



## مدیریت آب و آبیاری (نشریه علمی)

دوره ۱۱ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۰  
صفحه‌های ۵۲۷-۵۴۰

DOI: 10.22059/jwim.2021.325784.892

مقاله پژوهشی:

### ارزیابی پیش‌بینی هیدروگراف آبخوان با رویکرد شبکه‌های بیزین منفرد و یکپارچه

حمید کاردان مقدم<sup>۱\*</sup>، عباس روزبهانی<sup>۲</sup>

۱. استادیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، ایران.

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

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۰۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۸

#### چکیده

بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک به‌عنوان یک عامل اساسی در توسعه و چشم‌انداز منطقه حائز اهمیت است. این موضوع سبب شده تا استفاده از رویکردهای مختلف جهت ارزیابی و تعیین میزان حجم منابع آب زیرزمینی به‌کار گرفته شود. در این مطالعه از شبکه بیزین که یک شبکه احتمالاتی براساس داده‌های ثبت شده است، به‌منظور کاهش عدم قطعیت‌ها استفاده شد. استفاده از دو حالت منفرد بیزومترها و ترکیبی بیزومترها در برآورد هیدروگراف آبخوان با استفاده از شبکه بیزین با استفاده از نرم‌افزار HUGIN v8.3 مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور پیاده‌سازی دو رویکرد شبیه‌سازی با شبکه بیزین، شبیه‌سازی حالت منفرد برای هر چاه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی برای حالت یکپارچه برای پنج چاه مشاهده‌ای در سطح آبخوان انجام گرفت. نتایج دو حالت شبیه‌سازی برای دو سال پیش‌بینی روند آبی آبخوان حاکی از بالابودن میزان شاخص‌های آماری بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی است. نتایج نهایی در روش منفرد حاکی از متوسط ضریب تبیین ۰/۸۵ با میانگین مجذور خطای ۰/۴۲ و در روش یکپارچه با متوسط ضریب تبیین ۰/۸ با میانگین مجذور خطای ۰/۲۵ است. هم‌چنین نتایج نشان داد که استفاده از روش بیزین جهت پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی و حجم آبخوان دقت بالایی داشته و استفاده از رویکرد منفرد برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در هر چاه مشاهده‌ای و روش یکپارچه در پیش‌بینی هیدروگراف آبخوان دارای دقت مناسبی است.

**کلیدواژه‌ها:** آب زیرزمینی، شبکه‌های بیزین، شبکه منفرد، شبکه یکپارچه.

## Evaluation of Aquifer Hydrograph Prediction with Approaches of Single and Integrated Bayesian Networks

Hamid Kardan Moghaddam<sup>1\*</sup>, Abbas Roozbahani<sup>2</sup>

1. Assistant Professor, Department of Water resources research, Water research institute, Ministry of energy, Tehran, Iran.

2. Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: June 18, 2021

Accepted: September 27, 2021

#### Abstract

Utilization of groundwater resources in arid areas is an important factor in the development and landscape of the region. This has led to the use of different approaches to assess and determine the volume of groundwater resources. In this study, Bayesian network, which is a probabilistic network based on recorded data, was used to reduce uncertainties. The use of two single states of piezometers and a combination of piezometers in the estimation of aquifer hydrographs using Bayesian network was evaluated using HUGIN v8.3 software. In order to implement two simulation approaches with Bayesian network, single state simulation for each observation well and integrated mode simulation for five observation wells at the aquifer level were performed. The results of two simulation models for two years predicting the future trend of the aquifer indicate a high level of statistical indicators between observational data and simulation. The final results in the single method indicate an average explanation coefficient of 0.85 with an average error square of 0.42 and in the integrated method with an average explanation coefficient of 0.8 with an average error square of 0.25. The results also showed that the use of Bayesian method to predict groundwater level and aquifer volume is highly accurate and the use of a single approach to predict groundwater level in each observation well and integrated method in predicting aquifer hydrograph has good accuracy.

**Keywords:** Bayesian networks, Groundwater, Integrate network, Single network.

## مقدمه

با توجه به حجم بالای بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک، مدیریت بهره‌برداری و شناسایی میزان پتانسیل آن جهت توسعه پایدار بسیار حائز اهمیت است. لذا کلیه برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و درازمدت تأمین آب در این مناطق، بر مبنای حجم آب زیرزمینی در دسترس است (Kardan moghaddam & Roozbahani, 2015). کنترل و پایش حجم آب زیرزمینی با استفاده از سطح آب مشاهده‌شده در چاه‌های مشاهده‌ای یک آبخوان جهت مدیریت تنش‌های هیدرولوژیکی بسیار حائز اهمیت است. تاکنون مدل‌ها و روش‌های مختلفی در برآورد سطح آب زیرزمینی و به‌دنبال آن حجم آبخوان ارائه شده‌اند. برخی از این مدل‌ها عددی بوده که با روش‌های تفاضل محدود و اجزای محدود و استفاده از ابزارها و الگوریتم‌های فراکوشی توانسته‌اند تا حدودی عدم قطعیت موجود در برآورد سطح آب زیرزمینی را کاهش دهند. شناسایی رفتار و الگوی تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌تواند راه‌کار مناسبی جهت برنامه‌ریزی باشد. استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، نروفازی، روش‌های رگرسیونی، سری زمانی و غیره مورد توجه پژوهش‌گران زیادی برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی بوده است که هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی در نوع خود نیز هستند (Kardan Moghaddam et al., 2021). سادگی فرایند شبکه عصبی مصنوعی و گسترش آن راه‌حل قوی در مدل‌های غیرخطی و غیرمانا ارائه داده که مورد استفاده پژوهش‌گران زیادی قرار گرفته است. پژوهش‌های متعددی برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی و برآورد حجم آبخوان جهت مدیریت و توسعه پایدار صورت گرفته است و مقایسات متعددی بین روش‌های مختلف صورت گرفته است. Sahoo & Madan (2013) مقایسه دو روش رگرسیون چندگانه خطی و شبکه عصبی مصنوعی را در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی منطقه کنان انجام دادند، نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از دقت بالای

روش شبکه عصبی مصنوعی در برآورد زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی است. Ghose et al. (2019) Mirarabi et al. (2017) Wen et al. (2017) و Huang et al. (2017) از جمله مطالعاتی بودند که با استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی، شبیه‌سازی عمق آب زیرزمینی را انجام دادند و نتایج مناسبی در این زمینه به‌دست آوردند. با توجه به تنوع داده‌های پیش‌بینی‌کننده سطح آب زیرزمینی در مطالعات مختلف، در این مطالعه ضمن پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی و هیدروگراف آبخوان برای کلیه چاه‌های مشاهده‌ای منطقه مورد مطالعه، ارزیابی اهمیت پارامترهای ورودی جهت پیش‌بینی نیز انجام می‌گیرد. بر این اساس پارامترهای بارش، دما، تبخیر، سطح آب زیرزمینی، تخلیه از منابع آب زیرزمینی و تغذیه منابع آب زیرزمینی به‌عنوان پارامترهای پیش‌بینی‌کننده برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن گام زمانی ماهانه تحلیل می‌شود.

