

پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل شبکه‌های بیزین پویا مبتنی بر تحلیل حساسیت (مطالعه موردی: دشت بیرجند)

ابراهیم ابراهیمی^۱، عباس روزبهانی^{۲*} و محمد ابراهیم بنی‌حبیب^۳

چکیده

پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی، نقش مهمی در مدیریت منابع آب زیرزمینی دارد. در این پژوهش، با استفاده از شبکه‌های بیزین پویای احتمالاتی و در نظر گرفتن ۱۰ رویکرد پیش‌بینی ماهانه، با استفاده از داده‌های واسنجی ۱۲ سال آبی، سطح ایستابی آبخوان بیرجند، در یک دوره آبی ۵ ساله و در دو رویکرد صریح (پیوسته) و خوشه‌بندی (دسته‌بندی) صحت‌سنجی و پیش‌بینی شد. در رویکرد پیش‌بینی صریح، از داده‌های صریح ماهانه استفاده و در رویکرد خوشه‌بندی با استفاده از شاخص عرض سیلهوت تعداد خوشه‌های بهینه تعیین و با خوشه‌بندی داده‌ها، از داده‌های خوشه‌بندی شده برای آموزش مدل بیزین استفاده و پیش‌بینی مدل با استفاده از داده‌های خوشه‌بندی انجام شد. با اعمال واسنجی در مدل بیزین و بررسی نتایج سناریوهای تحلیل حساسیت مختلف، کارایی بالای شبکه‌های بیزین پویا به‌ویژه در رویکرد صریح، مشاهده شد. با بررسی ۱۰ رویکرد تحلیل حساسیت اعمال شده برای پیش‌بینی سطح ایستابی آبخوان، مشاهده شد که از بین عوامل پیش‌بینی‌کننده، پارامتر سطح آب زیرزمینی در ماه فعلی اثرگذاری بالایی را در افزایش دقت مدل برای پیش‌بینی سطح ایستابی آبخوان ماه بعدی دارد؛ به گونه‌ای که با حذف این پارامتر در مدل بیزین، ضریب تبیین از ۰/۹۹۲۵ به ۰/۰۰۰۴ کاهش یافت و میانگین مجذور مربعات خطا نیز از ۰/۲۶۵۴ به ۰/۹۷۰۹ متر افزایش یافت. همچنین بالاترین ضریب تبیین در بین سناریوهای پیش‌بینی ۰/۹۹۵ است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، تئوری بیز، خوشه‌بندی، مدیریت آب زیرزمینی.

ارجاع: ابراهیمی ا. روزبهانی ع. و بنی‌حبیب م. ا. ۱۳۹۷. پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل شبکه‌های بیزین پویا مبتنی بر تحلیل حساسیت (مطالعه موردی: دشت بیرجند). مجله پژوهش آب ایران. ۲۹: ۹۱-۱۰۰.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مهندسی منابع آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

۲- استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

۳- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: roozbahany@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۷

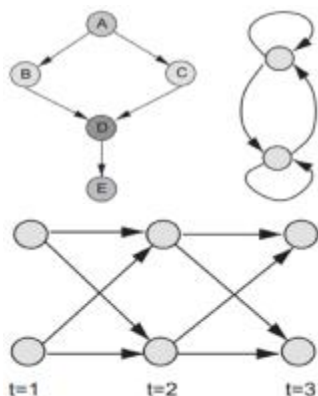
مقدمه

همچنین می‌توانند بر اساس داده‌های جدید به آسانی به‌روز و استفاده شوند (کستلتی و سونکینی سسا، ۲۰۰۷). این شبکه‌ها اصولاً مناسب وضعیتی هستند که احتمال وقوع یک رخداد، همبستگی خوبی با وضعیت رویدادهای قبلی آن دارد. روش بیزین که بر پایه استنتاج آماری است، کارایی بیشتری برای پیش‌آب زیرزمینی دارد؛ چون با این روش می‌توان تغییرات حاصل از خطاهای تحلیلی، اسمی، نمونه‌برداری و زمانی را بررسی کرد و عدم قطعیت حاکم بر مدل را کاهش داد. علاوه بر این، به‌کارگیری این روش آسان است و انعطاف‌پذیری مناسبی برای مقابله با پیچیدگی‌های علمی و محدودیت‌های فنی دارد (استاو و همکاران، ۲۰۰۳). با این اوصاف، محدودیت شبکه بیزین، این است که در روابط علت و معلولی نباید حلقه‌ای تشکیل شود و این موضوع بازخورد گرفتن از شبکه را با مشکل مواجه می‌کند. زمانی که از داده‌های با سری زمانی استفاده می‌شود، شبکه‌های بیزین پویا (DBNs^۱) جایگزین مناسبی است؛ چون DBNs می‌تواند تأخیر زمانی داده‌ها را مدل کند و شبکه‌های حلقه‌دار را بسازد. برخلاف BNs که بر پایه داده‌های ایستا است، DBNs از داده‌های سری زمانی برای ایجاد روابط علت و معلولی بین متغیرهای تصادفی استفاده می‌کند (کیم و همکاران، ۲۰۰۳). در ادامه به برخی از کاربردهای این مدل در پژوهش‌های اخیر پرداخته می‌شود.

