علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره نوزدهم، شماره یک، بهار ۹۶

مدل‌سازی مکانی – زمانی تغییرات تراز سطح آبهای زیرزمینی مناطق شهری و روستایی آبخوان کاشان با استفاده از تکنیک‌های 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 نقشه‌های تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان کاشان نشان می‌دهد که طی سال های ۸۱ تا ۹۰، سطح ایستابی با متوسط عمق ۷۲/۰۶متر به طور متوسط حدود ۵/۵متر افت داشته است. با توجه به اینکه نمونه‌برداری از تمام نقاط محدوده مطالعاتی مقدور نیست، روش‌های پهنه‌بندی ابزاری قدرتمند در تخمین تغییرات مکانی و زمانی داده‌ها است. هدف از این تحقیق مدل‌سازی تراز، عمق و تغییرات مکانی و زمانی سطح آب های زیرزمینی آبخوان کاشان بر اساس استفاده از تکنیک اعتبارسنجی متقابل روش‌های مختلف درون‌یابی قطعی و زمین‌آماری در محیط GIS می‌باشد.

روش بررسی: بدین منظور اطلاعات سطح آب زیرزمینی ۶۷ چاه مشاهده‌ای در محدوده منطقه مورد نظر طی سال های ۸۱ تا ۹۰ برای تهیه نقشه سطح آب زیرزمینی آبخوان کاشان مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. برای ارزیابی کارآیی روش‌های مختلف درون‌یابی 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 روش‌های مختلف به کار گرفته شده‌اند.

نتایج: نتایج ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی نشان داد که توابع چندجمله‌ای‌موضعی با MBE = 0.444، MAE = 13.19، RMSE = 20.29 و $R^2 = 0.999$ بیشترین دقت در مدل‌سازی مکانی را دارا بود.

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

واژه‌های کلیدی: درون‌یابی، روش‌های قطعی و زمین‌آماری، اعتبارسنجی متقابل، سطح آب زیرزمینی، آبخوان کاشان.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه آلاینده‌های 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.

J.Env. Sci. Tech., Vol 19, No.1, spring 2017

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 Samadi[2]

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 defferent 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 Counclusion: 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 می‌شود. در مناطق خشک و نیمه خشک جهان از جمله ایران که میانگین بارندگی سالانهٔ آن، کفایت نیاز آبی را نمی‌دهد، حفظ و مدیریت منابع آب زیرزمینی اهمیتی بسیار بالا داشته و آگاهی از چگونگی تغییرات مکانی و زمانی سفره‌ها و همچنین ساختار ریاضی تغییرپذیری، به منظور مدیریت بهینه، اطلاعات مهمی در اختیار مدیران مربوطه قرار می‌دهد (۱). از آنجا که تغییرات سطح آب های زیرزمینی متغیری مکانی و زمانی بوده و اندازه‌گیری آن در نقاط مختلف، در دوره‌های زمانی کوتاه مدت مشکل می‌باشد و موجب صرف هزینه‌های زیادی می‌شود، بنابراین شناسایی و استفاده از ابزاری مناسب جهت پایش میزان تراز و عمق آب های زیرزمینی و با نمونه‌برداری از نقاط محدودتر و درون‌یابی دقیق اطلاعات تهیه‌شده، ضروری است. روش‌های گوناگونی برای مدل‌سازی و پهنه‌بندی تغییرات ویژگی‌های آب‌های زیرزمینی وجود دارد که هر کدام از آن ها بسته به شرایط منطقه و وجود آمار و داده‌های کافی دارای دقت‌هایی گوناگون می‌باشند (۲).

شناسایی به موقع و تهیه نقشه از تغییرات تراز آب های زیرزمینی و شناسایی عامل آن توسط روش‌های مشاهده‌ای و سنتی، کاری سخت، زمانبر و پرهزینه می‌باشد. امروزه به منظور تخمین متغیرهای مکانی یک منطقه از روش های زمین آمار استفاده می‌گردد. روش‌های زمین‌آمار 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 نمونه‌های گرفته شده از یک جامعه آماری، مستقل از یکدیگر بوده و وجود یک نمونه هیچگونه اطلاعاتی درباره نمونه بعدی نمی‌دهد. اما روش‌های زمین‌آماری، وجود همبستگی مکانی بین مقادیر یک متغیر در یک ناحیه را بررسی می‌نمایند. روش‌های مختلف زمین‌آمار بسته به نوع متغیر، دقت متفاوتی را نشان می‌دهند. بطورکلی آنالیز زمین‌آماری[1] به بررسی پدیده‌های متغیر در زمان و مکان و آنالیز نقاط نمونه‌برداری‌شده با موقعیت‌های متفاوت به منظور تولید یک سطح پیوسته می‌پردازد 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 روش‌های زمین‌آماری و کاربردهای آن در زمینه سیستم آب زیرزمینی و مدل‌سازی آن در مناطق شهری و روستایی متاثر از فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی انجام شده است. نیریزی و جان‌پرور در پژوهشی بیان کردند که میزان بهره‌برداری آب زیرزمینی در دشت مشهد از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۴ به میزان ۴/۶میلیارد متر مکعب افزایش یافته و پیش‌بینی کردند که تا سال ۱۳۹۹ به میزان ۲/۵میلیارد متر مکعب دیگر نیز افزایش یابد. همچنین عوامل مهمی را که باعث افزایش بهره‌برداری شده‌اند را توسعه زیاد سطح زیر کشت از ۱۰۰۰۰۰ به ۱۳۰۰۰۰هکتار، توسعه صنعت کمتر از ۱۰۰واحد صنعتی به بیش از ۳۰۰۰واحد، افزایش توسعه شهری از ۱۵کیلومتر مربع به ۱۶۰ و افزایش جمعیت از ۰/۵میلیون به ۲/۵میلیون‌نفر در طی ۳۴ سال دانسته‌اند (۴). رنگزن و همکاران (۱۳۸۴) در مقاله‌ای به ارزیابی دقت مدل‌های IDW[2] و Kriging جهت درونیابی داده‌های سطح آب زیرزمینی دشت میان آب شوشتر پرداخت. نتیجه نشان‌دهنده ارجحیت روش IDW به روش Kriging است (۵). میثاقی و محمدی (۱۳۸۷) به برآورد سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های متداول درون‌یابی و مقایسه آن با تکنیک زمین‌آمار در دشت ایرانشهر - بمپور پرداختند. نتایج نشان دهنده دقت قابل قبول روش زمین‌آمار و تخمینگر کریجینگ در مقایسه با سایر روش‌های 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 روش‌های قطعی درون‌یابی نقشه سطح آب زیرزمینی تهیه نموده و به بررسی روند افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از هیدروگراف معرف دشت مشهد پرداخته است (۷).

