

الله اعلم
بما كنا
نعمل



دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی
گروه مهندسی آبیاری و آبادانی

مدیریت تأمین آب کشاورزی از منابع تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی در
راستای حداکثرسازی تأمین حقابه دریاچه ارومیه
(مطالعه موردی: دشت مهاباد)

تدوین و نگارش:

امید رجا

استاد راهنما:

دکتر مسعود پارسی نژاد

استاد مشاور:

دکتر مسعود تجربی

رساله برای دریافت درجه دکتری
در رشته مهندسی آبیاری و زهکشی

بهمن ماه ۱۴۰۱

بسمه تعالی



دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی

دانشکده کشاورزی

گروه مهندسی آبیاری و آبادانی

گواهی دفاع از رساله دکتری تخصصی (Ph.D.)

هیئت داوران رساله دکتری آقای امید رجا در رشته /گرایش مهندسی آبیاری و زهکشی را با عنوان مدیریت تأمین آب کشاورزی از منابع تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی در راستای حداکثرسازی تأمین حقابه دریاچه ارومیه (مطالعه موردی: دشت مهاباد) در تاریخ ۱۴۰۱/۱۱/۲۶ با درجه عالی ارزیابی نمود.

| امضاء | دانشگاه یا مؤسسه | مرتبۀ دانشگاهی | نام و نام خانوادگی | مشخصات هیئت داوران |
|-------|--------------------|----------------|--------------------|------------------------|
| | دانشگاه تهران | دانشیار | مسعود پارسی نژاد | استاد راهنما |
| | دانشگاه صنعتی شریف | استاد | مسعود تجریشی | استاد مشاور |
| | دانشگاه ارومیه | استاد | وحید رضاوردی نژاد | استاد داور خارجی اول |
| | دانشگاه تربیت مدرس | دانشیار | مجید لاور | استاد داور خارجی دوم |
| | دانشگاه تهران | استاد | عبدالمجید لیاقت | استاد داور داخلی اول |
| | دانشگاه تهران | دانشیار | حامد ابراهیمیان | استاد داور داخلی دوم |
| | دانشگاه تهران | استاد | عبدالمجید لیاقت | نماینده تحصیلات تکمیلی |



تعه‌دنامه اصالت اثر

اینجان‌ب امید ر‌جا دانش‌آموخته مقطع دکتری در رشته علوم و مهندسی آب گرایش مهندسی آبیاری و زهکشی که در تاریخ ۱۴۰۱/۱۱/۲۶ از پایان‌نامه خود تحت عنوان: "مدیریت تأمین آب کشاورزی از منابع تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی در راستای حداکثرسازی تأمین حقابه دریاچه ارومیه (مطالعه موردی: دشت مهاباد)" با کسب درجه عالی دفاع نموده‌ام، شرعاً و قانوناً متعهد می‌شوم:

- (۱) مطالب مندرج در این پایان‌نامه یا رساله حاصل تحقیق و پژوهش اینجان‌ب بوده و در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران اعم از پایان‌نامه، کتاب، مقاله و غیره استفاده نموده‌ام، رعایت کامل امانت را نموده، مطابق مقررات، ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ اقدام به ذکر آن‌ها نموده‌ام.
- (۲) تمامی یا بخشی از این پایان‌نامه یا رساله قبلاً برای دریافت هیچ مدرک تحصیلی (هم‌سطح، پایین‌تر یا بالاتر) در سایر دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزش عالی ارائه نشده است.
- (۳) مقالات مستخرج از این پایان‌نامه یا رساله کاملاً حاصل کار اینجان‌ب بوده و از هرگونه جعل داده و یا تغییر اطلاعات پرهیز نموده‌ام.
- (۴) از ارسال هم‌زمان و یا تکراری مقالات مستخرج از این پایان‌نامه یا رساله (با بیش از ۳۰ درصد همپوشانی) به نشریات و یا کنگره‌های گوناگون خودداری نموده و می‌نمایم.
- (۵) کلیه حقوق مادی و معنوی حاصل از این پایان‌نامه یا رساله متعلق به دانشگاه تهران بوده و متعهد می‌شوم هرگونه بهره‌مندی و یا نشر دستاوردهای حاصل از این تحقیق اعم از چاپ کتاب، مقاله، ثبت اختراع و غیره (چه در زمان دانشجویی و یا بعد از فراغت از تحصیل) با کسب اجازه از تیم استادان راهنما و مشاور و حوزه پژوهشی دانشکده باشد.
- (۶) در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادرشده توسط دانشگاه تهران از درجه اعتبار ساقط و اینجان‌ب هیچ‌گونه ادعایی نخواهم داشت.

