دانشگاه فردوسی مشهد
دانشکده کشاورزی
رساله دکتری

# کاربرد و ارزیابی یک مدل توسعه‌یافته تلفیقی آب‌زیرزمینی ـ آب سطحی در حوضه آبریز نیشابور

**عزیزا... ایزدی**

**استادان راهنما**
**دکتر کامران داوری**
**دکتر امین علیزاده**

**استادان مشاور**
**دکتر علی‌نقی ضیایی**
**دکتر سمیرا اخوان**

**بهمن ۱۳۹۲**

دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب

از این رساله دکتری توسط عزیزا... ایزدی دانشجوی مقطع دکتری رشته مهندسی کشاورزی در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۲۱ در حضور هیات داوران دفاع گردید. پس از بررسی های لازم، هیات داوران این پایان نامه را با نمره عدد حروف و با درجه مورد تأیید قرار داد.

عنوان رساله: **کاربرد و ارزیابی یک مدل توسعه یافته تلفیقی آب زیرزمینی-آب سطحی در حوضه آبریز نیشابور**

| سمت در هیات داوران | نام و نام خانوادگی | مرتبه علمی | گروه | دانشگاه / موسسه | امضاء |
|---|---|---|---|---|---|
| **داور خارجی** | دکتر حمیدرضا ناصری | دانشیار | علوم زمین | شهید بهشتی تهران | |
| **داور** | دکتر سید محمود حسینی | استاد | مهندسی عمران | فردوسی مشهد | |
| **داور** | دکتر بیژن قهرمان | استاد | مهندسی آب | فردوسی مشهد | |
| **استاد راهنما** | دکتر کامران داوری | دانشیار | مهندسی آب | فردوسی مشهد | |
| **استاد راهنما** | دکتر امین علیزاده | استاد | مهندسی آب | فردوسی مشهد | |
| **استاد مشاور** | دکتر علی‌نقی ضیایی | استادیار | مهندسی آب | فردوسی مشهد | |
| **استاد مشاور** | دکتر سمیرا اخوان | استادیار | مهندسی آب | بوعلی سینای همدان | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **نماینده تحصیلات تکمیلی** | دکتر سید حسین ثنائی‌نژاد | دانشیار | مهندسی آب | فردوسی مشهد |
| **مدیر گروه** | دکتر امین علیزاده | استاد | مهندسی آب | فردوسی مشهد |

## تعهد نامه

**عنوان رساله: کاربرد و ارزیابی یک مدل توسعه‌یافته تلفیقی آب‌زیرزمینی - آب سطحی در حوضه آبریز نیشابور**

اینجانب عزیزا... ایزدی، دانشجوی دوره دکتری رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، تحت راهنمایی آقایان دکتر کامران داوری و امین علیزاده متعهد می‌شوم:

- نتایج ارایه شده در این رساله حاصل مطالعات علمی و عملی اینجانب بوده، مسئولیت صحت و اصالت مطالب مندرج را به‌طور کامل بر عهده می گیرم.
- در خصوص استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد نظر استناد شده است.
- مطالب مندرج در این رساله را اینجانب یا فرد یگری به منظور اخذ هیچ نوع مدرک یا امتیازی تاکنون به هیچ مرجعی تسلیم نکرده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر به دانشگاه فردوسی مشهد تعلق دارد. مقالات مستخرج از رساله، ذیل نام دانشگاه فردوسی مشهد (Ferdowsi University of Mashhad) به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت خواهد شد.
- در خصوص استفاده از موجودات زنده یا بافت‌های آنها برای انجام رساله، کلیه ضوابط و اصول اخلاقی مربوطه رعایت شده است.

**عزیزا... ایزدی**


### مالکیت نتایج و حق نشر

- **کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) به دانشگاه فردوسی مشهد تعلق دارد و بدون اخذ اجازه کتبی از دانشگاه قابل واگذاری به شخص ثالث نیست.**
- **استفاده از اطلاعات و نتایج این رساله بدون ذکر مرجع مجاز نیست.**

