

هیدروژنومورفولوژی، شماره ۴، پاییز ۱۳۹۴، صص ۱۹-۱
وصول مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۰۸ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۰۵

پیش‌بینی زمانی و مکانی تراز آب زیرزمینی دشت داورزن

طاهر رجائی^{۱*}

فاطمه پوراصلان^۲

چکیده

هدف از این پژوهش تخمین مقدار تراز آب زیرزمینی در نقاط مختلف دشت داورزن واقع در استان خراسان رضوی در یک ماه آینده است. جهت پیش‌بینی زمانی از روش پرسپترون چندلایه شبکه عصبی و برای پیش‌بینی مکانی از روش کریجینگ استفاده شده است. داده‌های ورودی شامل سری زمانی تراز آب زیرزمینی است که به مدت هشت سال از مهر ۸۲ تا اسفند ۸۹ به صورت ماهیانه اندازه‌گیری شده است. ابتدا به منظور تعیین میزان دقت مدل، تراز آب زیرزمینی ۱۲ ماه پایانی یک پیژومتر جدید با استفاده از روش پیشنهادی مدل‌سازی شده و با مقدار واقعی آن مقایسه گردیده است. مقدار ضریب انطباق به دست آمده ($E=0/812$) نشان دهنده کارایی مدل در این دشت است. سپس با اتکا به نتایج قابل قبول به دست آمده، تراز آب زیرزمینی یک ماه آینده پیش‌بینی شد. در مرحله بررسی کارایی مدل، روش شبکه عصبی با میانگین ضریب انطباق $0/688$ برای پیژومترها و نیم تغییرنمای گوسی نیز با درصد همبستگی $0/657$ نتایج قابل قبولی را برای دشت داورزن نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی زمانی و مکانی؛ تراز آب زیرزمینی؛ دشت داورزن؛ شبکه عصبی مصنوعی؛ کریجینگ

مقدمه

آب‌های زیرزمینی بزرگ‌ترین ذخیره قابل دسترس آب شیرین در کره زمین هستند. در مناطقی از کره زمین که منابع آب سطحی محدود بوده و یا به راحتی قابل دسترس نیست، نیاز انسان‌ها به آب را می‌توان از طریق آب‌های زیرزمینی که در همه جا به طور وسیع و گسترده پخش شده‌اند، برطرف نمود. در مناطق کم آب، مدیریت صحیح این ذخایر ارزشمند شناسایی، مدل‌سازی و پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در دشت‌ها جهت برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و استفاده بهتر و بهینه‌تر از پتانسیل‌های آبی موجود ضرورت بیشتری دارد. بدین منظور مدل کردن سفره‌های آب زیرزمینی و به تبع آن پیش‌بینی سطح ایستابی از نظر ایجاد سازه‌های مهندسی، مطالعات هیدرولوژی و مدیریتی، مصارف کشاورزی و به دست آوردن آب‌های زیرزمینی با کیفیت مناسب، از اهمیت بسیاری برخوردار است. پیشرفت‌های رایانه‌ای نیز امکان جمع‌آوری، ذخیره و پردازش بسیاری از عوامل مؤثر در بعد زمان و مکان را برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی فراهم نموده است. روش‌های زمین آمار و شبکه‌ی عصبی از جمله روش‌های مدل‌سازی مورد توجه در سال‌های اخیر هستند که به ترتیب در پی کشف ساختار مکانی متغیرها و تعمیم دانش نهفته در ورای اطلاعات تجربی به ساختار مدل می‌باشند (میثاقی و محمدی، ۱۳۸۵).

ریزو و دوگرتی^۱ (۱۹۹۴)، در پژوهشی با ترکیب شبکه‌های عصبی و روش کریجینگ، روشی را با عنوان کریجینگ-عصبی جهت تعیین مشخصه‌های هیدرودینامیکی آبخوان در گستره‌ی مکانی ارایه نمودند. مقایسه‌ی سه روش زمین آمار، شبکه عصبی و سیستم استنتاجی فازی-عصبی در میان‌بایی ضریب انتقال موضوع پژوهش خلقی و حسینی (۲۰۰۹) بود، که نتایج آن نشان‌دهنده‌ی دقت بالاتر سیستم استنتاجی فازی-عصبی می‌باشد. حسینعلی‌زاده و یعقوبی (۱۳۸۹)، به بررسی تغییرات زمانی و مکانی سطح سفره آب زیرزمینی با استفاده از زمین آمار پرداختند. آنها تعداد ۷۶ داده سطح آب زیرزمینی چهار فصل آبی ۸۳-۱۳۸۲ دشت‌های چهارگانه گناباد و ۷۱ داده سطح آب زیرزمینی فصل‌های زمستان ۸۱ و ۸۵ را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات نشان داد، نوسان‌های سطح آب زیرزمینی تمامی فصول دارای روند و ناهمسان‌گردی بوده‌اند. افزون بر این نیم تغییرنماهای به دست آمده فصل‌های بهار، تابستان و پاییز مدل نمایی و فصل‌های زمستان ۸۱، ۸۲ و ۸۵ مدل کروی را نشان می‌دهند. در تحقیقی دیگر دهقانی و همکارانش (۱۳۸۸)، برای تخمین مقادیر تراز سطح آب زیرزمینی در دشت قزوین، از سه روش زمین آمار، شبکه‌ی عصبی و سیستم استنتاجی فازی-عصبی استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد، سیستم استنتاجی فازی-عصبی با توجه به میانگین مربعات خطای کمتر، از دقت بالاتری نسبت به روش‌های زمین آمار و شبکه‌های عصبی برخوردار

است. محمدی و همکارانش (۱۳۹۱)، پس از بررسی تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی با استفاده از بهترین روش تخمین‌گر زمین آماری طی یک دوره‌ی ده ساله آماری در کرمان، پیشنهاد کردند که در مطالعات مربوط به منابع آب زیرزمینی بهتر است به‌جای استفاده از هیدروگراف واحد برای کل دشت، از نقشه‌ی پهنه‌بندی مکانی سطح آب زیرزمینی دشت استفاده شود، زیرا استفاده از هیدروگراف‌ها در ارزیابی تغییرات مکانی سطح آب، معرف کل دشت می‌باشد، در صورتی که ممکن است تغییرات سطح آب زیرزمینی در برخی مناطق دشت از روند کلی حاکم بر دشت پیروی نکرده و آنومالی‌هایی در برخی نقاط دشت دیده شود. زارع ابیانه و بیات ورکشی (۱۳۹۲)، به منظور برآورد سطح ایستابی در نقاط بدون اندازه‌گیری، مقادیر برآورد نقطه‌ای هر یک از روش‌های هوشمند عصبی را در محیط کریجینگ زمین آمار پهنه‌بندی کردند. دقت روش‌های مورد استفاده بر حسب خطای کم‌تر مقادیر سطح ایستابی برآوردی به ترتیب به روش‌های عصبی ژنتیک، پرسپترون چندلایه، تابع پایه‌ی شعاعی و عصبی فازی تعلق داشت. بیشترین مقدار خطا به برآوردهای مدل شبکه‌ی عصبی فازی و مدل شبکه‌ی تابع پایه‌ی شعاعی تعلق داشت. نتایج همچنین نشان داد با استفاده از طول و عرض جغرافیایی به‌عنوان بردار اطلاعات ورودی، می‌توان به‌دقت اطلاعات به دست آمده در برآورد تغییرات مکانی و پهنه‌بندی مقادیر سطح ایستابی اطمینان داشت. پورمحمدی و همکارانش (۱۳۹۲)، به مقایسه‌ی کارایی روش‌های شبکه عصبی و سری‌های زمانی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی زیرحوضه‌ی بختگان استان فارس پرداختند. در این تحقیق از شبکه‌های عصبی پیش‌خور پس‌انتشار خطا با توابع آموزشی لونیبرگ-مارکوارت استفاده شد. نتایج این پژوهش کارایی و دقت بالای هر دو تکنیک شبکه عصبی و سری زمانی را در پیش‌بینی سطح ایستابی چاه‌های منطقه نشان داد. صادقیان و همکارانش (۱۳۹۲) ضمن تشریح مختصری در خصوص انواع هم‌تغییر نمای فضایی-زمانی تفکیک‌پذیر و نحوه برآورد و مدل‌سازی آنها، ساختار همبستگی فضایی-زمانی داده‌های مربوط به سطح آب‌های زیرزمینی را مدل‌سازی کردند. در این پژوهش منحنی تراز پیش‌بینی سطح آب‌های زیرزمینی به روش کریجینگ عام تحت مدل‌های ضربی و جمعی-ضربی ارایه شده و دقت این مدل‌ها برای پیش‌بینی فضایی-زمانی سطح آب‌های زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مدل نشان‌دهنده‌ی دقت بسیار مطلوب مدل ضربی برای پیش‌بینی سطح آب‌های زیرزمینی در ناحیه مورد مطالعه است. چیت‌سازان و همکارانش (۲۰۱۳)، از شبکه عصبی مصنوعی جهت شبیه‌سازی نوسانات آب زیرزمینی دشت عقیلی منطقه گتوند استفاده کردند. ایشان از الگوریتم‌های مختلفی جهت شبیه‌سازی استفاده کرده و آنها را مورد بررسی قرار دادند. میزان بارش، تبخیر، رطوبت نسبی، درجه حرارت، تخلیه کانال آبیاری و تغذیه آب‌های زیرزمینی به عنوان ورودی شبکه و تراز آب زیرزمینی در آینده به