نام و نام خانوادگی دانشجو

امید ر‌جا

امضاء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

سپاس یزدان پاک را که مرا مشمول الطاف خویش نمود که با طی مراحل تحصیل به اخذ درجه دکتری نائل شوم به شکرانه این نعمت بزرگ الهی که با امکانات این مرز و بوم فراهم و نزد اینجانب به امانت گذاشته شده است، در پیشگاه ملت ایران به کتاب آسمانی خود، قرآن کریم، سوگند یاد می‌کنم که:

✓ در سراسر زندگی حرفه‌ای، به نحو احسن در راه اعتلای کشور ایران و جامعه بشری قدم برداشته و در این راه از هیچ کوششی دریغ نکنم.

✓ در تمام فعالیت‌های تخصصی، رضای خدا را همراه با صداقت علمی و اجتماعی مدنظر داشته و از موقعیت‌های به‌دست‌آمده در جهت رفع مشکلات مردم استفاده کنم و در همه امور، منافع کشور را بر منافع فردی مقدم بدانم.

✓ همواره علم و دانش خود را به‌روز نگاه داشته و در ادای وظایف و تعهدات حرفه‌ای در حد توان سعی و تلاش خود را به‌کارگیرم.

✓ و اینک از خداوند متعال توفیق بندگی و پای بندی به مفاد این سوگندنامه را خواستارم و از او می‌خواهم که مرا در ادامه و پیمودن مسیر و فتح قله‌های رفیع علم و دانش و ایفای رسالت علمی و انسانی خویش موفق بدارد.

و ایمان دارم که:

"إِنَّ اللَّهَ يَعْلَمُ غَيْبَ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاللَّهُ بَصِيرٌ بِمَا تَعْمَلُونَ (سوره حجرات، آیه ۱۸)"

نام و نام خانوادگی دانشجو

امید رجا

امضاء



تقدیم بہ:

ہمسر عزیزم کہ حریم سینما دایرہ ای است کہ اہمیتی ندارد کہ باچہ شعاعی رسم می شود، اما تو در مرکز آن ایستادہ ای۔

ہمسرم، مقدس ترین واژہ مادر لغت نامہ دلم، زندکیم را می یون مہر و عطفوت تومی دانم۔

بہ روح پاک پدرم و مادر عزیزتر از جانم کہ عالمانہ بہ من آموختند تا چگونہ در عرصہ زندگی، ایستادگی را تجربہ کنم۔

پدرم کوتاہی زمان را وقتی فهمیدم کہ درکنارت بودم و طولانی بودن آنرا وقتی فهمیدم کہ درکنارم نبودی۔

بہ خواہر عزیزم کہ وجودش شادی بخش و صفاش مایہ آرامش من است۔

تقدیم بہ برادرانم کہ ہموارہ در طول دوران تحصیل متحمل زحامت بودند و وجودشان مایہ دلگرمی من است۔

تقدیر و شکر

پاس خدای را که سخوران، در ستودن او بماند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را کزاردن
توانند و سلام و دورد بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان و امدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته
بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز..

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، بازبان قاصرو
دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، پاس از انسانی است که هدف و غایت آفونش را
تأمین می کند و سلامت امانت های را که به دستش سپرده اند.

از استاد باکالات، شایسته، بصور و با تقوا؛ جناب آقای دکتر مسعود پارسى نژاد که در کمال سه صدر، با حسن خلق و فروتنی،
از هیچ کلى در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهمائی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛ شکر می کنم
و از استاد فرزانه و گرامی، جناب آقای دکتر مسعود تجریشی که زحمت مشاوره و راهمائی این پایان نامه را متقبل
شدند، پاسگذارم.

از اساتید محترم؛ جناب آقای دکتر عبدالمجید لیاقت، دکتر حامد ابراهیمیان، دکتر مجید دلاور و دکتر وحید رضاوردی نژاد که
زحمت داورى این پایان نامه را متقبل شدند؛ کمال شکر و قدردانی را دارم.

