

مطالعه تأثیر ناحیه غیراشباع در مدل‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از بسته UZF در نرم‌افزار MODFLOW-NWT (مطالعه موردی: دشت نیشابور)

فرزانه نظریه¹، حسین انصاری^{2*}، علی نقی ضیائی³، کامران داوری⁴، عزیزاله ایزدی⁵

تاریخ دریافت: 1395/3/22 تاریخ پذیرش: 1395/9/3

چکیده

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر مدل‌سازی ناحیه غیراشباع بر تغذیه آبخوان و مقایسه آن با حالت مرسوم مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی صورت پذیرفته است. بدین منظور، دشت نیشابور به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردید. شبیه‌سازی ناحیه اشباع، توسط مدل آب زیرزمینی MODFLOW-NWT انجام گرفت. برای شبیه‌سازی ناحیه غیراشباع از بسته UZF و از بسته RCH برای انتقال مستقیم تغذیه به ناحیه اشباع استفاده گردید. جهت لحاظ نمودن تغذیه برای مدل‌های آب زیرزمینی از خروجی نرم‌افزار SWAT استفاده شد. واسنجی خودکار مدل‌ها توسط نرم‌افزار PEST و به کمک اطلاعات ماهانه دوره آماری 1379 تا 1389 انجام گرفت. سپس صحت‌سنجی مدل‌ها برای دوره آماری 1389 تا 1391 صورت پذیرفت. مقدار RMSE برای روش مرسوم (RCH) و روش لحاظ نمودن ناحیه غیراشباع (UZF) در مرحله واسنجی برابر به ترتیب 1/45 و 1/52 متر و در مرحله صحت‌سنجی، برابر 1/80 و 1/62 متر بدست آمد. نتایج UZF حاکی از آن است که رسیدن تغذیه به آبخوان در مکان‌های مختلف دارای تأخیرهای زمانی 1 تا 60 ماه می‌باشد که هم‌خوانی مطلوبی با اطلاعات میدانی دارد. نتایج تحلیل حساسیت دو مدل نشان داد که مدل UZF به تغییر در پارامترهای ورودی حساس‌تر می‌باشد همچنین یافته‌های تحقیق حاکی از آن بود که در نظر گرفتن ناحیه غیراشباع در مدل‌سازی آب زیرزمینی، علاوه بر افزودن به مقدار RMSE مدل، امکان محاسبه زمان تأخیر و بخشی از نفوذ که در ناحیه غیراشباع ذخیره شده است را فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: بسته UZF، بسته RCH، تغذیه، ناحیه غیراشباع، MODFLOW-NWT

مقدمه

گذشته از روشی که برای محاسبه تغذیه مورد استفاده قرار می‌گیرد، در اغلب این روش‌ها فرض می‌شود که آب مستقیماً پس از خروج از ناحیه ریشه به ناحیه اشباع وارد می‌شود (Batelaan and De Smedt., 2007; Dripps and Bradbury., 2007). این فرض برای مناطق با سطح ایستابی کم عمق و یا هنگامی که مدل‌سازی آب زیرزمینی برای طولانی مدت (در حد دهه و سده) انجام می‌گیرد قابل پذیرش باشد. اما در نظر نگرفتن ناحیه غیراشباع در مناطق خشک که در آن ضخامت لایه غیراشباع به دهه‌ها و یا حتی صدها متر می‌رسد قابل قبول نمی‌باشد، چرا که در چنین مناطقی تغذیه رسیده به ناحیه غیراشباع می‌تواند متعلق به ماه‌ها یا حتی فصول گذشته با رژیم آب و هوایی متفاوت باشد (Healy., 2010).

جهت شبیه‌سازی جریان در ناحیه غیراشباع می‌توان به روش‌هایی که معادله ریچاردز را در کل ناحیه غیراشباع و اشباع به‌طور سه‌بعدی مدل می‌کنند اشاره نمود (Panday and Huyakorn., 2004; Jones et al., 2008). این روش‌ها نیازمند محاسبات عددی سنگین و زمان اجرای طولانی هستند، که کاربرد این روش‌ها را در مناطق

به منظور تأمین پایداری برداشت از یک آبخوان ضروری است که مولفه‌های بیلان بخصوص میزان تغذیه بر پایه اصول هیدرولوژی مشخص شوند. برای محاسبه تغذیه روش‌های متعددی وجود دارد (Scanlon et al., 2002)، از روش‌های ابتدایی مانند روش نوسان سطح ایستابی (Healy and Cook., 2002) تا روش‌های پیچیده مانند مدل‌های ترکیبی اتمسفری بیوسفری (Tian et al., 2012) یا مدل‌های کوپل شده آب سطحی و زیرزمینی (Smits and Hemker., 2004; Kim et al., 2008).

- 1- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - 2- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - 3- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - 4- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - 5- محقق پسادکتری، مرکز تحقیقات آب دانشگاه سلطان قابوس، مسقط، عمان
- * - نویسنده مسئول: (Email: Ansary@um.ac.ir)

عوارض طبیعی موجود در منطقه بوده است و متوسط تغذیه سالانه 390 میلیون مترمکعب می‌باشد (Izady et al., 2015).

مدل نمودن کلیه مولفه‌های چرخه هیدرولوژی در راستای برنامه‌ریزی برداشت پایدار از منابع آب زیرزمینی حایز اهمیت بالایی می‌باشد. تحت این شرایط مدنظر قرار دادن حرکت جریان آب از سطح تا ناحیه اشباع می‌تواند یک گام رو به جلو در راستای شبیه‌سازی هر چه دقیق‌تر آب زیرزمینی تلقی گردد. در این تحقیق جهت بررسی تأثیر ناحیه غیراشباع از بسته UZF در نرم‌افزار MODFLOW_NWT استفاده گردید. جهت ارزیابی خروجی‌ها، نتایج مدل UZF با حالت مرسوم مدل‌سازی با بسته RCH (که در آن تغذیه از سطح بدون روندیابی و یا ایجاد تأخیر زمانی به سلول MODFLOW منتقل می‌شود) مورد مقایسه قرار گرفت. واسنجی خودکار این دو مدل توسط نرم افزار PEST انجام شد و سپس خروجی هر دو مدل مورد تحلیل قرار گرفت و حساسیت مدل‌ها به پارامترهای ورودی مربوط به ناحیه اشباع و ناحیه غیراشباع بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق آبخوان آبرفتی حوضه آبریز نیشابور می‌باشد. دشت نیشابور یکی از دشت‌های پایلوت طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی است (وزارت نیرو، 1394). حوضه آبریز نیشابور در عرض شمالی $35^{\circ} 40'$ تا $36^{\circ} 39'$ و طول شرقی $58^{\circ} 30'$ تا $59^{\circ} 30'$ با حداکثر ارتفاع 3305 متر در کوهستان بینالود و حداقل ارتفاع 1056 در خروجی حسین آباد جنگل می‌باشد. این حوضه دارای وسعت 9157 کیلومتر مربع می‌باشد که 4241 کیلومتر مربع را ارتفاعات و 4917 کیلومتر مربع را دشت تشکیل می‌دهد (شکل 1). دشت نیشابور در محدوده‌ی ارتفاعات بینالود دارای بافت آبرفتی و تحت تأثیر تغذیه‌ی سطحی و زیرزمینی قرار دارد و در نیمه‌ی جنوبی و غربی دارای بافت ریزدانه‌ی آبرفتی و سازندهای دانه‌ریز ماری و سایر رسوبات تبخیری است که سبب شده از نظر دانه‌بندی این قسمت از آبرفت مطلوب نباشد (ولایتی و توسلی، 1370).