## چکیده

در این مطالعه دو کد SWAT و MODFLOW برای شبیه‌سازی جریان آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوضه‌آبریز نیشابور از طریق واسنجی توام آن‌ها بکار گرفته شده‌اند. ابتدا مدل‌های مفهومی آب سطحی و آب‌زیرزمینی با استفاده از تمامی داده‌ها و اطلاعات تهیه گردیدند. تهیه مدل مفهومی از مهم‌ترین مراحل توسعه مدل جریان آب‌زیرزمینی می‌باشد. آمار و اطلاعات محدود و سازمان‌دهی‌نشده، تهیه مدل مفهومی آب-زیرزمینی را بویژه در کشورهای جهان سوم با مشکل مواجه می‌سازد. در این پژوهش یک دستورالعمل جامع و نوین بمنظور تهیه‌ی مدل مفهومی آب‌زیرزمینی برای آبخوان آزاد تدوین گردید. روش پیشنهادی شامل یک روش گام به گام شش مرحله‌ای است. هدف از مرحله‌ی مقدماتی، جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات کمی و توصیفی می‌باشد. مرحله‌ی یک با انتخاب "مشاهدات کنترل کننده"، ابزاری برای کنترل سایر مراحل فراهم می‌کند. داده‌های پایه برای این امر شامل سطح آب در پیزومترها، دبی چاه‌های بهره‌برداری و اطلاعات هیدرومتری می‌باشند. به دلیل اهمیت زیاد این مرحله در کنترل سایر مراحل، داده‌های پایه که دارای هر گونه تعارض آشکار باشند از بانک داده‌ها/اطلاعات حذف می‌گردند. خروجی این مرحله «مدل مفهومی نسخه صفر» می‌باشد. مرحله‌ی دو به تبیین هندسه‌ی آبخوان می‌پردازد که شامل مرزهای آبخوان، توپوگرافی زمین، و موقعیت سنگ کف می‌باشد. خروجی این مرحله «مدل مفهومی نسخه یک» می‌باشد. در این مرحله قبل از ورود به مرحله‌ی بعدی، ارزیابی همنوایی (Consistency Evaluation) بر پایه مشاهدات کنترلی (مرحله‌ی یک) صورت می‌گیرد. خروجی مرحله سوم "ضرایب هیدرودینامیک آبخوان" و «مدل مفهومی نسخه دو» می‌باشد. مجددا بایستی ارزیابی همنوایی با در نظر گرفتن توام مشاهدات کنترلی و نتایج مرحله دو صورت گیرد. مرحله‌ی چهار بررسی برهم‌کنش آب‌های سطحی و زیرزمینی است. در این مرحله نیز ارزیابی همنوایی لازم است. خروجی این مرحله «مدل مفهومی نسخه سه» می‌باشد. پنجمین مرحله، تلفیق نتایج مراحل قبلی به منظور تدوین «نسخه نهایی مدل مفهومی» است. در این مرحله، براساس دقت/کفایتِ داده‌ها و اطلاعات دردسترس، سطح دقت مدل مفهومی نیز تعیین می‌گردد. این کار بطور جداگانه برای هر پارامتر، از طریق امتیازدهیِ به قطعیت داده‌ها در مدل مفهومی بر اساس وجود داده اندازه‌گیری شده، تراکم مکانی، قدرت برآورد داده، و نیز تعارضات صورت می‌گیرد. بعد از تهیه مدل‌های مفهومی آب سطحی و زیرزمینی، مدل‌های SWAT و MODFLOW بمنظور برآورد توزیع زمانی و مکانی مولفه‌های هیدرولوژیکی، می‌بایستی اجرا شوند. واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW بصورت رفت و برگشتی و بر اساس داده‌های دبی رودخانه، عملکرد گندم، برداشت از آبخوان و تراز آب‌زیرزمینی به ترتیب در یک دوره‌ی ۱۰ ساله (مهر ۱۳۷۹ تا شهریور ۱۳۸۹) و ۲ ساله (مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۱) صورت پذیرفت. به دلیل ارتباط

مستقیم تبخیر-تعرق واقعی با عملکرد گیاه و برداشت از آبخوان، واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ-مقیاس با استفاده از دبی رودخانه، عملکرد گیاه و برداشت از آبخوان، دارای سطح اعتماد بیشتری در رابطه با تفکیک آب موجود در خاک به ذخیره‌ی خاک، تبخیر-تعرق واقعی و تغذیه‌ی آبخوان می‌باشد. نتایج نشان داد کارایی مدل تلفیقی برای پیش‌بینی جریان رودخانه و عملکرد گیاه کاملاً رضایت‌بخش بود. معیارهای ارزیابی کارایی مدل در ایستگاه هیدرومتری حسین‌آباد جنگل به عنوان خروجی حوضه در دوره واسنجی ( $R^2$ = 0.77, NS=0.74) و دوره اعتبارسنجی ($R^2$ = 0.51, NS=0.61) بیانگر این موضوع می‌باشند. همچنین مقادیر RMSE برای پیش‌بینی عملکرد گندم آبی و برداشت از آبخوان به ترتیب ۰/۱۵۲ تن بر هکتار و ۲/۳۲ میلی‌متر بدست آمد. حداقل، متوسط و حداکثر تغذیه‌ی آب‌زیرزمینی در دوره واسنجی به ترتیب صفر، ۱۷۶ و ۹۶۰ میلی‌متر برآورد شد که دارای همخوانی زیادی با مقدار برآوردی تغذیه‌ی سالانه از مطالعه‌ی پیشین می-باشد. برای دشت نیشابور که متحمل افت متوسط سالانه ۰/۸۵ متر می‌باشد مقدار RMSE نرمال‌شده‌ی ۱۵/۷ درصدی نتیجه‌ای کاملاً رضایت‌بخش و مناسب است. محاسبات بیلان آب‌زیرزمینی نشان داد که متوسط کسری بیلان آب‌زیرزمینی به دلیل تخلیه‌ی شدید آب‌زیرزمینی برای مصارف کشاورزی ۲۰۱ میلیون‌متر مکعب در سال می‌باشد. با ادامه روند کنونی و درنظرنگرفتن افزایش برداشت در آینده، دشت نیشابور در کمتر از ۱۲۰ سال آینده کاملا تهی خواهد گردید. بدیهی است که بسیار پیش‌تر از زمان مذکور، بدلیل شورشدن آب، کیفیت آب‌زیرزمینی تا سطح غیرقابل قبولی کاهش یافته و دیگر قابل استفاده نخواهد بود. با توجه به مشکلات عدیده موجود در دشت نیشابور، مدل تلفیقی توسعه‌یافته برای بررسی سناریوهای مختلف جهت مدیریت پایدار آب‌زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت. تحت سناریوی یک و ادامه روند کنونی تا افق ۱۴۰۴، هیدروگراف واحد آبخوان برای کل دشت افتی معادل ۱۰/۳ متر (افت سالانه‌ی ۰/۷۹ متر) نشان داد. تحت سناریوی دوم که هدف کاهش برداشت از آبخوان بمنظور نیل به وضعیت تعادل در بیلان آب‌زیرزمینی می‌باشد، نتایج نشان داد که برداشت از آبخوان بایستی به میزان تقریبا ۴۰ درصد کاهش یابد تا بتوان به شرایط تعادلی دست یافت. همچنین بر اساس هیدروگراف واحد آبخوان، تراز آب‌زیرزمینی حداکثر تا ۰/۶۸ متر در انتهای دوره (شهریور ۱۴۰۴) افزایش نشان داد.