استفاده از شبکه‌های بیزین در پیش‌بینی به‌ویژه در فرایندهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی رشد روزافزونی داشته که از آن جمله Biondi & Luca (2012) با استفاده از شبکه‌های بیزین اقدام به ارزیابی عدم قطعیت موجود در پیش‌بینی زمان واقعی رخداد سیلاب در جنوب ایتالیا کردند. نتایج آن‌ها حاکی از ترکیب عدم قطعیت در پارامترهای توزیع بارندگی و سیلاب مشاهده‌شده می‌باشد. Ahmadi et al. (2016) با مقایسه دو روش شبکه بیزین و ماشین بردار در پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از الگوی جریان روزقبل شبیه‌سازی را انجام دادند و در نهایت براساس شاخص‌های آماری روش بردار ماشین را مناسب‌تر معرفی کردند. Noorbeh et al. (2020) با استفاده از شبکه بیزین پیش‌بینی جریان ورودی به سد زاینده‌رود را در دو رویکرد ماهانه و سالانه مورد بررسی قرار دادند. نتایج پیش‌بینی عددی در رویکرد سالانه نشان داد که تأخیر دو ماه در پارامترهای ورودی به شبکه نتایج مناسب‌تری با مقدار خطای نسبی ۰/۲۱ و ضریب همبستگی ۰/۶۲ بین داده‌های

بالادست و پایین‌دست جریان را عملاً برقرار کرده و نقش یک چاه مشاهده‌ای در بالادست آبخوان در آن مشهود است. رویکرد یکپارچه شبکه بیزین این امکان را فراهم می‌کند برای مدیریت منابع آب زیرزمینی، راه‌کارهای تعادل‌بخشی براساس موقعیت و شرایط واقعی آبخوان تبیین شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز بیرجند از حوزه آبریز کویر لوت در استان خراسان جنوبی بین طول جغرافیایی  $43^{\circ} 58'$  تا  $45^{\circ} 59'$  و عرض جغرافیایی  $34^{\circ} 32'$  تا  $33^{\circ} 08'$  با وسعت  $3455$  کیلومترمربع که  $1045$  کیلومتر دشت و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد، قرار دارد. اقلیم منطقه خشک با میانگین بارش  $30$  ساله  $156/7$  میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالانه  $16/4$  درجه سانتی‌گراد است. آبخوان بیرجند از نوع آزاد که از نواحی شمالی تغذیه و در جنوب تخلیه و سطح ایستابی در گستره آبخوان بین حداکثر  $139$  متر در نواحی شمالی و شرقی تا حداقل  $7/5$  متر در جنوب غربی تغییر می‌کند. با توجه به متکی بودن منطقه به آب زیرزمینی به‌عنوان تنها منبع تأمین آب در کلیه بخش‌ها و روند افت سطح ایستابی و برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، لزوم مدیریت برداشت در سفره آب زیرزمینی بسیار حائز اهمیت است. شکل (۱) موقعیت منطقه طرح در کشور و موقعیت چاه مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. بررسی روند افت آب زیرزمینی با بررسی سطح آب چاه مشاهده‌ای در آبخوان بیرجند مطابق شکل (۲) نشان می‌دهد که هر ساله بر میزان افت افزوده می‌شود و تا پایان سال آبی  $94-1393$  حدود  $9/22$  میلیون مترمکعب کسری آب در مخزن آب زیرزمینی وجود دارد، به‌طوری‌که با ادامه روند افت و برداشت بی‌رویه سبب خشک‌شدن منطقه خواهد شد (Kardan Moghaddam *et al.*, 2018). در جدول (۱) ویژگی‌های چاه‌های مشاهده‌ای در این منطقه ارائه شده است.

مشاهداتی و پیش‌بینی شده حاصل می‌شود. در رویکرد پیش‌بینی ماهانه، الگوی شماره  $20$  با داشتن پارامترهای ورودی جریان انتقالی از کوه‌رنگ، بارش، میانگین ارتفاع برف و جریان طبیعی شده رودخانه با میزان خطای نسبی  $0/48$  و همبستگی  $0/7$  به‌عنوان الگوی منتخب برای پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد به‌دست آمد. مطالعات در استفاده از شبکه بیزین برای پیش‌بینی فرایندهای هیدرولوژیکی رشد زیادی داشته است به‌گونه‌ای که Abbasi *et al.* (2020) در پیش‌بینی خشکسالی، Karimi rizvandi *et al.* (2020) پتانسیل‌یابی مناطق بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی و Yunana *et al.* (2021) در ارزیابی ریسک مورد استفاده قرار دادند.

بررسی مطالعات انجام‌شده حاکی از دقت مناسب استفاده از روش شبکه بیزین برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی فرایندهای هیدرولوژیکی است، اما یکی از مهم‌ترین موضوعات در این نوع شبیه‌سازی، در نظر گرفتن ابعاد و چارچوب فرایندهای هیدرولوژیکی از نظر یکپارچگی است. بررسی رویکردهای مختلف به‌کار گرفته‌شده در شبیه‌سازی عمق آب زیرزمینی حاکی از این موضوع است که شبیه‌سازی براساس متغیرهای وابسته به هرچاه مشاهده‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است و نقش و تأثیر موقعیت مکانی و اثرات احتمالی چاه‌های بالادست و پایین‌دست بررسی نشده است. این موضوع در شبیه‌سازی‌های جریان‌ات آب سطحی نیز مورد بررسی قرار نگرفته است. این مطالعه برای نخستین بار از شبکه‌های بیزین با استفاده از دو رویکرد صریح و یکپارچه در آبخوان با ساختارهای آموزش برای پیش‌بینی احتمالاتی سطح آب زیرزمینی استفاده شده و قابلیت آن در آبخوان بیرجند به‌عنوان یکی از محدوده‌های مطالعاتی بحرانی کشور مورد ارزیابی قرار گرفته است استفاده از رویکرد یکپارچه ضمن برقراری ارتباط بین اجزای مختلف در آبخوان، پیوستگی جریان آب زیرزمینی و ارتباط بین