چکیده

منابع آب سطحی و زیرزمینی اغلب به صورت ترکیبی در بخش کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این منابع به طور پیوسته در مقیاس‌های مکانی یا زمانی مختلف در یک دشت مانند حوضه دریاچه ارومیه تعامل دارند. بیش از دو دهه از روند خشک شدن سریع دریاچه ارومیه می‌گذرد. وضعیت تلخ کنونی دریاچه حاصل مجموعه‌ای از عوامل انسانی و طبیعی در دهه‌های گذشته است. احیای دریاچه ارومیه یک اولویت ملی در سال‌های اخیر بوده است. علاوه بر کاهش جریان آب رودخانه‌ها به دلیل خشک‌سالی‌ها، دلیل اصلی کاهش ورود آب به دریاچه برداشت بی‌رویه از منابع آبی بالادست بوده است. به طور مشخص، اندازه‌گیری‌های میدانی در ایستگاه هیدرومتری خروجی رودخانه مهاباد واقع در حوضه چای مهاباد، کاهش شدید سهم جریان آب به دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد. پیش‌فرض اصلی این مطالعه بر این اساس تعریف شده است که بازتخصیص آب مورد نیاز کشاورزی از منابع تلفیقی با هدف بالا بردن سهم آب زیرزمینی و کاهش سهم آب‌های سطحی بتواند در افزایش سهم حقاچه دریاچه و نهایتاً احیای دریاچه ارومیه نقش موثری داشته باشد. فلذا ارزیابی طرح‌های احتمالی تخصیص مجدد تلفیقی از هر دو منبع آب بر سرنوشت اجزای بیلان آب در این منطقه آبی رقابتی مهم است. برای این منظور از ترکیب مدل‌های آب‌های سطحی (SWAT) و زیرزمینی (MODFLOW-NWT) به عنوان یک مدل یکپارچه برای امکان‌سنجی و بررسی اثرات بازتخصیص منابع آب تلفیقی استفاده شد. هدف اصلی این مطالعه ارزیابی اجزای آب سطحی و زیرزمینی دشت مهاباد با استفاده از مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW-NWT به عنوان یک مدل جامع و یکپارچه بود. علاوه بر این، نتیجه عملی این مطالعه بررسی الگوی تخصیص ترکیبی آب سطحی و زیرزمینی برای تأمین نیاز آبیاری محصولات منطقه با استفاده از مدل ترکیبی است. این امر با تعیین حداکثر برداشت مطمئن از آب‌های زیرزمینی در تأمین نیازهای آبیاری در مناطق مختلف و در سال‌های مختلف هیدرولوژیکی با حفظ تعادل نسبی آب زیرزمینی در درازمدت بدون هیچ‌گونه تأثیر منفی بر جریان رودخانه‌ها در مناطق مختلف مورد مطالعه انجام شد. مدل SWAT-MODFLOW-NWT برای دشت مهاباد کالیبره و اعتبارسنجی شد. ابتدا مدل SWAT بر اساس رواناب، تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات عمده منطقه و مدل MODFLOW-NWT بر اساس نوسانات سطح آب زیرزمینی واسنجی و اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که مدل SWAT به خوبی قادر به شبیه‌سازی جریان سطحی برای دوره واسنجی ($R^2 = 0.87$; $NSE = 0.85$) و دوره اعتبارسنجی ($R^2 = 0.89$; $NSE = 0.92$) بود. ارزیابی مدل SWAT در تخمین تبخیر و تعرق واقعی (ET_a) در مقایسه با خروجی مدل سنجش از دور WaPOR قابل قبول بود. نتایج شبیه‌سازی مدل برای اجزای سطح آب زیرزمینی و تعادل آب زیرزمینی نیز در دوره‌های واسنجی ($R^2 = 0.94$; $NSE = 0.91$) و اعتبارسنجی ($R^2 = 0.93$; $NSE = 0.89$) رضایت‌بخش بود. معیارهای آماری RMSE برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب $0/35$ و $0/34$ متر بود. به‌طور کلی تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW-NWT قادر به شبیه‌سازی صحیح اجزای بیلان آب‌های سطحی و زیرزمینی است. به‌طور خاص، تعامل بین منابع آب سطحی و زیرزمینی در مناطق مختلف برای سهم متناوب تأمین آب کشاورزی از هر دو منبع آبی شبیه‌سازی شد. پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل ترکیبی آب سطحی و زیرزمینی SWAT-MODFLOW-NWT، مجموعه‌ای از سناریوها برای افزایش سهم آب‌های زیرزمینی برای تأمین آب آبیاری و ارزیابی نتیجه آن‌ها بر رهاسازی آب سطحی به دریاچه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد ظرفیت برداشت بالاتری از آبخوان در نواحی شمالی و مرکزی به دلیل سطح بالای سطح آب (۱ تا ۳ متر) وجود دارد. علاوه بر

