

## شبیه سازی و پیش بینی غلظت نیترات در آب زیرزمینی؛ مطالعه موردی خراسان جنوبی-آبخوان بیرجند

زهرا رحیمزاده کیوی<sup>۱</sup>، حمید کاردان مقدم<sup>۲</sup>، سید محمودرضا بهبهانی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۶

### چکیده

آب‌های زیرزمینی یکی از منابع اصلی تامین آب شرب، کشاورزی و ... در محدوده‌ی مطالعاتی بیرجند می‌باشد، لذا توجه به امر مدیریت در سفره‌های آب زیرزمینی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این مطالعه به منظور مدیریت بر آبخوان بیرجند واقع در استان خراسان جنوبی با استفاده از نرم‌افزار *GMS V.7* شبیه‌سازی کمی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار انجام شد. با توجه به بیلان آب زیرزمینی در آبخوان، پارامترهای ورودی و خروجی در مدل کمی آب زیرزمینی تعریف شد. حالت ماندگار در مهرماه ۱۳۸۰ که روند تغییرات سطح ایستابی نوسانات کمتری داشته و حالت ناماندگار از مهر ۸۰ تا شهریور ۹۰ در طی ۲۰ گام زمانی شش ماهه در نظر گرفته شد. با انجام آنالیز حساسیت مدل، هدایت هیدرولیکی در حالت ماندگار و آبدهی ویژه در حالت ناماندگار به عنوان عامل حساس انتخاب شد. پس از انجام واسنجی، نتایج حاکی از بیلان آب زیرزمینی مدل، وضعیت بحرانی افت سطح ایستابی در آبخوان را نشان داد. براساس بیلان آبی بدست آمده وضعیت آبی آبخوان شبیه‌سازی و مقدار ۱۰ متر افت سطح ایستابی برای مدت ۵ سال پیش‌بینی شد. در مدل کیفی *MT3D* روند تغییرات نیترات بررسی شد و نتایج حاکی از همبستگی بالای بین افت سطح ایستابی و افزایش مقدار نیترات داشت. طی دوره ۵ ساله افزایش مقدار نیترات در دو منطقه پایین دست شهر بیرجند و پایین دست اراضی کشاورزی بسیار مشهود می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی، شبیه‌سازی، نیترات، مدیریت آبخوان، *MT3D*.

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، Zahra\_rahimzadeh89@yahoo.com

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، دانشجوی دکتری منابع آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران\_ تهران، خیابان قزوین، خیابان احمدی

س.خا. ۰۹۱۵۵۶۱۱۹۱۲، [hkardan@ut.ac.ir](mailto:hkardan@ut.ac.ir) (مسئول مکاتبه)

<sup>۳</sup> استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ۰۹۱۲۱۰۵۰۱۲۶، [behbahni@ut.ac.ir](mailto:behbahni@ut.ac.ir)

## مقدمه

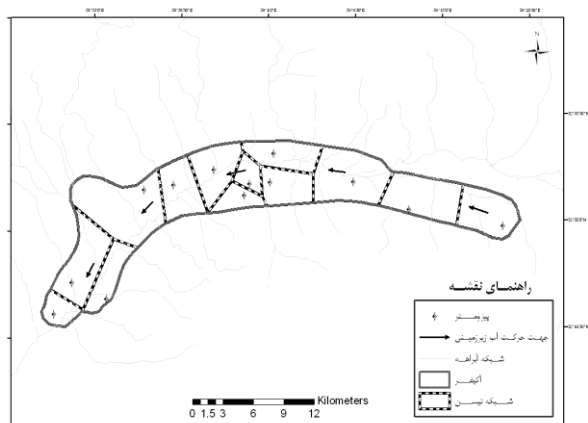
در سالیان اخیر افزایش نسبی درجه حرارت، کاهش میزان نزولات جوی و تغییر در توده و جبهه‌های هوایی سبب تغییر اقلیم گشته است. تغییر اقلیم از یک سو و افزایش بهره‌برداری در پی افزایش تقاضا از سوی دیگر سبب شده تا بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی بیش از پیش به عنوان منبع اصلی تامین‌کننده نیاز بشر مطرح و مورد توجه قرار گیرد. امروزه کنترل و مدیریت خشکسالی می‌تواند ابزاری مدیریتی و بهینه را در اختیار مدیران در جوامع بشری قرار دهد. کنترل این حادثه طبیعی که در سالیان اخیر در پی تغییر اقلیم‌ها بوجود آمده می‌تواند از شدت آسیب در سطح دشت‌ها کاهش دهد. با توجه به اینکه استفاده از مدل ریاضی از سال ۸۰۰ میلادی شروع شده است به دنبال گسترش کامپیوترهای پیشرفته در دهه ۱۹۶۰ استفاده از مدل‌های ریاضی با راه حل عددی به یکی از روش‌های مطلوب در مطالعه آب زیرزمینی تبدیل شده است. حل عددی مسائل مربوط به حرکت سیالات در محیط متخلخل برای اولین بار، قبل از سال ۱۹۵۰، در صنعت نفت بکار گرفته شد. بعد از سال ۱۹۷۲ مدل‌های ترکیبی تهیه شد که محیط‌های اشباع و غیر اشباع را بطور همزمان شبیه‌سازی می‌کردند. Wang et al., 1988 کتابی را برای زمین‌شناسان نوشتند که در آن مقدمه‌ای بر روش‌های عددی تفاضل محدود و عناصر محدود همراه با برنامه‌های کامپیوتری به زبان فرترن برای حل معادلات جریان در محیط‌های متخلخل آمده است. روش‌های متعددی جهت مطالعه و پهنه‌بندی تغییرات کیفی آب‌های زیر زمینی وجود دارد که هر یک از آنها با توجه شرایط منطقه و وجود آمار و داده‌های کافی دارای دقت‌هایی متفاوتی است. Chang, 2008 به بررسی روند کیفی برخی رودخانه‌های کره پرداخت و با استفاده از GIS تحلیل روند زمانی پارامترهای کیفی منطقه را انجام داد. همچنین روابطی بین کاربری اراضی و پارامترهای کیفی منطقه ارائه داد. Yetik et al., 2009 اقدام به واسنجی مدل کیفی آب

