نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی سال هجدهم، شماره ۴۸، بهار ۹۷

مقایسه مدل عددی، روش‌های هوشمند عصبی و زمین آمار در تخمین سطح آب زیرزمینی

دریافت مقاله: ۹۶/۸/۴ **پذیرش نهایی:** ۹۶/۱۲/۲۲

صفحات: ۱۸۲-۱۶۵

مریم بیات ورکشی: استادیار گروه علوم خاکشناسی دانشگاه ملایر، ملایر، ایران[1].
m.bayat.v@malayeru.ac.ir
روژین فصیحی : دانشجوی کارشناسی ارشد علوم خاکشناسی دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.
rojin.fasihi@yahoo.com

چکیده

مدل‌سازی به‌عنوان روشی کارآمد با کم‌ترین هزینه، امکان مطالعه پیچیدگی جریان آب زیرزمینی را برای مدیران فراهم می‌نماید. هدف این تحقیق مقایسه مدل عددی، روش‌های هوشمند عصبی و زمین آمار در مدل‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌باشد. بدین منظور اطلاعات آبخوان دشت همدان – بهار به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تامین آب منطقه، مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش از کد عددی MODFLOW در نرم‌افزار GMS، شبکه عصبی مصنوعی و روش عصبی - فازی در نرم‌افزار NeuroSolution، روش عصبی – موجک در نرم‌افزار MATLAB و روش زمین آمار در نرم‌افزار ArcGIS استفاده گردید. مقایسه نتایج نشان داد که دقت روش‌های محاسبه سطح آب زیرزمینی برحسب کم‌ترین آماره مجذور میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE)، به‌ترتیب به روش عصبی - موجک، عصبی – فازی، زمین آمار، شبکه عصبی مصنوعی و مدل عددی تعلق داشت. به‌طوری که مقدار آماره NRMSE در روش عصبی - موجک به‌عنوان روش بهینه، برابر ۰/۱۱ درصد و در روش مدل عددی برابر ۲/۲ درصد بدست آمد. مقدار ضریب همبستگی روش‌های فوق به‌ترتیب ۰/۹۹۸ و ۰/۹۰۴ بود. بنابراین می‌توان کاربرد روش‌های ترکیبی هوشمند عصبی به‌ویژه نظریه موجک را در محاسبه سطح آب زیرزمینی مناسب‌تر از روش زمین آمار و مدل عددی دانست. ضمن آن‌که در روش‌های هوشمند عصبی از متغیرهای شاخص طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا به‌عنوان بردار اطلاعات ورودی استفاده شد. نتایج پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی آبخوان نیز گویای روند کاهش سطح آب زیرزمینی از بخش غرب به شرق آبخوان بود که همسو با گرادیان هیدرولیکی می‌باشد.

کلیدواژگان: مدل عددی، عصبی – موجک، عصبی - فازی، زمین آمار، سطح آب زیرزمینی.

---

۱. نویسنده مسئول: استان همدان، شهرستان ملایر، دانشگاه ملایر، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی خاکشناسی.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت، احداث کارخانجات صنعتی و بروز خشک‌سالی‌های اخیر، کمیت آب‌های زیرزمینی را تحت تاثیر قرار داده است. منابع آب زیرزمینی از طریق تعامل مستقیم با منابع آب سطحی مثل رودخانه‌ها و دریاچه‌ها و تعامل غیر مستقیم از طریق روند تغذیه، با پدیده تغییر اقلیم در ارتباط است. بنابراین محاسبه سطح آب زیرزمینی به‌منظور پیش‌بینی رفتار سیستم آب‌های زیرزمینی در مطالعات هیدروژئولوژی مناطق مختلف مورد توجه قرار گرفته است (تندیسه و همکاران، ۱۳۹۲: ۱). مدل آب زیرزمینی به‌عنوان ابزار مدیریتی برای مقاصد مختلف از جمله فراهم آوردن چارچوبی جهت سازماندهی داده‌های هیدرولوژی، کمی‌سازی خصوصیات و رفتار سیستم‌ها و امکان پذیر نمودن پیش‌بینی کمی پاسخ سیستم‌ها به تنش‌های خارجی، کاربرد دارد. روش‌های تخمین سطح آب زیرزمینی را می‌توان با سه رویکرد دنبال نمود. در رویکرد اول، هدف ایجاد مدل‌های ریاضی، تجربی و فیزیکی براساس مفاهیم انتقال جریان و حل معادلات هیدرولیک جریان در محیط‌های متخلخل است. مدل‌های ریاضی آب‌های زیرزمینی،مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل می‌باشند که چگونگی جریان آب زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌کنند (پریکت[1]، ۱۹۷۵: ۱۴۳). مدل MODFLOW یک کد مدل‌سازی آب زیرزمینی تفاضلات محدود است که در محیط‌های مختلف تحت شرایط سیستم‌های تک‌بعدی، شبه دوبعدی یا کاملا سه‌بعدی به‌طور گسترده مورد آزمایش قرار گرفته است (کرسیک[2]، ۱۹۹۷: ۱۱۵). کاربرد مدل عددی MODFLOW در محاسبه سطح آب زیرزمینی دشت زرین گل در حوضه آبریز گرگانرود (ابارشی و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۸۱)، دشت نورآباد لرستان (پورحقی و همکاران، ۱۳۹۳: ۷۱)، دشت تویسرکان (شکوهی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱)، دشت نهاوند (بانژادو همکاران، ۱۳۹۲: ۴۳)،دشت بیرجند (محتشمی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱)، حوضه رودخانه ماهش در هند (خدری و پنده[3]، ۲۰۱۶: ۱)، دشت دامغان (کاظمی و همکاران[4]، ۲۰۱۵: ۶۳) ،لایه آبدار نوبیان[5]کشور مصر (کیم و سلطان[6]، ۲۰۰۲: ۶۸) مورد استفاده قرار گرفته است. نایاک و همکاران[7] (۲۰۰۶:۷۷) نیازمندی این روش‌ها به داده‌های متنوع، نداشتن تشابه نتایج به دست آمده از مناطق مختلف در شرایط مشابه و پیچیده و غیرخطی بودن رابطه‌های بین متغیرهای مؤثر بر سطح آب‌های زیرزمینی را سبب ناکارآمدی مدل‌های ریاضی دانسته‌اند. در رویکرد دوم با ابداع روش‌های هوشمند که ابزاری توانمند، انعطاف‌پذیر و مستقل از مدل‌های دینامیکی هستند، تغییرات سطح و حجم سفره قابل بررسی است. روش‌های هوشمند در پیش‌بینی سری‌های زمانی غیرماندگار و حل مسایل پیچیده مهندسی، ابزاری توانمند و مؤثرهستند (چانگ و چانگ[8]، ۲۰۰۶:۱؛ فقیه[9]، ۲۰۱۰:۲۷). کاربرد روش‌های هوشمند عصبی در محاسبه سطح آب زیرزمینی نقاط مختلف گزارش شده است (محتشمی و همکاران،۱۳۸۹:۱، مختاری و همکاران، ۱۳۹۱:۳۴۵، تسلطی و همکاران، ۱۳۸۲: ۱، یانگ و همکاران[10]، ۲۰۰۹:۴۸۷). در رویکرد سوم کاربرد روش‌های

[1] Prickett
[2] Kresic
[3] Khadri and Pande
[4] Kazemi et al
[5] Nubian
[6] Kim and Sultan
[7] Nayak et al
[8] Chang and Chang
[9] Faghih
[10] Yang et al