**کلید واژه‌ها:** MODFLOW، SWAT، مدل مفهومی، چارچوب، واسنجی تلفیقی، تخلیه‌ی آب‌زیرزمینی، تغذیه، حوضه آبریز/دشت نیشابور.

## سپاسگزاری

سپاس خداوندگار حکیم را که با لطف بی‌کران خود، آدمی را زیور عقل آراست.

در آغاز وظیفه خود می‌دانم از زحمات بی‌دریغ استادان راهنمای خود، آقایان دکتر امین علیزاده و کامران داوری صمیمانه تشکر و قدردانی کنم که از راهنمایی‌های ارزنده آن‌ها در راستای پیشبرد پژوهش حاصل فراوان بردم و همواره شاگرد مکتب علم و انسانیت و منش والای آن‌ها هستم. از جناب آقای دکتر علی‌نقی ضیایی استاد مشاور این رساله به خاطر هر آنچه که از مدل‌سازی و فراتر از آن درس زندگی به من آموخت، کمال تشکر را دارم. از خانم دکتر سمیرا اخوان دیگر مشاور این رساله نیز که با صبر و حوصله مرا در طول انجام این پژوهش یاری کردند، قدردانی می‌کنم. از آقایان دکتر حمیدرضا ناصری، دکتر سیدمحمود حسینی و دکتر بیژن قهرمان که از نظرات ارزنده‌شان به عنوان داوران رساله استفاده کرده‌ام، کمال امتنان را دارم. از Dr Mary Anderson، Dr Raghavan Srinivasan، Dr Sandhya Rao، Dr Mark Brusseau، Dr Jerry Fairley، Dr Vincent Post، Dr Il Moon Chung و دوستان خوبم عطاا... جودوی، محسن پوررضا بیلندی و هادی نامقی که در طول انجام رساله از نظرات علمی آنها بهره برده‌ام و در بهبود علمی این اثر نقش مهمی ایفا نمودند، عمیقاً سپاسگزارم. لازم می‌دانم از آقایان دکتر ولایتی و دکتر لشکری‌پور و نیز مهندسین روح-الامین بهرامی، اکبر علیپور، حسین زراعتی، امیر رمضانی و غلامحسین تولایی که در تهیه‌ی مدل مفهومی آب‌زیرزمینی از نظرات کارشناسی و ارزشمند آنها استفاده کردم تشکر می‌نمایم. از دوستان عزیزم مرتضی صادقی، میثم مجیدی، مجتبی شفیعی، صادق غضنفری، روزبه موذن‌زاده، کریم سجادی، سجاد زرین‌فر، طیبه احمدی و پگاه خلیلی که در طول این سال‌ها باعث دلگرمی و قوت قلب من بوده‌اند، سپاسگزارم. در پایان، بوسه می‌زنم بر دستان خداوندگاران مهر و مهربانی، پدر و مادر عزیزم و بعد از خدا، ستایش می‌کنم وجود مقدس‌شان را و تشکر می‌کنم از برادارن و خواهران عزیزم به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان، که بهترین پشتیبان من در طی این سال‌ها بودند.

