

مدل سازی مکانی - زمانی تغییرات تراز سطح آبهای زیرزمینی مناطق شهری و روستایی آبخوان کاشان با استفاده از تکنیک های GIS

جواد صمدی^{۱*}

Javad.Samadi09138287975@yahoo.com

جواد صمدی^۲

تاریخ دریافت: ۹۲/۹/۵

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۰

چکیده

زمینه و هدف: هیدروگراف معرف و نقشه های تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان کاشان نشان می دهد که طی سال های ۸۱ تا ۹۰، سطح ایستابی با متوسط عمق ۷۲/۰۶ متر به طور متوسط حدود ۵/۵ متر افت داشته است. با توجه به اینکه نمونه برداری از تمام نقاط محدوده مطالعاتی مقدور نیست، روش های پهنه بندی ابزاری قدرتمند در تخمین تغییرات مکانی و زمانی داده ها است. هدف از این تحقیق مدل سازی تراز، عمق و تغییرات مکانی و زمانی سطح آب های زیرزمینی آبخوان کاشان بر اساس استفاده از تکنیک اعتبارسنجی متقابل روش های مختلف درون یابی قطعی و زمین آماری در محیط GIS می باشد.

روش بررسی: بدین منظور اطلاعات سطح آب زیرزمینی ۶۷ چاه مشاهده ای در محدوده منطقه مورد نظر طی سال های ۸۱ تا ۹۰ برای تهیه نقشه سطح آب زیرزمینی آبخوان کاشان مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند. برای ارزیابی کارایی روش های مختلف درون یابی و انتخاب بهترین روش، از تکنیک اعتبارسنجی متقابل استفاده شده است و معیارهای میانگین خطای انحراف (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و R^2 برای ارزیابی روش های مختلف به کار گرفته شده اند.

نتایج: نتایج ارزیابی روش های مختلف درون یابی نشان داد که توابع چندجمله ای موضعی با $MAE = 13.19$ ، $MBE = 0.444$ ، $RMSE = 20.29$ و $R^2 = 0.999$ بیشترین دقت در مدل سازی مکانی را دارا بود.

نتیجه گیری: همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که مناطق مسکونی با جمعیت بالا به دلیل تشدید بالای تغذیه خالص از طریق چاه های دفع فاضلاب خانگی و نواحی جنگلی باعث افزایش سطح آب زیرزمینی و فعالیت های صنعتی، کشاورزی و استحصال آب باعث کاهش شدید سطح آب زیرزمینی شده است.

واژه های کلیدی: درون یابی، روش های قطعی و زمین آماری، اعتبارسنجی متقابل، سطح آب زیرزمینی، آبخوان کاشان.

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه آلاینده های محیط زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهیدبهشتی تهران و عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی نراق* (مسوول مکاتبات).

۲- شهرداری کاشان، معاونت خدمات شهری و محیط زیست، اداره محیط زیست شهری.

Spatial-Temporal Modeling of Groundwater Level Variations of Urban and Rural Areas in Kashan Aquifer Using GIS Techniques

Javad Samadi^{1*}

Javad.Samadi09138287975@yahoo.com

Javad Samadi²

Abstract

Background and Objective: The hydrograph and maps of groundwater level variations in Kashan aquifer demonstrate that during 2002-2011 the level of groundwater with depth moderate of 72.06 meter has decreased about 5.5 meter. When dealing with the quality of water resources for different uses, collecting samples from all parts of a study area is not economically possible, In this regard zoning methods are powerful tools in the providing the data based on spatial-temporal variations. This research aimed, modeling of level, depth and spatial-temporal variations Kashan aquifer groundwater table based on Cross validation technique of different methods of deterministic and geostatistic interpolation in GIS environment.

Method: water level data of 67 observational wells in the region have been surveyed and compared to mapping of Kashan groundwater level during 2002-2011. Cross validation techniques have been employed and some criteria such as mean biased error (MBE), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE) and R^2 have been used to assess the performance of different methods and choosing the best one.

Findings: The results indicated that the local polynomials method with MBE = 0.444, MAE = 13.19, RMSE = 20.29 and $R^2 = 0.999$ possessed the highest accuracy.

Discussion and Conclusion: As well as the results of this study showed that residential areas with high population due to the high aggravation of net recharge and forest areas increased groundwater level and activities in the industrial, agricultural and water extraction have caused a drastic reduction in groundwater level.

Keywords: Interpolation, Geostatistic and Deterministic methods, Cross Validation, Groundwater level, Kashan Aquifer

1- M.Sc. in Environmental pollutant Department of Environmental Pollutants, Researches Institute of Environmental Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran & Member of Young Researchers and Elite Club of Islamic Azad University, Naragh Branch **(Corresponding Author)*.

2- Kashan Municipality, Urban Services Assistance and Environment, Office of Urban Environment.

مقدمه

آب زیرزمینی همواره یکی از منابع مهم آبی محسوب می شود. در مناطق خشک و نیمه خشک جهان از جمله ایران که میانگین بارندگی سالانه آن، کفایت نیاز آبی را نمی دهد، حفظ و مدیریت منابع آب زیرزمینی اهمیتی بسیار بالا داشته و آگاهی از چگونگی تغییرات مکانی و زمانی سفره ها و همچنین ساختار ریاضی تغییرپذیری، به منظور مدیریت بهینه، اطلاعات مهمی در اختیار مدیران مربوطه قرار می دهد (۱). از آنجا که تغییرات سطح آب های زیرزمینی متغیری مکانی و زمانی بوده و اندازه گیری آن در نقاط مختلف، در دوره های زمانی کوتاه مدت مشکل می باشد و موجب صرف هزینه های زیادی می شود، بنابراین شناسایی و استفاده از ابزاری مناسب جهت پایش میزان تراز و عمق آب های زیرزمینی و با نمونه برداری از نقاط محدودتر و درون یابی دقیق اطلاعات تهیه شده، ضروری است. روش های گوناگونی برای مدل سازی و پهنه بندی تغییرات ویژگی های آب های زیرزمینی وجود دارد که هر کدام از آن ها بسته به شرایط منطقه و وجود آمار و داده های کافی دارای دقت هایی گوناگون می باشند (۲).

شناسایی به موقع و تهیه نقشه از تغییرات تراز آب های زیرزمینی و شناسایی عامل آن توسط روش های مشاهده ای و سنتی، کاری سخت، زمانبر و پرهزینه می باشد. امروزه به منظور تخمین متغیرهای مکانی یک منطقه از روش های زمین آمار استفاده می گردد. روش های زمین آمار در دهه ۱۹۶۰ ابداع شدند و کاربرد آن در استخراج معادن و سپس در علوم دیگر گسترش یافت (۲). تفاوت اصلی این روش با آمار کلاسیک این است که در آمار کلاسیک نمونه های گرفته شده از یک جامعه آماری، مستقل از یکدیگر بوده و وجود یک نمونه هیچگونه اطلاعاتی درباره نمونه بعدی نمی دهد. اما روش های زمین آماری، وجود همبستگی مکانی بین مقادیر یک متغیر در یک ناحیه را بررسی می نمایند. روش های مختلف زمین آمار بسته به نوع متغیر، دقت متفاوتی را نشان می دهند. بطور کلی آنالیز زمین آماری^۱ به بررسی پدیده های متغیر در زمان و مکان و

آنالیز نقاط نمونه برداری شده با موقعیت های متفاوت به منظور تولید یک سطح پیوسته می پردازد که دارای ساختار مکانی هستند و یا به عبارتی بین مقادیر مختلف آن ها، فاصله و جهت قرارگرفتن آن ها یک ارتباط فضایی وجود دارد (۳).