در محیط GIS و مدلسازی کیفی آب کردند. Yang et al., 2010 با استفاده از تکنیک‌های GIS اقدام به پیش‌بینی کیفی شبکه رودخانه یووا در آمریکا کرده و در نهایت روابطی رگرسیونی برای پیش‌بینی ارائه دادند. در این مطالعه اعلام داشتند که رگرسیون مکانی دقت بیش‌تری نسبت به روش‌های سنتی حداقل مربعات دارند. کرمی در سال ۱۳۸۸ با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره اقدام به برآورد تغییرات شوری در سطح منطقه سراب کرد و نتایج کار ایشان حاکی از شورزار شدن وسط دشت به دلیل تجمع نمک می‌باشد. اعتباری و همکاران در سال ۱۳۸۸ تهیه مدل مفهومی را باعث سهولت کنترل داده‌های ژئوفیزیکی با استفاده از داده‌های لوگ‌چاه‌ها اعلام داشتند، یعنی گسترش لایه‌های محبوس‌کننده (اکیتارد) و سنگ کف منطقه ممکن است با نتایج ژئوفیزیکی مقداری خطا نشان دهد که می‌توان ابتدا گسترش لایه‌ها را به کمک داده‌های ژئوفیزیکی ترسیم و سپس با داده‌های حفاری آنرا تصحیح نمود. همچنین اعلام داشتند که تهیه یک مدل مفهومی خوب تنها راه رسیدن به نتایج بهتر در مدل‌سازی باشد. هر چه مدل مفهومی بهتر تهیه شده باشد تهیه مدل عددی ساده‌تر خواهد بود. زمزم و همکاران در سال ۱۳۹۱ به بررسی وضعیت کیفی آبخوان رفسنجان که در معرض برداشت شدید آب زیرزمینی در بخش کشاورزی است پرداخته و با استفاده از سناریوهای مختلف برداشت آب اثرات سوء برداشت را بررسی کردند. بانژاد و همکاران در سال ۱۳۹۲ به شبیه‌سازی عددی انتقال آلودگی در سطح آبخوان نهاوند با استفاده از مدل MODPATH پرداخته و نتایج آن‌ها حاکی از انتقال آلودگی در جهت شیب از طرف جنوب شرقی به شمال غربی بوده و نتایج شبیه‌سازی حاکی از انتقال توده‌ای آلودگی می‌باشد. در این مطالعه به بررسی وضعیت آبخوان بیرجند با بیش از ۳۰۰ حلقه چاه عمیق پرداخته و اثرات سوء برداشت را مطالعه و ارزیابی می‌نماییم. برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی جهت رسیدن به بالاترین سود در امر کشاورزی سبب شده است تا علاوه بر شور شدن آب‌های زیرزمینی

## مواد و روش‌ها

## منطقه مورد مطالعه

حوزه آبریز بیرجند از حوزه آبریز کویر لوت بین طول جغرافیایی  $43^{\circ} 58'$  تا  $45^{\circ} 59'$  و عرض جغرافیایی  $34^{\circ} 34'$  تا  $33^{\circ} 08'$  با وسعت  $3455$  کیلومتر مربع، که  $1045$  کیلومتر دشت و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. طبق طبقه‌بندی‌های اقلیمی جزء مناطق خشک با میانگین بارش دراز مدت  $156.7$  میلی‌متر در سال می‌باشد. شکل (۱)



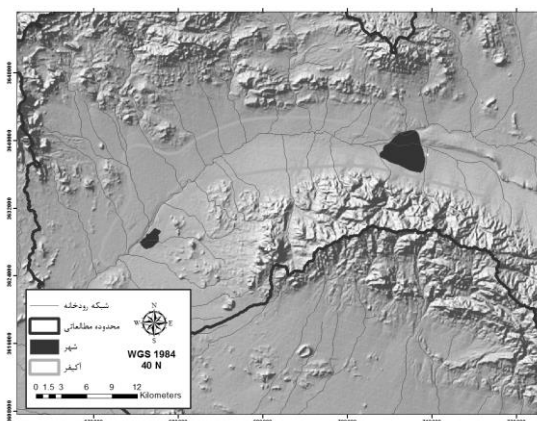
شکل (۲): موقعیت پیزومترها، شبکه آبراهه و جهت جریان

بودن محیط و اشباع بودن محیط در نظر گرفته می‌شود. با توجه به قانون دارسی و با در نظر گرفتن موازنه جرمی<sup>۳</sup> بر روی یک حجم کنترل نهایتاً معادله (۳) حاصل می‌شود. این معادله، یک معادله سه بعدی انتقال جرم برای یک مادهٔ محلول پایدار<sup>۴</sup> می‌باشد. به منظور تهیه یک مدل مفهومی و شبیه‌سازی پارامترهای کیفی در آبخوان بیرجند با استفاده از مدل ناماندگار در مدل کمی، داده‌های کیفی مورد نیاز در مدل MT3D و پارامترهای ورودی جهت آنالیز و شبیه‌سازی را تهیه می‌کنیم.

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

3 - Mass balance  
4 - Conservative solute

سبب افت محسوس در سفره‌های زیرزمینی شود. این کاهش عملکرد با کم شدن بازده محصولات زراعی و باغی، شور و سدیمی شدن اراضی و ... توانسته مدیریت را در این آبخوان علاوه بر کاهش کمی، از حیث کیفی نیز به چالش برساند.



شکل (۱): موقعیت آبخوان بیرجند در محدوده مطالعاتی

## معادله حرکت و انتقال آلودگی در آب زیرزمینی

معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی معادله لاپلاس می‌باشد که با توجه به شرایط جریان در دو حالت ماندگار و ناماندگار ارائه شده است. در حالت ناماندگار در یک محیط ایزوتروپ و هنگامی که سیستم مختصات در طول جهت اصلی ناهمسانگردی جهت گیری نموده است برای شرایط محبوس معادله (۱) و در شرایط نامحبوس معادله (۲) برقرار است (شمسایی، ۱۳۸۳) در حالت ماندگار طرف راست معادلات بالا برابر صفر خواهد بود. جهت مدل‌سازی آبخوان در حالت کیفی بدست آوردن معادله حاکم بر انتقال آلودگی تحت مکانیزم‌های پخشیدگی<sup>۱</sup> و همرفت<sup>۲</sup> و فرضیات همگن بودن محیط، ایزوتروپ

1 - Dispersion  
2 - Advection

$$(۲) \quad \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_y}{bK} \frac{\partial h}{\partial t}$$

$K_i$ : هدایت هیدرولیکی در جهت  $i$ ؛  $S_s$ : ضریب ذخیره،

$S_y$ : آبدهی ویژه،  $b$ : ضخامت آبخوان و  $\frac{\partial^2 h}{\partial t^2}$ : تغییرات

سطح آب در جهت  $i$  ام.  $\frac{\partial h}{\partial t}$ : تغییرات سطح در واحد

زمان.

### بررسی بیلان آب و کسری مخزن

ایجاد رابطه بین ورودی ها و خروجی ها مستلزم محاسبه میزان نفوذ و تبخیر و رواناب ناشی از بارندگی در دشت و ارتفاعات به تفکیک و بقیه عوامل بیلان است. بدین منظور بررسی بیلان آب زیرزمینی در محدوده انجام و مشخص گردید که این آبخوان با کسری مخزن مواجه است. این کسری مخزن (۱/۱۰) میلیون مترمکعب در سال-شرکت مدیریت منابع آب (۱۳۹۰) و سیر سریع افت به طور متوسط سالانه ۰/۵۹ متر آن را در زمره دشت‌های فوق بحرانی قرار داده است. جدول ۱ خلاصه ای از بیلان آب زیرزمینی براساس نتایج بدست آمده از گزارش ممنوعیت آبخوان بیرجند در سال ۱۳۹۰ را نشان می‌دهد.

