجی (میانگین سطح آب زیرزمینی در هر منطقه) وجود دارد. از این رو تعداد نرون‌های ورودی و خروجی به ترتیب ۱۵ و ۱ است.

برای تعیین تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌های موجود در هر لایه از روش سعی و خطا استفاده شد. برای شبکه‌های یک لایه با تغییر تعداد نرون‌های لایه‌ی پنهان، شبکه‌های مختلفی ایجاد و آموزش دیده شد. با مقایسه‌ی نتایج شبکه‌های ذکر شده بر مبنای پارامترهای سنجش شبکه و اعتبارسنجی، بهترین آن‌ها انتخاب شد. اگر بهترین شبکه‌ی یک لایه‌ی به‌دست آمده، ویژگی‌های لازم برای انتخاب را نداشت، شبکه‌های دولایه بررسی می‌شد. به این صورت که مشابه حالت یک لایه‌ی پنهان با تغییر تعداد نرون‌های لایه‌ی پنهان اول و ثابت نگه داشتن تعداد نرون‌های لایه‌ی دوم و بالعکس، شبکه‌های مختلفی ایجاد و آموزش داده می‌شد و درنهایت با مقایسه‌ی نتایج شبکه‌های مذکور، بهترین آن‌ها انتخاب می‌شد. برای ایجاد اطمینان از انتخاب بهترین ساختار، از شبکه‌ی عصبی خودسازمانده[۱] (SOM) نیز کمک گرفته شد. شبکه‌های عصبی خودسازمانده با توجه به خصوصیات مشترک داده‌های ورودی، به خوشه‌بندی کردن آن‌ها می‌پردازند. به گونه‌یی که داده‌های با خصوصیات مشترک را در یک خوشه قرار می‌دهند. با تعیین تعداد دسته‌ی داده‌های متفاوت می‌توان تعداد نرون مناسب برای لایه‌ی پنهان را پیدا کرد. نتایج SOM حاکی از صحیح بودن انتخاب ساختار مناسب به‌دست آمده از روش سعی و خطا بود. این روند برای هر سه نوع تابع فعال‌سازی logsig، tansig و radbas به‌صورت جداگانه انجام شد و درنهایت بهترین شبکه‌های به‌دست آمده با هر یک از توابع فعال‌سازی، با یکدیگر مقایسه و بهترین شبکه به‌عنوان شبکه‌ی برگزیده انتخاب شد. لازم به ذکر است که معمولاً هنگامی که خروجی‌ها پیوسته هستند، تابع فعال‌سازی لایه‌ی آخر را تابع همانی در نظر می‌گیرند. در جدول ۴، خلاصه‌ی معماری شبکه‌های منتخب به همراه مقادیر معیار سنجش آن‌ها و مدت زمان آموزش شبکه ارائه شده است.

لازم به ذکر است که مقادیر کمینه، میانگین و بیشینه‌ی خروجی شبکه‌ی عصبی به تصمیم‌گیری صحیح‌تر در مورد سنجش یک شبکه با معیار MSE و RMSE کمک می‌کند تا بتوان مقایسه‌یی بدون بعد بر میزان خطای شبکه داشت. در شکل‌های ۳ و ۴، مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی تراز سطح آب زیرزمینی به‌دست آمده از شبکه‌ی عصبی با مقادیر مشاهده شده در دو منطقه‌ی مطالعاتی مشاهده می‌شود.



شکل ۳. تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در مقایسه با مقادیر مشاهده‌یی در منطقه‌ی چپ نکوآباد.

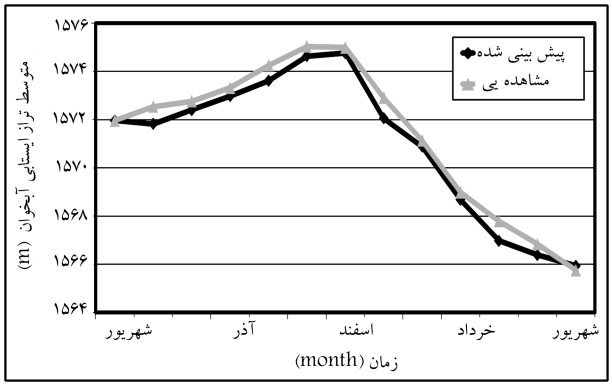


شکل ۴. تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در مقایسه با مقادیر مشاهده‌یی در منطقه‌ی راست نکوآباد.

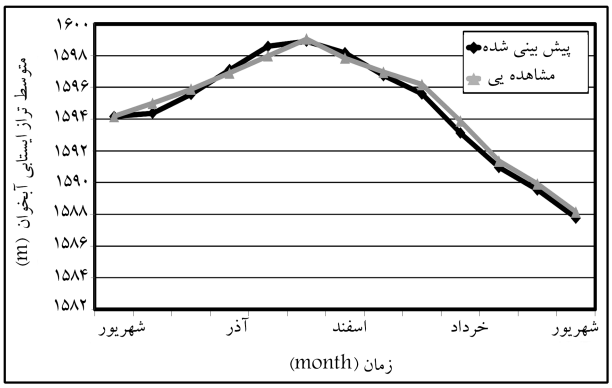
جدول ۴. خصوصیات شبکه‌ی عصبی منتخب برای هر منطقه.

پارامترهای مورد بررسی	منطقه‌ی مطالعاتی	
	چپ نکوآباد	راست نکوآباد
تعداد لایه‌ها	۱	۱
تعداد نرون‌ها	۵	۴
روش آموزش	لونبرگ ـ مارکوارت	لونبرگ ـ مارکوارت
تابع محرک لایه‌ی پنهان	tansig	logsig
تابع محرک لایه‌ی خروجی	purelin	purelin
MSE آموزش	۰٫۵۷۵	۰٫۴۱
MSE صحت‌سنجی	۰٫۸۱۷	۰٫۴۶
MSE آزمایش	۱٫۷۱	۱٫۳۷
RMSE آموزش	۰٫۷۵۸	۰٫۶۴۱
RMSE صحت‌سنجی	۰٫۹۰۴	۰٫۶۷۸
RMSE آزمایش	۱٫۳۱	۱٫۱۷
R^2 آموزش	۰٫۹۹۸	۰٫۹۹۸
R^2 صحت‌سنجی	۰٫۹۹۸	۰٫۹۹۸
R^2 آزمایش	۰٫۹۹۶	۰٫۹۹۲
زمان آموزش(ثانیه)	۰٫۹۴	۰٫۶۶
کمینه‌ی مقدار خروجی شبکه عصبی	۱۸	۲۲٫۲
میانگین خروجی شبکه عصبی	۴۰٫۲۶	۳۹٫۱۱
بیشینه‌ی مقدار خروجی شبکه عصبی	۷۲٫۷۸	۶۴٫۰۹

مطابق شکل‌های ۳ و ۴ مشخص است که دقت عملکرد شبکه‌ی عصبی منتخب مورد تأیید است، به نحوی که مقادیر شبیه‌سازی شده به‌طور قابل قبولی به مقادیر مشاهده‌یی نزدیک هستند. همان‌گونه که بیان شد، شبکه‌ی عصبی آموزش داده شده قرار است برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در مدل بهره‌برداری تلفیقی که از اتصال مدل شبیه‌ساز با مدل بهینه‌ساز به‌دست می‌آید، به‌کار گرفته شود. از این رو مدل باید در قسمت اعتبارسنجی به جهت توانایی برای پیش‌بینی نیز کنترل شود. در شکل‌های ۵ و ۶، مقایسه‌ی نتایج پیش‌بینی شده سال آبی ۸۹-۱۳۸۸ (که برای اعتبارسنجی مدل در بخش پیش‌بینی انتخاب شده است) با مقادیر مشاهده‌یی در دو منطقه‌ی چپ و راست مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که عملکرد مدل مذکور در قسمت پیش‌بینی نیز قابل قبول است. به‌طوری که خطای مدل در تخمین میزان تغییرات تراز آب در آبخوان در سال آبی ۸۹-۱۳۸۸



شکل ۵. تراز آب زیرزمینی پیش‌بینی شده در مقایسه با مقادیر مشاهده‌یی در منطقه‌ی چپ نکوآباد در سال آبی ۸۹-۱۳۸۸.