**تقدیم به روح جاویدان خواهرم، اوغل‌صنم**

# فهرست مطالب

**۱ ـ فصل اول؛ کلیات ..... ۱**

۱ ـ ۱ ـ مقدمه ..... ۱

۱ ـ ۲ ـ ضرورت انجام تحقیق ..... ۵

۱ ـ ۳ ـ اهداف تحقیق ..... ۷

۱ ـ ۴ ـ فرضیه تحقیق ..... ۸

۱ ـ ۵ ـ پیش‌فرض‌های تحقیق ..... ۸

۱ ـ ۶ ـ نوآوری‌های تحقیق ..... ۹

۱ ـ ۷ ـ ساختار رساله ..... ۱۰

**۲ ـ فصل دوم؛ مبانی نظری مدل‌ها و بررسی منابع ..... ۱۳**

۲ ـ ۱ ـ مقدمه ..... ۱۳

۲ ـ ۲ ـ مبانی مدل SWAT ..... ۱۳

۲ ـ ۱ ـ ۱ ـ آب و هوا ..... ۱۷

۲ ـ ۱ ـ ۲ ـ رواناب سطحی ..... ۱۸

۲ ـ ۱ ـ ۳ ـ آب‌زیرزمینی ..... ۱۹

۲ ـ ۱ ـ ۴ ـ تبخیر ـ تعرق ..... ۲۱

۲ ـ ۱ ـ ۵ ـ شبیه‌سازی عملکرد گیاه ..... ۲۲

۲ ـ ۱ ـ ۶ ـ واسنجی و تحلیل عدم‌قطعیت مدل SWAT ..... ۲۴

۲ ـ ۲ ـ مبانی MODFLOW ..... ۲۷

۲ ـ ۲ ـ ۱ ـ روش تفاضل‌محدود ..... ۲۸

۲ ـ ۲ ـ ۲ ـ شرایط مرزی ..... ۳۲

۲ ـ ۲ ـ ۳ ـ واسط گرافیکی (Interface) برای MODFLOW ..... ۳۳

۲ـ۲ـ۴ـ واسنجی مدل MODFLOW ..... ۳۴
۲ـ۳ـ مروری بر مطالعات صورت گرفته ..... ۳۴
**۳ـ فصل سوم؛ مواد و روش‌ها ..... ۴۳**
۳ـ۱ـ مقدمه ..... ۴۳
۳ـ۲ـ منطقه‌ی مورد مطالعه ..... ۴۴
۳ـ۳ـ چارچوب مدل مفهومی آب‌زیرزمینی ..... ۴۷
۳ـ۳ـ۱ـ مرحله صفر: گردآوری کلیه‌ی داده‌ها و اطلاعات مرتبط ..... ۵۱
۳ـ۳ـ۲ـ مرحله یک: تدوین مشاهدات کنترل‌کننده ..... ۵۱
۳ـ۳ـ۳ـ مرحله دو: تبیین هندسه مخزن ..... ۵۲
۳ـ۳ـ۴ـ مرحله سه: تعیین ضرایب هیدرودینامیک ..... ۵۸
۳ـ۳ـ۵ـ مرحله چهار: تعیین وضعیت تغذیه/ تخلیه ..... ۶۵
۳ـ۳ـ۶ـ مرحله پنج: تحویل نسخه‌ی نهایی مدل مفهومی ..... ۷۰
۳ـ۴ـ کاربرد چارچوب پیشنهادی در دشت نیشابور ..... ۷۲
۳ـ۴ـ۱ـ تدوین مشاهدات کنترل‌کننده ..... ۷۲
۳ـ۴ـ۲ـ هندسه مخزن ..... ۷۹
۳ـ۴ـ۳ـ خصوصیات هیدرودینامیک ..... ۹۴
۳ـ۴ـ۴ مرحله چهار: تعیین وضعیت تغذیه/ تخلیه ..... ۹۹
۳ـ۴ـ۵ـ مرحله پنج: تحویل نسخه‌ی نهایی مدل مفهومی ..... ۱۰۱
۳ـ۵ـ مدل مفهومی آب سطحی ..... ۱۱۵
۳ـ۵ـ۱ـ مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ..... ۱۱۵
۳ـ۵ـ۲ـ شبکه رقومی رودخانه ..... ۱۱۵
۳ـ۵ـ۳ـ نقشه خاک ..... ۱۱۵

۳ـ۵ـ۴ـ نقشه کاربری اراضی ..... ۱۱۶
۳ـ۵ـ۵ـ داده‌های اقلیمی ..... ۱۱۸
۳ـ۵ـ۶ـ داده‌های مدیریت گیاهی ..... ۱۱۹
۳ـ۵ـ۷ـ داده‌های هیدرومتری و عملکرد گیاه ..... ۱۲۱
۳ـ۵ـ۸ـ پیشنهاد مطالعات یا داده برداری‌های تکمیلی ..... ۱۲۲
۳ـ۶ـ روش پژوهش و ساختار مدل‌ها ..... ۱۲۴
۳ـ۶ـ۱ـ واسنجی تلفیقی SWAT-MODFLOW ..... ۱۲۵
۳ـ۶ـ۲ـ ساختار مدل جریان آب‌زیرزمینی ..... ۱۲۶
۳ـ۶ـ۳ـ واسنجی مدل آب‌زیرزمینی ..... ۱۲۹
۳ـ۶ـ۴ـ ساختار مدل آب سطحی (SWAT) ..... ۱۳۰
۳ـ۶ـ۵ـ واسنجی و تحلیل عدم‌قطعیت مدل ..... ۱۳۲
**۴ـ فصل چهارم؛ نتایج و بحث ..... ۱۳۵**
۴ـ۱ـ مقدمه ..... ۱۳۵
۴ـ۲ـ تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT ..... ۱۳۵
۴ـ۳ـ واسنجی هیدرولوژی و تحلیل عدم‌قطعیت ..... ۱۳۹
۴ـ۴ـ واسنجی بر مبنای عملکرد گیاه و برداشت از آبخوان و تحلیل عدم‌قطعیت ..... ۱۴۴
۴ـ۵ـ واسنجی جریان آب‌زیرزمینی ..... ۱۴۷
۴ـ۶ـ بیلان منابع آب ..... ۱۶۷
۴ـ۶ـ۱ـ بیلان آب سطحی ..... ۱۶۹
۴ـ۶ـ۲ـ بیلان آب‌زیرزمینی حاصل از مدل‌سازی ..... ۱۷۲
۴ـ۷ـ سناریوهای مدیریتی ..... ۱۷۴
۴ـ۷ـ۱ـ سناریو یک: ادامه روند کنونی تا سال ۱۴۰۴ ..... ۱۷۴

۴ ـ ۷ ـ ۲ ـ سناریو دو: وضعیت تعادل در بیلان آب‌زیرزمینی ..... ۱۷۷
**۵ ـ فصل پنجم؛ نتیجه‌گیری و پیشنهادات ..... ۱۷۹**
۵ ـ ۱ ـ خلاصه تحقیق و نتایج ..... ۱۷۹
۵ ـ ۲ ـ پیشنهادات ..... ۱۸۲
منابع ..... ۱۸۵
پیوست یک- فهرست اسامی لاتین ..... ۱۹۹

