



دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه به عنوان تحقق بخشی از شرایط دریافت درجه کارشناسی ارشد

گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب

شبیه سازی اندرکنش آبخوان و جریان سطحی در سناریوهای مختلف بهره برداری از منابع  
آب (مطالعه موردی : دشت ارومیه)

نگارش

مصطفی جوادیان

استاد راهنما

دکتر مسعود تجریشی

دی ۱۳۹۶

# دریاچه ارومیه

••

و هر آنکه قلبش برای احیای آن می تپد...

## تشکر و قدردانی

در ابتدا لازم است از استاد بزرگوار و گرانقدر خود، آقای دکتر تجریشی تشکر ویژه نمایم که در تمامی زمینه‌ها مرا یاری کردند و حقیقتاً پدرانه مرا مورد لطف خود قرار دادند. امیدوارم شایستگی لازم را برای لطف و مرحمت ایشان دارا بوده باشم.

از آقای مهندس محمدمهدی آقایی، دانشجوی دکترای مهندسی آب دانشگاه شریف برای کمک‌های همه‌جانبه ایشان در مسیر مدلسازی تشکر ویژه می‌نمایم.

از آقای دکتر ماساهیرو تاسومی، استاد دانشگاه میازاکی ژاپن برای راهنمایی‌هایی که در مورد محاسبه میزان تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از سنجش‌ازدور داشتند نیز تشکر می‌نمایم.

از سرکار خانم خیرآبادی، مسئول دفتر آقای دکتر تجریشی به جهت حمایت‌های اجرایی در کار صمیمانه تشکر می‌نمایم.

از کارکنان دفتر برنامه‌ریزی و تلفیق ستاد احیای دریاچه ارومیه به‌خصوص آقای دکتر چهره‌نگار به جهت فراهم نمودن شرایط سفر به منطقه مطالعاتی تشکر می‌نمایم.

از سازمان‌های مدیریت منابع آب، آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، زمین‌شناسی، شرکت زمین فیزیک، آب و فاضلاب آذربایجان غربی، شرکت مه‌اب قدس و هواشناسی به خاطر در اختیار قرار دادن اطلاعات لازم صمیمانه تشکر می‌نمایم.

در انتها نیز لازم است تا از همکاران عزیز خود در مرکز تحقیقات سنجش‌ازدور دانشگاه شریف تشکر نمایم که بستر مناسب برای بخش سنجش‌ازدور کار را فراهم نمودند و قطعاً غالب پیشرفت‌های به وجود آمده در محاسبه آب مصرفی کشاورزی دشت ارومیه بدون ظرفیت‌های موجود در این مرکز ممکن نبود.

## چکیده

منابع آب زیرزمینی از اهمیت بالایی در بیلان هیدرولوژیکی کشورهایی با اقلیم گرم و خشک همچون ایران برخوردار هستند. حوضه آبریز دریاچه ارومیه یکی از مناطقی می‌باشد که در آن بخش قابل توجهی از نیاز آبی با اتکا به منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود و طی دو دهه اخیر به دلیل بهره‌برداری نامتوازن با کاهش سطح آب دریاچه به سبب کاهش آب ورودی روبه‌رو شده است. سیستم آب سطحی و زیرزمینی در این حوضه دارای اثرات متقابل بر یکدیگر می‌باشند. از این رو هرگونه بهبود در نحوه بهره‌برداری از آبخوان‌های این حوضه می‌تواند به روند تأمین نیاز آبی دریاچه کمک نماید. در این تحقیق، شبیه‌سازی اندرکنش آبخوان و جریان سطحی در دشت ارومیه در سناریوهای مختلف بهره‌برداری با استفاده از مادفلو مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدیریت صحیح منابع آب در دشت ارومیه که بالاترین میزان برداشت آب زیرزمینی با حجم برداشت ۴۶۸ میلیون مترمکعب آب در سال را در میان تمامی زیرحوضه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه دارد می‌تواند نقش مهمی در بهبود وضعیت دریاچه ایفا کند. روش مورد استفاده در این تحقیق، مدلسازی آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور می‌باشد. از آنجایی که میزان تغذیه آب زیرزمینی در مناطق تحت کشاورزی شدید مانند دشت ارومیه بسیار متأثر از میزان آب مصرفی در بخش کشاورزی می‌باشد، برای تخمین میزان تغذیه آب زیرزمینی از تبخیر و تعرق واقعی محاسبه‌شده از الگوریتم‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق واقعی که نمایانگر آب مصرف‌شده در بخش کشاورزی است استفاده گردید. برای اینکار ابتدا روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق واقعی بررسی و سپس این روش‌ها در منطقه مطالعاتی با یکدیگر مقایسه شدند تا مناسب‌ترین روش انتخاب شود. نتایج نشان داد که الگوریتم بیلان انرژی SEBAL از دقت بیش‌تری در منطقه مطالعاتی برخوردار است. در ادامه مدلسازی آبخوان دشت با تهیه مدل مفهومی آبخوان انجام و نتایج برای دو سال آبی (از مهر ۸۷ تا شهریور ۸۹) واسنجی گردید. نتایج نشان داد اصلی‌ترین عامل تغذیه‌کننده آبخوان دشت ارومیه، نفوذ آب برگشتی کشاورزی و اصلی‌ترین عامل تخلیه‌کننده آن، برداشت از چاه‌های بهره‌برداری منطقه است. روند کلی تغییرات زمانی تراز آب نیز نشان می‌دهد که در فروردین‌ماه و اردیبهشت‌ماه سطح آب بیشتر از سایر ماه‌های سال بوده و در ماه‌های گرم سال نیز (تابستان) سطح آب کمترین مقدار خود را تجربه می‌کند. نتایج نشان داد که سالانه ۹۴ میلیون مترمکعب به‌طور مستقیم از آبخوان تبخیر می‌شود که عمده این نواحی در حاشیه رودخانه‌های نازلوچای و باراندوزچای قرار دارند. صحت‌سنجی مدل نیز با اجرای مدل در سال آبی ۹۰-۸۹ انجام شد که تغییر محسوس در خطای مدل مشاهده نشد. جهت ارائه راهکارهای مناسب برای مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی این دشت نیز دو سناریو برای یک دوره ده‌ساله از سال اعتبارسنجی طراحی شد. در سناریو اول به میزان ۴۰ درصد از تغذیه آبخوان توسط آب برگشتی کشاورزی و همین‌طور ۴۰ درصد از برداشت چاه‌ها به‌طور توأمان در یک دوره پنج‌ساله کاسته شد. نتایج نشان داد با اعمال این طرح سطح آب زیرزمینی در تمامی نقاط دشت افت قابل‌ملاحظه‌ای را به‌خصوص در نواحی میانی تجربه خواهد کرد، اما سالانه از میزان هدررفت ۵۲ میلیون مترمکعب آب از طریق تبخیر از آبخوان جلوگیری خواهد شد. در سناریو دوم در مناطق با تبخیر بالا زهکش‌هایی طراحی شد. نتایج در این سناریو نشان داد که با ایجاد این زهکش‌ها سالانه می‌توان ۵۷ میلیون مترمکعب از تبخیر کاست. با توجه به هدف اصلی که بهبود وضعیت دریاچه ارومیه است، این تحقیق سناریو اول را به‌عنوان یک راهکار اجرایی در دشت ارومیه پیشنهاد می‌کند.

