



دانشگاه گواران، دانشکده مهندسی آب و خاک

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و هفتم، شماره سوم، ۱۳۹۹

۸۵-۱۰۳

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2020.17149.3264

مقاله کامل علمی - پژوهشی

پیش‌بینی شبکه پایش آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های هیبریدی سری زمانی

*عباس خاشعی سیوکی^۱، علی شهیدی^۱، یوسف رضانی^۱ و محمد ناظری تهرودی^۲

^۱دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

چکیده

سابقه و هدف: طراحی سامانه‌های پایش کیفی و کمی منابع آب همواره به‌عنوان یکی از موضوعات پیچیده در زمینه منابع آب و محیط‌زیست مطرح بوده است. جهت حفاظت منابع آب در سطح حوضه، پایش مستمر و همیشگی منابع آب از ضروریات است که در این پژوهش با استفاده از تئوری آنتروپی این پایش صورت گرفته است. هم‌چنین در این پژوهش، پیش‌بینی شبکه پایش آب زیرزمینی زیرحوضه نازلوچای ارومیه با استفاده از مدل‌های هیبریدی سری زمانی از نظر توزیع زمانی و مکانی نیز مدنظر است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش از تئوری آنتروپی جهت پایش شبکه کمی آب زیرزمینی در دو دوره آماری تاریخی (۱۳۸۰-۱۳۹۵) و به‌روز شده (۱۴۰۰-۱۳۸۰) استفاده شده است. دوره آماری به‌روز شده با استفاده از مدل‌های هیبریدی سری زمانی (CARMA-ARCH) به وجود آمده است. پس از بررسی اولیه داده‌ها و تغییرات روند سری زمانی داده‌های موردبررسی، اقدام به شبیه‌سازی داده‌ها جهت به وجود آوردن اثر متقابل پیژومترها با استفاده از رگرسیون چندمتغیره شد. پس از تأیید دقت مدل رگرسیون چندمتغیره، شاخص‌های آنتروپی در سطح دشت نازلوچای محاسبه و پهنه‌بندی شد. بعد از ارزیابی شبکه کمی آب زیرزمینی در دوره آماری ۱۳۸۰-۱۳۹۵، شبکه کمی آب زیرزمینی دشت نازلوچای برای دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳۸۰ بروزرسانی شد.

یافته‌ها: نتایج بررسی دقت مدل هیبریدی CARMA-ARCH بیانگر توانایی بالای مدل هیبریدی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی مقادیر سالانه سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه است ($RMSE=0/97$). ضریب کارایی مدل (۰/۹۶) نیز این موضوع را تأیید کرد. نتایج ارزیابی شبکه پایش کمی آب زیرزمینی در دشت نازلوچای نشان داد که بیش از ۹۹ درصد مساحت منطقه مورد مطالعه از نظر تعداد پیژومترهای موجود در وضعیت مازاد و نسبتاً مازاد قرار دارد. وضعیت دشت مورد مطالعه در دوره آماری ۱۳۸۰-۱۳۹۵ خوب بوده و انتقال اطلاعات بین پیژومترها کامل است. در دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳۸۰ تغییرات سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه کاهش یافته که پایش شبکه کمی آب زیرزمینی منطقه را تحت تأثیر قرار داده است. به‌طوری‌که از سهم مناطق دارای چاه مازاد کاسته شده و به مناطق پایش متوسط افزوده شده است.

* مسئول مکاتبه: abbaskhashei@birjand.ac.ir

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی نتایج نشان داد که با کاهش سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه انتقال اطلاعات بین چاه‌ها نیز کاسته می‌شود. به‌طوری‌که نتایج نشان‌دهنده عدم وجود انتقال اطلاعات کامل در بین پیژومترهای موجود در منطقه مورد مطالعه در دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳۸۰ است.

واژه‌های کلیدی: آنتروپی شانون، انتقال اطلاعات، بی‌نظمی، دریاچه ارومیه، مدل‌سازی

مقدمه

با توجه به تغییرات اقلیمی موجود، کاهش بارش‌ها و در پی آن کاهش دبی جریان و سطح آب زیرزمینی باعث تغییرات شدید در شبکه‌های پایش سطح آب زیرزمینی شده است. این موضوع اهمیت بررسی شبکه‌های پایش سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن تغییر اقلیم را پررنگ می‌کند. موغیر و سینگ (۲۰۰۳) و موغیر و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند از میان چهار نوع آنتروپی (مرزی، مشترک، شرطی و انتقال اطلاعات)، آنتروپی انتقال اطلاعات بهترین و مناسب‌ترین روش برای ارزیابی سامانه‌های پایش کیفی آب‌های زیرزمینی است (۱۲ و ۱۳). آن‌ها هم‌چنین با نقشه‌های خطوط هم‌مقدار آنتروپی مرزی، روشی برای ارزیابی سامانه‌های پایش کیفی آب‌های زیرزمینی ارائه کردند. سرلک (۲۰۰۵) از اطلاعات انتقالی برای انتخاب بهترین چاه پایش از یک سری مناطق با پتانسیل در طول یک رودخانه استفاده کرد. برای هر چاه جدید با پتانسیل پایش، سری زمانی داده‌های کیفیت آب با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کیفی تولید شد (۱۹). چن و همکاران (۲۰۰۸) روش کریگینگ را برای درون‌یابی داده‌های بارش ماهیانه سیزده چاه باران‌سنجی ثبت‌کننده ۸۷ ماه بارش منطقه شیمن تایوان در شبکه‌ای به ابعاد $7/5 \times 7/5$ کیلومتر استفاده کردند (۴). تعداد شبکه‌های حاصل در منطقه هفده مورد بود که در مرکز هر شبکه یک چاه قرار داده شد که مبنای بررسی‌های بعدی قرار گرفت. با توجه به آمار بارش آن‌ها از آنتروپی انتقال اطلاعات بین چاه‌ها برای اولویت‌بندی چاه‌های بارش جدید

استفاده شد. در نهایت، با توجه به ۹۵ درصد آنتروپی انتقال اطلاعات بین چاه‌ها، تعداد شش چاه برای منطقه مکان‌یابی شد. چاداولادا و همکاران (۲۰۱۱) نیز با استفاده از عدم حتمیت (آنتروپی) و با استفاده از روش‌های ذکر شده، شبکه مورد مطالعه را بهینه نمودند (۳). ژو و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از تئوری آنتروپی در چین پرداختند (۲۵). ناظری تهرودی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تئوری آنتروپی به بررسی و پایش شبکه کمی و کیفی آب زیرزمینی در دشت نقده پرداخته و با استفاده از شاخص‌های آنتروپی به بازطراحی شبکه آب زیرزمینی پرداختند (۱۶). استفاده از مدل‌های سری زمانی در پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژی نیز کمک شایانی به تولید این داده‌ها و مدیریت آن‌ها خواهد کرد. در این زمینه نیز پژوهش‌های مختلفی صورت گرفته است که می‌توان به پژوهش‌های ناظری تهرودی و خلیلی (۲۰۱۵)، عباس‌زاده افشار و همکاران (۲۰۱۷) و زینلی و خاشعی سیوکی (۲۰۱۸) اشاره کرد (۱، ۱۵ و ۲۴).

برنامه‌های پایش منابع آب می‌توانند کمیت مناسب منابع آب برای کاربری‌های مختلف را تضمین کنند. امکان تعیین محل دقیق ایستگاه‌های مازاد و یا ایستگاه‌های کمبود توسط تئوری آنتروپی وجود ندارد ولی تلفیق تئوری آنتروپی گسسته و حاشیه‌ای می‌تواند تا حدودی این امکان را ایجاد کند که در مطالعات صورت گرفته این موضوع مدنظر قرار نگرفته است. در واقع رتبه‌بندی ایستگاه‌ها از نظر انتقال اطلاعات می‌تواند در تصمیم‌گیری بهینه‌سازی پایش منابع آب باران از طریق کاهش و یا افزایش

