



ستاد احیای دریاچه ارومیه



دانشگاه صنعتی شریف
مرکز تحقیقات سنجش از دور (RSRC)

تحلیل روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی در حوضه‌ی دریاچه ارومیه با استفاده از تصاویر MODIS بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

نگارنده

محمد سینا جهانگیر

کد سند

OC11RN9806051

شهریور ۱۳۹۸

شناسه سند			
عنوان سند		بررسی روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی در حوضه‌ی دریاچه ارومیه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی با استفاده از تصاویر MODIS	
نوع سند	گزارش فنی (TR)	خلاصه مدیریتی (ES)	پروپوزال (PR)
	یادداشت تحقیقی (RN)	یادداشت فنی (TN)	مقاله (AR) خروجی غیر رسمی (RM)
کد سند	RN - ۹۸ - ۲۲		
شماره قرارداد			
تاریخ قرارداد			
کارفرما	ستاد احیای دریاچه ارومیه		
گروه فنی	محمد دانش یزدی، مسعود تجریشی		
مدیر اجرایی			
مدیر فنی طرح			
کارشناسان فنی طرح	محمد سینا جهانگیر		
تاریخ انتشار	۱۳۹۸		
ویرایش	دوم		

نوع سند	تعریف
گزارش فنی (TR)	Peer review شده با فرایند داوری خیلی دقیق و جدی و دارای محتوی علمی مفصل و ویرایش شده ادبی و فنی
یادداشت فنی (TN)	همانند گزارش فنی است با این تفاوت که مطالب مفصل نبوده و داوری جدی نشده است.
خلاصه مدیریتی (ES)	خلاصه‌ای از یک کار تحقیقاتی یا مطالعاتی که برای مدیران و بارگزاری روی سایت تنظیم شده است.
یادداشت تحقیقی (RN)	جهت پاسخگویی به سوالات و ابهامات و یا آموزش و یادگیری از تکنیک‌ها و الگوریتم‌هایی که کاربرد آن برای مطالعات و پروژه‌های مرکز می‌باشد
خروجی غیر رسمی (RM)	نتیجه کار تحقیقی که تکمیل نشده و لذا داوری جدی نشده و ارزیابی عمیق و ویراستاری روی آن صورت نگرفته و به صورت غیر رسمی برای اطلاع عموم در اختیار قرار گرفته است.
پروپوزال (PR)	پیشنهادیه انجام پروژه
مقاله (AR)	مقالات فارسی و انگلیسی

پیش‌گفتار

قرارگیری دریاچه ارومیه در آستانه بحرانی زیست‌محیطی در مقیاس بین‌المللی در سال‌های منتهی به سال ۱۳۹۲ شمسی و مطالبات مردم شریف منطقه، هیأت محترم وزیران را بر آن داشت که در اولین جلسه خود در دولت یازدهم، طی مصوبه شماره ۴۹۵۰۳/۱۱۱۱۴۶ مورخ ۱۳۹۲/۰۵/۲۸، تشکیل کارگروه نجات دریاچه ارومیه را به تصویب رسانند که پس از بررسی‌های گروه‌های کارشناسی، ۱۹ طرح اولویت‌دار جهت نجات دریاچه ارومیه در جلسه ۱۳۹۲/۰۷/۱۶ کارگروه نجات دریاچه ارومیه تصویب گردید.

به منظور تمرکز و تسریع در روند اقدامات مرتبط با احیای دریاچه ارومیه، پیشنهاد تشکیل «کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه» در جلسه مورخ ۱۳۹۲/۱۱/۰۲ هیأت محترم وزیران مطرح و به موجب اختیارات اصل ۱۳۸ قانون اساسی، طبق مصوبه شماره ۴۹۵۰۳/۱۷۰۰۹۲ مورخ ۱۳۹۲/۱۱/۱۲، مقرر گردید که ریاست کارگروه بر عهده معاون اول محترم رئیس‌جمهور باشد و جناب آقای دکتر عیسی کلانتری به عنوان دبیر کارگروه و مدیر اجرایی احیای دریاچه ارومیه تعیین گردیدند. ۷ وزیر، ۲ معاون رئیس‌جمهور و ۳ استاندار حوضه آبریز نیز به عنوان اعضای این کارگروه معرفی شدند.