عنوان خروجی شبکه مورد استفاده قرار گرفتند. اعتبارسنجی شبکه نشان داد تقسیم پیزومترها به گروه‌های مختلف داده‌ها و طراحی شبکه‌های مجزا، باعث تمرکز بیشتر شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی در دشت می‌شود. همچنین نتایج نشان‌دهنده مناسب بودن الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت از میان سایر الگوریتم‌ها است. در پژوهشی دیگر ساهو و جی اچ ای (۲۰۱۳)، به این نتیجه رسیدند که در پیش‌بینی توزیع زمانی، مکانی تراز آب زیرزمینی یک منطقه، روش شبکه عصبی مصنوعی بهتر از روش رگرسیون خطی چندگانه عمل می‌کند. مختاری و همکارانش (۲۰۱۳)، به پیش‌بینی نوسانات تراز آب زیرزمینی دشت شبستر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در غرب استان آذربایجان شرقی پرداختند. نتایج پژوهش آنان نشان داد مدل شبکه عصبی تابع آموزش TRAINLM و تابع محرک TANSIG قادر به پیش‌بینی ماهانه سطح آب زیرزمینی در دوره سه ساله با دقت بالا است. مایتی و تیواری^۱ (۲۰۱۴) با مقایسه شبکه‌ی عصبی مصنوعی، شبکه‌های عصبی بیضی و سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی نتیجه گرفتند، شبکه‌های عصبی بیضی بهینه‌سازی شده توسط گرادیان مزدوج مدرج بهتر از هر دو مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی و سیستم استنتاجی فازی - عصبی تطبیقی جهت پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی عمل می‌کند.

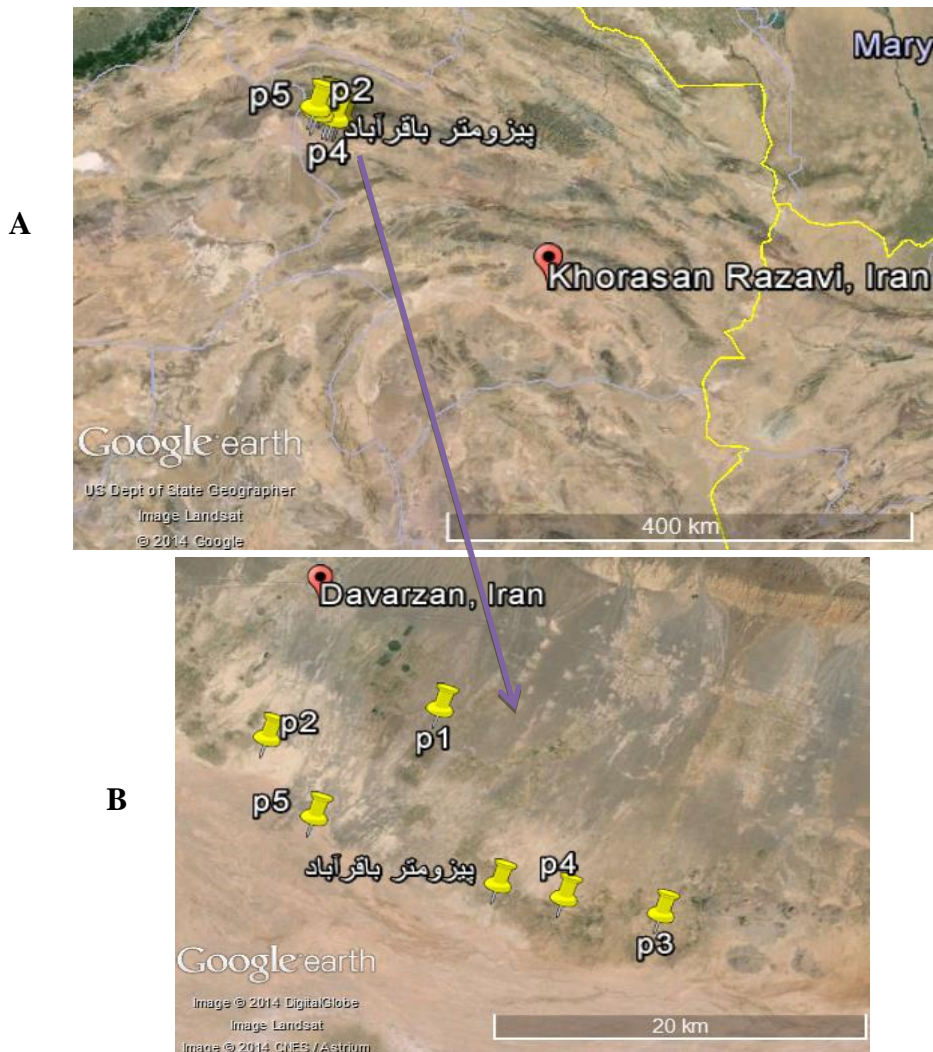
این پژوهش به پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی یک ماه آینده قسمتی از دشت داورزن استان خراسان رضوی پرداخته است. پس از معرفی منطقه مورد مطالعه و داده‌ها، و ارایه توضیح مختصری از دو مدل شبکه‌ی عصبی و زمین آمار، نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی شبکه‌ی عصبی به عنوان ورودی در روش کریجینگ مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل از روش کریجینگ جهت پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی یک پیزومتر جدید با مقادیر واقعی آن مقایسه شده و با به دست آمدن مقادیر قابل قبول، به پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی یک ماه آینده‌ی منطقه به وسیله‌ی دو روش شبکه‌ی عصبی و کریجینگ پرداخته شده است.

منطقه مورد مطالعه

دشت داورزن در غرب شهر سبزوار از لحاظ تقسیمات جغرافیایی جزو شهرستان داورزن در استان خراسان رضوی محسوب می‌گردد که بین $36^{\circ} 10' 7''$ تا $36^{\circ} 20' 30''$ عرض شمالی و $56^{\circ} 45' 30''$ تا $57^{\circ} 10' 15''$ طول شرقی قرار گرفته است. این دشت با وسعت $487/35$ کیلومتر مربع شکلی نسبتاً کشیده داشته و از شرق به دشت سبزوار، از شمال به ارتفاعات جغتای، از جنوب به کال شور سبزوار و از غرب به آبریز کویر مزینان که بخشی از حوضه آبریز دشت کویر است، محدود می‌گردد. شکل (۱) موقعیت شش پیزومتر مورد مطالعه را

1- Maiti & Tiwari

نشان می‌دهد. در این شکل، ابتدا موقعیت پیزومترهای مورد نظر در استان خراسان رضوی مشخص شده و سپس موقعیت پیزومترها با جزئیات بیشتر نشان داده شده‌اند.