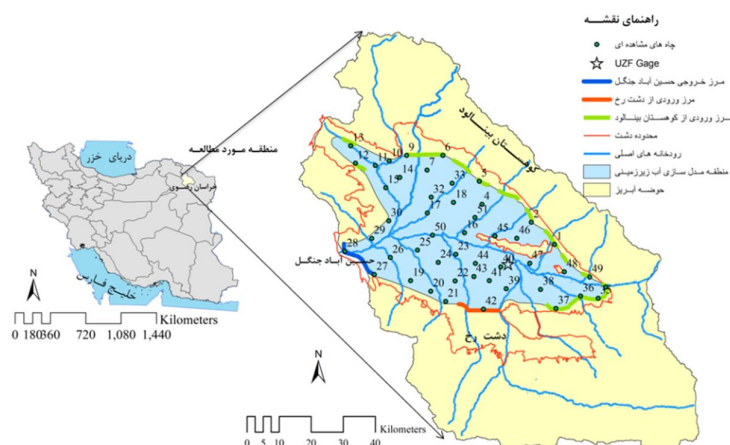
دشت نیشابور از سال 1377 به علت افت سریع سطح آب زیرزمینی ممنوعه بوده است. ولی با این وجود طبق گزارش آمایش استان خراسان رضوی در بازه زمانی سال‌های 1376 تا 1387 سطح آبخوان حدود 10/14 متر افت پیدا کرده است (مطالعات برنامه آمایش استان خراسان رضوی، 1389) با توجه به اینکه دشت نیشابور در منطقه‌ای خشک و نمیه‌خشک واقع شده است تراز آب زیرزمینی در آن بطور کلی پایین بوده و ناحیه غیر اشباع در آن ضخیم می‌باشد. شکل (2-الف) متوسط ضخامت لایه غیراشباع را برای سال آبی

وسیع با محدودیت مواجه می‌سازد. برای مناطق وسیع که آبخوان در عمق زیاد قرار داشته و تغذیه پس از طی مسیری طولانی به ناحیه اشباع می‌رسد، شبیه‌سازی جریان در ناحیه غیراشباع را می‌توان با فرضیات فرض‌های ساده کننده‌ای نیز لحاظ نمود. به عنوان مثال در بسته جریان ناحیه غیراشباع UZF که در سال 2006 به مدل MODFLOW اضافه گردید، جریان در ناحیه غیراشباع توسط معادله ریچاردز یک‌بعدی شبیه‌سازی می‌شود (Niswonger et al., 2006). هانت و همکاران به کمک بسته UZF، تأثیر شبیه‌سازی جریان در ناحیه غیراشباع را بر تغذیه آب‌های زیرزمینی در منطقه‌ای مرطوب مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که در مناطق با ضخامت لایه غیراشباع زیاد (15-26 متر) شبیه‌سازی ناحیه غیراشباع اهمیت زیادی دارد (Hunt et al., 2008). کاو و همکاران برای بررسی تأثیر ضخامت عمق ناحیه غیراشباع بر تغذیه آب زیرزمینی از بسته UZF استفاده نمودند (Cao et al., 2016). نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که وجود ناحیه غیراشباع با بافت لومی و ضخامت بیش از 30 متر سبب می‌گردد که طی یک دوره پانزده ساله نسبت نفوذ به تغذیه آب زیرزمینی به میزان 70٪ کاهش یابد، این نتیجه نشان می‌دهد که ناحیه غیراشباع می‌تواند بخشی از نفوذ را ذخیره نماید.

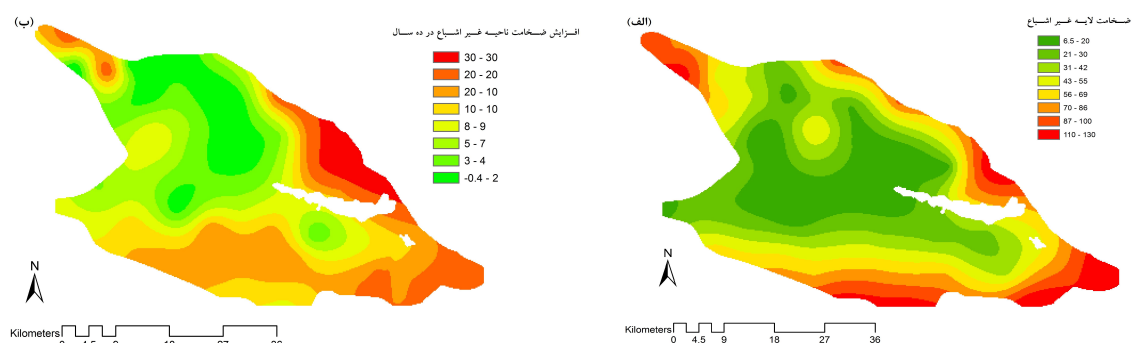
دشت نیشابور طی سالیان اخیر با بحران آبی مواجه بوده و جزء دشت‌های ممنوعه محسوب می‌گردد. با توجه به این شرایط، مطالعات مختلفی نظیر تحقیقات نادریان‌فر و انصاری (1390)، احمدی و همکاران (2015؛ Ahmadi et al., 2012) و ایزدی و همکاران (2015؛ Izady et al., 2015) بر روی مسایل آب زیرزمینی این منطقه تمرکز داشته‌اند. نادریان‌فر و انصاری (1390) به ارزیابی تأثیر خشک-سالی‌ها با شدت و مدت متغیر بر نوسان‌های سطح آب زیرزمینی در دشت نیشابور پرداختند. احمدی و همکاران (2012؛ Ahmadi et al., 2012) در تحقیق خود تغذیه آب زیرزمینی دشت مذکور را با استفاده از روش‌های مبتنی بر بیلان هیدرولوژیک شامل، نوسانات سطح ایستابی WTF، بیلان هیدرولوژیک توزیعی DHB، و بیلان هیدرولوژیک HB برآورد نمودند. متوسط تغذیه سالانه برآورد شده با استفاده از این روش‌ها برای یک دوره ده ساله مهر 1379 تا شهریور 1389 به ترتیب برابر 228، 269 و 354 میلیون مترمکعب گزارش شده است. همچنین در تحقیق دیگری احمدی و همکاران (2015؛ Ahmadi et al., 2015) از دو روش CRD و RIB برای تخمین تغذیه در دشت نیشابور استفاده نمودند. این دو روش بر اساس تعادل آب زیرزمینی و رابطه بین تراز سطح آب و بارش می‌باشند. تغذیه سالانه دشت نیشابور به‌طور متوسط برای روش‌های CRD و RIB به ترتیب برابر 364 و 354 میلیون مترمکعب گزارش شده است. ایزدی و همکاران نیز در تحقیق خود دو مدل SWAT و MODFLOW را به‌صورت ترکیبی واسنجی نموده. یافته‌های تحقیق ایشان نشان داد که توزیع مکانی تغذیه متاثر از

دشت نشان می‌دهند.

1379-1380 و شکل (2-ب) میزان افزوده شدن به ضخامت لایه غیراشباع از سال آبی 1379-1380 تا سال 1390-1391 را برای



شکل 1- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز نیشابور در ایران به همراه محدوده دشت، محدوده مدل سازی و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای



شکل 2 (الف) - ضخامت لایه غیر اشباع در سال 1379-1380 (متر) و (ب): میزان افزایش ضخامت لایه غیر اشباع در 10 سال (متر)

تهیه مدل مفهومی در ناحیه اشباع و غیر اشباع: (Izady et al., 2015) جهت تعریف نمودن تغذیه برای مدل‌های آب زیرزمینی، استفاده شده است. مدل SWAT توسط آرنولد (Arnold et al., 1998) ارائه شده است و در تحقیقات متعددی مانند آرنولد و همکاران، سفاکلیوس و پرکینز، کیم و همکاران و ایزدی و همکاران، به منظور محاسبه تغذیه آب زیرزمینی بکار رفته است (Arnold et al., 2000; Sophocleous and Perkins., 2000; Kim et al., 2008; Izady et al., 2015). لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در این تحقیق شامل مکان چاه‌های مشاهده‌ای، چاه‌های برداشت آب، مرزهایی که در آن ورودی به آبخوان یا خروجی از آبخوان وجود دارد، تغذیه سطحی، هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره، سنگ‌بستر، تراز سطح زمین می‌باشند (Izady et al., 2014). در این تحقیق نوسانات سطح ایستابی توسط 48 چاه مشاهده‌ای اندازه‌گیری شد، به طوری که برداشت از سفره آب زیرزمینی توسط حدود 1830 حلقه چاه انجام می‌گیرد. مرزها شامل جبهه ورودی از کوهستان در