1- Geostatistical Analyst

2- Inverse Distance Weighting

انصاری و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهشی با استفاده از نرم‌افزار GIS[1] و شاخص SPI[2] نشان داد که در بین سال های ۷۲ تا ۸۵ افت آب زیرزمینی دشت نیشابور حدود ۱۲/۳متر 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 جوین بر اساس روش میانیابی نزدیک‌ترین همسایه در GIS مشخص کرد که این آبخوان بین سال های ۷۴ تا ۸۶ افتی معادل ۱۰متر داشته است (۹). محمدی و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی با استفاده از انواع روش‌های درون‌یابی بر اساس دو معیار MBE[3] و MAE[4] نشان دادند که روش IDW مناسب‌ترین روش جهت پهنه‌بندی تغییرات مکانی - زمانی آب های زیرزمینی دشت کرمان می‌باشد همچنین افت حداکثر ۴۰متری قسمت خروجی شمالی و بالاآمدگی حداکثر ۷متری 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).

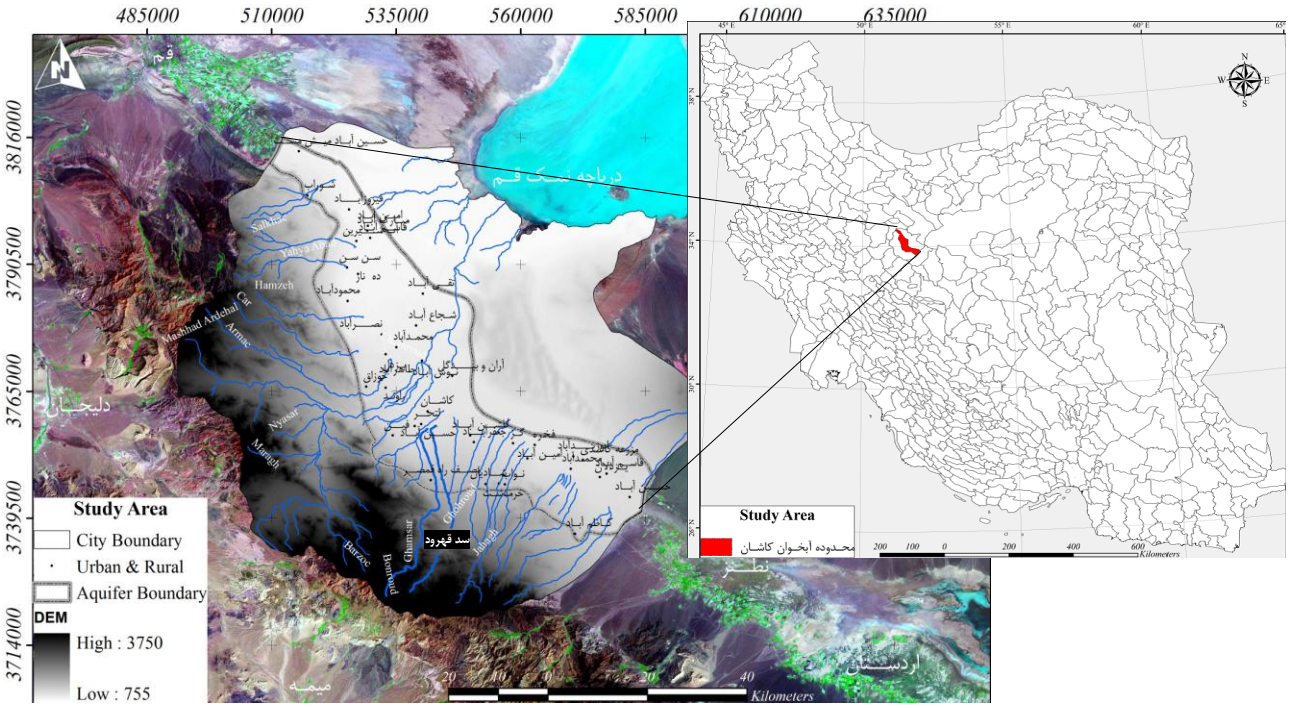
هدف و نوع‌آوری از این پژوهش بررسی و مدل‌سازی مکانی - زمانی تراز، عمق و تغییرات سطح آبهای زیرزمینی کاشان بر اساس کمترین خطای مکانی و بالاترین همبستگی مکانی داده‌ها جهت پهنه‌بندی در GIS و نیز روند افت و تغییرات سالانه آب های زیرزمینی آبخوان کاشان بر اساس هیدروگراف معرف تهیه‌شده و علل بروز مشکلات کمی ناشی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