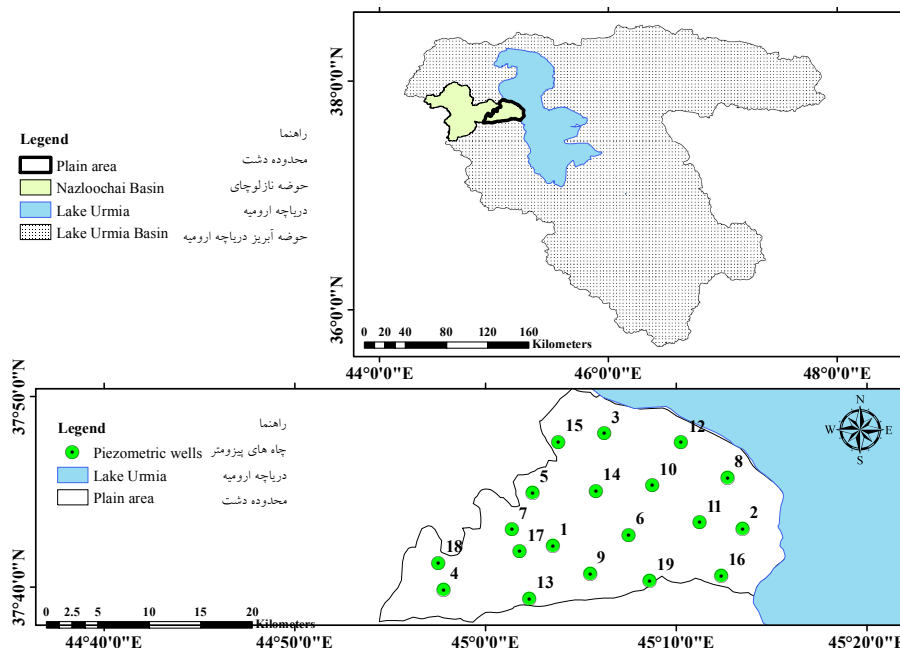
رودخانه‌های حوضه بسته ارومیه است، با وسعت تقریبی ۵۷۵۰ کیلومترمربع در میانه ناحیه شمالی حوضه قرار دارد. حوضه آبریز نازلوچای واقع در قسمت غربی حوضه دریاچه ارومیه با مساحتی برابر با ۱۸۸۱ کیلومترمربع واقع شده است. موقعیت حوضه آبریز نازلوچای و چاه‌های پیزومتری مورد مطالعه به شرح شکل ۱ و مشخصات آماری ایستگاه‌های مورد استفاده به شرح جدول ۱ ارائه گردید.

تئوری آنتروپی: برای تجزیه و تحلیل اطلاعات انواع مختلف شاخص‌های اندازه‌گیری میزان آنتروپی شامل آنتروپی حاشیه‌ای، آنتروپی مشترک، آنتروپی شرطی و آنتروپی انتقال مطالعات تعریف شده‌اند. در یک تقسیم‌بندی دیگر هرکدام از آنتروپی‌های اشاره شده در بالا را می‌توان به دودسته آنتروپی گسسته و پیوسته تقسیم‌بندی نمود. در ذیل به تعریف مختصر هرکدام از شاخص‌های آنتروپی در دو حالت پیوسته و گسسته پرداخته می‌شود (۵ و ۹).

ایستگاه‌ها چاره‌ساز باشد. علاوه بر موارد یادشده، با توجه به تغییرات اقلیمی و همچنین با توجه به وضعیت کنونی دریاچه ارومیه به نظر می‌رسد پارامترهای آب و هوایی در این حوضه تغییراتی داشته و این تغییرات در آینده نیز شدت بیشتری داشته باشد. بنابراین با توجه به تغییرات شدید سطح آب زیرزمینی در این منطقه، بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی در شرایط کنونی و شرایط پیش‌رو، پیش‌ازپیش ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین با توجه به موارد یادشده، هدف از مطالعه حاضر بررسی شبکه پایش کمی سطح آب زیرزمینی دشت ارومیه در دوره آماری تاریخی (۱۳۹۵-۱۳۸۰) پیش‌بینی (۱۴۰۰-۱۳۸۰) با استفاده از تئوری آنتروپی و مدل‌های چندمتغیره و هم‌زمان سری زمانی در حالت تلفیقی خطی و غیرخطی است. رویکرد ارائه شده تلفیقی از تئوری آنتروپی و مدل هیبریدی سری زمانی است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: دریاچه ارومیه که کانون تجمع جریان‌های سطحی مازاد بر مصرف همه



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز نازلوچای و چاه‌های موجود.

Figure 1. Location of Nazloochoi basin and studied wells.

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \ln f(x) dx \quad (2)$$

بنابراین H بیان‌کننده مقدار عدم قطعیتی است که در نتیجه عدم آگاهی کامل از یک سیستم به وجود می‌آید. این عدم قطعیت بیان‌کننده میزان هرج و مرج یا کمبود اطلاعات در خصوص یک سیستم است. آنتروپی مشترک دو متغیر x و y به صورت H(x, y) بیان می‌شود و صورت پیوسته آن اگر x و y غیروابسته باشند برابر با رابطه ۳ است:

$$H(x, y) = H(x) + H(y) \quad (3)$$

آنتروپی حاشیه‌ای: فرض کنید یک متغیر تصادفی پیوسته با تابع توزیع چگالی احتمال f(x) داشته باشیم، در این صورت احتمال اینکه x در i امین زیر بخش (بازه) قرار داشته باشد، مطابق رابطه ۱ عبارت است از:

$$P(x_i) = P(x_i - \frac{\Delta x}{2} \leq x_i \leq x_i + \frac{\Delta x}{2}) = \int_{x_i - \frac{\Delta x}{2}}^{x_i + \frac{\Delta x}{2}} f(x) dx \quad (1)$$

اگر p(x) در معادله $H(x) = -k \sum_{i=1}^{\infty} p(x_i) \ln p(x_i)$ به عنوان تعریف آنتروپی مرزی ارائه شد، به شرح رابطه ۲ قرار داده شود (۲۰):

جدول ۱- مشخصات آماری چاه‌های پیزومتری مورد استفاده واقع در حوضه آبریز نازلوچای در دوره آماری ۱۳۸۰-۱۳۹۵.

Table 1. Statistical characteristics of piezometric wells used in the Nazloochai basin in the period of 2004-2016.

پیزومتر	شماره	متوسط سطح آب (m)	طول (m)	عرض (m)
Piezometer	No.	Mean of water level (m)	Zone 38	Zone 38
ازرلو - Azerlou	1	7.91	505192	4172837
اصالو - Esalou	2	1.94	519842	4174530
باشلان‌بشلو - Bashlanbeshlou	3	5.97	509172	4183735
جنیزه - Janizeh	4	20.80	496775	4168540
خانقاه سرخ - Khanqah	5	53.54	503653	4177961
دانقرالو - Danqeralou	6	4.32	511064	4173881
ساعتلوی بیگلر - Saatlou	7	21.72	502057	4174410
سپرغان - Separghan	8	3.35	518658	4179429
شاه میرزاکندی - Mirzakandi	9	2.01	508056	4170089
شیرآباد - Shirabad	10	4.12	512854	4178693
طلاتپه - Talatpeh	11	4.45	516521	4175102
عبداله کندی - Abdollahkandi	12	3.03	515093	4182874
عسگرآباد تپه - Askarabad	13	3.65	503410	4167661
قشلاق شکور - Qeshlaqshakor	14	6.27	508529	4178164
کریم‌آباد - Karim abad	15	8.23	505602	4182998
گزنق - Gaznaq	16	2.55	518188	4169940
لک - Lak	17	6.77	502671	4172288
نازلو - Nazloo	18	34.08	496380	4171149
یورقون‌آباد - Yourgonabad	19	2.22	521666	4169423

$T(x, y)$ را هم‌چنین می‌توان به صورت محتوای اطلاعات مشترک x و y تعریف نمود (۱۱).

آنتروپی گسسته: طبق تعریف ارائه شده شانون از آنتروپی، برای دو متغیر گسسته x_i و y_j که $i=1,2,3, \dots, n$ و $j=1,2,3, \dots, m$ در یک فضای احتمال باشند، هر کدام دارای یک احتمال گسسته وقوع $p(x_i)$ ، $p(x_i, y_j)$ احتمال وقوع مشترک x_i, y_j و $p(x_i | y_j)$ احتمال رخ دادن x_i به شرط y_j می‌باشند. سایر شاخص‌های آنتروپی گسسته و شاخص‌های جدید آن در مطالعات ناظری تهرودی و همکاران (۲۰۱۹) تشریح شده است (۱۶). در نهایت براساس حدود ذکر شده در جدول ۲ برای شاخص $ITI(i)$ (انتقال اطلاعات) در منطقه مورد مطالعه پهنه‌بندی انجام شده است.

به این ترتیب که براساس ارزش انتقال اطلاعات اقدام به کلاس‌بندی مختلف آن‌ها می‌شود، به طوری که مقادیر کوچک‌تر، ایستگاه‌های دارای اولویت کم‌تر و مقادیر بزرگ‌تر، ایستگاه‌های دارای اولویت بیش‌تر را نشان می‌دهند (۶).

که $H(x)$ و $H(y)$ آنتروپی مرزی x و y می‌باشند و اگر وابسته باشند، به صورت رابطه ۴ نوشته می‌شود:

$$H(x, y) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \ln f(x, y) dx dy \quad (4)$$

که تابع $f(x, y)$ چگالی احتمال مشترک x و y هست. آنتروپی شرطی x به شرط y بیان‌کننده عدم قطعیت باقی‌مانده در x به شرط معلوم بودن y به شرح رابطه ۵ است:

$$H(x | y) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x | y) \ln f(x | y) dx dy \quad (5)$$

که در آن، $f(x | y)$ تابع توزیع چگالی احتمالی x به شرط y هست. نوعی دیگر از آنتروپی است که برابر با تفاضل مجموع آنتروپی‌های حاشیه‌ای و آنتروپی مشترک است. آنتروپی انتقال اطلاعات بین دو متغیر x و y به صورت رابطه‌های ۶ و ۷ تعریف می‌شود:

$$T(x, y) = H(x) + H(y) - H(x, y) \quad (6)$$

$$T(x, y) = T(y, x) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \ln \left(\frac{f(x, y)}{f(x)f(y)} \right) dx dy \quad (7)$$

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات $ITI(i)$ (۶).