نیکو و کراچیان (۱۳۸۸)، از سیستم نسبت-تجارت و شبکه‌های بیزین برای تهیه یک مدل مدیریت کیفی رودخانه در زمان واقعی استفاده کردند. در پژوهش ایشان، با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در سیستم رودخانه‌ای، از تلفیق تحلیل عدم قطعیت مونت کارلو، روش سیستم نسبت-تجارت و شبکه‌های بیزی، یک مدل جدید برای تجارت مجوز تخلیه آلاینده‌ها پیشنهاد شد. بیوندی و همکاران (۲۰۱۲)، با استفاده از شبکه‌های بیزین اقدام به ارزیابی عدم قطعیت موجود در پیش‌بینی زمان واقعی رخداد سیلاب در جنوب ایتالیا کردند. نتایج آنها نشان‌دهنده ترکیب عدم قطعیت در پارامترهای توزیع بارندگی و سیلاب مشاهده شده است. همچنین نتایج آنها نشان داد که مدل‌های بیزین توانایی بالایی در پیش‌بینی رخداد سیلاب و زمان آن دارد. مولینا و همکاران (۲۰۱۳)، با استفاده از پارامترهای بارش، تغذیه آبخوان، تغییرات

آبخوان‌ها، یکی از بهترین و قابل دسترس‌ترین منابع حاوی آب شیرین هستند که در سال‌های اخیر برداشت‌های زیادی از آنها شده است. این موضوع می‌تواند موجب افت سطح ایستابی آبخوان‌ها، کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی، نشست زمین و بروز مشکلات فراوانی در بحث تأمین آب شود. دشت بیرجند، به‌عنوان یکی از دشت‌های ممنوعه کشور، در سال‌های اخیر با افت شدید سطح ایستابی آبخوان مواجه بوده است که نیاز به اقدامات مدیریتی همچون کاهش برداشت آب از آبخوان، جلوگیری از حفر چاه‌های غیرمجاز و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، با اعمال پیش‌سطح ایستابی آبخوان دارد؛ بنابراین ضرورت دارد با پیش‌سطح ایستابی آبخوان، بسیاری از متغیرهای مؤثر بر آن را ارزیابی و مدیریت کرد. پیش‌بینی سطح ایستابی آبخوان در دوره‌های زمانی آتی، ابزار ضروری برای اعمال اقدامات مدیریتی قبل از وقوع وضعیت بحرانی آبخوان است. امروزه از ابزارهای مختلفی برای پیش‌بینی سطح ایستابی آبخوان استفاده می‌شود که از جمله می‌توان به مدل‌های ریاضی، شبکه‌های عصبی مصنوعی، نروفازی و سری زمانی اشاره کرد (میرزاوند و قاضوی، ۲۰۱۴)؛ اما قابلیت مدل احتمالاتی شبکه‌های بیزین تاکنون بررسی نشده است. شبکه بیزین، یکی از نوین‌ترین روش‌های احتمالاتی پیش‌بینی است که با استفاده از مدل گرافیکی، روابط احتمالاتی بین مجموعه‌ای از متغیرها را نمایش می‌دهد. این خصوصیت شبکه‌های بیزین، موجب به‌کارگیری این مدل در زمینه‌های مختلفی شده است. مدل‌های گرافیکی موجود در این شبکه‌ها، نشان‌دهنده ساختار وابستگی بین چندین متغیر اثرگذار برهم و اساس آن بر تئوری بیز است. شبکه‌های بیزین، گرافی متشکل از مجموعه گره‌ها و مسیرهای ارتباطی هستند که گره‌ها نشان‌دهنده مقداری متغیرهای تصادفی گسسته یا پیوسته و مسیرهای ارتباطی نیز نشان‌دهنده ارتباطات شرطی بین این گره‌ها هستند (نیک‌سخن، ۱۳۸۷). شبکه‌های بیزین، به‌عنوان یک چارچوب یکپارچه، مزایای فراوانی دارند، از جمله می‌توان به توانایی آنها در ترکیب داده‌های کمی و کیفی، صراحت آنها در بررسی عدم قطعیت‌ها، استفاده از داده‌های اندک یا ناقص، امکان آموزش ساختاری، امکان ترکیب منابع اطلاعاتی مختلف، امکان بررسی تصمیم‌گیری و قابلیت محاسباتی سریع اشاره کرد (بوسیتالو، ۲۰۰۷).

تنها می‌توانند به اجزا گام زمانی پیشین وابسته باشند (موتزک و مولر، ۲۰۱۵). در شکل ۱ نمایی از مفهوم شبکه‌های بیزین پویا ارائه شده است. یک مدل DBN یک فرآیند مارکوف ایستا، تحت تأثیر اجزا و تغییرات است که در طول زمان تکرار می‌شود. ویژگی دیگر شبکه‌های بیزین پویا، تمایل به تغییر ساختار جزئی است. با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های حاکم بر مدل، شبکه‌های بیزین پویا تحلیل بهتری را از مدل ارائه می‌دهند. یک شبکه بیزین پویا، راهی برای گسترش شبکه بیزین برای مدل کردن توزیع‌های احتمالاتی متغیرهای تصادفی است.



شکل ۱- سمت چپ بالا: یک شبکه بیزین ساده. سمت راست بالا: شبکه برگشتی دارای دو بازخورد که با یکدیگر در تعامل اند. این شبکه بیزین نیست. پایین: معادل شبکه‌های بیزین پویای به دست آمده از شبکه برگشتی وابسته به زمان

یک DBN در قالب دو متغیره (B_t, B_{t-1}) تعریف می‌شود که در آن B_t یک BN است که احتمال پیشین Z_t را تعریف می‌کند و B_{t-1} نیز شبکه بیزین زمانی دو بخشی (2-TBN) است که $P(Z_t | Z_{t-1})$ را با استفاده از یک گراف نظارت‌شده بدون حلقه (Directed Acyclic Graph) به شکل زیر تعریف می‌کند:

$$P(Z_t | Z_{t-1}) = \prod_{i=1}^N P(Z_t^i | P_a(Z_t^i)) \quad (1)$$

که در آن Z_t^i ، t مین گره در زمان t است و $P_a(Z_t^i)$ والدین Z_t^i در گراف هستند. گره‌ها در بخش اول از یک شبکه بیزین زمانی دو بخشی، هیچ پارامتر مرتبیطی با آنها ندارند؛ اما هر گره در بخش دوم از $TBN2$ یک ارتباط توزیع احتمال شرطی (CPD) دارند که $P(Z_t^i | P_a(Z_t^i))$ را برای همه $t > 1$ تعریف می‌کند (مرفی، ۲۰۰۲).