مطالعات متفاوتی در مورد استفاده از روش های زمین آماری و کاربردهای آن در زمینه سیستم آب زیرزمینی و مدل سازی آن در مناطق شهری و روستایی متأثر از فعالیت های کشاورزی و صنعتی انجام شده است. نیریزی و جان پرور در پژوهشی بیان کردند که میزان بهره برداری آب زیرزمینی در دشت مشهد از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۴ به میزان ۴/۶ میلیارد متر مکعب افزایش یافته و پیش بینی کردند که تا سال ۱۳۹۹ به میزان ۲/۵ میلیارد متر مکعب دیگر نیز افزایش یابد. همچنین عوامل مهمی را که باعث افزایش بهره برداری شده اند را توسعه زیاد سطح زیر کشت از ۱۰۰۰۰۰ به ۱۳۰۰۰۰ هکتار، توسعه صنعت کمتر از ۱۰۰ واحد صنعتی به بیش از ۳۰۰ واحد، افزایش توسعه شهری از ۱۵ کیلومتر مربع به ۱۶۰ و افزایش جمعیت از ۰/۵ میلیون به ۲/۵ میلیون نفر در طی ۳۴ سال دانسته اند (۴). رنگزن و همکاران (۱۳۸۴) در مقاله ای به ارزیابی دقت مدل های IDW^۲ و Kriging جهت درون یابی داده های سطح آب زیرزمینی دشت میان آب شوشتر پرداخت. نتیجه نشان دهنده ارجحیت روش IDW به روش Kriging است (۵). میثاقی و محمدی (۱۳۸۷) به برآورد سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش های متداول درون یابی و مقایسه آن با تکنیک زمین آمار در دشت ایرانشهر - بمپور پرداختند. نتایج نشان دهنده دقت قابل قبول روش زمین آمار و تخمینگر کریجینگ در مقایسه با سایر روش های آمار کلاسیک بوده است (۶). اکبری و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی افت سطح آب های زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی اقدام نمود. با استفاده از روش های قطعی درون یابی نقشه سطح آب زیرزمینی تهیه نموده و به بررسی روند افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از هیدروگراف معرف دشت مشهد پرداخته است (۷).

۲- منطقه مورد مطالعه

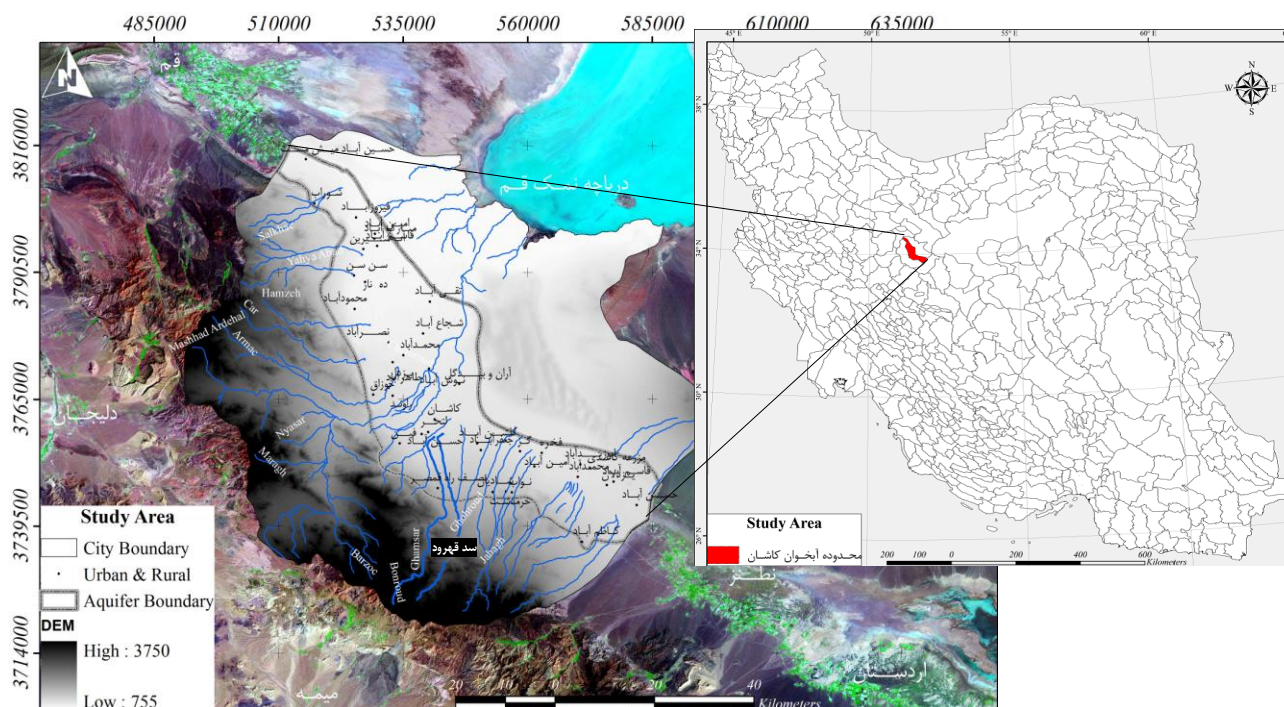
دشت کاشان در دامنه کوههای کرکس و حاشیه کویر مرکزی ایران و در حدود ۲۴۰ کیلومتری جنوب تهران به صورت دره‌ای باریک، با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی با عرضی در حدود ۲۰ کیلومتر واقع می‌باشد که در شمال به دشت قم، در جنوب به ارتفاعات مجاور منطقه نطنز، از غرب به ارتفاعات و از شرق به محدوده دریاچه نمک منتهی می‌شود. آبخوان کاشان به وسعت 1830 km^2 (شکل ۱)، شهر کاشان و بخش مرکزی آن، شهر آران و بیدگل و همه بخشهای آن و اراضی کشاورزی واقع در دشت را شامل می‌شود و بین طول های جغرافیائی $51^\circ 56'$ تا $51^\circ 6'$ و عرضهای $33^\circ 45'$ تا $34^\circ 29'$ محدود می‌باشد. تقریباً تمام بهره‌برداری از آبخوان ابرفتی کاشان نیز در همین محدوده صورت می‌گیرد. حداکثر ارتفاع آبخوان از سطح دریا ۱۶۰۲ متر در حاشیه جنوب غربی و حداقل ارتفاع آن ۸۰۰ متر در حاشیه شمالی آبخوان می‌باشد (۱۲).

در این مطالعه از آمار سطح آب زیرزمینی تعداد ۶۷ چاه مشاهده‌ای سازمان آب کاشان (۱۳) در کل محدوده شهری و روستایی مدل آبخوان کاشان جهت تهیه نقشه تغییرات مکانی - زمانی سطح آب زیرزمینی بکار گرفته شده است. شایان ذکر است که جهت بررسی تغییرات زمانی سطح آب زیرزمینی از هیدروگراف تراز آب زیرزمینی چاه های مشاهده‌ای سال ۱۳۸۱ الی ۱۳۹۰ نیز استفاده شده است.

انصاری و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهشی با استفاده از نرم‌افزار GIS^۱ و شاخص SPI^۲ نشان داد که در بین سال های ۷۲ تا ۸۵ افت آب زیرزمینی دشت نیشابور حدود ۱۲/۳ متر می‌باشد که این عامل در بخش‌های جنوبی شدیدتر و تحت تاثیر خشکسالی و اضافه برداشت از آبخوان می‌باشد (۸). رهنما و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی با عنوان بررسی وضعیت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی دشت جوبین بر اساس روش میانابایی نزدیک‌ترین همسایه در GIS مشخص کرد که این آبخوان بین سال های ۷۴ تا ۸۶ افتی معادل ۱۰ متر داشته است (۹). محمدی و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی با استفاده از انواع روش‌های درونیابی بر اساس دو معیار MBE^۳ و MAE^۴ نشان دادند که روش IDW مناسب‌ترین روش جهت پهنه‌بندی تغییرات مکانی - زمانی آب های زیرزمینی دشت کرمان می‌باشد همچنین افت حداکثر ۴۰ متری قسمت خروجی شمالی و بالآمدگی حداکثر ۷ متری به دلیل برگشتی فاضلاب‌های شهری را بین سال های ۷۵ تا ۸۵ با استفاده از GIS مشخص کردند (۱۰). صادقیان و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی با استفاده از روش کریجینگ و هم‌تغییرنگار فضایی - زمانی تفکیک‌پذیر، تراز آبهای زیرزمینی دشت بیرجند را پهنه‌بندی کردند نتایج نشان داد که مدل ضربی دقت بسیار مطلوبی را جهت پیش‌بینی فضایی - زمانی نشان می‌دهد (۱۱).