Table 2. Classification of ITI Information Transfer Index (ITI) (6).

ITI(i)	درجه اهمیت منطقه Degree of importance
0.0 - 0.2	کمبود شدید - Severe shortage
0.2 - 0.4	کمبود - Shortage
0.4 - 0.6	متوسط - Average
0.6 - 0.8	مازاد - surplus
0.8 <	شدیداً مازاد - Extremely surplus

$$Y_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i Y_{t-i} + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (8)$$

که در آن، Y_t یک ماتریس ستونی $n \times 1$ از سری مشاهداتی Y_t^k با توزیع نرمال و میانگین صفر به نمایندگی از ایستگاه‌های مختلف $k=1,2,\dots,n$ ، $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ ماتریس قطری $n \times n$ پارامترهای مدل اتورگرسیو (خودهمبسته) و $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ ماتریس قطری $n \times n$ پارامترهای مدل میانگین متحرک است. ε_t نیز یک ماتریس $n \times 1$ داده‌های تصادفی نرمال با میانگین صفر و واریانس - کوواریانس g است.

مدل ARCH: اگرچه مدل ARCH ساده است، اما اغلب پارامترهای زیادی جهت به دست آوردن مناسب فرآیند مدل‌سازی نیاز دارند. به همین دلیل باید مدل‌های جایگزین را جستجو کرد (۱۰). اگر برای سری باقی‌مانده R_t ، $R_t = \mu_t + a_t$ در زمان t صادق است، آن‌گاه a_t از مدل GARCH(p,q) پیروی می‌کند. در این صورت رابطه ۹ استفاده می‌شود:

$$a_t = \sigma_t e_t$$

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \sum_{i=1}^q \alpha_i a_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^p \beta_j \sigma_{t-j}^2 \quad (9)$$

که در آن، e_t برابر با سری تصادفی با میانگین صفر و واریانس یک است. در واقع مدل EGARCH، مدل لگاریتم طبیعی روش GARCH است که توسط نیلسون (۱۹۹۱) ارائه گردید (۱۷).

ارزیابی مدل: به منظور ارزیابی دقت و کارایی مدل‌های مورد بررسی از جذر میانگین مربعات خطا (رابطه ۱۰) و نش- ساتکلیف (رابطه ۱۱) استفاده شد.

مدل‌های چندمتغیره هم‌زمان آرما (CARMA): ویژگی نوعی از مدل‌های هم‌زمان، ماتریس پارامترهای قطری است که برآورد پارامترهای آن مستقل از مدل‌های تک‌متغیره است. از مدل‌های خطی چندمتغیره، می‌توان به مدل خودهمبستگی چندمتغیره، مدل هم‌زمان خودهمبسته با میانگین متحرک که به‌عنوان مدل CARMA(p,q) تعریف می‌شود، مدل ترکیبی هم‌زمان و میانگین متحرک که به‌عنوان CSM-CARMA(p,q) تعریف می‌شود و مدل دوره‌ای خودهمبسته چندمتغیره فصلی MPAR(p) اشاره کرد. در مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی چندمتغیره بر اساس مدل کامل چندمتغیره ARMA، اغلب مشکلات در برآورد پارامترهای آن به وجود می‌آید. مدل CARMA (مدل هم‌زمان خودهمبسته با میانگین متحرک) به‌عنوان یک جایگزین ساده‌تر به مدل کامل چندمتغیره ARMA پیشنهاد شد (۱۸). در مدل CARMA(p,q) ماتریس پارامترهای هر دو مدل خودهمبسته و میانگین متحرک به صورت قطری فرض می‌شود به طوری که یک مدل چندمتغیره را می‌توان مستقل از مدل تک‌متغیره ARMA دانست؛ بنابراین، به جای برآورد پارامترهای مدل به طور مشترک، می‌توان آن‌ها را به طور مستقل برای هر ایستگاه تک‌متغیره ARMA برآورد کرد، که این کار باعث شناسایی بهترین مدل ARMA تک‌متغیره می‌شود. بنابراین، اگر یک مدل کامل چندمتغیره ARMA مورد استفاده قرار گیرد، ساختار وابستگی متفاوت در زمان را می‌توان به جای آن‌که برای هر ایستگاه مدل کرد، یک ساختار وابسته مشابه در زمان برای تمام ایستگاه‌ها در نظر گرفت. مدل CARMA(p,q) را برای n ایستگاه می‌توان به صورت رابطه ۸ نشان داد:

به جای استفاده مستقیم از داده‌های یک پیزومتر، پیش‌بینی داده‌های پیزومتر موردنظر انجام شد. نتایج بررسی دقت و میزان خطای تخمین مقادیر سالانه سطح آب زیرزمینی پیزومترهای مورد مطالعه با ورودی‌های ذکر شده به صورت جدول ۳ ارائه گردید. با توجه به نتایج جدول ۳ می‌توان مشاهده کرد که دقت محاسبات روش رگرسیون چندمتغیره در برآورد مقادیر سالانه سطح آب زیرزمینی پیزومترهای مورد بررسی قابل قبول است. با محاسبه ماتریس‌های فراوانی و احتمالاتی، مقادیر آنتروپی انتقال (T) برای تمامی کلاس‌های مورد بررسی محاسبه گردید. نتایج بررسی T مدل نشان داد که تقسیم‌بندی ۱۲ کلاسه از بین سایر کلاس‌ها دقت بیشتری در تخمین داده‌ها دارد.

با انتخاب تعداد تقسیمات ۱۲ کلاسه و مقادیر تخمین زده شده توسط روش رگرسیون چندمتغیره، مقادیر شاخص آنتروپی تعیین و نتایج مربوط به پایش کمی شبکه آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه برآورد گردید. نتایج بررسی وضعیت شبکه پایش آب زیرزمینی حوضه آبریز نازلوچای به شرح شکل ۴ ارائه گردید.

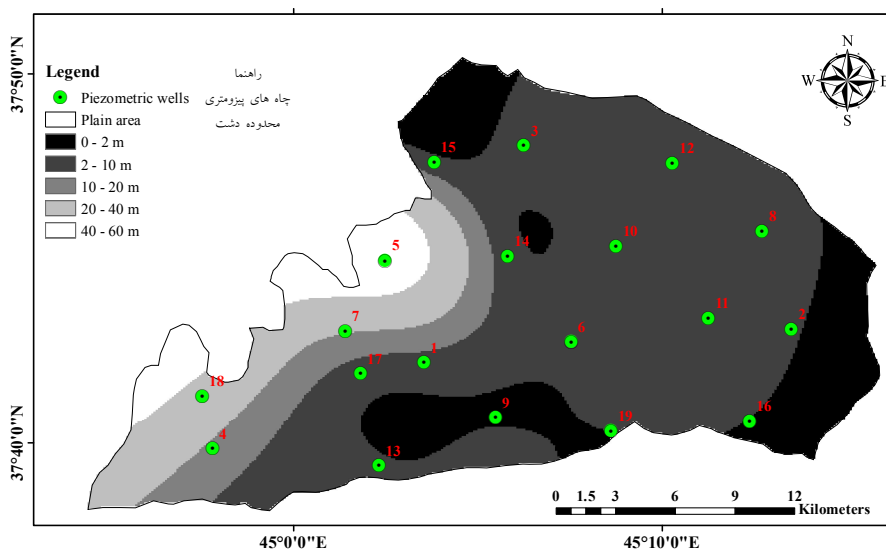
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{S}} \quad (10)$$

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^S (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^S (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (11)$$

که در آن، Q_i داده‌های واقعی یا مشاهده‌ای، Q'_i داده‌های پیش‌بینی، \bar{Q}_i میانگین داده‌ها و S تعداد داده‌ها است (۲۱ و ۱۴).