شکل ۶. تراز آب زیرزمینی پیش‌بینی شده در مقایسه با مقادیر مشاهده‌یی در منطقه‌ی راست نکوآباد در سال آبی ۸۹-۱۳۸۸.

(تفاوت تراز آب زیرزمینی در ابتدا و انتهای سال) در حالت پیش‌بینی نسبت به مقدار مشاهده‌یی برای منطقه‌ی چپ نکوآباد ۳٪ و برای منطقه‌ی راست ۶٪ است.

در ادامه، کارآیی مدل شبیه‌ساز در قسمت پیش‌بینی، در سال‌هایی که به‌عنوان نماینده‌ی سال‌های نرمال، تر و خشک در مدل بهره‌برداری تلفیقی استفاده شده‌اند، بررسی شد. همان‌طورکه در جدول ۵ مشاهده می‌شود، تراز سطح ایستابی به‌دست آمده توسط مدل شبیه‌ساز در انتهای هر سال در حالت پیش‌بینی با مقادیر مشاهده شده در آن سال سنجیده شده است که بیانگر خطای قابل قبول مدل در تخمین سطح آب زیرزمینی است. همچنین جدول ۵، نگرانی انباشتگی خطای پیش‌بینی مدل در انتهای دوره و در پی آن عملکرد ضعیف مدل مدیریتی را نیز از بین می‌برد.

پس از شبیه‌سازی و انتخاب بهترین شبکه با استفاده از ورودی، خصوصیات و پارامترهای به‌دست آمده از شبکه‌ی عصبی منتخب، با استفاده از معادله نیز می‌توان عمق سطح ایستابی در انتهای گام زمانی جاری (خروجی) را به‌دست آورد. برای مثال، اگر شبکه‌ی مذکور ۲ لایه با یک لایه‌ی پنهان با تابع فعال‌سازی tansig باشد، تراز آب با استفاده از رابطه‌ی ۱ به‌دست می‌آید:

$$H_t = purline\left(W_2 . \tan sig\left((W_1 . I_t) + b_1\right) + b_2\right) \qquad (1)$$

که در آن، I ماتریس ورودی است که ۱۲ × ۱۵ آرایه دارد که ۱۵ ورودی بیان شده در سطرهای آن و در ستون‌های آن گام‌های زمانی مختلف قرار دارد که برای پژوهش حاضر به‌صورت ماهانه است. برای مثال هنگام شبیه‌سازی گام زمانی t، از ستون t ماتریس ذکر شده به همراه همه‌ی ردیف‌های آن استفاده می‌شود و به‌عنوان ماتریس I_t در رابطه‌ی ۱ قرار می‌گیرد W_1و W_2 به ترتیب ماتریس وزن‌های لایه‌ی اول و

جدول ۵. مقایسه‌ی تراز سطح آب به‌دست آمده (متر) از مدل شبیه‌ساز در حالت پیش‌بینی با مقادیر مشاهده‌یی در هر منطقه.

منطقه‌ی مطالعاتی	دوره‌ی برنامه‌ریزی	تراز آب قبل از شروع سال آبی (شهریور ماه سال قبل)	به‌دست آمده از مدل یا مشاهده‌یی	تراز آبی در انتهای سال آبی (شهریور ماه)
چپ نکوآباد	خشکسالی	۱۵۶۶٫۲	مشاهده‌یی	۱۵۶۰٫۸
			به‌دست آمده از مدل	۱۵۶۰٫۵
	نرمال	۱۵۷۵٫۳	مشاهده‌یی	۱۵۷۵٫۶
			به‌دست آمده از مدل	۱۵۷۵٫۹
	ترسالی	۱۵۷۸	مشاهده‌یی	۱۵۸۱٫۷
			به‌دست آمده از مدل	۱۵۸۲
راست نکوآباد	خشکسالی	۱۵۸۷٫۵	مشاهده‌یی	۱۵۸۴٫۷
			به‌دست آمده از مدل	۱۵۸۵
	نرمال	۱۶۰۰٫۵	مشاهده‌یی	۱۵۹۹٫۴
			به دست آمده از مدل	۱۵۹۹٫۵
	ترسالی	۱۵۹۷٫۳	مشاهده‌یی	۱۵۹۹٫۲
			به‌دست آمده از مدل	۱۵۹۹٫۴

دوم و b_1 و b_2 بایاس‌های لایه‌های اشاره شده هستند. H_t ماتریس خروجی ۱ × ۱ است که بیانگر عمق سطح ایستابی در منطقه‌ی موردنظر در زمان t است.

۲.۳. ساختار کلی مدل بهینه‌سازی تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی

پس از ایجاد مدل‌شبیه‌ساز، به تشکیل مدل بهینه‌ساز پرداخته می‌شود، تا درنهایت بتوان با متصل کردن دو مدل شبیه‌ساز و بهینه‌ساز، مقادیر بهینه‌ی تخصیص آب سطحی و زیرزمینی را به‌دست آورد. مدل بهینه‌ساز ملزم به رعایت محدودیت اعمال شده بر متغیر حالت و متغیرهای تصمیم است که در پژوهش حاضر، نوسان‌های سطح آب زیرزمینی به‌عنوان متغیر حالت در نظر گرفته شده است. بنابراین ابتدا الگوریتم بهینه‌ساز، متغیرهای تصمیم را تولید می‌کند و سپس آن‌ها را به مدل شبیه‌ساز، که با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی به دست آمده است، انتقال می‌دهد. در ادامه، مدل شبیه‌ساز رفتار سیستم را در پاسخ به تصمیم‌های اتخاذ شده توصیف و مقدار متغیر حالت را محاسبه می‌کند. کنترل ارضاء قیود نیز با استفاده از روش جریمه صورت می‌گیرد. اگر جواب‌های تولید شده نتوانند قیود را ارضا کنند و مقدار تابع هدف کمینه را بدست نیاورند، این روند تکرار می‌شود. به‌طوری که الگوریتم بهینه‌ساز مجدداً متغیرهای تصمیم جدیدی را تولید می‌کند و به مدل شبیه‌ساز می‌فرستد. این چرخه تا زمان هم‌گرایی به بهینه‌ی کلی یا نزدیک به آن ادامه می‌یابد. لازم به توضیح است که مدل مدیریتی برای دو منطقه‌ی چپ و راست نکوآباد به‌صورت جداگانه ایجاد و سناریوهای مدیریتی در هر منطقه ارائه و تحلیل شده است.