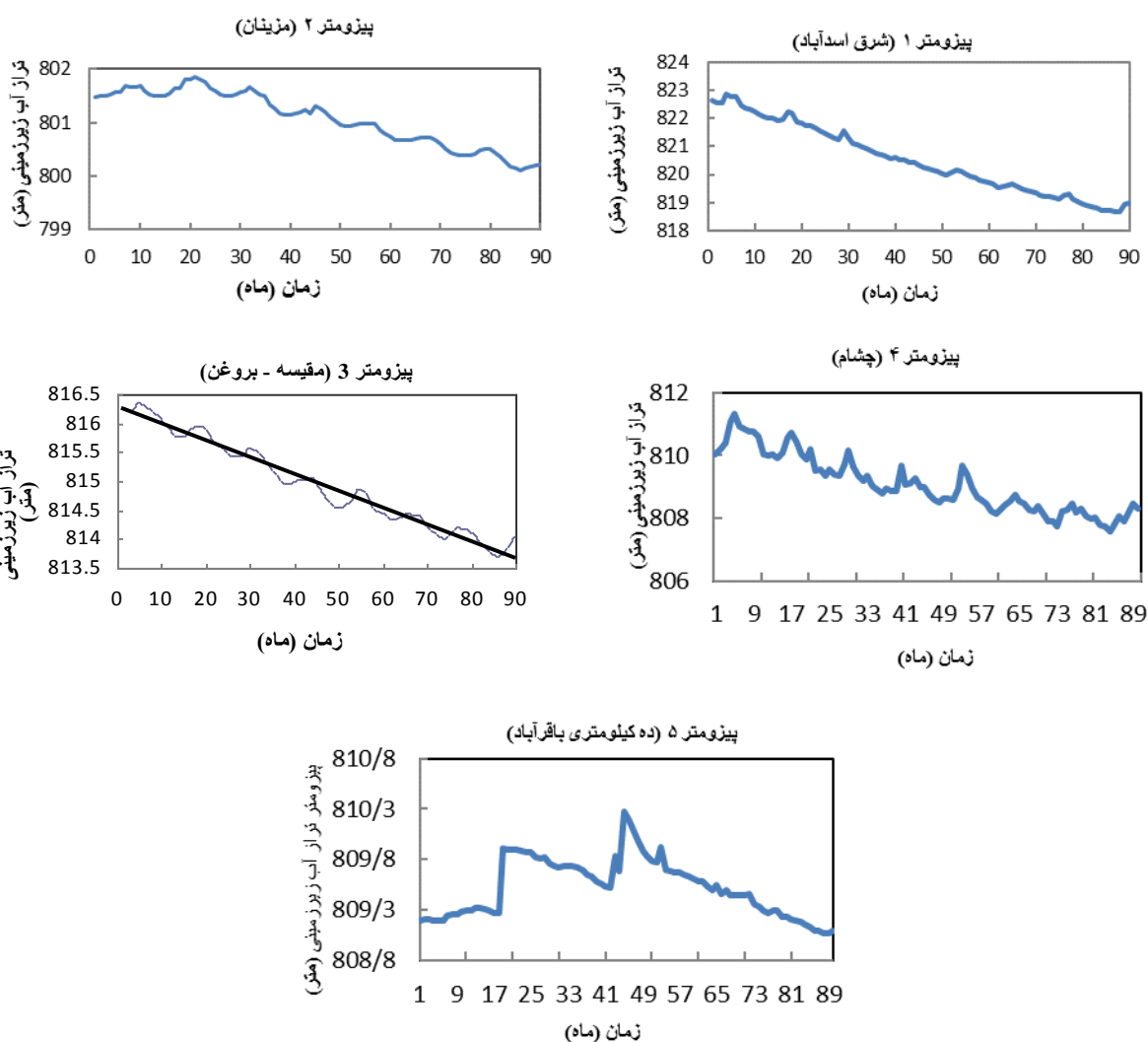


شکل (۱) A و B تصویر ماهواره‌ای و موقعیت پیزومترهای مطالعاتی دشت داورزن

پنج حلقه چاه نمونه به دلیل کامل بودن داده‌ها و قرارگیری آنها در یک محدوده از دشت مورد مطالعه قرار گرفته است. داده‌ها شامل اندازه‌گیری ماهانه‌ی تراز آب زیرزمینی پنج پیزومتر به مدت هشت سال در دوره‌ی آماری (اسفندماه ۱۳۸۹ - مهرماه ۱۳۸۲) به تعداد ۹۰ ماه برای هر پیزومتر می‌باشد. جدول (۲) مشخصات این پیزومترها را نشان می‌دهد. در شکل (۳) نیز تغییرات تراز آب زیرزمینی پنج پیزومتر برای دوره‌ی آماری ۹۰ ماهه نشان داده شده است.

جدول (۱) مشخصات پنج پیزومتر مشاهداتی مورد مطالعه

شماره پیزومتر	نام پیزومتر	UTM		نوع آماربرداری	محدوده زمانی	تعداد داده‌ها
		X	Y			
۱	شرق اسدآباد	۴۰۱۴۳۵۵	۴۹۵۱۴۰	ماهانه	۱۳۸۲-۱۳۸۹	۹۰
۲	مزینان	۴۰۱۲۶۱۷	۴۸۵۸۷۷	ماهانه	۱۳۸۲-۱۳۸۹	۹۰
۳	مقیسه-بروغن	۴۰۰۱۹۳۸	۵۰۶۹۴۱	ماهانه	۱۳۸۲-۱۳۸۹	۹۰
۴	چشام	۴۰۰۲۹۲۸	۵۰۱۹۹۱	ماهانه	۱۳۸۲-۱۳۸۹	۹۰
۵	ده کیلومتری باقراآباد	۴۰۰۷۸۴۰	۴۸۸۳۹۷	ماهانه	۱۳۸۲-۱۳۸۹	۹۰



شکل (۲) تراز آب زیرزمینی پنج پیزومتر مورد بررسی در دوره زمانی ۹۰ ماهه

همان‌طور که از نمودارهای شکل (۳) مشخص است، تمامی پیژومترها در نهایت یک روند نزولی را طی کرده‌اند. می‌توان گفت علت عمده‌ی کاهش ذخایر آبی عوامل انسانی، اضافه برداشت از سطح آب‌های زیرزمینی و البته خشکسالی‌های اخیر است.

مواد و روش‌ها

شبکه‌های عصبی مصنوعی: یک مدل غیرخطی متداول برای حل مسایل آب‌های زیرزمینی که توان مدل‌سازی و ایجاد روابط غیرخطی را دارد. این مدل بنابه تعریف، یک سیستم پردازش اطلاعات موازی است که عملکرد اجرایی آن برگرفته از ساختار بیولوژیکی شبکه مغز انسان است (هایکین^۱، ۱۹۹۴: ۲). در پژوهش حاضر جهت مدل‌سازی شبکه عصبی، از سری زمانی پرسپترون چندلایه (MLP) استفاده شده است. برای آموزش شبکه، از میان الگوریتم‌های مختلف از الگوریتم آموزشی لونیگ-مارکوات استفاده شده است که تحقیقات موجود سرعت، دقت و اطمینان بالای آن در پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی را تأیید می‌کند (آداموسکی و چان^۲، ۲۰۱۱). روند آموزش شبکه تا زمانی که خطای مربع متوسط (MSE) در مراحل آموزش، اعتبارسنجی و آزمون حداقل گردد، ادامه دارد.