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

زمین آمار در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته است. تفاوت اصلی روش‌های زمین آمار با آمار کلاسیک در این است که در آمار کلاسیک نمونه‌های جامعه مستقل از هم هستند و وجود یک نمونه هیچ اطلاعاتی در مورد نمونه بعدی به ما نمی‌دهد. اما در روش‌های زمین آمار وجود همبستگی مکانی بین مقادیر یک متغیر در یک ناحیه مورد بررسی قرار می‌گیرد (دهقانی و نورعلیئی، ۱۳۹۵: ۳۳). دهقانی و نورعلیئی (۱۳۹۵:۳۳) کاربردروش زمین آمار را موفق‌تر از شبکه عصبی مصنوعی[1](ANN) در محاسبه تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت نورآباد استان لرستان دانستند. حبیبی و همکاران (۱۳۹۴:۸۵) مدل ترکیبی ژنتیک – کریجینگ را در پیش‌بینی زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی دشت هادیشهر مناسب‌تر از روش عصبی - فازی ارزیابی نمودند. زارع ابیانه و بیات ورکشی (۱۳۹۲:۱) با مقایسه روش‌های هوشمند عصبی و زمین آمار در محاسبه سطح آب زیرزمینی دشت همدان – بهار اظهار داشتند که دقت روش‌های مورد استفاده بر حسب خطای کم‌تر مقادیر سطح ایستابی محاسبه شده به‌ترتیب به روش‌های عصبی - ژنتیک، پرسپترون چند لایه، تابع پایه شعاعی و عصبی – فازی تعلق داشت. نخعی و صابری نصر (۱۳۹۱:۴۷) با مقایسه روش عصبی – موجک (Wavelet – ANN) و مدل MODFLOW در محاسبه نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت قروه استان نشان دادند که روش عصبی – موجک نسبت به مدل عددی کارایی بالاتری دارد. برتری شبکه عصبی مصنوعی نسبت به مدل عددی MODFLOW در شبیه‌سازی تراز هفتگی آب‌های زیرزمینی آبخوان آبرفتی واقع در ادیشای هند توسط موهانتی و همکاران[2] (۲۰۱۳:۳۸)گزارش شد. محمدی[3] (۲۰۰۸:۱۲۷)کم‌تر بودن ورودی‌ها و سرعت بالای شبکه عصبی مصنوعی را عامل برتری آن نسبت به مدل عددی MODFLOW در محاسبه سطح آب زیرزمینی دانست. ژانگ و همکاران[4] (۲۰۰۹:۱) با روش ترکیبی عصبی – فازی - موجک، تغییرات سطح آب دریاچه پویانگ چین را پیش‌بینی و گزارش نمودند که روش تلفیقی عصبی – فازی – موجک، دقت بالاتری نسبت به روش عصبی – فازی دارد. مانزیون و همکاران[5] (۲۰۰۶:۴۴۹) به‌دلیل تأثیر مستقیم بارندگی و رواناب بر سطح آب زیرزمینی از متغیرهای مذکور به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل PIRFICT برای تعیین مناطقی که با خطر کمبود آب در درحوضه آبریز رودخانه جاردیم در بزریل مواجه‌اند، استفاده و گزارش نمودند که این مدل ابزاری مناسب برای پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌باشد. راترمن و همکاران[6] (۲۰۰۵:۱) مدلی از ترکیب نرم‌افزارهای ArcView و MATLAB برای مدل‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی استان اوترخت[7] در کشور هلند ارائه نمودند. این مدل قابلیت مدل‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی به صورت سه‌بعدی را داشت.

بررسی منابع نشان می‌دهد که عملکرد روش‌های هوشمند محاسبه سطح آب زیرزمینی، در نقاط مختلف متفاوت می‌باشد. ضمن آن‌که مطالعات محدودی درخصوص مقایسه جامع روش‌های هوشمند عصبی، زمین آمار و مدل عددی صورت گرفته است. بنابراین انجام مطالعه در نقاط مختلف با استفاده از روش‌هایی با ماهیت متفاوت، ضروری به‌نظر می‌رسد. دشت همدان - بهار منبع تامین بخش مهمی از آب موردنیاز شرب و کشاورزی در استان همدان می‌باشد که در سال‌های اخیر با افت شدید سطح آب مواجه شده است. پیش‌بینی سطح آب

[1] Artificial Neural Network
[2] Mohanty et al
[3] Mohammadi
[4] Zhang et al
[5] Manzione et al
[6] Raterman et al
[7] Utrecht

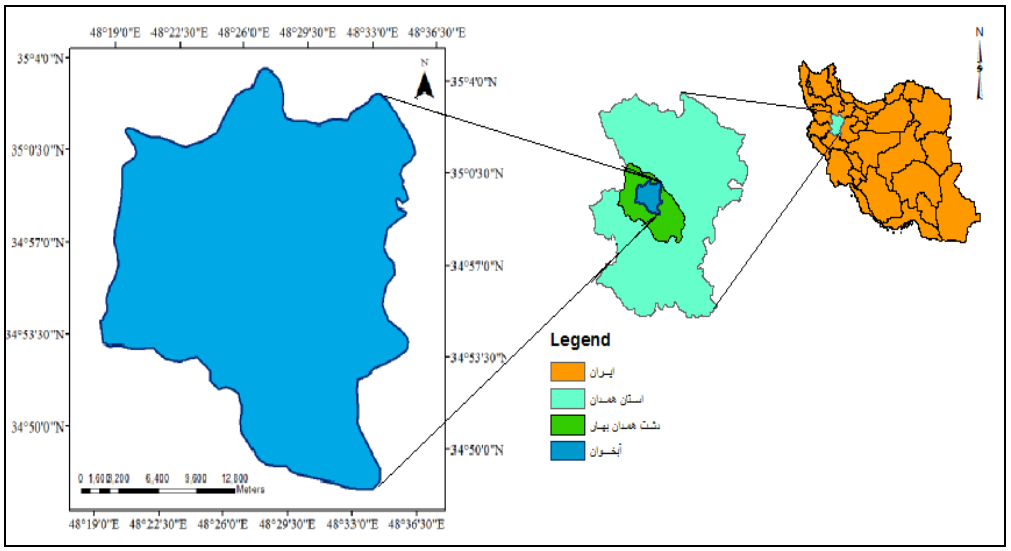
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

زیرزمینی آبخوان مورد نظر جهت مدیریت منابع آب از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش، باتوجه به ضرورت مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی، اقدام به مقایسه مدل عددی، روش زمین آمار، شبکه عصبی مصنوعی، روش عصبی - فازی و روش عصبی – موجک در محاسبه سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت همدان – بهار گردید.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

دشت همدان – بهار با وسعت ۸۸۰ کیلومتر مربع بین طول شرقی ´۱۷ °۴۸ تا ´۳۳ °۴۸ و عرض شمالی ´۴۹ °۳۴ تا ´۰۲ °۳۵ قرار گرفته و دارای ۱۷۰۰-۱۸۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا می‌باشد.حوضه آبریز این دشت موسوم به سیمینه‌رود با وسعت ۲۴۵۹ کیلومترمربع در دامنه شمالی ارتفاعات الوند واقع است. گسترش سطحی آبخوان اصلی دشت ۴۶۸ کیلومترمربع و وسعت ارتفاعات ۱۵۷۹ کیلومتر مربع می‌باشد. خروجی حوضه در اراضی کوشک آباد از ناحیه شمالی و سفره آب زیرزمینی با دشت‌های کبودرآهنگ و قهاوند ارتباط هیدروژئولوژیکی دارد. شکل (۱) موقعیت آبخوان دشت مورد مطالعه رانشان می‌دهد.



شکل (۱). موقعیت منطقه مورد مطالعه

روش‌های مورد استفاده

مقادیر سطح آب زیرزمینی از یک مدل عددی، سه مدل هوشمند عصبی شامل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازی (CANFIS)[1] و روش عصبی - موجک (Wavelet - ANN)، و روش زمین آمار محاسبه گردید. سپس ارزیابی هر یک از روش‌ها با شاخص‌های خطاسنجی صورت گرفت.