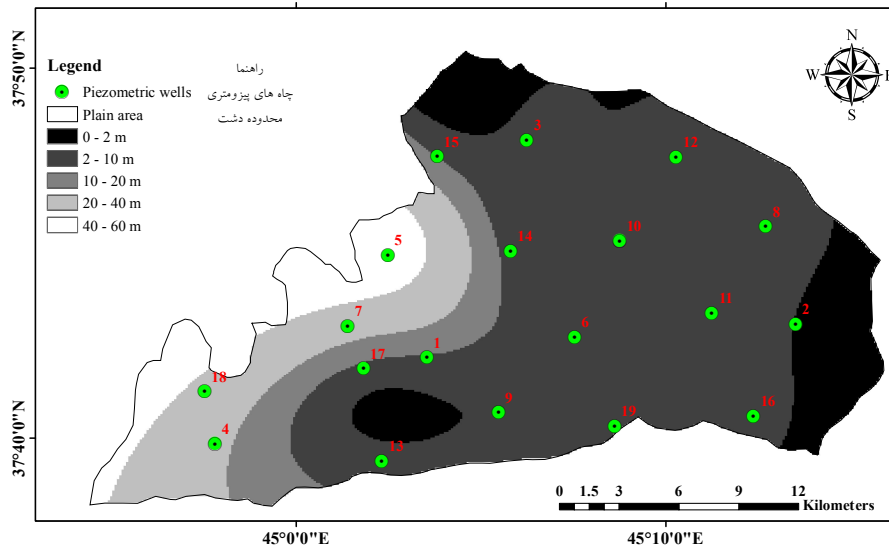
نتایج و بحث

در ابتدا تغییرات سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۹۵ به صورت شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. بعد از آماده‌سازی داده‌های مورد بررسی، مقادیر سالانه سطح آب زیرزمینی هر پیزومتر با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره و مقادیر سطح آب زیرزمینی پیزومترهای مجاور تخمین زده شد. در این مرحله اقدام به تولید داده‌های جدید برای هر پیزومتر شد. به عبارت دیگر



شکل ۲- سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (۱۳۸۰).

Figure 2. Groundwater level changes in the study area (2004).



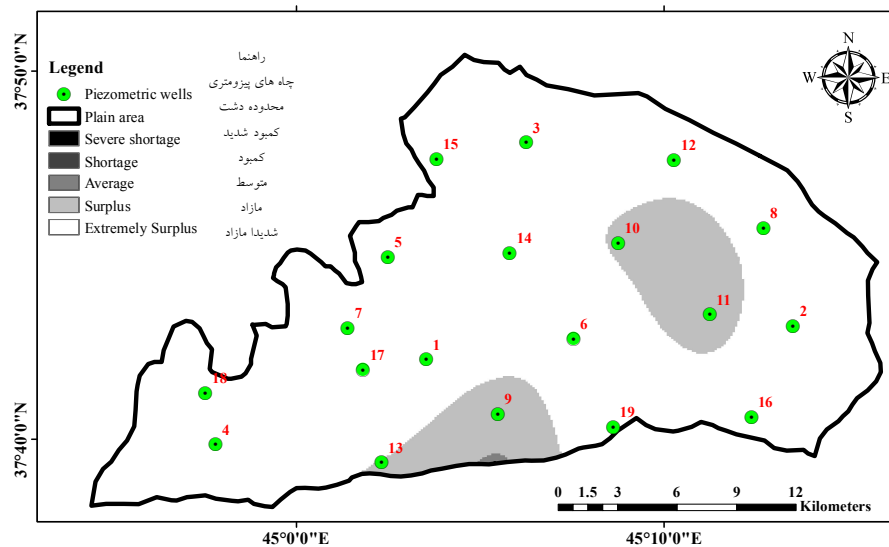
شکل ۳- سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (۱۳۹۵).

Figure 3. Groundwater level changes in the study area (2016).

جدول ۳- نتایج بررسی کارایی و خطای روش رگرسیون چندمتغیره در تخمین داده‌های سالانه سطح آب زیرزمینی.

Table 3. Results of the evaluation of efficiency and error of multivariate regression method in estimating annual groundwater level data.

Nash	RMSE	پیزومتر Well	Nash	RMSE	پیزومتر Well	Nash	RMSE	پیزومتر Well	Nash	RMSE	پیزومتر Well
0.896	0.21	16	0.948	0.15	11	0.992	0.04	6	0.999	0.04	1
0.939	0.26	17	0.997	0.03	12	0.992	0.51	7	0.936	0.08	2
0.973	0.15	18	0.980	0.12	13	0.986	0.06	8	0.998	0.06	3
0.999	0.01	19	0.999	0.03	14	0.942	0.09	9	0.999	0.10	4
			0.999	0.04	15	0.974	0.11	10	0.999	0.02	5



شکل ۴- نتایج پهنه‌بندی مقادیر شاخص آنتروپی در کلاس ۱۲ طبقه‌ای جهت پایش شبکه کمی آب زیرزمینی.

Figure 4. Results of zoning the 12-class entropy index values for monitoring the groundwater quantitative network.

حوضه و هم‌چنین به دلیل یافتن محل‌هایی با کاهش یا افزایش اطلاعات از شبکه‌بندی منطقه مورد مطالعه کمک گرفته شد. در صورتی که هدف از پایش بهینه کردن و بهبود شبکه پایش باشد، می‌توان براساس نتایج موجود گمانه‌های جدید ایجاد کرد و یا گمانه‌هایی که انتقال اطلاعات کم‌تری دارند را از سیستم حذف کرد. نتایج شاخص آنتروپی اطلاعات دقیق و جامعی در مورد شبکه پایش در هر منطقه در اختیار قرار می‌دهد. ناظری تهرودی و همکاران (۲۰۱۹) نیز در پژوهش‌های خود دقت تئوری آنتروپی در بهبود شبکه پایش را تأیید کردند (۱۶). استفاده از تمامی شاخص‌های تئوری آنتروپی می‌تواند پوشش کامل تغییرات شبکه پایش را نمایش دهد.

جهت بررسی ارزش هر ایستگاه مقادیر $N(i)$ محاسبه و پیرومترهای موجود براساس افزایش این شاخص رتبه‌بندی و به شرح جدول ۵ ارائه گردید. نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه نشان داد که ایستگاه‌های شماره ۱، ۳ و ۴ رتبه‌های ۱ تا ۳ را دریافت کردند که نشان‌دهنده انتقال و دریافت اطلاعات بیش‌تر نسبت به سایر ایستگاه‌ها است. به عبارت دیگر این ایستگاه‌ها ارزش حفظ بیش‌تری نسبت به ایستگاه‌های دیگر دارند و داده‌های این ایستگاه‌ها را می‌توان با اطمینان کامل استفاده کرد.

این ایستگاه‌ها در نقاط مختلف حوضه قرار دارند. از طرف دیگر ایستگاه‌های شماره ۱۱، ۲ و ۶ در بین سایر ایستگاه‌ها کم‌ترین ارزش و اعتبار را کسب کرده‌اند. این ایستگاه‌ها در قسمت شرقی حوضه قرار داشته و در منطقه مازاد از نظر ITI قرار دارند.

همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، نتایج پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات (ITI) در سطح منطقه مورد مطالعه نشان داد که در قسمت‌هایی از جنوب و نواحی شرقی شرایط نسبتاً مازاد بوده و حتی کمبود ایستگاه نیز احساس نمی‌شود. این موضوع بیانگر انتقال اطلاعات خوب بوده و نشان می‌دهد که ارتباط ایستگاه‌ها در این نواحی ضعیف‌تر از سایر نواحی است؛ اما کمبود ایستگاه در این منطقه دیده نمی‌شود و نیاز به احداث ایستگاه جدید وجود ندارد. در بیش‌تر نواحی منطقه مورد مطالعه ایستگاه‌های مازاد دیده می‌شود. به عبارتی با پراکندگی موجود در بین ایستگاه‌های مورد بررسی به خوبی می‌توان اطلاعات کافی در مورد شبکه آب زیرزمینی در این حوضه کسب کرد. مساحت تحت پوشش هر یک از تقسیمات شاخص ITI به شرح جدول ۴ ارائه گردید. با توجه به شکل ۴ و جدول ۴ می‌توان مشاهده کرد که بیش از ۹۹ درصد منطقه مورد مطالعه پایش خوبی بر منابع آب زیرزمینی از نظر پراکندگی پیرومترها دارد. در کم‌تر از یک درصد مساحت منطقه مورد مطالعه کمبود تعداد ایستگاه احساس می‌شود که بخش عمده آن در قسمت جنوبی حوضه قرار دارد. همان‌طور که از جدول ۴ قابل مشاهده است، بیش‌تر نواحی منطقه مورد مطالعه (۹۹ درصد) را مناطق با ایستگاه‌های نسبتاً مازاد و مازاد فراگرفته است. ۰/۱۵ درصد مساحت منطقه را نواحی متوسط از نظر پایش سطح آب زیرزمینی و کمبود ایستگاه در بر گرفته است. به‌طور کلی نتایج نشان داد منطقه مورد مطالعه با شرایط فعلی از نظر پایش شبکه آب زیرزمینی مشکلی ندارد. تعداد ایستگاه‌های مازاد در سطح منطقه محاسبه گردید. به دلیل پراکندگی نامنظم ایستگاه‌ها در سطح

جدول ۴- مناطق تحت پوشش تقسیمات شاخص ITI.

Table 4. Areas covered by the ITI index.