شبکه عصبی MLP: یکی از متداول‌ترین شبکه‌ها در پیش‌بینی و حل مسایل غیرخطی، شبکه‌های موسوم به پرسپترون چند لایه است. آموزش این شبکه‌ها با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا صورت می‌پذیرد. ورودی‌ها به شبکه به صورت یک بردار $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ وارد می‌شوند و هر ورودی توسط یک وزن به گره مربوطه متصل شده و در نهایت تسلسلی از وزن‌ها به شکل بردار وزن $W(w_1, w_2, \dots, w_n)$ به گره مورد نظر مرتبط می‌گردد. وزن ارتباطی از گره لایه‌ی پیشین به لایه‌ی مورد نظر است. خروجی گره که Y نامیده می‌شود طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Y = f(x \cdot w - b) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، x بردار داده‌های ورودی، w بردار وزن و b مقدار آستانه یا بایاس است. درون هر گره پردازشگر تابع انتقال تولیدکننده‌ی خروجی‌های آن گره به‌شمار می‌رود و یکی از انواع مهم و پرکاربرد توابع انتقال تانژانت هیپربولیک است.

مدل شبکه‌ی عصبی NAR: از شبکه عصبی می‌توان به صورت تابعی و یا سری زمانی و با معماری‌های

1- Haykin

2- Adamo Wskin & Chan

مختلفی استفاده کرد. در مدل شبکه عصبی NAR یا خود بازگشتی غیرخطی، تنها داده‌های یک سری زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد و مقادیر آینده سری زمانی به صورت تابعی از مقادیر گذشته همان سری زمانی پیش‌بینی می‌شوند.

تئوری زمین آمار: در زمین آمار وجود یا عدم وجود ساختار مکانی بین داده‌ها بررسی شده و در صورت وجود ساختار مکانی، تحلیل داده‌ها انجام می‌گیرد. البته ممکن است نمونه‌های مجاور تا فاصله معینی در قالب ساختار مکانی به هم وابسته باشند که در این حالت بدیهی است میزان شباهت بین مقادیر مربوط به نمونه‌های نزدیک‌تر، بیش‌تر است. به طور کلی تخمین زمین آماری فرآیندی است که طی آن می‌توان یک کمیت در نقاطی با مختصات معلوم را با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاطی دیگر با مختصات معلوم به دست آورد. یکی از روش‌های معروف در زمین آمار، روش کریجینگ می‌باشد.

روش کریجینگ: کریجینگ یک روش تخمین است که بر منطق میانگین متحرک وزن دار استوار بوده و می‌توان گفت بهترین تخمین‌گر خطی نارایب است. این تخمین‌گر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{vi} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه Z_v^* عیار تخمینی، λ_i وزن و یا اهمیت کمیت وابسته به نمونه i ام و Z_{vi} عیار نمونه i است.

شرط استفاده از این تخمین‌گر توزیع نرمال متغیر Z است، در غیراین صورت یا باید از کریجینگ غیرخطی استفاده کرد و یا این که با تبدیل‌های مناسب توزیع متغیر را به نرمال تبدیل کرد (حسنی پاک، ۱۳۹۲: ۱۸۲).

نرمالیزه کردن داده‌ها: با توجه به محدودیت توابع آستانه نوروها در مدل شبکه‌ی عصبی، ارایه نمونه‌های آموزشی و آزمایشی که به صورت داده‌های خام اندازه‌گیری شده‌اند، باعث عدم دقت و کاهش سرعت شبکه می‌گردد. همچنین شرط استفاده از روش کریجینگ نرمال بودن داده‌ها می‌باشد، لذا در تحقیق حاضر داده‌ها طبق رابطه‌ی زیر نرمالیزه شده و هنگام ارایه به شبکه، دارای مقادیری بین صفر تا ۱ می‌باشند. نتایج خروجی را نیز پس از دینرمال شدن می‌توان به عنوان مقادیر پیش‌بینی در نظر گرفت.

$$Z_n = \frac{Z - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه، Z داده به صورت خام، Z_n داده نرمالیزه شده، Z_{\min} مینیمم داده‌ها و Z_{\max} ماکزیمم داده‌هاست.

جهت بررسی کارایی مدل‌ها، از سه معیار ضریب انطباق E و میانگین قدر مطلق خطا MAE و جذر میانگین مربعات خطا RMSE استفاده شده است (رجایی، ۲۰۱۱):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z_{i(\text{measured})}(x) - Z_{i(\text{predicted})}(x))^2}{\sum_{i=1}^n (Z_{i(\text{measured})}(x) - Z_{i(\text{mean})}(x))^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Z_{i(\text{measured})}(x) - Z_{i(\text{predicted})}(x)|}{n} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{i(\text{measured})}(x) - Z_{i(\text{predicted})}(x))^2}{n}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

بحث و نتایج

تحلیل آماری داده‌ها: ابتدا به منظور بررسی دقیق‌تر، پیش‌آنالیزی در ارتباط با تراز آب زیرزمینی در پیچ پیژومتر در جداول (۲) و (۳) صورت گرفته است. این جدول شامل مقدار بیشینه، مقدار کمینه، میانگین، انحراف معیار (S_d)، ضریب چولگی (C_s)، ضریب همبستگی یک ماهه (R_1)، ضریب همبستگی دو ماهه (R_2)، ضریب همبستگی سه ماهه (R_3)، ضریب همبستگی چهار ماهه (R_4) است.

جدول (۲) تحلیل آماری داده‌های کل، آموزش و آزمون در پیژومترهای ۱ و ۲ و ۳

پارامتر آماری	پیژومتر ۱			پیژومتر ۲			پیژومتر ۳		
	کل داده‌ها	آموزش	آزمون	کل داده‌ها	آموزش	آزمون	کل داده‌ها	آموزش	آزمون
N	۹۰	۷۸	۱۲	۹۰	۷۸	۱۲	۹۰	۷۸	۱۲
میانگین	۸۲۰/۵۱۳	۸۲۰/۷۷۲	۸۱۸/۸۳۱	۸۰۱/۰۷۰	۸۰۱/۱۹۳	۸۰۰/۲۶۹	۸۱۴/۹۶۹	۸۱۵/۱۳۱	۸۱۳/۹۱۹
MAX	۸۲۲/۸۶۰	۸۲۲/۸۶۰	۸۱۹/۰۵۰	۸۰۱/۸۶۰	۸۰۱/۸۶۰	۸۰۰/۵۰۰	۸۱۶/۳۵۰	۸۱۴/۰۲۰	۸۱۴/۱۷۰
MIN	۸۱۸/۶۶۰	۸۱۹/۱۲۰	۸۱۸/۶۶۰	۸۰۰/۱۱۰	۸۰۰/۳۸۰	۸۰۰/۱۱۰	۸۱۳/۷۱۰	۸۱۶/۳۵۰	۸۱۳/۷۱۰
S_d	۱/۲۴۸۸	۱/۱۳۶	۰/۱۳۵	۰/۵۱۶	۰/۴۳۵	۰/۱۴۴	۰/۷۷۶	۰/۷۰۳	۰/۱۵۸
C_s	۰/۲۶۷	۰/۲۲۸	۰/۱۸۴	-۰/۲۹۶	-۰/۳۸۸	۰/۶۴۷	۰/۲۰۰	۰/۱۶۰	۰/۱۲۷
R_1	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۰/۸۵۱	۰/۹۹۴	۰/۹۹۱	۰/۷۵۶	۰/۹۹۶	۰/۹۹۶	۰/۹۴۲
R_2	۰/۹۹۳	۰/۹۹۲	۰/۶۴۱	۰/۹۸۳	۰/۹۷۶	۰/۴۸۱	۰/۹۸۸	۰/۹۸۶	۰/۷۸۶
R_3	۰/۹۹۱	۰/۹۸۹	۰/۳۵۹	۰/۹۶۷	۰/۹۵۴	۰/۲۶۸	۰/۹۷۷	۰/۹۷۳	۰/۴۷۶
R_4	۰/۹۹۰	۰/۹۸۹	۰/۱۹۵	۰/۹۵۰	۰/۹۳۰	-۰/۲۴۱	۰/۹۶۴	۰/۹۶۱	۰/۰۶۱