کلمات کلیدی: مدلسازی، آب زیرزمینی، آبخوان، دشت ارومیه، دریاچه ارومیه، سنجش‌ازدور، SEBAL

## فهرست مطالب

ا	چکیده
ب	فهرست مطالب
ح	فهرست جدول ها
ی	فهرست شکل ها
م	فهرست علائم
۱	فصل ۱ معرفی پژوهش
۱	۱-۱ مقدمه.....
۳	۲-۱ ضرورت انجام تحقیق.....
۴	۳-۱ اهداف تحقیق و سولات.....
۵	۴-۱ مراحل انجام تحقیق.....
۶	۵-۱ دامنه و فرضیات تحقیق.....
۶	۶-۱ نرم افزارهای اصلی مورد استفاده.....
۷	۷-۱ مروری بر مطالب فصل ها.....
۸	فصل ۲ مبانی نظری و پیشینه پژوهش
۸	۱-۲ مقدمه.....
۸	۲-۲ تاریخچه مطالعات قبلی در مناطق مختلف دنیا.....
۱۵	۳-۲ تاریخچه مطالعات قبلی در مورد الگوریتم SEBAL.....
۱۷	۴-۲ مفاهیم پایه در آب های زیرزمینی.....
۱۷	۲-۴-۱ آب زیرزمینی.....

۱۸	۲-۴-۲ آبخوان
۱۹	۲-۴-۳ آبدهی ویژه
۲۰	۲-۴-۴ ذخیره مخصوص
۲۰	۲-۴-۵ ضریب ذخیره
۲۱	۲-۴-۶ ضریب هدایت هیدرولیکی
۲۱	۲-۵ معادله جریان در محیط‌های متخلخل
۲۴	۲-۶ روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق واقعی
۲۴	۲-۶-۱ روش‌های برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور
۳۷	۲-۶-۲ برآورد تبخیر و تعرق واقعی توسط تبخیر و تعرق مرجع و ضریب محصول
۳۹	۲-۶-۳ برآورد تبخیر و تعرق واقعی توسط محصولات آماده‌ی بین‌المللی
۵۱	۲-۷ سنجنده‌های مورد استفاده
۵۱	۲-۷-۱ سنجنده MODIS
۵۲	۲-۷-۲ سنجنده و ماهواره TRMM
۵۳	۲-۸ جمع بندی فصل
۵۴	<b>فصل ۳ معرفی منطقه مطالعاتی</b>
۵۴	۳-۱ مقدمه
۵۴	۳-۲ موقعیت جغرافیایی
۵۵	۳-۳ آب و هواشناسی
۵۶	۳-۳-۱ دما (درجه حرارت)
۵۶	۳-۳-۲ بارندگی

۵۷	..... ۳-۳-۳ تبخیر
۵۸	..... ۴-۳-۳ آب های سطحی
۵۹	..... ۴-۳ زمین شناسی
۶۰	..... ۱-۴-۳ تکتونیک
۶۱	..... ۲-۴-۳ ژئوفیزیک
۶۴	..... ۵-۳ شبکه چاه های پیزومتری
۶۷	..... ۶-۳ وضعیت کشاورزی دشت ارومیه
۶۸	<b>فصل ۴ معرفی مدل آب زیرزمینی مادفلو</b>
۶۸	..... ۱-۴ مقدمه
۶۸	..... ۲-۴ مدل سازی آب زیرزمینی
۶۹	..... ۳-۴ معادله جریان آب زیرزمینی
۷۱	..... ۴-۴ انتخاب مدل
۷۳	..... ۵-۴ مدل مادفلو
۷۳	..... ۶-۴ داده های مورد نیاز در مدل مادفلو
۷۴	..... ۱-۶-۴ حل عددی معادله ریاضی
۷۴	..... ۲-۶-۴ نحوه تجزیه مکانی و زمانی مدل
۷۵	..... ۳-۶-۴ معادلات تفاضل محدود
۸۰	..... ۴-۶-۴ نحوه ی حل معادله عددی توسط مادفلو
۸۱	..... ۵-۶-۴ ساختار مادفلو
۸۳	..... ۷-۶-۴ بسته های شبیه سازی در مدل مادفلو

۸۴	..... ۱-۷-۴ بسته شبیه‌ساز جریان داخلی
۸۵	..... ۲-۷-۴ بسته شبیه‌ساز تغذیه
۸۵	..... ۳-۷-۴ بسته شبیه‌ساز جریان رودخانه
۸۷	..... ۴-۷-۴ بسته شبیه‌ساز چاه
۸۷	..... ۵-۷-۴ بسته شبیه‌ساز تبخیر و تعرق
۸۸	..... ۸-۴ بسته حل معادله
۸۹	..... ۱-۸-۴ بسته اطلاعات پایه
۸۹	..... ۹-۴ رابط گرافیکی مدل مادفلو
۹۰	..... ۱۰-۴ فلوجارت مدل‌سازی
۹۲	<b>فصل ۵ نتایج و تجزیه و تحلیل آن‌ها</b>
۹۲	..... ۱-۵ مقدمه
۹۳	..... ۲-۵ مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق واقعی
۹۳	..... ۱-۲-۵ مقایسه نتایج تبخیر و تعرق ECMWF و الگوریتم SEBAL
۹۶	..... ۲-۲-۵ مقایسه نتایج تبخیر و تعرق MOD16 و الگوریتم SEBAL
۱۰۰	..... ۳-۲-۵ مقایسه نتایج تبخیر و تعرق GLEAM و الگوریتم SEBAL
۱۰۳	..... ۴-۲-۵ مقایسه نتایج تبخیر و تعرق WaPOR و الگوریتم SEBAL
۱۱۸	..... ۵-۲-۵ مقایسه نتایج ET محصولات جهانی و الگوریتم SEBAL با داده‌های زمینی
۱۲۲	..... ۶-۲-۵ انتخاب روش منتخب برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی
۱۲۴	..... ۷-۲-۵ نتایج تبخیر و تعرق واقعی الگوریتم SEBAL در محدوده مطالعاتی
۱۳۱	..... ۸-۲-۵ برآورد میزان نفوذ عمقی به آبخوان دشت ارومیه



۱۳۵	..... ۳-۵ مدل‌سازی
۱۳۵	..... ۱-۳-۵ هندسه‌ی مدل
۱۳۵	..... ۲-۳-۵ تغییرات مکانی خصوصیات مدل
۱۳۶	..... ۳-۳-۵ شبکه‌بندی
۱۳۷	..... ۴-۳-۵ شرایط مرزی
۱۳۸	..... ۵-۳-۵ تقسیم‌بندی زمانی مدل
۱۳۸	..... ۶-۳-۵ تراز اولیه آب زیرزمینی
۱۳۹	..... ۷-۳-۵ چاه‌های مشاهده‌ای
۱۴۳	..... ۴-۵ اجرای مدل
۱۴۳	..... ۱-۴-۵ واسنجی مدل
۱۴۳	..... ۲-۴-۵ واسنجی ضریب هدایت هیدرولیکی
۱۴۴	..... ۳-۴-۵ واسنجی ضریب ذخیره لایه آبدار
۱۴۴	..... ۴-۴-۵ واسنجی ضریب نفوذ
۱۴۵	..... ۵-۴-۵ واسنجی ضریب هدایت کف رودخانه‌ها
۱۴۵	..... ۵-۵ نتایج مدل‌سازی
۱۴۹	..... ۶-۵ بیان آب دشت
۱۴۹	..... ۷-۵ تحلیل نتایج مدل
۱۵۱	..... ۸-۵ تفسیر نتایج مدل‌سازی
۱۵۴	..... ۹-۵ خطای مدل
۱۵۹	..... ۱۰-۵ صحت سنجی