۲- منطقه مورد مطالعه

دشت کاشان در دامنه کوههای کرکس و حاشیه کویر مرکزی ایران و در حدود ۲۴۰کیلومتری جنوب تهران به‌صورت دره‌ای باریک، با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی با عرضی در حدود ۲۰کیلومتر 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 ′۵۶ °۵۱ تا ′۶ °۵۱ و عرضهای ′۴۵ °۳۳ تا ′۲۹ °۳۴ محدود می‌باشد. تقریباً تمام بهره‌برداری از آبخوان آبرفتی کاشان نیز در همین محدوده صورت می‌گیرد. حداکثر ارتفاع آبخوان از سطح دریا ۱۶۰۲متر در حاشیه جنوب غربی و حداقل ارتفاع آن ۸۰۰متر 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.

1- Geographic Information System
2- Standardized Perecipitation 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

۳- مواد و روش پژوهش

۳-۱- روش‌های تجزیه و تحلیل و مدلسازی مکانی داده‌ها

انتخاب روش مناسب پهنه‌بندی و تهیهٔ نقشهٔ تغییرات ویژگی‌های کمی و کیفی آبهای زیرزمینی گامی اساسی و مهم در مدیریت منابع آبی یک منطقه بشمار می‌رود. استفاده از روش‌های زمین‌آماری مستلزم بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده‌هاست که توسط تجزیه و تحلیل واریوگرام این امر بررسی می‌شود. شرط استفاده از این تجزیه و تحلیل، نرمال‌بودن داده‌ها می‌باشد. بنابراین تمامی داده‌های مربوط به هر پارامتر از نظر نرمال‌بودن بررسی شد. پس از آنالیز داده‌ها و اطمینان از نرمال‌بودن آنها با استفاده از لگاریتم‌گیری و آزمون‌نمودن آن با استفاده از آزمون کلموگرف- اسمیرنف در محیط SPSS، اقدام به نرمال‌کردن و برازش واریوگرام مناسب به ساختار مکانی داده‌ها و پارامترهای مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار GS+ گردید.

از جمله روش‌های میان‌یابی که جهت مدل‌سازی و تهیهٔ نقشه‌های تغییرات کمی آبهای زیرزمینی استفاده می‌شود می‌توان به روش‌های زمین‌آمار کریجینگ[1] و کوکریجینگ[2] و روش‌های قطعی مانند روش وزن‌دادن عکس فاصله (IDW)، تابع شعاعی (RBF[3])، تخمینگر موضعی (LPI[4]) و تخمینگر عام (GPI[5]) اشاره کرد. در روش‌های قطعی مقادیر متغیر مورد بررسی برای نقاط مختلف با استفاده از توابع ریاضی برآورد می‌گردد و از این توابع برای ایجاد سطوح از نقاط اندازه‌گیری شده بر مبنای میزان تشابه نقاط استفاده می‌کنند، این روش‌ها خود به دو دسته عام (جامع یا گلوبال)[6] و موضعی[7] تقسیم می‌شوند. شوند. روش‌های عام یا جامع (مانند تابع چندجمله‌ای عام)، برای پیش‌بینی، از کل سری داده‌ها در نقاط اندازه‌گیری استفاده می‌کنند ولی روش‌های موضعی مانند معکوس وزنی فاصله (IDW)، توابع چندجمله‌ای موضعی و اسپلاین، مجاورت را اساس محاسبه مقادیر برای سایر نقاط قرار می‌دهند. در

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.

وزن‌دادن 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 آن ها 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 نزدیک ترین‌ترین نمونه‌ها و اختصاص وزن کمتر به نمونه‌هایی است که در فاصله بیشتر قرار گرفته‌اند. که بر اساس رابطه زیر مقادیر نقاط نمونه‌برداری‌نشده مشخص می‌شود (۱۴).

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{z_i}{d_i^m}}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{d_i^m}} \qquad (۱)$$

که در آن Z مقدار برآورد متغیر در منطقه نمونه‌برداری‌نشده، z_i مقدار نمونه‌برداری‌شده، d_i فاصله نقطه نمونه‌برداری‌شده تا نقطه تخمین، N تعداد کل نمونه‌ها و m توان فاصله است. بگونه‌ای که با نزدیک‌شدن این پارامتر به صفر تخمین‌گر IDW رفتاری شبیه میانگین حسابی و با افزایش بیش از حد آن رفتاری شبیه چندضلعی تیسن[1] از خود نشان می‌دهد.