۱.۲.۳. تابع هدف مدل بهینه‌ساز

هدف مدل بهینه‌ساز، تأمین بیشینه‌ی نیاز یا به عبارتی دیگر، کمینه‌سازی تفاوت آب تخصیص‌یافته با مقدار نیاز طبق رابطه‌ی ۲ است:

$$Minimize\ F = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{Demand_{k,i} - Supply_{k,i}}{Demand_{k,i}} \right)^2 \qquad k = 1, 2 \qquad (2)$$

که در آن، $Supply_{k,i} = a \times G_{k,i} + a \times b \times c \times S_{k,i}$ است. همچنین، F تابع هدف، i شمارنده‌ی گام زمانی (ماه‌های دوره‌ی برنامه‌ریزی)، k شمارنده‌ی مناطق راست و چپ، $Demand_{k,i}$ میزان نیاز خالص آبی منطقه‌ی kاُم در ماه iاُم، $Supply_{k,i}$ میزان آب تخصیص‌یافته به منطقه‌ی kاُم در ماه iاُم توسط مدل بهینه‌ساز، $G_{k,i}$ میزان برداشت آب زیرزمینی در ماه iاُم از منطقه‌ی kاُم، $S_{k,i}$ میزان آب سطحی برداشت شده از شبکه‌های آبیاری در منطقه‌ی kاُم در ماه iاُم، a ضریب راندمان کاربرد آب در سطح مزرعه، b ضریب راندمان انتقال آب در طول کانال اصلی و c راندمان توزیع آب در سطح شبکه‌ی آبیاری تلفات آب است که در ۳ مرحله‌ی انتقال، توزیع و کاربرد در سطح مزرعه اتفاق می‌افتد. با وجود شبکه‌های مدرن آبیاری در دشت نجف‌آباد با پوشش بتنی در کل طول کانال و استفاده از دریچه‌های مناسب آب‌بند، راندمان انتقال ۹۰٪ در نظر گرفته شده است. همچنین راندمان کاربرد آب برابر ۵۶٪ و راندمان توزیع نیز برابر با ۸۵٪ است.[۳]

۲.۲.۳. قیود

در مدل حاضر، بهینه‌سازی قید اول مربوط به حد بالای برداشت ماهانه از آب سطحی است، که طبق رابطه‌ی ۳ بیان شده است. قید دوم نیز مربوط به بیشینه‌ی میزان مجموع برداشت از آب سطحی در یک دوره‌ی برنامه‌ریزی (۱۲ ماهه) است که در رابطه‌ی ۴ ملاحظه می‌شود:

$$S_{k,i} \le S_{\max,i,k} \qquad i = 1, 2, ..., 12 \qquad k = 1, 2 \qquad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{12} S_{k,i} \le S_{\max,k} \qquad k = 1, 2 \qquad (4)$$

که درآن‌ها، $S_{k,i}$ میزان برداشت ماهانه از آب سطحی در ماه iاُم در منطقه‌ی kاُم، $S_{\max,i,k}$ بیشینه‌ی میزان برداشت ماهانه از آب سطحی در ماه iاُم در منطقه‌ی kاُم، $S_{\max,k}$ بیشینه‌ی میزان برداشت مجموع از آب سطحی در یک دوره‌ی برنامه‌ریزی (۱۲ ماهه) در منطقه‌ی kاُم قید سوم مربوط به بیشینه‌ی برداشت ماهانه از آب زیرزمینی است. حد بالای برداشت ماهانه از آب زیرزمینی برابر با بیشینه‌ی مقدار برداشت شده‌ی ماهانه در بین تمام ماه‌های دوره‌ی ۲۳ ساله‌ی آمار موجود انتخاب شده است. حد بالای مذکور برای منطقه‌ی چپ برابر با ۹۷٫۰۵ میلیون مترمکعب و برای منطقه‌ی راست برابر با ۴۰ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده است. دلیل

انتخاب این اعداد این است که میزان برداشت از آب زیرزمینی در مطالعه‌ی حاضر به‌عنوان یک قید فیزیکی محسوب می‌شود.

قیود دیگری که باید اعمال شوند، مربوط به کنترل تراز سطح ایستابی هستند. رابطه‌ی ۵، نشانگر محدودیت بیشینه‌ی تراز آب در هر منطقه است که نباید این مقدار بالاتر از منطقه‌ی ریشه برود (۱٫۵ متری سطح زمین). در رابطه‌ی ۶، نیز محدودیت عدم تعدی میزان مجموع افت در انتهای دوره‌ی بهره‌برداری از میزان افت بیشینه‌ی مجاز دوره‌ی بهره‌برداری بیان شده است:

$$L_{i,k} \geq ۱٫۵ \quad i = ۱, ۲, ..., ۱۲ \quad k = ۱, ۲ \tag{۵}$$

$$\sum_{i=۱}^{۱۲} \Delta L_{i,k} \leq \Delta L_total_{\max,k} \quad k = ۱, ۲ \tag{۶}$$

که در آن‌ها، $L_{i,k}$ عمق آب زیرزمینی یا به بیانی دیگر، فاصله‌ی بین دهانه‌ی چاه تا سطح آب در آبخوان در ماه iاُم در منطقه‌ی kاُم، $\Delta L_{i,k}$ تغییر تراز سطح آب در ماه iاُم نسبت به ماه $(i-۱)$اُم در منطقه‌ی kاُم، و $\Delta L_total_{\max,k}$ حد بالای میزان افت یا حد پایین میزان بهبود مجاز تراز آب در انتهای یک دوره‌ی برنامه‌ریزی است. اعداد به گونه‌یی انتخاب شده‌اند که سطح آب در آبخوان در یک دوره‌ی بلندمدت ۲۳ ساله ثابت بماند. برای تعیین این مقادیر از آمار آب منطقه‌یی استان اصفهان استفاده شده است. در این آمار بیان شده است که در دوره‌ی آماری پژوهش مذکور (از سال آبی ۷۱-۱۳۷۰ تا سال آبی ۹۳-۱۳۹۲) ۵ سال تر، ۹ سال نرمال و ۹ سال خشک وجود دارد. بنابراین در هر منطقه اعداد طوری انتخاب شده‌اند که ضمن منطقی بودن، امکان دست‌یابی و همخوانی با کمینه و بیشینه‌ی میزان برداشت‌های سالانه‌ی آب‌های سطحی و زیرزمینی در دوره‌ی آماری، بتوانند پایداری آبخوان در درازمدت را نیز ایجاد کنند. درنهایت، برای ۳ دوره‌ی خشک‌سالی، نرمال و ترسالی در منطقه‌ی چپ این مقادیر به ترتیب برابر با ۴ متر (بیشینه‌ی میزان افت)، ۱ متر (کمینه‌ی میزان بهبود سطح آبخوان) و ۶ متر (کمینه‌ی میزان بهبود سطح آبخوان) و در منطقه‌ی راست نیز این مقادیر به ترتیب برابر با ۲ متر (بیشینه‌ی میزان افت)، صفر (سطح آب در پایان دوره تغییری نکند) و ۴ متر (کمینه‌ی میزان بهبود سطح آبخوان) در نظرگرفته شد. درنهایت، در صورتی که هرکدام از قیود ارضاء نشوند، عبارت جریمه طبق روابط ۷ و ۸ به تابع هدف اضافه می‌شود:

$$F = F + F_۱ \tag{۷}$$

$$F_۱ = R \times \Delta \tag{۸}$$

که در آن‌ها، R ضریب پنالتی است که عدد مناسب آن برای هرکدام از قیود با توجه به اهمیت ارضاء شدن آن‌ها و با انجام سعی و خطا در مدل بهینه‌ساز به‌دست می‌آید و Δ میزان تجاوز از مقادیر مجاز در رابطه‌های ۳ الی ۶ است.