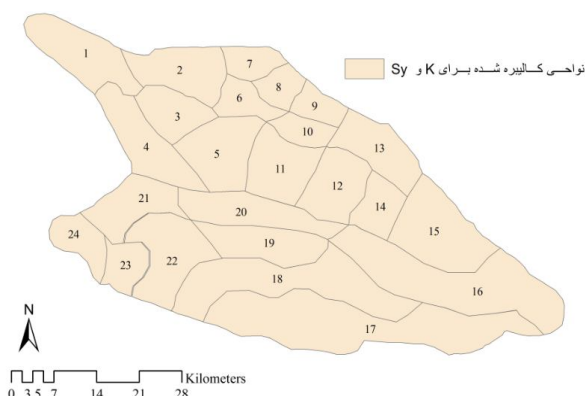
تهیه مدل مفهومی در ناحیه اشباع و غیر اشباع:

به منظور استخراج اطلاعات بافت خاک در ناحیه غیر اشباع، داده لاگ‌های حفاری در نقاط مختلف دشت (وزارت نیرو، 1348) و نقشه خاک منطقه دریافتی از سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی مورد استفاده قرار گرفتند؛ سپس با توجه به جدول ارائه شده در تحقیق راولز و همکاران (Rawls et al., 1982) اطلاعات مورد نیاز در ناحیه غیر اشباع برای معادله بروکس و کوری (شامل هدایت هیدرولیکی، رطوبت باقیمانده، رطوبت اشباع و توان بروکس و کوری) استخراج گردید. رابطه بروکس و کوری مطابق معادله (1) می‌باشد.

$$k(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\epsilon} \quad (1)$$

در این معادله، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع، θ_r رطوبت باقیمانده، θ_s رطوبت اشباع و ϵ توان بروکس و کوری می‌باشند. در این تحقیق از خروجی تغذیه بدست آمده از مدل SWAT

et al., 2015 نقشه‌های زمین‌شناسی و خاک‌شناسی دریافت شده از سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی و پیرومترهایی که تغییرات تراز سطح آب در آن‌ها دارای روند مشابهی می‌باشد، انجام پذیرفت (شکل 3).



شکل 1- تقسیم‌بندی منطقه به 24 ناحیه از نظر خصوصیات هیدروژئولوژیک (Sy, K)

بخش شمال و شرق، جبهه ورودی از جلگه رخ در بخش جنوبی و یک جبهه خروجی در قسمت غربی در ناحیه حسین آباد جنگل می‌باشند (شکل 1). پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در آبخوان به صورت ناحیه ای به بخش‌هایی تقسیم شدند، با توجه به داده‌های نقطه‌ای هدایت هیدرولیکی (وزارت نیرو، 1348 و Izady

بالادست¹ UPW برای محاسبه قابلیت انتقال بین سلول‌ها استفاده می‌کند. بسته UPW مشکل غیرخطی شدن تراز سطح آب که در اثر خشک و تر کردن سلول‌ها به وجود می‌آید را با پیوسته در نظر گرفتن تراز آب حل می‌کند. پیوسته بودن تراز سطح آب سبب می‌شود تابع قابلیت انتقال پیوسته و مشتق پذیر شده و بنابراین امکان استفاده از روش نیوتن برای حل معادلات سفره‌های آب زیرزمینی آزاد را فراهم می‌کند. روش خطی‌سازی مورد استفاده در MODFLOW-NWT برخلاف روش معمول استفاده شده در MODFLOW 2005 سبب تولید یک ماتریس نامتقارن برای دستگاه معادلات می‌شود. از آنجا که کلیه حل‌کننده‌های خطی تعریف شده برای حل ماتریس تولید شده توسط MODFLOW 2005 ماتریس‌های متقارن را حل می‌کنند برای حل ماتریس نامتقارن تولید شده توسط MODFLOW-NWT از حل‌کننده‌های ماتریس نامتقارن GMRES² و CGSTAB³ استفاده شده است.

مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW-NWT، در محیط کاربری ModelMuse که توسط سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا⁴ USGS ارائه گردیده و به طور رایگان در وبسایت این سازمان⁵ موجود است ساخته شد. برای اجرای مدل از

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل 12 سال داده ماهانه (از مهر 1379 تا مهر 1391) می‌باشد، که 10 سال آن جهت واسنجی (1379 تا 1389) و 2 سال دوره ماهانه آماری (1389 تا 1391) برای صحت‌سنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت به منظور ارزیابی دقیق نتایج واسنجی مدل از شاخص‌های میانگین مطلق خطا (MAE)، میانگین انحراف خطا (MBE)، جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE)، انحراف معیار مربوط به جذر میانگین مربعات خطاها SDV-RMSE و جذر میانگین مربعات خطاهای نرمال شده (NRMSE)، جهت مقایسه سطح آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، استفاده گردید.

مدل‌سازی عددی

مدل عددی مورد استفاده برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی MODFLOW-NWT می‌باشد (Niswonger et al., 2011). این مدل، برای حل مشکل غیرخطی شدن معادلات آبخوان آزاد در MODFLOW 2005 (Harbaugh., 2005) به‌طور مستقل توسعه داده شده است. مشکل غیرخطی شدن دستگاه معادلات آب زیرزمینی در اثر خشک و تر شدن سلول‌ها در MODFLOW 2005 رخ می‌دهد. خشک شدن سلول زمانی رخ می‌دهد که تخلیه در سلول بیش‌تر از مجموع ورودی و ذخیره باشد (به عنوان مثال: نقاطی با پمپاژ بالا که عمق ناحیه اشباع کم می‌باشد) در صورتی که در گام بعد ورودی به سلول بیش‌تر از برداشت شود امکان تر شدن مجدد این سلول وجود دارد. برنامه MODFLOW-NWT از بسته وزن‌دهی

1- Upstream-Weighting

2- Generalized-Minimum-Residual Solver

3- Orthomin / Stabilized Conjugate-Gradient Solver

4- United State Geological survey

5-<http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/ModelMuse/ModelMuse.html>

مدل UZF، به صورت دستی واسنجی شد. در ادامه با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی، مقاطع ژئوالکترونیک و داده‌های نقطه‌ای مربوط به ضرایب هیدرودینامیک، دامنه تغییرات برای هدایت هیدرولیکی ± 2 متر بر روز و آبدهی ویژه برابر 50/1 درصد تعریف گردید و واسنجی خودکار توسط مدل PEST انجام گرفت.

اضافه نمودن پارامترهای بیشتر به مدل اغلب انعطاف‌پذیری آن را برای واسنجی افزایش می‌دهد. بنابراین حساسیت تراز آب زیرزمینی در مدل‌های ارایه شده (هر دو مدل RCH و UZF) به تغییر در ضرایب هیدرودینامیکی (هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه) و حساسیت مدل UZF به پارامترهای مربوط به ناحیه غیراشباع (توان رابطه بروکس و کوری (EPS)، رطوبت اشباع (THTS) و هدایت هیدرولیکی عمودی خاک در حالت اشباع (Kvs)) مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی با تغییر 5، 10، 15 و 20 درصدی پارامترهای اشاره شده صورت پذیرفت. در انتها حساسیت مدل‌ها به پارامترهای مشترک مورد مقایسه قرار گرفت و ترتیب پارامترهای حساس برای هر مدل مشخص گردید.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها

شکل 4 نمودار مربوط به هیدروگراف واحد دشت نیشابور را در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برای بسته‌های UZF و RCH، طی دوره آماری مورد بررسی نشان می‌دهد. شکل مذکور حاکی از قابلیت دو مدل عددی واسنجی شده UZF و RCH در مدل‌سازی روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در دشت نیشابور می‌باشد. به منظور کمی‌سازی خطای محاسباتی در مدل‌های عددی، متوسط شاخص‌های آماری برای چاه‌های مشاهده‌ای منطقه مورد مطالعه به‌جز چاه‌هایی که برای تعریف مرز با هد ثابت استفاده شده‌اند در جدول 1 آورده شده است. منفی بودن معیار MBE برای هر دو مدل در بخش واسنجی حاکی از کم برآورد مدل‌ها در این مرحله می‌باشد. در مرحله صحت‌سنجی مدل RCH در شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی بیش برآورد داشته، اما مدل UZF در این مرحله نیز تراز آب را کم‌تر از میزان واقعی شبیه‌سازی نموده است. جدول 1 همچنین نشان می‌دهد که معیار RMSE برای دو مدل RCH و UZF در مرحله واسنجی به ترتیب برابر 1/45 و 1/52 درصد و در مرحله صحت‌سنجی 1/80 و 1/62 درصد متر بوده است. بیشترین مقدار RMSE برای دو مدل RCH و UZF مربوط به چاه مشاهده‌ای شماره 25 و کم‌ترین مقدار مربوط به چاه مشاهده‌ای شماره 7 می‌باشد، مقادیر حداکثر و حداقل RMSE برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی برای چاه‌های 25 و 7 در جدول 1 آورده شده است.