تابع چند جمله‌ای عام و موضعی: دراین نوع درون‌یابی توابع چندجمله‌ای مرتبه پایین برای توصیف فرآیندهای فیزیکی و ایجاد سطوح متغیر تدریجی به کارگرفته 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 انعطاف پذیری 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 اندازه-گیری‌شده، مقادیر نقاط نامعلوم برآورد می‌شوند. ویژگی اساسی اسپلاین این است که درسطح تغییرات ناگهانی وجود ندارد. روش اسپلاین به دو دسته منظم[2] و کششی[3] تقسیم می‌شود. روش منظم یک سطح نرم با تغییرات تدریجی ایجاد می‌کند که ممکن است در آن برخی از مقادیر از دامنه مقادیر نقاط اندازه گیری 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 آن ها مورد نظر می‌باشد مفید است (۱۴). این روش با استفاده از معادله ۲ محاسبه می‌شود.

$$Z_{(x,y)} = T_{(x,y)} + \sum_{j=1}^{N} \lambda_j * R(r_j) \qquad (۲)$$

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 jام، $T(x,y)$ و $R(r_j)$ بر حسب نوع اسپلاین مورد استفاده تعیین می‌شود.

1- Thiessen polygons

2- Regular Spline

3- Spline with tension

کریجینگ: مزیت عمده این روش نسبت به سایر روش‌های درونیابی اعم از سراسری و محلی، ایجاد اطلاعات مناسب و بهینه‌تری از ناحیه، اندازه، جهت و شکل همسایگی‌ها و همچنین خطای مقادیر درونیابی است (۱۵). در این روش، به منظور پیشبینی مقادیر نامعلوم برای یک موقعیت خاص، مدل منطبق‌شده از واریوگرافی شکل مکانی داده‌ها و مقادیر نمونه همسایه، مورد نیاز خواهد بود. همچنین به منظور پیشبینی مقادیر نامعلوم، از وزن های مقادیر نقاط نمونه همسایه استفاده می‌شودکه 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 می‌پذیرد.

$$Z = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i * z(x_i) \qquad (۳)$$

که در آن Z مقدار متغیر مکانی برآوردشده، $z(x_i)$ مقدار متغیر مکانی مشاهده‌شده در نقطه x_i و λ_i وزنی است که به نمونه x_i نسبت داده می‌شود و بیانگر اهمیت نقطه iام در برآورد است.

تخمین‌گر کریجینگ ساده[1] به شکل ترکیب خطی وزندار است، اما میانگین μ، که بایستی حتماً دارای ویژگی ایستایی مرتبه دوم باشد در فرایند تخمین مورد توجه و استفاده قرار می‌گیرد.

کریجینگ معمولی[2] تخمین‌زنی است که مقادیر یک متغیر را در نقاط نمونه‌برداری‌نشده بصورت ترکیب خطی از مقادیر همان متغیر در نقاط اطراف آن در نظر می‌گیرد.

کریجینگ جامع[3] در شرایطی است که هر دو مؤلفهٔ تغییرپذیری (جبری و تصادفی)، به طور همزمان در ساختار مکانی متغیر ناحیه‌ای وجود داشته باشند، به طوریکه رفتار و الگوی تغییرپذیری متغیر مربوط را می‌توان در قالب رابطه ۴ نشان داد:

$$Z(X) = \sum_{k=0}^{k} a_k * f_k(x) + \varepsilon(x) \qquad (۴)$$

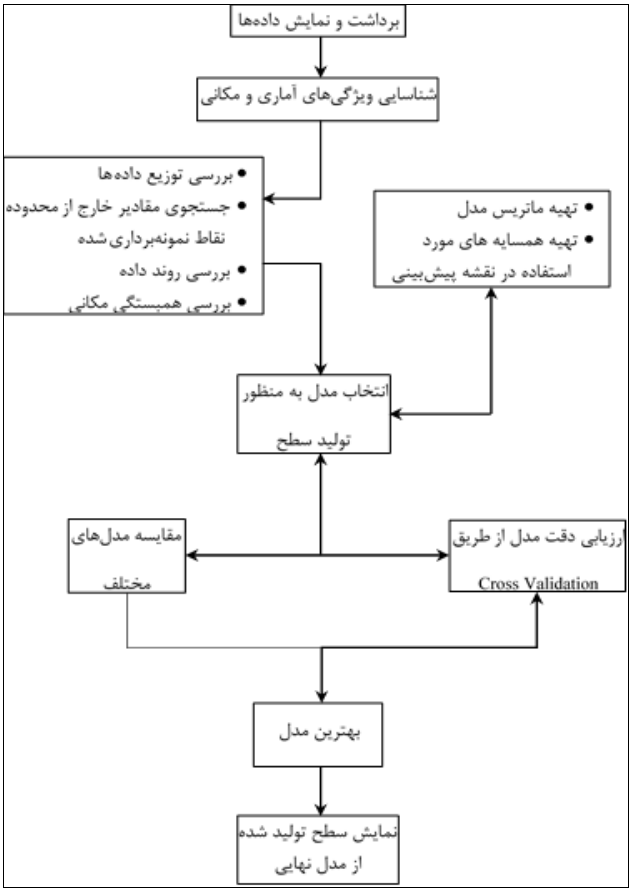
کریجینگ گسسته[4] تخمین‌گری غیرخطی می‌باشد و در شرایطی به کار گرفته می‌شود که توزیع داده‌ها پیچیده و برازش آن ها توسط توزیع‌های معمول آماری (نرمال و یا لوگ نرمال) دشوار باشد.

کوکریجینگ همان کریجینگ توسعه‌یافته است که در آن متغیرهای ثانویه نیز لحاظ شده است.