در گام بعدی، ستاد احیای دریاچه ارومیه ضمن ایجاد کمیته‌های تخصصی شش‌گانه، ۲۰ کارگروه تخصصی، انجام مطالعات تطبیقی و ایجاد شوراهای منطقه‌ای، ضمن برگزاری ۹۸ جلسه متنوع کارشناسی و مدیریتی و بهره‌گیری از نظرات بیش از ۷۵۰ نفر از متخصصان داخلی و بین‌المللی در بازه زمانی ۱۳۶ روزه (از ۱۳۹۲/۱۱/۰۲ تا ۱۳۹۳/۰۳/۱۷)، اقدام به تدوین و اجرای یک نقشه راه جامع در راستای احیای دریاچه ارومیه نمود که نقشه راه مذکور در جلسه مورخ ۱۳۹۳/۰۴/۰۸ به ریاست رئیس‌جمهور محترم جناب آقای دکتر روحانی، ارائه و مورد تصویب قرار گرفت و دستور شروع عملیات اجرایی راه‌کارهای مصوب توسط ایشان صادر گردید. کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه نیز طی مصوبه شماره ۴۹۵۰۳/۵۷۵۴۲ مورخ ۱۳۹۳/۰۵/۲۵ به طور رسمی مسئولیت مطالعه و طراحی طرح نجات دریاچه ارومیه را به دانشگاه صنعتی شریف سپرد.

در کنار دستاوردهای میدانی متعدد حاصل از طرح ملی نجات دریاچه ارومیه از جمله قرار گرفتن دریاچه در مسیر احیای پایدار و رفع مخاطرات بهداشتی و سلامتی، نقش محوری دانشگاه‌های ملی و استانی در کلیه امور مطالعه و پایش، شاخصه‌ای کم‌نظیر در پروژه بوده که توانسته است ضمن خلق تعاملی پویا و چندسویه با دستگاه‌های اجرایی، روح اقدامات علمی-پژوهشی را در کالبد همه پروژه‌های ذیل طرح، جاری نمایند.

لذا با هدف شفاف‌سازی اقدامات مطالعاتی و پژوهشی انجام شده و نیز به منظور فراهم شدن امکان استفاده مجامع علمی در رشته‌های مختلف دانشگاهی از آب (هیدرولوژی، آب زیرزمینی، هیدرولیک و هیدرودینامیک)، محیط‌زیست، اکولوژی و لیمنولوژی گرفته تا اقتصاد و جامعه‌شناسی از دانش بومی تولید شده در این طرح ملی، کلیه مطالعات انجام شده توسط دبیرخانه کارگروه در کتابخانه مرکزی دانشگاه صنعتی شریف در دسترس پژوهشگران محترم قرار گرفته است. یقیناً تدارک مطالعه و پژوهش در این منابع بومی ارزشمند که حاصل سال‌ها تلاش مجدانه محققان تراز اول داخلی و بین‌المللی بوده، سرآغازی خواهد بود برای تداوم نهضت علمی شکل گرفته و به زودی با بروز جهشی علمی در بستر استثنایی پدید آمده، شاهد شکوفایی برکات این گردش آزاد اطلاعات در اقصی نقاط کشور خواهیم بود.

کلیه تعبیر، نتایج و تفاسیری که در این اثر ذکر شده‌اند، محصول تلاش‌های نویسندگان (یا نویسندگان) آن بوده و لزوماً منعکس‌کننده دیدگاه‌های دبیرخانه کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه نیست. لذا مسئولیت صحت کلیه اطلاعات و نتایجی که توسط این اثر در دسترس عموم قرار می‌گیرد، به عهده نویسندگان (یا نویسندگان) آن می‌باشد.

