

توسعه شاخص کیفی برای ارزیابی آب زیرزمینی و پیش‌بینی تغییرات آن با مدل شبکه بیزین (مطالعه موردی: دشت زنجان)

سعید مظفری^۱، محمدابراهیم بنی‌حبیب^{۲*}، سامان جوادی^۳، حمید کاردان مقدم^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

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

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

۴. کارشناس پژوهشی پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۸/۱۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۱۲/۱۹)

چکیده

آب‌های زیرزمینی یکی از منابع مهم تأمین آب به‌خصوص در مناطق خشک و کم‌بارش به شمار می‌رود. از این‌رو، تعیین کیفیت و پیش‌بینی آن امری ضروری است. مطالعه حاضر به ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی و پیش‌بینی آن در آبخوان زنجان می‌پردازد. شاخص GWQI در پژوهش‌های پیشین، وزن‌دهی ساده بر پایه دیدگاه‌های کارشناسی بوده است. از این‌رو، در شاخص جدید (C-GWQI) برای تعیین وزن‌ها، از روش آنتروپی شانون و از تصمیم‌گیری چندمعیاره COPRAS، به منظور توسعه این شاخص استفاده شد. با تعریف دو محدوده کیفی مجاز و مطلوب برای مصارف شرب طبق استاندارد WHO، کیفیت آبخوان در سه محدوده مطلوب، مجاز و غیرمجاز برای طبقه‌بندی آب شرب استفاده شد. نتایج نشان داد در همه دوره‌های زمانی سطح کیفیت آب زیرزمینی در محدوده شهری پایین‌تر از سایر نقاط است. با این حال، در بیشتر چاه‌های بررسی شده، کیفیت آب برای شرب ارزیابی مطلوب شد. شاخص توسعه داده شده با استفاده از مدل شبکه بیزین تحت ۸ راهبرد ساختاری ارزیابی و پیش‌بینی شد و از بین راهبردهای مختلف، با توجه به معیارهای میانگین مطلق خطای نسبی (MARE) و ضریب همبستگی (R) راهبرد برتر انتخاب شد. راهبرد برتر کیفیت آب زیرزمینی در مرحله آموزش و آزمون به ترتیب دارای مقادیر ۱/۹۳۲ و ۰/۹۹۲ درصد از نظر شاخص MARE ارزیابی شد. پارامترهای پیش‌بینی‌کننده راهبرد منتخب شامل آب برگشتی، تخلیه، بارش، دما و کیفیت این ماه توانستند با دقت زیادی کیفیت ماه بعد را پیش‌بینی کنند. نتایج مطالعه حاضر می‌تواند به مدیران برای حفظ و مدیریت بهتر آبخوان کمک کند.

کلیدواژگان: آبخوان زنجان، شبکه بیزین، کیفیت آب زیرزمینی، COPRAS.

مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت جهان و رشد صنایع وابسته به آب، نیاز به نظارت مستمر و پیش‌بینی کیفیت منابع آب شیرین را افزایش داده است. آب‌های زیرزمینی یکی از منابع مهم آب برای تأمین نیاز شرب، کشاورزی و صنعت است. با این‌حال، کیفیت آب‌های زیرزمینی در نتیجه تغییرات فیزیکی، شیمیایی و زیست‌محیطی تغییر می‌کند. استفاده از منابع آب با سطح کیفیت پایین برای شرب، آبیاری و مصارف صنعتی ممکن است به مشکلات جدی برای سلامتی و ضرر اقتصادی منجر شود [۱]. با تعیین کیفیت شیمیایی آب‌های زیرزمینی، می‌توان برآوردی از وضعیت سلامت این منابع به دست آورد و متناسب با آن، نوع کاربری را مشخص کرد [۲]. از این‌رو، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، مستلزم آگاهی داشتن از وضعیت کمی و کیفی آبخوان است. یکی از ابزارهای مهم برای تحلیل وضعیت کیفی منابع آب زیرزمینی، استفاده از شاخص است. هورتون در سال ۱۹۶۷ شاخص کیفیت آب (WQI^۱) را معرفی کرد [۳]. WQI یک عدد بدون بعد است که چندین متغیر کیفیت آب را با نرمال‌سازی مقادیر در یک عدد واحد ترکیب می‌کند [۴]. بسیاری از محققان از مفهوم WQI برای مطالعات کیفیت آب‌های زیرزمینی (GWQI^۲) استفاده کردند [۵-۷]. در مسائل پیچیده مانند تعیین و تفسیر دقیق کیفیت آب که وابسته به بسیاری از پارامترهاست، می‌توان از روش‌های تصمیم‌گیری استفاده کرد. تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM^۳) نوعی تکنیک انتخابی است که برای ارزیابی تصمیم‌های پیچیده استفاده می‌شود [۸ و ۹]. این تکنیک به طور گسترده در ارزیابی تصمیم‌های به‌خصوص در مورد مدیریت حوادث و مدیریت محیط زیست به کار گرفته شده است [۱۰-۱۲]. در سال‌های اخیر، از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی کیفیت آب و تعیین WQI استفاده شده است [۱۳-۱۶]. در پژوهشی کاورماچی و همکاران [۱۷] به ارزیابی توزیع مکانی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۴ DEA و AHP^۵ در منطقه سرفلیکوچیزار^۶ در ترکیه پرداختند. بر اساس این مدل‌ها، دو شاخص جدید A-

GWQI و D-GWQI ارائه شده است. نتایج پژوهش یادشده نشان داد A-GWQI و D-GWQI شاخص‌های مفید و قابل اعتمادی هستند. در مطالعه‌ای دیگر مینه و همکاران [۱۸] به ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی کیفی آب‌های زیرزمینی برای یک دوره ده‌ساله از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ با استفاده از Fuzzy-AHP در استان جیانگ^۷ ویتنام پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد چاه‌های کم‌عمق در مناطق شمال شرقی و جنوب شرقی منطقه بیشتر به دلیل مقادیر زیادی از رسوب در فصل موسمی تحت کیفیت «آب بد» با غلظت آرسنیک زیاد طی سال‌ها طبقه‌بندی شده‌اند. در پژوهش حاضر نیز برای وزن‌دهی از ۴ گروه متخصص استفاده شده است که امر زمان‌بری بوده و قابلیت پیش‌بینی این شاخص بررسی نشده است. روش^۸ COPRAS، نوعی روش ساده و جدید MCDM است که برای حل مشکلات تصمیم‌گیری چندمعیاره با معیارهای متضاد به کار می‌رود. در مطالعه حاضر از روش COPRAS به دلیل زمان محاسباتی کمتر، امکان استفاده بسیار ساده و شفاف، امکان زیاد تفسیر گرافیکی به کار گرفته شد که بهتر از سایر روش‌های MCDM مانند^۹ EVAMIX،^{۱۰} TOPSIS و AHP است [۱۹ و ۲۰].