۳-۲- مدل‌سازی مکانی

برای پهنه‌بندی و مدل‌سازی سطح و تراز آب زیرزمینی از تخمین‌گرهای زمین‌آماری کریجینگ، تخمین‌گر چندجمله‌ای عام و موضعی، IDW، اسپیلاین کششی و منظم استفاده گردید. در پایان جهت ارزیابی و دقت مدل تخمین‌گر زمین‌آماری و قطعی و بررسی خطای میانیابی و تعیین شاخص‌های مورد نظر، از تکنیک اعتبارسنجی متقابل[5] بر طبق مدل مفهومی استفاده گردید (شکل ۲). در این تکنیک برای هریک از نقاط اندازه‌گیری‌شده که معمولاً تنها ابزار مقایسه می‌باشند، می‌توان تخمین انجام داد و سپس به مقایسه مقدار مشاهده‌ای و تخمین پرداخت. بدین ترتیب که در روش اعتبارسنجی حذفی، یک نقطه حذف و با استفاده از سایر نقاط و اعمال روش میانیابی مورد نظر، برای این نقطه تخمین صورت می‌گیرد. سپس این نقطه به محل خود برگردانده می‌شود و نقطه بعدی حذف می‌گردد. به همین ترتیب برای تمام نقاط برآورد صورت می‌گیرد. مقادیر مشاهده‌ای و برآوردشده مقایسه گردیده و خطای برآورد با استفاده از مدل آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE[6]) استاندارد شده و محاسبه می‌شود، که این مقدار هر چه به صفر نزدیکتر باشد نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل می‌باشد.

1- Simple Kriging
2- Ordinary Kriging
3- Universal Kriging
4- Disjunctive Kriging
5- Cross-validation
6- Root Mean Square Error



شکل ۲- مدل مفهومی انتخاب بهترین مدل از طریق روش‌های زمین‌آماری و قطعی

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

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 آن ها به قرار زیر است:

$$e = Z^*(x_i) - Z(x_i) \quad (۵)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left[Z^*(x_i) - Z(x_i)\right]}{n} \quad (۶)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left|Z^*(x_i) - Z(x_i)\right|}{n} \quad (۷)$$

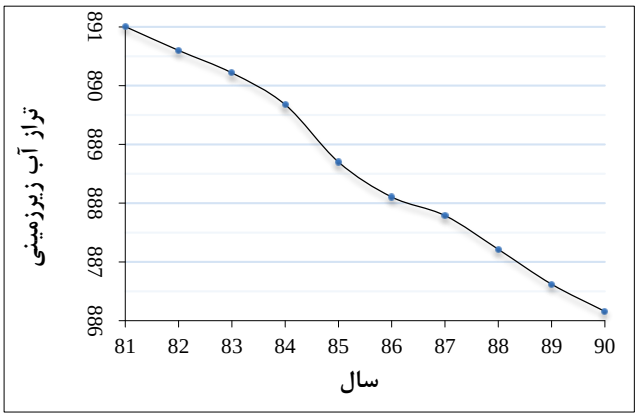
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[Z^*(x_i) - Z(x_i)\right]^2}{n}} \quad (۸)$$

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

MBE و MAE 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.

۴- نتایج و بحث

هیدروگراف تغییرات زمانی تراز آب های زیرزمینی چاه های مشاهداتی از سال ۱۳۸۱ تا سال ۱۳۹۰ در شکل (۳) نشان داده شده است. بر اساس این نمودار سطح آب ایستابی چاه ها به طور متوسط سالانه حدود ۰/۵۴متر کاهش یافته است.



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)

نتایج اعتبارسنجی روش‌های مختلف درون‌یابی قطعی و زمین‌آماری مورد مطالعه دراین تحقیق جهت برآورد توزیع مکانی سطح آب زیرزمینی در آبخوان کاشان براساس معیارهای آماری ذکرشده در بخش قبل، در جدول ۱ ارایه شده است. نتایج ارزیابی بر اساس معیارهای آماری نشان داد که روش توابع چند جمله‌ای موضعی مناسب‌ترین روش جهت برآورد توزیع مکانی سطح آب زیرزمینی آبخوان کاشان می‌باشد. زیرا دارای کمترین RMSE و بیشترین همبستگی با مقادیر واقعی - رتبه دوم بر اساس معیار MAE می‌باشد که نشان‌دهنده تفاوت کمتر مقادیر برآوردشده نسبت به مقادیر مشاهده‌ای است. در بین همه روش‌ها بعد از روش اسپلاین منظم، اسپلاین کششی، تابع چندجمله‌ای عام، کریجینگ و معکوس وزنی فاصله به ترتیب بیشترین دقت را دارا بودند.