## فصل ۶ نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۶۱

۱-۶ مقدمه ..... ۱۶۱

۲-۶ سناریو مرجع ..... ۱۶۲

۳-۶ سناریو شماره ۱ ..... ۱۶۴

۴-۶ سناریو شماره ۲ ..... ۱۶۷

۵-۶ نتیجه گیری ..... ۱۶۸

۶-۶ پیشنهادات ..... ۱۷۰

۱۷۲

مراجع

## فهرست جدول ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲ آبدهی مخصوص در برخی از مواد رسوبی (برحسب درصد) (علیزاده، ۱۳۸۷).....	۱۹
جدول ۲-۲ آبدهی ویژه و ضریب هدایت هیدرولیکی خاکها (برحسب متر در روز) (علیزاده، ۱۳۸۷).....	۲۱
جدول ۳-۲ مشخصات سنجنده‌های ارائه‌دهنده رطوبت سطحی خاک.....	۳۵
جدول ۴-۲ داده‌های دینامیک مورد نیاز در روش ET Look.....	۳۶
جدول ۵-۲ داده‌های ایستای مورد نیاز در روش ET Look.....	۳۶
جدول ۶-۲ محصولات آماده تبخیر و تعرق جهانی.....	۴۰
جدول ۷-۲ پایگاه‌داده‌های قابل دانلود تارنمای ECMWF.....	۴۲
جدول ۸-۲ خصوصیات ورودی‌های مدل تبخیر تعرق GLEAM (Miralles et al.,2011).....	۴۷
جدول ۹-۲ مشخصات اطلاعات خروجی از سامانه WaPOR (تارنمای سامانه WaPOR).....	۴۹
جدول ۱۰-۲ برنامه زمان‌بندی توسعه سامانه WaPOR.....	۵۱
جدول ۱-۳ دمای متوسط ماهانه و سالانه در ارتفاعات و دشت محدوده مطالعاتی ارومیه (سانتی‌گراد).....	۵۶
جدول ۲-۳ بارندگی متوسط ماهانه و سالانه در ارتفاعات و دشت محدوده مطالعاتی ارومیه (میلی‌متر).....	۵۷
جدول ۳-۳ متوسط تبخیر از تشت ماهانه و سالانه در ارتفاعات و دشت محدوده مطالعاتی ارومیه (میلی‌متر).....	۵۷
جدول ۴-۳ توزیع ماهانه تبخیر از سطح آزاد ارتفاعات و دشت محدوده مطالعاتی ارومیه (میلی‌متر).....	۵۷
جدول ۵-۳ خلاصه اطلاعات ژئوفیزیک دشت ارومیه.....	۶۱
جدول ۱-۴ پارامترهای مورد استفاده در مدلسازی آب زیرزمینی با استفاده از مدل مادفلو.....	۷۴
جدول ۲-۴ لیست بسته‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان در مادفلو.....	۸۴
جدول ۱-۵ مقایسه اطلاعات خروجی از سامانه WaPOR و مرکز RSRC.....	۱۰۴
جدول ۲-۵ متوسط اختلاف مکانی تبخیر و تعرق سالانه (بر حسب میلی‌متر) در محدوده‌های ارتفاعی بین نتایج مرکز RSRC و سامانه WaPOR.....	۱۱۰
جدول ۳-۵ متوسط تبخیر و تعرق اراضی کشاورزی به تفکیک زیرحوضه‌های مهم حوضه دریاچه ارومیه (میلی‌متر).....	۱۱۳
جدول ۴-۵ میزان تبخیر و تعرق میانگین (بر حسب میلی‌متر) در حوضه دشت میاندوآب و همچنین اختلاف میان دو سنجنده لندست و مادیس با سامانه WaPOR (سال ۲۰۱۴ میلادی).....	۱۱۴
جدول ۵-۵ آب مصرفی مشاهدتی مناطق منتخب حوضه آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود در سال ۱۳۹۳-۱۳۹۲.....	۱۲۰
جدول ۶-۵ مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق واقعی.....	۱۲۳
جدول ۷-۵ مشخصات چاه‌های مشاهده‌ای دشت ارومیه.....	۱۴۱
جدول ۸-۵ نتایج واسنجی ضریب هدایت هیدرولیکی (برحسب متر بر روز).....	۱۴۴
جدول ۹-۵ نتایج واسنجی ضریب ذخیره.....	۱۴۴
جدول ۱۰-۵ نتایج واسنجی ضریب هدایت کف رودخانه (برحسب متر بر روز).....	۱۴۵

جدول ۱۱-۵ بیلان آب زیرزمینی آبخوان دشت ارومیه (برحسب میلیون مترمکعب در سال) ..... ۱۴۹

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲ لایه آبخوان آزاد.....	۱۸
شکل ۲-۲ لایه آبدار تحت فشار.....	۱۹
شکل ۳-۲ حجم کنترل در نظر گرفته شده برای نوشتن معادله بقای جرم در آبخوان آزاد.....	۲۲
شکل ۴-۲ شکل شماتیک بیلان انرژی در سطح زمین.....	۲۵
شکل ۵-۲ روندنمای الگوریتم SEBAL (مرکز سنجش از دور دانشگاه شریف، ۱۳۹۴).....	۳۱
شکل ۶-۲ ساختار شماتیک الگوریتم ETLook (WaterWatch, 2013).....	۳۶
شکل ۷-۲ فلوجارت الگوریتم تخمین ET روزانه از داده‌های MODIS (Mu et al., 2013).....	۴۴
شکل ۸-۲ ساختار شماتیک الگوریتم تبخیر تعرق پایگاه GLEAM.....	۴۶
شکل ۹-۲ تغییرات بهره‌وری آب به ازای تولید محصول.....	۴۹
شکل ۱-۳ راست: تصویر هوایی از محدوده مطالعاتی. چپ: موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی ارومیه.....	۵۵
شکل ۲-۳ تشت تبخیر ایستگاه ارومیه.....	۵۸
شکل ۳-۳ رودخانه‌های اصلی دشت ارومیه.....	۵۹
شکل ۴-۳ نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی ارومیه.....	۶۰
شکل ۵-۳ نقشه سه‌بعدی آبخوان سه‌لایه‌ی دشت ارومیه.....	۶۳
شکل ۶-۳ نقشه ترازهای فوقانی و تحتانی سه‌لایه‌ی آبخوان دشت ارومیه.....	۶۳
شکل ۷-۳ نقشه هم‌قابلیت انتقال آبخوان دشت ارومیه (آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، ۱۳۹۴).....	۶۴
شکل ۸-۳ شبکه چاه‌های پیژومتری آبخوان دشت ارومیه.....	۶۵
شکل ۹-۳ نمودار تغییرات تراز آب مشاهداتی درازمدت آبخوان شدت ارومیه (شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی).....	۶۶
شکل ۱۰-۳ راست: نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی چپ: نقشه هم‌تراز آب زیرزمینی.....	۶۶
شکل ۱۱-۳ راست: سطوح زیر کشت مختلف دشت ارومیه چپ: نقشه چاه‌های بهره‌برداری دشت ارومیه.....	۶۷
شکل ۱-۴ جدول مقایسه خصوصیات مدل‌های عددی رایج در شبیه‌سازی آب زیرزمینی (Christoph et al., 2012).....	۷۲
شکل ۲-۴ تجزیه مکانی یک سیستم آب زیرزمینی برای حل به روش تفاضل محدود.....	۷۵
شکل ۳-۴ جریان یک بعدی مابین دو سلول مجاور.....	۷۶
شکل ۴-۴ نمای سه بعدی از سلول‌های در نظر گرفته شده برای توسعه معادله پایستگی جرم در یک سلول.....	۷۷
شکل ۵-۴ نمودار شماتیک تغییرات هد برحسب زمان در سلول (i,j,k).....	۷۹
شکل ۶-۴ نحوه‌ی محاسبه‌ی توزیع هد به روش تکرار در مدل مادفلو.....	۸۱
شکل ۷-۴ فلوجارت نرم افزار مادفلو در بخش شبیه‌سازی فرایند جریان آب زیرزمینی.....	۸۳
شکل ۸-۴ تفاوت بین نمونه واقعی از ارتباط بین رودخانه و آبخوان با نمونه شبیه‌سازی شده در مادفلو.....	۸۶
شکل ۹-۴ پارامترهای مورد استفاده در محاسبه هدایت پذیری کف رودخانه.....	۸۶