مساحت (km ²) Area (km ²)	درصد (%) Percentage	درجه اهمیت منطقه Importance
0	0	کمبود شدید Severe shortage
0	0	کمبود Shortage
0.6	0.15	متوسط Average
40.32	9.83	مازاد surplus
365.43	90.02	شدیداً مازاد Extremely surplus
406.35	100	مجموع Sum

کم‌تری برخوردار می‌باشند. فاصله این ایستگاه‌ها از دریاچه ارومیه نسبت به سایر ایستگاه‌ها کم‌تر است.

البته همان‌طور که مشاهده می‌شود این پیژومترها نیز از ارزش بالایی در حوضه برخوردار می‌باشند و تنها در مقایسه با سایر پیژومترها از تبادل اطلاعات

جدول ۵- رتبه‌بندی ایستگاه‌های موجود بر اساس شاخص N(i).

Table 5. Ranking of studied stations according to N(i) index.

Ni	ایستگاه Station	Ni	ایستگاه Station	Ni	ایستگاه Station
0.010	8	0.00	16	0.00	1
0.010	12	0.00	17	0.00	3
0.01	10	0.00	18	0.00	4
0.01	6	0.00	19	0.00	5
0.01	2	0.002	13	0.00	7
0.01	11	0.002	9	0.00	14
				0.00	15

مقادیر سطح آب زیرزمینی پیژومترهای موردبررسی با استفاده از مدل‌های CARMA موردبررسی قرار گرفت. داده‌های پیژومترهای موردبررسی در دوره آماری ۱۳۸۰-۱۳۹۵ موردبررسی و مدل‌سازی قرار

نتایج مدل‌سازی مقادیر سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل هیبریدی سری زمانی (CARMA-ARCH): بعد از بررسی داده‌های اولیه و بررسی شبکه پایش آب زیرزمینی دشت نازلوچای،

مدل‌سازی مقادیر سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده مربوط به چاه شماره ۱ به‌عنوان نمونه به‌صورت شکل ۵ ارائه گردید. نتایج مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های چندمتغیره هیبریدی سری زمانی نشان داد که این مدل‌ها توانایی بالایی در مدل‌سازی مقادیر مذکور تحت‌تأثیر مقادیر سایر چاه‌ها دارد. همان‌طور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، با دخالت مدل ARCH و مقادیر سایر چاه‌ها در مدل‌سازی‌ها، نقاط بیشینه و کمینه به‌خوبی مدل می‌شود. این موضوع در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه به چشم می‌خورد. آنچه در تمام ایستگاه‌ها واضح است، این است که با تلفیق مدل‌های چندمتغیره سری زمانی با مدل‌های غیرخطی ARCH میزان خطای مدل کاهش و همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی افزایش یافته است. لازم به ذکر است که نتایج مقایسه دو آماره نش- ساتکلیف و جذر میانگین مربعات خطا حاصل از مدل‌های CARMA و CARMA-ARCH نشان داد که در تمام موارد (تمام چاه‌ها) دقت مدل تلفیقی نسبت به مدل چندمتغیره بالاتر بوده است. در پژوهش‌های مختلف هم‌چون مطالعات عباس‌زاده افشار (۲۰۱۷) و ناظری تهرودی و خلیلی (۲۰۱۵) نیز دقت و عملکرد مدل‌های تلفیقی را نسبت به مدل‌های مرسوم بالاتر معرفی کردند (۱ و ۱۵).

نتایج بررسی دقت مدل‌های مورد بررسی نشان داد که مدل‌های تلفیقی نتایج بهتری نسبت به مدل‌های خطی رایج سری زمانی ارائه می‌کنند که این موضوع با نتایج پژوهش‌های وانگ و همکاران (۲۰۰۵)، لائوکس (۲۰۱۱)، ناظری تهرودی و خلیلی (۲۰۱۵) و عباس‌زاده افشار (۲۰۱۷) مطابقت دارد (۲۳، ۷، ۱۵ و ۱).

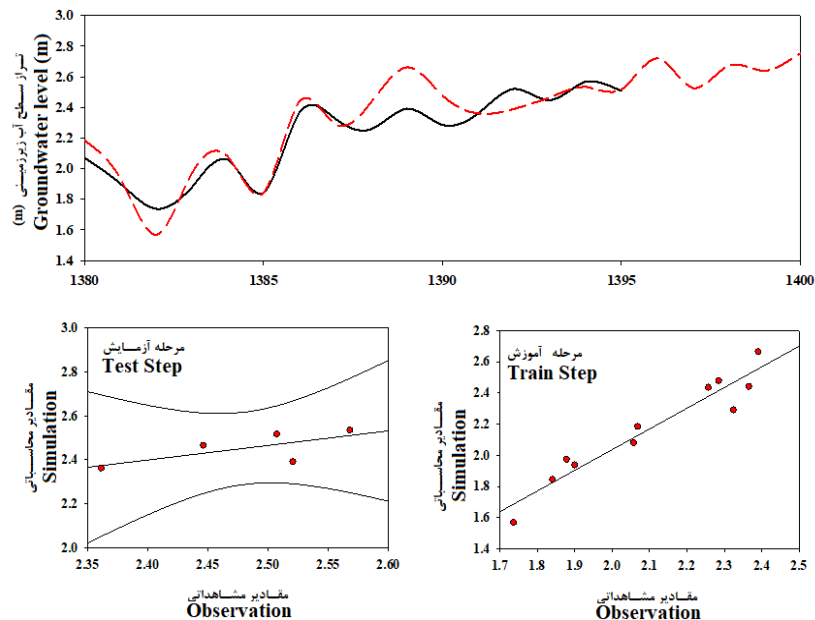
گرفت. با توجه به خاصیت چندمتغیره بودن مدل CARMA، برای مدل‌سازی داده‌های سطح آب زیرزمینی در هر چاه، از داده‌های چاه مرتبط و داده‌های سطح آب زیرزمینی سایر چاه‌ها استفاده شد. جهت مدل‌سازی از داده‌های سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ برای آموزش و از داده‌های سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ برای بررسی شبیه‌سازی مدل‌ها استفاده شد. درنهایت با تأیید دقت مدل‌ها، داده‌های هر چاه به مدت ۵ سال به‌صورت سالانه پیش‌بینی شد.

جهت تلفیق مدل CARMA با مدل غیرخطی ARCH، سری باقی‌مانده مدل استخراج و توسط مدل‌های خانواده ARCH برازش یافت. درنهایت با به‌کارگیری روابط موجود، واریانس شرطی سری باقی‌مانده مدل محاسبه و درنهایت سری باقی‌مانده مدل که متناسب با داده‌های دل‌شده است، حاصل شد. با اضافه کردن این سری باقی‌مانده جدید به مدل، مدل تلفیقی CARMA-ARCH حاصل گشت. نتایج داده‌های مدل شده توسط مدل هیبریدی مذکور، با داده‌های مشاهده‌ای سطح آب زیرزمینی پیرومترهای مورد مطالعه مقایسه و آماره جذر میانگین مربعات خطا محاسبه گردید. نتایج آماره جذر میانگین مربعات خطای ناشی از داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی مدل CARMA-ARCH محاسبه و به‌شرح جدول ۶ ارائه گردید. با توجه به کارایی مدل هیبریدی در مدل‌سازی و شبیه‌سازی مقادیر سطح آب زیرزمینی، نتایج نشان داد که مقادیر آماره نش- ساتکلیف بین ۶۹ تا ۱۰۰ درصد متغیر است و متوسط میزان آن ۹۶ درصد است. درنهایت مقادیر سطح آب زیرزمینی با استفاده از اثر متقابل سطح آب زیرزمینی پیرومترهای دشت و مدل CARMA-ARCH مدل‌سازی و نتایج دقت

جدول ۶- نتایج بررسی کارایی مدل هیبریدی در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی دشت نازلوچای.

Table 6. Results of hybrid model efficiency in groundwater simulation of Nazloochai basin.

Nash	RMSE (m)	پیزومتر Well	Nash	RMSE (m)	پیزومتر Well
0.959	0.131	11	0.994	0.105	1
0.0692	0.093	12	0.880	0.104	2
0.992	0.074	13	0.994	0.103	3
0.995	0.081	14	0.998	0.128	4
0.995	0.133	15	0.983	0.089	5
0.988	0.074	16	0.962	0.087	6
0.985	0.128	17	0.999	0.071	7
0.994	0.069	18	0.952	0.104	8
0.779	0.116	19	0.847	0.084	9
			0.985	0.086	10



شکل ۵- نتایج بررسی دقت مدل هیبریدی CARMA-ARCH در مدل‌سازی مقادیر سالانه سطح آب زیرزمینی دشت نازلوچای در دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳۸۰ مربوط به پیزومتر شماره ۱.

Figure 5. Precision results of CARMA-ARCH hybrid model to modeling the annual groundwater levels in Nazloochai Plain during 2004-2021 for Pizometer No. 1.