مدل‌سازی و پیش‌بینی مناسب کیفیت آب زیرزمینی، یکی از ابزارهای مهم برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب است. پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی به دلیل عدم اطمینان مختلف و رابطه غیر خطی و پیچیده بین متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی ورودی با متغیرهای پیش‌بینی شده کار دشواری است [۲۱]. از این‌رو، استفاده از ابزاری مناسب برای پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی ضروری است. نژاد و همکاران [۲۲] در مطالعه‌ای با هدف ارائه شاخصی برای ارزیابی کیفیت فاضلاب تصفیه‌شده با تمرکز بر استفاده مجدد از آب مبتنی بر شبکه بیزین انجام دادند. نتایج نشان داد مدل بیزین پتانسیل بسیار خوبی برای مدل‌سازی شاخص کیفیت پساب دارد. شایان یادآوری است که در مطالعات متعدد از مدل‌های بیزین برای پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی استفاده شده است [۲۳ و ۲۴]. مطالعه حاضر به بررسی مکانی و زمانی کیفیت آب

7. Giang

8. Complex Proportional Assessment

9. EVALuation of MIXed data

10. Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

1. Water Quality Index

2. Ground Water Quality Index

3. Criteria Decision Making Multiple

4. Data Envelopment Analysis

5. Analytical Hierarchy Process

6. Sereflikochisar

یعنی ۲۹ چاه در ۱۲ سال بررسی شده (هر سال دو داده) یعنی در مجموع ۶۹۶ عدد است. برای ارزیابی دقیق از وضعیت آبخوان نیاز به معرفی چند نقطه مشخص با داده‌های کیفی معلوم است تا بتوان کیفیت آبخوان را نسبت به این نقاط معلوم سنجید. برای تحقق این امر از دو نقطه مجاز و مطلوب آب شرب طبق استاندارد WHO استفاده شد [۲۵]. شایان یادآوری است به دلیل اینکه برای پارامترهای غلظت سدیم (Na)، پتاسیم (K)، بی‌کربنات (HCO₃) فقط حد مجاز تعریف شده بود، نصف غلظت آن مقدار به عنوان حد مطلوب فرض شده که در جدول ۱ آمده است. معیارهای ماتریس تصمیم، ۱۱ پارامتر کیفی از جمله Ca و HCO₃، CL، K، PH، So₄، Na، Mg، TH، EC، TDS است که محدوده این پارامترها در جدول ۱ ارائه شده است. به این دلیل که پارامتر PH بازه‌ای بوده و در بازه‌ای خاص مطلوب و در بازه‌ای دیگر مجاز است، پارامتر جایگزینی به صورت معادله ۱ تعریف شد، که جزء معیارهای منفی بوده یعنی هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، مطلوب‌تر است. برای وزن‌دهی معیارها از دو روش آنترپی شانون و وزن‌دهی رفرنس استفاده شد [۲۶]. همان‌طور که گفته شد، معیارها، گزینه‌ها و وزن‌دهی ماتریس تصمیم‌گیری به این صورت تعریف شد و در پایان ارزش همه چاه‌ها در همه دوره‌های زمانی محاسبه شده و نتایج دو نوع وزن‌دهی با هم مقایسه شد. نتایج COPRAS عددی بین صفر تا ۱۰۰ است؛ به این معنا که هر چه این عدد به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد، کیفیت بهتر است و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، کیفیت بدتر را نشان می‌دهد. این شاخص داده‌های پیچیده را یکپارچه می‌کند و نمره‌ای را تشریح می‌کند که وضعیت کیفیت آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.

$$PH' = |PH - \gamma/\delta| \quad (1)$$

آبخوان با ۲۹ چاه نمونه‌برداری تیسن‌بندی شده و با استفاده از میانگین‌گیری وزنی، کیفیت آب کل آبخوان محاسبه شد. در اینجا کل آبخوان به صورت یکپارچه^۳ در نظر گرفته شده است. سپس، درون‌یابی بین ماه‌های اردیبهشت و مهر صورت گرفت تا کیفیت آب آبخوان به صورت سری زمانی ماهانه تبدیل شود. برای تعیین ورودی‌های بهینه به مدل پیش‌بینی‌کننده بیزین، ۸ راهبرد

زیرزمینی آبخوان زنجان با استفاده از داده‌های شیمیایی پرداخته و سپس پیش‌بینی آن با استفاده از شبکه بیزین تحت راهبردهای مختلف انجام گرفته است. هدف اصلی از تحقیق حاضر، تدوین مدلی برای پیش‌بینی کیفیت آب‌های زیرزمینی و تعیین مکان‌های بهینه بر اساس کیفیت خوب آب در طولانی‌مدت است. شاخص کیفیت آب زیرزمینی با ترکیبی از پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب و تعریف دو نقطه مجاز و مطلوب آب شرب طبق استاندارد WHO^۱ تهیه شده و شاخص جدید کیفیت آب زیرزمینی C-GWQI ارائه شده است. سپس، به قابلیت پیش‌بینی این شاخص توسط شبکه‌های بیزین (BN) پرداخته شد. از یافته‌های مطالعه حاضر می‌توان برای اطمینان از کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده شده در اهداف آشامیدنی و آبیاری در مناطق مشابه استفاده شود. علاوه بر این، پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی و پایش تغییرات آن یکی از نیازهای مدیریتی بوده و بسیار حائز اهمیت است.

مواد و روش‌ها

متدولوژی تحقیق

ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش COPRAS^۲ شامل استفاده از شاخص GWQI، ساخت ماتریس تصمیم‌گیری و وزن‌دهی معیارهاست. در پژوهش حاضر برای تحلیل داده‌های پیچیده کیفیت منابع آب از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره COPRAS استفاده شده است. این تکنیک نسبت به سایر تکنیک‌های MCDM مزایایی همچون سادگی، قابلیت در نظر گرفتن معیارهای مثبت و منفی و زمان محاسباتی کمتر دارد [۱۹ و ۲۰].

در پژوهش حاضر از داده‌های کیفی ۲۹ چاه نمونه‌برداری برای مدت ۱۲ سال استفاده شد. ابتدا ماتریس تصمیم‌گیری با استفاده از پارامترهای کیفی مشاهداتی به عنوان معیارهای ماتریس تصمیم‌گیری و از چاه‌های نمونه‌برداری به عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری استفاده شد. درخور یادآوری است در بررسی سری زمانی کیفیت آب زیرزمینی در این روش باید همه دوره‌های زمانی کل چاه‌ها در یک ماتریس تصمیم‌گیری مقایسه شوند. به بیان بهتر، گزینه‌های ماتریس تصمیم‌گیری سری زمانی کل چاه‌ها

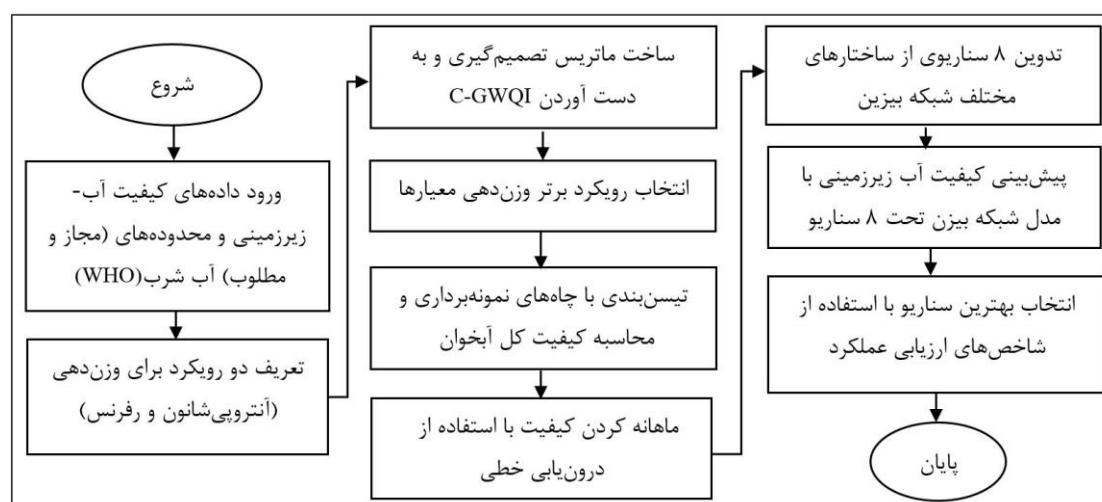
1. World Health Organization
2. Complex Proportional Assessment

شاخص‌های عملکرد انتخاب شد. در شکل ۱ چگونگی استفاده از مدل‌ها، راهبردها و مراحل کار، به صورت فلوجارت ترسیم شده است.