این، مدیریت افت سطح آب زیرزمینی منجر به کاهش تلفات تبخیر مستقیم از آب‌های زیرزمینی، بهبود کیفیت خاک و تهویه در ناحیه ریشه و تسهیل عملکرد ماشین‌آلات با حفظ سطح مناسب آب زیرزمینی (در شرایط پایدار) می‌شود. نتایج نشان داد افزایش سهم تأمین آبیاری از آب‌های زیرزمینی نیز منجر به کاهش تخصیص تأمین آبیاری از آب‌های سطحی می‌شود که در نهایت می‌تواند رهاسازی آب به دریاچه ارومیه را افزایش دهد. با این حال، نتایج مطالعات شبیه‌سازی طولانی‌مدت نشان داد که پس از افزایش ۳۰ درصدی آب‌های زیرزمینی برای ۱۰ سال متوالی نسبت به شرایط موجود، سطح ایستابی حدود ۰/۲۵ متر تا ۰/۹۵ متر کاهش می‌یابد. برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی در درازمدت می‌تواند منجر به افزایش افت سطح ایستابی شود که در نهایت ممکن است منجر به ناپایداری منابع آبی در این منطقه شود. تحلیل شاخص‌های پایداری آب‌های زیرزمینی در شرایط فعلی و پس از اعمال سناریوها نشان داد که افزایش ۳۰ درصدی تأمین آبیاری از آب‌های زیرزمینی و کاهش ۳۰ درصدی از آب‌های سطحی نشان می‌دهد که طرح تخصیص آب تلفیقی مناسب تلقی می‌شود. کاهش تخصیص آب از آب‌های سطحی می‌تواند منجر به افزایش ۱۶ (۲۱٪) تا ۱۸ (۲۵٪) میلیون مترمکعب آب به دریاچه برای سال‌های مختلف شود. نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان راهنمای تخصیص بهینه و پایدار از منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه‌های رقابتی و بسیار شکننده مانند دریاچه ارومیه مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: دریاچه ارومیه، دشت مهاباد، پایداری، باز تخصیص منابع آب تلفیقی، SWAT-MODFLOW-NWT

فهرست مطالب

| | |
|---------|---|
| ۱..... | فصل اول - مقدمه و کلیات..... |
| ۳..... | ۱- مقدمه..... |
| ۴..... | ۱-۱- ضرورت و اهمیت موضوع مطالعه..... |
| ۷..... | ۲-۱- اهداف تحقیق..... |
| ۸..... | ۳-۱- فرض ها و ملاحظات تحقیق..... |
| ۱۰..... | ۴-۱- نوآوری های تحقیق..... |
| ۱۱..... | فصل دوم- مبانی نظری مدل ها و پیشینه پژوهش..... |
| ۱۳..... | ۲- مقدمه..... |
| ۱۳..... | ۱-۲- مبانی نظری مدل ها..... |
| ۱۳..... | ۱-۱-۲- مبانی مدل SWAT..... |
| ۱۵..... | ۱-۱-۱-۲- آب وهوا..... |
| ۱۶..... | ۲-۱-۱-۲- رواناب سطحی..... |
| ۱۷..... | ۳-۱-۱-۲- آب زیرزمینی..... |
| ۱۹..... | ۴-۱-۱-۲- تبخیر و تعرق..... |
| ۱۹..... | ۵-۱-۱-۲- شبیه سازی نفوذ عمقی در مدل SWAT..... |
| ۲۰..... | ۶-۱-۱-۲- شبیه سازی مخزن سد در مدل SWAT..... |
| ۲۱..... | ۷-۱-۱-۲- مدیریت آب و زمین در مدل SWAT..... |
| ۲۲..... | ۸-۱-۱-۲- واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT..... |
| ۲۴..... | ۲-۱-۲- مبانی مدل MODFLOW..... |
| ۲۶..... | ۱-۲-۱-۲- مدل MODFLOW-NWT..... |
| ۲۸..... | ۲-۲-۱-۲- معادله عمومی جریان غیرماندگار آب های زیرزمینی..... |
| ۳۱..... | ۳-۲-۱-۲- حل عددی معادله ریاضی..... |
| ۳۲..... | ۴-۲-۱-۲- روش تفاضل محدود..... |
| ۳۴..... | ۵-۲-۱-۲- نحوه ی حل معادله عددی توسط MODFLOW..... |
| ۳۶..... | ۶-۲-۱-۲- بسته های شبیه سازی در مدل MODFLOW..... |
| ۴۵..... | ۷-۲-۱-۲- بسته حل معادله..... |
| ۴۷..... | ۸-۲-۱-۲- شرایط مرزی..... |
| ۴۷..... | ۹-۲-۱-۲- واسطه گرافیکی برای MODFLOW..... |
| ۵۰..... | ۱۰-۲-۱-۲- قابلیت های نرم افزار GMS..... |
| ۵۰..... | ۱۱-۲-۱-۲- عوارض در GMS..... |
| ۵۱..... | ۱۲-۲-۱-۲- انواع زیر برنامه های GMS..... |
| ۵۳..... | ۱۳-۲-۱-۲- واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل MODFLOW..... |
| ۵۵..... | ۳-۱-۲- مبانی مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW..... |
| ۶۶..... | ۲-۲- مروری بر مطالعات صورت گرفته..... |
| ۶۷..... | ۱-۲-۲- مدل SWAT..... |
| ۶۷..... | ۱-۲-۲-۲- پیش بینی جریانات سطحی..... |