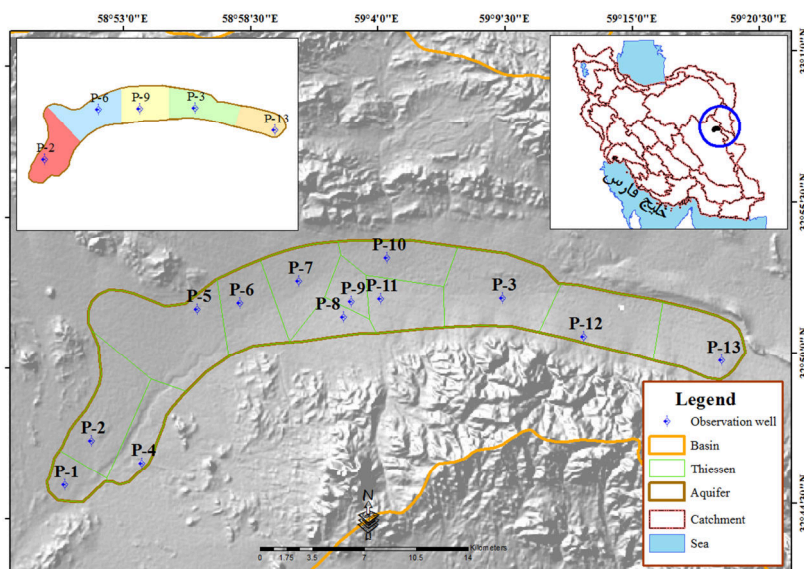


Figure 1. Case study and integrated network

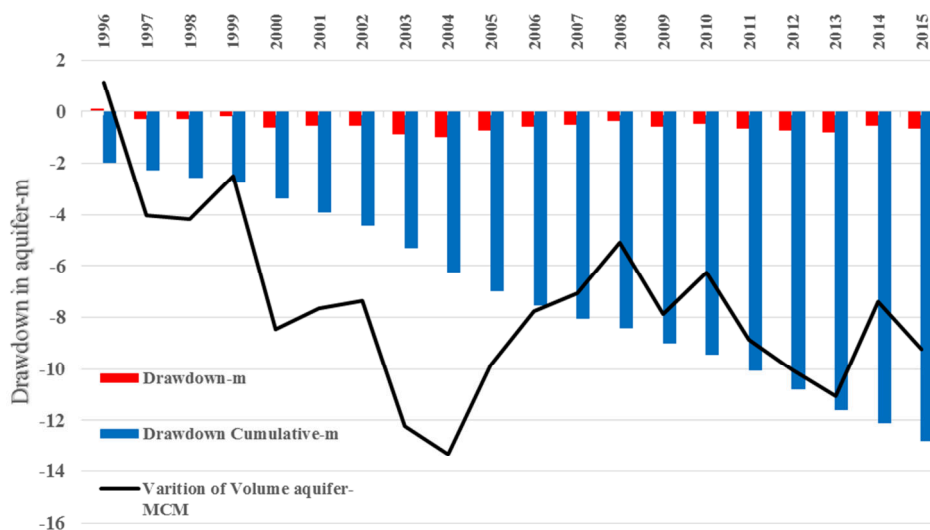


Figure 2. Changes in the volume and depletion of Birjand aquifer

Table 1. Characteristics of observation wells

Name obs	UTM X	UTM Y	COD	Water table-m
Fedeshk	672033	3626393	P-1	10
Nasar Abad	673802	3629361	P-2	10
Siuojan	683819	3638673	P-6	47.5
Mohammadiyeh N	687790	3640119	P-7	51.5
Mohammadiyeh S	690820	3637697	P-8	62.1
Kavir tayer	693320	3638923	P-11	58
Rakat N	693718	3641657	P-10	66.9
Haji Abad S	701534	3638970	P-3	63.3
Bojd	716280	3634789	P-13	62.5
Taghab	680949	3638227	P-5	56.2
Khosef	677230	3627836	P-4	14.8
Sarab	707009	3636374	P-12	125.1
Mohammadiyeh NE	691322	3638761	P-9	64.3

### شبکه بیزین

انجام یک فرایند پیش‌بینی دقیق به‌منظور مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی یکی از چالش‌های مهم در مدل‌سازی است. وجود عدم قطعیت در فرایندهای مدل‌سازی شامل، خطا در ساختار مدل، خطا در پارامترهای مدل و خطا در داده‌های ورودی می‌باشد (Montanari et al., 2009). امروزه استفاده از روش‌های مختلف به‌منظور کاهش عدم قطعیت توانسته است دقت فرایندهای مدل‌سازی را افزایش دهد. شبکه‌های بیزین ابزار قوی جهت فرایند تصمیم‌گیری و در نظرگرفتن سناریوهای اقتصادی-اجتماعی می‌باشد (Roosbahani et al., 2018). شبکه بیزین یک مدل گرافیکی احتمالاتی بین متغیرها و احتمالات به‌صورت یک گراف مستقیم و بدون چرخه در ارتباط می‌باشد. مبنای این روش احتمالات وابسته (تئوری بیز) که توسط توماس بیز در قرن هجده میلادی ارائه داده شد، می‌باشد. سپس این تئوری توسط لاپلاس گسترش یافت و در قالب منطق تئوری احتمالات قرار داده شد. اگر E و F دو رویداد مفروض باشند به‌گونه‌ای که  $P(E) \neq 0$  و  $P(F) \neq 0$ ، در این شرایط احتمال شرطی E با رخداد F به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P(E|F) = \frac{P(F|E)P(E)}{P(F)} \quad (1)$$

شبکه‌های بیزین امکان محاسبات رو به جلو و رو به عقب را برای تحلیل‌گر ایجاد می‌کنند. در واقع نه تنها از تجمیع وضعیت پارامترهای علت می‌توان به وضعیت معلول رسید، بلکه در این روش با در اختیارداشتن وضعیت معلول یا همان پارامتر پیش‌بینی‌شده، با یک فرایند بازگشت به عقب، امکان محاسبه وضعیت عوامل تأثیرگذار وجود داشته و به بیان دیگر می‌توان تعیین نمود که میزان تأثیرگذاری هر عامل بر خروجی نهایی چقدر خواهد بود. استفاده از شبکه بیزین با توجه به رویکرد

احتمالات جهت مدل‌سازی عدم قطعیت کاربرد قوی دارد. شبکه بیزین از مجموعه گره‌های متصل به هم که دو حالت وقوع و عدم وقوع یک فرایند را بررسی می‌کنند، تشکیل شده‌اند. بر این اساس مطابق رابطه (۲) متغیرهای A و B نقش مهمی در پیش‌بینی یا وقوع متغیر وابسته C دارند. A و B علت وقوع C می‌باشند و افزایش یا کاهش آن، معلول آن دو است. هم‌چنین متغیر B خود وابسته به متغیر A است.

$$P(A, B, C) = P(A).P(B|A).P(C|A, B) \quad (2)$$

شبکه بیزین در دهه اخیر در مطالعات مختلف به‌دلیل سرعت بالا، نمایش گرافیکی، قرار نداشتن حداقلی برای داده‌ها، سادگی در به‌کارگیری، ترکیب منابع مختلف داده و تحلیل عدم قطعیت‌ها، رشد چشم‌گیری داشته است (Nash & Hannah, 2011).

### مدل‌سازی شبکه بیزین

شبکه بیزین بر مبنای تئوری احتمالاتی به‌منظور بررسی عدم قطعیت و کاهش آن در شرایط متغیر داده‌ها به‌کار برده می‌شود. شبکه‌های بیزین با قابلیت اثرگذاری داده‌های ورودی و خروجی به‌صورت احتمالاتی، اثر متقابل روی هم‌دیگر را در ساختار آموزش به‌کار می‌برد (Moghaddam et al., 2019). آموزش ساختار شبکه به معنای تعیین متغیرهای وابسته، مستقل و یافتن ارتباط‌های ممکن بین متغیرهایی است که روابط علت و معلولی آن‌ها بر اساس داده‌های مشاهداتی (داده‌های واسنجی) قابل تشخیص است. مدل‌های مختلفی جهت آموزش ساختار به‌کار برده می‌شود که اصول آموزش بر مبنای دو حالت منفرد و خوشه‌بندی متغیرهای ورودی به شبکه طرح ریزی شده است. مدل‌های کامپیوتری متعددی جهت شبیه‌سازی و استفاده از شبکه بیزین در فرایندهای مختلف ارائه شده‌اند از جمله Netica، Hugin، Matlab و غیره در

ارائه می‌دهد (Tabesh et al., 2018). در این الگوریتم فرایند آموزش احتمالات شرطی بین متغیرها با استفاده از داده‌های ورودی مشاهداتی انجام می‌گیرد. در صورتی که جدول‌های احتمالات شرطی شبکه بیزین دارای اطلاعات اولیه باشد (توزیع احتمالاتی شرطی اولیه برای متغیرها تعریف شده باشد)، نتایج به دست آمده از داده‌های ورودی به الگوریتم با این احتمالات اولیه ترکیب می‌شود. الگوریتم EM با انجام تعدادی تکرار نتایج نهایی احتمالات شرطی را مشخص می‌کند. در هر تکرار لگاریتم احتمال داده مشاهداتی ورودی مربوط به توزیع احتمالاتی محاسبه می‌شود و الگوریتم سعی می‌کند که این مقدار را بیشینه نماید. به منظور ارزیابی استفاده از مدل بیزین جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی مراحل کار به صورت شکل (۳) در دو حالت منفرد و یکپارچه ارائه شده است.