نسبت به مدل‌های تک‌متغیره نشان داد (۲). نتایج نشان داد که مدل‌های چندمتغیره در صورت موجود بودن داده می‌تواند بهترین مدل برای جایگزینی مدل آرما باشد. همان‌طور که کاماچو (۱۹۸۴) و مک‌لئود و هپیل (۱۹۷۸) نشان دادند، با توجه به گسترش تکنیک‌های

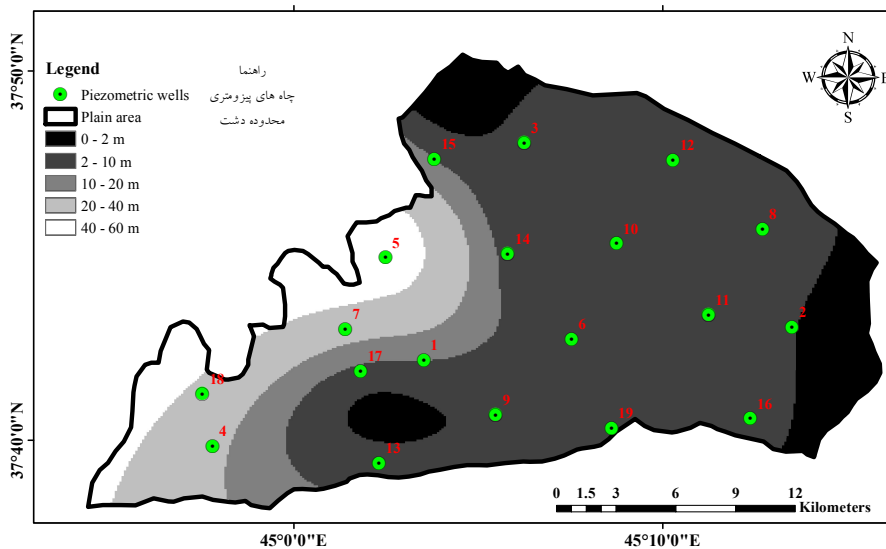
با تأثیرپذیری پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی و با نظر گرفتن وزن برای هر پارامتر توسط مدل، می‌توان نسبت تأثیرپذیری هر پارامتر را بر میزان سطح آب زیرزمینی شناسایی کرد. نتایج پژوهش کاماچو و همکاران (۱۹۸۵) نیز برتری مدل‌های چندمتغیره را

می‌کنند. هم‌چنین نتایج نشان داد که ترکیب مدل‌های خطی و غیرخطی سری زمانی می‌تواند مدل‌های مناسبی جهت مدل‌سازی پارامترهای هیدرولوژیکی باشند. تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه در سال ۱۴۰۰ جهت نمونه به‌شرح شکل ۶ ارائه شده است.

نتایج بررسی و پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت نازلوچای طی دوره آماری ۱۳۹۶-۱۴۰۰ نشان از تغییرات افزایشی است که بیانگر افزایش سطح دسترسی به آب طی سال‌های آتی دارد. البته این تغییرات با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی کنونی است. بعد از مدل‌سازی و تشکیل سری زمانی جدید (به‌روز شده)، مقادیر سطح آب زیرزمینی دشت نازلوچای با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره برای بار دوم شبیه‌سازی شده تا اثر متقابل چاه‌ها نمایان شود. درنهایت مقادیر شاخص آنتروپی در دوره آماری به‌روز شده (۱۳۸۰-۱۴۰۰) تعیین و نتایج مربوط به پایش کمی شبکه آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه برآورد گردید. نتایج بررسی وضعیت شبکه پایش آب زیرزمینی حوضه آبریز نازلوچای به‌شرح شکل ۷ ارائه گردید.

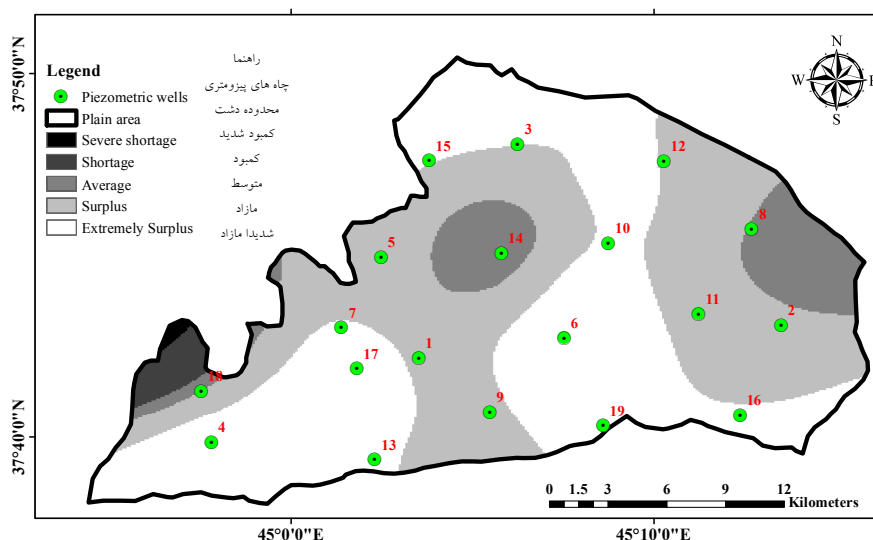
شبیه‌سازی، مدل‌های چندمتغیره سری زمانی پوشش مناسبی برای مدل‌های آرما خواهند بود (۲ و ۸). مدل‌های پرودیک نسبت به مدل‌های سالانه به‌مراتب از دقت بالاتری برخوردار هستند. سری‌های انتخاب شده به‌صورت ماهانه، هفتگی و سالانه و حتی در دوره‌های زمانی n روزه دارای دامنه تغییرات مشخص در همان بازه زمانی هستند که این موضوع باعث بهبود نتایج مدل‌سازی در این مدل‌ها می‌باشد. هم‌چنین همبستگی بین داده‌ها در سری‌های پرودیک بیش‌تر است.

با ترکیب دو مدل مذکور، علاوه بر بالا بردن قطعیت مدل، می‌توان سری تصادفی متناسب با داده‌ها و از جنس داده‌ها تولید کرد که این کار باعث کاهش ریسک می‌شود. نتایج نشان‌دهنده دقت بالای دو مدل تلفیقی نسبت به مدل آرما بود که این موضوع با پژوهش‌های تسفای و همکاران (۲۰۰۶) مطابقت دارد (۲۲). آنچه به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی به‌دست آمد این بود که با تلفیق مدل‌های خطی و غیرخطی، دقت مدل‌سازی‌های مدل‌های خانواده آرما افزایش می‌یابد. این مدل‌های هیبریدی، نقاط اوج را به‌خوبی مدل



شکل ۶- تغییرات سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در سال ۱۴۰۰.

Figure 6. Changes in groundwater level of the study area in 2021.



شکل ۷- نتایج پهنه‌بندی مقادیر شاخص آنتروپی در کلاس ۱۲ طبقه‌ای در دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳۸۰.

Figure 7. Results of zoning the 12-class entropy index values in 2004-2021 statistical period.

در این حوضه کسب کرد. در نواحی مرکزی و شرقی حوضه آبریز نازلوچای در دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳۸۰ شرایط متوسط از نظر پایش شبکه آب زیرزمینی دیده می‌شود؛ اما نواحی نوار مرز غربی حوضه آبریز دشت نازلوچای به شدت نیاز به احداث چاه جدید در این منطقه دارد.

به‌طورکلی نتایج نشان می‌دهد که تغییرات سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در دوره آماری به‌روز شده در جهت منفی بوده و تأثیر زیادی در شبکه پایش آب زیرزمینی در محدوده دشت نازلوچای را دارد. این موضوع لزوم به‌روزرسانی شبکه‌های پایش آب زیرزمینی را در دشت‌های کشور نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات اقلیمی و تغییرات الگوی بارش‌ها، پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی مدام در حال تغییر می‌باشند که این موضوع نیز در شبکه‌های پایش کمی و کیفی آب زیرزمینی تأثیر دارد. در نهایت مساحت تحت پوشش هر یک از تقسیمات شاخص ITI در هر دو دوره آماری مورد بررسی (تاریخی و به‌روز شده) به شرح جدول ۷ ارائه گردید.

همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است، نتایج پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات (ITI) در سطح منطقه مورد مطالعه نشان داد که در دوره آماری به‌روز شده (۱۴۰۰-۱۳۸۰) تغییرات چشمگیری در سطح دشت نازلوچای رخ داده است. در دوره آماری به‌روز شده از مساحت نواحی مازاد و به‌شدت مازاد کاسته شده و به مساحت نواحی با پایش متوسط و حتی کمبود چاه اضافه شده است. با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی مقادیر ITI، نتایج نشان داد که در قسمت‌هایی از جنوب، شمال و نواحی شرقی شرایط نسبتاً مازاد بوده و حتی کمبود ایستگاه نیز احساس نمی‌شود. این موضوع بیانگر انتقال اطلاعات خوب بوده و نشان می‌دهد که ارتباط ایستگاه‌ها در این نواحی بهتر از سایر نواحی است؛ اما کمبود ایستگاه در این منطقه دیده نمی‌شود و نیاز به احداث ایستگاه جدید وجود ندارد. در بیشتر نواحی منطقه مورد مطالعه ایستگاه‌های مازاد دیده می‌شود. به عبارتی با پراکندگی موجود در بین ایستگاه‌های مورد بررسی به‌خوبی می‌توان اطلاعات کافی در مورد شبکه آب زیرزمینی

جدول ۷- مناطق تحت پوشش تقسیمات شاخص ITI در سطح حوضه در دو دوره آماری مورد بررسی.