هدف و نوع‌آوری از این پژوهش بررسی و مدل‌سازی مکانی - زمانی تراز، عمق و تغییرات سطح آبهای زیرزمینی کاشان بر اساس کمترین خطای مکانی و بالاترین همبستگی مکانی داده‌ها جهت پهنه‌بندی در GIS و نیز روند افت و تغییرات سالانه آب های زیرزمینی آبخوان کاشان بر اساس هیدروگراف معرف تهیه‌شده و علل بروز مشکلات کمی ناشی از آن در مناطق شهری و روستایی می‌باشد.

-
- 1- Geographic Information System
 - 2- Standardized Precipitation Index
 - 3- Mean Bias Error
 - 4- Mean Absolute Error



شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه آبخوان کاشان

Figure 1- Study area map of Kashan aquifer

توان به روش های زمین آمار کریجینگ^۱ و کوکریجینگ^۲ و روش های قطعی مانند روش وزن دادن عکس فاصله (IDW)، تابع شعاعی (RBF^۳)، تخمینگر موضعی (LPI^۴) و تخمینگر عام (GPI^۵) اشاره کرد. در روش های قطعی مقادیر متغیر مورد بررسی برای نقاط مختلف با استفاده از توابع ریاضی برآورد می-گردد و از این توابع برای ایجاد سطوح از نقاط اندازه گیری شده بر مبنای میزان تشابه نقاط استفاده می کنند، این روش ها خود به دو دسته عام (جامع یا گلوبال)^۶ و موضعی^۷ تقسیم می شوند. روش های عام یا جامع (مانند تابع چندجمله ای عام)، برای پیش بینی، از کل سری داده ها در نقاط اندازه گیری استفاده می کنند ولی روش های موضعی مانند معکوس وزنی فاصله (IDW)، توابع چندجمله ای موضعی و اسپلاین، مجاورت را اساس محاسبه مقادیر برای سایر نقاط قرار می دهند. در

۳- مواد و روش پژوهش

۳-۱- روش های تجزیه و تحلیل و مدلسازی مکانی داده ها

انتخاب روش مناسب پهنه بندی و تهیه نقشه تغییرات ویژگی های کمی و کیفی آب های زیرزمینی گامی اساسی و مهم در مدیریت منابع آبی یک منطقه بشمار می رود. استفاده از روش های زمین آماری مستلزم بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده ها است که توسط تجزیه و تحلیل واریوگرام این امر بررسی می شود. شرط استفاده از این تجزیه و تحلیل، نرمال بودن داده ها می باشد. بنابراین تمامی داده های مربوط به هر پارامتر از نظر نرمال بودن بررسی شد. پس از آنالیز داده ها و اطمینان از نرمال بودن آنها با استفاده از لگاریتم گیری و آزمون نمودن آن با استفاده از آزمون کلموگراف- اسمیرنوف در محیط SPSS، اقدام به نرمال کردن و برازش واریوگرام مناسب به ساختار مکانی داده ها و پارامترهای مورد نظر با استفاده از نرم افزار GS+ گردید.

از جمله روش های میان یابی که جهت مدلسازی و تهیه نقشه های تغییرات کمی آب های زیرزمینی استفاده می شود می-

- 1- Kriging
- 2- Cokriging
- 3- Radial Basis Functions
- 4- Local Polynomial Interpolatoin
- 5- Global Polynomial Interpolatoin
- 6- Global
- 7- Local

روش‌های زمین‌آماری، خصوصیات آماری نقاط اندازه‌گیری مبنای درون‌یابی برای سایر نقاط قرار می‌گیرد.

وزن دادن عکس فاصله: فرض اساسی این روش بر آن

است که با افزایش فاصله میزان تاثیر نقاط اندازه‌گیری در برآورد واحد سطح کاهش می‌یابد. برای پیش‌بینی در مکان‌هایی که داده‌های آن‌ها اندازه‌گیری نشده است از مقادیر اندازه‌گیری شده پیرامون محل استفاده می‌شود. پایه این روش در پیش-بینی، وزن‌دهی بر اساس عکس فاصله تا تخمین است. به عبارت دیگر وزن‌دهی بیشتر به نزدیک‌ترین نمونه‌ها و اختصاص وزن کمتر به نمونه‌هایی است که در فاصله بیشتر قرار گرفته‌اند. که بر اساس رابطه زیر مقادیر نقاط نمونه‌برداری نشده مشخص می‌شود (۱۴).

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{d_i^m}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^m}} \quad (1)$$

که در آن Z مقدار برآورد متغیر در منطقه نمونه‌برداری نشده، Z_i مقدار نمونه‌برداری شده، d_i فاصله نقطه نمونه‌برداری شده تا نقطه تخمین، N تعداد کل نمونه‌ها و m توان فاصله است. بگونه‌ای که با نزدیک شدن این پارامتر به صفر تخمین گر IDW رفتاری شبیه میانگین حسابی و با افزایش بیش از حد آن رفتاری شبیه چندضلعی تیسسن^۱ از خود نشان می‌دهد.

تابع چند جمله‌ای عام و موضعی: در این نوع درون‌یابی

توابع چندجمله‌ای مرتبه پایین برای توصیف فرآیندهای فیزیکی و ایجاد سطوح متغیر تدریجی به کار گرفته می‌شوند. این توابع ممکن است مرتبه یک (خطی)، مرتبه دو (مربعی)، مرتبه سه (مکعبی) یا از مراتب بالاتر باشند. برای یافتن توابع چندجمله‌ای از رگرسیون چندمتغیره استفاده می‌شود. متغیر وابسته یا سطح روند بر روی محورهای X و Y که متغیرهای همراه محسوب می‌شوند، برازش می‌یابد. برازش مدل‌های رگرسیونی با برآورد پارامترهای مدل از روش حداقل مربعات معمولی انجام می‌شود. تابع چندجمله‌ای عام در مواردی استفاده می‌شود که تغییرات

متغیر مورد بررسی از ناحیه‌ای به ناحیه دیگر به آرامی صورت می‌گیرد. در روش تخمین موضعی یک دامنه کوتاه از تغییرات در داده‌های ورودی را در نظر می‌گیرد و با فواصل همسایگی در پنجره مشترک حساس است، بدین گونه که پنجره حرکت کرده و مقادیر سطحی در مرکز هر پنجره در هر نقطه به وسیله برازش یک چندضلعی تخمین زده می‌شود. این روش انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به روش تخمین عام دارد. این دو روش هیچ فرضی برای داده‌ها نیاز ندارند (۱۴).

روش اسپلاین: این روش از برازش منحنی‌های دوبعدی

بر روی سطوح سه‌بعدی ایجاد می‌شود. برای درک بهتر می‌توان این روش را معادل ریاضی قراردادن یک خط‌کش انعطاف‌پذیر بر روی یک سری از مکان‌های اندازه‌گیری تصور کرد. برای درون‌یابی براساس مدل اسپلاین از چندجمله‌ای‌ها استفاده می‌شود و از برازش تابع چندجمله‌ای بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، مقادیر نقاط نامعلوم برآورد می‌شوند. ویژگی اساسی اسپلاین این است که در سطح تغییرات ناگهانی وجود ندارد. روش اسپلاین به دو دسته منظم^۲ و کششی^۳ تقسیم می‌شود. روش منظم یک سطح نرم با تغییرات تدریجی ایجاد می‌کند که ممکن است در آن برخی از مقادیر از دامنه مقادیر نقاط اندازه‌گیری خارج باشد. در روش کششی سطح نرم‌تری ایجاد می‌شود که مقادیر آن بر اساس خصوصیت پدیده مورد مدلسازی، با دامنه مقادیر نقاط اندازه‌گیری کنترل و محدود می‌شود. این روش در تهیه منحنی‌های هم‌ارزش اقلیمی که سطح معینی از تعمیم در آن‌ها مورد نظر می‌باشد مفید است (۱۴). این روش با استفاده از معادله ۲ محاسبه می‌شود.

$$Z_{(x,y)} = T_{(x,y)} + \sum_{j=1}^N \lambda_j * R(r_j) \quad (2)$$

که در آن N تعداد نقاط، λ_j ضریبی که با حل دستگاه معادلات خطی محاسبه می‌شود. r_j فاصله نقطه (x,y) تا نقطه j ام، $T(x,y)$ و $R(r_j)$ بر حسب نوع اسپلاین مورد استفاده تعیین می‌شود.