### مدل‌سازی آبخوان با استفاده از شبکه بیزین

#### مدل‌سازی در حالت منفرد

با توجه به این که سطح آب زیرزمینی نقش مهمی در مطالعات بیلان آب زیرزمینی یک منطقه دارد و حجم آب قابل استحصال براساس آن برآورد می‌شود، لذا پارامترهای مختلف اقلیمی، محیطی و غیره تأثیر مستقیم بر افزایش یا کاهش آن دارد. در این پژوهش از پنج پارامتر ورودی برای مدل‌سازی در شبکه بیزین استفاده شد. با توجه به ارزیابی نتایج استخراجی از پژوهش‌های گذشته (Mirarabi et al., 2019; Yue et al., 2017; Nourani & Gong et al., 2015; Mouasavi, 2016) میزان تبخیر از سطح آزاد، سطح آب زیرزمینی در دوره قبل، میزان بارندگی، متوسط دمای و برداشت از آب زیرزمینی به عنوان پارامترهای ورودی به مدل برای شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی تعریف شد. به منظور تعیین سری زمانی

این مطالعه از شبیه‌سازی گرافیکی Hugin 8.3 که یکی از مدل‌های فراگیر در شبکه بیزین است که دارای شش ساختار آموزش برای حالت خوشه‌بندی و دو ساختار آموزش برای حالت منفرد است. به منظور مدل‌سازی جهت پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با توجه به ساختارهای آموزشی موجود، سناریوها مختلفی طراحی می‌شود که مبنای نتایج نهایی طرح است. سناریو براساس نحوه ورود متغیرهای ورودی به صورت منفرد و یکپارچه تقسیم‌بندی شد. در ورود داده‌ها به مدل بیزین در حالت منفرد از تابع توزیع احتمال داده‌ها در طی بازه زمانی مدل‌سازی استفاده می‌شود و با توجه به احتمال رخداد فرایند مقدار موردنظر پیش‌بینی می‌شود.

الگوریتم‌های PC و NPC جهت آموزش ساختار مدل‌سازی در مدل‌های بیزین به عنوان گزینه‌های مناسب انتخاب و در این مطالعه از الگوریتم PC جهت آموزش در شبکه‌های بیزین براساس طرح اسپرتر با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری مبتنی بر محدودیت عمل می‌کند. ایده اصلی این الگوریتم، استخراج مجموعه‌ای از استقلال و وابستگی عبارت‌های شرطی توسط آزمون‌های آماری است که در آن استقلال شرطی بین هر جفت متغیر وجود ندارد و جهت کمان‌ها براساس استقلال شرطی تعیین می‌شود. پس از نهایی شدن ساختار شبکه بیزین جهت محاسبه احتمال سطح آب زیرزمینی با احتمال مشخص، به آموزش پارامترهای مدل و در واقع استخراج جدول‌های احتمال شرطی متغیرهای مختلف موجود در شبکه با استفاده از داده‌های موجود که در پایگاه داده‌های کالیبراسیون تنظیم شده‌اند، پرداخته می‌شود. در این پژوهش برای آموزش پارامترها از الگوریتم EM استفاده شده است. این روش توسط لاریتزن در سال ۱۹۹۶ توسعه داده شده است. این روش ابزاری منعطف برای تخمین بیشینه احتمال در مسائل مختلف شامل داده‌های ناقص

شد. بر این اساس ساختار و ارتباطات بین پارامترهای مؤثر بر سطح آب زیرزمینی منطقه مورد تحلیل و با استفاده از ساختار آموزشی PC در سطح اطمینان ۵ درصد آموزش شبکه بیزین، جهت مدل‌سازی انجام شد. یک دوره آماری ۹۷-۱۳۸۷) برای دوره آموزش و یک دوره دو ساله (۹۷-۱۳۹۶) برای صحت‌سنجی شبکه بیزین جهت شبیه‌سازی استفاده و با توجه به ساختار و ارتباطات تعریف‌شده برای پارامترهای ورودی به شبکه بیزین در نظر گرفته شد. شکل (۴) نمونه‌ای از اجرای مدل در حالت منفرد را در مرحله آموزش نشان می‌دهد.

پارامتر برداشت از آب زیرزمینی با استفاده از تیسن‌بندی آبخوان، میزان تخلیه منابع آب زیرزمینی در هر تیسن منظور شد. اطلاعات هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه شامل دما، تبخیر و بارندگی در سطح آبخوان برای دوره مدل‌سازی تهیه شد و تحلیل داده‌های پرت با استفاده از نمودار Box-Plot انجام شد. گام زمانی برای مدل‌سازی متناسب با داده‌های موجود، به صورت ماهانه انتخاب شد. با توجه به تعریف سناریوهای مدل‌سازی، در سناریو اول متغیرهای ورودی به صورت منفرد وارد مدل شد. در مدل‌سازی به روش منفرد، متغیرهای ورودی به صورت پیوسته وارد مدل