سطح ایستایی آبخوان و تکامل زمانی ذخیره آبخوان، یک سیستم پشتیبانی در تصمیم‌گیری بر اساس شبکه‌های بیزین پویا ارائه داد. اثر تغییر اقلیم را بر رفتار آبخوان در قالب سناریوهای مختلف مدیریتی ارزیابی کردند. مددگر و مرادخانی (۲۰۱۴) به بررسی تغییرات مکانی خشکسالی در رودخانه گانیس ایالات متحده آمریکا و توسعه یک مدل پیش‌بینی بر اساس خشکسالی‌های گذشته برای پیش‌بینی خشکسالی در آینده با استفاده از شبکه بیزین پرداختند و با استفاده از شاخص رواناب استاندارد شده وضعیت خشکسالی را در طول حوضه بررسی کردند. عنبری و تابش (۱۳۹۵)، با استفاده از شبکه بیزین، مدلی را برای محاسبه احتمال رویداد شکست در بخشی از شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب شهر تهران ارائه دادند. آویلس و همکاران (۲۰۱۶) مدل‌های زنجیره مارکوف و شبکه بیزین را برای پیش‌بینی خشکسالی در حوضه آند در کشور اکوادور با هم مقایسه کردند. نتایج ایشان، نشان‌دهنده دقت بالای مدل مارکوف در خشکسالی‌های شدید بود.

در پژوهش‌های مورد اشاره، از مدل بیزین برای پیش‌بینی سطح آبخوان استفاده نشده و از طرفی تحلیل حساسیت روی پارامترها نیز به‌طور همزمان انجام نشده است؛ بنابراین در پژوهش حاضر علاوه بر استفاده از شبکه‌های پویای بیزین، با تعریف ۱۰ رویکرد مختلف تحلیل حساسیت و با استفاده از رویکرد صریح و خوشه‌بندی، سطح آب زیرزمینی در ماه آتی پیش‌بینی شده و اثر هر یک از پیش‌بینی‌کننده‌ها در هر یک از دو رویکرد مذکور در سطح دشت بیرجند بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

شبکه بیزین پویا

شبکه‌های بیزین پویا، بسطی از شبکه‌های بیزین هستند که به دو دلیل ایجاد شده‌اند: از یک سو به‌عنوان آشکارساز وابستگی چرخه‌ای در طول زمان، کاملاً شبیه به مدل مارکوف، از سوی دیگر به‌عنوان فرایند ثابتی که در بازه زمانی ثابت تکرار می‌شود. در شکل نهایی یک DBN، متغیرها به یکدیگر وابسته‌اند. در این صورت، هیچ علتی برای کنار گذاشتن یک چنین وابستگی‌های علت و معلولی با گام‌های زمانی برابر وجود ندارد؛ به‌گونه‌ای که هر وابستگی می‌تواند موجب ایجاد چرخه شود. بنابراین اجزا

ساختار شبکه بیزین پویا

گام اول در مدل‌سازی شبکه بیزین پویا، تعیین داده‌های وابسته و مستقل برای واسنجی و صحت‌سنجی است. در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار Hugin 8.1، برای آموزش داده‌ها در هر دو رویکرد صریح و خوشه‌بندی، از ساختار آموزشی NPC برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی استفاده شد. با توجه به نوع داده‌های ورودی به مدل، دو رویکرد صریح و خوشه‌بندی به کار برده شد. در رویکرد آموزش صریح مدل، از توابع احتمالاتی استفاده می‌شود و با استفاده از داده‌های آموزشی، داده‌های پیش‌بینی شده ارائه می‌گردد. در روش خوشه‌بندی با اختصاص هر یک از اعداد به خوشه مناسب، مدل‌سازی انجام می‌شود.

خوشه، مجموعه‌اشیایی است که فاصله آنها نسبت به یکدیگر کم و نسبت به اعضای دیگر زیاد است. خوشه‌بندی یک روش یادگیری غیرنظارتی برای دسته‌بندی داده‌ها بر اساس مشابهت‌های آنها است. این تکنیک ابزاری توانمند برای استخراج ساختار اصلی نهفته در مجموعه داده‌ها، معرفی شده است و با دسته‌بندی داده‌ها در خوشه‌های مختلف، تصمیم‌گیری در مورد داده‌ها را تسهیل و بررسی میزان تعلق آنها را به خوشه‌های مختلف ممکن می‌کند (والنته و پدریکز، ۲۰۰۷). به دلیل اینکه خوشه‌بندی فرایند غیرنظارتی و بسیاری از روش‌های آن به شدت تحت تأثیر مفروضات اولیه‌شان است، باید ارزیابی‌ای در مورد نتایج خوشه‌بندی در تحقیقات کاربردی انجام تا اعتبار آن تأیید شود. شاخص‌های اعتبار، معیارهایی هستند که نتایج خوشه‌بندی را مورد سنجش و ارزیابی قرار می‌دهند. شاخص عرض سیلپوت (silhouette) برای هر داده معیاری مقایسه‌ای است و نشان می‌دهد که آیا بهتر است این داده در خوشه‌ای که در آن قرار دارد بماند یا این که به خوشه دیگری منتقل شود. عرض سیلپوت برای داده نام در خوشه k برابر است با (روسو، ۱۹۸۷):

$$SW_i = \frac{O_i - I_i}{\max[I_i, O_i]} \quad (2)$$

که در آن I_i متوسط فاصله‌ی داده نام تا تمامی داده‌های خوشه k ام و O_i حداقل فاصله بین داده نام تا سایر خوشه‌ها است. از این‌رو مقدار SW_i بین $+1$ تا -1 خواهد بود. هرچه مقدار SW_i به $+1$ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تعلق درست داده نام به خوشه‌ای است که در آن تعلق دارد. بر این اساس، متوسط عرض سیلپوت میانگین تمامی