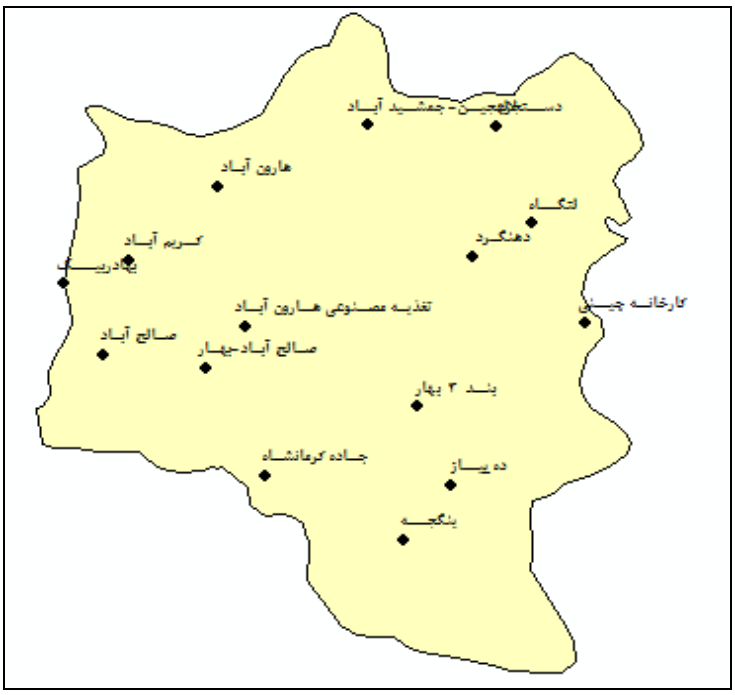
1.Co-active Neuro-Fuzzy Inference System

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

مدل عددی

جهت مدل‌سازی عددی آبخوان از کد عددی MODFLOW در نرم‌افزار GMS 7.1 استفاده شد .به‌منظور ساخت مدل سه‌بعدی هیدروژئولوژیکی از اطلاعات لاگ ۹ گمانه اکتشافی در محدوده مطالعاتی برای ساخت مدل سه‌بعدی زمین شناسی استفاده نمود. لاگ چاه‌ها شامل اطلاعات مختصات جغرافیایی و جنس لایه‌های تشکیل دهنده چاه است. برای تعیین جنس سنگ کف از اطلاعات مقطع زمین شناسی برگرفته از سازمان زمین شناسی کشور استفاده گردید.

براین اساس جنس سنگ کف شیست تعیین شد که در ۴۰۰ متری سطح زمین قرار دارد. بنابراین ضخامت لایه تشکیل دهنده آبخوان ۴۰۰ متر در نظر گرفته شد. در این مدل جهت ورود اطلاعات به مدل هیدروژئولوژیکی از دو پوشش[1] مجزا شامل پوشش تغذیه که میزان آب ورودی به آبخوان بعنوان تغذیه و اطلاعات سطح آب چاه‌های مشاهداتی، استفاده گردید. برای پوشش تغذیه داده‌های بارندگی ایستگاه‌های باران سنجی واقع در سطح دشت طی سال‌های ۱۳۹۴ - ۱۳۷۰ مورد استفاده قرار گرفت. اطلاعات سطح آب چاه‌های مشاهداتی نیز از طریق ۱۵ چاه پیزومتر موجود در منطقه تامین گردید. شکل (۲) موقعیت چاه‌های پیزومتری را نشان می‌دهد.

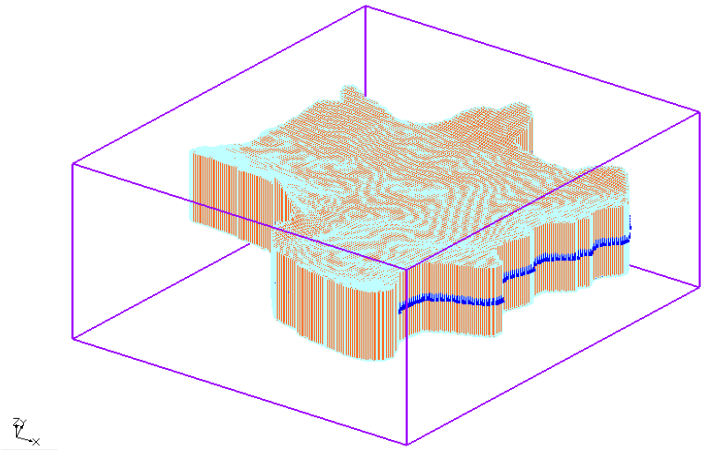


شکل (۲). موقعیت چاه‌های پیزومتری منطقه مورد مطالعه

1 .Coverage

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

با استفاده از ویژگی‌های هدایت هیدرولیکی مواد تشکیل دهنده دشت، مدل سه‌بعدی طراحی گردید. برای کالیبره کردن مدل، مطابق معمول، مقادیر هدایت هیدرولیکی و تغذیه با استفاده از روش سعی و خطا بدست آمد. به‌طوری که روش حاصل از مدل با مشاهدات بدست آمده از سطح چاه‌های مشاهده‌ای ،بهترین هم‌خوانی را داشته باشند، مقدار سطح آب زیرزمینی ۱۵ چاه پیزومتری در مهر ۱۳۸۹ به‌عنوان معیار مقایسه نتایج لحاظ گردید. شکل (۳) مدل سه‌بعدی هیدروژئولوژیکی محدوده آبخوان را نشان می دهد.



شکل (۳). مدل هیدروژئولوژیکی

شبکه عصبی مصنوعی

در گام بعدی کاربرد روش‌های هوشمند عصبی در محاسبه سطح آب زیرزمینی مورد سنجش قرار گرفت. یکی از فاکتورهای مهم در کاربرد روش‌های هوشمند عصبی، انتخاب تعداد و نوع پارامترهای ورودی است.

ازآنجا که هدف این مطالعه مقایسه روش‌های هوشمند عصبی با مدل عددی است، بنابراین کاربرد اطلاعات زودیافت و کم هزینه مدنظر قرار گرفت. بدین منظور اطلاعات جغرافیایی چاه‌های پیزومتری شامل طول (X) و عرض جغرافیایی (y) و ارتفاع از سطح دریا (z) به‌عنوان ورودی لحاظ گردید. استفاده از مختصات جغرافیایی به‌عنوان متغیرهای مستقل ازسوی زارع ابیانه و بیات ورکشی (۱۳۹۲) در محاسبه سطح ایستابی، طبری و همکاران[1] (۲۰۱۰:۶۲۵) در محاسبه آب معادل برف، ژنگ و همکاران[2] (۲۰۰۹:۱۲۲۷) برای محاسبه رطوبت و شوری و دهقانی و همکاران[3] (۲۰۰۹:۵۱۷) برای میان‌یابی سطح ایستابی دشت قزوین گزارش شده است. مشخصات جغرافیایی و سطح آب زیرزمینی چاه‌های پیزومتری در جدول (۱) ارایه شده است.

[1] Tabari et al
[2] Zheng et al
[3] Dehghani et al

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

جدول (۱). موقعیت جغرافیایی چاه‌های پیزومتری

شماره چاه	موقعیت جغرافیایی (UTM)		ارتفاع از سطح دریا (متر)	سطح آب زیرزمینی (متر)
	طول	عرض		
۱	۲۷۰۵۶۹	۳۸۵۹۹۵۱	۱۷۴۲/۵۴	۱۷۲۷/۰۹
۲	۲۶۴۵۰۰	۳۸۶۲۷۰۰	۱۷۵۹/۰۵	۱۷۴۰/۷۵
۳	۲۶۱۸۷۵	۳۸۶۷۴۲۸	۱۷۴۹/۴۹	۱۷۳۰/۹
۴	۲۵۷۴۴۷	۳۸۶۷۹۲۶	۱۷۸۶/۳۲	۱۷۷۵/۳۲
۵	۲۵۵۵۹۵	۳۸۷۱۰۴۱	۱۷۸۱/۵	۱۷۷۶/۶
۶	۲۶۲۱۲۰	۳۸۷۵۵۹۰	۱۷۷۴/۴۱	۱۷۲۶/۹۶
۷	۲۵۸۴۰۵	۳۸۷۲۱۸۵	۱۷۶۶/۳	۱۷۵۰/۱۵
۸	۲۷۳۱۷۰	۳۸۷۲۷۲۲	۱۷۰۳/۶۹	۱۶۸۶/۱
۹	۲۷۵۶۹۹	۳۸۷۴۶۰۵	۱۶۹۵/۹۸	۱۶۸۹/۷۸
۱۰	۲۷۲۵۲۰	۳۸۶۲۴۴۱	۱۷۲۹/۳۴	۱۷۱۱/۷۹
۱۱	۲۷۸۰۶۲	۳۸۶۹۸۸۳	۱۷۳۰/۲۷	۱۶۸۹/۷۷
۱۲	۲۷۴۰۵۶	۳۸۷۸۶۲۸	۱۷۰۳/۵۳	۱۶۸۲/۵۳
۱۳	۲۶۸۵۲۸	۳۸۷۸۵۲۳	۱۷۵۱/۰۶	۱۷۳۶/۰۶
۱۴	۲۷۱۰۰۵	۳۸۶۵۹۴۵	۱۷۳۷/۹۹	۱۷۰۶/۱۹
۱۵	۲۶۳۴۷۶	۳۸۶۹۳۶۹	۱۷۶۶/۸۹	۱۷۲۸/۱۹

اجرای شبکه عصبی مصنوعی با توابع فعالیت تانژانت[۱]، سیگموئید[۲] و قوانین آموزش لونبرگ مارکوات[۳] و گرادیان مزدوج[۴]صورت گرفت.