باید توجه داشت که مدل‌های شبکه عصبی، زمانی بهتر عمل می‌کنند که خصوصیات آماری داده‌های آموزش و آزمون مشابهت داشته باشند. در جداول (۲) و (۳) در مجموع خصوصیات آماری نسبتاً مشابهی را بین داده‌های آموزش و آزمون نشان می‌دهد. ضریب همبستگی برای تأخیرهای ۱، ۲، ۳ و ۴ ماهه در هر پنج پیرومتر نسبتاً بالاست. در بین پیرومترها، ضریب همبستگی پیرومتر ۴ دارای شباهت بیش‌تری در هر سه مورد کل داده‌ها، داده‌های آزمون و داده‌های آموزش می‌باشد. با این وجود در مقایسه با سایر پیرومترها در شبیه‌سازی با مدل شبکه عصبی نتایج ضعیف‌تری را نشان داده است. در مقابل پیرومتر ۲ نیز کم‌ترین شباهت ضریب همبستگی را بین کل داده‌ها، داده‌های آزمون و داده‌های آموزش نشان می‌دهد، اما دارای نتایج بهتری در تحلیل شبکه عصبی در مقایسه با سایر پیرومترها است، که این موضوع می‌تواند دلیل بر عدم وابستگی نتایج شبکه‌ی عصبی به ضریب همبستگی باشد.

جدول (۳) تحلیل آماری داده‌های کل، آموزش و آزمون در پیرومترهای ۴ و ۵

پارامتر آماری	پیرومتر ۴			پیرومتر ۵		
	کل داده‌ها	آموزش	آزمون	کل داده‌ها	آموزش	آزمون
N	۹۰	۷۸	۱۲	۹۰	۷۸	۱۲
میانگین	۸۵۰/۷۸۵	۸۵۰/۸۹۶	۸۵۰/۰۶۰	۸۰۹/۵۲۳	۸۰۹/۵۸۰	۸۰۹/۱۴۸
MAX	۸۵۱/۷۸۰	۸۵۱/۷۸۰	۸۵۰/۲۲۰	۸۱۰/۲۷۰	۸۱۰/۲۷۰	۸۰۹/۲۳۰
MIN	۸۴۹/۹۳۰	۸۵۰/۱۵۰	۸۴۹/۹۳۰	۸۰۹/۰۷۰	۸۰۹/۱۹۰	۸۰۹/۰۷۰
S_d	۰/۵۲۲	۰/۴۶۹	۰/۰۷۷	۰/۲۸۷	۰/۲۶۳	۰/۰۶۲
C_s	۰/۲۱۰	۰/۲۰۱	۰/۳۹۷	۰/۳۰۱	۰/۲۶۶	۰/۰۸۵
R₁	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۸۰	۰/۹۲۷	۰/۹۰۰	۰/۹۰۶
R₂	۰/۹۹۷	۰/۹۹۹	۰/۹۷۱	۰/۸۷۶	۰/۸۳۲	۰/۷۶۷
R₃	۰/۹۹۷	۰/۹۹۹	۰/۹۷۳	۰/۷۹۸	۰/۷۲۵	۰/۶۴۶
R₄	۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	۰/۹۷۲	۰/۷۲۶	۰/۶۲۷	۰/۵۱۴

ضریب چولگی هر پنج پیرومتر نیز نسبتاً پایین بوده که این برای مدل‌سازی مناسب‌تر است، زیرا ضریب چولگی بالا تأثیر منفی قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد شبکه‌های عصبی دارد (رجایی و همکاران، ۲۰۱۱).

تحلیل مدل شبکه عصبی: برای به دست آوردن بهترین نتیجه در مدل شبکه عصبی، ترکیبات گوناگونی بر اساس تعداد لایه‌های مخفی، تعداد نرون‌های لایه مخفی و تعداد تأخیرها مورد آموزش و آزمایش قرار گرفته است. از بین دو معماری شبکه با دقت برابر، مورد ساده‌تر ارجح است. اگرچه تعداد لایه‌های مخفی و نرون‌های

بیشتر، باعث دقت بیشتر محاسبات در آموزش شبکه می‌شود، ولی الزاماً دقت مدل را در پیش‌بینی داده‌های اعتبارسنجی و آزمون افزایش نخواهد داد.

در این تحقیق، دوازده ماه پایانی به‌عنوان داده‌های آزمون به شبکه داده شد. شبکه عصبی در چند حالت مورد آزمایش قرار گرفت که در نهایت در پیرومتر ۱، شبکه‌ای با یک لایه میانی شامل چهار نرون، سه زمان تأخیر و یک لایه خروجی، در پیرومتر ۲، شبکه‌ای با یک لایه میانی شامل چهار نرون، پنج زمان تأخیر و یک لایه خروجی، در پیرومتر ۳ نیز شبکه‌ای با یک لایه میانی شامل چهار نرون، سه زمان تأخیر و یک لایه خروجی، در پیرومتر ۴، شبکه‌ای با یک لایه میانی شامل پنج نرون، پنج زمان تأخیر و یک لایه خروجی و در پیرومتر ۵ نیز شبکه‌ای با یک لایه میانی شامل چهار نرون، چهار زمان تأخیر و یک لایه خروجی مدل‌های مناسبی را جهت پیش‌بینی سری زمانی ارائه نمودند.

مقادیر تخمین‌گرهای آماری ضریب انطباق، میانگین قدر مطلق خطا و جذر میانگین مربعات خطا در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول (۴) مقادیر ضریب انطباق، میانگین قدر مطلق خطا و جذر میانگین مربعات خطا در تحلیل زمانی

شماره پیرومتر	RMSE(m)	MAE	E
۱	۰/۰۷۰	۰/۰۶	۰/۷۰۴
۲	۰/۱۰۸	۰/۰۹۲	۰/۸۳۹
۳	۰/۰۶۱	۰/۰۴۱	۰/۷۳۴
۴	۰/۱۶۳	۰/۱۴۷	۰/۵۳۸
۵	۰/۰۳۶	۰/۰۲۷	۰/۶۲۳

با توجه به نتایج به‌دست آمده از جدول (۴) مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از مدل‌سازی روش شبکه عصبی در ارتباط با پنج پیرومتر دشت داورزن تا حد زیادی قابل قبول بوده و قابل اتکاست.