مختلف از داده‌های ورودی تعریف شد. سپس، پیش‌بینی شاخص C-GWQI برای کل آبخوان با مدل بیزین صورت گرفت، بهترین راهبرد از داده‌های ورودی با استفاده از

جدول ۱. طبقه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی مطابق WHO [۲۵ و ۲۷] و وزن‌دهی [۲۶]

Wi	WHO		بیشینه	میانگین	کمینه	واحد	پارامتر
	حد مجاز	حد مطلوب					
۵	۱۵۰۰	۵۰۰	۱۳۵۰	۴۱۸/۳۸	۱۱۵	(mg/L)	TDS
۳	۳۱۲۵	۷۸۰	۲۱۷۰	۶۶۸/۵۵	۱۸۷/۴	(μS/cm)	EC
۳	۶۰۰	۳۰۰	۷۶۰	۲۱۵/۹۵	۶۹	(mg/L)	TH
۳	۱۵۰	۳۰	۹۹/۷۵	۲۱/۸	۱/۸۲	(mg/L)	Mg
۴	۲۰۰	۱۰۰	۳۱۵/۱	۵۴/۷۱	۶/۹	(mg/L)	Na
۵	۴۰۰	۲۰۰	۶۱۷/۲۹	۱۰۵/۳۳	۰/۴۸	(mg/L)	So4
-	۹-۶	۸/۵ - ۶/۵	۸/۸۲	۷/۷	۶/۴۸	-	PH
۲	۱۲	۶	۱۲/۴۸	۲/۷۳	۰/۴	(mg/L)	K
۵	۶۰۰	۲۰۰	۲۳۳/۰۴	۳۶/۱۱	۱/۰۶	(mg/L)	CL
۱	۳۰۰	۱۵۰	۵۴۹/۰۸	۱۹۸/۴۵	۱/۸۳	(mg/L)	HCO ₃
۳	۲۰۰	۷۵	۱۹۹/۹۹	۵۰/۶۵	۲	(mg/L)	Ca
۳	۱/۵	۱	۱/۳۲	۰/۳۵	۰	-	PH'



شکل ۱. فلوجارت مراحل تحقیق

چندعاملی با سادگی محاسبه، زمان محاسبه کم، رتبه‌بندی کل امتیازها و استفاده هم‌زمان از معیارهای کمی و کیفی، امکان محاسبه جداگانه معیارهای مثبت (حداکثر) و منفی (حداقل) است. معیارها در فرایند ارزیابی، توانایی تخمین میزان اهمیت هر گزینه به عنوان درصد به منظور نشان دادن اندازه بهتر یا بدتر از یک گزینه و توانایی انطباق با شرایط محلی و تجربی را دارند.

روش تصمیم‌گیری چندمعیاره COPRAS

COPRAS نوعی روش جدید تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) است که توسط کالائوسکاس و همکارانش ارائه شده است [۲۸]. این روش وابستگی مستقیم و متناسب با سطح بزرگی و سودمندی گزینه‌ها را در صورت وجود معیارهای متناقض فرض می‌کند. در پژوهش حاضر از این روش استفاده شده است، زیرا یک روش تصمیم‌گیری

می‌شود و براساس رابطه ۳، مقدار Q_i دست می‌آید. سپس، براساس رابطه ۴، مقدار Q_i برای هر گزینه به دست می‌آید. مقدار Q_i نشان‌دهنده میزان ارزش و اهمیت هر یک از گزینه‌ها برحسب معیارهاست و مقدار زیاد ارزش، نشان دهنده اهمیت و مطلوبیت بیشتر گزینه‌ها خواهد بود. در مرحله پایانی C-GWQI با معادله ۵ محاسبه می‌شود که عددی بین صفر تا ۱۰۰ است. این عدد هر چه بیشتر شود، کیفیت بهتر آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.

$$C - GWQI = \frac{Q_i}{Q_{max}} 100\% \quad (5)$$

شبکه بیزین

مدل شبکه بیزین برای نخستین بار توسط جودا پرل در سال ۱۹۸۸ ارائه شد [۳۰]. از مزایای بارز این مدل نسبت به سایر مدل‌ها می‌توان به تحلیل ریسک و عدم قطعیت با دقت بیشتری نسبت به مدل‌هایی که فقط مقادیر پیش‌بینی شده را ارائه می‌دهند، اشاره کرد [۳۱]. از طرفی، شبکه بیزین برای ورود داده‌ها محدودیت کمی و کیفی ندارد و می‌توان ترکیبی از این داده‌ها را به صورت ورودی در نظر گرفت. شبکه بیزین نوعی مدل گرافیکی احتمالاتی است که در این مدل بین متغیرها و احتمالات به صورت یک گراف مستقیم و بدون چرخه ارتباط برقرار است. مبنای این روش بر قاعده بیز استوار است که توسط توماس بیز در قرن ۱۸ بنیان نهاده شده است [۳۱ و ۳۲]. لاپلاس این تئوری را گسترش داد و منطق احتمالات را بر پایه آن تعیین کرد [۳۳]. اگر E و F رویداد مفروض باشند، به گونه‌ای که $P(E) \neq 0$ و $P(F) \neq 0$ باشد، آن گاه داریم:

$$P(E|F) = \frac{P(E)P(F|E)}{P(F)} \quad (6)$$

شبکه بیزین امکان محاسبات رو به جلو و رو به عقب را برای تحلیل فراهم می‌کند. به این صورت که علاوه بر پیش‌بینی متغیر مد نظر با استفاده از وضعیت متغیرهای ورودی، می‌تواند با دست داشتن وضعیت متغیر پیش‌بینی‌شونده، میزان تأثیر هر یک از متغیرهای ورودی را بر خروجی‌های مدل مشخص کند [۳۱ و ۳۲]. شبکه بیزین از یک سری مجموعه گره‌های متصل به هم ساخته شده است که برای هر فرایند دو حالت وقوع و عدم وقوع را بررسی می‌کند. مطابق شکل ۲، متغیر A و B در پیش‌بینی

اطلاعات بیشتر در مورد روش COPRAS را می‌توان در پژوهشی توسط زاوادسکاس و کلاوسکاس یافت [۲۹].

بنابراین، به طور کلی مراحل به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱. تعیین وزن معیارها با یکی از روش‌های معمول مانند آنتروپی شانون، فرایند سلسله‌مراتبی، فولر و غیره. در پژوهش حاضر از روش آنتروپی شانون و وزن‌دهی رفرنس استفاده شده است.
۲. ساخت ماتریس تصمیم‌گیری (در تحقیق حاضر معیارها ۱۱ پارامتر کیفیت آب زیرزمینی و گزینه‌ها، سری زمانی ۲۹ چاه نمونه برداری به علاوه دو محدوده مطلوب و مجاز (WHO)).
۳. نرمال‌سازی و وزن‌دار کردن ماتریس تصمیم‌گیری با استفاده از رابطه ۲:

$$d_{ij} = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} x_{ij} \quad (2)$$

که در آن w_j وزن هر معیار و x_{ij} مقدار هر گزینه به ازای هر معیار است.

۴. سپس، معیارهای مثبت و منفی، مشخص و تفکیک می‌شوند. منظور از معیار مثبت یا سازگار، معیاری است که با افزایش مقدار آن، میزان مطلوبیت آن نیز افزایش می‌یابد که در مطالعه حاضر همه معیارها منفی در نظر گرفته شدند.
۵. پس از مشخص کردن معیارهای مثبت و منفی، باید ارزش نهایی معیارهای مثبت و منفی را مطابق رابطه ۳ مشخص کرد.

$$S_j^- = \sum_{z_i=-} d_{ij} \quad S_j^+ = \sum_{z_i=+} d_{ij} \quad (3)$$

براساس رابطه ۳، جمع جبری ارزش‌های مثبت و منفی به تفکیک محاسبه می‌شود.