۳.۳. نحوه‌ی کارکرد مدل بهینه‌ساز

پس از تعیین پارامترهای اولیه‌ی مدل شبیه‌ساز شبکه‌ی عصبی، به اجرای مدل تلفیق شده‌ی شبکه‌ی عصبی و مدل بهینه‌ساز پرداخته شده است. در هر اجرای الگوریتم بهینه‌ساز به ازاء هر زنبور از جمعیت، مقادیری به متغیرهای تصمیم (میزان برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی) در همه‌ی گام‌های زمانی تعلق می‌گیرد. این مقادیر به همراه ورودی‌های دیگر مدل شبیه‌ساز (که در قسمت توسعه‌ی شبکه‌ی عصبی بیان شده است) وارد شبکه‌ی عصبی می‌شوند و تراز آب زیرزمینی که خروجی شبکه و متغیر حالت مدل بهینه‌ساز است، تخمین زده می‌شود. در ادامه، از آنجایی که مدل بهینه‌ساز ملزم به رعایت محدودیت‌های اعمال شده بر متغیر حالت و متغیرهای تصمیم است، به کنترل ارضاء قیود با استفاده از روش جریمه پرداخته می‌شود و درنهایت، در صورت تأمین یا عدم تأمین قیود، هر زنبور مقداری برای تابع هدف خود به‌دست می‌آورد. در ادامه، زنبورها براساس مقدار تابع هدفی که به‌دست آورده‌اند، امتیازدهی می‌شوند و اگر برترین آن‌ها از ملکه (بهترین جواب موجود تا مرحله‌ی کنونی) بهتر بود، جایگزین آن می‌شود و در غیر این‌صورت از جواب‌های جمعیت ذکر شده استفاده‌یی نمی‌شود. در بازگشت (پرواز جفت‌گیری بعدی) مجدداً به تعداد هر زنبور در جمعیت، متغیرهای تصمیم جدیدی تولید می‌شود (یا به عبارتی دیگر، بچه زنبورهایی جدید که هرکدام شامل یک رشته جواب‌هستند، تولید می‌شوند) و این چرخه تا زمان هم‌گرایی به بهینه‌ی کلی یا نزدیک به آن ادامه می‌یابد. در انتها، مقادیر به دست آمده برای متغیرهای تصمیمی که به ازاء آن‌ها مقدار تابع هدف کمینه می‌شود (مقادیر به دست آمده توسط زنبور منتخب)، به‌عنوان بهترین میزان برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی گزارش می‌شود. لازم به توضیح است که همه‌ی مقادیر ورودی‌های شبکه‌ی عصبی در هر سناریو برابر با مقادیر متناظر در سال نماینده‌ی خود هستند. همچنین مقادیر آب سطحی و زیرزمینی نیز به همراه مقادیر تأخیری آن‌ها در هر مرحله، از الگوریتم بهینه‌ساز گرفته می‌شود.

در ادامه‌ی پژوهش حاضر، با توجه به داشتن نیازهای آبی متناسب با الگوی کشت پیشنهاد شده، به تأمین نیاز با استفاده از مدل مدیریتی ارائه‌شده پرداخته شده است. مدل مدیریتی مذکور به هدررفت کمتر آب در برخی ماه‌ها و جبران بیشتر میزان کمبود در ماه‌های دیگر کمک می‌کند. برای درنظرگرفتن شرایط آب و هوایی مختلف، سه سیاست بهره‌برداری مجزا برای ۳ دوره‌ی خشک‌سالی، میان‌آبی (نرمال) و ترسالی ارائه شده است. پس از بررسی و استفاده از آمار شرکت آب منطقه‌یی اصفهان، سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ به‌عنوان نماینده‌ی سال‌های خشک، سال ۸۴-۱۳۸۳ به‌عنوان نماینده‌ی سال‌های میان‌آبی (نرمال) و سال آبی ۸۶-۱۳۸۵ به‌عنوان نماینده‌ی سال‌های تر در نظرگرفته شد.

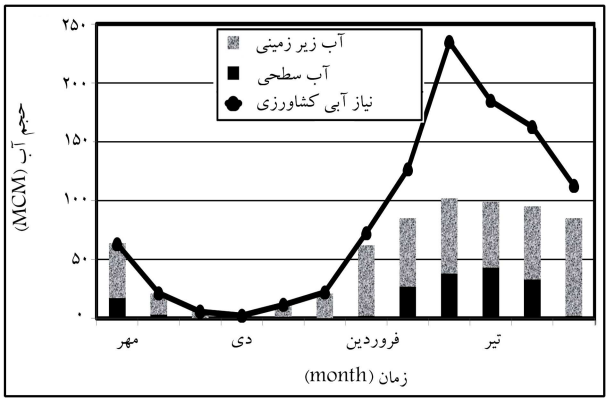
۱.۳.۳. سناریوی ترسالی

بیشینه‌ی آب سطحی در دوره‌ی ترسالی برابر با مجموع آب سطحی استفاده شده در سال ۸۶-۱۳۸۵ قرار داده شده است، که برای مناطق چپ و راست به ترتیب برابر با ۱۶۸٫۰۵ و ۴۷٫۹۱ میلیون مترمکعب است. در ادامه، برای ایجاد اطمینان بیشتر برای اجرایی بودن قوانین تخصیص آب سطحی ماهانه‌ی به دست آمده، حد بالای استفاده از آب سطحی ماهانه به بیشینه‌ی مقدار استفاده شده در بین ماه‌های متناظر در کل دوره‌ی آماری محدود می‌شود، که این مقادیر برای دو منطقه‌ی چپ و راست در جدول ۶ ارائه شده است.

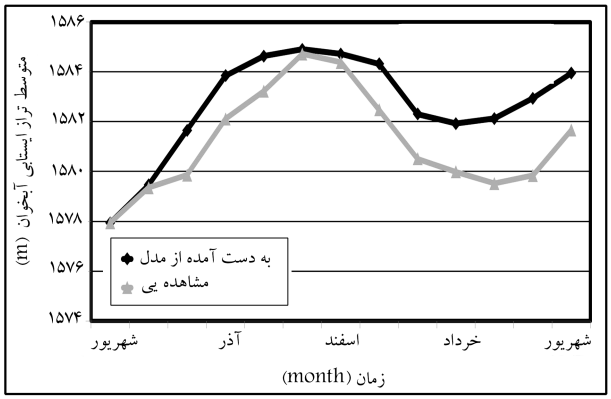
بنابراین مدل بهینه‌ساز در یک دوره‌ی برنامه‌ریزی برای مقادیر آب سطحی، به توزیع بهینه‌ی آن در گام‌های زمانی مختلف می‌پردازد. نتایج حاصل از اجرای مدل مدیریتی در دوره‌ی ترسالی با توجه به میزان آب سطحی و زیرزمینی به دست آمده

جدول ۶. حد بالای آب سطحی ماهانه قابل استفاده برای دو منطقه‌ی راست و چپ نکوآباد (MCM).