درون‌یابی تراز آب زیرزمینی یک پیرومتر جدید، با استفاده از نتایج به‌دست آمده از تحلیل پنج پیرومتر دشت داورزن به‌شرح زیر است:

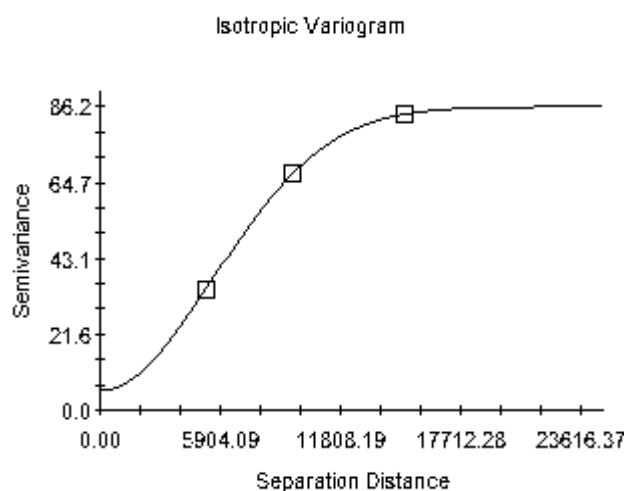
تحلیل زمین‌آمار: نخستین مرحله از مدل‌سازی زمین‌آمار ترسیم نیم تغییرنا است. پس از تعیین نوع توزیع داده‌ها و به منظور تعیین ساختار تغییرات مکانی داده‌های عملکرد، پردازش مدل‌های مختلفی از نیم تغییرناهای تجربی انجام می‌شود، که این امر توسط تجزیه و تحلیل واریوگرام بررسی می‌گردد. با استفاده از واریوگرام می‌توان شعاع همبستگی متغیرها، بررسی حالت ایستایی و وجود یا عدم وجود روند را در داده‌ها

تشخیص داد. شرط استفاده از این تجزیه و تحلیل، نرمال بودن داده‌ها است که تمام داده‌های مورد استفاده ابتدا توسط رابطه ۳ نرمال‌سازی شده‌اند. در نهایت پس از تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته بر روی هر یک از پنج پیرومتر، مدل تئوری مناسب برای برازش بر روی نیم تغییرنمای تجربی با توجه به مقدار RSS کمتر و میزان نسبت $\frac{c_0}{c_0+c}$ انتخاب گردید. نسبت واریانس قطعه‌ای به آستانه یا واریانس کل $\frac{c_0}{c_0+c}$ شاخصی از قدرت ساختار مکانی در متغیرها است که نسبت کمتر از ۰/۲۵ آن، نشان‌دهنده همبستگی قوی، نسبت بین ۰/۲۵-۰/۷۵، بیانگر همبستگی متوسط و نسبت بزرگتر از ۰/۷۵، نشان‌دهنده همبستگی ضعیف خواهد بود (حسینعلی‌زاده و یعقوبی، ۱۳۸۹). جدول (۵) مقادیر به دست آمده از محاسبه نیم تغییرنماهای مختلف را نشان می‌دهد.

جدول (۵) مشخصات نیم تغییرنماهای برازش شده سطح آب در ۵ حلقه چاه مشاهده‌ای

مدل نیم تغییرنما	پایداری ساختار مکانی (درصد) $\frac{c}{c_0+c}$	همبستگی (درصد) r^2	مجموع مربعات باقیمانده RSS
مدل کروی	۰/۹۹۹	۰/۹۸۵	۲۷/۱
مدل نمایی	۰/۹۳۴	۰/۹۸۷	۱۷۷
*مدل گوسی	۰/۹۳۵	۱/۰۰۰	۰/۰۸۷
مدل خطی	۰/۸۵۵	۰/۹۳۰	۸۹/۹

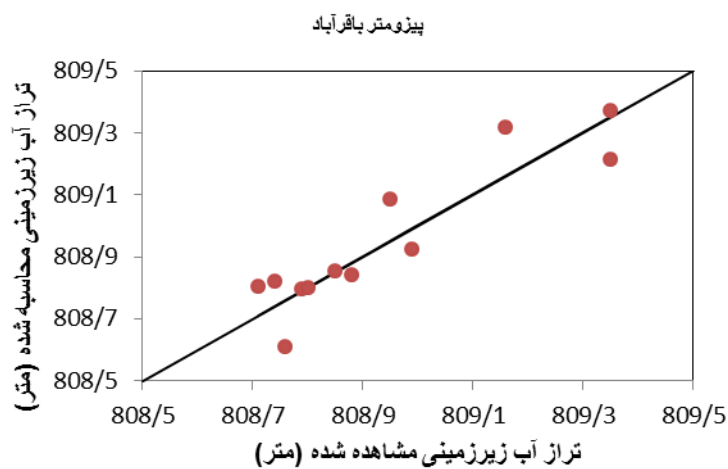
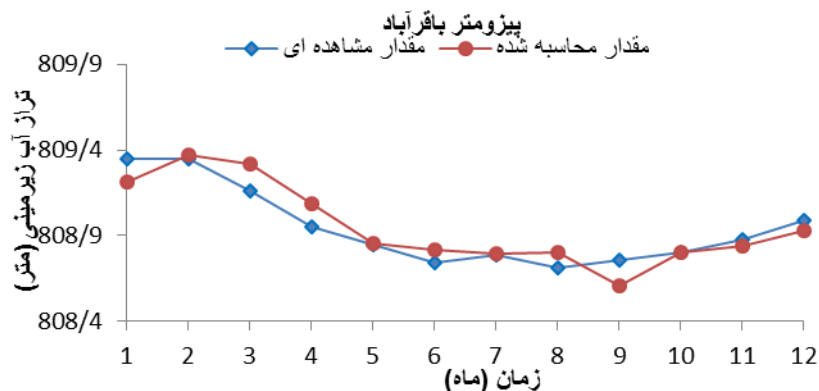
همانطور که از جدول (۵) مشخص است، مقدار $\frac{c_0}{c_0+c}$ در این مدل‌ها نشان‌دهنده همبستگی مکانی ضعیف است. از بین مدل‌های محاسبه شده در مجموع مدل گوسی به دلیل میزان همبستگی بالاتر و مجموع مربعات باقیمانده کمتر در مقایسه با سایر مدل‌ها انتخاب گردیده است. در شکل (۳) نیم تغییرنمای گوسی به دست آمده نشان داده شده است.



شکل (۳) نیم تغییرنمای گوسی پیرومترها

یکی از روش‌های تشخیص ایستایی داده‌ها آنالیز نیم تغییرنا است. به این صورت که اگر نیم تغییرنا به سقف معینی نرسد و ثابت نگردد داده‌ها ایستایی ندارند، که با توجه به نیم تغییرنمای به دست آمده از پیژومترها، این ایستایی دیده می‌شود.

شکل (۴) نمودار مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه شده و همچنین نمودار پراکندگی آنها را جهت مقایسه بهتر برای پیژومتر باقرآباد نشان می‌دهد.



شکل (۴) مقایسه تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از درون‌یابی کریجینگ زمین آمار

نتایج به دست آمده از درون‌یابی روش کریجینگ برای پیژومتر باقرآباد، مقادیر تراز آب زیرزمینی ۱۲ ماه پایانی این پیژومتر را مشخص می‌کند. جدول (۶) مقادیر ضریب انطباق، میانگین قدر مطلق خطا و جذر میانگین مربعات خطا برای مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای تراز آب زیرزمینی ۱۲ ماه پایانی پیژومتر باقرآباد را نشان می‌دهد.

جدول (۶) مقادیر ضریب انطباق، میانگین قدر مطلق خطا و جذر میانگین مربعات خطا در پیرومتر باقرآباد

E	MAE	RMSE(m)	UTM		نام پیرومتر
			X	Y	
۰/۸۱۲	۰/۰۷۴	۰/۰۹۴	۴۹۸۲۲۱	۴۰۰۳۷۵۵	باقرآباد

کارهای صورت گرفته تا این مرحله از پژوهش به منظور بررسی میزان دقت و قابل اتکا بودن روش‌های شبکه‌ی عصبی و زمین‌آماري کريجينگ جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی زمانی و مکانی تراز آب زیرزمینی در نقاط فاقد پیرومتر بوده است. با توجه به نتایج قابل قبول به‌دست آمده تا این مرحله برای یک پیرومتر، در ادامه به پیش‌بینی و مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی یک ماه آینده در کل محدوده مورد نظر پرداخته می‌شود. بدین منظور ابتدا با استفاده از مدل شبکه عصبی تراز آب زیرزمینی در پنج پیرومتر مورد مطالعه در یک ماه آینده پیش‌بینی شده است. نتایج به دست آمده از این پیش‌بینی در جدول (۷) نشان داده شده است.