یک شبکه تفاضلات محدود با 167 ستون و 68 ردیف استفاده گردید. آبخوان آزاد و به صورت یک‌لایه و ابعاد هر سلول 500 متر در 500 متر مشخص شد. گام زمانی اجرای مدل روزانه، دوره‌های تنش ماهانه و ارزیابی در مقیاس ماهانه انجام گردید.

بسته UZF جریان آب در ناحیه غیراشباع را به کمک معادله ریچاردز یک بعدی رونمایی می‌کند (Niswonger et al., 2006). فرم کلی معادله ریچاردز یک بعدی به صورت معادله (2) می‌باشد.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} - i = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \right] - i \quad (2)$$

در معادله فوق θ رطوبت حجمی خاک، q شار جریان، z فاصله در جهت عمودی، $D(\theta)$ پخشیدگی هیدرولیکی، $K(\theta)$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک، i تخییرتغرق از سطح زیرین ناحیه ریشه به ازاء واحد عمق و t زمان می‌باشند.

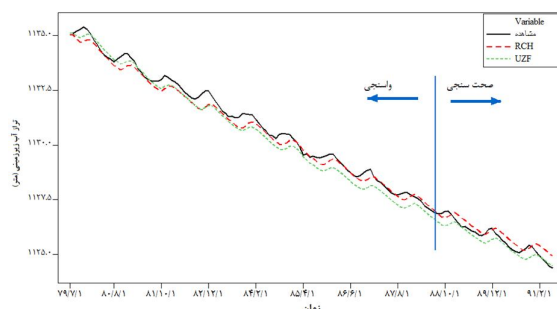
در بسته UZF از تخمین موج سینماتیک برای معادله ریچاردز استفاده می‌شود، که در آن فرض شده است از گرادیان نیروی مؤینگی می‌توان چشم‌پوشی نمود، بنابراین پخشیدگی هیدرولیکی $D(\theta)$ از معادله حذف شده است. در این بسته معادله حاکم بر جریان در ناحیه غیراشباع با فرض همگن بودن رسوبات و یک‌بعدی بودن جریان در ناحیه غیراشباع به روش مشخصه‌ها¹ حل شده است و ارتباط هدایت هیدرولیکی اشباع با هدایت هیدرولیکی غیراشباع، توسط معادله بروکس و کوری برقرار گردیده است.

به‌طور کلی از نظر ریاضی سه نوع شرایط مرزی اساسی وجود دارد و این سه شرط در مدل MODFLOW نیز قرار داده شده‌اند. اگر هد هیدرولیکی یا فشار در مرزهای محدوده جریان مشخص باشد، این حالت به‌عنوان شرط مرزی دریشله² نامیده می‌شود. اگر جریان در مرزهای محدوده جریان مشخص باشد، این حالت به‌عنوان شرط نیومان در نظر گرفته می‌شود. حالت سوم که ترکیبی از دو حالت فوق می‌باشد شرط کوشی نام‌گذاری می‌گردد و برای مرز نیمه نفوذپذیر یا مرزی که در آن هد تابع جریان است، ایجاد می‌شود (Franke et al., 1987). در این تحقیق به دلیل وجود چاه‌های مشاهده‌ای در نزدیکی مرز ورودی و خروجی آبخوان (شکل 1) مرزهای مدل‌سازی بر مبنای این پیرومترها از نوع دریشله تعریف گردید. شرایط مربوط به برداشت از چاه‌ها از نوع نیومان، در نظر گرفته شد. برای تغذیه نیز در حالت استفاده از بسته RCH شرایط مرزی از نوع نیومان و در حالت استفاده از بسته UZF شرایط مرزی از نوع کوشی می‌باشند.

پس از تهیه مدل‌های آب زیرزمینی با بسته‌های RCH و UZF، در ابتدا ضرایب هیدرودینامیک شامل هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه برای هر دو مدل و پارامترهای مربوط به رابطه بروکس و کوری برای

1- Characteristic Method

2- Dirichlet



شکل 2- هیدروگراف واحد مشاهده‌ی دشت و هیدروگراف واحد برای مدل‌سازی با بسته RCH و UZF

جدول 1- متوسط معیارهای آماری برای چاه‌های مشاهده‌ای

NRMSE (%)	Min-RMSE (OW7)	Max RMSE (OW25)	SDV -RMSE	RMSE (m)	MBE (m)	MAE (m)	نوع مدل
16/9	0/27	4/81	1/06	1/45	0/40-	1/20	RCH
17/5	0/31	5/68	1/11	1/52	0/64-	1/34	UZF واسنجی
58/3	0/41	6/86	1/39	1/80	0/11	1/68	RCH
56/3	0/31	7/94	1/50	1/62	0/49-	1/53	UZF صحت‌سنجی

UZF بالا آمدن سطح آب در برخی مناطقی که سطح ایستابی بالایی دارند سبب کاهش ظرفیت خاک برای پذیرش نفوذ نسبت به ظرفیت پذیرش نفوذ در RCH می‌شود. این اتفاق در ابتدای مدل‌سازی وقتی تراز آب در سلول‌های نزدیک به زهکش اصلی دشت بالا بوده در نزدیکی زهکش اصلی به میزان محدودی رخ داده است ولی میزان کاهش تغذیه در چنین شرایطی ناچیز بوده و تأثیری بر نتایج نداشته است. (3) در بسته UZF در مناطق با ضخامت بسیار زیاد ناحیه غیراشباع بخشی از نفوذ باعث افزایش رطوبت در ناحیه غیراشباع می‌شود و مابقی نفوذ با تأخیر زمانی قابل‌توجهی به ناحیه اشباع می‌رسد، این اتفاق در دامنه کوهستان بینالود نزدیک مرز بین کوه و دشت که آبخوان در عمق زیاد قرار گرفته اتفاق افتاده است این مورد مهم‌ترین عامل تأثیر گذار بر تفاوت بین تغذیه شبیه شده توسط RCH و UZF می‌باشد. (4) مورد چهارم که عکس حالات قبلی است در این حالت با بالا آمدن سطح آب در بسته UZF، بخشی از ناحیه غیراشباع، اشباع می‌شود و رطوبت پیشین موجود در این ناحیه به عنوان تغذیه محسوب می‌گردد. در مدل‌سازی انجام گرفته در این تحقیق در کل تراز آب در منطقه مورد مطالعه در حال کاهش می‌باشد بنابراین تغذیه‌ای از این منبع وارد آبخوان نشده است.

مقادیر واسنجی شده برای هدایت هیدرولیکی (K) و آبدهی ویژه (Sy) برای 24 ناحیه در دشت نیشابور (شکل 3) برای دو مدل با بسته‌های UZF و RCH، در جدول 2 نمایش داده شده است.

با توجه به معیار MAE، RMSE، RMSE در جدول 1 نتایج مدل UZF در مرحله صحت‌سنجی بهتر از مدل RCH بوده است. در نهایت با توجه به هیدروگراف واحد منطقه (شکل 4) و شاخص‌های آماری (جدول 1) می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که در هر دو مدل توانسته‌اند تغییرات تراز آب زیرزمینی در یک دوره دوازده ساله را به خطای قابل قبولی شبیه‌سازی نمایند.