# فهرست شکل‌ها

**شکل ۲-۱.** نمایش چرخه هیدرولوژیک در SWAT (نستیچ و همکاران، ۲۰۰۹) ..... ۱۵

**شکل ۲-۲.** شماتیکی از روند تغذیه آب‌زیرزمینی در SWAT ..... ۲۱

**شکل ۲-۳.** رابطه بین عدم‌قطعیت در پارامترهای ورودی و عدم‌قطعیت در خروجی مدل (عباس‌پور، ۲۰۰۹). ..... ۲۶

**شکل ۲-۴.** نمایش گسسته‌سازی تفاضل‌محدود که در آن b ضخامت لایه آبدار می‌باشد (اندرسون و وسنر، ۱۹۹۲). ..... ۲۹

**شکل ۲-۵.** سلول i,j,k و شش سلول مجاور آن (اندرسون و وسنر، ۱۹۹۲). ..... ۳۱

**شکل ۲-۶.** جریان ورودی به سلول i,j,k از سوی سلول i , j – 1, k (اندرسون و وسنر، ۱۹۹۲). ..... ۳۱

**شکل ۳-۱.** تقسیمات زمین‌شناسی ایران، موقعیت حوضه آبریز نیشابور در استان خراسان رضوی، نقشه‌ی زمین‌شناسی به همراه مرز آبخوان، ایستگاه‌های هواشناسی، هیدرومتری و شبکه‌ی رودخانه ..... ۴۵

**شکل ۳-۲.** شمای عمومی فرآیندها، ارتباط آن‌ها با یکدیگر و نتیجه/خروجی‌های هر فرآیند. یکپارچگی مؤلفه‌های مدل مفهومی با ارزیابی همنوایی (Consistency Evaluation) اجزای مدل مفهومی کنترل می‌گردد. خط چین قرمز نمایشگر مسیر «گردش کار» در صورت وجود تعارض جدی و خط پر آبی نمایشگر مسیر «گردش کار» در صورت وجود تطابق نسبی (کافی) می‌باشند. ..... ۵۰

**شکل ۳-۳.** شمای عمومی ارتباط اجزای درونی مرحله یک و نتیجه/خروجی آن ..... ۵۲

**شکل ۳-۴.** شمای عمومی ارتباط اجزای درونی مرحله دو و نتیجه/خروجی آن ..... ۵۳

**شکل ۳-۵.** نحوه‌ی تعیین عمق سنگ کف ..... ۵۵

**شکل ۳-۶.** نحوه‌ی تعیین مرز آبخوان ..... ۵۷

**شکل ۳-۷.** شمای عمومی ارتباط اجزای درونی مرحله‌ی سه و نتیجه/خروجی آن ..... ۵۸

**شکل ۳-۸.** دیاگرام نحوه‌ی تعیین هدایت هیدرولیکی ..... ۶۰

**شکل ۳-۹.** دیاگرام نحوه‌ی تعیین آبدهی ویژه ..... ۶۳

**شکل ۳-۱۰.** شمای عمومی ارتباط اجزای درونی مرحله‌ی چهار و نتیجه/خروجی ..... ۶۵

**شکل ۳-۱۱.** دیاگرام نحوه‌ی تعیین تغذیه.....۶۸

**شکل ۳-۱۲.** شمای عمومی ارتباط اجزای درونی مرحله‌ی پنج و نتیجه/خروجی .....۷۰

**شکل ۳-۱۳.** موقعیت پیزومترها و خطوط هم‌تراز آب‌زیرزمینی مهرماه ۱۳۹۱در محدوده‌ی مطالعاتی دشت نیشابور .....۷۳

**شکل ۳-۱۴.** موقعیت مکانی چاه‌های بهره‌برداری، قنوات و چشمه‌ها در محدوده مطالعاتی نیشابور طبق آماربرداری سال ۱۳۸۷.....۷۸

**شکل۳- ۱۵.** برش زمین‌شناسی چاه اکتشافی بایرام آباد .....۸۱

**شکل ۳-۱۶.** برش زمین‌شناسی چاه اکتشافی سالاری.....۸۲

**شکل ۳-۱۷.** برش زمین‌شناسی چاه اکتشافی استادیوم ورزشی .....۸۳

**شکل ۳-۱۸.** برش زمین‌شناسی چاه اکتشافی جهان آباد .....۸۴

**شکل ۳-۱۹.** موقعیت مقاطع ژئوفیزیک و کل سونداژ های سال ۱۳۴۵ و ۱۳۴۶ در محدوده‌ی مطالعاتی نیشابور .....۸۶

**شکل ۳-۲۰.** نمایی ازمقطع شماره ۴ ترسیم شده در سال ۱۳۴۵.....۸۷

**شکل ۳-۲۱.** چاه‌های نزدیک مقاطع ژئوفیزیک (۳۲۹ حلقه)، دارای لوگ حفاری (۱۶۱ حلقه) و سنگ کف مشخص (۵۲ حلقه).....۸۸

**شکل ۳-۲۲.** عمق برخورد به سنگ کف براساس گزارش‌های کارشناسان امور آب.....۸۹

**شکل ۳-۲۳.** نمایی از مقطع ۴، بازسازی شده با توجه به اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری، نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی و نظر کارشناسان محلی (برای آگاهی از موقعیت مقطع به شکل (۳-۱۹) مراجعه گردد). .....۹۰

**شکل ۳-۲۴.** نمایی از مقطع ۱۰، بازسازی شده با توجه به اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری، نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی و نظر کارشناسان محلی (برای آگاهی از موقعیت مقطع به شکل (۳-۱۹) مراجعه گردد).....۹۱

**شکل ۳-۲۵.** نقشه هم‌عمق سنگ کف در محدوده مطالعاتی نیشابور .....۹۳

**شکل ۳-۲۶.** نقشه هم-مقدار هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری‌شده و برآوردی بر حسب متر بر روز .....۹۷