### مدل سازی آبخوان بیرجند

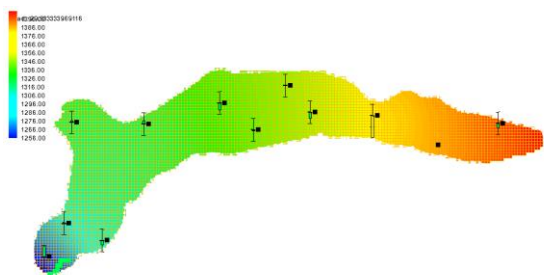
بطور کلی هدف از مدل سازی بررسی گزینه‌های چگونگی به تعادل رساندن بیلان، پیش بینی وضعیت آبی آبخوان تحت شرایط مختلف هیدرولوژیکی و گزینه‌های مختلف، بررسی صحت و سقم داده‌های مدل مفهومی و دنباله روی از روش‌های استاندارد مدل سازی ریاضی توام با ارائه کالیبراسیون. مکانیسم‌ها و شرایط مختلف موثر بر سفره های آب زیرزمینی، تغییراتی در حجم و کیفیت و سطح آب ذخایر مذکور بوجود می‌آورد که جهت برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح و توسعه کامل، می‌بایست تحت کنترل دقیق و پیش بینی‌های به موقع قرار گیرد. یکی از ارکان مهم در مدل سازی، تهیه مدل مفهومی می‌باشد که در واقع پایه و اساس مدل ریاضی می‌باشد. مدل مفهومی در

واقع ارائه‌کننده یک تفسیر کاملی از شرایط واقعی محدوده مدل سازی می‌باشد. در مدل مفهومی باید منابع تغذیه و تخلیه آبخوان، مرز محدوده مدل سازی، زون‌های تغذیه و تبخیر و تعرق و همچنین ساختار فیزیکی آبخوان تشریح کردند، در واقع کلیه عوامل تاثیرگذار و موثر بر آبخوان باید در نظر گیرند. به منظور مدیریت بهینه به لحاظ کمی از دو حالت جریان ماندگار و ناماندگار در آبخوان را طراحی و با شبکه ۲۵۰ \* ۲۵۰ مترمربع (۴۵۲۵ سلول شبکه) براساس بیلان آب زیرزمینی وارد مدل ۷7 GMS گردید. مدل سازی کمی و کیفی آبخوان براساس ساختارهای اصلی مدل که لایه های توپوگرافی (با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰)، لایه درون‌یابی شده به روش کریجینگ سطح ایستابی، لایه سنگ بستر (بر اساس آخرین مطالعات ژئوفیزیک)، قابلیت انتقال و هدایت هیدرولیکی (براساس آزمایش پمپاژ)، منابع آب زیرزمینی (تخلیه از آبخوان)، ضریب ذخیره آبخوان .... می‌باشد را با در نظر گرفتن وضعیت موجود آبخوان به مدل معرفی کردیم. شرایط مرزی آبخوان بصورت مرز با بار مشخص در مناطق شرق، شمال و جنوب آبخوان تعریف و وارد مدل شد. پس از ورود داده‌های به مدل بررسی صحت و سقم داده ها انجام می‌شود. در طی وارد کردن داده‌ها احتمال خطای شخص وجود داشت، نهایتاً برای تمامی داده‌های ورودی کنترل داده ها و اصلاح انجام گردید. پس از ورود کلیه پارامترها اقدام به اجرای مدل سازی در حالت ماندگار و ناماندگار با در نظر گرفتن یک دوره ۱۰ ساله شد. در طی مرحله ماندگار ضریب هدایت هیدرولیکی و در مرحله ناماندگار ضریب ذخیره ویژه پس از تحلیل حساسیت، واسنجی مدل انجام و پیش بینی برای یک دوره ۵ ساله انجام پذیرفت. شکل ۳ مدل ماندگار و شکل ۴ مدل ناماندگار را در آبخوان بیرجند و اشکال ۵ و ۶ آنالیز خطای نهایی بین سطح ایستابی پیش‌بینی شده و مشاهداتی را نشان می‌دهد. معادله ۳ رابطه کلی انتقال آلودگی در آبخوان را نشان می‌دهد که اساس مدل کیفی آب زیرزمینی است.

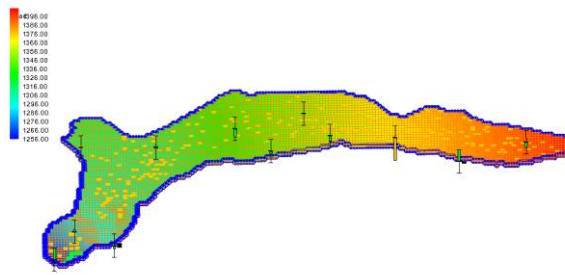
$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \right] - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (V_m \cdot V) + \frac{\partial}{\partial y} (V_y \cdot C) + \frac{\partial}{\partial z} (V_z \cdot C) \right] = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (3)$$

جدول (۱): خلاصه بیلان آب زیرزمینی محدوده آبخوان بیرجند

تغییرات	تخلیه (MCM)				تغذیه (MCM)				
	جمع	خروجی از آب زیرزمینی	تبخیر از آب زیرزمینی	برداشت از چاه، چشمه و قنات	جمع	برگشتی از آب شرب و صنعت	برگشتی کشاورزی	جریان سطحی	نفوذ از یافته های کوهستانی
حجم مخزن (MCM)	۱۰۷	۳	۰	۱۰۴	۹۶/۹۳	۱۴/۸۸	۱۷/۰۸	۱۲/۲	۵۲/۷۷



شکل (۴): مدل ناماندار کمی



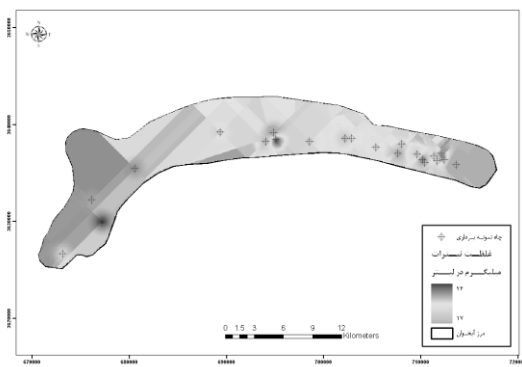
شکل (۳): مدل ماندگار کمی

جدول (۲): خطای مدل در حالت ماندگار و غیرماندگار

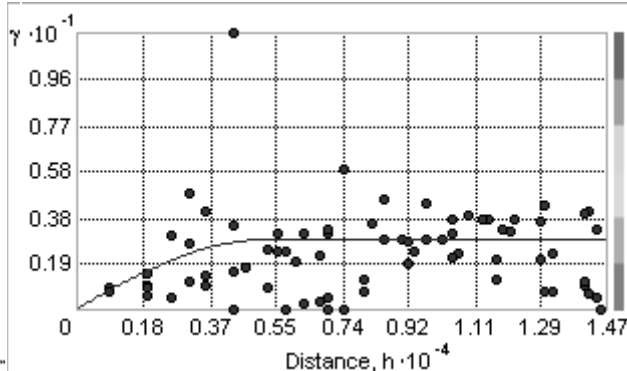
مدل غیرماندگار	مدل ماندگار	پارامتر
0.207	-0.143	میانگین خطا
0.699	0.527	میانگین مطلق خطا
0.852	0.751	مجذور میانگین خطا

اولین گام زمانی و نتایج اولیه پهنه‌بندی در شکل ۶ ارائه شده است.