عرض‌های سیلپوت خواهد بود؛ بنابراین خوشه‌ای بهینه است که از بیشینه متوسط عرض سیلپوت برخوردار باشد. برای خوشه‌بندی داده‌ها از روش k میانگین که از کاربردی‌ترین روش‌های خوشه‌بندی داده‌هاست، استفاده شد. تعداد خوشه‌ها در این روش ثابت و از پیش تعیین شده است. این روش برای خوشه‌بندی داده‌هایی طراحی شده است که به صورت عددی باشند و خوشه دارای مرکزی به نام میانگین باشد. در این روش، ابتدا اشیاء به صورت تصادفی به k خوشه تقسیم می‌شوند. در گام بعد، مرکز هر یک از اشیاء از مرکز خوشه خود محاسبه می‌شود. در صورتی که فاصله شیء مورد نظر از میانگین خوشه خود زیاد و به خوشه دیگری نزدیک‌تر باشد، این شیء به خوشه‌ای که نزدیک‌تر است، اختصاص می‌یابد. این کار آن قدر تکرار می‌شود تا تابع خطا حداقل شود یا تغییر نیابد. اگر D مجموعه داده‌ها با n شیء باشد و C_1, C_2, \dots, C_k بیانگر k خوشه مجزای D باشند، در این صورت تابع خطا (EF) مجموع فواصل هر شیء از مرکز خوشه خودش تعریف می‌شود:

$$EF = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} d(X, m(C_i)) \quad (3)$$

که در آن μ نشان‌دهنده مرکز (میانگین) خوشه و $d(X, \mu(C_i))$ فاصله هر شیء از خوشه خود است که می‌تواند بر پایه اقلیدسی یا روش‌های دیگر محاسبه شود. در این پژوهش، برای آموزش پارامترها از الگوریتم EM^1 استفاده شد. این الگوریتم برای داده‌های ناقص هم مناسب است. برای آموزش ساختار مدل‌سازی در دو رویکرد صریح و خوشه‌بندی، از الگوریتم NPC استفاده شد. این الگوریتم بر مبنای ایجاد ساختاری که از آزمون‌های آماری برای استقلال‌های شرطی ناشی شده است. الگوریتم NPC می‌تواند برای ابهامات ساختاری، راه‌حل گرافیکی ارائه کند.

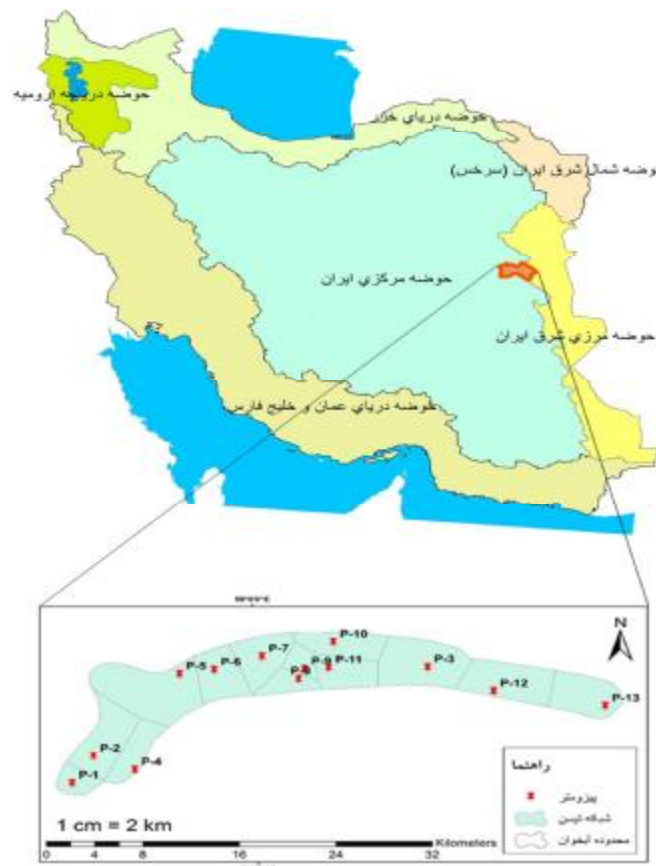
مطالعه موردی

حوضه آبریز بیرجند، در حوضه آبریز کویر لوت، در ۴۸۵ کیلومتری جنوب مشهد و در شرق ایران واقع شده است. اقلیم منطقه خشک و در سال‌های اخیر به دلیل برداشت بی‌رویه آب از سفره‌های آب زیرزمینی، این منطقه با کاهش شدید سطح آب مواجه شده است و در صورت عدم

درجه سلسیوس، میانگین بارندگی در این محدوده ۱۷۰ میلی‌متر در سال و میانگین تبخیر پتانسیل در این دشت سه هزار و ۱۵۲ میلی‌متر است. میزان کل تغذیه آبخوان بیرجند برابر ۹۰/۳۰ میلیون مترمکعب در سال و میزان برداشت آب از این آبخوان ۱۰۱/۰۵ میلیون مترمکعب در سال است. بالاترین رقوم سطح ایستابی در آبخوان، حدود هزار و ۳۵۰ متر در شمال و پایین‌ترین رقوم حدود هزار و ۱۵۰ متر در جنوب و جهت کلی جریان آب زیرزمینی، از شمال به طرف جنوب است.

در شکل ۲ محدوده مورد مطالعه به همراه شبکه پیزومتری آن نشان داده شده است.

اتخاذ راه حل درست، خسارات جبران‌ناپذیری را در پی خواهد داشت. با توجه به آمار سطح ایستابی، میزان افت سطح ایستابی آبخوان بیرجند در ۵۰ سال اخیر به‌طور میانگین سالانه ۰/۴ متر بوده و میزان کسری مخزن به ۱۰/۷۵ میلیون مترمکعب رسیده است (تارنمای شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۴). منطقه یاد شده از شرق به ارتفاعات مؤمن آباد، از شمال به رشته‌کوه‌های شاه‌ناصر و از جنوب به رشته‌کوه‌های باقران و از غرب به کوه‌های گرونک محدود می‌شود. به‌طور کلی جریان آب زیرزمینی، از شرق به طرف غرب و از شمال و جنوب آبخوان به سمت مرکز در جریان است. میانگین دما در دشت بیرجند ۱۶/۵