**شکل ۳-۲۷.** نقشه هم-مقدار آبدهی ویژه‌ی اندازه‌گیری‌شده و برآوردی بر حسب درصد .....۹۸

**شکل ۳-۲۸.** نقشه نواحی قابلیت انتقال آبخوان در محدوده‌ی مطالعاتی نیشابور ..... ۱۰۰

**شکل ۳-۲۹.** ارزیابی داده‌های مربوط به سنگ کف در محدوده‌ی مطالعاتی نیشابور ..... ۱۰۲

**شکل ۳-۳۰.** ارزیابی داده‌های مربوط به ضرایب هیدرودینامیک در محدوده‌ی مطالعاتی نیشابور ..... ۱۰۳

**شکل ۳-۳۲.** پیشنهاد برای انجام مطالعات ژئوفیزیک تکمیلی ..... ۱۰۹

**شکل ۳-۳۳.** پیشنهاد برای انجام حفاری‌های اکتشافی و عملیات پمپاژ تکمیلی ..... ۱۱۲

**شکل ۳-۳۴.** پیشنهاد برای تکمیل شبکه چاه مشاهده‌ای ..... ۱۱۴

**شکل ۳-۳۵.** نقشه واحدهای اراضی خاک حوضه آبریز نیشابور (شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی ، ۱۳۷۷) ..... ۱۱۶

**شکل ۳-۳۶.** نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز نیشابور (شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی ، ۱۳۷۷)۱۱۸

**شکل ۳-۳۷.** پیشنهاد برای ایجاد ایستگاه‌های جدید هیدرومتری و/یا هوا اقلیم‌شناسی ..... ۱۲۳

**شکل ۳-۳۸.** شماتیکی از انتقال تغذیه حاصل از HRUهای SWAT به CELLهای MODFLOW.... ۱۲۶

**شکل ۳-۳۹.** شبکه‌ی منظم تفاضلات محدود با شرایط مرزی برای دشت نیشابور ..... ۱۲۹

**شکل ۳-۴۰.** زیرحوضه‌های تولید شده به وسیله SWAT با توجه به محدودیت‌های مرز کوه و دشت، مرز محصولات باغی و زراعی، مرز دهستان‌ها و ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در سطح دشت، موقعیت چشمه‌ها، مرز دهستان‌ها و مخازن تغذیه‌ی مصنوعی ..... ۱۳۲

**شکل ۴-۱.** مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در دوره واسنجی (مهر ۱۳۷۹ (اول اکتبر ۲۰۰۰) تا شهریور ۱۳۸۹ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۰) و صحت‌سنجی (مهر ۱۳۸۹ (اول اکتبر ۲۰۱۰) تا شهریور ۱۳۹۱ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۲) ..... ۱۴۱

**شکل ۴-۲.** مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در دوره واسنجی (مهر ۱۳۷۹ (اول اکتبر ۲۰۰۰) تا شهریور ۱۳۸۹ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۰) و صحت‌سنجی (مهر ۱۳۸۹ (اول اکتبر ۲۰۱۰) تا شهریور ۱۳۹۱ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۲) ..... ۱۴۱

**شکل ۴-۳.** مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در دوره واسنجی (مهر ۱۳۷۹ (اول اکتبر ۲۰۰۰) تا شهریور ۱۳۸۹ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۰) و صحت‌سنجی (مهر ۱۳۸۹ (اول اکتبر ۲۰۱۰) تا شهریور ۱۳۹۱ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۲) ..... ۱۴۲

**شکل ۴-۴.** موقعیت چشمه‌ها و مخازن تغذیه‌ی مصنوعی..... ۱۴۲

**شکل ۴-۵.** مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در دوره واسنجی (مهر ۱۳۷۹ (اول اکتبر ۲۰۰۰) تا شهریور ۱۳۸۹ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۰) و صحت‌سنجی (مهر ۱۳۸۹ (اول اکتبر ۲۰۱۰) تا شهریور ۱۳۹۱ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۲) برای گندم آبی. ..... ۱۴۶

**شکل ۴-۶.** مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در دوره واسنجی (مهر ۱۳۷۹ (اول اکتبر ۲۰۰۰) تا شهریور ۱۳۸۹ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۰) و صحت‌سنجی (مهر ۱۳۸۹ (اول اکتبر ۲۰۱۰) تا شهریور ۱۳۹۱ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۲) برای گندم دیم. ..... ۱۴۶

**شکل ۴-۷.** مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در دوره واسنجی (مهر ۱۳۷۹ (اول اکتبر ۲۰۰۰) تا شهریور ۱۳۸۹ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۰) و صحت‌سنجی (مهر ۱۳۸۹ (اول اکتبر ۲۰۱۰) تا شهریور ۱۳۹۱ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۲) برای برداشت از آبخوان. ..... ۱۴۷

**شکل ۴-۸.** مقادیر هدایت هیدرولیکی واسنجی شده و توزیع مکانی نقاط اندازه‌گیری و تخمین زده شده. ..... ۱۴۹

**شکل ۴-۹.** مقادیر آبدهی ویژه واسنجی شده و توزیع مکانی نقاط اندازه‌گیری و تخمین زده شده..... ۱۴۹

**شکل ۴-۱۰.** متوسط ده-ساله‌ی تغذیه‌ی برآورد شده به وسیله مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW... ۱۵۱

**شکل ۴-۱۱.** مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده، مشاهده شده و پیش‌بینی شده برای سناریو یک و دو در دوره واسنجی (مهر ۱۳۷۹ (اول اکتبر ۲۰۰۰) تا شهریور ۱۳۸۹ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۰)، صحت‌سنجی (مهر ۱۳۸۹ (اول اکتبر ۲۰۱۰) تا شهریور ۱۳۹۱ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۲) و پیش‌بینی (مهر ۱۳۹۱ (اول اکتبر ۲۰۱۲) تا شهریور ۱۴۰۴ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۲) بترتیب برای پیزومترهای سیدآباد، قلعه آقا حسن، امان آباد، گرماب، زرین دشت، جغراتی، اراضی رئیسی، کلاته حسن، راه درخت سنجد، هشت کیلومتری شهرک، کوشکک راه شهرک، نوآباد، اراضی محمدآباد خرابه، چاه قرق، باقریه، ده شیب و اراضی نوبهار می‌باشد. خطای RMSE برای این پیزومترها کمتر از یک متر می‌باشد. ..... ۱۵۷