۶. در مرحله پایانی، برای محاسبه ارزش نهایی Q برای هر گزینه، از رابطه ۴ استفاده می‌شود.

$$Q_i = S_j^+ + \frac{S_{min}^- \sum_{j=1}^n S_j^-}{S_j^- \sum_{j=1}^n S_{min}^-} = S_j^+ + \frac{\sum_{j=1}^n S_j^-}{S_j^- \sum_{j=1}^n S_j^-} \quad (4)$$

که در آن، S_j^+ برابر با مقدار جمع جبری معیارهای مثبت برای هر گزینه و S_j^- مقدار جمع جبری معیارهای منفی برای هر گزینه است. در این بخش ابتدا ۱ بر S_j^- تقسیم

که در آن P_i مقادیر پیش‌بینی و O_i مقادیر مشاهداتی و \bar{P} میانگین مقادیر مشاهداتی و \bar{O} میانگین مقادیر پیش‌بینی است. هر چه مقادیر RMSE به صفر و هر چه مقدار R به یک نزدیک باشد، مطلوب‌تر است. در پژوهش حاضر چون کیفیت آب زیرزمینی (C-GWQI) بی‌بعد می‌باشد، به همین دلیل RMSE نیز واحد ندارد.

منطقه مطالعه شده

آبخوان بررسی شده در مطالعه حاضر در دشت زنجان واقع شده که در فاصله طول‌های ۴۷ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۴۹ درجه شرقی و عرض ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۷ درجه شمالی قرار دارد و وسعت تقریبی آن حدود ۲۱۵۴ کیلومترمربع است. در دشت زنجان آبخوان آبرفتی آزاد با وسعت ۱۱۷۴ کیلومترمربع بیش از ۶۰ درصد از گستره دشت را فرا گرفته است. در این محدوده مطالعاتی سالانه ۴۹۰ میلیون مترمکعب برداشت می‌شود که ۴۰۰ میلیون مترمکعب از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود که خود نشان‌دهنده میزان اهمیت این آبخوان استراتژیک در منطقه مطالعه شده است. این آبخوان به دلیل آبدهی مناسب و نبود منابع مطمئن آب سطحی جزء مهم‌ترین منابع تأمین آب کشاورزی، صنعت و آب شرب شهری و روستایی است. به همین دلیل، پایش کیفیت آبخوان و مکان‌یابی کیفیت آبخوان اهمیت زیادی دارد. این آبخوان به دلیل برداشت بی‌رویه دچار افت سالانه ۰/۵۴ متر شده و به همین این علت، وضعیت این آبخوان راهبردی، بحرانی است. در این دشت تراز آب زیرزمینی بین ۱۴۲۰ تا ۱۸۳۰ متر بوده و رقوم آنها از شرق به غرب کاهش می‌یابد. دمای متوسط سالانه در نواحی میانی محدوده ۱۱ درجه سانتی‌گراد بوده و در ارتفاعات به ۸ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. بیشینه بارندگی ۶۰۰ میلی‌متر در دورترین نقطه جنوب شرق و کمینه آن ۲۵۰ میلی‌متر در دورترین نقطه شمال غرب محدوده است. موقعیت جغرافیایی منطقه بررسی شده و چاه‌های نمونه‌برداری موجود در آبخوان در شکل ۳ ارائه شده است.

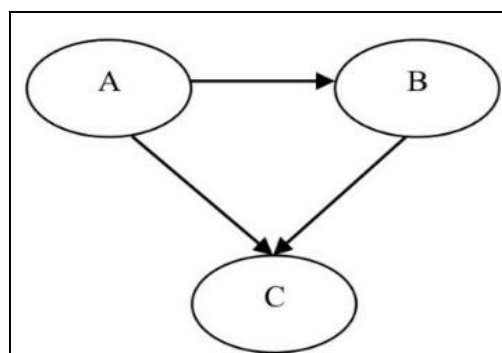
نتایج و بحث

توسعه شاخص C-GWQI

به منظور توسعه شاخص C-GWQI از دو رویکرد وزن‌دهی استفاده شد. سپس، این دو رویکرد با هم مقایسه شد. در رویکرد نخست توسعه شاخص C-GWQI با استفاده از روش

وقوع C نقش دارند. به تعبیر دیگر، A و B علت وقوع C هستند و با افزایش یا کاهش آن، معلول A و B است. همچنین، وقوع متغیر B به متغیر A بستگی دارد. احتمال هم‌زمان n رویداد که شامل E_1, E_2, \dots, E_n که $P(E) \neq 0$ برای $1 \leq i \leq n$ از رابطه ۷ به دست می‌آید.

$$P(E_i|F) = \frac{P(E_i) P(F|E_i)}{P(F|E_1)P(F|E_1) + P(F|E_2)P(F|E_2) + \dots + P(F|E_n)P(F|E_n)} \quad (7)$$



شکل ۲. یک نمونه ساده از شبکه بیزین

دو الگوریتم PC^۱ و NPC^۲ با توجه به سادگی، بیشترین استفاده را در آموزش شبکه بیزین برای آموزش ساختار مدل‌سازی دارند. در تحقیق حاضر از الگوریتم PC استفاده شد.

شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل

در پژوهش حاضر از سه پارامتر میانگین مربعات خطا^۳ (رابطه ۸)، میانگین نسبی خطای مطلق^۴ (رابطه ۹) و ضریب همبستگی پیرسون^۵ (رابطه ۱۰) برای بررسی دقت ارزیابی مدل‌ها و همچنین مقایسه مدل‌ها استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (8)$$

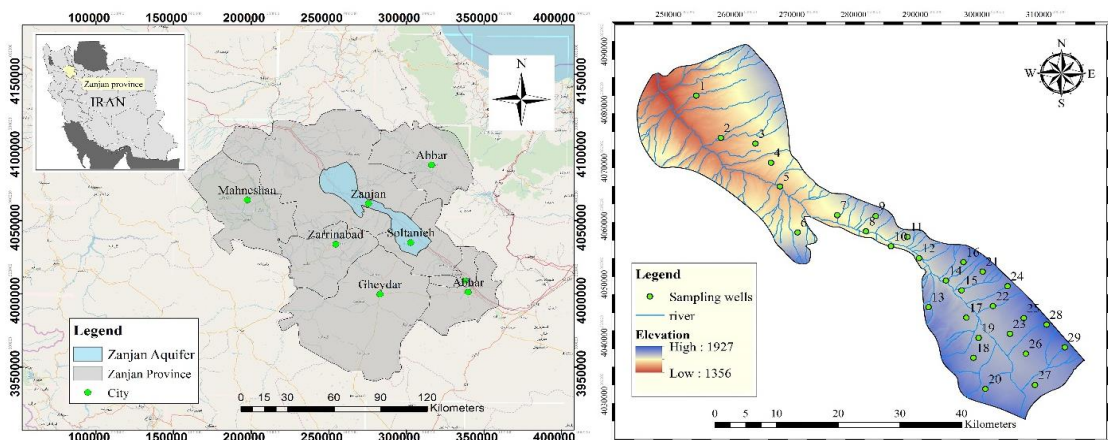
$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{|O_i - P_i|}{O_i} \right] \quad (9)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (10)$$

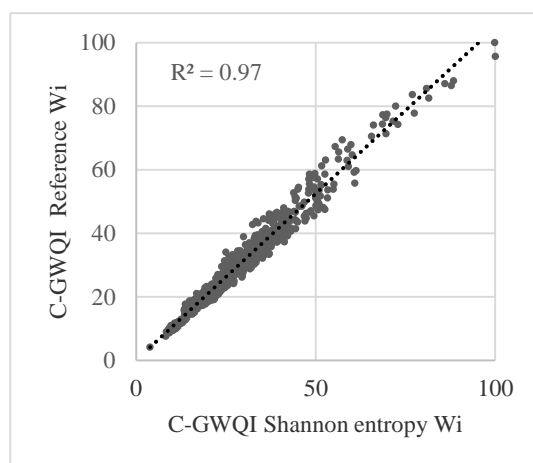
1. Path Condition
2. Necessary Path Condition
3. Root Mean Square Error
4. Mean Absolute Relative Error
5. Pearson Correlation Coefficient

به دست آمد. سپس، نتایج شاخص C-GWQI با دو وزن دهی مختلف، با هم مقایسه شد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، این دو روش وزن دهی همبستگی بسیار خوبی از خود نشان داده‌اند.