شکل ۲- محدوده شبکه تیسن آبخوان بیرجند

(WT) و پارامتر پیش‌بینی شونده سطح آب زیرزمینی در ماه آتی (WTT) است. داده‌های استفاده شده در آموزش ساختار مدل، شامل داده‌های هواشناسی و آبخوان با گام زمانی ماهانه است. از آمار ایستگاه سینوپتیک بیرجند در نزدیکی محدوده طرح برای پارامترهای دما، بارش و تبخیر استفاده شد. در رویکرد اول با استفاده از داده‌های صریح و

ساختار و پارامترهای مدل

در این پژوهش، داده‌های ورودی به مدل برای پیش‌بینی، پارامترهای پیش‌بینی کننده دما (T)، بارش (RAIN)، تبخیر (ET)، تغذیه ماهانه در هر تیسن آبخوان (Recharge)، برداشت ماهانه از آب زیرزمینی در هر تیسن آبخوان (Discharge)، سطح آب زیرزمینی در ماه فعلی

همان‌گونه که مشخص است، در برخی ماه‌ها مقادیر پیش‌بینی بیش از مقدار واقعی تخمین زده شده است. در شبیه‌سازی به روش خوشه‌بندی هم برای داده‌های مورد استفاده، در محیط نرم‌افزار MATLAB شاخص عرض سیلهوت محاسبه و مقدار بهینه تعداد خوشه برای هر یک از داده‌های مذکور تعیین شد که در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

با توجه به شاخص تعداد بهینه خوشه‌ها، خوشه‌بندی داده‌ها از روش k میانگین انجام و در رویکرد خوشه‌بندی و ساختار آموزشی NPC، نرم‌افزار HUGIN 8.1، مدل آموزش داده شد و سطح آب زیرزمینی برای ماه آتی (WTT)، با توجه به تحلیل حساسیت پارامترهای پیش‌بینی کننده نامبرده طبق ۱۰ رویکرد متفاوت پیش‌بینی شد (جدول ۲). در شکل ۴ نمایی از یکی از رویکردها که همه پیش‌بینی کننده‌ها دخالت داده شده‌اند، ارائه شده است.

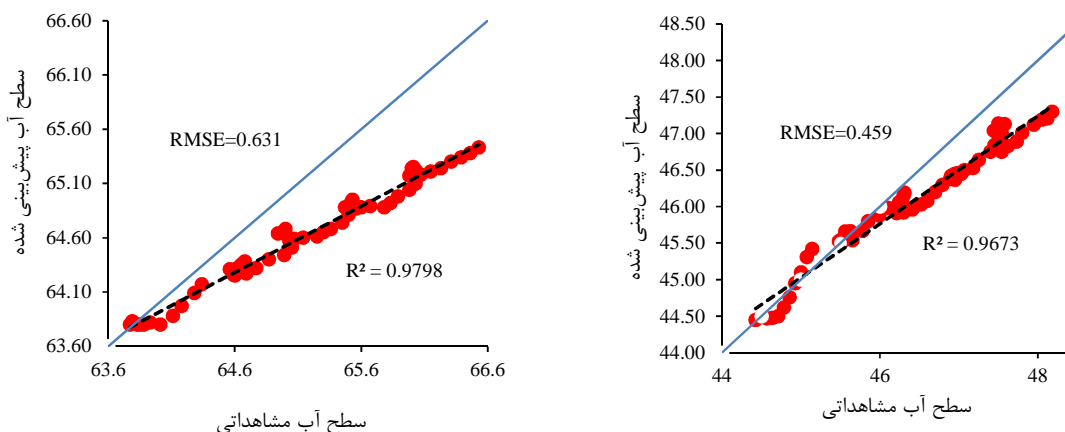
با توجه به اینکه بررسی هیدروگراف آبخوان، اطلاعات جامعی را از وضعیت آبخوان ارائه می‌دهد، با بررسی دقت پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی طبق دو رویکرد صریح و خوشه‌بندی، به شیوه مطلوب‌تری می‌توان رویکرد برتر را پیشنهاد داد. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، رویکرد صریح شبکه‌های بیزین پویا با دقت بیشتری نسبت به رویکرد خوشه‌بندی، هیدروگراف آبخوان را پیش‌بینی می‌کند؛ بنابراین بهتر است برای پیش‌بینی هیدروگراف آبخوان از رویکرد صریح استفاده شود.

ساختار آموزشی NPC در سطح اطمینان ۵ درصد، آموزش مدل انجام و در رویکرد دوم با استفاده از شاخص اعتبارسنجی عرض سیلهوت، تعداد خوشه مناسب تعیین شد و با استفاده از روش k میانگین، خوشه‌بندی داده‌ها صورت گرفت.

با استفاده از داده‌های خوشه‌بندی شده و ساختار آموزشی NPC، آموزش مدل در رویکرد دوم انجام شد. داده‌های واسنجی مدل در هر دو رویکرد صریح و خوشه‌بندی شامل دوره آماری ۱۲ ساله (سال‌های ۷۶-۷۷ تا ۸۷-۸۸) با گام زمانی ماهانه و داده‌های صحت‌سنجی شامل دوره آماری ۵ ساله (سال‌های آبی ۸۸-۸۹ تا ۹۳-۹۲) با گام زمانی ماهانه است. با تعریف ۱۰ رویکرد مختلف تحلیل حساسیت برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی ماه آتی، عدم قطعیت مربوط به تأثیر پارامترهای پیش‌بینی در هر دو رویکرد صریح و خوشه‌بندی بررسی شد. رویکرد این سناریوها در واقع تحلیل حساسیت دقت مدل بیزین نسبت به بودن یا نبودن پارامترهای مختلف پیش‌بینی کننده است و در کنار تحلیل احتمالاتی شبکه بیزین پویا به بررسی عدم قطعیت موجود در خروجی مدل می‌پردازد.