چکیده

میزان تبخیر و تعرق به عنوان یکی از مهمترین مؤلفه‌های چرخه‌ی هیدرولوژیکی می‌تواند به طور غیر مستقیم شاخصی از پتانسیل مقدار آب مصرفی در بخش کشاورزی باشد. هدف اصلی این یادداشت تحقیقی، بررسی روند تغییرات تبخیر و تعرق و همچنین تغییرات میزان مصرف آب کشاورزی در حوضه‌ی دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی است. نتایج به دست آمده از بکارگیری الگوریتم متریک (METRIC) برای تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر سنجنده‌ی MODIS حاکی از آن است که در فصول بهار و تابستان، مقادیر بیشینه روند در پیکسل‌ها بزرگ‌تر از مقادیر به‌دست‌آمده‌ی نظیر در مقایسه با بقیه‌ی فصل‌ها می‌باشند. با تعریف پنج کلاس کشاورزی، مرتع، دیم، بایر و شهری مشخص گردید که میزان روند تغییرات به صورت کلی در همه‌ی کلاس‌ها صعودی بوده ولی شیب تغییرات برای کلاس کشاورزی بزرگ‌تر از بقیه‌ی کلاس‌ها است. همچنین، روند افزایشی مقدار تبخیر و تعرق در حوضه به ویژه در اراضی کشاورزی در مطابقت با روند صعودی تغییرات تبخیر و تعرق گیاه مرجع و نیز روند نزولی مقدار بارش در حوضه است. با توجه به روند افزایشی سطح زیر کشت در حوضه و هم‌چنین تغییر احتمالی الگوی کشت در سالیان اخیر، و همچنین با در نظرگیری تغییرات کلی اقلیمی در حوضه (افزایش دما و کاهش بارش) می‌توان نتیجه گرفت که میزان برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی نیز در طی سالیان اخیر در حوضه افزایش یافته است؛ موضوعی که نگران‌کننده بوده و چالشی جدی برای سیاست‌های کاهش ۴۰ درصدی مصرف آب در بخش کشاورزی در آینده محسوب می‌شود.

کلمات کلیدی: تبخیر و تعرق واقعی، روند، تغییرات اقلیم، حوضه‌ی دریاچه ارومیه

فهرست مطالب

چکیده.....	۱
۱- مقدمه.....	۱
۱- روش انجام پژوهش.....	۲
۱-۱- محاسبه‌ی روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی.....	۲
۱-۲- مقادیر روند در اراضی کاربری مختلف.....	۲
۱-۳- پارامترهای آماری.....	۳
۱-۴- تغییرات تخمینی نسبی.....	۳
۲- نتایج به دست آمده.....	۴
۲-۱- مقادیر روند.....	۴
۲-۲- مقادیر روند به ازای کاربری‌های مختلف.....	۵
۲-۳- ارزیابی تغییرات تخمینی نسبی.....	۱۴
۲-۴- بررسی روند میزان بارش و ارتباط آن با روند تبخیر و تعرق.....	۲۱
۲-۵- مقایسه روند تبخیر و تعرق مرجع و مقایسه آن با روند تبخیر و تعرق محاسبه شده.....	۲۲
۲-۶- بررسی روند تغییرات اراضی کشاورزی در حوضه دریاچه ارومیه.....	۲۴
۲-۷- بررسی روند تغییرات تبخیر و تعرق در اطراف سد بوکان.....	۲۵
۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....	۲۸
۴- مراجع.....	۲۹