- شکل ۴-۱۰ پروفیل مورد استفاده در مادفلو برای تخمین میزان تبخیر و تعرق..... ۸۸
- شکل ۴-۱۱ محیط کاربری نرم افزار GMS 10.1..... ۹۰
- شکل ۴-۱۲ فلوجارت مدل ساز آب زیر زمینی با استفاده از مدل مادفلو..... ۹۱
- شکل ۵-۱ لایه تبخیر تعرق ECMWF در محدوده حوزه آبریز دریاچه ارومیه در ماه‌های March تا June سال ۲۰۱۰... ۹۳
- شکل ۵-۲ لایه تبخیر تعرق ECMWF در محدوده حوزه آبریز دریاچه ارومیه در ماه‌های July تا September سال ۲۰۱۰..... ۹۴
- شکل ۵-۳ مقایسه نتایج ET ماهانه ECMWF و الگوریتم SEBAL در محدوده حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰... ۹۵
- شکل ۵-۴ مقایسه نتایج ET ماهانه ECMWF و الگوریتم SEBAL در محدوده حوضه دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵... ۹۵
- شکل ۵-۵ مقایسه نتایج ET ماهانه MOD16 و الگوریتم SEBAL در محدوده حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰... ۹۶
- شکل ۵-۶ اختلاف لایه تبخیر تعرق MOD16 و الگوریتم SEBAL در ماه‌های April تا July سال ۲۰۱۰..... ۹۷
- شکل ۵-۷ اختلاف لایه تبخیر تعرق MOD16 و الگوریتم SEBAL در ماه‌های August و September سال ۲۰۱۰... ۹۸
- شکل ۵-۸ مقایسه نتایج ET ماهانه MOD16 و الگوریتم SEBAL در محدوده اراضی زراعی و باغی حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی..... ۹۹
- شکل ۵-۹ نمودار همبستگی نتایج ET بدست آمده از الگوریتم SEBAL و MOD16..... ۹۹
- شکل ۵-۱۰ ارتفاع تبخیر تعرق محصول پایگاه GLEAM ( May تا August سال ۲۰۱۰ میلادی)..... ۱۰۱
- شکل ۵-۱۱ ارتفاع تبخیر تعرق محصول پایگاه GLEAM ( September تا December سال ۲۰۱۰ میلادی)..... ۱۰۲
- شکل ۵-۱۲ مقایسه نتایج ET ماهانه GLEAM و الگوریتم SEBAL در سال ۲۰۱۰..... ۱۰۳
- شکل ۵-۱۳ نقشه برآورد تبخیر و تعرق توسط سامانه WaPOR و مرکز RSRC (سال ۲۰۱۰)..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۴ نقشه برآورد تبخیر و تعرق توسط سامانه WaPOR و مرکز RSRC (سال ۲۰۱۴)..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۵ اختلاف مکانی محصولات تبخیر و تعرق سامانه WaPOR و مرکز RSRC در حوضه دریاچه ارومیه (۲۰۱۰)..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۶ اختلاف مکانی محصولات تبخیر و تعرق سامانه WaPOR و مرکز RSRC در حوضه دریاچه ارومیه (۲۰۱۴)..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۷ بررسی هیستوگرام برای نقشه‌های تبخیر و تعرق در سال ۲۰۱۴ میلادی- الف- هیستوگرام مربوط به مرکز RSRC ب- هیستوگرام مربوط به سامانه WaPOR..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۸ متوسط مقادیر تبخیر و تعرق در حوض آبریز دریاچه ارومیه (۲۰۱۴ میلادی)..... ۱۱۲
- شکل ۵-۱۹ نمودار میانگین ارتفاع تبخیر و تعرق در دشت میاندوآب (MODIS, Landsat و سامانه WaPOR)..... ۱۱۴
- شکل ۵-۲۰ تفاوت ارتفاعی مقادیر بارش و تبخیر و تعرق سالانه در اراضی دیم در سال ۲۰۱۰..... ۱۱۶
- شکل ۵-۲۱ تفاوت ارتفاعی مقادیر بارش و تبخیر و تعرق سالانه در اراضی دیم در سال ۲۰۱۴..... ۱۱۷
- شکل ۵-۲۲ مقایسه مقادیر ET محصولات جهانی و الگوریتم SEBAL با مقادیر لایسیمتر تبریز در سال ۲۰۱۰..... ۱۱۹
- شکل ۵-۲۳ منطقه‌بندی بخشی از حوضه آبریز زرينه رود و سیمینه رود ( مهندسین مشاور یکم، ۱۳۹۵)..... ۱۲۰
- شکل ۵-۲۴ مقایسه مقادیر آب مصرفی مشاهداتی با الگوریتم SEBAL و محصول WaPOR..... ۱۲۱
- شکل ۵-۲۵ تصاویر پیکسل سرد انتخابی در روستای باراندوز..... ۱۲۵