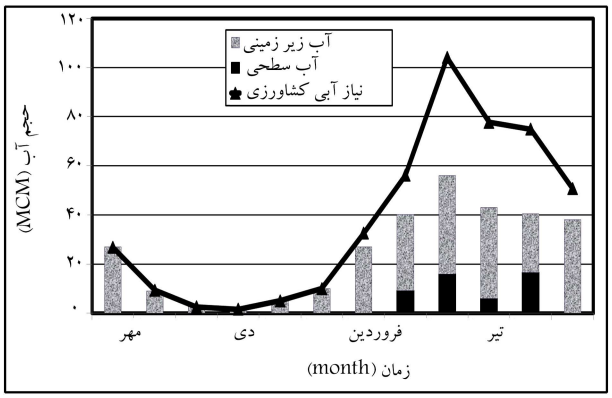
ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
منطقه چپ	۵۸٫۱	۴۶٫۹۰	۴۳٫۷۰	۱٫۴۳	۱٫۴۳	۱٫۳۸	۴۴٫۷۰	۷۰	۸۲٫۴۰	۱۰۰٫۵	۹۹٫۳	۹۰
منطقه راست	۰٫۷۷	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۱٫۲	۱۱٫۲۰	۱۶٫۵۳	۲۲٫۸۳	۲۲٫۵۴	۲۰٫۰۲



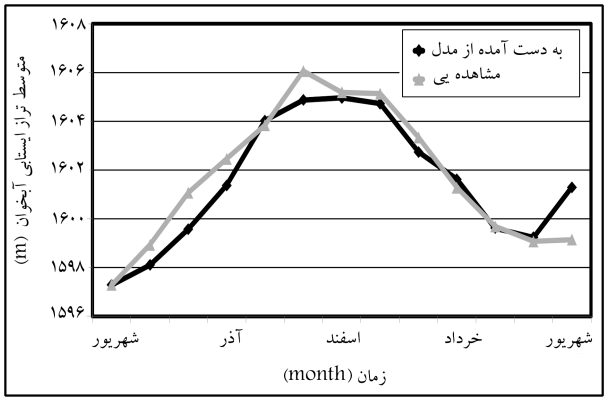
شکل ۷. مجموع آب سطحی و زیرزمینی تخصیص یافته توسط مدل در سناریو اول در منطقه‌ی چپ نکوآباد در دوره‌ی ترسالی.



شکل ۹. متوسط تراز ایستابی به‌دست آمده از مدل در سناریو اول در مقایسه با مقدار مشاهده‌یی در منطقه‌ی چپ در دوره‌ی ترسالی.



شکل ۸. مجموع آب سطحی و زیرزمینی تخصیص یافته توسط مدل در سناریو اول در منطقه‌ی راست در دوره‌ی ترسالی.



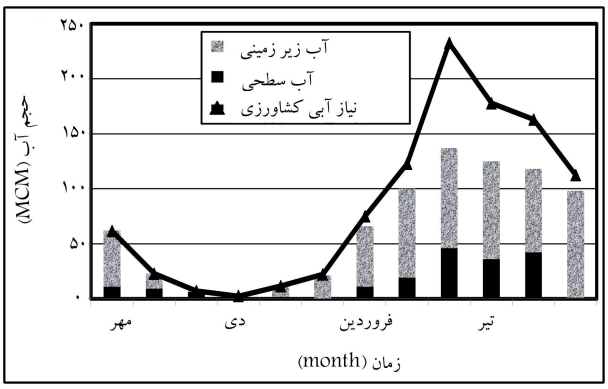
شکل ۱۰. متوسط تراز ایستابی به‌دست آمده از مدل در سناریو اول در مقایسه با مقدار مشاهده‌یی در منطقه‌ی راست در دوره‌ی ترسالی.

به همراه نیاز آبی کشاورزی برای دو منطقه‌ی چپ و راست نکوآباد به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود.

مطابق شکل‌های ۷ و ۸، در حالت ترسالی در دو منطقه‌ی چپ و راست نکوآباد، مدل ارائه شده تمام قیود موجود را ارضاء کرده است، ولی نتوانسته است نیازهای کشاورزی را کاملاً تأمین کند. عدم تأمین کامل نیازها علاوه بر اینکه به دلیل وجود قیود مسئله (محدودیت در میزان آب سطحی در دسترس و میزان برداشت از آب زیرزمینی و قید تغییر تراز) است، به علت زیاد بودن نیازهای آبی کشاورزی نیز است. زیرا نیاز آبی کشاورزی مطابق با الگوی کشت پیشنهادی مطلوب در سال پرآبی ۸۶-۱۳۸۵ است. در شکل‌های ۹ و ۱۰، تراز سطح ایستابی ارائه شده توسط مدل در مقایسه با مقادیر مشاهده‌یی در سال پرآبی ۸۶-۱۳۸۵ در دو منطقه‌ی چپ و راست مشاهده می‌شود. با مقایسه‌ی تراز آب به دست آمده از مدل و مقادیر مشاهده‌یی در دو منطقه، بهبود وضعیت آبخوان در انتهای دوره در صورت استفاده از مقادیر بهینه‌ی تخصیص یافته توسط مدل، کاملاً مشهود است.

۲.۳.۳. سناریوی سال نرمال (میان‌آبی)

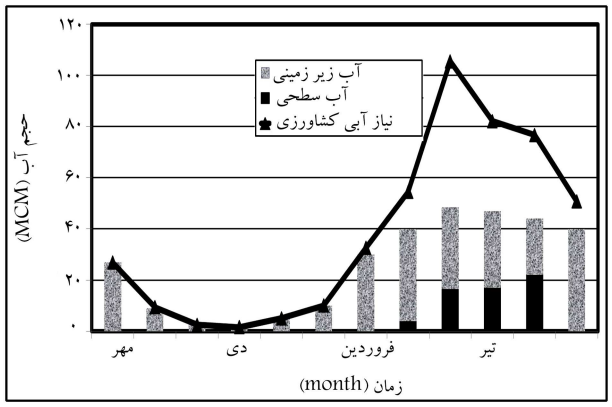
بیشینه‌ی آب سطحی در اختیار در دوره‌ی برنامه‌ریزی نرمال (میان‌آبی)، برابر با مجموع آب سطحی استفاده‌شده در سال آبی ۸۴-۱۳۸۳ تعیین شده است که این مقدار برای مناطق چپ و راست به ترتیب برابر با ۱۸۴/۱۵ و ۵۹/۸۴ میلیون مترمکعب است. حد بالای استفاده از آب سطحی ماهانه نیز برابر با بیشینه‌ی مقدار بیان شده در جدول ۶ در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل مدیریتی در



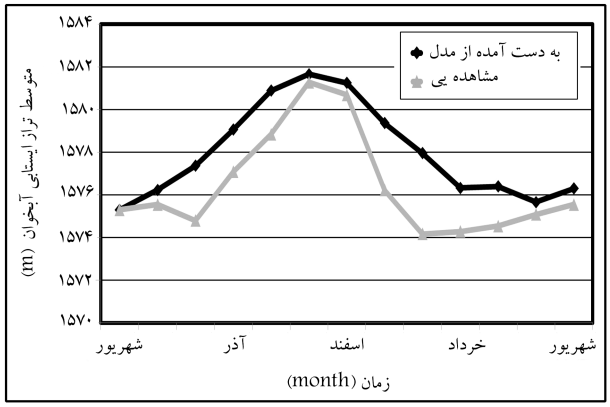
شکل ۱۱. مجموع آب سطحی و زیرزمینی تخصیص یافته توسط مدل در سناریو اول در منطقه‌ی چپ نکوآباد در دوره‌ی نرمال (میان‌آبی).