وزن دهی رفرنس انجام پذیرفت و هر یک از چاه‌ها در دوره زمانی با شاخص C-GWQI ارزیابی شدند. در رویکرد دوم از روش آنتروپی شانون برای وزن دهی C-GWQI استفاده شد و بر این اساس، عدد شاخص C-GWQI برای تمامی چاه‌ها



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی آبخوان زجان و چاه‌های نمونه‌برداری



شکل ۴. همبستگی شاخص C-GWQI با دو روش وزن دهی آنتروپی شانون و رفرنس

با وزن دهی به روش آنتروپی شانون، شاخص کیفیت آب زیرزمینی C-GWQI برای تمامی چاه‌ها در دوره زمانی محاسبه شد. حد مطلوب کیفیت آب شرب $C-GWQI = 9/7$ و حد مجاز کیفیت آب شرب $C-GWQI = 3/87$ را به خود اختصاص داد. هیچ‌یک از چاه‌ها در محدوده کیفیت غیرمجاز آب شرب قرار نگرفتند. به بیانی دیگر، C-GWQI در هیچ‌یک از چاه‌ها به کمتر از $3/87$ نرسید. در بیشتر مواقع و مناطق، کیفیت آب زیرزمینی مطلوب ($C-GWQI > 9/7$) برای شرب بوده است. از این بین فقط چاه های ۱، ۷ و ۱۰ در برخی از ماه‌های بررسی شده میزان کیفیت کمتر از حد مطلوب و در

بررسی مقالات متعدد شاخص کیفیت آب نشان می‌دهد در وزن دهی WQI دیدگاه‌های کارشناسان مختلف است [۲۶، ۲۴]. به همین دلیل، وزن دهی به روش آنتروپی شانون به دلیل عدم اتکا به دیدگاه‌های کارشناسان و ناهمگونی دیدگاه‌ها، به عنوان رویکرد برتر انتخاب می‌شود. البته شایان یادآوری است با توجه به منطقه مطالعه شده و پارامترهای کیفی استفاده شده، در برخی موارد آنتروپی شانون گزینه مطلوب برای وزن دهی نیست، چون این روش وزن دهی بر اساس پراکندگی داده‌ها بوده و به داده‌های پرت حساس است.

کیفیت آبخوان مربوط به اردیبهشت ۱۳۸۹ با میزان ۳۲/۸۱۵ بوده و پایین ترین سطح کیفیت آبخوان مربوط به اردیبهشت ۱۳۸۵ با میزان ۲۲/۴۹ در دوره زمانی بررسی شده را داشت. البته باید در نظر داشت که تغییرات کیفیت آبخوان در منطقه مطالعه شده زیاد نیست و بیشتر چاه‌های نمونه برداری کیفیت قابل قبولی دارند.

شایان یادآوری است که در مسائل پیچیده، مانند تعیین کیفیت آب، تفسیر دقیق کیفیت آب زیرزمینی، در حالتی که کیفیت آب زیرزمینی وابسته به بسیاری از پارامترها و فرایندها از جمله تعامل سنگ و آب، تغییر توپوگرافی است، کار ساده‌ای نیست. یکی از گزینه‌های پیش رو، استفاده از روش‌های جدید و غیرخطی است تا بتوان راه حل احتمالی برای تفسیر دقیق را به دست آورد. به همین دلیل، از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره COPRAS برای تدوین شاخص کیفیت آب زیرزمینی استفاده شد. نتایج نشان داد این شاخص توانایی خوبی برای تعیین کیفیت آب زیرزمینی دارد. همچنین، کیفیت آب زیرزمینی از نظر استاندارد کیفیت آب آشامیدنی WHO در آبخوان مطالعه شده مطلوب است، اما در محدوده شهری از حد مطلوب به سمت حد مجاز حرکت می‌کند. باید برای صرفه‌جویی و بهینه‌سازی استفاده از منابع آب، برنامه‌ریزی مناسب صورت گیرد.

بازه مجاز ارزیابی شد. چاه ۱ در سه دوره، چاه ۸ در پنج دوره و چاه ۱۰ در چهار دوره از مجموع ۲۴ دوره بررسی شده مطلوبیتی کمتر از حد مطلوب و بیشتر از حد مجاز داشته‌اند ($9/7 < C-GWQI < 3/87$). با توجه به جدول ۳، کمترین رتبه را چاه ۱۰ در اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۹ با $C-GWQI = 8/25$ به خود اختصاص داد. چاه‌های ۷، ۸ و ۱۰ به دلیل قرارگیری در محدوده شهر زنجان، سطح کیفیت پایین تری نسبت به سایر نقاط آبخوان داشتند. همچنین، چاه ۱ به دلیل قرارگیری در خروجی آبخوان، کیفیت نامناسبی نسبت به سایر نقاط داشت. جدول ۲ نشان می‌دهد چاه ۲ بهترین کیفیت آب را به خود اختصاص داده است. این چاه به عنوان منبع آب شرب روستای ینگجه استفاده می‌شود که به دلیل تأمین آب شرب مطمئن و آبدهی مناسب، عمیق حفر شده است و به همین علت، کیفیت مطلوبی نسبت به سایر چاه‌ها دارد. محدوده کیفیت آب چاه‌های نمونه‌برداری آبخوان زنجان در جدول ۲ نشان داده شده است. تغییرات کیفیت آب زیرزمینی نشان می‌دهد وضعیت مرکز آبخوان نسبت به سایر مناطق کیفیت نامطلوب تری دارد. این امر می‌تواند به دلیل وجود شهر زنجان در این منطقه و ورود فاضلاب‌های شهری به آبخوان باشد.

شاخص‌های C-GWQI برای آبخوان با استفاده از روش تیسن‌بندی به صورت جدول ۳ محاسبه شد. بهترین