کریجینگ گسسته^۴ تخمین گری غیرخطی می باشد و در شرایطی به کار گرفته می شود که توزیع داده ها پیچیده و برازش آن ها توسط توزیع های معمول آماری (نرمال و یا لوگ نرمال) دشوار باشد.

کو کریجینگ همان کریجینگ توسعه یافته است که در آن متغیرهای ثانویه نیز لحاظ شده است.

۲-۳- مدل سازی مکانی

برای پهنه بندی و مدل سازی سطح و تراز آب زیرزمینی از تخمین گرهای زمین آماری کریجینگ، تخمین گر چندجمله ای عام و موضعی، IDW، اسپیلین کششی و منظم استفاده گردید. در پایان جهت ارزیابی و دقت مدل تخمین گر زمین آماری و قطعی و بررسی خطای میانابی و تعیین شاخص های مورد نظر، از تکنیک اعتبارسنجی متقابل^۵ بر طبق مدل مفهومی استفاده گردید (شکل ۲). در این تکنیک برای هریک از نقاط اندازه گیری شده که معمولاً تنها ابزار مقایسه می باشند، می توان تخمین انجام داد و سپس به مقایسه مقدار مشاهده ای و تخمین پرداخت. بدین ترتیب که در روش اعتبارسنجی حذفی، یک نقطه حذف و با استفاده از سایر نقاط و اعمال روش میانابی مورد نظر، برای این نقطه تخمین صورت می گیرد. سپس این نقطه به محل خود برگردانده می شود و نقطه بعدی حذف می گردد. به همین ترتیب برای تمام نقاط برآورد صورت می گیرد. مقادیر مشاهده ای و برآورد شده مقایسه گردیده و خطای برآورد با استفاده از مدل آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE^۶) استاندارد شده و محاسبه می شود، که این مقدار هر چه به صفر نزدیکتر باشد نشان دهنده دقت بالاتر مدل می باشد.

کریجینگ: مزیت عمده این روش نسبت به سایر روش های درونابی اعم از سراسری و محلی، ایجاد اطلاعات مناسب و بهینه تری از ناحیه، اندازه، جهت و شکل همسایگی ها و همچنین خطای مقادیر درونابی است (۱۵). در این روش، به منظور پیشبینی مقادیر نامعلوم برای یک موقعیت خاص، مدل منطبق شده از واریوگرافی شکل مکانی داده ها و مقادیر نمونه همسایه، مورد نیاز خواهد بود. همچنین به منظور پیشبینی مقادیر نامعلوم، از وزن های مقادیر نقاط نمونه همسایه استفاده می شود که البته این وزن ها تنها مبتنی بر فاصله بین نقاط نمونه با نقطه مورد نظر نبوده بلکه ترتیب مکانی میان نقاط و همبستگی مکانی بین آن ها نیز لحاظ گردیده است. محاسبه پیشبینی مقادیر نامعلوم در این روش بر طبق رابطه ۳ صورت می پذیرد.

$$Z = \sum_{i=1}^N \lambda_i * z(x_i) \quad (3)$$

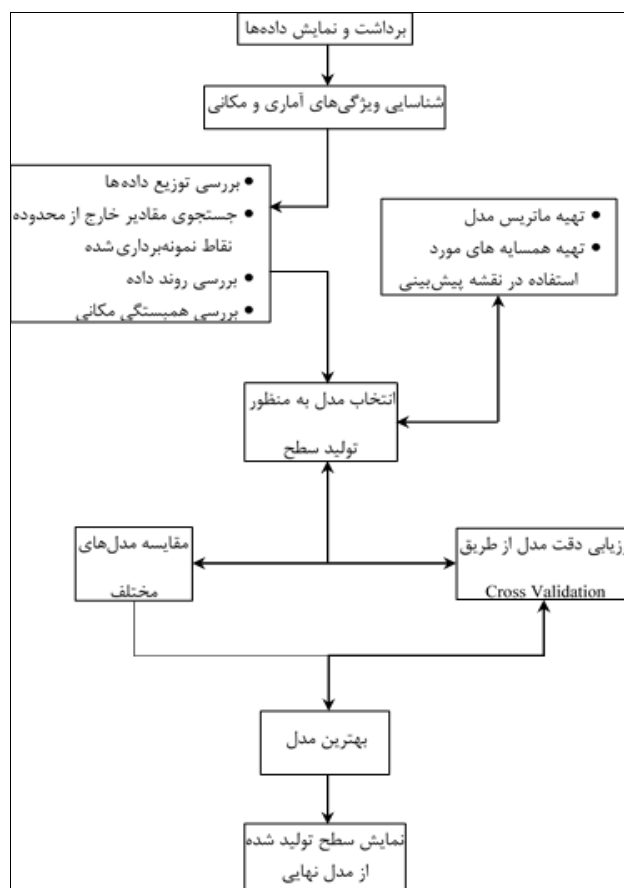
که در آن Z مقدار متغیر مکانی برآورد شده، $Z(x_i)$ مقدار متغیر مکانی مشاهده شده در نقطه x_i و λ_i وزنی است که به نمونه x_i نسبت داده می شود و بیانگر اهمیت نقطه نام در برآورد است. تخمین گر کریجینگ ساده^۱ به شکل ترکیب خطی وزندار است، اما میانگین λ_i که بایستی حتماً دارای ویژگی ایستایی مرتبه دوم باشد در فرایند تخمین مورد توجه و استفاده قرار می گیرد. کریجینگ معمولی^۲ تخمین زنی است که مقادیر یک متغیر را در نقاط نمونه برداری نشده بصورت ترکیب خطی از مقادیر همان متغیر در نقاط اطراف آن در نظر می گیرد.

کریجینگ جامع^۳ در شرایطی است که هر دو مؤلفه تغییرپذیری (جبری و تصادفی)، به طور همزمان در ساختار مکانی متغیر ناحیه ای وجود داشته باشند، به طوریکه رفتار و الگوی تغییرپذیری متغیر مربوط را می توان در قالب رابطه ۴ نشان داد:

$$Z(X) = \sum_{k=0}^k a_k * f_k(x) + \varepsilon(x) \quad (4)$$

4- Disjunctive Kriging
5- Cross-validation
6- Root Mean Square Error

1- Simple Kriging
2- Ordinary Kriging
3- Universal Kriging



شکل ۲- مدل مفهومی انتخاب بهترین مدل از طریق روش‌های زمین‌آماري و قطعي

Figure 2- Conceptual model of best selection method using geostatistical and deterministic techniques

که در آن n تعداد نقاط مشاهده‌ای، $Z^*(x_i)$ مقدار برآوردی بر نقطه λ_m و $Z(x_i)$ مقدار مشاهده‌ای برای نقطه λ_m می‌باشد.

MAE و MBE نشان‌دهنده اختلاف میانگین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی است. هر چه این دو معیار به صفر نزدیک‌تر باشند، نشان‌دهنده تفاوت کمتر مقادیر برآوردشده نسبت به مقادیر مشاهده‌ای است. مقادیر مثبت و منفی MBE به ترتیب نشان‌دهنده برآورد بیشتر و کمتر از واقعیت است. RMSE یک پارامتر کلیدی است که به طور گسترده برای بررسی دقت آنالیزهای مکانی در مطالعات مختلف استفاده شده است. مناسب‌ترین روش به ترتیب کمترین مقدار RMSE، بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقادیر MAE و MBE نزدیک به صفر را به خود اختصاص می‌دهد.