روش عصبی – فازی

کاربرد منطق فازی در قالب سیستم استنتاج تطبیق عصبی - فازی[۵] (CANFIS) انجام گرفت. در این روش، برخلاف ساختار ANFIS[۶]، کاربر قادر است مشخصات شبکه عصبی مصنوعی و مدل فازی را به تفکیک انتخاب و به ساختار بهینه آن به روش آزمون و خطا دست یابد (زارع ابیانه و بیات ورکشی، ۱۳۹۲:۱). به‌منظور مدل‌سازی، مدل استنتاج سوگنو[۷] با توابع عضویت زنگوله‌ای[۸] و گوسین[۹] اجرا گردید. تعداد توابع عضویت نیز ۲ تا ۴ دسته درنظر گرفته شد. اجرای ساختار شبکه عصبی مصنوعی و روش عصبی - فازی در نرم‌افزار Neuro Solution صورت گرفت.

1 Tanh Axon
2 Sigmoid Axon
3 Levenberg Marquate
4 Conjugate Gradient
5Fuzzy Logic
6Adaptive Neuro Fuzzy Inference System
7Sugeno
8 Bell
9Gaussian

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

روش عصبی – موجک

در این مطالعه، نظریه موجک به‌منظور محاسبه سطح آب زیرزمینی آبخوان، مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا مقادیر سطح آب زیرزمینی با بکارگیری موجک میر (موجک پیچیده) و موجک هار (موجک ساده) و توسط تبدیل موجک گسسته به ۳ زیرسری معین $d(t)_1$,$d(t)_2$, $d(t)_3$, $a(t)_3$ تجزیه شدند. از آنجا که هدف از تجزیه موجکی، ساده‌سازی سیگنال می‌باشد، با استفاده از کد برنامه نوشته شده در MATLAB مشاهده شد که در سطح تجزیه ۳ زیرسری تقریبی به مرحله‌ای می‌رسند که در آن‌ها بسامدی مشاهده نمی‌گردد. در نتیجه $d(t)_1$, $d(t)_2$, $d(t)_3$ به‌عنوان زیر سری‌های جزئی و $a(t)_3$ به‌عنوان زیرسری تقریبی، در ورودی شبکه عصبی مصنوعی برای محاسبه سطح آب زیرزمینی بکار گرفته شدند.

روش زمین آمار

کاربرد روش زمین آمار برای محاسبه سطح آب زیرزمینی در قالب نرم‌افزار ArcGIS 9.3 صورت گرفت. بدین منظور روش‌های مختلف درون‌یابی شامل کریجینگ ساده[۱] و معمولی[۲]، عکس فاصله[۳]، تابع شعاعی[۴]، تخمین‌گر عام[۵] و تخمین‌گر موضعی[۶] بودند. جهت انتخاب روش مناسب میان‌یابی، روش ارزیابی متقابل مورد استفاده قرار گرفت. در این روش، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیه نقاط مشاهده‌ای، آن نقطه محاسبه می‌گردد. به‌طوری که در آخر، به تعداد نقاط مشاهده شده، نقاط محاسبه شده نیز وجود خواهد داشت. با داشتن مقادیر واقعی و محاسبه شده می‌توان خطا و انحراف روش استفاده شده را محاسبه نمود.

ارزیابی روش‌های مورد استفاده

معیار ارزیابی دقت روش‌های مورد استفاده، شاخص‌های خطا سنجی مجذور میانگین مربعات خطای نرمال[۷](NRMSE) و میانگین خطای سوگیری[۸](MBE)و ضریب همبستگی[۹](r) طبق روابط (۱تا۳) می باشند:

رابطه (۱)
$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(P_i - O_i)^2}{n}}}{\overline{O}}$$

رابطه (۲)
$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)}{n}$$

رابطه(۳)
$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})(P_i - \overline{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})^2 (P_i - \overline{P})^2}}$$

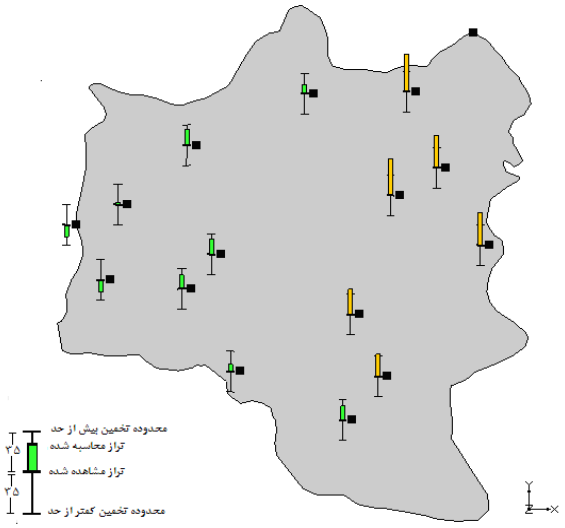
1 Simple Kriging
2 Ordinary Kriging
3 Inverse Distance Weight
4 Radial Basis Function
5 Global Polynomial Interpolation -
6 Local Polynomial Interpolation
7 Normal Root Mean square Error (NRMSE)
8Mean Bias Error (MBE)
9 Coefficient Of Correlation (r)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

در این روابط O_i مقدار سطح آب زیرزمینی مشاهده شده (متر)، $\overline{O}$ میانگین مقدار سطح آب زیرزمینی مشاهده شده (متر)، P_i مقدار سطح آب زیرزمینی محاسبه شده (متر) و $\overline{P}$ میانگین مقدار سطح آب زیرزمینی محاسبه شده (متر) و n تعداد داده‌ها می‌باشند.

نتایج

نتایج اجرای مدل عددی در نرم‌افزار GMS، پس از کالیبراسیون در شکل (۴) آورده شد. شکل (۴) برازش سطح آب زیرزمینی مشاهده و محاسبه شده در پیزومترها در پایان فرآیند واسنجی در شرایط پایدار را نشان می‌دهد. نقشه نشان‌دهنده آن است که سطح آب محاسبه شده در محدوده خطای کم (۳۵ ± متر) و رنگ زرد بیان‌گر آن است که میزان اختلاف سطح آب محاسبه شده و مشاهده شده در محدوده خطای متوسط (بین ۳۵ ± تا ۷۰ ± متر) می‌باشد. براساس نتایج شکل (۴)، اختلاف سطح آب محاسبه و مشاهده شده ۶۰ درصد از چاه‌ها در دامنه خطای کم و ۴۰ درصد چاه‌ها در محدوده خطای متوسط قرار دارند. در مجموع می‌توان اظهار داشت، کالیبراسیون مدل در محاسبه سطح آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه در محدوده قابل قبول می‌باشد.



شکل (۴). مقایسه بین سطح آب زیرزمینی محاسبه شده و مشاهده شده.