Table 7. Areas covered by the ITI Index in Basin area in the two studied statistical periods.

۱۳۸۰-۱۴۰۰		۱۳۸۰-۱۳۹۵		درجه اهمیت منطقه Degree of importance
2004-2021		2004-2016		
مساحت (km ²) Area (km ²)	درصد (%) (%)	مساحت (km ²) Area (km ²)	درصد (%) (%)	
1.00	0.25	0	0	کمبود شدید - Severe shortage
6.68	1.64	0	0	کمبود - Shortage
39.6	9.74	0.6	0.15	متوسط - Average
174.23	42.88	40.32	9.83	مازاد - surplus
184.84	45.49	365.43	90.02	شدیدا مازاد - Extremely surplus
406.35	100	406.35	100	مجموع - Sum

کیلومتر مربع از مساحت منطقه مورد مطالعه کمبود چاه را تجربه کرده است. مناطق متوسط از دیدگاه پایش نیز در دوره آماری به روز شده نسبت به دوره آماری تاریخی حدود ۶۶ برابر افزایش یافته از عدد ۰/۶ کیلومتر مربع به عدد ۳۹/۶ کیلومتر مربع رسیده است. مناطق نسبتاً مازاد نیز در دوره آماری به روز شده افزایش داشته است. به طور مشابه تغییرات مناطق شدیداً مازاد در دوره آماری به روز شده از ۳۶۵ کیلومتر مربع به ۱۷۴ کیلومتر مربع کاهش یافته است. با استفاده از تقسیم بندی ۱۲ کلاس تعداد ایستگاه های مازاد در سطح منطقه محاسبه گردید. به دلیل پراکندگی نامنظم ایستگاه ها در سطح حوضه و همچنین به دلیل یافتن محل هایی با کاهش یا افزایش اطلاعات از شبکه بندی منطقه مورد مطالعه کمک گرفته شد. در صورتی که هدف از پایش، بهینه کردن و بهبود شبکه باران سنجی باشد، می توان بر اساس نتایج موجود گمانه های جدید ایجاد کرد و یا گمانه هایی را که انتقال اطلاعات کمتری دارند از سیستم حذف کرد. مقادیر $N(i)$ محاسبه شد و پیوزمترهای موجود بر اساس افزایش این شاخص رتبه بندی و به شرح جدول ۸ ارائه گردید.

با توجه به شکل ۷ و جدول ۷ می توان مشاهده کرد که بیش از ۸۸ درصد منطقه مورد مطالعه در دوره آماری به روز شده (۱۳۸۰-۱۴۰۰) پایش خوبی بر منابع آب زیرزمینی از نظر پراکندگی پیوزمترها دارد. در کم تر از ۱۰ درصد مساحت منطقه مورد مطالعه کمبود تعداد ایستگاه احساس می شود که بخش عمده آن در قسمت غربی حوضه قرار دارد. همان طور که از جدول ۷ قابل مشاهده است، در دوره آماری به روز شده (۱۳۸۰-۱۴۰۰) بیش تر نواحی منطقه مورد مطالعه (۸۷ درصد) را مناطق با ایستگاه های نسبتاً مازاد و مازاد فرا گرفته است. حدود ۱۰ درصد مساحت منطقه را نواحی متوسط از نظر پایش سطح آب زیرزمینی و کمبود ایستگاه در برگرفته است. به طور کلی نتایج نشان داد منطقه مورد مطالعه با شرایط به روز شده از نظر پایش شبکه آب زیرزمینی مشکلی ندارند اما در سال های آتی دچار مشکل خواهد شد. نتایج مقایسه دو دوره آماری تاریخی و به روز شده نشان داد که در دوره آماری به روز شده حدود یک کیلومتر مربع از مساحت منطقه مورد مطالعه کمبود شدید چاه احساس می شود که این موضوع در دوره آماری تاریخی (۱۳۸۰-۹۵) وجود نداشت. هم چنین ۶/۶۸

جدول ۸- رتبه‌بندی ایستگاه‌های موجود در منطقه براساس شاخص $N(i)$ در دوره آماری به‌روز شده.

Table 8. Ranking of stations in the region based on $N(i)$ index in the updated statistical period.

Ni	ایستگاه Station	Ni	ایستگاه Station	Ni	ایستگاه Station
0.02	19	0.02	17	0.00	4
0.02	8	0.02	3	0.00	6
0.03	11	0.02	18	0.00	12
0.05	7	0.02	10	0.00	16
0.05	15	0.02	1	0.00	2
0.12	14	0.02	5	0.01	9
				0.01	13

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه کارایی تئوری آنتروپی در رتبه‌بندی و تحلیل منطقه‌ای شبکه کمی آب زیرزمینی حوضه آبریز نازلوچای واقع در غرب دریاچه ارومیه در دو دوره آماری تاریخی و پیش‌بینی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌ها براساس مقادیر شاخص‌های متفاوت آنتروپی برای تقسیمات ۱۲ کلاسه ارائه شد. در تئوری آنتروپی گسسته جهت تأثیر غیرمستقیم داده‌های سایر ایستگاه‌ها بر یکدیگر از روش‌هایی برای تخمین چندمتغیره استفاده می‌شود که در این مطالعه از رگرسیون چندمتغیره استفاده شد. نتایج بررسی تئوری آنتروپی در پایش شبکه کمی آب زیرزمینی نشان داد که بیش‌تر نواحی منطقه مورد مطالعه را نواحی مازاد از نظر تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی در بر گرفته است. هدف از مطالعات پایش شبکه آب زیرزمینی، بهبود تراکم شبکه است که این موضوع با پیشنهاد افزایش یا کاهش تعداد ایستگاه‌ها همراه است. بنابراین توصیه می‌شود جهت کاهش یا افزایش تعداد پیژومترهای موجود در دشت مورد مطالعه از آماره رتبه‌بندی ایستگاه‌ها استفاده شده و رتبه ایستگاه‌ها از نظر انتقال اطلاعات در نظر گرفته شود. بعد از بررسی و ارزیابی شبکه پایش در دوره

نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه نشان داد که ایستگاه‌های شماره ۴، ۶ و ۱۲ رتبه‌های ۱ تا ۳ را دریافت کردند که نشان‌دهنده انتقال و دریافت اطلاعات بیش‌تر نسبت به سایر ایستگاه‌ها است. به عبارت دیگر این ایستگاه‌ها ارزش حفظ بیش‌تری نسبت به ایستگاه‌های دیگر دارند و داده‌های این ایستگاه‌ها را می‌توان با اطمینان کامل استفاده کرد. از طرف دیگر ایستگاه‌های شماره ۷، ۱۵ و ۱۴ در بین سایر ایستگاه‌ها کم‌ترین ارزش و اعتبار را کسب کرده‌اند. البته همان‌طور که مشاهده می‌شود این پیژومترها نیز از ارزش بالایی در حوضه برخوردار می‌باشند و تنها در مقایسه با سایر پیژومترها از تبادل اطلاعات کم‌تری برخوردار می‌باشند. این ایستگاه‌ها نسبت به دریاچه ارومیه، در فاصله دورتری قرار دارند. با توجه به نتایج حاصل از جدول ۸ می‌توان مشاهده کرد که شاخص اطلاعات خالص در دوره آماری به‌روز شده (۱۴۰۰-۱۳۸۰) نسبت به دوره آماری تاریخی (۱۳۹۵-۱۳۸۰) افزایش یافته است. این موضوع نشان‌دهنده اختلاف بین اطلاعات دریافتی و اطلاعات انتقالی در چاه‌ها است. به‌طورکلی نتایج نشان داد که تغییرات انتقال اطلاعات در پیژومترهای موجود در دشت نازلوچای در دوره آماری به‌روز شده ضعیف‌تر از دوره آماری تاریخی خواهد بود.

نازلوچای دیده می‌شود. پایش شبکه کمی آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه تغییراتی داشته است که این تغییرات با توجه به شرایط فعلی دور از انتظار نبود. تغییرات شبکه کمی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه روند افزایشی خالص اطلاعات را در دوره آماری به روز شده نشان داد که این موضوع بیانگر ضعیف شدن ارتباط بین چاه‌ها در دوره آماری به روز شده نسبت به دوره آماری تاریخی است.