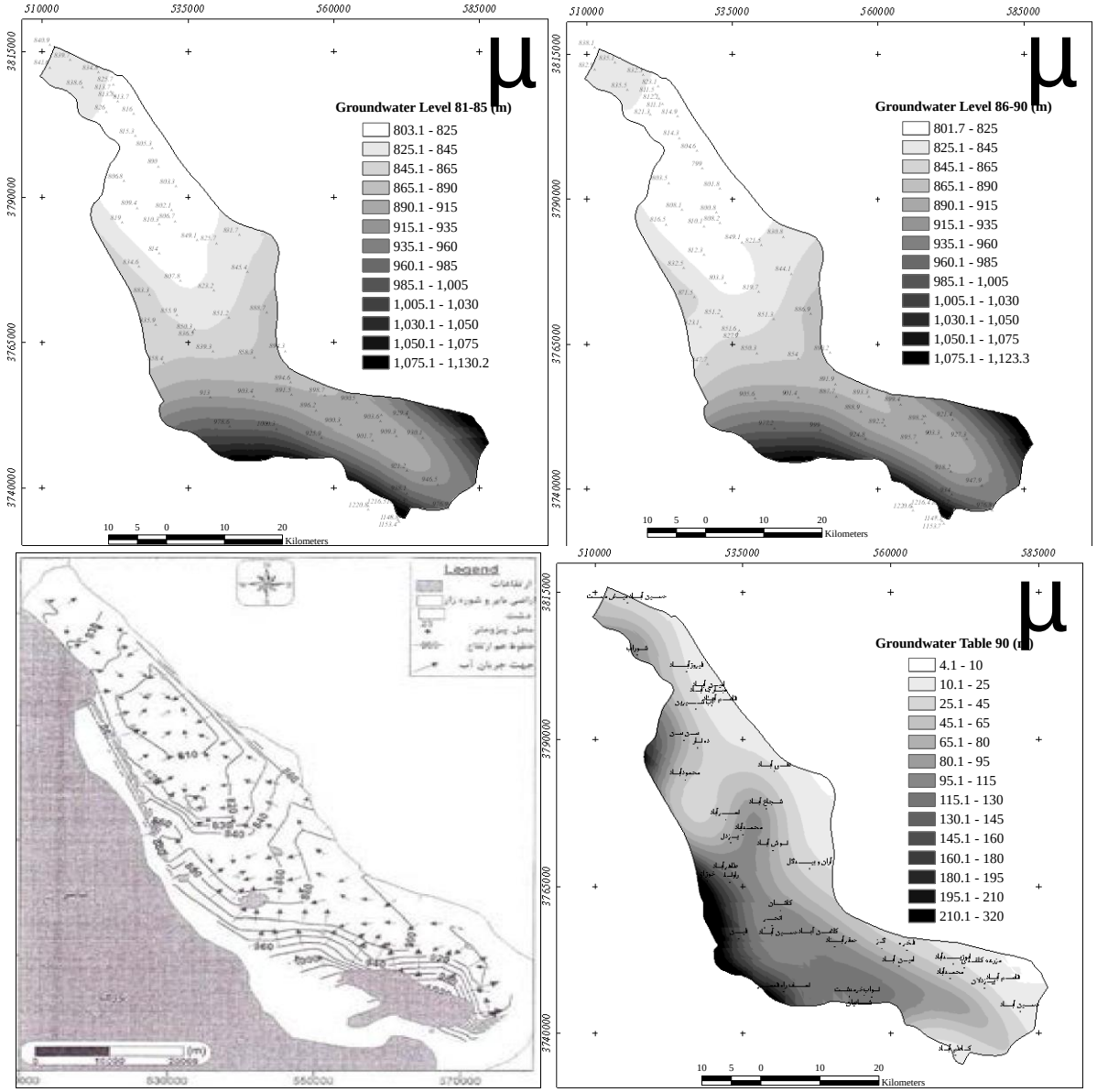
جدول ۱- نتایج اعتبارسنجی روش‌های مختلف درون‌یابی قطعی و زمین‌آماری

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

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

نقشه‌های سطح آب زیرزمینی تهیه‌شده با استفاده از تابع چندجمله‌ای موضعی در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. همانطور که در نقشه‌ها مشاهده می‌شود بالاترین تراز آب زیرزمینی مربوط به قسمت‌های جنوبی محدوده مورد مطالعه ۱۱۳۰متر می‌باشد. که این امر به دلیل ارتفاع بالای سطح منطقه و تغذیه خالص طبیعی بالا در این قسمت از آبخوان به نسبت تراز پایین

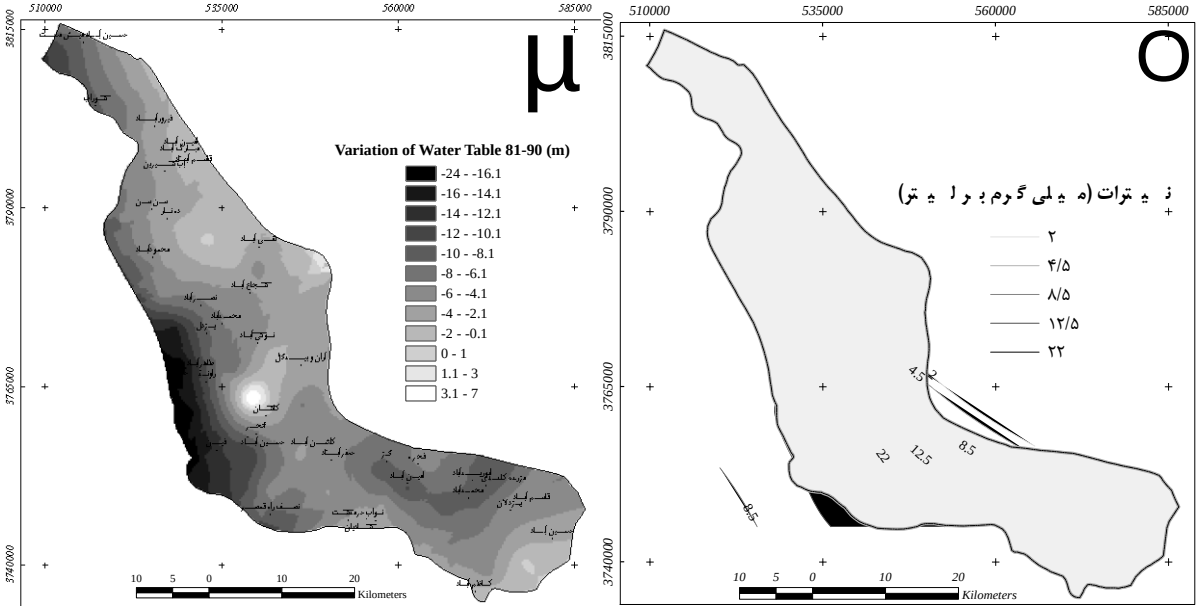
۷۹۶متر قسمت‌های شمالی می‌باشد. از این رو جهت کلی حرکت آب زیرزمینی طبق نقشه‌های به دست آمده از روش‌های درون‌یابی مؤید این مسأله است که جهت کلی جریان آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه جنوب – شمال و غرب - شرق می‌باشد. بر اساس نقشه گرادیان هیدرولیکی دشت حداکثر میزان شیب در قسمت های غربی و جنوبی آبخوان به دلیل تراز بالای سطح آب زیرزمینی حدود ۱/۶درصد، 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 حرکت آن به این نواحی کمتر از ۰/۱درصد 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 ۷۲/۰۶متر می‌باشد که در قسمت‌های مرتفع جنوب غربی آبخوان به ۳۲۰ یا حتی بیشتر از آن در قلل مرتفع می‌رسد. حداقل عمق آب های زیرزمینی در حاشیه شمالی و شمال شرقی آن می‌باشد که میزان آن ۴متر است.