فهرست اشکال

- شکل ۱- ساختار کلی مدل توسعه داده شده جهت برآورد روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی..... ۳
- شکل ۲- اراضی کاربری تعریف گردیده در مطالعه جاری (سمیه سیما، ۱۳۹۴)..... ۴
- شکل ۳- مقادیر روند به دست آمده تبخیر و تعرق در حوضه دریاچه ارومیه (میلی متر در سال) برای ماه‌های ژانویه تا فوریه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی..... ۶
- شکل ۴- مقادیر روند به دست آمده تبخیر و تعرق در حوضه دریاچه ارومیه (میلی متر در سال) برای ماه‌های مارچ تا آپریل طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی..... ۷
- شکل ۵- مقادیر روند به دست آمده تبخیر و تعرق در حوضه دریاچه ارومیه (میلی متر در سال) برای ماه‌های می تا ژوئن طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی..... ۸
- شکل ۶- مقادیر روند به دست آمده تبخیر و تعرق در حوضه دریاچه ارومیه (میلی متر در سال) برای ماه‌های جولای تا آگوست طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی..... ۹
- شکل ۷- مقادیر روند به دست آمده تبخیر و تعرق در حوضه دریاچه ارومیه (میلی متر در سال) برای ماه‌های سپتامبر تا اکتبر طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی..... ۱۰
- شکل ۸- مقادیر روند به دست آمده تبخیر و تعرق در حوضه دریاچه ارومیه (میلی متر در سال) برای ماه‌های نوامبر تا دسامبر طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی..... ۱۱
- شکل ۹- مقادیر میانگین، بیشینه و کمینه‌ی روندهای به دست آمده (میلی متر در سال) در ماه‌های مختلف در بازه‌ی مطالعاتی..... ۱۲
- شکل ۱۰- مقادیر میانگین روندهای تبخیر و تعرق (میلی متر در سال) در ماه‌های مختلف در کلاسهای کشاورزی، دیم، مرتع، بایر و شهری..... ۱۲
- شکل ۱۱- مقادیر تغییرات نسبی روند تبخیر و تعرق برای ماه‌های ژانویه تا فوریه در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی..... ۱۵
- شکل ۱۲- مقادیر تغییرات نسبی روند تبخیر و تعرق برای ماه‌های مارچ تا آپریل در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی..... ۱۶
- شکل ۱۳- مقادیر تغییرات نسبی روند تبخیر و تعرق برای ماه‌های می تا ژوئن در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی..... ۱۷

- شکل ۱۴- مقادیر تغییرات نسبی روند تبخیر و تعرق برای ماه‌های جولای تا آگوست در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی..... ۱۸
- شکل ۱۵- مقادیر تغییرات نسبی روند تبخیر و تعرق برای ماه‌های سپتامبر تا اکتبر در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی..... ۱۹
- شکل ۱۶- مقادیر تغییرات نسبی روند تبخیر و تعرق برای ماه‌های نوامبر تا دسامبر در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی..... ۲۰
- شکل ۱۷- میزان بارش سالیانه در حوضه دریاچه ارومیه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی..... ۲۲
- شکل ۱۸- روند تغییرات (الف) رطوبت نسبی، (ب) دما و (ج) شیب تغییرات تبخیر و تعرق مرجع در ایستگاه ارومیه..... ۲۳
- شکل ۱۹- تغییرات اراضی مرتع و کشاورزی در حوضه بر اساس شاخص (الف) NDVI و (ب) LAI..... ۲۶
- شکل ۲۰- تصاویر منطقه مطالعاتی بوکان متعلق به دو سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶ (تصاویر برداشتی از Google Earth)..... ۲۷
- شکل ۲۱- منطقه مورد بررسی در حوالی سد بوکان..... ۲۷