در پایان با داشتن مقادیر واقعی و برآوردشده می‌توان خطا و انحراف روش استفاده‌شده را برآورد نمود. معیارهای مختلفی برای این کار وجود دارد که می‌توان به میانگین خطای انحراف (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) اشاره نمود (۱۶). معادلات محاسبه ۵ تا ۸ آن‌ها به قرار زیر است:

$$e = Z^*(x_i) - Z(x_i) \quad (5)$$

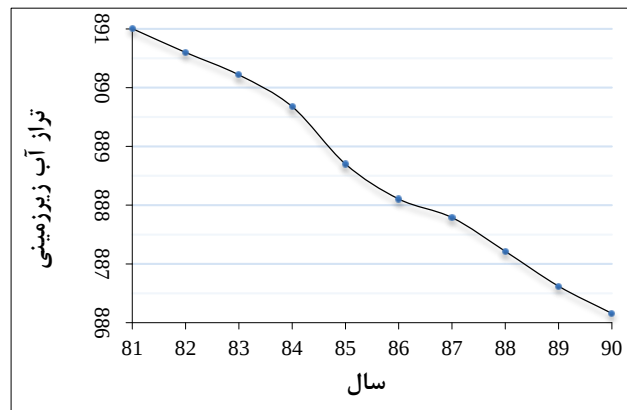
$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N [Z^*(x_i) - Z(x_i)]}{n} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Z^*(x_i) - Z(x_i)|}{n} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [Z^*(x_i) - Z(x_i)]^2}{n}} \quad (8)$$

۴- نتایج و بحث

هیدروگراف تغییرات زمانی تراز آب های زیرزمینی
چاه های مشاهداتی از سال ۱۳۸۱ تا سال ۱۳۹۰ در شکل (۳)



شکل ۳- هیدروگراف تغییرات زمانی تراز آب چاه های مشاهداتی سال های ۸۱ تا ۹۰ آبخوان کاشان

Figure 3- Temporal variations hydrograph of observational wells water level in Kashan aquifer (2002-2012)

کمترین RMSE و بیشترین همبستگی با مقادیر واقعی - رتبه دوم بر اساس معیار MAE می باشد که نشان دهنده تفاوت کمتر مقادیر برآورد شده نسبت به مقادیر مشاهده ای است. در بین همه روش ها بعد از روش اسپلاین منظم، اسپلاین کششی، تابع چندجمله ای عام، کریجینگ و معکوس وزنی فاصله به ترتیب بیشترین دقت را دارا بودند.

نتایج اعتبارسنجی روش های مختلف درون یابی قطعی و زمین آماری مورد مطالعه در این تحقیق جهت برآورد توزیع مکانی سطح آب زیرزمینی در آبخوان کاشان براساس معیارهای آماری ذکر شده در بخش قبل، در جدول ۱ ارایه شده است. نتایج ارزیابی بر اساس معیارهای آماری نشان داد که روش توابع چند جمله ای موضعی مناسب ترین روش جهت برآورد توزیع مکانی سطح آب زیرزمینی آبخوان کاشان می باشد. زیرا دارای

جدول ۱- نتایج اعتبارسنجی روش های مختلف درون یابی قطعی و زمین آماری

Table 1- Validation results of geostatistical and deterministic interpolation differnt methods

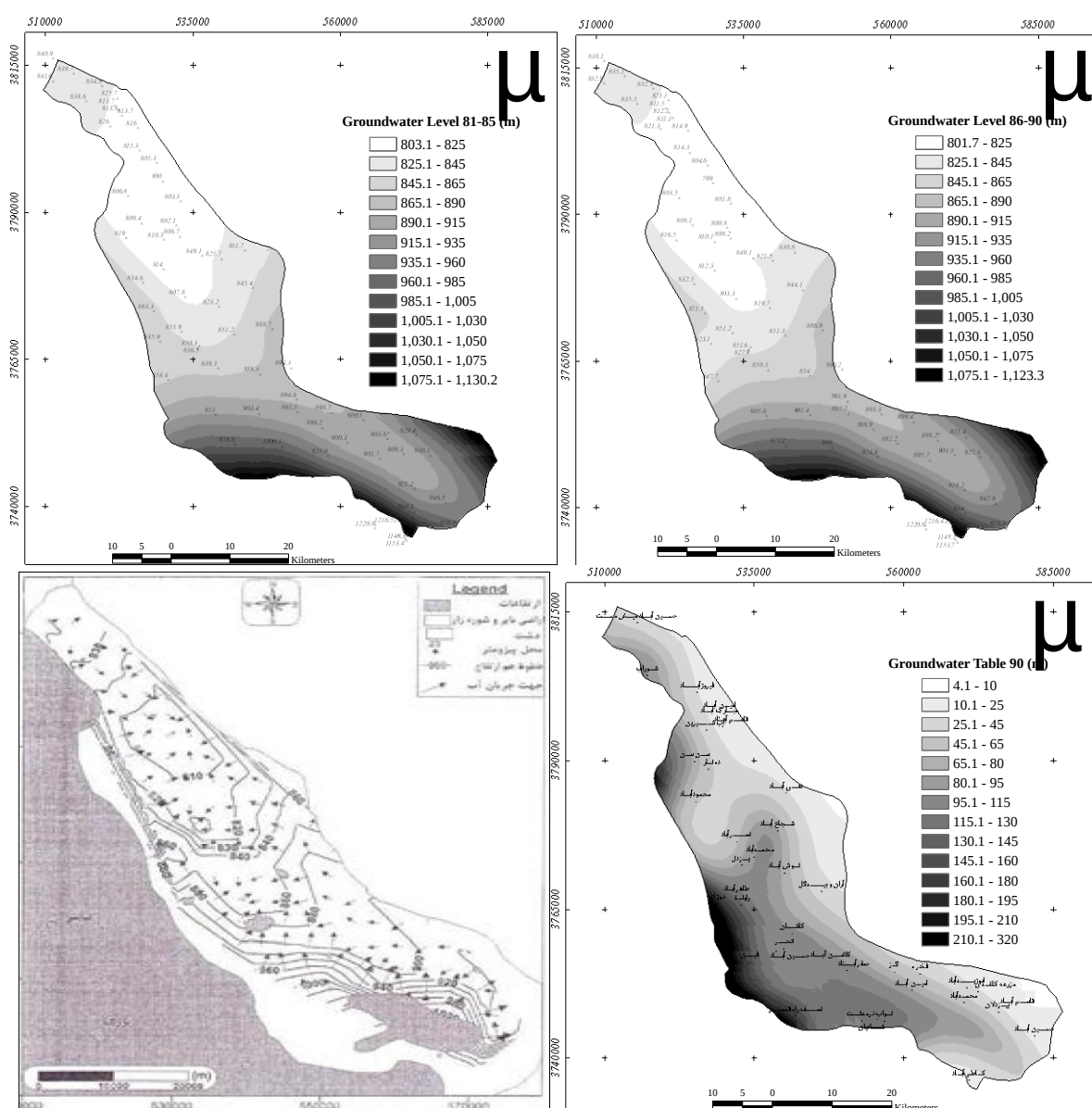
رتبه نهایی	رتبه بر اساس R^2	رتبه بر اساس RMSE	رتبه بر اساس MAE	رتبه بر اساس MBE	R^2	RMSE	MAE	MBE	معیار ارزیابی روش درون یابی
۶	۶	۵	۵	۱	۰/۹۷۱	۲۷/۴۰	۱۵/۷۹	۰/۰۷۲	معکوس وزنی فاصله
۴	۴	۱	۴	۵	۰/۹۸۳	۲۰/۱۲	۱۵/۳۴	-۰/۳۷۲	چند جمله ای عام
۱	۱	۲	۲	۶	۰/۹۹۹	۲۰/۲۹	۱۳/۱۹	-۰/۴۴۴	چند جمله ای موضعی
۲	۲	۴	۳	۳	۰/۹۹۰	۲۱/۹۲	۱۳/۲۶	-۰/۱۷۷	اسپلاین منظم
۳	۵	۳	۱	۴	۰/۹۸۰	۲۰/۷۵	۱۲/۶۱	-۰/۱۸۷	اسپلاین کششی
۵	۳	۶	۶	۲	۰/۹۸۷	۲۸/۵۰	۱۶/۲۵	-۰/۱۵۰	کریجینگ