شکل 4 نشان می‌دهد تراز سطح آب در دو مدل RCH و UZF متفاوت شبیه‌سازی شده است. با توجه به یکسان بودن ساختار دو مدل بجز نحوه تعریف تغذیه، می‌توان دلیل تفاوت در تراز آب شبیه‌سازی شده در دو مدل را تفاوت در تغذیه شبیه‌سازی شده دانست. به طور کلی تفاوت در تغذیه شبیه‌سازی شده توسط این دو مدل را می‌توان به دلیل چهار مکانیزم در بسته UZF دانست: (1) در بسته UZF زمانی که نرخ نفوذ از میزان نفوذپذیری خاک اشباع بیش‌تر شود، بخشی از نفوذ به صورت رواناب هورتنی در می‌آید، در چنین شرایطی میزان تغذیه شبیه‌سازی شده توسط UZF از تغذیه مدل RCH کم‌تر است. در این تحقیق از آن‌جا که مقادیر نفوذ تعریف شده برای دوره‌های تنش متوسط مقادیر روزانه در یک ماه می‌باشد (مقدار نفوذ ماهانه بر تعداد روزهای ماه تقسیم شده تا متوسط نفوذ روزانه حاصل گردد)، از شدت تغذیه‌هایی که در اثر بارش ناگهانی می‌باشند کاسته شده است پس این نکته به تفاوت بین تغذیه شبیه‌سازی شده توسط RCH و UZF تأثیری ندارد. (2) در بسته

جدول 2- مقادیر واسنجی شده برای هدایت هیدرولیکی (K) و آبدهی ویژه (Sy) برای دو مدل RCH و UZF

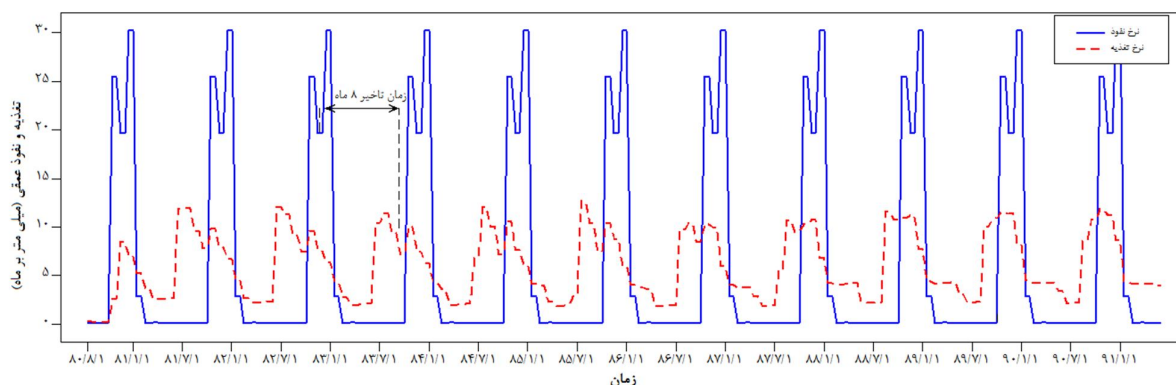
Sy_UZF	Sy_RCH	K_UZF	K_RCH	ناحیه شماره
0/09	0/08	1/5	1/5	1
0/09	0/08	2/5	4/4	2
0/1	0/1	4	6/2	3
0/12	0/1	9	7	4
0/1	0/09	3/4	3/6	5
0/1	0/12	4/3	4/8	6
0/12	0/12	4	6	7
0/15	0/13	14/9	15	8
0/16	0/14	8	11	9
0/11	0/12	7	9	10
0/11	0/08	1/7	1/5	11
0/06	0/06	1/5	1/9	12
0/14	0/14	20	18	13
0/05	0/04	1/5	1/5	14
0/11	0/1	3/4	3/7	15
0/13	0/13	14/7	16/2	16
0/13	0/12	30	29/5	17
0/11	0/11	28/1	28	18
0/16	0/14	18	16	19
0/14	0/12	8	11	20
0/11	0/1	13/7	13/5	21
0/15	0/14	18/3	16/1	22
0/07	0/06	2	4	23
0/05	0/05	6	4/4	24

به نمودار نرخ نفوذ هموارتر می‌باشد. عبور جبهه‌های رطوبتی از ناحیه غیراشباع سبب می‌شود، این جبهه‌ها با تأخیر زمانی به ناحیه اشباع برسند. میزان تأخیر زمانی رسیدن جبهه رطوبتی به ناحیه اشباع بستگی به سه عامل دارد اولین عامل جنس خاک منطقه می‌باشد، عامل دوم ضخامت لایه غیراشباع بوده و عامل سوم درصد رطوبت در جبهه رطوبتی می‌باشد. بنابراین جبهه‌های رطوبتی با درصد رطوبتی مختلف سرعت پیشروی متفاوتی دارند، جبهه‌های رطوبتی به دلیل داشتن سرعت پیشروی متفاوت در ناحیه غیراشباع با یکدیگر ترکیب، این ترکیب سبب می‌شود شکل اولیه و سرعت اولیه جبهه‌های رطوبتی تغییر کند. نتایج بررسی زمان تأخیر، بیانگر تأخیر زمانی هشت ماهه (شکل 5) برای عبور جبهه از ناحیه غیراشباع می‌باشد. در نقاط دیگر آبخوان بسته به ضخامت و بافت خاک در ناحیه غیراشباع زمان تأخیرهای متفاوتی رخ می‌دهد.

با توجه به جدول 2 مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه به ترتیب در 71% و 91% بخش‌ها در دو مدل RCH و UZF متفاوت می‌باشند. شایان ذکر است که مقادیر واسنجی شده برای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در دو مدل در بازه تغییرات استاندارد تعریف شده برای این پارامترها در منطقه می‌باشد.

تحلیل خروجی‌های ناحیه غیراشباع

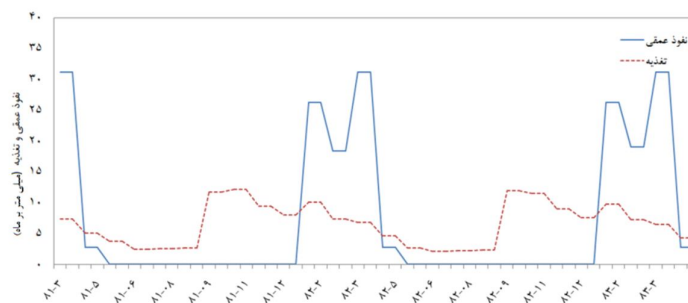
برای درک تأثیر ناحیه غیراشباع، بر تغذیه، نمودار نرخ نفوذ و تغذیه برای سلول سطر 83 ستون 112 در شکل 5 آورده شده است (محل سلول ستاره (شکل 1)). در این سلول متوسط عمق ناحیه غیراشباع 19 متر و بافت خاک شن رسی لومی می‌باشد. در شکل 5، به دلیل ترکیب شدن جبهه‌های رطوبتی با درصدهای متفاوت رطوبت در ناحیه غیراشباع با یکدیگر، نمودار نرخ تغذیه نسبت



شکل 3- نمودار نرخ تغییرات نفوذ و تغذیه در برابر زمان (محور زمان سال)

ماه مشاهده می‌گردد و در ماه تیر نفوذ به میزان قابل‌توجهی تا 2 میلی‌متر در ماه کاهش می‌یابد. به منظور بررسی چگونگی تغییرات رطوبتی در ناحیه غیراشباع خاک برای سلول مذکور پروفیل رطوبتی در چهار ماه متوالی (فروردین تا تیر 1382) تا عمق 16 متری در شکل 7 نمایش داده شده است.

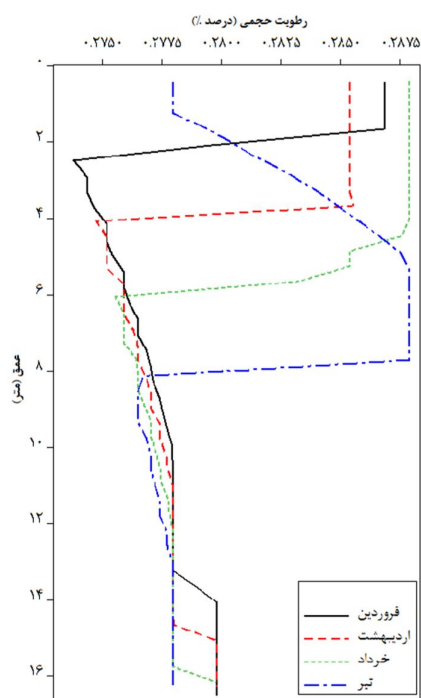
شکل 6 نمودار نرخ نفوذ و تغذیه را به‌طور دقیق‌تر با مقیاس ماهانه برای دوره، اردیبهشت 1381 تا خرداد 1383 نمایش می‌دهد (برای سلول ذکر شده در فوق). با بررسی این نمودار ملاحظه می‌گردد که در فروردین 1382 نفوذ حدودا 30 میلی‌متر در ماه بوده و در ماه اردیبهشت میزان نفوذ با اندکی کاهش به 20 میلی‌متر در ماه رسیده است. در ادامه در ماه خرداد پیک دوم نفوذ به میزان 35 میلی‌متر در