به منظور ورود اطلاعات کیفی در محدوده آبخوان و با توجه به کمبود داده های کیفی در چاههای منطقه، با استفاده از روش درون‌یابی اقدام به پهنه‌بندی کیفی شاخص نیترات کردیم. لذا واریوگرام منتخب (فضایی) و با استفاده از برنامه زمین‌آمار در نرم افزار Arc GIS پهنه‌بندی شاخص نیترات به عنوان ورودی مدل برازش داده شد. استفاده از روش‌های کریجینگ به عنوان یکی از ابزارهای نوین در درون‌یابی می‌باشد که در این طرح با توجه به واریوگرام انتخابی (شکل ۵) روش کریجینگ ساده استفاده شد. موقعیت چاههای نمونه‌برداری شده در



شکل (۶): نقشه پهنه‌بندی شده پارامتر نیترا



شکل (۵): واریوگرام برازش داده شده برای پارامتر نیترا

مدلسازی و واسنجی مدل به این دو پارامتر انجام و پس از صحت‌سنجی ۳ سال پیش‌بینی انجام گرفت. جدول (۳) نحوه ورود داده‌ها و حالت‌های تعریف شده‌ی مدل را بیان می‌نماید.

بعد از اجرای مدل مفهومی داده‌های نیترا چاه‌های منتخب در آبخوان وارد مدل MT3D با دوره زمانی ۱۰ ساله (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰) شده و پس از تعیین ضرایب انتشار و نسبت پخشودگی طولی به عرضی

جدول (۳): چگونگی تهیه داده‌های لازم برای مدل کیفی

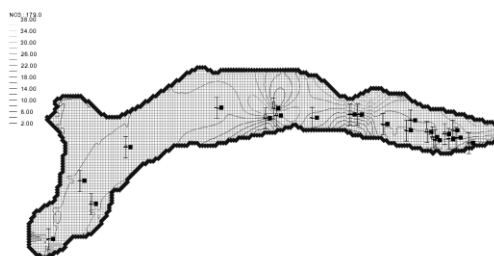
مدل کیفی مفهومی	روش انتقال به مدل کیفی ریاضی
لایه نیترا	میان‌یابی لایه در محیط GIS، با استفاده از ماژول GIS نرم افزار GMS لایه مزبور فراخوانی شده و تبدیل به لایه اسکاتر نقطه ای شده و بعد از آن میان‌یابی مجدد و تبدیل آن به grid و فراخوانی آن در MT3D
همرفت	استفاده از یکی از روش‌های MOC، HMOC، MMOC و ULTIMATE
پخشیدگی	تعریف ضرایب انتشار و نسبت پخشودگی طولی به عرضی استفاده از جداول کتاب Spitz & Moreno استفاده گردید.
بررسی صحت و سقم داده‌های آماده شده	چون در طی وارد کردن داده‌ها احتمال خطای شخص وجود داشت، نهایتاً برای تمامی داده‌ها منحنی‌های مربوطه به کمک ترسیم‌کننده نرم افزار GMS کنترل و داده‌های غلط اصلاح گردید.

بصورت شکل ۷ و خطای مدل به میزان ۹٫۵ میلی‌گرم در لیتر مطابق جدول ۴ نشان داده شده است.

اجرای مدل کیفی با استفاده از ماژول MT3D انجام و نتایج نهایی کیفی نیترا در آبخوان بیرجند

جدول (۴): خطای مدل کیفی MT3D در شبیه‌سازی

پارامتر	مدل MT3D
میانگین خطا	-2.746
میانگین مطلق خطا	4.58
مجذور میانگین خطا	9.49



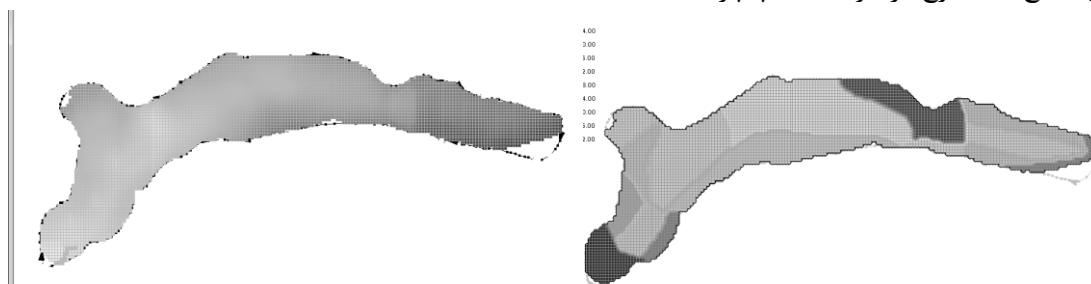
شکل (۷): مدل کیفی آب زیرزمینی با کمک MT3D

انجام و در نهایت مقدار این دو پارامتر حساس و اسنجی گردید. با توجه به اینکه یکی از مهمترین اهداف یک طرح مدلسازی پیش بینی شرایط آینده در وضعیت کمی و کیفی آبخوان است، لذا صحت سنجی مدل برای ارتباط بین داده های مشاهده ای و ارزیابی شده مدل حائز اهمیت است. طول زمان تطابق جهت صحت سنجی بستگی به دو عامل نوع آبخوان و رفتارهای زمانی آبخوان دارد. دوره ی زمانی انتخابی ۱۰ سال آبی از مهر ۸۰ تا شهریور ۹۰ معادل ۲۰ دوره تنش ۶ ماهه انتخاب گردید. علت انتخاب دوره های تنش ۶ ماهه، کمیت و کیفیت آماربرداری از سطح آبخوان و نیز تغییر روند تاثیر عوامل موثر برداشت در اوایل بهار و اوایل پاییز می باشد. اشکال ۱۰ و ۱۱ مراحل صحت سنجی را در پنج و ده سال نشان می دهند. نتایج صحت سنجی حاکی از رابطه همبستگی بالا بین سطح آب مشاهده شده و سطح آب محاسباتی مدل می باشد.