۱- مقدمه

یکی از عوامل تأثیرگذار بر توسعه اقتصادی، کشاورزی و اجتماعی هر منطقه، مدیریت صحیح و بهینه منابع آبی آن منطقه است. حوضه دریاچه ارومیه نیز از این قاعده مستثنا نبوده، به طوری که یکی از مهم‌ترین راهکارهای احیای دریاچه ارومیه، مدیریت مصارف آب در زیرحوضه‌های بالادست است که دستیابی به این هدف، مستلزم در اختیار داشتن اطلاعات کافی در زمینه میزان مصرف آب در بخش‌های مختلف بخصوص کشاورزی است. برآورد پتانسیل آب قابل صرفه‌جویی برای انتقال به دریاچه به نوبه‌ی خود نیازمند برآورد هر چه دقیق‌تر تبخیر و تفرق در حوضه است. برای بررسی موارد دیگری همچون میزان تغییرات مصرف آب، زمان‌بندی آبیاری و میزان تخصیص آب برای هر محصول، بررسی روند تغییرات تبخیر و تفرق در حوضه و تحلیل زمانی آن می‌تواند مفید واقع شود.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی روند تغییرات تبخیر و تفرق در حوضه دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی است. به این منظور، با استفاده از لایه‌های تبخیر و تفرق به‌دست‌آمده از الگوریتم متریک^۱ (Allen et al., 2007)، شیب تغییرات تبخیر و تفرق در هر پیکسل برای بازه زمانی یاد شده محاسبه گردیده و برخی پارامترهای آماری این شیب‌ها برای کل حوضه و اراضی کاربری مختلف محاسبه گردیده‌اند. موضوعی که این تحقیق را از موارد مشابه صورت گرفته متمایز می‌سازد، بررسی پیکسل به پیکسل روند تغییرات تبخیر و تفرق واقعی در حوضه دریاچه-ی ارومیه طی دو دهه‌ی گذشته است.

مهم‌ترین سؤالاتی که این تحقیق قصد پاسخ به آن را دارد عبارت‌اند از:

- ۱- میزان تغییرات تبخیر و تفرق در کدام بخش از حوضه بیشتر است؟
 - ۲- در کدامیک از ماه‌های سال میزان تغییرات تبخیر و تفرق چشم‌گیرتر است؟
 - ۳- سری زمانی میانگین تغییرات تبخیر و تفرق ۱۷ ساله‌ی حوضه به چه نحوی است؟
 - ۴- ارتباط میان مقدار روندهای تغییرات به دست آمده و مقادیر روند دما و بارش در حوضه چگونه است؟
 - ۵- روند تغییر اراضی کشاورزی و همچنین ارتباط آن با روند تغییرات تبخیر و تفرق در حوضه به چه نحوی است؟
- با پاسخ‌گویی به سؤالات فوق، امکان شناسایی دقیق‌تر عوامل تأثیرگذار بر خشک شدن دریاچه ارومیه، بررسی غیرمستقیم میزان و نحوه‌ی تغییرات الگوی کشت در سطح حوضه دریاچه ارومیه و پتانسیل آب قابل صرفه-جویی فراهم می‌گردد. از آنجا که محاسبات به صورت پیکسل به پیکسل انجام گردیده است، مناطقی که بیشترین

^۱ METRIC

افزایش تبخیر و تعرق واقعی (آب قابل در دسترس) در آن‌ها صورت گرفته است به عنوان مناطق نیازمند توجه بیشتر شناسایی می‌گردند.