- شکل ۲۶-۵ نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی دشت ارومیه از مهر ۸۷ تا اردیبهشت ۸۸ (واحد: میلی‌متر در ماه)..... ۱۲۶
- شکل ۲۷-۵ نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی دشت ارومیه از خرداد ۸۸ تا دی ۸۸ (واحد: میلی‌متر در ماه)..... ۱۲۷
- شکل ۲۸-۵ نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی دشت ارومیه از بهمن ۸۸ تا شهریور ۸۹ (واحد: میلی‌متر در ماه)..... ۱۲۸
- شکل ۲۹-۵ نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی دشت ارومیه از مهر ۸۹ تا اردیبهشت ۹۰ (واحد: میلی‌متر در ماه)..... ۱۲۹
- شکل ۳۰-۵ نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی دشت ارومیه از خرداد ۹۰ تا دی ۹۰ (واحد: میلی‌متر در ماه)..... ۱۳۰
- شکل ۳۱-۵ محدوده‌های تجزیه شده برای اعمال تغذیه آبخوان..... ۱۳۱
- شکل ۳۲-۵ برآورد میزان تغذیه آبخوان در منطقه شهری ارومیه..... ۱۳۲
- شکل ۳۳-۵ بررسی میزان نرخ تغذیه آبخوان توسط نزولات جوی در سال ۱۳۹۵..... ۱۳۴
- شکل ۳۴-۵ شبکه بندی مدل آب زیر زمینی آبخوان دشت ارومیه..... ۱۳۶
- شکل ۳۵-۵ مرز های تعیین شده برای مدل با استفاده از هد پیزومترى..... ۱۳۸
- شکل ۳۶-۵ تراز اولیه آب برای شروع مدل سازی..... ۱۳۹
- شکل ۳۷-۵ محل پیزومتر ها بر روی نقشه منطقه مطالعاتی..... ۱۴۰
- شکل ۳۸-۵ اختلاف مقادیر محاسباتی مدل در محل پیزومترها با مقادیر مشاهداتی از مهر ۱۳۸۷ تا اردیبهشت ۱۳۸۸..... ۱۴۶
- شکل ۳۹-۵ اختلاف مقادیر محاسباتی مدل در محل پیزومترها با مقادیر مشاهداتی از خرداد ۸۸ تا دی ۸۸..... ۱۴۷
- شکل ۴۰-۵ اختلاف مقادیر محاسباتی مدل در محل پیزومترها با مقادیر مشاهداتی از بهمن ۸۸ تا شهریور ۸۹..... ۱۴۸
- شکل ۴۱-۵ جهت جریان هیدرولیک در دشت در لایه سوم..... ۱۵۲
- شکل ۴۲-۵ میزان تغذیه و زهکشی رودخانه های عبوری از دشت (بر حسب متر مکعب در روز)..... ۱۵۳
- شکل ۴۳-۵ نقشه توزیع تبخیر صورت گرفته از آبخوان در لایه های مختلف ( برحسب مترمکعب در روز)..... ۱۵۴
- شکل ۴۴-۵ نمودار مجموع خطای اندازه گیری شده در پیزومتر های در گام های زمانی مدل سازی..... ۱۵۵
- شکل ۴۵-۵ نماد پیزومترها در مدلسازی..... ۱۵۵
- شکل ۴۶-۵ رگرسیون بین مقادیر مدلسازی و مشاهداتی پیزومترها از مهر ۸۷ تا اردیبهشت ۸۸..... ۱۵۶
- شکل ۴۷-۵ رگرسیون بین مقادیر مدلسازی و مشاهداتی پیزومترها از خرداد ۸۸ تا دی ۸۸..... ۱۵۷
- شکل ۴۸-۵ رگرسیون بین مقادیر مدلسازی و مشاهداتی پیزومترها از بهمن ۸۸ تا شهریور ۸۹..... ۱۵۸
- شکل ۴۹-۵ اختلاف مقادیر محاسباتی مدل در محل پیزومترها با مقادیر مشاهداتی در دوره صحت سنجی از مهر ۸۹ تا شهریور ۹۰..... ۱۶۰
- شکل ۱-۶ نمودار تغییرات تراز سطح آب در قسمت غربی آبخوان (سناریو مرجع)..... ۱۶۲
- شکل ۲-۶ نمودار تغییرات تراز سطح آب در قسمت میانی آبخوان(سناریو مرجع)..... ۱۶۳
- شکل ۳-۶ نمودار تغییرات تراز سطح آب در قسمت شرقی آبخوان(سناریو مرجع)..... ۱۶۳
- شکل ۴-۶ نمودار تغییرات تراز سطح آب در قسمت غربی آبخوان(سناریو اول)..... ۱۶۵
- شکل ۵-۶ نمودار تغییرات تراز سطح آب در قسمت میانی آبخوان(سناریو اول)..... ۱۶۵
- شکل ۶-۶ نمودار تغییرات تراز سطح آب در قسمت شرقی آبخوان(سناریو اول)..... ۱۶۶
- شکل ۷-۶ بالا: میزان تبخیر در سناریوی مرجع پایین: میزان تبخیر در سناریوی دوم (مترمکعب در روز)..... ۱۶۷

## فهرست علائم

$c_p$	air specific heat	J/kg/K
$d$	zero plane displacement	m
$d_{e-s}$	relative earth-sun distance	-
$d_r$	inverse squared relative earth-sun distance	-
ET	actual evapotranspiration rate	mm/hr
$ET_r$	reference evapotranspiration	mm/hr
G	soil heat flux	$W/m^2$
H	sensible heat flux	$W/m^2$
k	von Karman's constant	0.41
L	Monin-Obukhuv length	m
$L_\lambda$	spectral radiance for band $\lambda$	$W/m^2 / sr/\mu m$
$r_{ah}$	aerodynamic resistance to heat transport	s/m
$R_n$	net radiation flux	$W/m^2$
$\downarrow SR$	incoming shortwave radiation	$W/m^2$
$\downarrow LR$	incoming longwave radiation	$W/m^2$
$\uparrow LR$	outgoing longwave radiation	$W/m^2$
$R_c$	corrected thermal radiance from the surface	$W/m^2 / sr/\mu m$
$R_p$	path radiance in the 10.4 – 12.5 $\mu m$ band	$W/m^2 / sr/\mu m$
$R_{sky}$	narrow band downward thermal radiation for a clear sky	$W/m^2 / sr/\mu m$
$T_a$	near surface air temperature	K
$T_s$	surface temperature	K
u	wind velocity	m/s
$u_*$	friction velocity	m/s
z	Height	m
$z_{om}$	momentum roughness length	m
$\alpha$	surface albedo	-
$\alpha_{path-radiance}$	albedo path radiance	-
$\alpha_{toa}$	albedo at top of atmosphere	-
$\beta$	solar elevation angle	degrees
$\gamma$	aspect angle of the pixel	radians
$\delta$	declination of the earth	radians
$\epsilon_0$	broad band surface emissivity	-
$\epsilon_{NB}$	narrow band surface emissivity	-
$\epsilon_a$	atmospheric emissivity	-
$\theta$	solar incidence angle	degrees
$\lambda$	latent heat of vaporization	J/kg
$\lambda ET$	latent heat flux	$W/m^2$
$\rho$	air density	$kg/m^3$



$\rho_\lambda$	reflectivity for band $\lambda$	-
$\sigma$	Stefan-Boltzmann constant	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ /K}^4$
$\tau_{\text{sw}}$	shortwave transmissivity of air	-
$\tau_{\text{NB}}$	narrow band transmissivity of air	-
$\phi$	latitude of the pixel	radians
$\Psi_h$	stability correction for heat transport	-
$\Psi_m$	stability correction for momentum transport	-
$\omega$	mountain wind speed weighting coefficient	-
$\omega_\lambda$	weighting coefficient for band $\lambda$	-