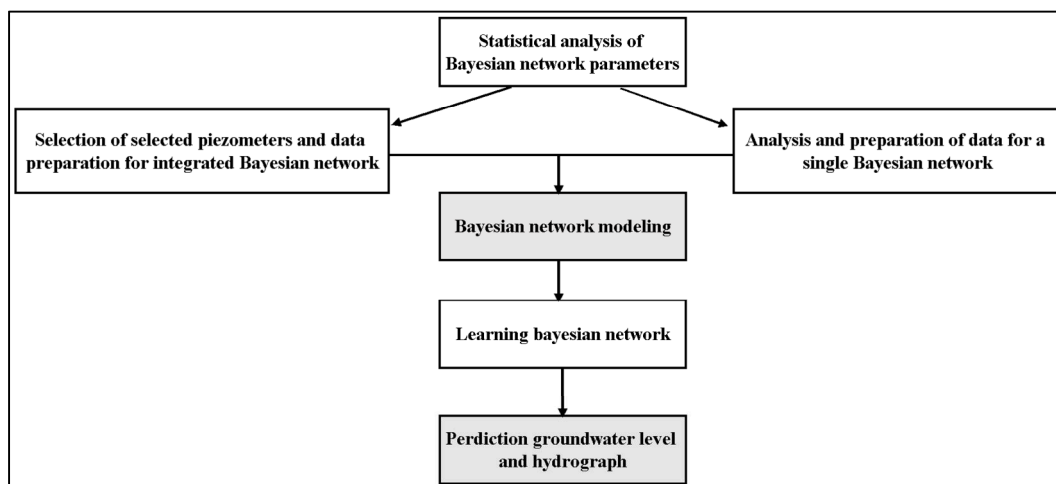


Figure 3. Methodology of this study

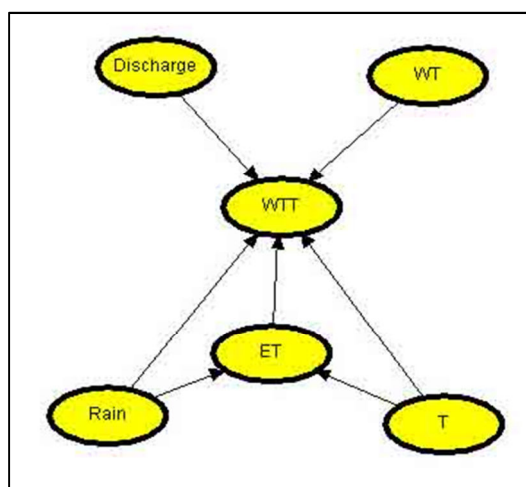


Figure 4. Structure of input variables to the HUGIN model in a single scenario

آب زیرزمینی در سطح آبخوان بیرجند و انجام محاسبات برای تمامی چاه مشاهده‌ای، برآورد تغذیه شبکه بیزین یکپارچه، با زیرحوزه‌بندی هیدرولوژیکی در بالادست هر محدوده تیسن چاه‌های مشاهده‌ای منتخب و برآورد نفوذ ناشی از رواناب با در نظر داشتن نفوذ ناشی از بارندگی و آب برگشتی از محدوده اراضی کشاورزی برآورد شد. به دلیل راه‌اندازی سیستم تصفیه فاضلاب شهری آب برگشتی از بخش شرب در نظر گرفته نشد. به‌منظور برآورد تخلیه از آبخوان برای شبکه بیزین یکپارچه، حجم آب برداشتی در محدوده هر تیسن با توجه به چاه‌های منطقه برآورد شد و در فرایند مدل‌سازی لحاظ شد. شکل (۵) نمای کلی شبکه بیزین استفاده‌شده در حالت یکپارچه آبخوان را نشان می‌دهد.

در آن، پارامترهای مدل‌سازی در شبکه بیزین عبارتند از ET: تبخیر از سطح آزاد در زمان  $T_t$ ، Rain: متوسط بارندگی ماهانه در زمان  $T_t$ ، T: متوسط دمای ماهانه در زمان  $T_t$ ، D(i): برداشت از آب زیرزمینی در زمان  $T_t$  برای چاه مشاهده‌ای نام، WT(i): سطح آب زیرزمینی در زمان  $T_t$  برای چاه مشاهده‌ای نام و WTT(ii): سطح آب زیرزمینی در ماه پیش‌بینی شونده (ماه فعلی) برای چاه مشاهده‌ای نام در زمان  $T_{t+1}$ .

بر این اساس پارامترهای مدل‌سازی در شبکه بیزین جهت پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی عبارتند از ET: تبخیر از سطح آزاد در زمان  $T_t$ ، Rain: متوسط بارندگی ماهانه در زمان  $T_t$ ، T: متوسط دمای ماهانه در زمان  $T_t$ ، Discharge: برداشت از آب زیرزمینی در زمان  $T_t$ ، WT: سطح آب زیرزمینی در زمان  $T_t$  و WTT: سطح آب زیرزمینی در ماه پیش‌بینی شونده در زمان  $T_{t+1}$ .

### مدل‌سازی شبکه بیزین یکپارچه

با توجه به این‌که هر یک از چاه مشاهده‌ای واقع در بالادست آبخوان روی چاه مشاهده‌ای پایین‌دست اثر می‌گذارد، لذا در این پژوهش از شبکه بیزین یکپارچه به‌منظور اثرگذاری کلیه پارامترهای یک آبخوان در روند پیش‌بینی آبخوان در حالت منفرد استفاده شد. بدین منظور با توجه به محدودیت مدل Hugin 8.3 در پذیرش تعداد متغیرهای ورودی به شبکه بیزین، از تعداد پنج حلقه چاه مشاهده‌ای منتخب در سطح آبخوان که دارای طول دوره آماری مناسب، هم‌خوانی نوسانات سطح آب زیرزمینی با هیدروگراف آبخوان و پراکنش مکانی قابل‌قبول در سطح آبخوان جهت پهنه‌بندی مناسب بودند، انتخاب شد. با توجه به بیان

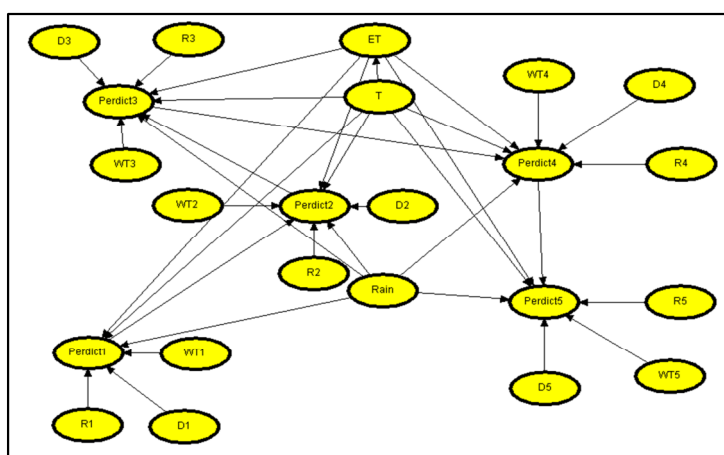


Figure 5. The structure of input variables to the HUGIN model is integrated in the Bayesian network



### شاخص‌های ارزیابی آماری خطا

با توجه به اهمیت دقت در ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف پیش‌بینی، نیاز به صحت‌سنجی آماری نتایج است که بدین منظور از چهار شاخص ضریب تبیین ( $R^2$ )، میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAPE) و شاخص نش ساتکلیف (NASH) استفاده شد.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (4)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - S_i}{O_i} \right| \quad (5)$$

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

در این روابط  $O_i$  و  $S_i$  به ترتیب آامین داده شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقدار واقعی (مشاهده‌شده)،  $\bar{O}$  و  $\bar{S}$  به ترتیب میانگین کل داده‌های  $O_i$  و  $S_i$  در جامعه آماری،  $n$  تعداد نمونه‌ها است.

### نتایج و بحث

#### نتایج شبیه‌سازی در حالت منفرد

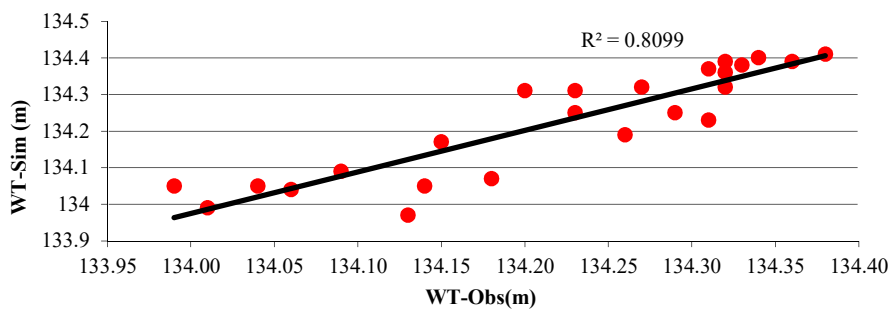
یکی از مهم‌ترین مراحل در فرایند مدل‌سازی استفاده از الگوریتم‌های مختلف جهت تعیین متغیرهای ورودی، گام‌های زمانی مؤثر، طراحی شبکه و غیره می‌باشد. در این مطالعه به منظور بررسی بهتر در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی، داده‌های ماهانه سطح آب زیرزمینی، تبخیر، دما، بارندگی و برداشت از آب زیرزمینی در طی یک دوره آماری ۱۰ ساله وارد شبکه بیزین شد. این پارامترها به دلیل تأثیر مستقیم بر سطح آب زیرزمینی انتخاب شدند. در این شبیه‌سازی متغیرهای ورودی تعداد ۱۰۸

ترکیب از متغیرهای ورودی به شبکه بیزین وجود دارد که با توجه به تعریف سطح اطمینان ۵ درصد و در نظر داشتن عدم قطعیت موجود بین متغیرهای ورودی شبکه طراحی و شبیه‌سازی شد. خطای همگرایی ۰/۰۰۱ در مدل برای انتخاب بهترین شبکه در هر بار اجرای برنامه و خطای آماری برگزیده شد. مدل‌سازی شبکه بیزین تحت شرایط منفرد منفرد با هدف شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی در تعداد ۱۳ چاه مشاهده‌ای آبخوان بیرجند انجام شد. نتایج خروجی از سناریو منفرد نشان داد که همبستگی بالایی بین سطح آب مشاهداتی و سطح آب شبیه‌سازی با استفاده از شبکه بیزین وجود دارد. در جدول (۲) پارامترهای آماری بین سطح آب زیرزمینی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در ۱۳ حلقه چاه مشاهده‌ای موجود در منطقه را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از دقت بالای مدل شبکه بیزین در حالت منفرد برای شبیه‌سازی در اکثر چاه مشاهده‌ای‌ها می‌باشد. در شکل (۶) نیز همبستگی در چاه مشاهده‌ای شماره ۲، ۵، ۱۰ و ۱۳ همراه با ضریب تبیین هر یک نشان داده شده است.