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)

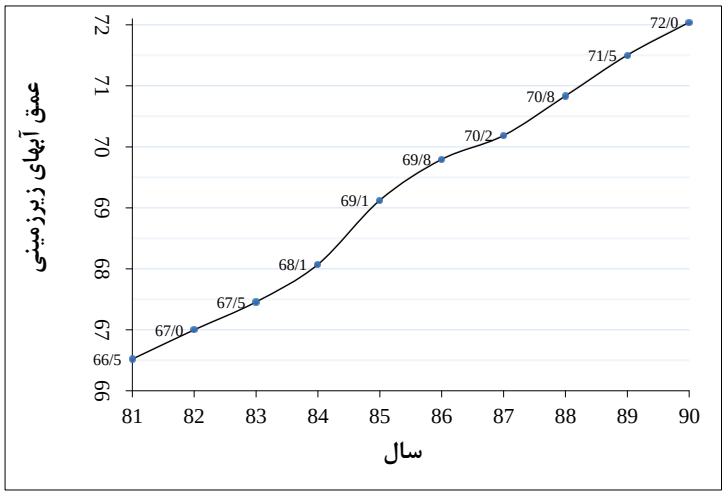
همان گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود افت سطح آب زیرزمینی در بعضی از قسمت‌های آبخوان کاشان به ۲۴متر می‌رسد که روند کاهش سطح آب در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در بعضی از چاه ها نوسان سطح آب به نسبت بقیه چاه ها بیشتر است، که این امر می‌تواند به دلیل واقع‌شدن این چاه ها در مناطق پرتنش از نظر استحصال آب از طـریق چاه های بهره‌برداری و جهت شیب آب های زیرزمینی که موجب کاهش سطح آب های زیرزمینی و یا تغذیه ناشی از وجود کاربری‌های شهری از طریق چاه های دفعی در قسمت‌های مرکزی آبخوان با توجه به نقشه نیترات که موجب افزایش سطح آب های زیرزمینی می‌شود 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) بالاآمدگی سطح آب زیرزمینی را در قسمت‌های مربوط به نفوذ فاضلاب خانگی را تایید کرده‌اند.



شکل ۵- نقشه‌های نیترات 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 2012 and groundwater level variations in Kashan aquifer at years of 2002-2012 (right to left)

تغییرات هیدروگراف نقشه‌های سالانه ایجاد شده از عمق آب های زیرزمینی آبخوان حاکی از میانگین روند افت سالانه ۰/۶۲متری آب های زیرزمینی بین سال های ۸۱ تا ۹۰ می‌باشد (شکل ۶) که این تغییرات در قسمت‌های غربی بسیار بیشتر است. تحقیقاتی که حیدری و همکاران (۱۳۹۰) نیز بر اساس آمار تغییرات هیدروگراف سطح آب چاه های سال های ۶۹ تا ۸۴ در دشت کاشان انجام دادند مشخص کردند که طی مدت ۱۵سال، افت ۷/۳۴متری و به طور متوسط سالانه ۴۹سانتی‌متر و سال ۸۴ نسبت به ۵۳ حداکثر افت به میزان ۵۵متر در حوالی راوند و کمترین میزان آن در نواحی شرقی آران و سن‌سن در حاشیه کویر به میزان ۵متر ایجاد شده است (۱۸).



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)

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 فعالیت‌های کشاورزی در مناطق روستایی باعث کاهش آب زیرزمینی تا ۲۴متر در آن مناطق (غربی و جنوبی آبخوان) و میانگین کاهش ۵/۵۶متری در کل آبخوان و نفوذ تغذیه آب زیرزمینی از طریق چاه های دفع فاضلاب خانگی در این مراکز باتوجه به نقشه آلودگی نیترات باعث افزایش سطح آب زیرزمینی ۵ تا ۱۰متری در طی۱۰سال شده است. همچنین مناطقی (راوند، محمدآباد، نصرآباد، ابوزیدآباد و نوش‌آباد) که بیشتر دارای فعالیت‌های بالای کشاورزی هستند آسیب‌پذیری بیشتری در برابر افت آب های زیرزمینی نسبت به مناطق جنگلی نشان داده‌اند.