جدول (۷) پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی یک ماه آینده در پنج پیرومتر مطالعاتی

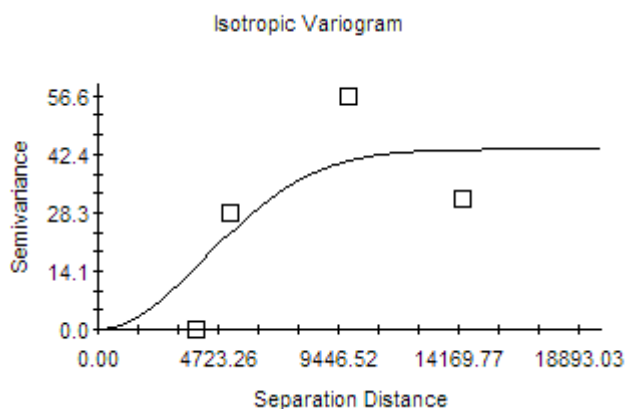
شماره‌ی پیرومتر	۱	۲	۳	۴	۵
تراز پیش‌بینی شده در یک ماه آینده (متر)	۸۱۸/۹۱	۸۰۰/۳۲	۸۱۴/۱۳	۸۰۸/۳۰	۸۰۹/۱۶

سپس درون‌یابی تراز آب زیرزمینی در کل محدوده مورد مطالعه، با استفاده از شبکه زمین‌آماري کريجينگ، انجام شده است. به این منظور ابتدا بهترین مدل نیم تغییرنا از جدول (۸) جهت درون‌یابی انتخاب گردید.

جدول (۸) مشخصات نیم تغییرناهای برازش شده سطح آب در ۵ حلقه چاه مشاهده‌ای

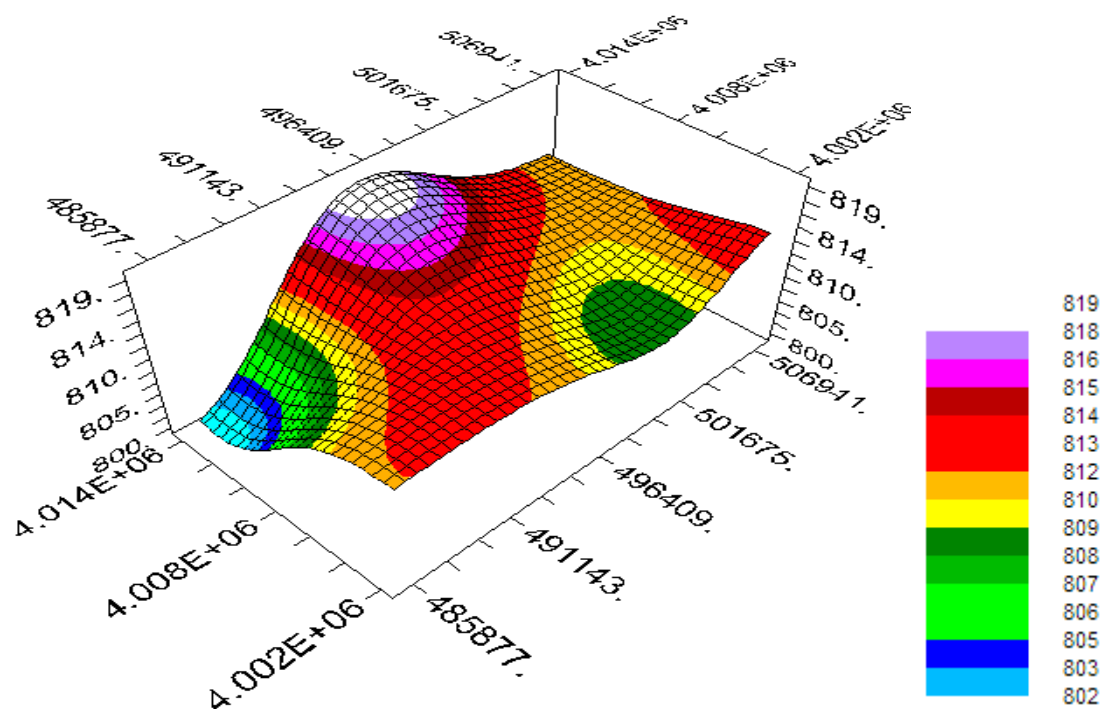
مدل نیم تغییرنا	پایداری ساختار فضایی (درصد) $\frac{c}{c_0 + c}$	همبستگی (درصد) r^2	مجموع مربعات باقیمانده RSS
مدل کروی	۰/۹۹۸	۰/۶۵۷	۷۵۹
مدل نمایی	۰/۹۹۸	۰/۴۶۲	۹۲۳
*مدل گوسی	۰/۹۹۸	۰/۶۵۷	۶۳۲
مدل خطی	۰/۸۷۰	۰/۳۲۹	۳۷۰۵

با توجه به جدول (۸) مدل گوسی به دلیل میزان همبستگی بالاتر و مجموع مربعات باقیمانده کمتر در مقایسه با سایر مدل‌ها انتخاب گردیده است. شکل ۵ نیز نیم تغییرنا به دست آمده از این مدل گوسی را نشان می‌دهد. با توجه به این که نیم تغییرنا به دست آمده به یک سقف معین رسیده و ثابت گردیده است، داده‌ها دارای ایستایی می‌باشند.



شکل (۵) نیم تغییرنمای گوسی پیزومترها

در نهایت نیز نتایج حاصل از این درون‌یابی برای کل محدوده‌ی مورد نظر در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶) پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی یک ماه آینده در محدوده‌ی پیزومترهای مطالعاتی دشت داورزن

با توجه به شکل (۶)، تراز آب زیرزمینی کل منطقه‌ی مورد مطالعه را می‌توان مشخص نمود، به عنوان مثال تراز به دست آمده برای پیزومتر باقرآباد در یک ماه آینده در حدود ۸۰۹ متر می‌باشد، که این مقدار با توجه به تراز آب زیرزمینی مشاهده شده در ۱۲ ماه پایانی این پیزومتر قابل قبول است. بررسی جداول

نشان می‌دهد مناطق حاشیه کویر، دارای تراز پایین‌تر و مناطق واقع در دامنه‌ی کوه دارای بالاترین تراز آب زیرزمینی هستند. در نهایت نتایج نشان می‌دهند روند تغییرات تراز آب زیرزمینی به سمت جنوب غرب یک روند کاهشی است که دلیل آن ممکن است وجود زمین‌های کشاورزی، بهره‌برداری بیش از حد مجاز از منابع طبیعی و وجود ناحیه کویری در این بخش از دشت باشد. اما با توجه به این که ساختار فضایی متغیرها مناسب تشخیص داده نشد، می‌توان نتیجه گرفت میزان دقت داده‌های برازش داده شده کافی نبوده است، که این مشکل با افزایش تعداد پیژومترهای مورد بررسی قابل حل است.