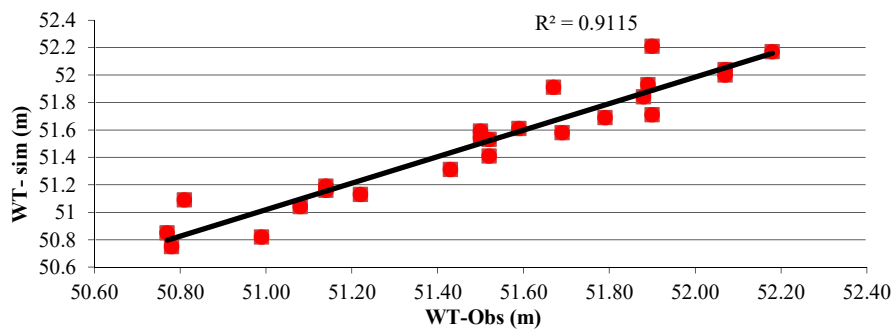
بررسی نتایج به‌دست‌آمده از دقت و ارزیابی صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده حاکی از این موضوع است که چاه‌های مشاهده‌ای که در بخش میانی آبخوان قرار دارند دارای دقت مناسب‌تری نسبت به چاه‌های ورودی و خروجی آبخوان هستند. دو حلقه چاه مشاهده‌ای P1 و P4 در بخش خروجی آبخوان و چاه مشاهده‌ای P13 در ورودی آبخوان قرار دارند. تحلیل وضعیت تغییرات تراز آب زیرزمینی در این سه حلقه چاه تابع جریان‌ات زیرزمینی ورودی و خروجی بوده، لذا با توجه به اهمیت این حجم‌ها در تراز آب زیرزمینی این سه حلقه دارای دقت پایین‌تری نسبت به سایر چاه‌های مشاهده‌ای در آبخوان است.

Table 2.  $R^2$  coefficient between water level observed and simulated in the aquifer

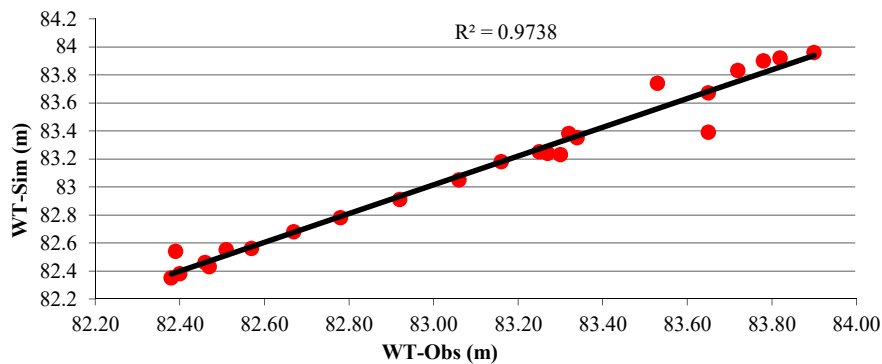
Obs	$R^2$	RMSE	MAPE	NASH	Obs	$R^2$	RMSE	MAPE	NASH
P1	0.57	0.75	0.074	0.74	P8	0.98	0.27	0.007	0.9
P2	0.8	0.47	0.042	0.81	P9	0.97	0.28	0.006	0.9
P3	0.83	0.42	0.032	0.8	P10	0.97	0.27	0.009	0.91
P4	0.46	1.12	0.06	0.66	P11	0.98	0.28	0.01	0.91
P5	0.91	0.32	0.007	0.84	P12	0.99	0.26	0.006	0.93
P6	0.83	0.37	0.019	0.79	P13	0.81	0.41	0.029	0.82
P7	0.93	0.3	0.005	0.88					



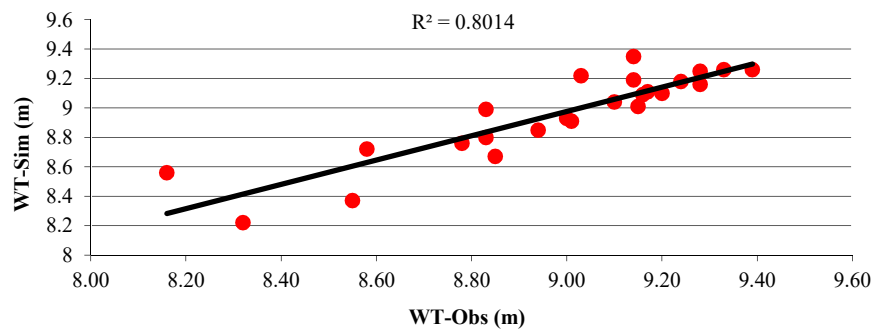
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 6. Correlation between observed and computational water levels (a. Obs 13, b. Obs 5, c. Obs 10 and d. Obs 2)

### نتایج شبیه‌سازی در حالت یکپارچه

با توجه به محدودیت مدل Hugin v8.3 در استفاده از تعداد بالای متغیرهای ورودی و بالارفتن حجم محاسبات و کاهش دقت شبیه‌سازی، تعداد پنج چاه مشاهده‌ای در محدوده آبخوان بیرجند که مبین شرایط کل آبخوان است جهت شبیه‌سازی استفاده شد. بر این اساس کلیه متغیرهای ورودی و خروجی برای مدل‌سازی با استفاده از شبکه بیزین برای هر یک از این پنج چاه مشاهده‌ای منتخب محاسبه و شبیه‌سازی در حالت منفرد انجام پذیرفت. با توجه به متغیرهای ورودی برای حالت یکپارچه، تنها ارتباط بین چاه مشاهده‌ای نیز براساس جهت جریان آب زیرزمینی غالب منطقه تعریف شد. بدین صورت که تغییرات سطح آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای بالادست روی سطح آب زیرزمینی در پایین دست نیز اثر گذاشته و یک ساختار شاخه-ای و یکپارچه را ایجاد می‌کند. پس از آموزش مدل با استفاده از الگوریتم P.C شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی انجام و در پنج چاه مشاهده‌ای مورد بررسی، همبستگی بین سطح آب زیرزمینی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده برآورد شد. نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

**Table 3. R<sup>2</sup> coefficient index between observed and simulated groundwater level**

Observation well number	R <sup>2</sup>	NASH	MAPE	RMSE
1	0.7	0.81	0.021	0.31
2	0.42	0.66	0.035	0.44
3	0.97	0.93	0.008	0.17
4	0.95	0.94	0.007	0.19
5	0.97	0.94	0.007	0.16