سپاسگزاری

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی با شماره ابلاغ ۱۳۹۸/د/۶۲۵۷ مورخ ۱۳۹۸/۰۳/۲۲ و با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه بیرجند انجام شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

آماري ۱۳۹۵-۱۳۸۰، داده‌های سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل‌های هیبریدی سری زمانی (CARMA-ARCH) مدل‌سازی شد. نتایج مدل‌سازی و صحت‌سنجی مدل یادشده با استفاده از دو آماره جذر میانگین مربعات خطا و نش- ساتکلیف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی این دو آماره تأییدی بر عملکرد این مدل بود. بعد از تأیید دقت و کارایی مدل CARMA-ARCH، مقادیر سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه به مدت ۵ سال (از سال ۱۳۹۵ تا سال ۱۴۰۰) پیش‌بینی گردید. در نهایت مراحل آنتروپی برای دوره آماری به روز شده (۱۴۰۰-۱۳۸۰) اجرا گردید. نتایج بررسی تغییرات شبکه آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه نشان داد که در دوره آماری به روز شده تغییرات منفی در سطح آب زیرزمینی و پایش شبکه کمی آب زیرزمینی در دشت

منابع

1. Abbaszadeh Afshar, M., Behmanesh, J., Khalili, K., and Nazeri Tahroudi, M. 2017. Evaluation of the Combined AR-ARCH and GAR-ARCH Models in Modeling Rivers Flow Rate (Case study: Zarineh River in West Azerbaijan). J. Water Soil Cons. 23: 6. 181-197. (In Persian)
2. Camacho, F., McLeod, A.I., and Hipel, K.W. 1985. Contemporaneous autoregressive - moving average (CARMA) modeling hydrology. J. Water Resour. Bull. 21: 4. 709-720.
3. Chadalavada, S., Datta, B., and Naidu, R. 2011. Uncertainty based optimal monitoring network design for a chlorinated hydrocarbon contaminated site. Environmental monitoring and assessment. 173: 1-4. 929-940.
4. Chen, Y.C., Wei, C., and Yeh, H.C. 2008. Rainfall network design using kriging and entropy. Hydrological Processes. 22: 3. 340-346.
5. Harmancioglu, N.B., and Alpaslan, N. 1992. Water quality monitoring network design: A problem of multiobjective decision making. JAWRA J. Amer. Water Resour. Assoc. 28: 1. 179-192.
6. Harmancioglu, N.B., Fistikoglu, O., Ozkul, S.D., Singh, V.P., and Alpaslan, N. 1999. Water quality Monitoring Network Design. Kluwer. Boston. USA. 299p.
7. Laux, P., Vogl, S., Qiu, W., Knoche, H.R., and Kunstmann, H. 2011. Copula-based statistical refinement of precipitation in RCM simulations over complex terrain. J. Hydrol. Earth Syst. Sci. 15: 4. 2401-2419.
8. McLeod, A.L., and Hipel, K.W. 1978. Simulation procedures for Box - Jenkins models. Water Resources Research, 14: 5. 969-975.
9. Mishra, A.K., and Coulibaly, P. 2010. Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. J. Hydrol. 380: 3. 420-437.

10. Moffat, I.U., Akpan, E.A., and Abasiokwere, U.A. 2017. A time series evaluation of the asymmetric nature of heteroscedasticity: an EGARCH approach. *Inter. J. Stat. Appl. Math.* 2: 6. 111-117.
11. Mogheir, Y., and Singh, V.P. 2002. Application of information theory to groundwater quality monitoring networks. *Water Resources Management.* 16: 1. 37-49.
12. Mogheir, Y., and Singh, V.P. 2003. Specification of information needs for groundwater management planning in developing country. *Groundwater Hydrology.* Balema Publisher. Tokyo. 2: 3-20.
13. Mogheir, Y., De Lima, J.L.M.P., and Singh, V.P. 2004. Characterizing the spatial variability of groundwater quality using the entropy theory: I. Synthetic data. *Hydrological processes.* 18: 11. 2165-2179.
14. Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 3. 282-290.
15. NAzeri Tahroudi, M., and Khalili, K. 2015. Comparing combined ARMA-PARCH and ARMA-ARCH models for modeling peak flow discharge (Case study: Siminehrood river in the west Azerbaijan province). *Water and soil science (agricultural science).* 25: 4/1. 113-127. (In Persian)
16. Nazeri Tahroudi, M., Khashei Siuki, A., and Ramezani, Y. 2019. Redesigning and monitoring groundwater quality and quantity networks by using the entropy theory. *Environ Monit Assess.* 191: 4. 1-17.
17. Nelson, D.B. 1991. Conditional heteroskedasticity in asset returns: A new approach. *Econometrica: J. Econ. Soc.* 59: 2. 347-370.
18. Salas, J.D. 1980. Applied modeling of hydrologic time series. Water Resources Publication.
19. ŞARLAK, N. 2005. Evaluation and modeling of streamflow data: Entropy method, Autoregressive models with asymmetric innovation and artificial neural networks (Doctoral dissertation, Middle East Technical University). 196p.
20. Shannon, C.E. 1948. A mathematical theory of communication, *Bell Syst. Technic. J.* 27: 3. 379-423.
21. Swinscow T.D.V., and Campbell, M.J. 2002. *Statistics at Square One.* London: BMJ Publication. 2002. 106p.
22. Tesfaye, Y.G., Meerschaert, M.M., and Anderson, P.L. 2006. Identification of periodic autoregressive moving average models and their application to the modeling of river flows. *Water Resources Research,* 42: 1. 1-11.
23. Wang, W., Van Gelder, P.H.A.J.M., Vrijling, J.K., and Ma, J. 2005. Testing and modeling autoregressive conditional heteroskedasticity of streamflow processes. *Nonlinear processes in Geophysics.* 12: 1. 55-66.
24. Zeynali, M.J., and Khashei Siyooki, A. 2018. Assessing the Accuracy of Contemporaneous Time Series and Neural Network Models in Modeling Rainfall-Runoff (Case study: Nazloochoaei Catchment). *J. Water Soil Cons.* 25: 2. 315-321.
25. Zhu, Q., Shen, L., Liu, P., Zhao, Y., Yang, Y., Huang, D., and Yang, J. 2015. Evolution of the Water Resources System Based on Synergetic and Entropy Theory. *Polish J. Environ. Stud.* 24: 6. 2727-2738. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 27(3), 2020
<http://jwsc.gau.ac.ir>
DOI: 10.22069/jwsc.2020.17149.3264

Research Full Paper

Forecasting the groundwater monitoring network using hybrid time series models

*A. Khashei Siuki¹, A. Shahidi¹, Y. Ramazani¹ and M. Nazeri Tahroudi²

¹Associate Prof., Dept. of Water Science and Engineering, University of Birjand,

²Ph.D. Student, Dept. of Water Science and Engineering, University of Birjand

Received: 09.16.2019; Accepted: 04.28.2020

Abstract

Background and Objectives: The design of qualitative and quantitative monitoring systems for water resources has always been one of the most complex issues in the field of water resources and the environment. To protect the water resources at each basin, continuous and constant monitoring of water resources is a necessity and in this research, it is done using the entropy theory. In this study, the prediction of groundwater monitoring network in the Nazloochai Basin located in the west of Lake Urmia Basin using time series hybrid models was considered in terms of temporal and spatial distribution.

Materials and Methods: In this research, the entropy theory was used to monitoring the water level network in two historical and updated statistical periods (2001-2016 and 2016-2021, respectively). The updated statistical period was developed using hybrid time series models (CARMA-ARCH). After initial data analysis, the data were simulated to create the interaction of piezometers with multivariate regression. After confirming the accuracy of the multivariate regression model, entropy indicators were calculated and zoned on the Nazloochai plain. After evaluating the groundwater network monitoring during the statistical period of 2001-2016, the Nazloochai plain groundwater network monitoring was updated for the statistical period of 2016-2021.

Results: The results of the evaluation of the CARMA-ARCH hybrid model accuracy indicate the ability of the hybrid model to simulate and predict the annual values of the groundwater level in the study area. The performance factor of the model also confirmed this. The results of the evaluation of the groundwater network monitoring in Nazloochai plain showed that more than 99% of the studied area is located in the surplus and the relatively surplus situation in terms of the number of piezometers. The status of the plain in the statistical period of 2011-2016 is good, and the transmission of information between the piezometers is complete. During the statistical period of 2016-2021, groundwater level changes in the study area have been reduced, which has affected the network's groundwater monitoring. So that the areas with excess wells has been reduced to moderate monitoring areas. In general, the results of this research indicate the necessity of using the groundwater monitoring network and it is recommended that this monitoring be carried out annually for different plains of Iran. Also, the results showed that with decreasing groundwater level in the studied area, information transfer between wells is also reduced.

Conclusion: The results show that there is no complete transfer of information between the piezometers in the study area during the statistical period of 2016-2021.

Keywords: Irregularities, Modeling, Shannon Entropy, Transfoinformation, Urmia Lake

* Corresponding Author; Email: abbaskhashei@birjand.ac.ir