جدول ۲. برآورد شاخص کیفیت آب زیرزمینی C-GWQI برای کل آبخوان

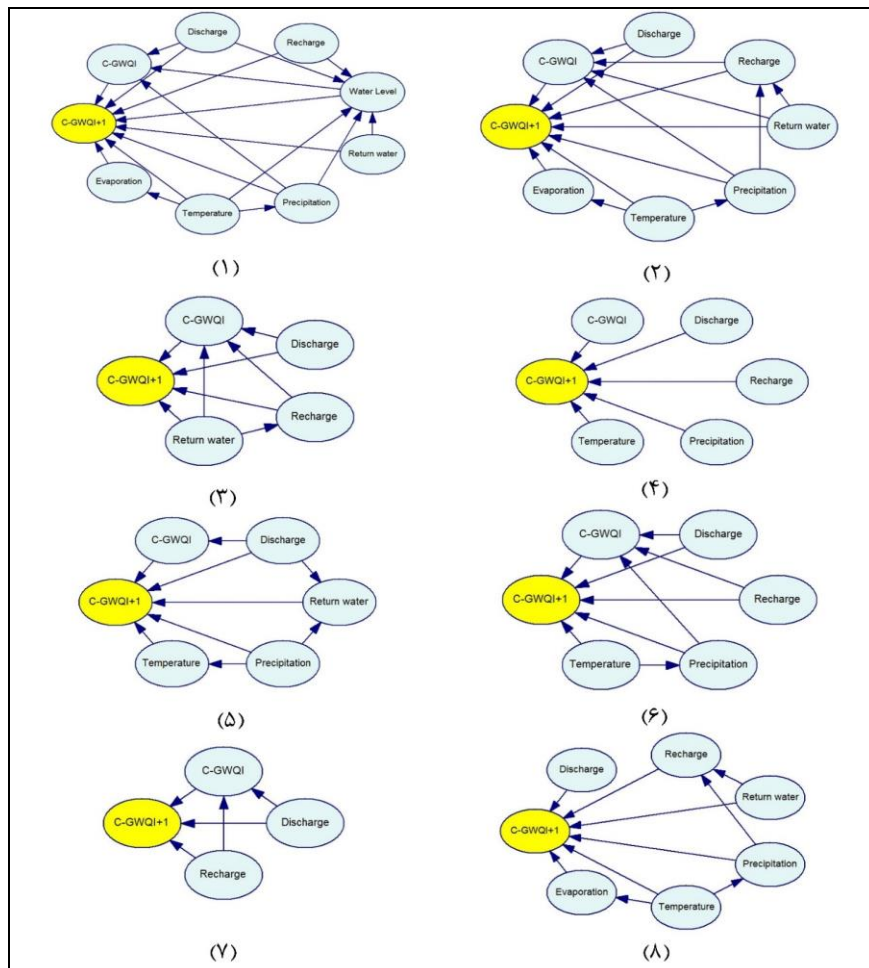
C-GWQI			چاه‌ها	C-GWQI			چاه‌ها
بیشینه	کمینه	میانگین		بیشینه	کمینه	میانگین	
۶۰/۸۴	۱۹/۶۳	۳۷/۰۷	۱۶	۱۹/۴۵	۸/۷۱	۱۲/۸۴	۱
۳۵/۸۶	۱۴/۲۷	۲۰/۲۳	۱۷	۱۰۰	۴۴/۳۵	۶۷/۶۵	۲
۳۳/۳۵	۱۴/۴۸	۲۳/۴۸	۱۸	۲۵/۵۶	۱۵/۶۶	۲۰/۲۵	۳
۲۲/۴۱	۱۳/۶۱	۱۷/۷۶	۱۹	۳۱/۷۲	۱۴/۸۷	۲۰/۹۳	۴
۵۰/۰۷	۲۳/۲۶	۳۲/۰۳	۲۰	۴۳/۳۵	۲۵/۱۶	۳۴/۱۱	۵
۳۷/۰۸	۲۱/۱۸	۲۸/۸۰	۲۱	۲۷/۱۱	۱۰/۹۷	۱۷/۷۱	۶
۶۱/۲۲	۳۱/۴۷	۴۳/۱۸	۲۲	۱۹/۰۷	۸/۴۱	۱۳/۴۰	۷
۴۹/۶۳	۱۶/۵۴	۳۵/۵۱	۲۳	۵۳/۴۰	۱۱/۵۵	۲۴/۹۴	۸
۵۰/۲۶	۲۱/۵۲	۳۸/۰۱	۲۴	۳۵/۱۸	۱۴/۹۶	۲۲/۱۷	۹
۲۷/۴۴	۱۳/۳۸	۱۹/۶۲	۲۵	۳۹/۸۷	۸/۲۵	۱۴/۹۸	۱۰
۵۵/۰۸	۱۳/۵۳	۲۲/۹۷	۲۶	۴۸/۳۵	۲۵/۴۶	۳۷/۹۱	۱۱
۳۹/۹۴	۱۰/۸۲	۲۴/۱۸	۲۷	۳۱/۰۴	۱۵/۷۹	۲۱/۹۷	۱۲
۸۸/۳۴	۲۰/۳۴	۴۸/۹۷	۲۸	۴۱/۲۷	۱۱/۶۶	۲۳/۹۶	۱۳
۵۰/۶۷	۲۳/۷۸	۳۶/۰۳	۲۹	۴۷/۳۸	۹/۹۴	۳۰/۰۶	۱۴
				۵۰/۷۵	۱۳/۶۴	۲۵/۹۳	۱۵

جدول ۳. برآورد شاخص کیفیت آب زیرزمینی C-GWQI برای کل آبخوان

زمان نمونه برداری	C-GWQI	زمان نمونه برداری	C-GWQI	زمان نمونه برداری	C-GWQI	زمان نمونه برداری	C-GWQI
اردیبهشت ۱۳۹۱	۲۹/۳۲	اردیبهشت ۱۳۸۸	۲۸/۵۵	اردیبهشت ۱۳۸۵	۲۲/۴۹	اردیبهشت ۱۳۸۲	۲۷/۰۵
مهر ۱۳۹۱	۲۹/۴۱	مهر ۱۳۸۸	۳۱/۴۰	مهر ۱۳۸۵	۲۴/۷۱	مهر ۱۳۸۲	۳۱/۹۸
اردیبهشت ۱۳۹۲	۳۰/۳۵	اردیبهشت ۱۳۸۹	۳۲/۸۲	اردیبهشت ۱۳۸۶	۲۴/۹۷	اردیبهشت ۱۳۸۳	۳۱/۹۵
مهر ۱۳۹۲	۳۰/۳۰	مهر ۱۳۸۹	۲۸/۷۷	مهر ۱۳۸۶	۲۵/۴۵	مهر ۱۳۸۳	۲۶/۴۳
اردیبهشت ۱۳۹۳	۲۷/۲۱	اردیبهشت ۱۳۹۰	۲۹/۶۰	اردیبهشت ۱۳۸۷	۲۳/۹۹	اردیبهشت ۱۳۸۴	۲۸/۰۰
مهر ۱۳۹۳	۲۷/۰۰	مهر ۱۳۹۰	۳۲/۷۰	مهر ۱۳۸۷	۳۰/۹۰	مهر ۱۳۸۴	۲۶/۸۲

پیش‌بینی شاخص C-GWQI با استفاده از مدل بیزین یکی از عوامل ایجاد خطا در مدل‌های داده مبنای نبود رابطه ساده بین مجموعه داده‌های ورودی بوده، پس نیاز است ترکیب داده‌های ورودی بهینه تعیین شود. در مطالعه حاضر برای پیش‌بینی بهتر کیفیت آب زیرزمینی و تعیین ورودی‌های بهینه به مدل، ۸ راهبرد مختلف از ترکیب و ساختار داده‌های ورودی تعیین شد. به منظور انتخاب مدل

بهینه پیش‌بینی، مدل برای هر یک از راهبردها اجرا شد و بهترین راهبرد با توجه به معیارهای R و MARE انتخاب شد. همچنین، با توجه به ساختار و ارتباطات تعریف‌شده برای پارامترهای ورودی به شبکه بیزین در ۸ راهبرد ساختاری برای شبیه‌سازی استفاده شد که شکل ۵ راهبردهای مختلف از داده‌های ورودی را نشان می‌دهد.



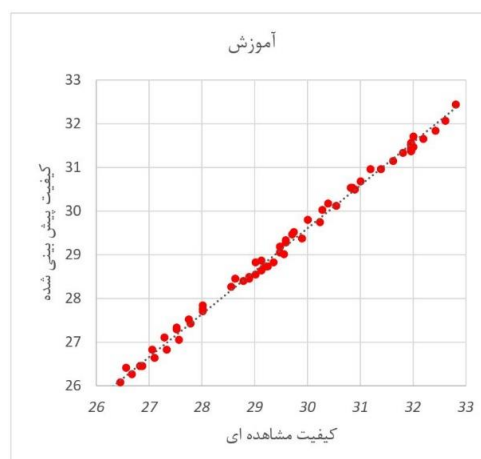
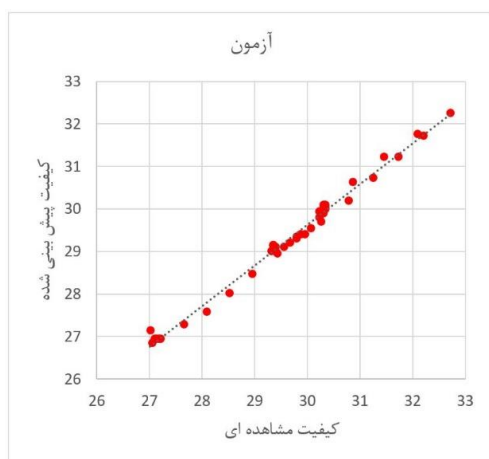
شکل ۵. راهبردهای انتخابی برای شبیه‌سازی در شبکه بیزین

پارامترهای پیش‌بینی‌کننده حذف شده بود، همین عامل سبب ایجاد خطای بسیار زیاد در امر پیش‌بینی شده است. شبکه بیزین برای تمامی راهبردها در دوره آزمون و آموزش، همبستگی بسیار خوبی از خود نشان داد. از این‌رو، با توجه به شاخص عملکرد MARE راهبرد ۵ با میزان MARE% آموزش و آزمون به ترتیب ۱/۹۳۲ و ۰/۹۹۲ به عنوان مدل برتر انتخاب شد. این راهبرد با داده‌های ورودی تخلیه، آب برگشتی، بارش، دما و C-GWQI این ماه، C-GWQI ماه آینده را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند. از این بین، راهبرد ۸ بدترین نتیجه را به خود اختصاص می‌دهد و نشان می‌دهد پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی در ماه آینده به شدت به کیفیت آب زیرزمینی در این ماه بستگی دارد. شکل ۶ همبستگی در دوره آموزش و آزمون راهبرد برتر را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، همبستگی در دوره آزمون بهتر از دوره آموزش است و پراکندگی در دوره آموزش بیشتر است.