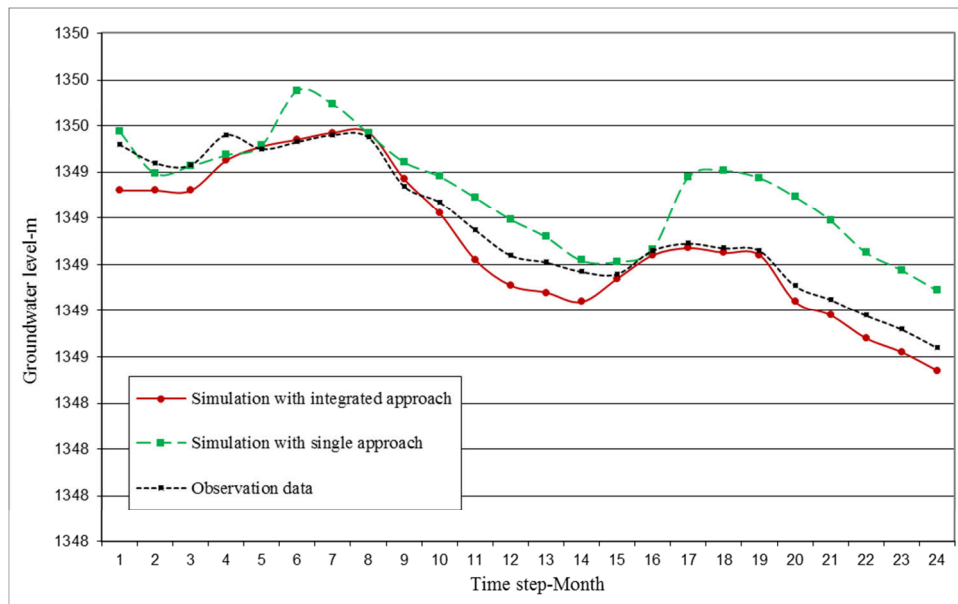
نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در حالت یکپارچه حاکی از این موضوع است که چاه‌های بخش میانی و خروجی آبخوان دارای دقت مناسبی از نظر پیش‌بینی است. ارزیابی نتایج به دست آمده حاکی از دقت بالا از نظر ضریب تبیین و خطای کم شبیه‌سازی است.

### مقایسه نتایج شبیه‌سازی در حالات مختلف شبکه بیزین

در این مطالعه عملکرد شبکه بیزین با توجه با ساختار احتمالاتی در نظر گرفته شده بین متغیرهای ورودی به شبکه، در دو حالت مورد بررسی قرار گرفته است. یک دوره صحت‌سنجی دو ساله برای ارزیابی شبکه‌های مختلف استفاده شده که با توجه به هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان بیرجند مورد تحلیل قرار گرفت. در شکل (۷) هیدروگراف آبخوان بیرجند در طی ۲۴ ماه در دو حالت شبکه بیزین منفرد و یکپارچه با داده‌های مشاهداتی ترسیم شده است. نتایج خروجی از چاه مشاهده‌ای حاکی از بالا بودن همبستگی بین سطح آب مشاهده‌شده و سطح آب شبیه‌سازی‌شده در استفاده از شبکه بیزین به منظور پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی بوده است. تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی چاه مشاهده‌ای آبخوان بیرجند با استفاده از شبکه بیزین در حالت منفرد نشان داد که میزان ضریب تبیین ۰/۷۶ در هیدروگراف آبخوان و میانگین ضریب تبیین در ۱۳ چاه مشاهده‌ای با استفاده از سناریو منفرد ۰/۸۵ و میانگین مجذور مربعات خطا ۰/۴۲ بوده که مقدار مناسبی برای پیش‌بینی است. استفاده از سناریوی یکپارچه با توجه به میزان ضریب تبیین ۰/۸۷ نتایج قابل قبولی را برای هیدروگراف آبخوان ارائه داده که با توجه به زمان کم محاسبات و عدم نیاز به شبیه‌سازی تک تک چاه مشاهده‌ای، می‌تواند به عنوان روشی با دقت بالا در نظر گرفته شود. در جدول (۴) شاخص‌های آماری همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده که نشان‌دهنده دقت شبیه‌سازی است را نشان می‌دهد. یکی از مهم‌ترین مزیت استفاده از رویکرد یکپارچه، قابلیت به کارگیری از سناریوهای مدیریتی در شبیه‌سازی است که می‌تواند با دقت بالایی وارد مدل شود. هم‌چنین بررسی وضعیت قرارگیری چاه مشاهده‌ای در رویکرد یکپارچه نشان می‌دهد که چاه مشاهده‌ای میانی و خروجی آبخوان با توجه به تأثیرپذیری از بالادست، دقت مناسبی در شبیه‌سازی داشته‌اند.

**Table 4. Statistical indicators between simulated hydrograph and real hydrograph in Birjand aquifer.**

Statistical index	Single network	Integrate network
R <sup>2</sup>	0.76	0.87
RMSE	0.37	0.29
MAPE	0.062	0.051
NASH	0.82	0.88



**Fig 7. Aquifer hydrograph with simulation of two Bayesian network modes**

ابخوان مورد استفاده قرار گرفته و این موضوع با این رویکرد می‌تواند شبیه‌سازی گردد. از طرف دیگر دقت نتایج به دست آمده در این روش نسبت به سایر روش‌ها در حد قابل قبولی بوده و می‌توان از این رویکرد با دقت مناسب شبیه‌سازی عمق آب زیرزمینی را در شرایط مختلف استفاده کرد.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه به اهمیت شبکه‌های بیزین که بر مبنای احتمالات شرطی طرح‌ریزی شده، برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی و حجم آبخوان استفاده شده است. این شبکه‌ها با در نظر گرفتن روابط احتمالاتی بین متغیرهای وابسته، ایجاد روابط علت و معلولی می‌کند که با آموزش ساختار قادر به شبیه‌سازی نتایج در شرایط مختلف

بررسی نتایج شبیه‌سازی هیدروگراف آبخوان در دو حالت منفرد و یکپارچه حاکی از دقت مناسب روش یکپارچه در پیش‌بینی را نشان می‌دهد. علاوه بر تحلیل آماری ارائه شده برای دقت نتایج، نمودار هیدروگراف آبخوان نیز برای یک دوره دو ساله حاکی از دقت این موضوع است. بررسی نتایج به دست آمده از این منظر حائز اهمیت است که در هر دو رویکرد نتایج مناسبی برای شبیه‌سازی عمق آب زیرزمینی در سطح آبخوان به دست آمد و با توجه به نتایج مطالعات انجام شده می‌توان از این رویکرد در سایر آبخوان‌ها نیز استفاده شود. از طرفی با توجه به رویکرد یکپارچه در استفاده از شبکه بیزین در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی می‌توان از این رویکرد برای پیاده‌سازی راه‌کارهای مختلف تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی استفاده کرد. این راه‌کارها در بخش یا کل

رویکرد یکپارچه در بخش میانی آبخوان دارای دقت مناسبی از نظر شبیه‌سازی بوده و پیاده‌سازی راه‌کارهای تعادل‌بخشی با توجه به تمرکز و تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری در این منطقه را به‌خوبی نشان خواهد داد. با توجه به دقت مناسب این رویکرد می‌توان از روش شبکه بیزین یکپارچه برای شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی و پیاده‌سازی راه‌کارهای تعادل‌بخشی در سایر آبخوان‌ها نیز استفاده کرد.