## نتایج و بحث

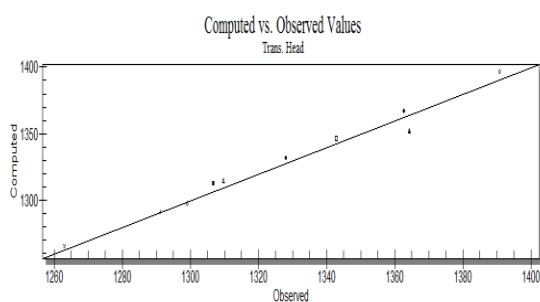
### تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت سنجی مدل کمی

دو مرحله تحلیل حساسیت و واسنجی دو مرحله متوالی در مدلسازی آب زیرزمینی در دو حالت ماندگار و ناماندگار می باشد. به منظور تحلیل حساسیت با اعمال تغییرات سیستماتیک در پارامترهای هدایت هیدرولیکی، تغذیه سطحی، شرایط مرزی، میزان برداشت آب زیرزمینی توسط چاه ها، تراز سنگ کف و اجرای مکرر مدل، حساسیت آن نسبت به هر یک از تغییرات مورد ارزیابی قرار گرفته است. پس از تحلیل حساسیت مدل کمی در حالت ماندگار نسبت به پارامتر هدایت هیدرولیکی (شکل ۸) و در حالت ناماندگار نسبت به پارامتر ضریب ذخیره ویژه (شکل ۹) حساسیت نشان داد. با استفاده از روش سعی و خطا و استفاده از روش خودکار PEST واسنجی مدل براساس نتایج مستخرج از آزمایشات پمپاژ منطقه

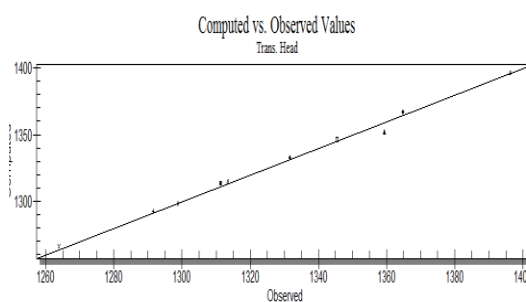


شکل (۹): واسنجی ضریب ذخیره ویژه در حالت ناماندگار

شکل (۸): واسنجی هدایت هیدرولیکی در حالت ماندگار



شکل (۱۱): صحت سنجی مدل کمی بعد از ده سال



شکل (۱۰): صحت سنجی مدل کمی بعد از پنج سال

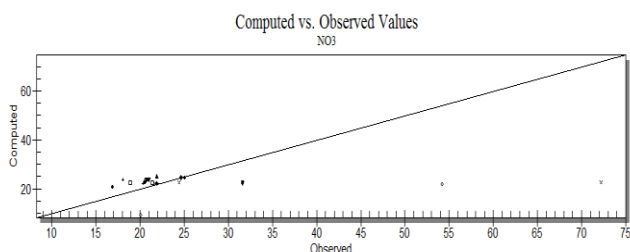
### تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت سنجی پارامترهای مدل **GMS** در مدل کیفی

در مدل کیفی آب زیرزمینی تغییرات در پارامترهای ورودی همرفت در شبیه سازی بسیار نامشهود می باشد و میزان خطا تنها تغییرات ۰/۲ میلی گرم را در مدل نشان داد. اما تغییرات ضریب پخشیدگی بگونه ای بوده است که میزان خطای اجرای مدل را در مرحله واسنجی به میزان ۹- میلی گرم در لیتر رساند که میزان قابل قبولی در آبخوان

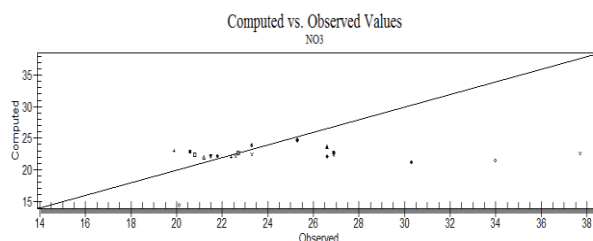
بیرجند می باشد. پارامترهای نهایی واسنجی شده در مدل **MT3D** بصورت جدول (۵) ارائه شده است. نتایج صحت سنجی مدل نشان می دهد که همبستگی بالایی بین غلظت اندازه گیری شده و غلظت محاسباتی در ۵ سال اول وجود دارد و از سال پنجم به بعد همبستگی کاهش یافته اما در حد قابل قبول می باشد. شکل ۱۴ پهنه بندی نترات را در سطح آبخوان بیرجند با استفاده از مدل **MT3D** در نرم افزار **GMS** نشان می دهد.

جدول (۵): ضرایب در نظر گرفته در شده معادله ی پخشیدگی

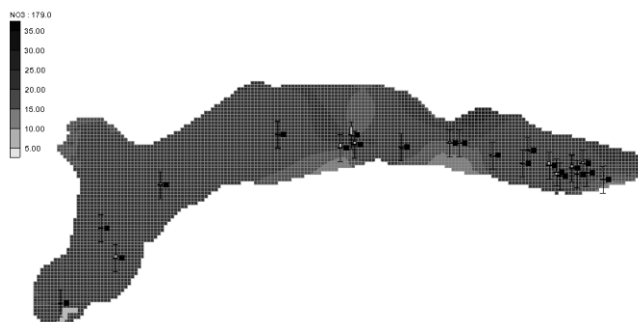
ردیف	نام پارامتر	میزان
۱	TRPT (نسبت پخش افقی به پخش طولی)	۰/۵
۲	TRPV (نسبت پخش عمودی به پخش طولی)	۰/۲
۳	DMCOEF (ضریب پخش مولکولی مؤثر)	۱ متر
۴	Longitudinal Dispersivity (پخشیدگی طولی)	۳۰



شکل (۱۳): صحت سنجی مدل کیفی بعد از ۱۰ سال



شکل (۱۲): صحت سنجی مدل کیفی بعد از ۵ سال



شکل (۱۴): مدل کیفی **MT3D** در آبخوان بیرجند در برآورد نترات



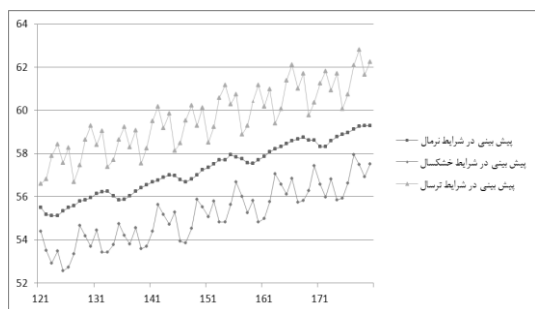
و پیش‌بینی سطح ایستابی در سه حالت (نرمال، خشکسال و ترسال) با استفاده از میانگین متحرک بارندگی برای متمایز کردن میزان تغذیه آبخوان، مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج حاصل از پیش‌بینی سطح ایستابی در چند پیژومتر آبخوان بیرجند مطابق اشکال (۱۵) تا (۱۷) ارائه شده است. همچنین وضعیت سطح آب زیرزمینی در شرایط نرمال هیدرولوژیکی نیز بعد از ۵ سال بصورت شکل (۱۸) ارائه شده است.