شکل 4- نمودار نرخ تغییرات نفوذ و تغذیه در برابر زمان (محور زمان ماه)

جدول 3- تأخیر زمانی در نقاط مختلف دشت بر اساس بافت خاک و عمق ناحیه غیراشباع

تأخیر زمانی (ماه)	عمق ناحیه غیراشباع	بافت خاک	UTM		سلول	
			X	Y	j	i
23	78	لومرسی	690850	3976180	143	103
56	106	لومرسی	625850	4022180	13	11
15	36	لوم	650850	4010180	63	35
8	25	لوم	647850	4000680	57	54
46	109	لوم‌شنی	664350	3973680	90	108
8	56	لوم‌شنی	635350	3983180	32	89
3	31	شن	648350	3986680	58	82
41	80	شن‌لومی	670850	3974180	103	107
6	32	شن‌رسی‌لومی	678850	3982680	119	90
29	47	سیلت‌لوم	685350	3977680	132	100



شکل 5- پروفیل رطوبتی مربوط به سلول (1112-83) در چهار ماه اول سال 1382

برای دو خاک با بافت شن و شن‌رسی لومی با ضخامت‌های 31 و 32 متر، زمان تأخیر به ترتیب 3 و 6 ماه بوده است.

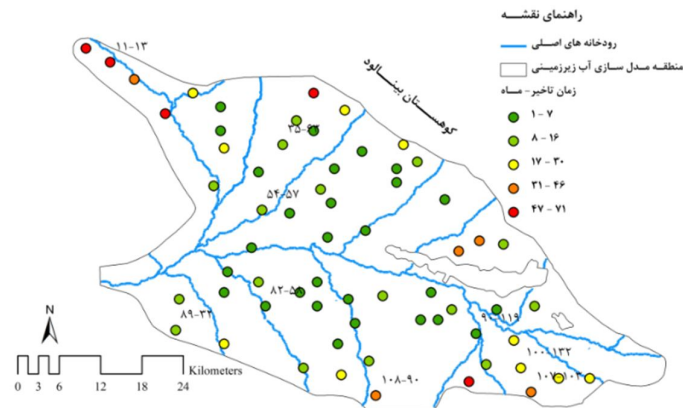
در این تحقیق برای درک بهتر توزیع مکانی، زمان تأخیر در آبخوان دشت نیشابور سلول‌هایی در کل دشت انتخاب و زمان تأخیر در آن‌ها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. شکل 8 موقعیت مکانی سلول‌هایی که برای آن‌ها زمان تأخیر محاسبه شده است را نشان می‌دهد در این شکل شماره سطر و ستون سلول‌هایی که مقدار زمان تأخیر برای آن‌ها در جدول 3 ارائه شده در کنار آن سلول آورده شده است.

اگر زمان تأخیر نقاط مختلف دشت (شکل 8) را با عمق ناحیه غیراشباع مربوط این نقاط (شکل 2) مورد مقایسه قرار گیرد، می‌توان دریافت که زمان تأخیر در حاشیه کوهستان با توجه به ضخیم بودن ضخامت لایه غیراشباع، بیش‌تر از قسمت‌های داخلی دشت می‌باشد. تغییرات زمان تأخیر در حاشیه کوهستان دشت، بازه‌ای در حدود 70-17 ماهه دارد در حالیکه در نواحی داخلی دشت رنج تغییرات زمان تأخیر در محدوده 16-1 ماه بدست آمده است.

در کل زمان تأخیر در نقاط مختلف دشت سبب شده است که از مجموع 400 میلیون مترمکعب نفوذ سالانه 386 میلیون مترمکعب به آبخوان برسد و بخشی از نفوذ باعث تغییرات رطوبتی در ناحیه غیراشباع گردیده است. مقدار تغذیه برآورد شده با اعداد بدست آمده توسط احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2015) هماهنگی دارد.

در شکل 7 جبهه رطوبتی در هر گام تا اندازه‌ای در ناحیه غیراشباع پیش‌روی می‌کند. رطوبت خاک در بخش فوقانی از فروردین به ماه اردیبهشت کاهش می‌یابد و مجدداً در ماه خرداد افزایش می‌یابد. این نکته با تغییرات نرخ نفوذ در سطح که در شکل 6 نمایش داده شده است هم‌خوانی دارد. در این سه ماه جبهه‌های رطوبتی پیش‌روی با درصدهای رطوبتی مختلف تا عمق شش متر پیش‌روی نموده‌اند. سپس با کاهش میزان نفوذ در ماه تیر مشخصاً یک موج پس‌روی اتفاق می‌افتد. این موج پس‌روی از سطح تا حدود عمق پنج متری خاک ادامه دارد در این ماه موج‌های پیش‌روی متعلق به سه ماه گذشته (فروردین تا خرداد 1382) تا عمق هشت متری خاک پیش‌روی نمود است. طی این دوره چهار ماهه، تغذیه صورت گرفته برای ناحیه اشباع در عمق شانزده متری متعلق به فصول گذشته می‌باشد؛ بنابراین در نظر نگرفتن ناحیه غیراشباع سبب برآورد اشتباه زمان رسیدن نفوذ به ناحیه اشباع می‌شود. در جدول 3 زمان تأخیر در نقاط دیگر آبخوان که دارای بافت خاک و ضخامت ناحیه غیراشباع متفاوت هستند، آورده شده است.

جدول 3 نشان می‌دهد که با سنگین شدن بافت خاک و افزایش ضخامت لایه غیراشباع زمان رسیدن نفوذ به ناحیه اشباع افزایش می‌یابد به‌طوری‌که برای خاک لوم‌رسی با ضخامت 106 متر واقع در شمال‌غربی آبخوان زمان تأخیر 56 ماه و برای خاک لوم‌شنی با ضخامت 109 متر زمان تأخیر 46 ماه بدست آمده است. همچنین



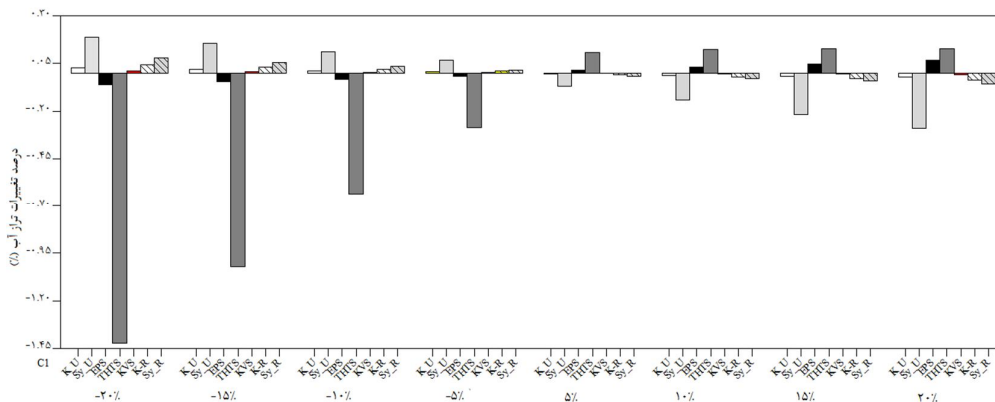
شکل 8- زمان تأخیر برای سلول‌های MODFLOW در موقعیت‌های مکانی مختلف

10، 15 و 20 درصد تغییر داده شد و سپس درصد تغییرات تراز آب زیرزمینی برای کلیه چاه‌های مشاهده‌ای نسبت به این مورد سنجش قرار گرفت.

متوسط تغییرات تراز آب زیرزمینی برای کلیه چاه‌های مشاهده‌ای به ازاء درصدهای مختلف تغییر پارامترها در شکل 9 نمایش داده شده است. ستون‌های هاشور خورده مربوط به مدل RCH و مابقی ستون‌ها مربوط به مدل UZF می‌باشد.