مربوط به قسمت های جنوبی محدوده مورد مطالعه ۱۳۰ متر می باشد. که این امر به دلیل ارتفاع بالای سطح منطقه و تغذیه خالص طبیعی بالا در این قسمت از آبخوان به نسبت تراز پایین

نقشه های سطح آب زیرزمینی تهیه شده با استفاده از تابع چندجمله ای موضعی در شکل (۴) نشان داده شده اند. همانطور که در نقشه ها مشاهده می شود بالاترین تراز آب زیرزمینی

حرکت آن به این نواحی کمتر از ۰/۱ درصد می‌باشد. همچنانکه تحقیقات حیدری و همکاران (۱۳۹۰) در آبخوان کاشان موید این مسئله می‌باشد (۱۷). جهت تهیه لایه عمق آب زیرزمینی آبخوان کاشان نیز از کریجینگ جامع استفاده گردید (شکل ۴). بر اساس این نقشه میانگین عمق آب های زیرزمینی محدوده مدل آبخوان کاشان ۷۲/۰۶ متر می‌باشد که در قسمت‌های مرتفع جنوب غربی آبخوان به ۳۲۰ یا حتی بیشتر از آن در قله مرتفع می‌رسد. حداقل عمق آب های زیرزمینی در حاشیه شمالی و شمال شرقی آن می‌باشد که میزان آن ۴ متر است.

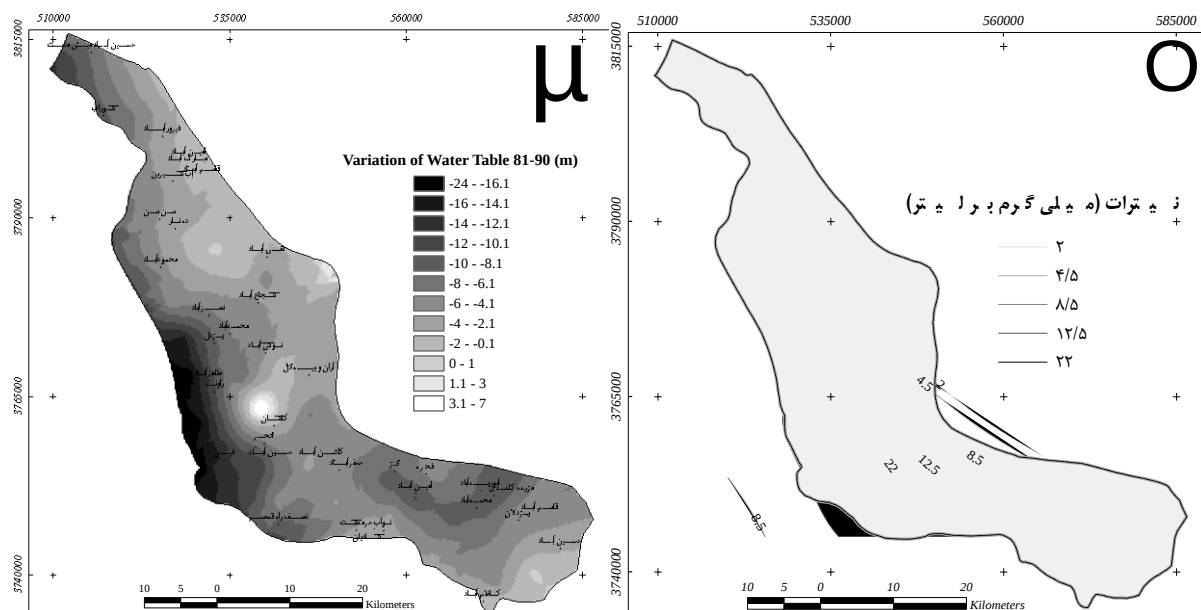
۷۹۶ متر قسمت‌های شمالی می‌باشد. از این رو جهت کلی حرکت آب زیرزمینی طبق نقشه‌های به دست آمده از روش‌های درون‌یابی مؤید این مسأله است که جهت کلی جریان آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه جنوب - شمال و غرب - شرق می‌باشد. بر اساس نقشه گزادین هیدرولیکی دشت حداکثر میزان شیب در قسمت های غربی و جنوبی آبخوان به دلیل تراز بالای سطح آب زیرزمینی حدود ۱/۶ درصد، و در قسمت‌های شمالی و مرکزی به دلیل تراز پایین آب های زیرزمینی و بالا آمدگی سطح آب ناشی از تغذیه فاضلاب های خانگی و جریان



شکل ۴- نقشه‌های تراز، عمق و جهت جریان آب های زیرزمینی سال های ۸۱ تا ۹۰ آبخوان کاشان (از راست به چپ)
Figure 4- Maps of level, depth and groundwater flow direction in Kashan aquifer at years of 2002-2012 (right to left)

وجود کاربری های شهری از طریق چاه های دفعی در قسمت های مرکزی آبخوان با توجه به نقشه نیترا ت که موجب افزایش سطح آب های زیرزمینی می شود در این مناطق باشد. همچنان که تحقیقات اکبری و همکاران (۱۳۸۸) در آبخوان دشت مشهد (۷) و محمدی و همکاران (۱۳۹۱) در دشت کرمان (۱۰) بالآمدگی سطح آب زیرزمینی را در قسمت های مربوط به نفوذ فاضلاب خانگی را تایید کرده اند.

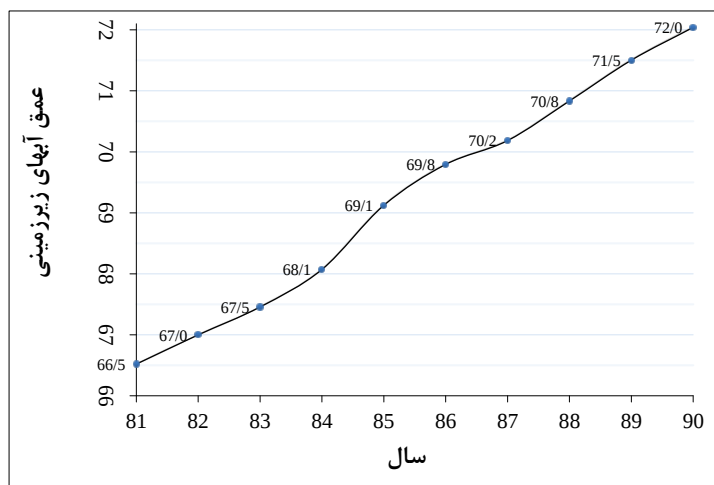
همان گونه که در شکل (۵) مشاهده می شود افت سطح آب زیرزمینی در بعضی از قسمت های آبخوان کاشان به ۲۴ متر می رسد که روند کاهش سطح آب در محدوده مورد مطالعه را نشان می دهد. در بعضی از چاه ها نوسان سطح آب به نسبت بقیه چاه ها بیشتر است، که این امر می تواند به دلیل واقع شدن این چاه ها در مناطق پرتنش از نظر استحصال آب از طریق چاه های بهره برداری و جهت شیب آب های زیرزمینی که موجب کاهش سطح آب های زیرزمینی و یا تغذیه ناشی از



شکل ۵- نقشه های نیترا ت سال ۹۱ و تغییرات سطح آب های زیرزمینی سال های ۸۱ تا ۹۰ آبخوان کاشان (از راست به چپ)
Figure 5- Maps of nitrate at year of 1202 and groundwater level variations in Kashan aquifer at years of 2002-2012 (right to left)

۸۴ در دشت کاشان انجام دادند مشخص کردند که طی مدت ۱۵ سال، افت ۷/۳۴ متری و به طور متوسط سالانه ۴۹ سانتی متر و سال ۸۴ نسبت به ۵۳ حداکثر افت به میزان ۵۵ متر در حوالی راوند و کمترین میزان آن در نواحی شرقی آران و سن سن در حاشیه کویر به میزان ۵ متر ایجاد شده است (۱۸).