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	گلشن‌آباد	۱۰۰۰	کشاورزی	-۲/۱۳
شهری	راوند	۳۰۰۰۰	کشاورزی و صنعتی	-۱۲/۴۶

نتیجه‌گیری

داده‌های سطح آب زیرزمینی در مدل‌سازی سیستم آب زیرزمینی، مدیریت منابع آب و خشکسالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. با توجه به این که اکثر مدل های جریان آب زیرزمینی برای شبیه‌سازی رفتار سیستم آب زیرزمینی نیاز به در اختیار داشتن داده‌های سطح آب به صورت توزیعی دارند. و از آن جائی که تعداد سطح چاه های مشاهداتی در اغلب دشت ها محدود و احداث آن ها هزینه بر است. لذا برای تهیه نقشه‌های توزیعی جهت تهیه مدل‌های آب زیرزمینی نیاز مبرم به روش‌های مختلف درونیابی احساس می‌شود. امروزه روش‌های مختلفی جهت درون‌یابی پارامترهای طبیعی همچون سطح آب زیرزمینی به کار گرفته می‌شوند. در این تحقیق برخی روش‌های قطعی درون‌یابی به منظور برآورد سطح آب زیرزمینی به کار گرفته شد. نتایج بررسی نشان داد که روش‌های توابع چند جمله‌ای موضعی، اسپلاین منظم، اسپلاین کششی، تابع چند جمله‌ای عام، کریجینگ و معکوس وزنی فاصله به ترتیب بیشترین دقت را دارا بودند. نتایج این تحقیق می‌تواند به عنوان ورودی در بسیاری از مدل‌های توزیعی- مکانی که نیاز به اطلاعات سطح آب دارند مورد استفاده قرار گیرد و همچنین برای مدیریت و برنامه‌ریزی در زمینه منابع آب، محیط زیست و منابع طبیعی به کار گرفته شود. همچنانکه تحقیقات ناصری و همکاران (۱۳۹۰) نیز روش توابع چندجمله‌ای‌موضعی را مناسب‌ترین 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 نمی‌داده است با توجه به نقشه‌های بدست آمده شاهد کاهش ۲۴متری به دلیل استحصال و خشکسالی زیاد در بخش‌های غربی آبخوان طی مدت ۹سال هستیم از آن جایی که این قسمت از آبخوان به دلیل ویژگی‌های زمین شناسی منطقه مناسبی برای ذخیره آب های زیرزمینی می‌باشد 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 نیترات و تغییرات سطح آب زیرزمینی مناطقی که دچار افزایش سطح آب زیرزمینی شدیدی شده‌اند به دلیل تغذیه ناشی از چاه های دفع فاضلاب خانگی می‌باشد از آنجایی که منابع تامین آب شهرستان از مناطق مجاور آن و با کیفیت مناسب می‌باشـــد با ورود آن به آب های زیرزمینی و حرکت آن به سمت قسمت‌های 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 ۱متری سطح آب زیرزمینی این قسمت از آبخوان به دلیل عمق کم سنگ کف و لایه‌های نفوذناپذیر شده است که لازم است نسبت به آزادسازی این رودخانه و رهاسازی و تغذیه آن به دشت جهت جبران و کاهش خسارت‌های 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 می‌شود و باعث جبران کاهش سطح و مانع شور شدن آب زیرزمینی می‌شود، از آنجایی که کاربری‌های زیاد کشاورزی با حجم مصرف آب زیاد توسط چاههای 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 ارزش‌ترین ماده موجود در طبیعت، جلوگیری از برداشت چاه‌های غیرمجاز، جلوگیری از توسعه باغ‌ها در سرشاخه‌های رودخانه‌ها، حفظ

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 سیلاب های 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 آب‌انبارها، 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 بین‌رفتن 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. حسینعلی‌زاده م.، یعقوبی ع.، (۱۳۸۹). تغییرات زمانی و مکانی سطح سفرهٔ آب زیرزمینی با استفاده از زمین آمار، مجلهٔ علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال چهارم، شماره ۱۰، بهار، صفحات ۶۳ تا ۶۷.

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 حوضه‌های کارون و زاینده‌رود (فرصت-ها و چالش‌ها)، شهرکرد، ۹ص.

۳. حسنی پاک، ع.ا.، ۱۳۷۷. زمین آمار (ژئواستاتیستیک)، 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 داده های سطح آب زیرزمینی دشت میان آب شوشتر. همایش ژئوماتیک، سازمان نقشه برداری تهران، ۱۰ص.

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. ۵ص

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 – ۶۳ص.

۸. انصاری، حسین.، نادریان‌فر، 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، ۷ص.

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

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). فصلنامهٔ 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

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، روح‌الله.، رستگاردباغی، مسعود ۱۳۹۰. بررسی مشخصات هیدروژئولوژی دشت کاشان – اصفهان. اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، زیباکنار، ۸ص.

۱۸. حیدری، محمد مهدی.، موسوی، روح‌الله.، رستگاردباغی، مسعود ۱۳۹۰. بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت کاشان - اصفهان. اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، زیباکنار، ۸ص.

۱۹. ناصری، حمیدرضا.، شکیبا، علیرضا.، میرباقری، بابک.، باقری‌نژاد 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.