**شکل ۴-۱۲.** مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده، مشاهده شده و پیش‌بینی شده برای سناریوی یک و دو در دوره واسنجی (مهر ۱۳۷۹ (اول اکتبر ۲۰۰۰) تا شهریور ۱۳۸۹ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۰)، صحت‌سنجی (مهر ۱۳۸۹ (اول اکتبر ۲۰۱۰) تا شهریور ۱۳۹۱ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۲) و پیش‌بینی (مهر ۱۳۹۱ (اول اکتبر ۲۰۱۲) تا شهریور ۱۴۰۴ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۲) بترتیب برای پیزومترهای فیلخانه، اقبالیه، صدرآباد، صالح‌آباد، اراضی چهل مغریان، بعد از رستوران بینالود، کنار شهر نیشابور، مظفرآباد، بین سالاری و باقریه، کلاته قنبر، کنار کال شور و جنوب غرب نورآباد می‌باشد. خطای RMSE برای این پیزومترها بین یک تا دو متر می‌باشد. ..... ۱۶۱

**شکل ۴-۱۳.** مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده، مشاهده شده و پیش‌بینی شده برای سناریوهای یک و دو در دوره واسنجی (مهر ۱۳۷۹ (اول اکتبر ۲۰۰۰) تا شهریور ۱۳۸۹ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۰)، صحت‌سنجی (مهر ۱۳۸۹ (اول اکتبر ۲۰۱۰) تا شهریور ۱۳۹۱ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۲) و پیش‌بینی (مهر ۱۳۹۱ (اول اکتبر ۲۰۱۲) تا شهریور ۱۴۰۴ (۳۰ سپتامبر ۲۰۱۲) بترتیب برای پیزومترهای احمدیه، بازوبند، امیرآباد، اردمه، اراضی رحیم آباد، اراضی چاه مهندس، بعد از دکل و دستجرد می‌باشد. خطای RMSE برای این پیزومترها بین دو تا پنج متر می‌باشد. ..... ۱۶۴

**شکل ۴-۱۴.** خطوط هم‌پتانسیل مشاهده‌ای (رنگ آبی) و شبیه‌سازی (قرمز) تراز آب‌زیرزمینی برای آبخوان نیشابور (مهر ۱۳۸۹) به همراه جهت جریان آب‌زیرزمینی. شروع دوره واسنجی مهر سال آبی ۸۰-۱۳۷۹ است. اعداد داخل و بیرون پرانتز موجود در کنار پیزومترها بترتیب بیانگر معیار RMSE و نوسانات آب‌زیرزمینی برای آن پیزومتر می‌باشد. ..... ۱۶۶

**شکل ۴-۱۵.** خطوط هم‌پتانسیل مشاهده‌ای (رنگ آبی) و شبیه‌سازی (قرمز) تراز آب‌زیرزمینی برای آبخوان نیشابور (شهریور ۱۳۹۱) به همراه جهت جریان آب‌زیرزمینی. شروع دوره اعتبارسنجی مهر ۱۳۸۹ است. اعداد داخل و بیرون پرانتز موجود در کنار پیزومترها بترتیب بیانگر معیار RMSE و نوسانات آب‌زیرزمینی برای آن پیزومتر می‌باشد. ..... ۱۶۷

**شکل ۴-۱۶.** خطوط هم‌پتانسیل پیش‌بینی شده برای سناریوی یک (رنگ آبی) و سناریوی دو (رنگ قرمز) (شهریور ۱۴۰۴) به همراه جهت جریان آب‌زیرزمینی. شروع دوره اعتبارسنجی مهر ۱۳۸۹ است. اعداد داخل و بیرون پرانتز موجود در کنار پیزومترها بترتیب بیانگر افت برای سناریوهای یک و دو می‌باشد. علامت مثبت و منفی بترتیب نشان‌دهنده افت و بالاآمدگی تراز آب‌زیرزمینی می‌باشد. ..... ۱۷۵

**شکل ۴-۱۷.** خطوط هم‌افت آب‌زیرزمینی حاصل از سناریوی یک (شهریور ۱۴۰۴) ..... ۱۷۶

**شکل ۴-۱۸.** هیدروگراف واحد آب‌زیرزمینی پیش‌بینی شده برای سناریوی یک (خط قرمز) و سناریوی دو (خط سبز) (شهریور ۱۴۰۴). ..... ۱۷۶