### بررسی عوامل حساس در مدل کمی و کیفی

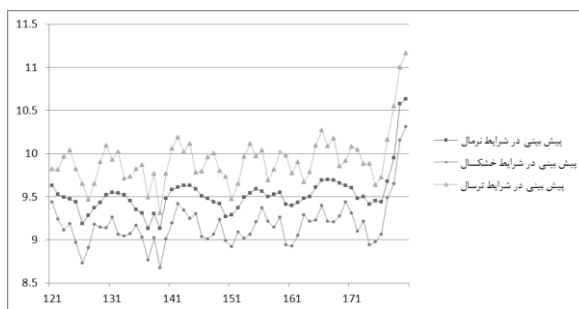
یکی از عوامل مهم در اجرای دقیق مدل، شناسایی عوامل حساس و واسنجی این عوامل جهت بدست آوردن نتایج بهینه می‌باشد. با توجه به اجرای مدل در دو حالت ماندگار و ناماندگار دو عامل هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره ویژه به عنوان عوامل حساس مشخص گردید. براساس این دو عامل مدل واسنجی گردید. نتایج نشان داد که با حرکت به سمت خروجی آبخوان، از میزان ضریب ذخیره کاسته می‌شود، که این نتایج با استفاده از جنس سازندهای زمین شناسی نیز قابل دسترسی می‌باشد. با توجه به اینکه مدل کمی پیش‌زمینه‌ای برای اجرای مدل کیفی می‌باشد و اجرای ناصحیح آن می‌تواند اثربخشی مدل کیفی را زیر سؤال ببرد. در اجرای مدل کیفی نقش پدیده ی پخشیدگی بسیار شدیدتر از پدیده ی همرفتی می‌باشد. تغییرات در پارامترهای ورودی همرفت در شبیه‌سازی بسیار نامشهود می‌باشد و میزان خطا تنها تغییرات ۹ میلی‌گرم را در برنامه نشان داد. اما تغییرات ضریب پخشیدگی بگونه ای بوده است که میزان خطای اجرای مدل را در مرحله واسنجی به میزان ۹ میلی‌گرم در لیتر رساند که میزان قابل قبولی در آبخوان بیرجند می‌باشد. البته مدل کیفی قابلیت تغییرپذیری بالایی همچون مدل کمی ندارد. تحلیل حساسیت و واسنجی مدل کیفی نشان داد که مدل کیفی حساسیت بسیار اندکی به ضرایب ورودی دارد و تغییرات این ضرایب بسیار اثر کمی در کاهش میزان خطای مدل دارد.

### پیش‌بینی

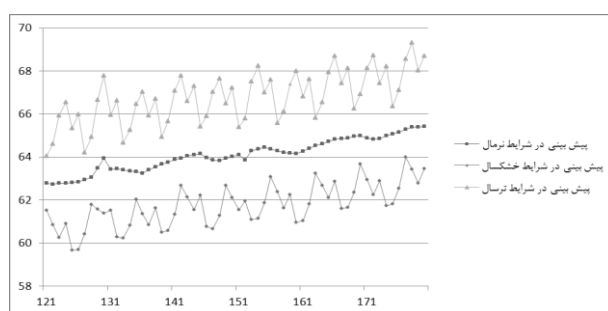
یکی از اهداف مهم در امر مدلسازی پیش‌بینی داده‌های چه به لحاظ کمی و چه به لحاظ کیفی می‌باشد. به منظور پیش‌بینی وضعیت کمی آبخوان بیرجند به مدت ۵ سال، کلیه پارامترهای ورودی به مدل کمی براساس آمار موجود شبیه‌سازی و وارد نرم‌افزار GMS 7 گردید. به منظور بررسی و عدم قطعیت موجود در بین داده‌های مختلف روند بررسی



شکل (۱۶): پیش بینی سطح ایستابی در تقاب (اواسط آبخوان)



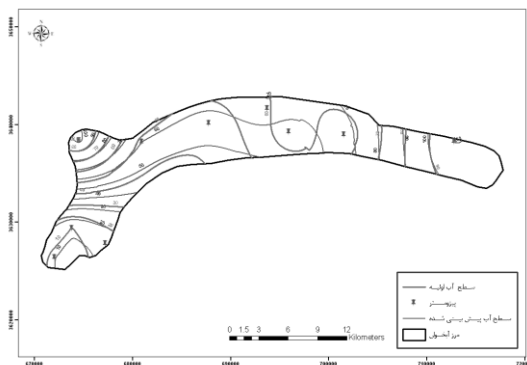
شکل (۱۵): پیش بینی سطح ایستابی در فدشک (خروجی آبخوان)



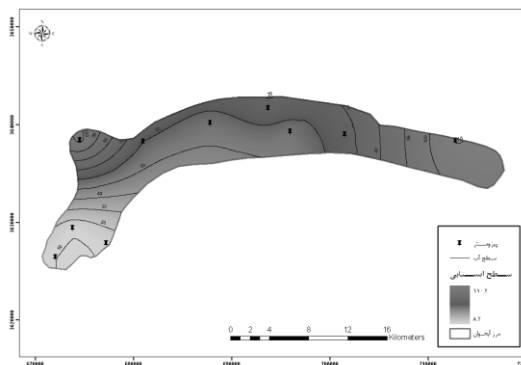
شکل (۱۷): پیش بینی سطح ایستابی در حاجی آباد (ابتداء آبخوان)

گذشت زمان و روند بهره برداری بطور متوسط در ۵ سال آینده ۱۰ متر نسبت به ابتداء مدل سازی در آبخوان افت خواهیم داشت. لذا این میزان افت سبب کاهش ذخیره استاتیک سفره آب زیرزمینی می شود. همچنین این میزان افت سبب بالارفتن غلظت عناصر آب می شود.

مطالعات و شبیه سازی های صورت پذیرفته در سطح آبخوان در مدل کمی نشان داد که با وضعیت موجود آبخوان بیرجند (شرایط نرمال) با توجه به افت سالانه ی ۵۵ سانتی متری این میزان افت به بیشتر از این مقدار نیز نزول نماید و آبخوان را از حالت بحرانی به حالت فوق بحرانی تبدیل نماید. نتایج پیش بینی در سطح آبخوان مطابق شکل (۱۸) نشان می دهد که با



شکل (۱۹): تغییرات سطح ایستابی در طی ۵ سال آتی



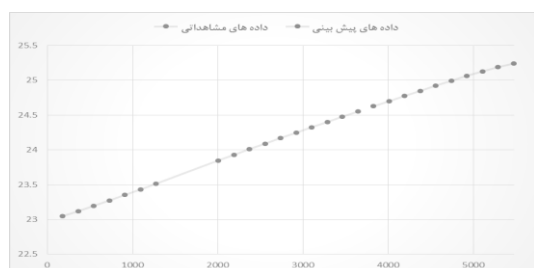
شکل (۱۸): پیش بینی ۵ ساله سطح ایستابی در شرایط نرمال

خانه، افزایش کودهای کشاورزی در سطح دشت، کاهش نزولات آسمانی، شهرک صنعتی و ... به عنوان گزینه های اصلی در این افزایش میزان نیترات شده است. اشکال (۲۰) تا (۲۳) میزان افزایش این آلاینده را در طی دوره ۱۰ ساله مدل سازی و ۵ سال پیش بینی مدل نشان می دهد.