تحلیل حساسیت

در این بخش، حساسیت مدل‌های آب زیرزمینی RCH و UZF، نسبت به پارامترهای ناحیه اشباع مقایسه گردید و حساسیت مدل UZF به پارامترهای مربوط به ناحیه غیراشباع مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور پارامترهای هدایت هیدرولیکی (K)، آبدهی ویژه (Sy)، توان رابطه بروکس و کوری (EPS)، رطوبت‌اشباع (THTS) و هدایت هیدرولیکی عمودی خاک در حالت اشباع (Kvs) در سطوح 5،



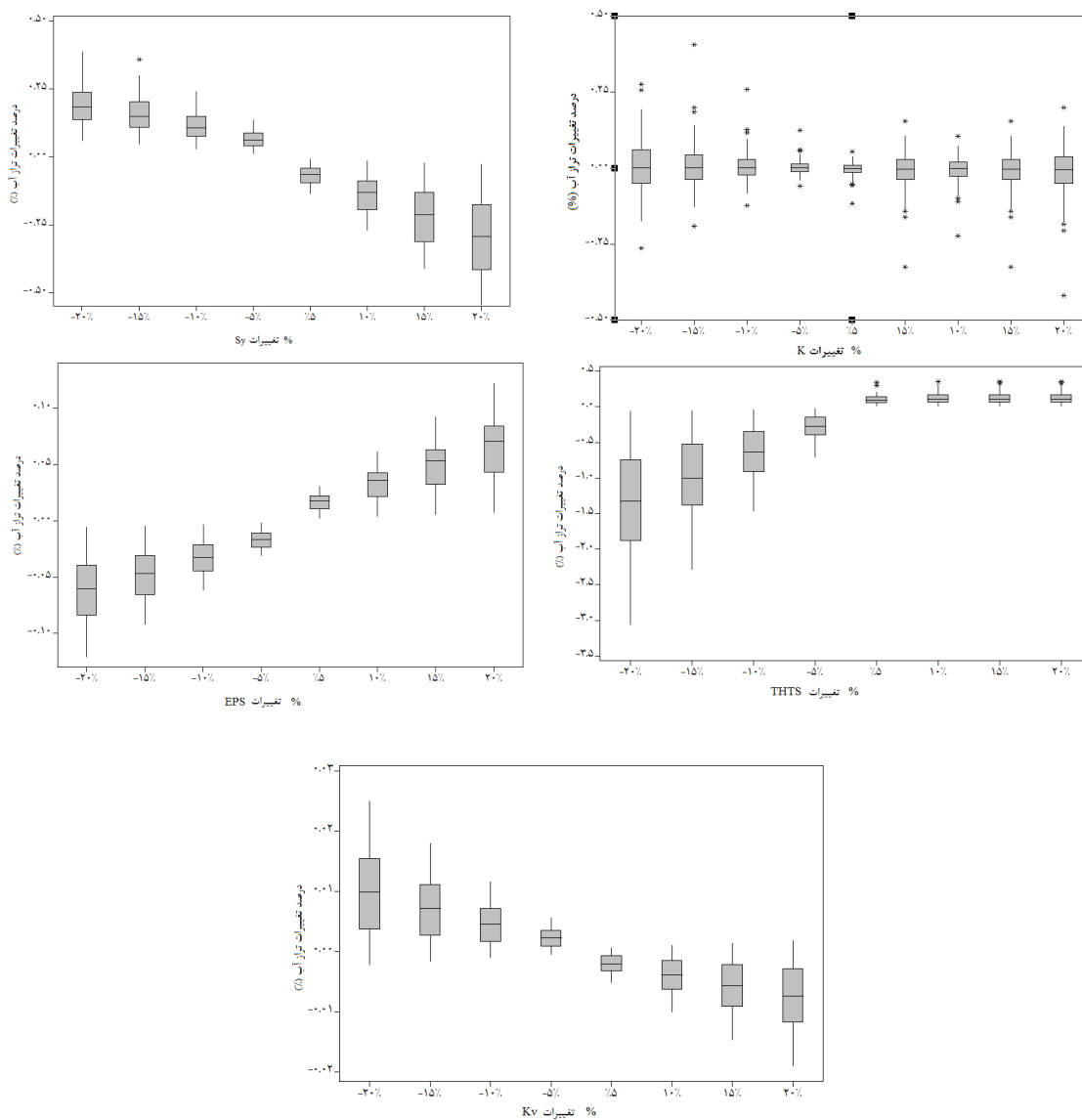
شکل 9- متوسط تغییرات تراز آب زیرزمینی به ازای تغییرات پارامترهای ورودی مدل‌های RCH (هاشوره خورده) و UZF

مدل UZF به کاهش میزان رطوبت اشباع خاک می‌باشد. بطور کلی ترتیب حساسیت پارامترهای مورد بررسی مدل UZF به شرح ذیل است:

رطوبت‌اشباع < آبدهی ویژه < توان بروکس و کوری < هدایت هیدرولیک افقی < هدایت هیدرولیکی عمودی خاک
برای درک بهتر میزان حساسیت مدل UZF به پارامترهای مذکور نمودار جعبه‌ای درصد تغییرات تراز آب زیرزمینی نسبت به تغییرات هر

با مقایسه حساسیت دو پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع و آبدهی ویژه برای دو مدل RCH و UZF در شکل 9 می‌توان دریافت که مدل UZF به ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان حساس‌تر می‌باشد. به عنوان مثال درصد تغییرات تراز آب زیرزمینی به ازاء 10 درصد افزایش آبدهی ویژه در مدل RCH 0/02- و در مدل UZF برابر 0/14- می‌باشد. همچنین در هر دو مدل حساسیت به آبدهی بیش‌تر از حساسیت به هدایت هیدرولیکی می‌باشد. شکل 9 نشانگر حساسیت بسیار زیاد

یک از پارامترها در شکل رسم شده است.



شکل 10- نمودار جعبه‌ای درصد تغییرات تراز آب زیرزمینی در مدل UzF به تغییرات هدایت هیدرولیکی افقی (K) (الف)، آبدی ویژه (THTS) (ب)، رطوبت اشباع (k) (ج)، توان رابطه بروکسی و کوری (ESP) (د)، هدایت هیدرولیکی عمودی (Kv) (ه)

کاهش بسیار چشم‌گیر می‌باشد (شکل 10-ج)، کاو (cao., 2011) نیز در تحقیق خود به حساسیت زیاد مدل آب زیرزمینی به کاهش THTS اشاره نموده است. مدل آب زیرزمینی به تغییرات کم‌تر از 5٪ توان رابطه بروکس و کوری EPS حساسیت نشان نمی‌دهد و حساسیت به افزایش و کاهش EPS تقریباً یکسان است (شکل 10-د). در مورد Kvs که حساسیت نسبت به آن کم‌تر از 0/01 درصد می‌باشد نیز حساسیت به افزایش و کاهش یکسان بوده است (شکل 10-ه).

با توجه به شکل 10 حساسیت به افزایش و کاهش هدایت هیدرولیکی افقی K تقریباً مشابه بوده. همچنان‌که از (شکل 10-ب) پیداست، در حالت افزایش مقدار Sy، مدل UzF حساسیت بیشتری در مقایسه با حالت کاهش آن نشان می‌دهد، بطوری‌که با افزایش 15 درصدی این پارامتر متوسط تغییرات تراز آب زیرزمینی برابر 0/22- درصد بوده است، اما کاهش 15 درصدی آن باعث 0/15 درصد تغییر در متوسط تراز آب زیرزمینی گردیده. در مورد THTS حساسیت به

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر در نظر گرفتن ناحیه غیراشباع در مدل‌سازی آب زیرزمینی انجام گرفت، بدین منظور دو مدل آب‌زیرزمینی با بسته‌های RCH و UZF ساخته شد. بسته RCH آب نفوذ کرده را مستقیماً به ناحیه اشباع انتقال می‌دهد و بسته UZF ناحیه غیراشباع را در نظر می‌گیرد. واسنجی خودکار هر یک از مدل‌ها توسط نرم افزار PEST نشان داد که تراز آب شبیه‌سازی شده در هر دو مدل با واقعیت مطابقت قابل قبولی دارد و تراز آب شبیه‌سازی شده توسط مدل UZF در مرحله صحت‌سنجی نسبت به مدل RCH نتایج بهتری داشته است.