نتیجه‌گیری

پیش‌بینی دقیق تراز آب زیرزمینی اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی مناسب و مدیریت صحیح منابع آب دارد. هر چند دخالت عوامل مختلف در تراز آب زیرزمینی و دقیق نبودن آمار آنها موجب پیچیدگی آن می‌شود. حتی اگر از همه عوامل، آمار دقیقی موجود باشد، به علت ماهیت پیچیده این پدیده و عوامل متعدد باز هم نمی‌توان رابطه دقیقی مثل یک رابطه ریاضی برای آن تعریف کرد. با این حال استفاده از روش‌های دقیق و کارآمد، می‌تواند کمک شایانی در این زمینه نماید. در این تحقیق ابتدا به وسیله شبکه عصبی پنج پیژومتر بررسی و مدل‌سازی شده است. در مدل عصبی با توجه به این که تأخیرهای سه، پنج، سه، پنج و چهار ماهه به ترتیب بهترین نتایج را برای پیژومترهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ داشته‌اند، به نظر می‌رسد این مدل‌ها ارتباطاتی را بین عمق آب زیرزمینی ماه فعلی با عمق آب زیرزمینی یک تا سه ماه، یک تا پنج ماه، یک تا سه ماه، یک تا پنج ماه و یک تا چهار ماه قبلی آنها یافته‌اند. سپس به کمک روش کریجینگ و با استفاده از نتایج مدل‌سازی پنج پیژومتر، پیش‌بینی مکانی تراز آب زیرزمینی ۱۲ ماه پایانی پیژومتر باقرآباد انجام شده است. با توجه به نتایج حاصل از تخمین زمین آمار نیز می‌توان دریافت که از بین انواع مدل‌های نیم تغییرنا مدل گوسی با مجموع مربعات باقیمانده و درصد همبستگی ۰/۰۸۷ و ۱/۰۰ بهترین برازش را نسبت به سایر مدل‌های برازش داده شده نشان می‌دهد. البته درصد پایداری ساختار مکانی بالای آن نشان از ضعیف بودن همبستگی مکانی است و دقت نامناسب داده‌های برازش داده شده را نشان می‌دهد، که می‌توان در صورت امکان با افزایش تعداد پیژومترها دقت را تا حدودی افزایش داد. مقایسه مقادیر محاسبه شده از مجموع دو روش با مقادیر مشاهده‌ای تراز آب زیرزمینی پیژومتر باقرآباد نشان از قابل قبول بودن روش‌های به کار رفته در این پژوهش می‌باشد. در ادامه با تکیه بر نتایج به دست آمده، ابتدا به وسیله شبکه عصبی به پیش‌بینی زمانی تراز آب زیرزمینی یک ماه آینده در پیچ پیژومتر مورد مطالعه پرداخته شده، سپس به کمک روش زمین آماری کریجینگ پیش‌بینی مکانی کل محدوده مورد نظر انجام شده است. در این مرحله نیز مدل گوسی با مجموع مربعات باقیمانده و همبستگی ۰/۶۵۷ و ۶۳۲ بهترین برازش را نسبت به سایر نیم‌تغییرناها نشان داد. نتایج حاصل از این

پژوهش نشان‌دهنده کارایی و دقت مناسب مدل شبکه عصبی و نیم‌تغییرنمای گوسی روش کریجینگ در دشت داورزن است.

امید است روش‌های ارایه شده به عنوان الگویی مناسب در جهت پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی ماه‌های آینده مناطق دیگر مورد استفاده قرار گیرند. پیشنهاد می‌شود محققان در تحقیقات بعدی جهت دستیابی به بالاترین دقت، ترکیب مدل‌های شبکه عصبی با روش‌هایی همچون موجک و ترکیب با روش‌های زمین آماری مختلف در ساختارهای زمانی و مکانی، مقایسه با ترکیب‌های ساختاری دیگر و بهینه‌سازی فرآیند تخمین را مورد بررسی قرار دهند.

منابع

- پورمحمدی، سمانه؛ ملکی‌نژاد، حسین و ربابه پورشرعیانی (۱۳۹۲)، مقایسه کارایی روش‌های شبکه عصبی و سری‌های زمانی در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: زیرحوضه بختگان استان فارس)، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۰، شماره ۴، صص ۲۶۱-۲۵۱.
- حسنی‌پاک، علی‌اصغر (۱۳۹۲)، زمین‌آمار، چاپ چهارم، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
- حسینعلی‌زاده، محسن و علی یعقوبی (۱۳۸۹)، تغییرات زمانی و مکانی سطح سفره آب زیرزمینی با استفاده از زمین‌آمار، علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران، شماره ۱۰، صص ۶۷-۶۳.
- دهقانی، امیراحمد؛ عسگری، معصومه و ابوالفضل مساعدی (۱۳۸۸)، مقایسه سه روش شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی و زمین‌آمار در میان‌یابی سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت قزوین، علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، جلد ۱۶، ویژه‌نامه ۱-ب، صص ۵۲۸-۵۱۷.
- زارع ایبانه، حمید و مریم بیات‌ورکشی، (۱۳۹۲)، توسعه و کاربرد مدل‌های عصبی، فازی، الگوریتم ژنتیک و زمین‌آمار در برآورد توزیع مکانی سطح ایستابی، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۰، شماره ۴، صص ۲۵-۱.
- صادقیان، آزاده؛ واقعی، یدالله و محسن محمدزاده (۱۳۹۲)، پیش‌بینی تغییرات مکانی-زمانی سطح آب زیرزمینی در دشت بیرجند به روش کریجینگ، آب و فاضلاب، جلد ۲۴، شماره ۱، صص ۹۴-۱۰۰.
- محمدی، صدیقه؛ سلاجقه، علی؛ مهدوی، محمد و رضا باقری (۱۳۹۱)، بررسی تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از روش زمین‌آمار مناسب طی یک دوره آماری ۱۰ ساله (۱۳۸۵-۱۳۷۵)، تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۹، شماره ۱، صص ۷۱-۶۰.
- میتاچی، فرهاد و کوروش محمدی (۱۳۸۵)، پهنه‌بندی اطلاعات بارندگی با استفاده از روش‌های آمار کلاسیک و زمین‌آمار و مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی، مجله علمی کشاورزی، سال ۲۳، شماره ۱۳، صص ۴-۱.
- Adamowski, J. & Chan, F. H., (2011), **A Wavelet Neural Network Conjunction Model for Groundwater Level Forecasting**, Journal of Hydrology, Vol. 407, PP 28-40.
- Chitsazan, Manouchehr; Rahmani, Gholamreza & Neyamadpour, Ahmad (2013), **Groundwater Level Simulation Using Artificial Neural Network: a case study from Aghili plain, urban area of Gotvand, south-west Iran**, Geopersia, Vol. 3, No. 1, PP 35-46.
- Haykin, S., (1994), **Neural Networks: a Comprehensive Foundation**, MacMillan, New York.

- Kholghi, M. & Hosseini, S.M., (2009), **Comparison of Groundwater Level Estimation Using Neuro-fuzzy and Ordinary Kriging**, Environmental Modeling and Assessment, Vol. 14, No. 6, PP 729-753.
- Kumar, M.; Bandyopadhyay, A.; Raghuwanshi, N.S. & Singh, R. (2008), **Comparative Study of Conventional and Artificial Neural Network-based ET₀ Estimation Models**, Irrigation Science, Vol. 26, No. 6, PP 531-545.
- Maiti, S. & Tiwari, R.K., (2014), **A Comparative Study of Artificial Neural Networks, Bayesian Neural Networks and Adaptive Neuro-fuzzy Inference System in Groundwater Level Prediction**, Environmental Earth Sciences, Vol. 71, No. 7, PP 3147-3160.
- Mokhtari, Z.; Nazemi, A.H. & Nadiri, A., (2013), **Forecasting the Underground Water Level with Artificial Neural Networks Model (Case Study: Shabestar Plain)**, Journal of Geotechnical Geology (Applied Geology), Vol. 8, No. 4, PP 345-353.
- Rajaei, T., (2011), **Wavelet and ANN Combination Model for Prediction of Daily Suspended Sediment Load in Rivers**, Science of The Total Environment, Vol. 409, No. 15, PP 2917–2928.
- Rajaei, T.; Nourani, V.; Zounemat-Kermani, M. & Kisi, O., (2011), **River Suspended Sediment Load Prediction: Application of ANN and Wavelet Conjunction Model**, Hydrologic Engineering, ASCE, Vol. 16, No. 8, PP 613-627.
- Rizzo, D.M. & Dogherty, D.E, (1994), **Characterization of Aquifer Properties Using Artificial Neural Networks: Neural Kriging**, Water Resour. Res, Vol. 30. No, 2, PP 483-497.