نتایج و بحث

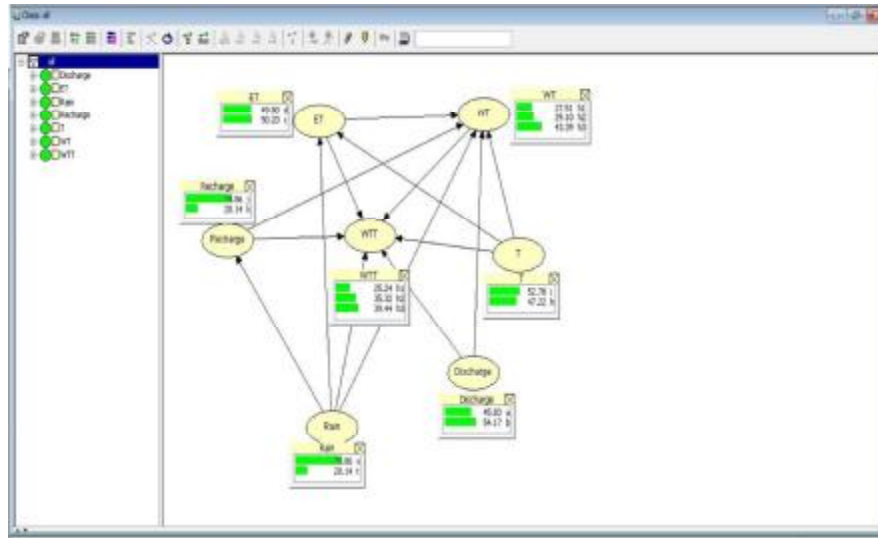
نتایج حاصل از رویکرد منتخب در روش صریح، دقت پیش‌بینی بالای شبکه بیزین را نشان داد؛ برای نمونه از بین همه پیژومترها بر اساس شکل ۳ در پیژومترهای شماره ۶ و ۹ ضریب تبیین حدود ۰/۹۷ به دست آمده و



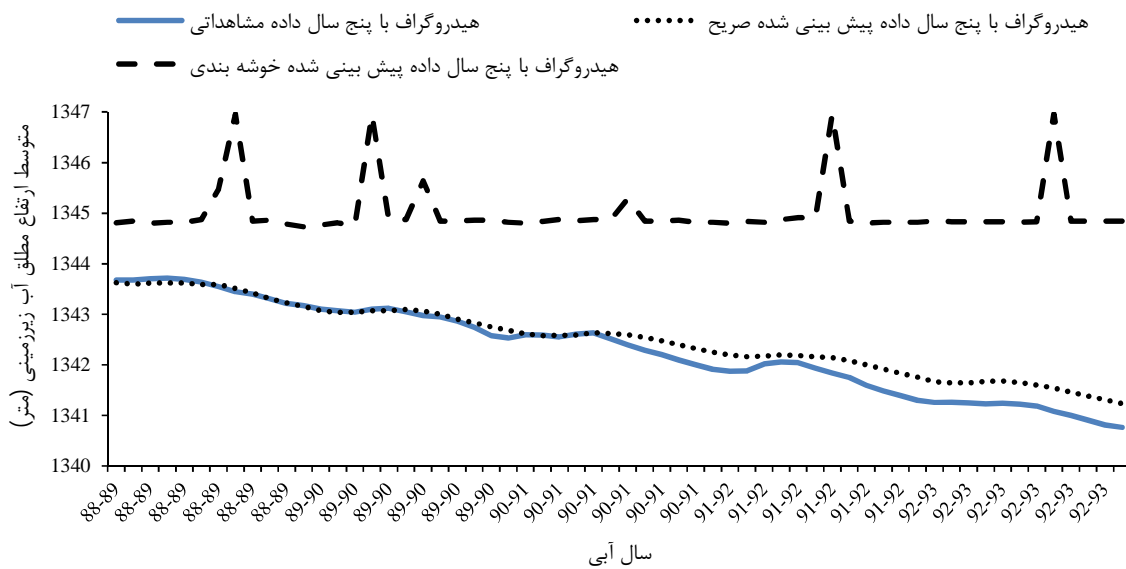
شکل ۳- سطح آب مشاهده شده و شبیه‌سازی در پیژومترهای ۶ و ۹

جدول ۱- مقادیر بهینه تعداد خوشه پارامترهای مورد استفاده در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی

تعداد خوشه بهینه	پارامتر
۲	دما
۲	بارش
۲	تبخیر
۲	تغذیه آبخوان
۲	برداشت از آبخوان
۳	سطح آب در ماه فعلی
۳	سطح آب در ماه آتی



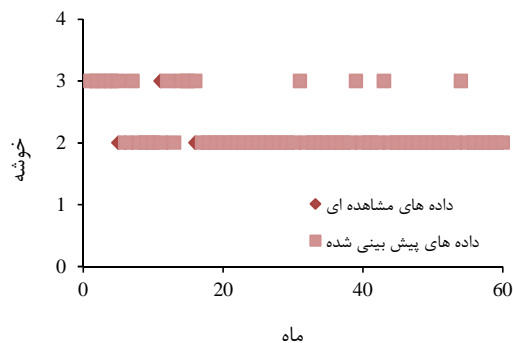
شکل ۴- نمایی از ساختار پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در ماه آتی با رویکرد خوشه‌بندی



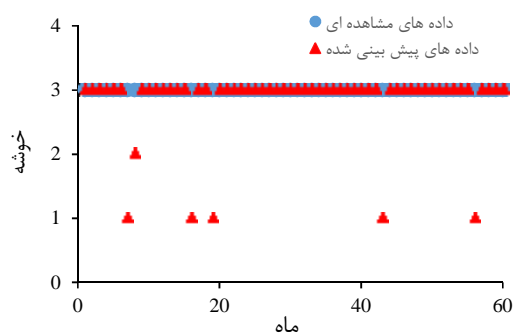
شکل ۵- هیدروگراف آبخوان داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده

مقایسه رویکردهای ۳ و ۴ مشهود است. اما از مقایسه رویکردهای ۳ و ۵ مشخص است که تأثیر دما کمتر بوده است. به هر صورت با توجه به اختلاف کم دقت بین سناریوها و با بررسی تأثیر دیگر پارامترهای پیش‌بینی کننده، مشاهده می‌شود که اثرگذاری مشابهی بر نتایج حاصل از مدل بیزین دارند.