نتایج در نظر گرفتن ناحیه غیراشباع نشان می‌دهد که بخشی از نفوذ در این ناحیه ذخیره شده (14 میلیون مترمکعب در سال) و با تأخیر زمانی به ناحیه اشباع می‌رسد. این تأخیر زمانی در نقاط مختلف دشت بسته به بافت خاک و ضخامت لایه غیراشباع متفاوت می‌باشد بیش‌ترین تأخیر زمانی مربوط به خاکی با بافت لومرسی با ضخامت ناحیه غیراشباع 170 متر به مدت 56 ماه بوده است. در نهایت می‌توان چنین گفت که UZF مقدار تغذیه را بین دو مقدار واقعی و پتانسیل شبیه‌سازی می‌کند؛ اما بسته RCH مقدار پتانسل را برابر تغذیه اتفاق افتاده در نظر می‌گیرد.

نتیجه آنالیز حساسیت مدل‌ها نشان داد که حساسیت مدل UZF به پارامترهای ورودی بیش‌تر از حساسیت مدل RCH می‌باشد. همچنین در واسنجی مدل‌سازی آب زیرزمینی همراه با بسته UZF، تغییر دو پارامتر رطوبت اشباع، آبدهی ویژه با احتیاط بیش‌تری باید انجام گیرد، چرا که UZF به این دو پارامتر بیش از پارامترهای دیگر حساس است.

منابع

- ولایتی، س و توسلی، س. 1370. منابع و مسایل آب خراسان. موسسه‌ی چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.
- مطالعات برنامه آمایش استان خراسان رضوی. 1389. مطالعات برنامه آمایش استان خراسان رضوی، تحلیل و ارزیابی موقعیت طبیعی و محیط زیستی (آب‌های سطحی و زیرزمینی) محدوده مطالعاتی نیشابور. جهاد دانشگاهی مشهد.
- نادریان‌فر، م و انصاری، ح. 1390. ارزیابی اثرات شدت - مدت خشک‌سالی‌های در مقیاس زمانی مختلف بر نوسانات سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت نیشابور). مهندسی منابع آب 9:1.3-16.
- وزارت نیرو، 1384. پروژه بررسی آب‌های زیرزمینی نیشابور
- (گزارش نهایی)، بخش منابع آب، اداره کل آب‌های زیرزمینی، ایران.
- وزارت نیرو، 1394. طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی - دستور عمل اول، 1-18.
- Ahmadi, T., Ziaei, A., Davari, K., Rasoulzadeh, A., Faridhoseini, A., Izadi, A. 2012. Estimation of ground water recharge using various methods in Neishaboob Plain, Iran. 5th international groundwater symposium, 19-November 2012, Kuwait, pp. 9-15.
- Ahmadi, T., Ziaei, A.N., Rasoulzadeh, A., Davary, K., Esmaili, K., Izady, A. 2015. Mapping ground water recharge areas using CRD and RIB methods in the semi-arid Neishaboob Plain, Iran. Arabian Journal of Geosciences. 8: 2921-2935.
- Arnold, J.G., Mutiah, R.S., Srinivasan, R., Allen, P.M. 2000. Regional estimation of base flow and ground water recharge in the Upper Mississippi river basin. Journal of Hydrology 227: 21-40.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Mutiah, R.S., Williams, J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development I. Wiley Online Library.
- Batelaan, O., De Smedt, F. 2007. GIS-based recharge estimation by coupling surface-subsurface water balances. Journal of Hydrology 337: 337-355.
- Cao, G.L. 2011. Recharge estimation and sustainability assessment of groundwater resources in the North China Plain. Ph.D. Thesis, Tuscaloosa: the University of Alabama.
- Cao, G., Scanlon, B.R., Han, D., Zheng, C. 2016. Impacts of thickening unsaturated zone on groundwater recharge in the North China Plain. Journal of Hydrology. 537: 260-270.
- Dripps, W., Bradbury, K. 2007. A simple daily soil-water balance model for estimating the spatial and temporal distribution of ground water recharge in temperate humid areas. Hydrogeology Journal. 15: 433-444.
- Franke, O.L., Reilly, T.E., Bennett, G.D. 1987. Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated ground-water flow systems: an introduction. US Government Printing Office.
- Harbaugh, A.W., 2005. MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process (pp.). Reston: US Department of the Interior, US Geological Survey. 6-16.
- Healy, R.W. 2010. Estimating groundwater recharge. Cambridge University Press.
- Healy, R.W., Cook, P.G. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeology Journal. 10: 91-109.
- Hunt, R.J., Prudic, D.E., Walker, J.F., Anderson, M.P. 2008. Importance of unsaturated zone flow for simulating recharge in a humid climate. Ground Water. 46: 551-560.
- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ziaei, A., Akhavan, S., Alipoor, A., Joodavi, A., Brusseau, M. 2015. Ground water conceptualization and modeling using distributed SWAT-based recharge for the semi-arid agricultural Neishaboob plain, Iran. Hydrogeology Journal. 23: 47-68.

- surface/subsurface flow. *Advances in water Resources*. 27: 361-382.
- Rawls, W., Brakensiek, D., Saxton, K. 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE*. 25: 1316-1320.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10: 18-39.
- Smits, F., Hemker, C. 2004. Modelling the interaction of surface-water and groundwater flow by linking DufLOW to MicroFem. FEM_MODFLOW, Karlovy Vary, Czech Republic.
- Sophocleous, M., Perkins, S.P. 2000. Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas. *Journal of Hydrology*. 236: 185-201.
- Tian, W., Li, X., Wang, X.-S., Hu, B. 2012. Coupling a groundwater model with a land surface model to improve water and energy cycle simulation. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 9: 1163-1205.
- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ziaei, A.N., Alipoor, A., Joodavi, A., Brusseau, M.L. 2014. A framework toward developing a ground water conceptual model. *Arabian Journal of Geosciences*. 7: 3611-3631.
- Jones, J., Sudicky, E., McLaren, R. 2008. Application of a fully-integrated surface-subsurface flow model at the watershed-scale: A case study. *Water Resources Research* 44 (3): 1-13.
- Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S., Arnold, J.G. 2008. Development and application of the integrated SWAT, MODFLOW model. *Journal of Hydrology*. 356: 1-16.
- Niswonger, R.G., Panday, S., Ibaraki, M. 2011. MODFLOW-NWT, a Newton formulation for MODFLOW-2005. *US Geological Survey Techniques and Methods* 6, A37.
- Niswonger, R.G., Prudic, D.E., Regan, R.S. 2006. Documentation of the Unsaturated-Zone Flow (UZFI) Package for modeling unsaturated flow between the land surface and the water table with MODFLOW-2005. 4-10
- Panday, S., Huyakorn, P.S. 2004. A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating

Investigating the Impact of Vadose Zone on Groundwater Modeling by UZF package of MODFLOW-NWT(Case study: Neishaboor Plain)

F. Nazarieh¹, H Ansari², A.N. Ziaei³, K. Davari⁴ and A. Izady⁵

Recived: Jun.11, 2016

Accepted: Nov.22, 2016

Abstract

This study was conducted to investigate the effect of vadose zone modeling on groundwater recharge, and comparing this method with conventional method of ground water modeling. Hence, Neishaboor plain was selected as a case study. MODFLOW-NWT model was chosen to simulate the flow of saturated zone. The UZF package simulates flow through the vadose zone while the RCH package transfers recharge directly to the saturated zone. Recharge defined for the two groundwater models was obtained from the SWAT model. Automatic calibration of the models was done with PEST form2000 to 2010, and verification of the models was done form2000 to 2010. RMSE of the conventional method (RCH package) and modeling vadose zone (UZF) in calibration stage were 1.45 m and 1.52 m, and in verification stage was 1.80 and 1.62 respectively. Results of UZF indicate recharge enter to the saturated zone with 1 to 56 month lag times in different areas. The sensitivity analysis of models demonstrated that the model, which considered UZF, was more sensitive to input parameters. Findings revealed that taking into account the vadose zone in groundwater modeling, can improve performance of the model, and makes it possible to calculate the lag time and part of infiltration that stored in vadose Zone.

Keywords: RCH package, Recharge, MODFLOW-NWT, Vadose Zone, UZF Package

1 - Ph.D student Of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

2 - Full Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

3 - Associate Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

4 - Full Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

5 - Research Scientist, Water Research Center, Sultan Qaboos University, Muscat, Oman

(* - Corresponding Author Email: Ansary@um.ac.ir)