جدول(۲)، ویژگی ساختار بهینه هریک از روش‌های هوشمند عصبی و روش زمین آمار در محاسبه سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت همدان – بهار را نشان می‌دهد. براساس نتایج جدول (۲)، ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی شامل تابع فعالیت سیگموئید با قانون آموزش لونبرگ مارکوات با ۱۵ تکرار محاسباتی است. در روش عصبی - فازی، تابع عضویت گوسین با قانون آموزش لونبرگ مارکوات و تابع فعالیت تانژانت، به‌عنوان بهترین ساختار معرفی گردید. این نتایج همسو با مطالعات دالیاکوپولوس و همکاران[1] (۲۰۰۵:۲۲۹) مبنی بر برتری قانون آموزش لونبرگ در محاسبه سطح آب زیرزمینی دارد. بررسی ساختار بهینه روش عصبی - موجک نیز

1. Daliakopoulos et al

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

بیان‌گر برتری تابع موجک هار با ۳ زیرسری بود. کاربرد موجک هار در محاسبه سطح آب زیرزمینی توسط رجایی و زینی وند (۱۳۹۳:۵۱) نیز مورد مطالعه قرار گرفت. اجرای روش‌های مختلف زمین آمار در جدول (۲) بیان‌گر آن است که مدل تخمین‌گر عام به‌عنوان مدل بهینه محاسبه سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. اگرچه در اکثر مطالعات صورت گرفته روش کریجینگ به‌عنوان روش مناسب جهت درون‌یابی معرفی شده است(ادب و همکاران، ۱۳۸۷:۱، مسعودیان، ۱۳۸۲:۸۷)، اما ذکر این نکته ضروری است که در بیشتر مطالعات، کاربرد روش تخمین‌گر عام مورد توجه قرار نگرفته است. چرا که درصورت کاربرد این روش، چه بسا نتایج گزارش شده تغییر می‌یافت. به‌طوری که در مطالعه مقیمی‌فرد قیری و همکاران (۱۳۹۲:۱)، برتری روش تخمین‌گر عام نسبت به کریجینگ در محاسبه کیفیت نیترات دشت مبارک آباد فارس گزارش شد که همسو با نتایج این مطالعه می‌باشد.

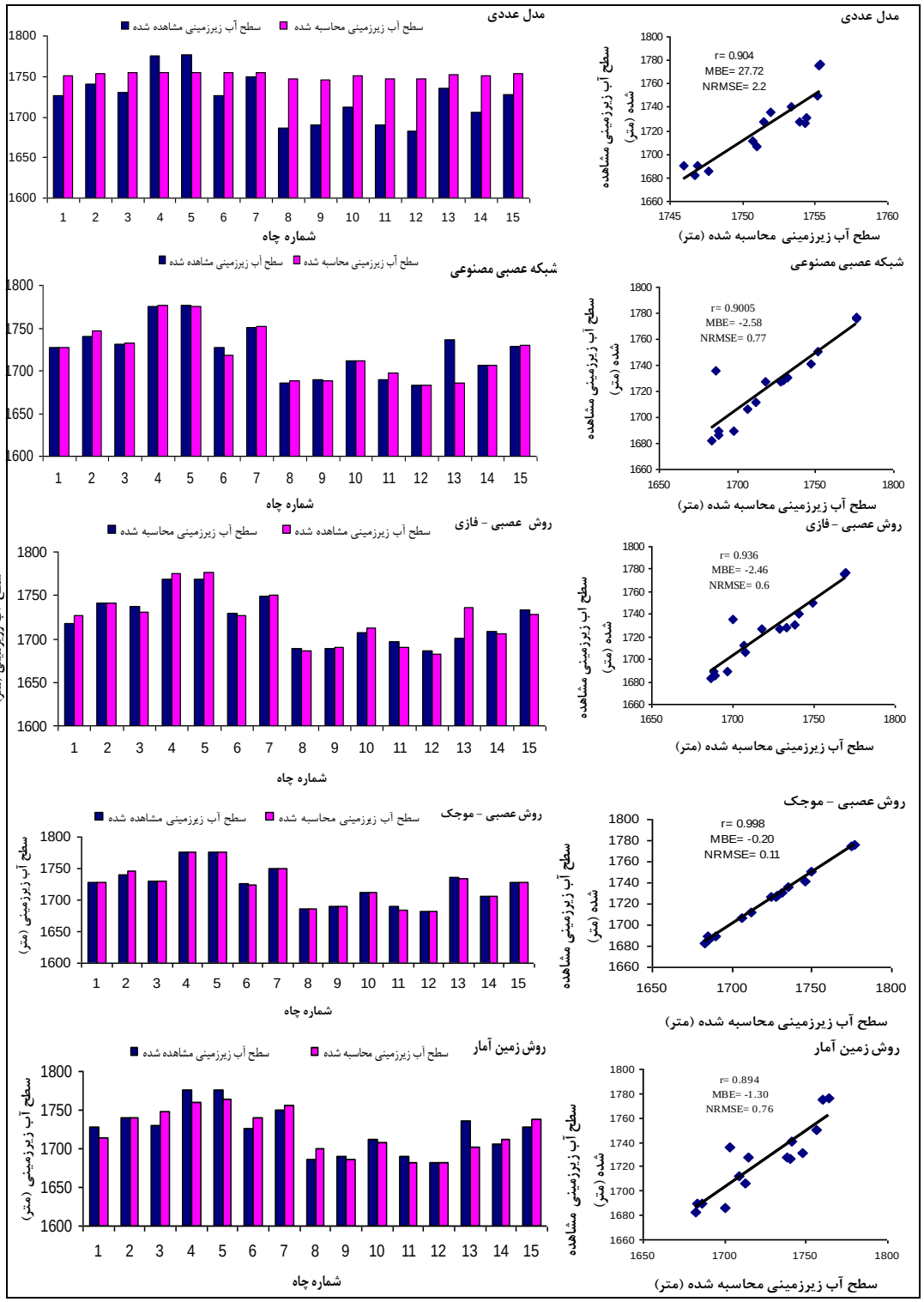
جدول (۲). نتایج شاخص‌های آماری شبکه‌های هوشمند و روش زمین آمار آبخوان همدان – بهار

روش	قانون آموزش	تابع عضویت	تابع فعالیت	ساختار	نوع موجک	تعداد زیرسری	تکرار محاسباتی	مدل
شبکه عصبی مصنوعی	لونبرگ مارکوات	---	سیگموئید	۳-۳۹-۱			۱۵	---
عصبی - فازی	لونبرگ مارکوات	گوسین	تانژانت	۴،۴،۴			۱۶	---
عصبی - موجک	لونبرگ مارکوات	---	سیگموئید	۴-۳۹-۱	هار	۳	۱۳	---
زمین آمار	--	---	---	---	---	---	---	تخمین‌گر عام

مقدار سطح آب زیرزمینی محاسبه شده از هر یک از روش‌ها در مقایسه با مقادیر مشاهده شده در شکل (۵) آورده شد. در ترسیم این شکل، از نمودار سری زمانی و توزیع همبستگی استفاده گردید. مقدار آماره‌های خطاسنجی NRMSE و MBE نیز به تفکیک روش‌های مورد استفاده در شکل (۵) ارائه گردید. همان‌گونه که در مواد و روش بیان گردید، مقدار سطح آب زیرزمینی ۱۵ چاه پیزومتری در مهر ۱۳۸۹ به‌عنوان معیار مقایسه نتایج لحاظ گردید.