تغییرات هیدروگراف نقشه های سالانه ایجاد شده از عمق آب های زیرزمینی آبخوان حاکی از میانگین روند افت سالانه ۰/۶۲ متری آب های زیرزمینی بین سال های ۸۱ تا ۹۰ می باشد (شکل ۶) که این تغییرات در قسمت های غربی بسیار بیشتر است. تحقیقاتی که حیدری و همکاران (۱۳۹۰) نیز بر اساس آمار تغییرات هیدروگراف سطح آب چاه های سال های ۶۹ تا



شکل ۶- هیدروگراف تغییرات زمانی عمق آب های زیرزمینی آبخوان کاشان ۸۱ تا ۹۰

Figure 6- Temporal variations hydrograph of groundwater table in Kashan aquifer (2002-2012)

در این مراکز باتوجه به نقشه آلودگی نیترا ت باعث افزایش سطح آب زیرزمینی ۵ تا ۱۰ متری در طی ۱۰ سال شده است. همچنین مناطقی (راوند، محمدآباد، نصرآباد، ابوزیدآباد و نوشآباد) که بیشتر دارای فعالیت های بالای کشاورزی هستند آسیب پذیری بیشتری در برابر افت آب های زیرزمینی نسبت به مناطق جنگلی نشان داده اند.

همچنین تغییرات سطح آب زیرزمینی مراکز جمعیتی شهری و روستایی بر اساس جدول (۲) نشان داد مناطقی که دارای جمعیت بیش از ۵۰۰۰۰ نفر هستند به دلیل استحصال آب از دیگر مناطق و نیز فعالیت های کشاورزی در مناطق روستایی باعث کاهش آب زیرزمینی تا ۲۴ متر در آن مناطق (غربی و جنوبی آبخوان) و میانگین کاهش ۵۶/۵ متری در کل آبخوان و نفوذ تغذیه آب زیرزمینی از طریق چاه های دفع فاضلاب خانگی

جدول ۲- تغییرات سطح آب های زیرزمینی مناطق شهری و روستایی تحت اثر فعالیت غالب انسانی و کاربری اراضی

Figure 2- Groundwater level variations in urban and rural areas under effects of prevailing anthropogenic and land use

مرکز	نام	جمعیت	فعالیت غالب	تغییرات سطح آب زیرزمینی (m)
شهری	کاشان	۲۷۵۰۰۰	مسکونی و صنعتی	+۶
شهری	آران و بیدگل	۶۰۰۰۰	مسکونی و صنعتی	+۱
شهری	نوشآباد	۱۰۰۰۰	کشاورزی	-۴/۵۸
شهری	ابوزیدآباد	۵۵۰۰	کشاورزی	-۶/۴۴
روستایی	آب شیرین	۱۰۰۰	جنگل و کشاورزی	-۱/۰۷
شهری	نصرآباد	۵۰۰۰	کشاورزی	-۵/۶۵
روستایی	سن سن	۲۰۰۰	جنگل و کشاورزی	-۰/۸۷
روستایی	محمدآباد	۲۰۰۰	کشاورزی	-۵/۴۱
روستایی	گلشن آباد	۱۰۰۰	کشاورزی	-۲/۱۳
شهری	راوند	۳۰۰۰۰	کشاورزی و صنعتی	-۱۲/۴۶

نتیجه گیری

داده های سطح آب زیرزمینی در مدل سازی سیستم آب زیرزمینی، مدیریت منابع آب و خشکسالی از اهمیت ویژه ای برخوردارند. با توجه به این که اکثر مدل های جریان آب زیرزمینی برای شبیه سازی رفتار سیستم آب زیرزمینی نیاز به در اختیار داشتن داده های سطح آب به صورت توزیعی دارند. و از آن جایی که تعداد سطح چاه های مشاهداتی در اغلب دشت ها محدود و احداث آن ها هزینه بر است. لذا برای تهیه نقشه های توزیعی جهت تهیه مدل های آب زیرزمینی نیاز مبرم به روش های مختلف درون یابی احساس می شود. امروزه روش های مختلفی جهت درون یابی پارامترهای طبیعی همچون سطح آب زیرزمینی به کار گرفته می شوند. در این تحقیق برخی روش های قطعی درون یابی به منظور برآورد سطح آب زیرزمینی به کار گرفته شد. نتایج بررسی نشان داد که روش های توابع چند جمله ای موضعی، اسپلاین منظم، اسپلاین کششی، تابع چند جمله ای عام، کریجینگ و معکوس وزنی فاصله به ترتیب بیشترین دقت را دارا بودند. نتایج این تحقیق می تواند به عنوان ورودی در بسیاری از مدل های توزیعی - مکانی که نیاز به اطلاعات سطح آب دارند مورد استفاده قرار گیرد و همچنین برای مدیریت و برنامه ریزی در زمینه منابع آب، محیط زیست و منابع طبیعی به کار گرفته شود. همچنانکه تحقیقات ناصری و همکاران (۱۳۹۰) نیز روش توابع چند جمله ای موضعی را مناسب ترین روش جهت برآورد توزیع مکانی سطح آب زیرزمینی آبخوان نورآباد - ممسنی معرفی کردند (۱۹).

مطالعاتی که تاکنون در دشت کاشان انجام شده است تنها بخشی از آبخوان کاشان بوده و حساسیت مکانی آن را به خوبی نشان نمی داده است با توجه به نقشه های بدست آمده شاهد کاهش ۲۴ متری به دلیل استحصال و خشکسالی زیاد در بخش های غربی آبخوان طی مدت ۹ سال هستیم از آن جایی که این قسمت از آبخوان به دلیل ویژگی های زمین شناسی منطقه مناسبی برای ذخیره آب های زیرزمینی می باشد بیانگر آن است که با از بین رفتن ذخیره آب در این قسمت از آبخوان در سال

های آینده مواجه با هجوم سریعتر و بیشتر آب شور و از بین رفتن منابع آبی در دشت خواهیم بود.

با توجه به نقشه آلودگی نیترا و تغییرات سطح آب زیرزمینی مناطقی که دچار افزایش سطح آب زیرزمینی شدیدی شده اند به دلیل تغذیه ناشی از چاه های دفع فاضلاب خانگی می باشد از آنجایی که منابع تامین آب شهرستان از مناطق مجاور آن و با کیفیت مناسب می باشد با ورود آن به آب های زیرزمینی و حرکت آن به سمت قسمت های شرقی و سپس شمالی دشت (باتوجه به نقشه جهت جریان و تغییرات سطح آب) باعث شور شدن و از بین رفتن همان منابع با کیفیت استحصالی شده است.

وجود سد قهرود در منطقه کوهستانی (شکل ۱) باعث ذخیره، نفوذ و ورود آب این رودخانه از قسمت انتهایی نیمه جنوبی دشت و خارج شدن منبع آب بسیار زیاد و افزایش تا ۱ متری سطح آب زیرزمینی این قسمت از آبخوان به دلیل عمق کم سنگ کف و لایه های نفوذناپذیر شده است که لازم است نسبت به آزادسازی این رودخانه و رهاسازی و تغذیه آن به دشت جهت جبران و کاهش خسارت های کمی و کیفی ناشی از هجوم آب شور علاوه بر اقدامات مصارف درست و بهینه در بخش کشاورزی، شرب و صنعت گردد.

با توجه به اینکه حجم آب زیرزمینی زیادی از قسمت شمالی (محدوده آبخوان قم) وارد آبخوان کاشان می شود و باعث جبران کاهش سطح و مانع شور شدن آب زیرزمینی می شود، از آنجایی که کاربری های زیاد کشاورزی با حجم مصرف آب زیاد توسط چاه های بسیار زیاد در این قسمت از محدوده آبخوان (جنوب آبخوان دشت قم) وجود داشته (شکل ۱) و مانع از ورود آب زیرزمینی به دشت شده است، لازم است نسبت به کاهش این کاربری ها و مصرف آب این قسمت اقدام شود.