## فصل ۱ معرفی پژوهش

### ۱-۱ مقدمه

امروزه یکی از نگرانی‌های اصلی جوامع بشری محدودیت منابع طبیعی موجود در زمین و عدم تطابق آن با نیازهای بشر می‌باشد. این مسئله باعث گردیده است که تعداد زیادی از دانشمندان تلاش خود را معطوف به ارائه راهکارهای مناسب جهت استفاده‌ی صحیح و بهینه از این منابع نمایند. در این میان محدودیت منابع آب شیرین در دسترس و تقاضای بالا برای مصرف آن به یکی از چالش‌های اصلی کارگزاران این حوزه تبدیل گردیده است. برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تأمین آب شیرین موردنیاز بشر بوده است که در کشور ما نیز از قدمت بالایی برخوردار می‌باشد. این منبع ارزشمند طبیعی که در حدود ۷۰ درصد از کل منابع آب شیرین در دسترس جهان را تشکیل داده است، یک مزیت نسبی برای مناطق دربردارنده‌ی آن به حساب می‌آید، که در صورت عدم اهتمام کافی در حفظ و بهره‌برداری از آن منجر به بروز مشکلات فراوانی در روند توسعه‌ی این مناطق خواهد شد.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک که غالب دشت‌های کشور ما را نیز شامل می‌شود، به دلیل کمبود منابع آب سطحی و سهولت برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی، وابستگی مردم در تأمین آب موردنیازشان به منابع آب زیرزمینی بیشتر از سایر نقاط دنیا می‌باشد. همچنین در بخشی از این مناطق که از شرایط مناسبی برای پرورش محصولات باغی و زراعی برخوردار هستند درآمد حاصل از کشاورزی نقش بسزایی را در امرار معاش مردم دارد، لذا آب شیرین به دلیل مصرف بالایش در تولید محصولات کشاورزی و در عین محدودیت منابع در دسترس آن، به‌عنوان مبنای توسعه قرار می‌گیرد و پیشرفت در عرصه‌های اقتصادی، اجتماعی و سیاسی معطوف به برنامه‌ریزی دقیق و دور بینانه در این بخش می‌گردد. از طرف دیگر در صورت فقدان برنامه‌ی صحیح مدیریتی، روند توسعه در این مناطق با برداشت‌های بی‌رویه از منابع آبی به‌ویژه از منابع آب زیرزمینی همراه می‌گردد. افت تراز آب ناشی از برداشت‌های بی‌رویه علاوه بر اثرات

مخرب بر ساختمان آبخوان باعث کاهش میزان تخلیه‌ی آب از سفره‌های آب زیرزمینی به مجاری آب سطحی می‌شود و به دلیل به مخاطره انداختن نیازهای اکولوژیکی منابع طبیعی در تضاد با الگوی توسعه پایدار در این مناطق قرار می‌گیرد.

محدودیت منابع آب و استفاده نامطلوب و غیراقتصادی از آن، عامل اصلی محدودکننده توسعه کشاورزی و افزایش تولیدات غذایی در کشور می‌باشد. این مسئله لزوم اتخاذ تصمیمات مناسب در راستای هدایت مصرف آب به صورت بهینه را نشان می‌دهد. تجربیات به دست آمده از مدیریت مصرف آب در نقاط مختلف دنیا نشان داده است که در اغلب مواردی که بدون ارزیابی شرایط موجود اقدام به برنامه‌ریزی جهت توسعه و یا بهبود استفاده از منابع گردیده است، به علت عدم درک صحیح از وضعیت موجود برنامه‌های در نظر گرفته شده نتوانسته‌اند در مرحله‌ی اجرا از نتایج مطلوبی برخوردار باشند. لذا ارزیابی مستمر کارایی مصرف آب در سطوح مختلف حوضه، شبکه‌های آبیاری و مزرعه به منظور تعیین وضعیت موجود، شناخت نقاط ضعف و قوت و یافتن راهکارهای کاربردی جهت بهبود شرایط موجود ضروری می‌باشد (عمادزاده، ۱۳۸۶).

مدل هیدرولوژیکی آبخوان می‌تواند تغییرات وضعیت آبخوان را در اثر تنش‌های مختلف آبی که بر روی آن اعمال می‌شود نشان دهد، یا به عبارت دیگر ابزاری است که عکس‌های آبخوان را در مقابل تغذیه و برداشت پیش‌بینی می‌نماید. به همین جهت می‌توان با مدل‌سازی آب زیرزمینی ضمن شناخت وضعیت موجود آبخوان، رفتار آبخوان را در سناریوهای مختلف بهره‌برداری از آن پیش‌بینی نمود. با توجه به اینکه ایجاد تغییر در محیط طبیعی می‌تواند منجر به بروز آثار غیرقابل بازگشت شود و یا جبران آن با صرف هزینه‌های بسیار زیادی همراه باشد و در صورت اجرایی شدن یک تصمیم اشتباه تبعات ناگواری را شاهد خواهیم بود، لذا قبل از اجرای برنامه‌های مدیریتی پیش‌بینی آثار آن بر روی آبخوان از اهمیت بالایی برخوردار است، به همین دلیل از مدل آب زیرزمینی به عنوان ابزار مناسب جهت بهره‌برداری بهینه از آبخوان، نظارت و اعمال مدیریت مناسب بر منابع آب زیرزمینی استفاده می‌کنیم.

مدل‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های عددی شناخت کافی از وضعیت آبخوان و ارتباط آن با سایر منابع آبی را در اختیار ما قرار داده و بررسی تأثیر عوامل مختلف روی تغییرات منابع آب زیرزمینی را تسهیل می‌نماید. برآورد میزان تغذیه آبخوان که عمدتاً از دو منبع آب مصرفی در بخش کشاورزی و نزولات جوی نشأت می‌گیرد، همواره یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها در بحث مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی می‌باشد که می‌توان با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور تا حد مناسبی علی‌الخصوص در آبخوان‌های آبرفتی مرتفع گردد. استفاده از مدل آب زیرزمینی و بهبود کارایی آن با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور، موجب می‌گردد تا شناخت مناسبی از منابع آب زیرزمینی جهت بهره‌برداری مناسب از آن‌ها حاصل گردد.

## ۱-۲ ضرورت انجام تحقیق

کشور ایران در یک منطقه خشک و نیمه خشک واقع شده است. متوسط بارندگی بلندمدت کشور حدود ۲۵۰ میلی متر در سال است که تقریباً معادل یک سوم متوسط بارندگی جهان است می باشد و درعین حال میزان تبخیر در آن در حدود سه برابر متوسط دنیا برآورد شده است. از کل منابع آبی که هر سال در کشور استحصال می شود، حدود ۹۴ درصد آن در بخش کشاورزی، ۵ درصد در بخش شرب و بهداشت و ۱ درصد در بخش صنعت مصرف می گردد. به عقیده بیشتر صاحب نظران مدیریت منابع آب در کشورهای که با بحران آبی مواجه شده اند در صورتی می تواند موفقیت آمیز باشد که محور اصلی آن بهبود بهره وری آب در بخش کشاورزی که عنوان عمده ترین مصرف کننده ی آب شناخته می شود باشد ( Christoph et al., 2012).