نتایج مربوط به دقت پیش‌بینی دست خوشه‌ها در سطح سناریوهای ارائه شده با رویکرد خوشه‌بندی نیز در جدول ۲ ارائه شده است. در رویکرد خوشه‌بندی، با بررسی دقت سناریوهای پیش‌بینی کننده در پیش‌بینی درست خوشه‌ها، اکثر سناریوها دارای دقت پیش‌بینی مناسبی هستند، جز رویکرد ۹ که در آن سطح آب زیرزمینی در ماه فعلی نقشی در پیش‌بینی سطح ایستابی آبخوان ندارد.



شکل ۶- مقایسه خوشه‌بندی سطح آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در پیژومتر شماره ۶



شکل ۷- مقایسه خوشه‌بندی سطح آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در پیژومتر شماره ۱۰

به دلیل پایین بودن کارایی رویکرد خوشه‌بندی در پیش‌بینی هیدروگراف آبخوان، در این رویکرد برای به‌دست آوردن دقت پیش‌بینی ۱۰ رویکرد پیش‌بینی، به جای شاخص ضریب تبیین همبستگی (R^2) و میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE)، درصد خوشه‌های درست پیش‌بینی شده به دست آمد. همان‌گونه که در اشکال ۶ و ۷ نشان داده شده است، رویکرد خوشه‌بندی در پیژومترهای مختلف، با دقت مناسبی خوشه‌ها را پیش‌بینی می‌کند. در واقع بررسی شده است که آیا شبکه بیزین زمانی توانسته است دسته یا همان حدود مربوط به سطح آب زیرزمینی در ماه‌های متوالی را درست حدس بزند یا خیر؟

برای بررسی دقت مدل پیش‌بینی بیزین در حالت خوشه‌بندی از تقسیم تعداد ماه‌هایی که دسته یا خوشه آنها درست پیش‌بینی شده، بر تعداد کل ماه‌ها استفاده شده است؛ به‌گونه‌ای که اگر به‌عنوان مثال از ۶۰ ماه، قرائگیری ۵۴ ماه مورد نظر در دسته مربوطه به درستی پیش‌بینی شود، درصد خوشه‌های درست پیش‌بینی شده برابر ۰/۹ یا ۹۰ درصد خواهد بود.

از آنجا که رویکرد صریح، پیش‌بینی قابل قبولی از سطح ایستابی آبخوان را دارد، دقت پیش‌بینی ۱۰ رویکرد پیش‌بینی، با توجه به شاخص‌های مقایسه‌ای ضریب تبیین (R^2) و میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) به دست آمد تا رویکرد برتر به دست آید که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. با بررسی نتایج رویکرد صریح مشاهده می‌شود بهترین رویکرد پیش‌بینی کننده، رویکرد شماره ۶ است که همه پارامترهای پیش‌بینی کننده جز تأخیر عمل پیش‌بینی را انجام می‌دهد.

در این رویکرد، شاخص ضریب تبیین (R^2) برابر ۰/۹۹۴۶ و میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) برابر ۰/۱۲۷۵ متر به دست آمد که نشان‌دهنده بهترین دقت پیش‌بینی است. رویکردهای دیگر هم دقت پیش‌بینی بسیار نزدیکی به رویکرد ۶ دارند، جز رویکرد ۹ که در آن سطح آب زیرزمینی به‌عنوان پارامترهای پیش‌بینی عمل نمی‌کند و همین عامل باعث کاهش دقت پیش‌بینی در این رویکرد است؛ بنابراین در رویکرد صریح، سطح آب زیرزمینی تأثیر به‌سزایی در افزایش دقت پیش‌بینی مدل دارد. بر اساس این جدول و مقایسه رویکردهای ۲ و ۳ مشخص است که اثر تغذیه قابل توجه است. همچنین تأثیر بارش نیز از

جدول ۲- نتایج رویکردهای تحلیل حساسیت با دو رویکرد صریح و خوشه‌بندی

رویکرد	پارامترهای پیش‌بینی کننده						رویکرد پیش‌بینی
	صریح	خوشه‌بندی	سطح آب زیرزمینی در ماه فعلی	برداشت از آب زیرزمینی	تغذیه آب زیرزمینی	تبخیر	
دقت پیش‌بینی	R ²	RMSE(m)					
۰/۹۳۵۹	۰/۹۹۲۴	۰/۲۸۵۵	۰	۰	۰	۰	۱
۰/۹۵۹۰	۰/۹۹۲۳	۰/۷۰۲۶	۰	۰	۰	۰	۲
۰/۹۵۲۶	۰/۹۹۲۹	۰/۲۵۴۳	۰	۰	۰	۰	۳
۰/۹۳۳۳	۰/۹۹۲۳	۰/۲۷۲۳	۰	۰	۰	۰	۴
۰/۹۳۳۳	۰/۹۹۳۱	۰/۲۶۹۶	۰	۰	۰	۰	۵
۰/۹۵۲۶	۰/۹۹۴۶	۰/۱۲۷۵	۰	۰	۰	۰	۶
۰/۹۷۱۸	۰/۹۸۶۷	۰/۱۸۶۳	۰	۰	۰	۰	۷
۰/۹۷۸۲	۰/۹۸۶۵	۰/۳۴۱۹	۰	۰	۰	۰	۸
۰/۳۷۹۵	۰/۱۰۰۴	۰/۹۷۰۹	۰	۰	۰	۰	۹
۰/۹۲۵۶	۰/۹۹۲۵	۰/۲۶۵۴	۰	۰	۰	۰	۱۰