مقایسه مقدار سطح آب زیرزمینی محاسبه شده از مدل عددی و مقایر مشاهده شده در شکل (۵)، نشان می‌دهد که مقادیر آماره‌های خطاسنجی NRMSE و MBE به‌ترتیب ۲/۲۰ درصد و ۲۷/۷۲+ متر می‌باشند. ضیایی و همکاران (۱۳۹۵:۲۰۵) درصد خطای نرم‌افزار GMS در محاسبه حوضه آبریز بجنورد را ۱۴ درصد گزارش نمودند. جباری و همکاران (۱۳۸۸:۱) با ۳/۵ درصد خطا، مقادیر سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت ساری را با کد عددی MODFLOW شبیه‌سازی نمودند. بنابراین می‌توان عملکرد مدل عددی را در مقایسه با مطالعات صورت گرفته مناسب و قابل قبول ارزیابی نمود. مقدار آماره MBE نیز گویای آن است که مدل تمایل به تخمین بیش‌تر دارد. این نتیجه در راستای مطالعه بانژاد و همکاران (۱۳۹۲: ۴۳) مبنی بر بیش محاسبه سطح آب زیرزمینی در نرم‌افزار GMS است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]



شکل (۵). مقایسه سطح آب زیرزمینی مشاهده شده با مقادیر محاسبه شده از هر یک از روش‌ها

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

براساس نتایج شکل ۵، مقادیر آماره‌های NRMSE، MBE و r در روش شبکه عصبی مصنوعی به‌ترتیب ۰/۷۷ درصد، ۲/۵۸- متر و ۰/۹۰۰۵ می‌باشند. با تطبیق منطق فازی در شبکه عصبی مصنوعی، مقدار آماره خطاسنجی کاهش و مقدار ضریب همبستگی افزایش یافت. به‌طوری که در بهترین ساختار مقدار آماره NRMSE و MBE به‌ترتیب برابر ۰/۶۰ درصد و ۲/۴۶- متر می‌باشد. بنابراین کاربرد منطق فازی منجر به کاهش ۲۲ درصد خطا و افزایش ۳/۹۴ درصد ضریب همبستگی در مقایسه با روش شبکه عصبی مصنوعی شد. در مطالعات علی‌پور (۱۳۹۱: ۱) و مسلمی (۱۳۹۰:۱) نیز کاربرد منطق فازی در ترکیب با شبکه عصبی مصنوعی منجر به کاهش خطای محاسبه سطح ایستابی نسبت به شبکه عصبی مصنوعی گردید. برتری روش عصبی - فازی نسبت به شبکه عصبی مصنوعی در محاسبه جریان رودخانه توسط یارار و همکاران[1] (۲۰۰۹، ۳۲۹) و توران و یوردوسو[2] (۲۰۰۹،۳۶۹) نیز گزارش شد. شیری و کیسی[3] (۲۰۱۱:۱۶۹۲) ازچندین روش هوشمند عصبی برای محاسبه سطح آب زیرزمینی استفاده و نشان دادند که روش عصبی - فازی نتایج بهتری در محاسبه سطح آب زیرزمینی دارند.

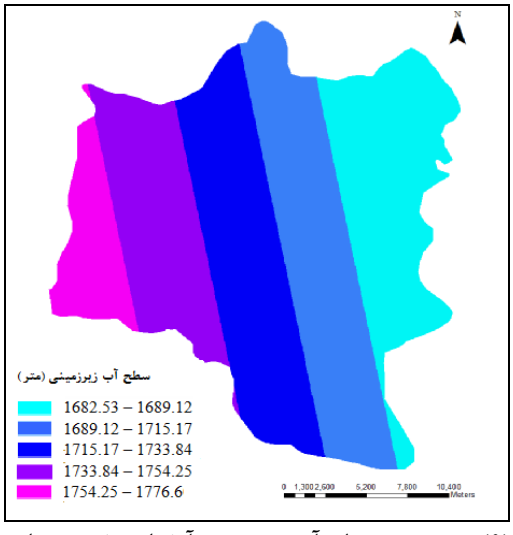
ترکیب نظریه موجک با شبکه عصبی مصنوعی در محاسبه سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد، مقدار NRMSE برابر ۰/۱۱ درصد می‌باشد. این نتیجه بیان‌گر برتری این مدل تلفیقی نسبت به شبکه عصبی مصنوعی و روش عصبی – فازی است. ضمن آن‌که بیش‌ترین ضریب همبستگی نیز معادل ۰/۹۹۸ به این روش تعلق دارد. مقایسه مقدار سطح آب زیرزمینی محاسبه شده و مشاهده شده از روش عصبی - موجک، در نمودار ستونی نیز موید این مطلب می‌باشد. رجایی و زینی وند (۱۳۹۳:۵۱) روش عصبی - موجک را در مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی در محاسبه سطح آب زیرزمینی دشت شریف آباد مناسب گزارش نمودند. موسوی و همکاران[4] (۲۰۱۳:۱۳۰۱) نیز کاربرد نظریه موجک در ترکیب با روش‌های هوشمند عصبی را منجر به کاهش خطای محاسبه سطح آب زیرزمینی دانستند. مقدار آماره MBE روش عصبی - موجک نیز مانند شبکه عصبی مصنوعی و روش عصبی - فازی، منفی می‌باشد که بیان‌گر آن است که مقدار سطح آب زیرزمینی محاسبه شده از این مدل‌ها کم‌تر از مقدار مشاهده شده می‌باشد. کم‌برآوردی روش‌های هوشمند عصبی در محاسبه سطح آب زیرزمینی همسو با گزارش موسوی و همکاران[5] (۲۰۱۳:۱۳۰۱) و نخعی و صابری نصر (۱۳۹۱:۴۷) است. مقایسه آماره‌های خطاسنجی هر سه مدل هوشمند عصبی با مدل عددی نشان می‌دهد، هر سه مدل هوشمند عصبی توانایی بیشتری در محاسبه سطح آب زیرزمینی در مقایسه با مدل عددی دارند. محمدی[6] (۲۰۰۸:۲۷) نیز با مقایسه نتایج مدل عددی با مدل هوشمند عصبی، اظهار داشت مدل هوشمند عصبی به دلیل کم بودن پارامترهای ورودی و سرعت بالاتر، در محاسبه سطح آب زیرزمینی قابل پیشنهاد است. نایاک و همکاران[7] (۲۰۰۶:۷۷) یکی از دلایل عمده ضعف روش‌های عددی را داده‌های ورودی آن دانستند که به دلیل کمبود شبکه‌های پایش و نمونه‌برداری ناقص و در برخی موارد نادرست می‌باشد. از سوی دیگر، به اعتقاد سلطانی و همکاران (۱۳۸۹:۱۵) مدل‌سازی بر پایه ابزار ریاضی برای سیستم‌های دارای عدم قطعیت، مناسب نمی‌باشند.

1 Yarar et al
2 Turan and Yurdusev
3 Shiri and Kişi
4 Moosavi et al
5 Moosavi et al
6 Mohammadi
7 Nayak et al

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

نتایج کاربرد روش زمین آمار به‌منظور محاسبه سطح آب زیرزمینی چاه‌های پیزومتری در شکل (۵)، نشان می‌دهد مقدار آماره‌های NRMSE و MBE به ترتیب برابر ۰/۷۶ درصد و ۱/۳۰- متر می‌باشد. مقایسه نتایج این روش با هر سه روش شبکه عصبی مصنوعی، عصبی - فازی و عصبی - موجک بیان‌گر آن است که روش زمین آمار خطای بیش‌تری در مقایسه با روش عصبی - فازی و روش عصبی - موجک دارد. حال آن‌که در مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی خطای کم‌تری دارد. بنابراین می‌توان اظهار داشت روش زمین آمار قابلیت بالاتری در مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی در محاسبه توزیع مکانی سطح آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه دارد، لیکن تلفیق منطقه فازی و نظریه موجک با شبکه مصنوعی، منجر به بهبود نتایج شبکه عصبی مصنوعی شد، به‌طوری که عملکرد بهتری نسبت به روش زمین آمار داشت. مطالعه خولقی و حسینی[1] (۲۰۰۶:۶۸) نیز بیانگرکارایی مناسب روش عصبی – فازی در مقایسه با دو روش شبکه عصبی مصنوعی و زمین آمار در تخمین ضریب قابلیت انتقال آبخوان دشت قزوین بود. دهقانی و همکاران[2] (۲۰۰۹:۵۱۷) نیز روش شبکه عصبی - فازی را در محاسبه سطح آب زیرزمینی نقاط مجهول آبخوان دشت قزوین برتر از روش‌های زمین آمار و شبکه‌های عصبی گزارش نمودند. در مجموع براساس آماره‌های خطاسنجی، می‌توان اولویت روش‌های مورد مطالعه در محاسبه سطح آب زیرزمینی را به‌ترتیب، روش عصبی - موجک، روش عصبی - فازی، روش زمین آمار، شبکه عصبی مصنوعی و مدل عددی دانست. این نتیجه همسو با مطالعات موهانتی و همکاران[3] (۲۰۱۳:۳۸) و نخعی و صابری نصر (۱۳۹۱:۴۷) مبنی بر قابلیت بالای روش‌های هوشمند عصبی در مقایسه با مدل عددی در محاسبه سطح آب زیرزمینی به‌ترتیب در کشور هند و قروه کردستان می‌باشد.