حوضه آبریز دریاچه ارومیه اگرچه از لحاظ ریزش های جوی و رواناب تولید شده از جایگاه مناسبی نسبت به سایر نقاط کشور برخوردار می باشد، ولی نظر به اینکه میزان آب تولید شده تکافوی اراضی مستعد و قابل کشت را نمی دهد و توزیع بارندگی از نظر زمانی متناسب با نیازهای کشاورزان نمی باشد، برای تأمین کمبود آب آبیاری و رفع سایر نیازهای آبی، حفر چاه و بهره برداری از آبخوان های آبرفتی به تدریج رواج یافته است. با رشد رو به تزاید جمعیت و در پی آن افزایش سطح زیر کشت در دهه های اخیر و با توجه به عدم کفایت آب های سطحی تنظیم شده در پاسخ دهی به نیازهای آبی، بهره برداری از منابع آب زیرزمینی از رشد چشمگیری برخوردار شده و باعث ایجاد افت سطح آب در تعداد قابل توجهی از آبخوان های آبرفتی حوضه آبریز دریاچه ارومیه و یا کاهش میزان تغذیه جریانات سطحی از این آبخوان ها شده است (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۲).

دشت ارومیه به عنوان یکی از اصلی ترین زیرحوضه های واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، بخش قابل توجهی از تولیدات محصولات کشاورزی این حوضه را به خود اختصاص داده است. این دشت به تنهایی در حدود ۲۵ درصد از کل برداشت های آب زیرزمینی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه را به خود اختصاص داده است. تراکنش بالای آبی دشت ارومیه سبب شده است تا این دشت نقش مهمی را در حل معضل کم آبی به وجود آمده برای دریاچه ی ارومیه ایفا نماید (دوستی رضایی و همکاران، ۱۳۹۰).

برنامه ریزی جهت مدیریت منابع آب نیاز به شناخت درست از وضعیت هر یک از منابع آبی موجود و نحوه ی ارتباط این منابع با یکدیگر دارد. لذا به منظور شناخت دقیق تر از منابع آبی منطقه و باهدف کمی کردن تأثیرات توسعه کاربری زمین، نحوه ی بهره برداری از سیستم آبیاری، نوع کشت و غیره بر آب زیرزمینی و نحوه ی اثرگذاری آن بر جریانات سطحی عبوری از دشت، مدل عددی آب زیرزمینی که از انطباق بالایی با سامانه هیدروژئولوژی آبخوان برخوردار است بکار گرفته شده و با استفاده از آن میزان

تغییر در تراز آبخوان در مواجهه با تنش‌های مختلف هیدرولوژیکی پیش‌بینی شده است. همچنین میزان تغییر در تغذیه رودخانه‌های اصلی عبوری از دشت که متأثر از تغییرات سطح آب در آبخوان می‌باشد محاسبه شده است. نتایج حاصل از این بررسی می‌تواند در تصمیم‌سازی‌ها آتی در جهت مدیریت بهینه منابع آبی حوضه آبریز مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به اینکه صحت نتایج مدل‌سازی منوط به استفاده از داده‌های معتبر و به میزان مناسب می‌باشد و جمع‌آوری برخی از داده‌های مورد نیاز مانند آب مصرفی در بخش کشاورزی هزینه‌بر بوده و دارای دقت کافی نمی‌باشد، از تصاویر ماهواره‌ای که دارای مزایای زیادی نسبت به اندازه‌گیری‌های میدانی برخوردار هستند جهت رفع این مشکل و بالا بردن دقت مدل استفاده شده و با تلفیق مدل آب زیرزمینی و تکنیک‌های سنجش‌ازدور، نتایجی که از دقت مناسبی جهت اتخاذ تصمیمات مدیریتی در بخش مدیریت منابع آب در منطقه می‌باشد استخراج شده است.

مدلسازی آب زیرزمینی با استفاده از کد مادفلو<sup>۱</sup> که تطابق بالایی با سامانه هیدرولوژیکی آبخوان دارد، می‌تواند شناخت کافی از وضعیت آبخوان و ارتباط آن با سایر منابع آبی را در اختیار ما قرار داده و بررسی تأثیر عوامل مختلف روی تغییرات منابع آب زیرزمینی را تسهیل نماید. آب مصرفی در بخش کشاورزی که اصلی‌ترین مصرف‌کننده‌ی منابع آب در منطقه می‌باشد، می‌تواند با به کار بردن الگوریتم‌های سنجش‌ازدوری همچون SEBAL<sup>۲</sup> که یک مدل ترمودینامیکی جهت تخمین میزان تبخیر و تعرق واقعی<sup>۳</sup> می‌باشد، محاسبه گردد. میزان بارش نیز به همین ترتیب می‌تواند با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدوری تخمین زده شود و در فرایند مدلسازی آب زیرزمینی به منظور محاسبه میزان تغذیه<sup>۴</sup> آبخوان بکار گرفته شوند. بهره‌گیری از ابزار سنجش‌ازدور در مدلسازی آب زیرزمینی علاوه بر بهبود نتایج مدل می‌تواند نقصان‌های داده‌ای مدل را جبران نماید (حمزه‌خانی، ۱۳۹۴).

### ۳-۱ اهداف تحقیق و سولات

اهداف تعیین‌شده جهت ارائه‌ی این پایان‌نامه عبارت‌اند از:

۱. بررسی روش‌های مختلف برآورد میزان تغذیه آبخوان با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور
۲. شناخت هیدرولوژی حاکم بر سیستم آب زیرزمینی دشت ارومیه و نحوه‌ی ارتباط آن با منابع آب سطحی.

---

<sup>۱</sup> MODFLOW

<sup>۲</sup> Surface Energy Balance Algorithm for Land

<sup>۳</sup> ETa

<sup>۴</sup> Recharge

۳. ارائه یک الگوی مدیریتی مناسب جهت برداشت از منابع آب زیرزمینی دشت ارومیه مطابق با اهداف توسعه پایدار و با محوریت افزایش میزان آب ورودی به دریاچه ارومیه.

همچنین در این پایان‌نامه به سؤالات زیر پاسخ داده شده است:

۱. مناسب‌ترین روش برای تخمین میزان تغذیه آبخوان دشت ارومیه از طریق محاسبه مصارف کشاورزی کدام است؟

۲. سهم آب زیرزمینی در شکل‌دهی جریان رودخانه‌های اصلی عبوری از دشت به چه میزان است و چگونه از وضعیت آبخوان تأثیر خواهند پذیرفت؟

۳. چه محل‌هایی برای برداشت از آب زیرزمینی به منظور افزایش آب دهی جریان‌ات سطحی ورودی به دریاچه ارومیه مناسب است؟

۴. تغییر در الگوی کشت، کاربری اراضی و سیستم آبیاری بر تراز آب زیرزمینی چه تأثیری بر وضعیت آبخوان دشت ارومیه خواهند داشت؟