نتیجه‌گیری

عمل خوشه‌بندی روی پارامترها اعمال شد و توسط پارامترهای خوشه‌بندی شده، آموزش مدل صورت گرفت. به دلیل پایین بودن دقت پیش‌بینی دقیق عددی مدل در رویکرد خوشه‌بندی پیش‌بینی هیدروگراف، در این رویکرد از دقت پیش‌بینی درست خوشه‌ها استفاده شد. در این رویکرد نیز در همه سناریوها پیش‌بینی کننده جز رویکرد بدون پارامتر سطح آب زیرزمینی در ماه فعلی، خوشه‌های تعلق یافته به سطح آب زیرزمینی در ماه آتی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کردند. مدل شبکه‌های بیزین پویا در رویکرد خوشه‌بندی، دسته‌ها را به درستی پیش‌بینی می‌کنند؛ ولی در پیش‌بینی هیدروگراف برخلاف روش صریح، نتایج قابل قبولی را ارائه نمی‌دهند. نتایج حاصل شده، نشان‌دهنده قابلیت مدل پیشنهادی در امر مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب زیرزمینی و کاهش خطر افت سطح ایستابی آبخوان با اعمال سناریوهای مدیریتی کوتاه مدت و پیش‌بینی آثار آن در علاج بخشی و دارای قابلیت به‌کارگیری در دیگر دشت‌های مشابه کشور نیز است. برای انجام تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود نتایج این مدل با دیگر مدل‌های موجود از جمله مدل‌های هوشمند و همچنین مدل‌های مفهومی آب زیرزمینی مقایسه شود.

منابع

۱. تارنمای شرکت مدیریت منابع آب ایران.

<http://www.wrm.ir/>. ۱۳۹۴.

به‌کارگیری ابزارهای مدیریتی برای مقابله با بحران‌های آبی و شبیه‌سازی رفتار آبخوان در مقاطع مختلف می‌تواند گامی مؤثر در احیای آبخوان‌های دارای تنش منابع آبی باشد. در این پژوهش، از شبکه‌های بیزین پویا برای بررسی عدم قطعیت پارامترهای پیش‌بینی کننده سطح ایستابی آبخوان بیرجند استفاده شد. در این مدل، داده‌های دما، تغذیه، برداشت از آب زیرزمینی، تبخیر و سطح آب زیرزمینی در ماه فعلی به‌عنوان متغیر ورودی پارامترهای پیش‌بینی کننده و سطح آب زیرزمینی در ماه آتی پارامتر پیش‌بینی شونده استفاده شدند. برای آموزش مدل پارامترهای ۱۲ سال آبی و برای صحت‌سنجی مدل از پارامترهای ۵ سال آبی دشت بیرجند با ساختار آموزشی NPC استفاده شد. ۱۰ رویکرد تحلیل حساسیت سطح آب زیرزمینی با دو رویکرد صریح و خوشه‌بندی بررسی شد. در رویکرد صریح از داده‌های صریح برای مدل‌سازی استفاده و نتایج خروجی با استفاده از شاخص ضریب تبیین (R^2) و میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) ارزیابی شد. در رویکرد صریح، همه سناریوهای پیش‌بینی کننده جز رویکرد بدون پارامتر سطح آب زیرزمینی در ماه فعلی دارای دقت پیش‌بینی قابل قبول بالای ۹۰ درصد بودند. در رویکرد خوشه‌بندی با توجه به معیار عرض سیلهوت، تعداد خوشه مناسب هر یک از پارامترها تعیین و

13. Murphy K. P. 2002. Dynamic Bayesian Networks: Representation, Inference and Learning. PHD. Thesis, University of California, Berkeley, USA. 212 p.
14. Rousseeuw P. J. 1987. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 20: 53-65.
15. Stow C. A. Roessler C. Borsuk M. E. Bowen J. D. and Reckhow K. H. 2003. Comparison of estuarine water quality models for total maximum daily load development in Neuse River Estuary. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 129(4): 307-314.
16. Uusitalo L. 2007. Advantages and challenges of bayesian networks in environmental modelling. *Ecological Modelling*. 203: 312-318.
17. Valente J. O. and Pedrycz W. 2007. *Advances in Fuzzy Clustering and Its Applications*. John Wiley and Son Ltd, England. 434 p.
۲. عنبری م. ج. و تابش م. ۱۳۹۵. محاسبه احتمال رویداد شکست در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از شبکه بیزین. *مجله آب و فاضلاب*. ۲۷(۳): ۴۸-۶۱.
۳. نیک‌سخن م. ج. ۱۳۸۷. تجارت مجوز تخلیه بار آلودگی در رودخانه‌ها با کاربرد مدل‌های رفع اختلاف. پایان‌نامه دکتری مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران. ۲۰۰ ص.
۴. نیکو م. ج. و کراچیان ر. ۱۳۸۸. ارزیابی کارایی شبکه‌های بیزی در مدیریت کیفیت آب رودخانه: کاربرد سیستم نسبت- تجارت. *مجله آب و فاضلاب*. ۲۰(۱): ۲۳-۳۳.
5. Avilés A. Célleri R. Solera A. and Paredes J. 2016. Probabilistic forecasting of drought events using Markov Chain- and Bayesian Network-based models: A case study of an Andean Regulated River basin. *Water*. 8(2): 1-16.
6. Biondi D. and De Luca D. L. 2012. A Bayesian approach for real-time flood forecasting. *Physics and Chemistry of the Earth*. 42-44: 91-97.
7. Castelletti A. and Soncini-Sessa R. 2007. Bayesian networks and participatory modeling in water resource management. *Environmental Modelling and Software*. 22: 1291-1233.
8. Kim S. Y. Imoto S. and Miyano S. 2003. Inferring gene networks from time series microarray data using dynamic Bayesian networks. *Bioinformatics*. 4(3): 228-235.
9. Madadgar S. and Moradkhani H. 2014. Spatio-temporal drought forecasting within Bayesian networks. *Journal of Hydrology*. 512: 134-146.
10. Mirzavand M. and Ghazavi R. 2014. A stochastic modelling technique for groundwater level forecasting in an arid environment using time series methods. *Water Resources Manage*. 29(4): 1315-1328.
11. Molina J. L. Velázquez D. P. Aróstegui J. L. G. and Velázquez M. P. 2013. Dynamic Bayesian Networks as a Decision Support tool for assessing Climate Change impacts on highly stressed groundwater systems. *Journal of Hydrology*. 479: 113-129.
12. Motzek A. and Möller R. 2015. Indirect Causes in Dynamic Bayesian Networks Revisited. *International Joint Conference on Artificial Intelligence*. 703-709.