دوره‌ی نرمال به همراه نیاز آبی کشاورزی برای دو منطقه‌ی چپ و راست نکوآباد به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود.

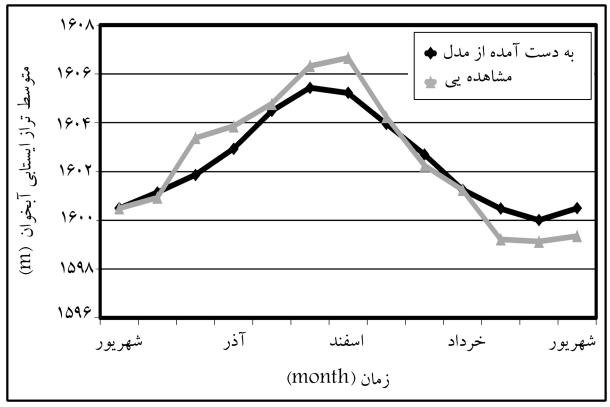
یکی از دلایل تأمین بیشتر نیازها در دوره‌ی میان‌آبی نسبت به دوره‌ی ترسالی، میزان تغییرات سطح آب خواسته‌شده در ۲ دوره‌ی ذکر شده است. زیرا سال‌هایی که از لحاظ داشتن میزان آب سطحی و بارش در مقایسه با دیگر سال‌های منطقه پرآب هستند، باید فرصتی برای ترمیم آبخوان باشند، تا با وجود افت در سال‌های خشک‌سالی بتوان در یک دوره‌ی درازمدت (که در پژوهش حاضر یک دوره‌ی ۲۳



شکل ۱۲. مجموع آب سطحی و زیرزمینی تخصیص یافته توسط مدل در سناریو اول در منطقه‌ی راست نکوآباد در دوره‌ی نرمال (میان‌آبی).

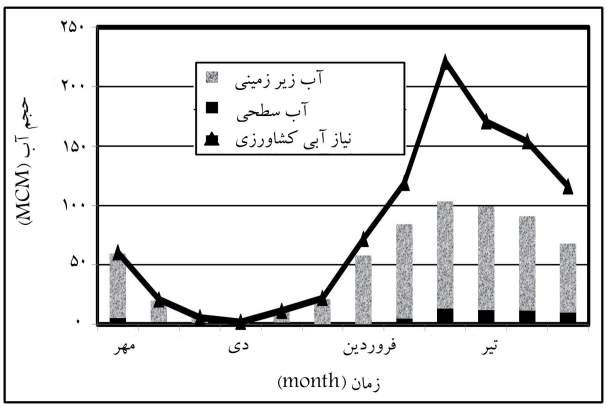


شکل ۱۳. متوسط تراز ایستابی به‌دست آمده از مدل در سناریو اول در مقایسه با مقدار مشاهده‌یی در منطقه‌ی چپ در دوره‌ی نرمال (میان‌آبی).

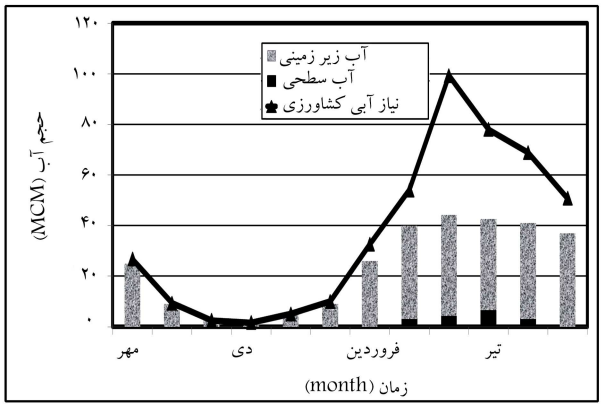


شکل ۱۴. متوسط تراز ایستابی به‌دست آمده از مدل در سناریو اول در مقایسه با مقدار مشاهده‌یی در منطقه‌ی راست در دوره‌ی نرمال (میان‌آبی).

ساله است)، پایداری آبخوان را تأمین کرد. لذا به دلیل اینکه در دوره‌ی میان‌آبی میزان بهبود خواسته شده‌ی سطح آبخوان کمتر از میزان بهبود خواسته شده در دوره‌ی ترسالی است، بنابراین در دوره‌ی میان‌آبی اجازه‌ی برداشت بیشتری نسبت به دوره‌ی ترسالی داده می‌شود. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نیز می‌توان متوسط تراز ایستابی به دست آمده را که مدل توانسته است در دو منطقه‌ی مذکور، سطح آب در آبخوان را بهبود ببخشد، مشاهده کرد.



شکل ۱۵. مجموع آب سطحی و زیرزمینی تخصیص یافته توسط مدل در سناریو اول در منطقه‌ی چپ نکوآباد در دوره‌ی خشکسالی.



شکل ۱۶. مجموع آب سطحی و زیرزمینی تخصیص یافته توسط مدل در سناریو اول در منطقه‌ی راست نکوآباد در دوره‌ی خشکسالی.

۳.۳.۳. سناریوی سال خشک

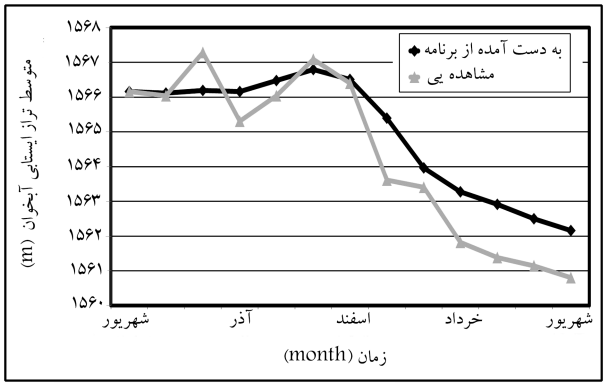
در سناریوی سال خشک، سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ به‌عنوان سال شاخص در نظر گرفته شده است. بیشینه‌ی آب سطحی در اختیار در دوره‌ی سال خشک نیز برابر با مجموع آب سطحی استفاده‌شده در سال ۹۰-۱۳۸۹ در نظر گرفته شده است که برای مناطق چپ و راست به ترتیب برابر با ۶۱٫۷۹ و ۱۶٫۸۸ میلیون مترمکعب است. برای تعیین حد بالای آب سطحی ماهانه، با توجه به کم‌آب بودن سال نماینده، از بیشینه‌ی میزان برداشت آب سطحی ماهانه از میان ماه‌های متناظر در سال‌های ۹۳-۱۳۸۹ استفاده شده است، که مقادیر آن در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل مدیریتی در دوره‌ی سال خشک، با توجه به میزان آب سطحی و زیرزمینی به‌دست آمده به همراه نیاز آبی کشاورزی برای دو منطقه‌ی چپ و راست نکوآباد به ترتیب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود.