#### ۱-۴ مراحل انجام تحقیق

برای پاسخ به سؤالات مطرح‌شده در قسمت قبل، تصمیم به مدلسازی آبخوان دشت ارومیه گرفته شد. بدین منظور ابتدا با مراجعه به سازمان‌های متولی اندازه‌گیری، جمع‌آوری و صحت‌سنجی اطلاعات مربوط به منابع آب، هواشناسی و زمین‌شناسی کشور، داده‌های مربوط به میزان برداشت از آب زیرزمینی، مشخصات جریان‌ات سطحی، چاه‌های مطالعاتی، اطلاعات هواشناسی، خصوصیات و پارامترهای آبخوان و نقشه‌ی سنگ‌شناسی و خاکشناسی منطقه جمع‌آوری و دسته‌بندی شدند. با توجه به عدم برآورد دقیق و با تفکیک مکانی مناسب از آب مصرف‌شده در بخش کشاورزی و میزان بارندگی در منطقه، سعی گردید با استفاده از پردازش داده‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای و محصولات سنجش‌ازدوری که از پایگاه‌های اطلاعاتی آنلاین تهیه‌شده بود، نقشه‌های توزیع تبخیر و تعرق واقعی تولید گردد تا بتوان با استفاده از آن‌ها نرخ بازگشت آب به سفره آب زیرزمینی را محاسبه نمود. از داده‌های زمین‌شناسی و اطلاعات منابع آب منطقه نیز برای ساخت مدل مفهومی از آب زیرزمینی که شامل ساختمان، مرزهای آبخوان، چاه‌های بهره‌برداری و رودخانه‌های عبوری از دشت استفاده شد. پس از ساخت مدل مفهومی که دربرگیرنده تمام عوامل اصلی تأثیرگذار بر رفتار هیدرولوژیکی آبخوان می‌بود، این مدل به مدل عددی که قابل حل با استفاده از کد مادفلو<sup>۱</sup> باشد، تبدیل گردید.

با اجرای مدل عددی ساخته‌شده در حالت یکنواخت و استخراج نتایج آن، مدل برای واسنجی در این حالت و تعیین دقیق‌تر بخشی از پارامترها که تشخیص آن‌ها در هنگام ساخت مدل مفهومی امکان‌پذیر

<sup>۱</sup> MODFLOW

نمود، آماده گردید. پس از اصلاح این پارامترها در محدوده‌ی مجاز تعیین شده، مدل غیریکنواخت با استفاده از توزیع زمانی داده‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی مورد استفاده در ساخت مدل مفهومی یکنواخت تهیه و واسنجی شد. واسنجی مدل در این حالت بروی توزیع زمانی برخی از پارامترهای هیدرولوژیکی صورت پذیرفت و مدل با استفاده از داده‌های سال مجاور اعتبارسنجی گردید. با اطمینان از عملکرد مناسب مدل و درک کامل آن از وضعیت آبخوان، با توجه به درک به وجود آمده از وضعیت آبخوان چند سناریو بهره‌برداری برای پاسخ به سؤالات بر روی آن اعمال گردید و نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

## ۱-۵ دامنه و فرضیات تحقیق

- فرضیات در نظر گرفته شده در این تحقیق به منظور تهیه مدل آب زیرزمینی به شرح زیر می باشد:
۱. در این مطالعه بخش اصلی آبخوان به مساحت ۶۶۳ کیلومترمربع که عمده مزارع و باغات کشاورزی بر روی آن قرار گرفته، از کل آبخوان دشت به مساحت ۶۸۷ کیلومترمربع جدا گردیده و به عنوان محدوده‌ی بیلان و مدلسازی در نظر گرفته شده است.
  ۲. میزان نفوذ به آبخوان در ماه‌های گرم سال (فروردین تا مهر) ناشی از دو عامل آبیاری مزارع کشاورزی و نزولات جوی در نظر گرفته شده است.
  ۳. میزان نفوذ به آب زیرزمینی در ماه‌های سرد (آبان تا اسفند) سال که آبیاری صورت نمی پذیرد، تنها ناشی از نزولات جوی در نظر گرفته شده است.
  ۴. درصد نفوذ از آب ناشی از بارندگی و کشاورزی با استناد به گزارش شرکت مهاب قدس به دست آمده است (مهاب قدس، ۱۳۹۱).
  ۵. تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط الگوریتم SEBAL برابر با مصرف خالص آب در بخش کشاورزی در نظر گرفته شده است (چه از طریق آبیاری و چه از طریق بارش‌های جوی).
  ۶. جانمایی و اطلاعات مربوط به مدلسازی رودخانه‌ها با توجه به نقشه‌های شرکت آب منطقه‌ای و اشل رودخانه در ایستگاه‌های هیدرومتری صورت پذیرفته است.

## ۱-۶ نرم افزارهای اصلی مورد استفاده

مدلسازی آب زیرزمینی در این تحقیق با استفاده از کد عددی مادفلو صورت پذیرفته است. رابط گرافیکی مورد استفاده در اجرای این کد نرم افزار GMS 10.1 می باشد که ضمن سهولت مراحل مدل سازی، قابلیت‌های فراوانی در ساخت و ورود داده از پایگاه‌های مختلف اطلاعاتی و با فرمت‌های گوناگون را دارد. لایه‌های اطلاعات مورد استفاده در این نرم افزار با بهره‌گیری از مجموعه نرم افزارهای Arc GIS نسخه

۱۰,۵ مرجع دهی مکانی شده‌اند، همچنین از این نرم‌افزار به منظور تولید و درون‌یابی لایه‌های اطلاعاتی موردنیاز نیز استفاده شده است. پردازش تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از نرم‌افزار ILWIS 3.3 انجام گردیده و تصحیح هندسی و عملیات ریجستر کردن این تصاویر در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 صورت پذیرفته است. عملیات واسنجی مدل اصلی در حالت پایدار و ناپایدار به ترتیب با استفاده از نرم‌افزارهای PEST و Parallel PEST که موجب کاهش زمان واسنجی گردیده، انجام شده است.

## ۱-۷ مروری بر مطالب فصل‌ها

فصل دوم شامل مبانی نظری و پیشینه تحقیق می‌باشد که در غالب دو بخش مرور ادبیات مرتبط با موضوع مورد مطالعه در داخل و خارج از کشور، و معرفی مفاهیم علمی و پایه مورد استفاده در این تحقیق می‌باشد. در فصل سوم منطقه مورد مطالعه با استفاده از آمار و اطلاعات اخذ گردیده از سازمان‌های مرجع تولید داده از جمله شرکت مادر تخصصی منابع آب و سازمان هواشناسی، و همچنین اطلاعات مندرج در گزارش‌ها و مقالاتی که به بررسی وضعیت منابع آب منطقه مورد مطالعه پرداخته‌اند به صورت مکفی معرفی گردیده است. فصل چهارم ضمن معرفی مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی به شرح کامل مدل مادفلو و بسته‌های شبیه‌سازی آن که در این مطالعه از آن‌ها استفاده شده پرداخته شده است. در فصل پنجم نحوه انجام عملیات مدل‌سازی در آبخوان دشت ارومیه با استفاده از ابزارهای مطرح شده شرح داده شده است. در فصل آخر نیز در کنار بررسی نتایج مدل‌سازی، از نتایج به دست آمده و همچنین سناریوهای توسعه داده شده به منظور پاسخ‌گویی به سؤالات تحقیق استفاده شده، نهایتاً همچنین جمع‌بندی و پیشنهادات ارائه شده به منظور ادامه تکمیل و تدقین پژوهش در این بخش گنجانده شده است.