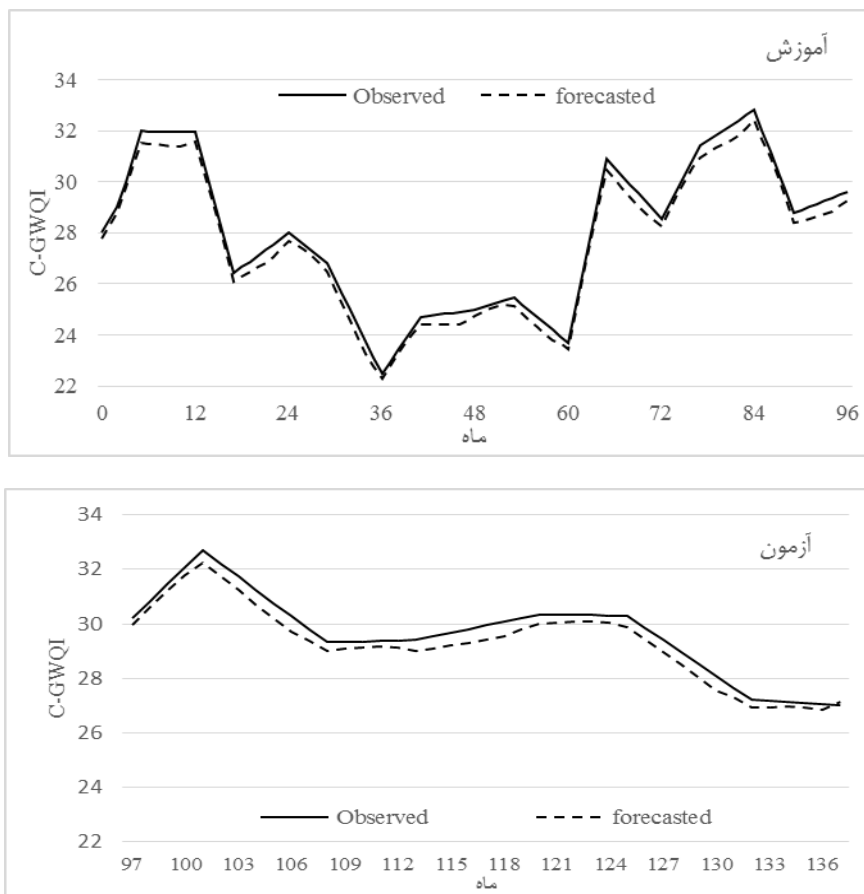
سری زمانی کیفیت آب زیرزمینی مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده برای مرحله آموزش (۹۶ داده) و مرحله آزمون (۴۱ داده) در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج مدل بیزین برای پیش‌بینی C-GWQI در دو دوره آموزشی و آزمون در جدول ۴ ارائه شد. عملکرد شبکه بیزین با راهبردهای مختلف بررسی شد و از بین این راهبردها، راهبردی که خطای کمتر داشت، به عنوان راهبرد برتر انتخاب شد. با توجه به جدول ۴ میزان خطا در بخش آموزش و آزمون راهبردهای مختلف غیر از راهبردهای اول و هشتم، بسیار نزدیک هم بوده و به بیان دیگر، مدل حساسیت کمی به پارامترهای تبخیر، دما، بارش، آب برگشتی و سطح آب زیرزمینی دارد. در راهبرد اول، سطح آب زیرزمینی هم به عنوان پارامتر پیش‌بینی‌کننده شاخص کیفیت آب زیرزمینی به مدل وارد شده است که یکی از دلایل بروز این خطاست و در راهبرد ۸، پارامتر کیفیت آب زیرزمینی (C-GWQI) از بین

جدول ۴. مقایسه شاخص‌های عملکرد مدل بیزین تحت راهبردهای مختلف

آموزش			آزمون			راهبردها
RMSE	R	MARE%	RMSE	R	MARE%	
۶۵/۰۳	۰/۹۱۷	۲۳۴/۸۷	۶۴/۸	۰/۹۴۳	۲۱۹	۱
۰/۶۹۸	۰/۹۱۹	۲/۰۳۴	۰/۴۶۸	۰/۹۴۳	۱/۱۶۵	۲
۰/۶۸۲	۰/۹۱۴	۱/۹۶۷	۰/۴۲۸	۰/۹۴۷	۱/۰۳۵	۳
۰/۶۹۸	۰/۹۱۹	۲/۰۳۳	۰/۴۶۷	۰/۹۴۳	۱/۱۶۳	۴
۰/۶۷۲	۰/۹۱۴	۱/۹۳۲	۰/۴۱۸	۰/۹۴۶	۰/۹۹۲	۵
۰/۶۸۴	۰/۹۱۴	۱/۹۷۵	۰/۴۳۲	۰/۹۴۶	۱/۰۴۵	۶
۰/۶۷۹	۰/۹۱۴	۱/۹۵۸	۰/۴۲۶	۰/۹۴۶	۱/۰۱۸	۷
۷۹۵/۹۵	-۰/۳۸۴	۲۸۷۴	۷۹۵/۷۲	-۰/۱۸۷	۲۶۸۹	۸



شکل ۶. همبستگی دوره آموزش و آزمون برای راهبرد برتر پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی



شکل ۷. نمایش کیفیت آب زیرزمینی مشاهده شده و پیش‌بینی شده در دوره آموزش و آزمون

آنتروپی شانون به سادگی کیفیت چاه‌های بررسی شده را با هم مقایسه می‌کند. بررسی کیفیت آب چاه‌های نمونه‌برداری شده نشان داد کیفیت آب زیرزمینی در مرکز آبخوان، به دلیل وجود شهر زنجان که بیشتر فاضلاب شهری به صورت چاه‌های جذبی دفع می‌شوند، بدتر از سایر قسمت‌های آبخوان است. نتایج نشان داد این شاخص توانایی خوبی در تعیین کیفیت آب زیرزمینی دارد. بر این اساس، از روش شبکه بیزین برای پیش‌بینی وضعیت کیفی در منطقه استفاده شد. ۲۹ حلقه چاه نمونه‌برداری شده در منطقه مطالعه شده انتخاب و مدل‌سازی شد. بر این اساس، میزان شاخص $MARE\%$ در دوره آموزش و آزمون به ترتیب $1/932$ و $0/992$ بوده است که عملکرد خوبی از مدل‌سازی را نشان داد. به طور کلی، مدل شبکه بیزین می‌تواند به عنوان روشی سریع، قابل اعتماد برای پیش‌بینی و مدیریت کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده شود.

نتایج پیش‌بینی در دوره آموزش و آزمون در شکل ۷ نشان داده شده است. میزان خطای ایجاد شده در دوره آموزش بیشتر از دوره آزمون است که از خطای ایجاد شده در ابتدای دوره آموزش نشئت می‌گیرد. در پیش‌بینی یک تأخیر زمانی یک‌ماهه در دوره آموزش و آزمون مشهود بوده و مقادیر پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر مشاهداتی است. با این حال، روند پیش‌بینی منطبق بر روند کیفیت مشاهداتی بوده و نتایج قابل قبول است.

نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، بررسی مکانی و زمانی کیفیت منابع آب زیرزمینی آبخوان زنجان با استفاده از روش COPRAS بررسی شد. براساس نتایج به دست آمده از این مدل، شاخص کیفیت آب (C-GWQI) ارائه شد. به منظور ارزیابی این شاخص، از دو روش وزن‌دهی استفاده شد و بررسی دو نوع روش وزن‌دهی نشان داد شاخص (C-GWQI) بدون نیاز به نظر کارشناسان با وزن دهی به روش

- practice. Operations Research Management Science, Massachusetts. 2000.
- [9].Zavadskas EK, Turskis Z. Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview. Technological and economic development of economy. 2011;17(2):397-427.
- [10]. Cooper W. Seiford. LM and Tone, K.(2000) Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software. Boston: Kluwer Academic Publishers; 2007.
- [11]. Üstün AK. Evaluating İstanbul's disaster resilience capacity by data envelopment analysis. Natural Hazards. 2016;80(3):1603-23.
- [12]. Üstün AK, Barbarosoğlu G. Performance evaluation of Turkish disaster relief management system in 1999 earthquakes using data envelopment analysis. Natural Hazards. 2015;75(2):1977-96.
- [13]. Banai-Kashani R. A new method for site suitability analysis: The analytic hierarchy process. Environmental management. 1989;13(6):685-93.
- [14]. Jha MK, Chowdary V, Chowdhury A. Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system and multi-criteria decision analysis techniques. Hydrogeology journal. 2010;18(7):1713-28.
- [15]. Do HT, Lo S-L, Thi LAP. Calculating of river water quality sampling frequency by the analytic hierarchy process (AHP). Environmental monitoring and assessment. 2013;185(1):909-16.
- [16]. Jeihouni M, Toomanian A, Shahabi M, Alavipanah S. Groundwater quality assessment for drinking purposes using GIS modelling (case study: city of Tabriz). The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014;40(2):163.
- [17]. Kavurmaci M, Üstün AK. Assessment of groundwater quality using DEA and AHP: a case study in the Sereflikochisar region in Turkey. Environmental monitoring and assessment. 2016;188(4):258.
- [18]. Minh HVT, Avtar R, Kumar P, Tran DQ, Ty TV, Behera HC, et al. Groundwater Quality Assessment Using Fuzzy-AHP in An Giang Province of Vietnam. Geosciences. 2019;9(8):330.
- [19]. Chatterjee P, Athawale VM, Chakraborty S. Materials selection using complex proportional assessment and evaluation of mixed data methods. Materials & Design. 2011;32(2):851-60.
- نتایج مطالعه حاضر نشان داد C-GWQI شاخص مفید و قابل اعتمادی برای سنجش کیفیت منابع آب زیرزمینی است و می‌تواند برای تعیین و تحلیل کیفیت آب زیرزمینی در هر منطقه استفاده شود. علاوه بر این، مدل شبکه بیزین یکی از بهترین روش‌ها به دلیل هزینه کم و دقت زیاد برای پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی است. از این روش می‌توان برای مکان‌یابی و پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی برای اهداف آشامیدنی و آبیاری در منطقه مطالعه‌شده استفاده کرد که این امر سبب کاهش بیماری‌های ناشی از استفاده آب‌های زیرزمینی آلوده می‌شود.

منابع

- [1].Germolec DR, Yang RS, Ac kermann MF, Rosenthal GJ, Boorman GA, Blair P, et al. Toxicology studies of a chemical mixture of 25 groundwater contaminants: II. Immunosuppression in B6C3F1 mice. Toxicological Sciences. 1989;13(3):377-87.
- [2].Huiqun M, Ling L, editors. Water quality assessment using artificial neural network. 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering; 2008: IEEE.
- [3].Horton RK. An index number system for rating water quality. Journal of Water Pollution Control Federation. 1965;37(3):300-6.
- [4].Miller W, Joung H, Mahannah C, Garret J. Identification of Water Quality Differences in Nevada Through Index Application 1. Journal of Environmental Quality. 1986;15(3):265-72.
- [5].Ramakrishnaiah C, Sadashivaiah C, Ranganna G. Assessment of water quality index for the groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India. Journal of Chemistry. 2009;6(2):523-30.
- [6].Vasanthavigar M, Srinivasamoorthy K, Vijayaragavan K, Ganthi RR, Chidambaram S, Anandhan P, et al. Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India. Environmental monitoring and assessment. 2010;171(1-4):595-609.
- [7].Logeshkumaran A, Magesh N, Godson PS, Chandrasekar N. Hydro-geochemistry and application of water quality index (WQI) for groundwater quality assessment, Anna Nagar, part of Chennai City, Tamil Nadu, India. Applied Water Science. 2015;5(4):335-43.
- [8].Barba-Romero S, Pomerol JC. Multicriterion Decision in Management: principles and

- [20]. Das MC, Sarkar B, Ray S. A framework to measure relative performance of Indian technical institutions using integrated fuzzy AHP and COPRAS methodology. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2012;46(3):230-41.
- [21]. Maiti S, Das A, Shah R, Gupta G. Application of automatic relevance determination model for groundwater quality index prediction by combining hydro-geochemical and geo-electrical data. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2017;3(4):1371-82.
- [22]. Nezhad MF, Abbasi M, Markarian S. A novel method for modeling effluent quality index using Bayesian belief network. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019;16(11):7071-80.
- [23]. Ammar K, McKee M, Kaluarachchi J. Bayesian method for groundwater quality monitoring network analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2009;137(1):51-61.
- [24]. Hantush MM, Chaudhary A. Bayesian framework for water quality model uncertainty estimation and risk management. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2013;19(9):04014015.
- [25]. Venkatramanan S, Chung S, Ramkumar T, Rajesh R, Gnanachandrasamy G. Assessment of groundwater quality using GIS and CCME WQI techniques: a case study of Thiruthuraiipoondi city in Cauvery deltaic region, Tamil Nadu, India. *Desalination and Water Treatment*. 2016;57(26):12058-73.
- [26]. Abbasnia A, Yousefi N, Mahvi AH, Nabizadeh R, Radfard M, Yousefi M, et al. Evaluation of groundwater quality using water quality index and its suitability for assessing water for drinking and irrigation purposes: Case study of Sistan and Baluchistan province (Iran). *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2019;25(4):988-1005.
- [27]. World Health Organization (WHO). *Information Products: Water, Sanitation and Health*. World Health Organization (WHO); 2004.
- [28]. Kaklauskas A, Zavadskas EK, Raslanas S, Ginevicius R, Komka A, Malinauskas P. Selection of low-e windows in retrofit of public buildings by applying multiple criteria method COPRAS: A Lithuanian case. *Energy and buildings*. 2006;38(5):454-62.
- [29]. Zavadskas E, Kaklauskas A, editors. *Determination of an efficient contractor by using the new method of multicriteria assessment*. International Symposium for "The Organization and Management of Construction" Shaping Theory and Practice; 1996.
- [30]. Pearl J. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems*. Representation & Reasoning. Morgan Kaufmann Publishers San Mateo; 1988.
- [31]. Aguilera P, Fernández A, Fernández R, Rumí R, Salmerón A. Bayesian networks in environmental modelling. *Environmental Modelling & Software*. 2011;26(12):1376-88.
- [32]. Uusitalo L. Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modelling. *Ecological modelling*. 2007;203(3-4):312-8.
- [33]. Farmani R, Henriksen HJ, Savic D. An evolutionary Bayesian belief network methodology for optimum management of groundwater contamination. *Environmental Modelling & Software*. 2009;24(3):303-10.
- [34]. Reza Nemati A, Nemati B, Reza Pirestani M. Qualitative monitoring of Saveh plain's Groundwater based on water quality index (WQI). *European Online Journal of Natural and Social Sciences: Proceedings*. 2014;3(3 (s)):pp. 236-41.