با توجه به اهمیت این دشت در اقتصاد و معاش ساکنین، لازم است راه کارهای مناسبی برای این مشکل اتخاذ گردد. مواردی مانند، ارزش نهادن به آب به عنوان با ارزش ترین ماده موجود در طبیعت، جلوگیری از برداشت چاه های غیرمجاز، جلوگیری از توسعه باغ ها در سرشاخه های رودخانه ها، حفظ

۲. اکبری، اکبر، کلانتری، نصرالله، رحیمی، محمد حسین ۱۳۸۵. بررسی و ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت میاناب شوشتر با استفاده از GIS. اولین همایش منطقه‌ای بهره برداری از منابع آب حوزه‌های کارون و زاینده‌رود (فرصت-ها و چالش‌ها)، شهرکرد، ۹ ص.

۳. حسنی پاک، ع.ا.، ۱۳۷۷. زمین آمار (ژئواستاتستیک)، چاپ اول. انتشارات دانشگاه تهران، ۳۱۴ صفحه.

4. Nairizi, S., Janparvar, M. 2006. Mashhad Plain Groundwater Management under Drought Condition. 22p. Proceedings of the International Workshop, Tehran, 29-31 October 2006. Groundwater for emergency situations, IHP-VI, Series on groundwater No.15.

۵. رنگزن، کاظم، مختاری، مهدی، شایگان، مهران ۱۳۸۴. ارزیابی دقت مدل‌های IDW و Kriging جهت درونیابی داده‌های سطح آب زیرزمینی دشت میان آب شوشتر. همایش ژئوماتیک، سازمان نقشه برداری تهران، ۱۰ ص.

۶. میثاقی، فرهاد، محمدی، کورش ۱۳۸۷. بررسی سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های متداول درونیابی و مقایسه آن با تکنیک زمین آمار. سومین گرد همایی علوم زمین. سازمان زمین شناسی ایران. ۵ ص

۷. اکبری، مرتضی، جرگه، محمد رضا، مدنی سادات، حمید ۱۳۸۸. بررسی افت آب های زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعاتی جغرافیایی (GIS) (مطالعه موردی: آبخوان دشت مشهد). پژوهش های حفاظت آب و خاک. جلد ۱۶، شماره ۴، ۷۹ - ۶۳ ص.

۸. انصاری، حسین، نادریان فر، محمد، مرادی، حوریه. پایش و تحلیل اثر تغییرات مکانی خشکسالی‌ها بر تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از GIS (مطالعه موردی: دشت نیشابور). هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، ۱۳۹۰، ۷ ص.

۹. رهنما، هادی. قنبرپور، محمد رضا. حبیب نژاد روشن، محمود. دادرسی سبزواری، ابوالقاسم ۱۳۹۱. بررسی وضعیت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی (مورد شناسی: دشت

بستر و حریم رودخانه‌ها به عنوان بهترین بستر برای تغذیه آبخوان، تغییر روش‌های آبیاری و الگوی کشت و صرفه‌جویی آب در بخش کشاورزی، استفاده از پساب تصفیه شده فاضلاب و جایگزینی آن با بخش کشاورزی، ترویج فرهنگ استفاده صحیح از آب می‌تواند تا حدودی شرایط نامناسب را بهبود بخشد (۷).

همچنین اصلاح و بهینه‌سازی نهر صفی‌آباد، آزادسازی و رهاسازی آب سد قهرود به آبخوان دشت کاشان، مهار، پخش و ذخیره‌سازی سیلاب‌های ناشی از رودخانه‌های بن‌رود و قهرود، رودخانه‌های منتهی به آن و نیز تغذیه مصنوعی مناسب آب های زیرزمینی در آبخوان دشت کاشان با رعایت اصول محیط‌زیستی، استفاده هرچه بیشتر رودخانه‌ها و سد مذکور جهت مصرف شرب، ذخیره‌سازی و استفاده در آبنبارها، خریدن حق‌آبه‌های آب رودخانه‌ها و سد قهرود جهت کاهش هرچه بیشتر مصارف آب کشاورزی و استفاده از آب زیرزمینی به جای آن همراه با بهینه‌سازی مصرف آبیاری و الگوی کشت و پیاده‌سازی موارد مذکور در دیگر مسیل‌ها و رودخانه‌های دائمی و فصلی کاشان می‌تواند بسیار مفید و باعث کمک بسیار شایانی در ارتقاء کمیت و کیفیت، جلوگیری از آلودگی شوری و از بین رفتن آب های زیرزمینی، چاهها، قنوات، مصارف آب شرب، صنعت و کشاورزی و نیز پیشگیری از خطرات ناشی از سیلاب‌ها به خصوص در زمان بحران شود.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از همکاری جناب آقای مهندس واحدیان، معاون محترم معاونت خدمات شهری و محیط‌زیست شهرداری کاشان تشکر می‌شود.

منابع

۱. حسینی‌علی‌زاده م، یعقوبی ع، (۱۳۸۹). تغییرات زمانی و مکانی سطح سفره آب زیرزمینی با استفاده از زمین آمار، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال چهارم، شماره ۱۰، بهار، صفحات ۶۳ تا ۶۷.

15. Johnston, K., Ver Hoef, J., Krivoruchko, K., Lucas, N., 2001. Using ArcGIS Geostatistical Analyst. Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, CA, USA
16. Siska, P. P., Hung, I. K., 2005. Assessment of kriging accuracy in the GIS environment [on-line]
<http://gis.esri.com/library/userconf/proc01/professional/papers/pap280/p280.htm>.
۱۷. حیدری، محمد مهدی، موسوی، روح الله، رستگاردباغی، مسعود ۱۳۹۰. بررسی مشخصات هیدروژئولوژی دشت کاشان - اصفهان. اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، زیباکنار، ۸ص.
۱۸. حیدری، محمد مهدی، موسوی، روح الله، رستگاردباغی، مسعود ۱۳۹۰. بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت کاشان - اصفهان. اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، زیباکنار، ۸ص.
۱۹. ناصری، حمیدرضا، شکیب، علیرضا، میرباقری، بابک، باقری نژاد اسماعیل ۱۳۹۰. مدلسازی تغییرات مکانی - زمانی سطح آب زیرزمینی با استفاده از تکنیکهای GIS مطالعه موردی: آبخوان دشت نورآباد ممسنی، استان فارس. دومین همایش علوم زمین، ۱۲ص.
- جوین، استان خراسان رضوی. جغرافیا و آمایش شهری - منطقه ای، دوره ۲، شماره ۳، ۴۶ - ۳۱ص.
۱۰. محمدی، صدیقه، سلاجقه، علی، مهدوی، محمد، باقری، رضا ۱۳۹۱. بررسی تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از روش زمین آماری مناسب (طی یک دوره آماری ۱۰ ساله ۱۳۷۵-۱۳۸۵). فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۹، شماره ۱، ۷۱ - ۶۰ص.
۱۱. صادقیان، آزاده، واقعی، یدالله، محمدزاده، محسن ۱۳۹۲. پیش بینی تغییرات مکانی - زمانی سطح آب زیرزمینی در دشت بیرجند به روش کریجینگ. مجله آب و فاضلاب، دوره ۲۴، شماره ۸۵، ۱۰۰ - ۹۳ص.
۱۲. صمدی، جواد ۱۳۹۴. ارزیابی تأثیر کاربری اراضی و آسیب پذیری آبخوان کاشان بر آلودگی آب های زیرزمینی با استفاده از روش DRASTIC و مدل تخریب. تحقیقات منابع آب ایران، سال یازدهم، شماره ۱، ۲۰ - ۱۳ص.
۱۳. سازمان آب کاشان ۱۳۹۰. سطح آب زیرزمینی کاشان.
14. Augustijn, E. W., 2002. Interpolations. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Spatial Information Theory and Applied Computer Science Division