در دوره‌ی سال خشک نیز مانند دو دوره‌ی ترسال و میان‌آبی، مدل برای تأمین قیود قادر به تأمین همه‌ی نیازها نشده است. متوسط تراز ایستابی به‌دست آمده از مدل در مقایسه با مقادیر مشاهده‌یی در دو منطقه‌ی چپ و راست نکوآباد را می‌توان در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشاهده کرد.

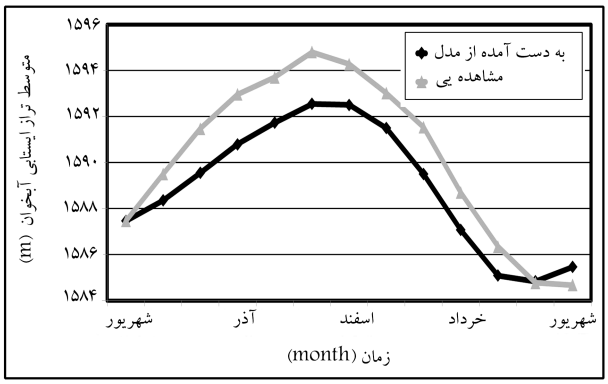
در دوره‌ی سال خشک نیز مدل با مقادیر تخصیص بهینه‌ی خود توانسته است ضمن ایجاد پایداری بیشتر، سطح آب در آبخوان را با کاهش نوسان‌های تراز آب (به‌خصوص در منطقه‌ی چپ)، به میزان قابل قبولی بهبود ببخشد.

جدول ۷. حد بالای برداشت ماهانه از آب سطحی در دوره‌ی خشک‌سالی (MCM).

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
منطقه چپ	۶٫۴۷	۱٫۷۸	۱٫۱۶	۱٫۴۳	۱٫۴۳	۱٫۳۸	۳٫۵۴	۱۰٫۴۳	۱۳٫۳۲	۱۲٫۰۶	۱۱٫۷۲	۹٫۹۳
منطقه راست	۰٫۷۷	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۳٫۶۷	۴٫۱۸	۶٫۶۳	۴٫۳۶	۴٫۰۵



شکل ۱۷. متوسط تراز ایستابی به‌دست آمده از مدل در سناریو اول در مقایسه با مقدار مشاهده‌یی در منطقه‌ی چپ در دوره‌ی خشکسالی.



شکل ۱۸. متوسط تراز ایستابی به‌دست آمده از مدل در سناریو اول در مقایسه با مقدار مشاهده‌یی در منطقه‌ی راست در دوره‌ی خشکسالی.

۴. نتیجه‌گیری

مدل شبیه‌ساز شبکه‌ی عصبی مورداستفاده در پژوهش حاضر توانسته است با میزان خطای قابل قبولی سطح آب در آبخوان را به‌خوبی پیش‌بینی کند. به‌گونه‌یی که مقدار R^2 در دو شبکه‌ی چپ و راست بیش از ۰٫۹۹ و خطای اعتبارسنجی مدل برای پیش‌بینی، کمتر از ۶٪ در تخمین تغییرات سطح ایستابی انتهای دوره نسبت به ابتدای دوره است. یکی دیگر از مزایاهای شبکه‌های ذکر شده، کوچک بودن ساختار شبکه (تعداد نرون‌های کم و استفاده از یک لایه‌ی پنهان) و در نتیجه، صرف زمان کمتر برای آموزش شبکه است.

استفاده از شبکه‌ی عصبی در مواقعی که امکان اتصال مستقیم مدل شبیه‌ساز به مدل بهینه‌ساز وجود ندارد، مفید است. علاوه بر این، با کمک معادله‌ی مذکور، متصل کردن نرم‌افزارهای بهینه‌ساز به شبکه‌ی عصبی آسان‌تر می‌شود، که درنهایت می‌توان شانس رسیدن به حل‌های بهینه‌ی عمومی یک مسئله‌ی مدیریت تلفیقی با توابع هدف خطی و غیرخطی را افزایش داد. نتایج نشان می‌دهد که هر چند عدم تأمین کامل آب موردنیاز کشاورزی در تمامی دوره‌های خشک‌سالی، نرمال و ترسالی مشاهده می‌شود، ولی با این وجود مدل توانسته است ضمن ارضاء تمامی قیود، میانگین سطح ایستابی در آبخوان را به میزان قابل قبولی بهبود بخشد. همچنین مدل قادر به کاهش تغییرات کاهشی و افزایشی سطح آب در آبخوان در ماه‌های مختلف دوره‌های بهره‌برداری بوده است که این مسئله به پایداری آبخوان و جلوگیری از نشست زمین کمک می‌کند. به‌علاوه با توجه به مقادیر تخصیص یافته در ۳ دوره‌ی برنامه‌ریزی در هر منطقه مشخص می‌شود که به دلیل ارضاء قید تعیین شده‌ی تغییرات تراز آبخوان که برای رسیدن به پایداری آبخوان در درازمدت در نظر گرفته شده است، مدل در ۳ دوره‌ی ترسالی، نرمال و خشکسالی میزان تخصیص نزدیک به هم را داشته است. تأمین تقریباً یکنواخت نیازهای آبی در طول سال‌های مختلف به پایداری بیشتر بخش کشاورزی در منطقه کمک می‌کند.

همان‌طورکه از مطالعات پیشین انجام گرفته با الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل و پژوهش حاضر مشخص است، این الگوریتم در رسیدن به جواب‌های بهینه‌ی سراسری یا نزدیک به بهینه، خوب عمل می‌کند. همچنین راهکار عدم به دام افتادن در بهینه‌های محلی در ساختار الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل گنجانده شده است. استفاده از الگوریتم مذکور در حل مسائل غیرخطی (همانند مدلی که در مطالعه‌ی حاضر بررسی شده است) و بررسی نتایج آن به ما در استفاده یا عدم استفاده‌از الگوریتم جفت‌گیری زنبور عسل در حل مسائل محدب و چندهدفه که امکان حل آن توسط نرم‌افزارهای حل بهینه‌ی موجود میسر نیست، کمک خواهد کرد.

باید خاطرنشان کرد با وجود اینکه یکی از معایب الگوریتم‌های فراابتکاری، عدم امکان تشخیص صحت عملکرد الگوریتم است، ولی در پژوهش حاضر با اجراهای متعدد الگوریتم جفت‌گیری زنبور در یک دوره با شرایط و پارامترهای یکسان، خطای معیار بسیار کمی در جواب‌ها مشاهده شد، که این موضوع تأییدی دیگر بر عملکرد قابل قبول الگوریتم مذکور دارد.

پانوشت

1. self organizing map (SOM)

منابع (References)

1. Safavi, H.R., Darzi, F. and Marino, M.A. "Simulation-optimization modeling of conjunctive use of surface wa-

ter and groundwater", *Water Resource Management*, **24**(10), pp. 1965-1988 (2010).