| | |
|----------|--|
| ۶۹..... | ۲-۲-۲-۲- مؤلفه‌های بیلان آب..... |
| ۷۲..... | ۲-۲-۲- مدل آب زیرزمینی (مدل MODFLOW)..... |
| ۷۲..... | ۲-۲-۱- ارتباط و اندرکنش بین آب سطحی و زیرزمینی..... |
| ۷۶..... | ۲-۲-۲- ارزیابی و شبیه‌سازی گزینه‌های مختلف مدیریتی..... |
| ۸۵..... | ۲-۳- روند تکاملی مدل‌ها در بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی..... |
| ۹۰..... | ۲-۴- مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW..... |
| ۹۶..... | ۲-۵- جمع‌بندی..... |
| ۱۰۱..... | فصل سوم- مواد و روش‌ها..... |
| ۱۰۴..... | ۳-۱- منطقه‌ی مورد مطالعه..... |
| ۱۰۵..... | ۳-۱-۱- شبکه آبیاری و زهکشی مهاباد..... |
| ۱۰۹..... | ۳-۱-۲- هواشناسی..... |
| ۱۰۹..... | ۳-۱-۲-۱- ایستگاه‌های هواشناسی..... |
| ۱۰۹..... | ۳-۱-۲-۲- پارامترهای هواشناسی..... |
| ۱۱۲..... | ۳-۱-۳- اقلیم منطقه..... |
| ۱۱۳..... | ۳-۱-۳- بررسی اثرات اقلیم بر وضعیت منابع آب..... |
| ۱۱۴..... | ۳-۱-۳-۱- شاخص SPI..... |
| ۱۱۵..... | ۳-۱-۳-۲- شاخص SPEI..... |
| ۱۱۶..... | ۳-۱-۳-۳- شاخص RDI..... |
| ۱۱۷..... | ۳-۱-۳-۴- شاخص SDI..... |
| ۱۱۹..... | ۳-۱-۴- وضعیت منابع و مصارف در منطقه..... |
| ۱۱۹..... | ۳-۱-۴-۱- مصارف از منابع آب سطحی..... |
| ۱۲۰..... | ۳-۱-۴-۲- مصارف از آب زیرزمینی..... |
| ۱۲۱..... | ۳-۲- تهیه مدل مفهومی..... |
| ۱۲۳..... | ۳-۲-۱- چارچوب مدل آب سطحی (SWAT)..... |
| ۱۲۴..... | ۳-۲-۱-۱- مدل رقومی ارتفاع (DEM)..... |
| ۱۲۵..... | ۳-۲-۱-۲- نقشه خاک..... |
| ۱۲۹..... | ۳-۲-۱-۳- نقشه کاربری اراضی..... |
| ۱۳۴..... | ۳-۲-۱-۴- داده‌های اقلیمی..... |
| ۱۳۶..... | ۳-۲-۱-۵- شبکه رودخانه‌ای منطقه..... |
| ۱۳۷..... | ۳-۲-۱-۶- داده‌های ایستگاه‌های آب‌سنجی..... |
| ۱۴۰..... | ۳-۲-۱-۷- داده‌های مدیریت گیاهی و عملکرد گیاه مورد استفاده در زیرحوضه‌ها..... |
| ۱۴۴..... | ۳-۲-۱-۸- تعیین نیاز آبی (تبخیر و تعرق) محصولات زراعی و باغی..... |
| ۱۴۶..... | ۳-۲-۱-۹- تبیین زیرواحدهای هیدرولوژیکی (HRUها)..... |
| ۱۴۶..... | ۳-۲-۱-۱۰- نحوه اعمال روش‌های مختلف آبیاری و مدیریت آن به هر یک از HRUها..... |
| ۱۴۸..... | ۳-۲-۲- چارچوب مدل آب زیرزمینی (MODFLOW)..... |
| ۱۵۰..... | ۳-۲-۲-۱- شبکه‌بندی آبخوان..... |
| ۱۵۱..... | ۳-۲-۲-۲- نوسانات سطح ایستابی در آبخوان..... |
| ۱۵۳..... | ۳-۲-۲-۳- شبکه چاه‌های مشاهده‌ای..... |