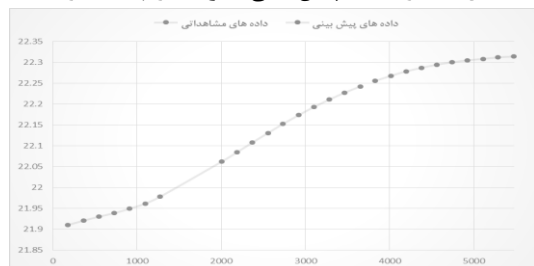
### بررسی روند تغییرات کیفی نیترات در آب

#### زیرزمینی

با توجه به افزایش فرآیندهای انسانی و بالتبع آن افزایش آلودگی های زیست محیطی لذا میزان نیترات که به عنوان یکی از شاخص های آلودگی آب زیرزمینی است افزایش می یابد. با بررسی های به عمل آمده افزایش جمعیت شهرنشینی، راه اندازی مراکز جمعیتی در اطراف دشت بدون احداث تصفیه



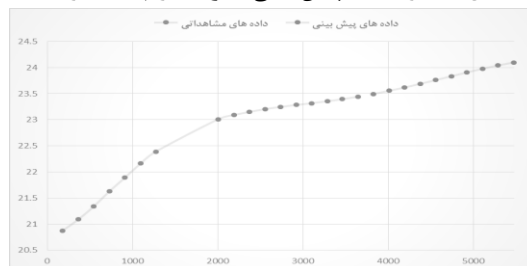
شکل (۲۱): وضعیت پیش بینی نیترات در چاه شماره ۳



شکل (۲۳): وضعیت پیش بینی نیترات در چاه شماره ۲۰



شکل (۲۰): وضعیت پیش بینی نیترات در چاه شماره یک

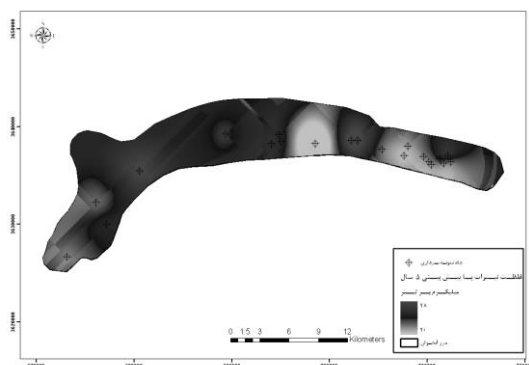


شکل (۲۲): وضعیت پیش بینی نیترات در چاه شماره ۱۳

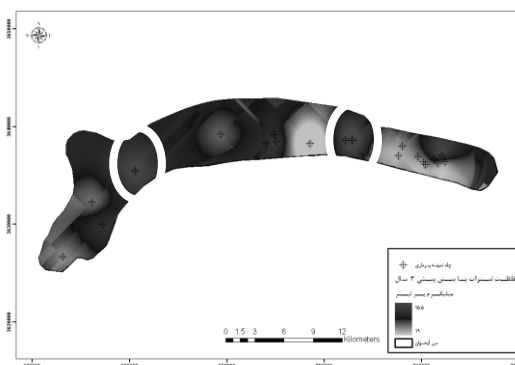
هستند که کمتر در معرض آلودگی هستند، افزایش ۲۰ میلی گرم در لیتر غلظت نیترات در تعدادی از چاه ها با توجه روند افزایش می تواند در آینده ای نه چندان دور باعث آلودگی سفره ی آب زیرزمینی شود. البته نتایج ارائه شده در چاه شماره ۷ دور از واقعیت می باشد و پیش بینی صحیحی در این مورد مدل MT3D نتوانسته اعمال نماید که وابستگی به مدل کمی را می توان یکی از دلایل عمده در ضعف پیش بینی نشان داد. روند تغییرات پارامتر نیترات در طی ۳ سال (سال ۱۳۹۳) و ۵ سال (سال ۱۳۹۵) پیش بینی بصورت اشکال (۲۴) و (۲۵) ارائه شده است. پیش بینی های صورت پذیرفته در محدوده ی آبخوان نشان داد که تغییرات مقدار نیترات تابعی از میزان

روند افزایش میزان نیترات در ۱۴ چاه از ۲۲ چاه مورد تحلیل حادث شده است لذا بررسی روی چاه هایی که تغییرات نیترات بصورت کاهشی است نشان داد عوامل زیر می تواند نقش مهمی در این تغییرات داشته باشد: روند کاهشی داده های ورودی به مدل، عدم کارایی مدل در پیش بینی میزان نیترات، کاهش میزان طبیعی نیترات بر اثر جذب سطحی نیترات در لایه های خاک. با شبیه سازی پارامتر نیترات در آبخوان بیرجند، نتایج ارائه شده حاکی از افزایش میزان ۲۰ میلی گرم بر لیتر در کل ۲۲ چاه انتخابی در طی ۵ سال می باشد. البته با توجه به کاهش میزان نیترات در برخی چاه ها که معمولا این چاه ها در ابتدای آبخوان و بعضی در طرفین آبخوان بگونه ای

زیرزمینی و انتقال کلیه مواد آلاینده به سمت خروجی آبخوان، این محدوده مقدار نیترات بالایی را نشان می‌دهد. بطورکلی نتایج نشان داد که غلظت نیترات در دو محدوده آبخوان بیرجند دارای غلظت بالایی می‌باشد که پایین دست شهر بیرجند و شهرک صنعتی و خروجی اراضی کشاورزی در نزدیکی انتهای دشت که روی شکل (۲۴) مناطق مشخص شده‌اند.



شکل (۲۵): پیش بینی ۵ ساله غلظت نیترات



شکل (۲۴): پیش بینی ۳ ساله غلظت نیترات

مجاور و همچنین پارامترهای خروجی شامل جریان زیرزمینی خروجی و زهکش و تخلیه از چاهها تعریف شد. با اجرای مدل کمی به این نتیجه رسیدیم که مدل به پارامتر هدایت هیدرولیکی در حالت ماندگار و ضریب ذخیره ویژه در حالت ناماندگار حساس می‌باشد که عدم قطعیت این پارامترها ناشی از وجود خطا در تخمین این پارامترها می‌باشد که اهم آن به علت عدم قطعیت در خود پارامترها و همچنین ناهمگن و ناهمسانگرد بودن آبخوان در سلول‌های تعریف شده می‌باشد. لذا واسنجی روی این پارامترها به صورت دستی انجام پذیرفت. پس از انجام واسنجی، صحت سنجی و در نهایت پیش بینی در آبخوان در طی ۵ سال صورت پذیرفت. نتایج حاکی از افت شدید سفره به میزان ۱۰ متر در سناریو خشکسالی، میزان ۵/۶ متر در حالت نرمال و افت ۳/۸ متری در ۵ سال برای سناریو ترسال در سطح آبخوان می‌باشد. در صورت عدم مدیریت صحیح در طی سالیان آبیاری و بارندگی، نفوذ از پساب، نفوذ از آب برگشتی آبیاری و جریان آب زیرزمینی ورودی و جریان از حوضه‌های