2. Safavi, H.R. and Esmikhani, M. "Conjunctive use of surface water and groundwater: Application of support vector machines (SVMs) and genetic algorithms", *Water Resources Management*, **27**(7), pp. 2623-2644 (2013).
3. Chen, Z.H., Grasby, S.E. and Osadetz, K.G. "Predicting average annual groundwater level from climatic varaibles: an empirical model", *Journal of Hydrology*, **260**(1-4), pp. 102-117 (2002).
4. Fergosen, G. and Scott, G. "Historical and estimated groundwater level near winnipeg, Canada and their sensitivity climatic variability", *Journal of American Water Resources Association*, **39**(5), pp. 1249-1259 (2003).
5. Jan, C.H., Chen, T.H. and Lo, W. "Effect of rainfall intensity and distribution on groundwater level fluctuations", *Journal of Hydrology*, **332**(3-4), pp. 348-360 (2007).
6. Park, E. and Parker, J.C. "A Simple model for water table fluctuations in response to precipitation", *Journal of Hydrology*, **356**(3-4), pp. 344-349 (2008).
7. Aziz, A.B.D. and Wong, K.-F.V. "A Neural-Network Approach to the determination of aquifer parameters", *Groundwater*, **30**(2), pp. 164-166 (1992).
8. Karamouz, M., Tabari, M.R. and Kerachian, R. "Application of genetic algorithms and artificial neural networks in conjunctive use of surface and groundwater resources", *J. Water Int.*, **32**(1), pp. 163-176 (2007).
9. Safavi, H.R. and Enteshari, S. "Conjunctive use of surface and groundwater resources using yhe ant system optimization", *Agricultural Water Management*, **173**(2016), pp. 23-34 (2010).
10. Ebrahimi, M.S. "Modeling temporal-spatial changes in groundwater level in interaction with surface water using techniques of artificial neural network and geostatics, case study: Najaf-abad aquifer", Thesis For the Degree of Master of Science In Water Engineering, Isfahan University of Technology (In Persian) (2004).
11. Moradi Frah Abadi, M., Hbib Nejad Roshan, M. and Vahhab Zadeh, GH. "Investigation and simulation of fluctuations in groundwater level using artificial neural networks, case study: Sari's coastal aquifer, neka", *5th Water Management Conference*, Iran (In Persian) (2014).
12. Ahmadi, Z. "Assessment of conjunctive use of surface water and groundwater under climate xhanges conditions", Thesis For the Degree of Master of Science In Water Engineering, Isfahan University of Technology (In Persian) (2014).
13. Rezapour Tabari, M.M. and Soltani, J. "Multi-objective optimal model for conjunctive use management using SGAs and NSGA-II models", *Water Resources Management*, **27**(1), pp. 37-53 (2013).
14. Singh, A. "Simulation-Optimization modeling for conjunctive water use management", *Agricultural Water Management*, **141**, pp. 23-29 (2014).
15. Peralta, R.C., Forghani, A. and Fayad, H. "Multiobjective genetic algorithm conjunctive use optimization for production, cost and energy with dynamic return flow", *J. of Hydrol.*, **511**, pp. 776-785 (2014).
16. Heydari, F., Saghafian, B. and Delavar, M. "Coupled quantity-quality simulation-optimization model for conjunctive surface-groundwater use", *Water Resources Manag.*, **30**(12), pp. 4381-4397 (2016).
17. Rezaei, F., Safavi, H.R. and Zakeri, M. "A hybrid fuzzy-based multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use and optimal multi-crop pattern planning", *Water Resources Management*, **31**(4), pp. 1139-1155 (2016).
18. Ghanbarian, F., Esmaeilian, GH. and Hamedi, M. "Study the position of metahuristic algorithms In the field of optimization in industrial engineering", *National Conference on Industrial Engineering Projects*, Iran (In Persian) (2014).
19. Bozorg Haddad, O., Afshar, A. and Marino, M.A. "Honey-bees mating optimization (HBMO) algorithm: A new heuristic approach for water resources optimization", *Water Resources Management*, **20**(5), pp. 661-680 (2006).
20. Bozorg Haddad, O., Afshar, A. and Marino, M.A. "Optimization of non-convex water resource problems by honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm", *Engineering Computations*, **26**(3), pp. 267-280 (2009).
21. Bozorg Haddad, O., Afshar, A. and Marino, M.A. "Honey-Bees mating optimization (HBMO) algorithm in deriving optimal operation rules for reservoirs", *Journal of Hydroinformatics*, **10**(3), pp. 257-264 (2008).
22. Bozorg Haddad, O., Mirmomeni, M., Zarezadeh Mehrizi, M. and et al. "Finding the shortest path with honey-bee mating optimization algorithm in project management problems with constrained/unconstrained resources", *Computational Optimization and Applications*, **47**(1), pp. 97-128 (2010).
23. Bozorg Haddad, O., Ghajarnia, N., Solgi, M. and et al. "A DSS-based honey bee mating optimization (HBMO) algorithm for single and multi-objective design of water distribution networks", *Metaheuristics and Optimization in Civil Engineering*, **7**, pp. 199-233 (2015).
24. Bozorg Haddad, O. and Marino, M.A. "Dynamic penalty function as a strategy in solving water resources combinatorial optimization problems with honey-bee optimization (HBMO) algorithm", *Journal of Hydroinformatics*, **9**(3), pp. 233-250 (2007).
25. Afshar, A., Bozorg Haddad, O., Marino, M.A. and et al. "Honey-bees mating optimization (HBMO) algorithm for optimal reservor operation", *Journal of the Franklin Institute*, **344**(5), pp. 452-462 (2007).
26. Afshar, A., Shafii. M. and Bozorg Haddad, O. "Optimizing multi-reservoir operation rules: an improved HBMO", *Journal of Hydro Informatics*, **13**(1), pp. 121-139 (2008).
27. Soltanjalili M, Bozorg-Haddad O, Marino, MA. "Effect of breakage level one in design of water distribution networks", *Water Resour. Manag.*, **25**(1), pp. 311-337 (2010).
28. Sabbaghpour, S., Naghashzadehgan, M., Javaherdeh, K. and et al. "HBMO algorithm for calibrating water distribution network of Langarud city", *Water Science and Technology*, **65**(9), pp. 1564-1569 (2012).

29. Mohan, S. and Jinesh Babu, K.S. "Optimal water distribution network design with honey-bee mating optimization", *J. Comput. Civ. Eng.*, **24**(1), pp. 117-126 (2010).

30. Georgescu, S. and Popa, R. "Application of honey-bees mating optimization algorithm to pumping station scheduling for water supply", *UPB Scientific Bulletin, Series D*, **72**(1), pp. 78-84 (2010).

31. Solgi, M., Bozorg Haddad, O., Seifollahi-Aghmiuni, S. and et al. "Intermittent operation of water distribution networks considering equanimity and justice principles", *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.*, **6**(4), pp. (2015).

32. Consultant Water Research Institude, "Studies of water comprehensive plan, case study: Gavkhooni basin", 6th Research (In Persian) (2013).

33. Aalam Tabriz, A. "Metahuristic algorithm i combinatorial optimization", Tehran, Eshraghi (In Persian) (2013).

34. Moslemi, K.H., Karami, G.H. and Emam Gholi Zadeh, S. "Forcasting groundwater level using artificial neural network, case study: Bastam", *5th Water Management Conference*, Iran (In Persian) (2005).