**شکل ۴-۱۹.** خطوط هم‌افت آب‌زیرزمینی حاصل از سناریوی دو (شهریور ۱۴۰۴). ..... ۱۷۸

# فهرست جدول‌ها

**جدول ۱-۱.** مقایسه‌ی مطالعات مختلف صورت گرفته در ارتباط با استفاده توام مدل‌های SWAT و MODFLOW ..... ۱۰

**جدول ۳-۱.** گروه‌بندی رسوبات از نظر دانه‌بندی و مقدار آبدهی ویژه (Sy) آنها (جانسون، ۱۹۶۷) ..... ۶۴

**جدول ۳-۲.** کلاسه‌های مختلف برای تعیین سطح دقت مکانی مؤلفه‌های مدل مفهومی ..... ۷۱

**جدول ۳-۳.** آمار منابع بهره‌برداری (چاه، چشمه و قنات) محدوده مطالعاتی نیشابور (میلیون متر مکعب) ۷۶

**جدول ۳-۴.** مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه آبریز نیشابور ..... ۷۹

**جدول ۳-۵.** خلاصه نتایج حفاری‌های اکتشافی آبرفتی محدوده نیشابور (وزارت نیرو، ۱۳۴۸) ..... ۸۱

**جدول ۳-۶.** خلاصه نتایج آزمایش‌های پمپاژ دشت نیشابور (وزارت نیرو، ۱۳۴۸) ..... ۹۵

**جدول ۳-۷.** نتایج آزمایش‌های پمپاژ سال ۱۳۸۸دشت نیشابور (همراز، ۱۳۹۰) ..... ۹۵

**جدول ۳-۸.** بیلان سالانه‌ی آب‌زیرزمینی حسب میلیون‌مترمکعب ..... ۱۰۵

**جدول ۳-۹.** مساحت و درصد مساحت کاربری اراضی حوضه آبریز نیشابور (مهندسین مشاور سازآب شرق، ۱۳۸۷) ..... ۱۱۷

**جدول ۳-۱۰.** شیوه‌های مدیریتی برای گندم آبی برای دهستان ریوند از بخش مرکزی ..... ۱۲۰

**جدول ۳-۱۱.** شیوه‌های مدیریتی برای گندم دیم برای دهستان میان‌رخ از بخش جلگه‌رخ ..... ۱۲۰

**جدول ۳-۱۲.** شیوه‌های مدیریتی برای ذرت علوفه‌ای برای دهستان میان‌رخ از بخش جلگه‌رخ ..... ۱۲۰

**جدول ۳-۱۳.** مشخصات حوضه‌های بالادست ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه آبریز ..... ۱۲۱

**جدول ۴-۱.** پارامترهای نهایی انتخاب شده در فرآیند واسنجی تلفیقی SWAT-MODFLOW، حدود اولیه و نهایی آن‌ها و مقدار حساسیت آن‌ها ..... ۱۳۸

**جدول ۴-۲.** مقادیر معیارهای عملکرد مدل برای دوره واسنجی (صحت‌سنجی)..... ۱۳۹

**جدول ۴-۳.** مقادیر معیارهای عملکرد مدل برای دوره واسنجی (صحت‌سنجی) ..... ۱۴۵

**جدول ۴-۴.** مقادیر معیارهای عملکرد مدل آب‌زیرزمینی برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی ..... ۱۵۲

**جدول ۴-۵.** مقادیر متوسط دوازده ساله‌ی مؤلفه‌های بیلان آب سطحی برای کل حوضه (میلی‌متر) ..... ۱۶۹

**جدول ۴-۶.** مقادیر سالانه‌ی مؤلفه‌های بیلان آب سطحی برای کل حوضه (میلی‌متر) ..... ۱۷۰

**جدول ۴-۷.** مقادیر متوسط ماهانه‌ی مؤلفه‌های بیلان آب سطحی برای کل حوضه (میلی‌متر) ..... ۱۷۱

**جدول ۴-۸.** مقادیر سالانه‌ی مؤلفه‌های بیلان آب‌زیرزمینی حسب میلیون مترمکعب..... ۱۷۳

**جدول ۴-۹.** مقادیر متوسط ماهانه‌ی مؤلفه‌های بیلان آب‌زیرزمینی حسب میلیون مترمکعب ..... ۱۷۴

# فهرست علائم و اختصارها

| علامت | معادل انگلیسی | معادل فارسی |
|---|---|---|
| *95PPU* | 95% prediction uncertainty | باند عدم‌قطعیت ۹۵ درصد |
| *Bio* | Total plant biomass | مقدار کل توده گیاهی |
| $bio_{ag}$ | Aboveground biomass | توده گیاهی بالای سطح زمین |
| *CE* | Consistency Evaluation | ارزیابی همنوایی |
| *CN* | Curve number | شماره منحنی |
| *CRD* | Cumulative rainfall departure | نفوذ عمقی بارش |
| *DEM* | Digital Elevation Model | مدل ارتفاعی رقومی |
| *d-factor* | Average thickness of the 95PPU band divided by the standard deviation of the measured data | میانگین ضخامت 95PPU، تقسیم بر انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری شده |
| $E_a$ | Evapotranspiration | تبخیر و تعرق |
| $E_{soil,z}$ | Evaporative demand at depth z | تبخیر در عمق Z |
| $E_t$ | Maximum transpiration | حداکثر تعرق |
| $ET_0$ | Potential evapotranspiration | تبخیروتعرق پتانسیل |
| *h* | Potentiometric head | بار آبی |
| *HI* | Potential harvest index | شاخص برداشت پتانسیل |
| $HI_{opt}$ | Potential harvest index for the plant a maturity | شاخص برداشت پتانسیل برای زمانی که گیاه به بلوغ رسیده باشد |
| *HRU* | Hydrologic Response Unit | واحد پاسخ هیدرولوژیک |
| $I_a$ | Initial abstraction | مقدار جذب اولیه |
| *K* | Hydraulic conductivity | هدایت هیدرولیکی |
| *LAI* | Leaf area index | شاخص سطح برگ |
| *MAE* | Mean Absolute Error | میانگین خطای مطلق |
| *ME* | Mean Error | میانگین خطا |