### پی‌نوشت

1. Estimation Maximization algorithm

### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

### منابع

- Abbasi, A., Khalili, K., Behmanesh, J., & Shirzad, A. (2020). Application of support vector machine and bayesian network for agricultural drought prediction. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 12(1), 107-124 (In Persian).
- Ahmadi, F. (2016). Comparing the Performance of Support Vector machines and Bayesian Networks in predicting daily river flow (case study: Barandoozchay River). *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(6), 171-186 (In Persian).
- Biondi, D., & De Luca, D. L. (2012). A Bayesian approach for real-time flood forecasting. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 42, 91-97.
- Ghose, B., Dhawan, H., Kulkarni, H., Aslekar, U., Patil, S., Ramachandrudu, M. V., ... & Prasad, E. (2018). Peoples' participation for sustainable groundwater management. In *Clean and Sustainable Groundwater in India* (pp. 215-234). Springer, Singapore.
- Gong, Y., Zhang, Y., Lan, S., & Wang, H. (2016). A comparative study of artificial neural networks, support vector machines and adaptive neuro fuzzy inference system for forecasting groundwater levels near Lake Okeechobee, Florida. *Water Resources Management*, 30(1), 375-391.
- Huang, F., Huang, J., Jiang, S. H., & Zhou, C. (2017). Prediction of groundwater levels using evidence of chaos and support vector machine. *Journal of Hydroinformatics*, 19(4), 586-606.

می‌باشد. به‌منظور پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی آبخوان بیرجند که یک آبخوان بحرانی است یک دوره ۸ ساله جهت آموزش از متغیرهای ورودی دمای متوسط ماهانه، تبخیر از سطح آزاد به‌صورت ماهانه، برداشت از آب زیرزمینی در شبکه‌بندی تیسن آبخوان به‌صورت ماهانه، متوسط تغذیه آبخوان به‌صورت ماهانه و سطح آب زیرزمینی در ماه قبل تشکیل و سطح آب زیرزمینی در ماه کنونی به‌عنوان پارامتر پیش‌بینی شوند، استفاده شد. با آموزش ساختار شبکه بیزین توسط الگوریتم PC تحت دو رویکرد یکپارچه و منفرد شبیه‌سازی تحت عدم قطعیت سطح آب زیرزمینی انجام پذیرفت. به‌منظور شبیه‌سازی در حالت منفرد از توزیع احتمالاتی داده‌های ورودی در مدل و در روش یکپارچه با توجه به محدودیت مدل نتایج پنج چاه مشاهده‌ای منتخب که بیانگر رفتار کلی آبخوان است جهت شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در حالت یکپارچه حاکی از دقت مناسب این رویکرد برای تعیین حجم آبخوان و بخصوص در حالتی که تعداد متغیرهای ورودی کم است می‌باشد. نتایج کلی حاصله از این شبیه‌سازی حاکی از همبستگی بالای سطح آب مشاهده‌شده با سطح آب پیش‌بینی‌شده هیدروگراف آبخوان است که دقت روش منفرد نسبت به روش یکپارچه بهتر ارزیابی شد. نتایج هر دو رویکرد به‌کار برده‌شده در شبیه‌سازی هیدروگراف آبخوان نیز دارای دقت بالایی از نظر شاخص‌های آماری است و روند افت سطح آب زیرزمینی را در طی دو سال به‌خوبی پیش‌بینی کرده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی متوسط ضریب تبیین در روش منفرد در ۱۳ چاه مشاهده‌ای آبخوان ۰/۸۵ با میانگین مجذور خطای ۰/۴۲ به‌دست آمد. در روش شبکه بیزین با رویکرد یکپارچه متوسط ضریب تبیین بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی آبخوان و شبیه‌سازی مقدار ۰/۸ با میانگین مجذور خطای ۰/۲۵ به‌دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که

- Kardan Moghadam, H., & Roozbahani, A. (2015). Evaluation of Bayesian networks model in monthly groundwater level prediction (Case study: Birjand aquifer). *Water and Irrigation Management*, 5(2), 139-151.
- Karimi-Rizvandi, S., Goodarzi, H. V., Afkoeieh, J. H., Chung, I. M., Kisi, O., Kim, S., & Linh, N. T. T. (2021). Groundwater-Potential Mapping Using a Self-Learning Bayesian Network Model: A Comparison among Metaheuristic Algorithms. *Water*, 13(5), 658.
- Mirarabi, A., Nassery, H. R., Nakhaei, M., Adamowski, J., Akbarzadeh, A. H., & Alijani, F. (2019). Evaluation of data-driven models (SVR and ANN) for groundwater-level prediction in confined and unconfined systems. *Environmental Earth Sciences*, 78(15), 1-15.
- Moghaddam, H. K., Milan, S. G., Kayhomayoon, Z., & Azar, N. A. (2021). The prediction of aquifer groundwater level based on spatial clustering approach using machine learning. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4), 1-20.
- Moghaddam, H. K., Moghaddam, H. K., Kivi, Z. R., Bahreinimotlagh, M., & Alizadeh, M. J. (2019). Developing comparative mathematic models, BN and ANN for forecasting of groundwater levels. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100237.
- Moghaddam, H. K., Banihabib, M. E., & Javadi, S. (2018). Quantitative sustainability analysis of aquifer system (case study: South Khorasan-Birjand aquifer). *Journal of water and soil*, 31(6).
- Montanari, A., Shoemaker, C. A., & Van de Giesen, N. (2009). Introduction to special section on Uncertainty Assessment in Surface and Subsurface Hydrology: An overview of issues and challenges. *Water Resources Research*, 45(12).
- Nash, D., & Hannah, M. (2011). Using Monte-Carlo simulations and Bayesian Networks to quantify and demonstrate the impact of fertiliser best management practices. *Environmental Modelling & Software*, 26(9), 1079-1088.
- Noorbah, P., Roozbahani, A., & Moghaddam, H. K. (2020). Annual and monthly dam inflow prediction using Bayesian networks. *Water Resources Management*, 34(9), 2933-2951.
- Nourani, V., & Mousavi, S. (2016). Spatiotemporal groundwater level modeling using hybrid artificial intelligence-meshless method. *Journal of Hydrology*, 536, 10-25.
- Sahoo, S., & Jha, M. K. (2013). Groundwater-level prediction using multiple linear regression and artificial neural network techniques: a comparative assessment. *Hydrogeology Journal*, 21(8), 1865-1887.
- Roozbahani, A., Ebrahimi, E., & Banihabib, M. E. (2018). A framework for ground water management based on bayesian network and MCDM techniques. *Water resources management*, 32(15), 4985-5005.
- Tabesh, M., Roozbahani, A., Roghani, B., Faghihi, N. R., & Heydarzadeh, R. (2018). Risk assessment of factors influencing non-revenue water using Bayesian networks and fuzzy logic. *Water Resources Management*, 32(11), 3647-3670.
- Wen, X., Feng, Q., Deo, R. C., Wu, M., & Si, J. (2017). Wavelet analysis-artificial neural network conjunction models for multi-scale monthly groundwater level predicting in an arid inland river basin, northwestern China. *Hydrology Research*, 48(6), 1710-1729.
- Yue, Q., Zhang, F., & Guo, P. (2018). Optimization-based agricultural water-saving potential analysis in Minqin County, Gansu Province China. *Water*, 10(9), 1125.
- Yunana, D., Maclaine, S., Tng, K. H., Zappia, L., Bradley, I., Roser, D., ... & Le-Clech, P. (2021). Developing Bayesian networks in managing the risk of Legionella colonisation of groundwater aeration systems. *Water Research*, 193, 116854.