در ادامه به‌منظور بررسی توزیع مکانی سطح آب زیرزمینی در آبخوان مورد مطالعه، نتایج پهنه‌بندی به روش تخمین‌گر عام در شکل (۶) ارائه گردید.



شکل (۶). پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت همدان – بهار

[1] Kholgi and Hosseini
[2] Dehghani et al
[3] Mohanty et al

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

شکل (۶)، نتایج پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه را در ۵ کلاس نشان می‌دهد. در نگاه اول، روند یکنواخت کاهشی سطح آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه از غرب به شرق مشهود می‌باشد. به‌طوری که بیش‌ترین سطح آب زیرزمینی مربوط به بخش غربی آبخوان با دامنه ۱۷۷۶/۶ تا ۱۷۵۴/۲۵ متر می‌باشد که به سمت شرق آبخوان روند کاهشی دارد. دامنه تغییرات سطح آب زیرزمینی در شرق آبخوان بین ۱۶۹۸/۱۲ - ۱۶۸۲/۵۳ متر است. بنابراین می‌توان جهت گرادیان هیدرولیکی آبخوان را غرب به شرق دانست که در مطالعه معروفی و همکاران (۱۳۸۸:۱۶۹) نیز بیان شده است. با توجه به تغذیه غالب سفره آب زیرزمینی از ریزش‌های جوی و آبراهه‌های متعدد منشعب از دامنه‌های الوند کوه در بخش غربی دشت و با توجه به ضخامت بیش‌تر سفره در این بخش صحت پهنه‌بندی قابل توجیه است (زارع ابیانه و بیات ورکشی، ۱۳۹۲:۱). همچنین لزوم ایجاد مکان‌های تغذیه مصنوعی برای جلوگیری از کاهش ممتد سطح ایستابی به ویژه در حاشیه‌های دشت ضروری به‌نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

جهت محاسبه سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت همدان - بهار از روش‌های هوشمند عصبی، روش زمین آمار و مدل عددی استفاده شد. روش‌های هوشمند عصبی شامل شبکه عصبی مصنوعی، روش عصبی – فازی و روش عصبی – موجک بود که با مدل عددی MODFLOW در نرم‌افزار GMS و زمین آمار در نرم‌افزارArcGIS مقایسه شدند. مقدار آماره NRMSE برای مدل عددی، شبکه عصبی مصنوعی، روش عصبی – فازی، عصبی - موجک و زمین آمار به‌ترتیب ۲/۲، ۰/۷۷، ۰/۶، ۰/۱۱ و ۰/۷۶ درصد بدست آمد. بنابراین می‌توان اولویت کاربرد روش‌های مختلف مورد استفاده در محاسبه سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت همدان - بهار را به‌ترتیب روش عصبی – موجک، عصبی – فازی، زمین آمار، شبکه عصبی مصنوعی و مدل عددی دانست. با این حال تهیه مدل ریاضی این امکان را فراهم می‌سازد که بر اساس آمار و اطلاعات موجود رفتار سفره آب زیرزمینی موردنظر را شبیه‌سازی نموده و با استفاده از مدل، در صورت اعمال هرگونه تغییر در شرایط تخلیه، تغذیه و شرایط مرزی، وضعیت آینده سفره را در هر نقطه و هر زمان تعیین نمود. درمقابل روش‌های هوشمند عصبی مبتنی بر سیستم استنباط فازی و نظریه موجک می‌تواند مفاهیم کیفی دانش بشری و فرآیند استدلال را بدون آنالیز دقیق مسایل کیفی مدل کنند نتایج پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی آبخوان نیز گویای روند کاهش سطح آب زیرزمینی از بخش غرب به شرق آبخوان بود که همسو با گرادیان هیدرولیکی می‌باشد.

منابع

ابارشی، فرزانه؛ مفتاح هلقی، مهدی؛ دهقانی، امیراحمد؛ کابلی، عبدالرضا؛ رحیمیان، مهدی. (۱۳۹۳). **مدیریت آبخوان دشت زرین گل در استان گلستان با استفاده از مدل آب زیرزمینی**. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۱ (۶): ۲۸۱-۲۹۲.

ادب، حامد؛ فلاح قالهری، غلامعباس؛ میرزا بیاتی، رضا. (۱۳۸۷). **ارزیابی روش‌های میانیابی کریجینگ و رگرسیون خطی بر پایه DEM در تهیه نقشه همبارش سالانه در استان خراسان رضوی**، همایش ژئوماتیک.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

بانژاد، حسین؛ محب زاده، حمید؛ قبادی، محمد حسین؛ حیدری، مجید. (۱۳۹۲). **شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال آلودگی در آب‌های زیرزمینی مطالعه موردی: آبخوان دشت نهاوند**. نشریه دانش آب و خاک،۲۳(۲): ۴۳-۵۷.

پورحقی، امیر؛ آخوندعلی، علی محمد؛ رادمنش، فریدون؛ میرزایی، سیدیحیی. (۱۳۹۳). **مدیریت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در شرایط خشکسالی با مدلMODFLOW (مطالعه موردی: دشت نورآباد)**. علوم و مهندسی آبیاری دانشگاه شهید چمران اهواز، ۳۷(۲): ۷۱-۸۲.

تسلطی،بهرام. (۱۳۸۲). **برآورد سطح آب زیرزمینی با استفاده از MODFLOW و شبکه عصبی مصنوعی**. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

تندیسه، زهرا؛ حافظی مقدس، ناصر؛ کرمی، غلامحسین؛ جعفری، هادی. (۱۳۹۲). **پیش‌بینی تاثیر اجرای طرح فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی، مطالعه موردی: آبخوان شهر مشهد**. هشتمین همایش انجمن زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران. مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد.

جباری، پریسا؛ قنبرپور، محمدرضا؛ اشبه، علیرضا. (۱۳۸۸). **بهینه‌سازی پارامترهای آبخوان آزاد دشت ساری - نکا با استفاده از مدل ریاضی**، پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

حبیبی، محمدحسن؛ ندیری، عطاالله؛ اصغری مقدم، اصغر. (۱۳۹۴). **ارائه مدل ترکیبی ژنتیک – کریجینگ برای پیش‌بینی زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت هادیشهر)**. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۱(۳): ۸۵-۹۹.

دهقانی، رضا؛ نورعلیئی، عاطفه. (۱۳۹۵). **مقایسه روش های زمین آمار و شبکه عصبی مصنوعی در تخمین سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت نورآباد، استان لرستان)**. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۸(۱): ۳۳-۴۳.

رجایی، طاهره؛ زینی وند، اکرم. (۱۳۹۳). **مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی با بهره‌گیری از مدل هیبرید موجک - شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: دشت شریف آباد)**. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۴(۴): ۵۱-۶۶.

زارع ابیانه، حمید؛ بیات ورکشی، مریم. (۱۳۹۲). **توسعه و کاربرد مدل‌های عصبی، فازی، الگوریتم ژنتیک و زمین آمار در برآورد توزیع مکانی سطح ایستابی**. نشریه پژوهشهای حفاظت آب و خاک، ۲۰(۴): ۱-۲۵.

سلطانی، علی؛ علیائی، احسان؛ قربانی، محمدعلی. (۱۳۸۹). **مدل‌سازی رابطه دبی – اشل در رودخانه‌ها با استفاده از سیستم‌های هوشمند**. مجله دانش آب و خاک، ۲۰(۴): ۱۵-۳۱.