## نتیجه‌گیری

افزایش جمعیت، افزایش بهره برداری از چاه به منظور تامین آب شرب و کشاورزی و تغییرات سیاسی منطقه و با توجه به قرار داشتن در یک اقلیم خشک مدل‌سازی آب زیرزمینی برای دستیابی به نتایجی جهت مدیریت آبخوان و بررسی وضعیت آبی این آبخوان انجام شد. با توجه به موقعیت استراتژیک این آبخوان در شرق کشور و داشتن زمین‌های کشاورزی مستعد در سطح محدوده، نیاز به مدل‌سازی و پیش بینی وضعیت کمی و کیفی آبخوان بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این مطالعه برای رسیدن به این هدف اقدام به شبیه‌سازی سطح ایستابی در حالت کمی توسط نرم‌افزار GMS V.7 شد. با توجه به وضعیت بیان آب زیرزمینی برآوردی در کل محدوده آبخوان، پارامترهای ورودی و خروجی به آبخوان تعریف و وارد نرم‌افزار شد. پارامترهای ورودی شامل بارندگی، نفوذ از پساب، نفوذ از آب برگشتی آبیاری و جریان آب زیرزمینی ورودی و جریان از حوضه‌های

آبی آبخوان بیرجند از حیث کیفی، تنها می‌توان به ورود پساب و آب برگشتی کشاورزی اشاره داشت که وضعیت کیفی آبخوان را با توجه به برداشتهای آب تحت تاثیر قرار می‌دهد. نتایج حاکی از این طرح هم‌خوانی زیادی با مطالعات صورت گرفته در سطح مناطق مختلف داشته که از آن جمله می‌توان به نتایج زمزم و همکاران ۱۳۹۱ و بانژاد و همکاران در سال ۱۳۹۲ اشاره داشت که رابطه مستقیمی بین غلظت عناصر با افت سطح ایستابی دارد.

کیفی MT3D پیش بینی های ۵ ساله نشان داد که میزان افزایش غلظت نیترات رابطه‌ی مستقیمی با افت سطح ایستابی دارد. در مدل کیفی نیز پس از واسنجی ضریب پخشیدگی مولکولی ۱، نسبت پخش افقی به طول پخش ۰/۵، نسبت پخش عمودی به طول پخش ۰/۲ و پخشیدگی طولی ۳۰ بدست آمد. عوامل موثر در پخشیدگی اگرچه به عنوان تنها فاکتورها در واسنجی استفاده گردید اما تغییرات کیفی آن چنانی در محدوده‌ی آبخوان ثبت نگردید. پیش بینی وضعیت

### منابع:

- اعتباری، ب. م. یعقوب زاده. ۱۳۸۸. اهمیت تهیه مدل‌های مفهومی در تهیه مدل ریاضی آبخوان‌ها (مطالعه موردی دشت تبریز) پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- بانژاد، ح. ح. محب زاده، م. ح. قبادی، م. حیدری. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال آلودگی در آب‌های زیرزمینی مطالعه موردی: آبخوان دشت نهاوند. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۲، صفحه‌های ۵ تا ۴۳.
- چیت‌سازان، م. ح. کشکولی. ۱۳۸۱. مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی و حل مسائل هیدروژئولوژی. انتشارات دانشگاه شهید چمران. ۶۸۰ ص.
- زمزم، ع. و م. ب. رهنما. ۱۳۹۱. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با مدل MT3DMS (مطالعه موردی: دشت رفسنجان). مجله پژوهش آب ایران، سال ششم، شماره ۱۰.
- شمسایی، ا. ۱۳۸۳. هیدرولیک جریان آب در محیط‌های متخلخل. جلد سوم کاربرد مدل‌های ریاضی- کامپیوتری. دانشگاه صنعتی امیر کبیر. ۳۹۲ ص.
- وزارت نیرو. ۱۳۹۰. گزارش ممنوعیت دشت بیرجند. شرکت مدیریت منابع آب.
- کرمی شاهملکی، ن. س. م. بهبهانی، ع. مساح بوانی، ک. خدایی. ۱۳۹۱. مقایسه روشهای Logistic Regression، دراستیک اصلاح شده و DRASTIC- AHP در بررسی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی. محیط‌شناسی سال ۳۸. شماره ۴. ص ۷۹-۹۲.
- Anderson, M. P. and W. W. Woessner. 1992. Applied groundwater modeling, simulation of flow and advective transport. Academic Press, p381.
- Chang, H. 2008. Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin, South Korea. Water Resources, 42: 3285-3304.
- Todd, D. K. 1980, Groundwater Hydrology. 2nd edition, John Wiley, New York, 535 p.
- Wang, H. F., and P. Anderson. 1988. Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods. Academic Press, San Diego. 237p.
- Yang, X., and W. Jin. 2010. GIS-based spatial regression and prediction of water quality in river networks: A case study in Iowa. J. Environ. Manage. 91: 1934-1951.
- Yetik, M. K., M. Yüceer, R. Berber and E. Karadurmus. 2009. River water quality model verification through a GIS based software. P 1-6, ADCHEM 2009, IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, July 12-15, Istanbul-Turkey.

## Simulation and prediction nitrate in ground water (Case study: south khorasan-Birjand aquifer)

Zahra Rahimzadeh Kivi<sup>1</sup>, Hamid kardan moghaddam<sup>2</sup>, Seyd mahmood reza behbahani<sup>3</sup>

### Abstract:

Groundwater is one of the main sources of drinking water supply, agriculture, and ... in Birjand region , So the management of underground water table is very important. GMS software is one of the most prestigious models based on groundwater modeling that considered with steady and unsteady flow. This model is able to simulate and predict the future status of an aquifer with defined scenarios. The purpose of building a conceptual model is to simplify the field problem and organize the associated field data so that the system can be analyzed more readily. For Steady state September .month was selected that have less oscillation in water table, and for unsteady state October 80 to August 91 during 20 time steps were selected. After running the model, calibration and sensitivity analysis according to the underground water balance perform, and show that model is sensitive toward hydraulic conductivity and in unsteady state is sensitive toward specific yield. Based on balance equation the aquifer will have 10 meters shortage in water table in aquifer in 5 years prediction. In this model for predict quality in birjand plain used MT3D modules. In the model due to lack of quality parameters, in MT3D only Nitrate (No3) was investigated and the results indicate the correlation between water table and increasing in nitrate. During 5 years increase nitrate in lowering of birjand city and agriculture land.

**KeyWords:** Management Aquifer, MT3D Model, Nitrate, prediction, Simulation.

---

<sup>1</sup> MSc student, Dept. of Water Engineering, Birjand University

<sup>2</sup> - MSc water resource, Ph.D. Student, Dept. of Water Engineering, Tehran University, Tehran, Iran  
([hkardan@ut.ac.ir](mailto:hkardan@ut.ac.ir)) 09155611912

<sup>3</sup> - Professor, Department of Water Engineering, Tehran University of agriculture, Tehran, Iran.([behbahni@ut.ac.ir](mailto:behbahni@ut.ac.ir))-  
09121050126