شکوهی، فائزه؛ عبده کلاه چی، عبدالنبی؛ مجیدی، علیرضا؛ یعقوبی، بهروز؛ بخشی پورآذر، جواد. (۱۳۹۳). **مدل-سازی جریان آب زیرزمینی دشت تویسرکان با استفاده از مدل ریاضیGMS**. اولین همایش ملی معماری، عمران و محیط زیست شهری، همدان.

ضیایی، علی نقی؛ محمدی، اعظم؛ مشکینی، جواد. (۱۳۹۵). **تاثیر انتقال آب از حوضه مانه بر آب زیرزمینی بجنورد با استفاده از مدل GMS**. فصلنامه بین المللی پژوهشی تحلیلی منابع آب و توسعه، ۴۱(۵): ۲۰-۲۱۷.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

علی‌پور، زهره. (۱۳۹۱). **ارزیابی سیستم استنتاجی فازی – عصبی تطبیقی و شبکه عصبی در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت مهیار شمالی)**. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه چمران اهواز.

محتشمی، محسن؛ دهقانی، امیرمحمد؛ اکبرپور، ابوالفضل؛ مفتاح هلقی، مهدی؛ اعتباری، بهروز. (۱۳۸۹). **پیش‌بینی سطح ایستابی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: دشت بیرجند)**. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۴(۱): ۱-۱۰.

محتشمی، محسن؛ دهقانی، میرمحمدا؛ اکبرپور، ابوالفضل؛ مفتاح هلقی، مهدی؛ اعتباری، بهروز. (۱۳۹۰). **پیش‌بینی سطح ایستابی در آبخوان با بکارگیری نرم‌افزار GMS.** چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران: دانشگاه امیرکبیر.

مختاری، زینب؛ ناظمی، امیرحسین؛ ندیری، عطاالله. (۱۳۹۱). **پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی با استفاده از مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: دشت شبستر)**. فصلنامه زمین شناسی کاربردی، ۸(۴): ۳۴۵-۳۵۳.

مسعودیان، سیدابوالفضل. (۱۳۸۲). **تحلیل ساختار دمای ماهانه ایران.** مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان. ۹۶-۸۷

مسلمی، خدیجه. (۱۳۹۰). **پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی دشت بسطام با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و شبکه استنتاج تطبیقی عصبی فازی (ANFIS).** پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی شاهرود.

معروفی، صفر؛ ترنجیان، امین؛ زارع ابیانه، حمید. (۱۳۸۸). **ارزیابی روش‌های زمین آمار جهت تخمین هدایت الکتریکی و PH زه‌آب‌های آبراهه‌ای دشت همدان – بهار.** مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۶(۲): ۱۸۷-۱۶۹.

مقیمی‌فرد قیری، محمد؛ شعبانی حیدر آبادی، محمد؛ محمد نیا، مهرداد. (۱۳۹۲). **پهنه‌بندی کیفیت نیترات (NO3) با استفاده از روش‌های زمین آمار در دشت مبارک آباد استان فارس**. اولین همایش ملی مهندسی و مدیریت کشاورزی، محیط زیست و منابع طبیعی پایدار.

نخعی، محمد؛ صابری نصر، امیر. (۱۳۹۱). **پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت قروه با استفاده از شبکه عصبی – موجکی و مقایسه آن با مدل عددی MODFLOW**. مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، ۱(۴): ۴۷-۵۸.

Chang F, Chang Y. (2006). **Adaptive neuro-fuzzy inference system forprediction of water level in reservoir**. Advanc. Water Resour, 29: 1-10.

Daliakopoulos N I, Coulibaly P, Tsanis I K. (2005).**Ground water level forecasting using artificial neuralnetworks**. Journal of Hydrology, 309(1): 229-240.

Dehghani AA, Asgari M, Mosaedi A. (2009). **Comparison of Geostatistics, Artifitial Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Approaches in Groundwater Level Interpolation (Case study: Ghazvin aquifer).** Journal Agric. Sci. Natur.Resour, 16(1): 517-528.

Faghih H. (2010). **Evaluating Artificial Neural Network and its Optimization UsingGenetic Algorithm in Estimation of Monthly Precipitation Data (Case**

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

Study:Kurdistan Region). Journal Agric. Tech. Sci. Natur.Resour, 145(1): 27-44.(In Persian).

Kazemi GH A, Parhizkar S, Ajdary KH, Emamgholizadeh S. (2015). **Predicting water level drawdown and assessment of land subsidence in Damghan aquifer by combining GMS and GEP models**. Geopersia, 5 (1): 63-80

Khadri S F R, Pande C. (2016). **Ground water flow modeling for calibrating steady state using MODFLOW software: a case study of Mahesh River basin, India**. Modeling Earth Systems and Environment, 2(1): 1-17.

Kholgi M, Hosseini S M. (2006). **Estimation of aquifer transmissivity usingkriging, artificial neural network**. Journal Spat. Hydr, 6(2): 68-81.

Kim J, Sultan M. (2002). **Assessment of long-term hydrologic impacts of Lake Nasser and related irrigation projects in Southwestern Egypt**. Journal of Hydrology, 26(2): 68-83.

Kresic N. (1997). Quantitative solution in hydrogeology and groundwater modeling. CRC Press LLC, 115p.

Mohammadi K. (2008). **Groundwater table estimation using MODFLOW and Artificial Neural Networks**. Water Science and Technology Library, 68(2): 127-138.

Manzione RL, Knotters M, Heuvelink GMB. (2006). **Mapping trends in water table depths in a Brazilian Cerrado area**. Procedings of Accuracy.449-458.

Mohanty S, Jha M, Kumar A, Panda D K. (2013). **Comparative Evaluation of NumericalModel and Artificial Neural Network forSimulating Groundwater Flow in Kathajodi-Suru Inter-basin of Odisha, India**, Journal of Hydrology. 49(5): 38-51.

Moosavi V, Vafakhah, M, Shirmohammadi B, Behnia N. (2013).**A wavelet-ANFIS hybrid model for groundwater level forecasting for different prediction periods.**Water resources management, 27(5): 1301-1321.

Nayak P, Satyaji Rao Y R, Sudheer K P. (2006). **Groundwater levelforecasting in a shallow aquifer using artificial neural network approach.** WaterResour. Manage, 2(1): 77-99.

Prickett T A. (1975). **Modeling Techniques forGroundwater Evaluation**. Journal of Advances inHydrosciense, 10(1): 1-143.

Raterman B, Schaars F W d, Griffioen M. (2005). **GIS and MATLAB integrated for groundwater modeling**. ESRI User Conference Proceedings.

Shiri J, Kişi Ö. (2011). **Comparison of genetic programming with neuro-fuzzy systems for predicting short-term water table depth fluctuations**. Computers & Geosciences, 3(7): 1692-1701.

Tabari H, Maroufi S, Zareabyaneh H, Sharifi M R. (2010). **Comparison of artificial neural network and combined models in estimating spatial distribution of snow depth and snow water equivalent in samsami basin of Iran.** Neural Comp. Appl, 19(4): 625-635.

Turan M E, Yurdusev A. (2009). **River flow estimation from upstream flow records by artificial intelligence methods**. Journal Hydrology. 36(9): 71-77.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]

Yang Z P, Lu W X, Long Y Q, Li P.(2009). **Application and Comparison of Two Prediction Models for Groundwater Levels: A Case Study in Western Jilin Province China**. Journal of Arid Environments, 7(3): 487-492.

Yarar A, Onucyıldız M, Copty N K. (2009) .**Modelling level change in lakes using neuro-fuzzy and artificial neural networks.** Journal Hydrology. 36(5): 329-334.

Zhang R, Dong Z, Guo H. (2009). **Forcast of Poyang lake's water level by Wavelet-ANFIS model. In Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2009**. IEEE International Conference.

Zheng Z, Zhang F, Chai X, Zhu Z, Ma F. (2009). **Estimation of Soil Moisture and Salinity with Neural Kriging.In IFIP International Federation for Information Processing**, Computer and Computing Technologies in Agriculture II, 2: 1227-1237.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1397.18.48.8.9]
[DOI: 10.29252/jgs.18.48.165]