۱- روش انجام پژوهش

۱-۱- محاسبه‌ی روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی

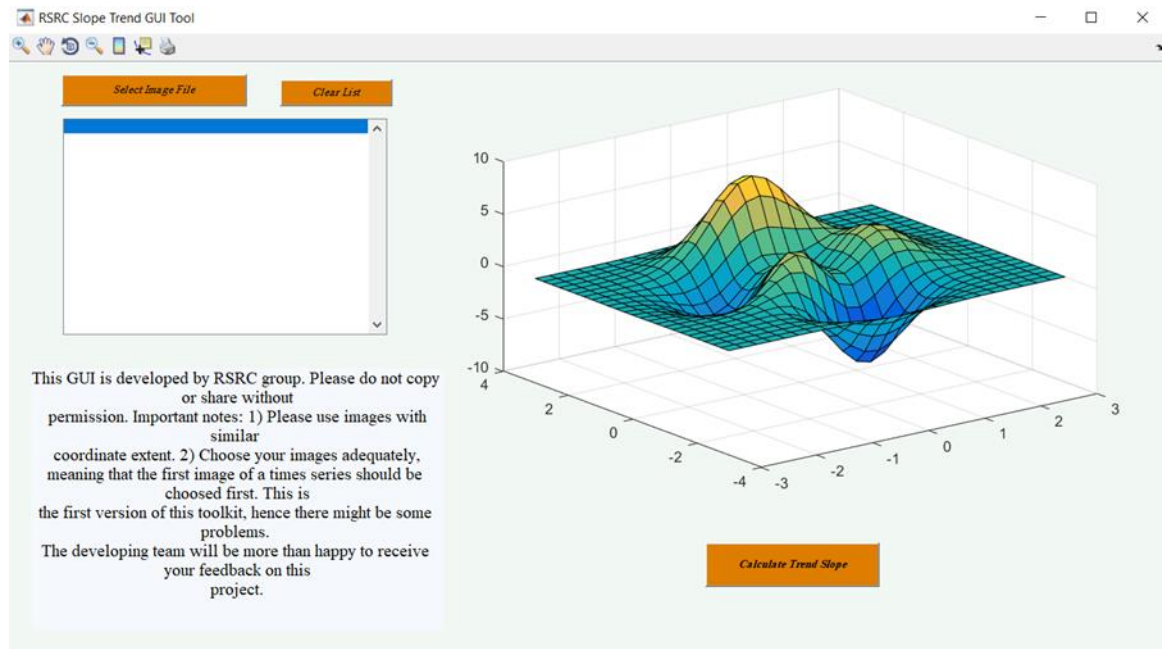
در این پژوهش، از نتایج تبخیر و تعرق برآورد شده بر اساس الگوریتم متریک و با استفاده از سنجنده MODIS طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی استفاده شده است (مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه شریف، ۱۳۹۷). به‌منظور محاسبه‌ی روند تغییرات تبخیر و تعرق در حوضه، به ازای هر ماه و برای هر پیکسل، یک معادله‌ی خطی طبق رابطه‌ی ۱ به مقادیر تبخیر و تعرق برازش داده شده و شیب این خط به عنوان مقدار روند تغییرات در نظر گرفته می‌شود.

$$ET = mt + ET_0 \quad (1)$$

در معادله‌ی بالا، m (میلی‌متر در سال) مقدار روند، ET (میلی‌متر) مقدار تبخیر و تعرق هر ماه، ET_0 (میلی-متر) برابر با مقدار تبخیر و تعرق در اولین لایه‌ی موجود (یعنی لایه‌ی مربوط به اولین ماه مورد بررسی در سری زمانی کل لایه‌ها) و t متغیر بیان‌کننده‌ی زمان است (در سال ۲۰۰۰، t برابر با یک است و از آن به بعد هر سال یک واحد به t اضافه می‌گردد). لایه‌های تبخیر و تعرق ماه‌های یکسان در سال‌های مختلف به مدل توسعه داده شده به عنوان ورودی داده شده و سپس مقدار پارامتر m در هر پیکسل محاسبه می‌گردد. به غیر از ماه‌های ژانویه و فوریه که لایه‌های تبخیر و تعرق برای سال ۲۰۰۰ موجود نمی‌باشند، برای بقیه‌ی ماه‌ها، از لایه‌های سال ۲۰۰۰ به بعد استفاده شد. برای دو ماه ذکر گردیده، از داده‌های سال ۲۰۰۱ به بعد استفاده گردید. نمایی از برنامه‌ی استفاده شده برای روند یابی پیکسلی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۱-۲- مقادیر روند در اراضی کاربری مختلف

جهت بررسی هرچه بهتر ارتباط بین مقادیر روند محاسبه شده برای تبخیر و تعرق واقعی در کاربری‌های اراضی مختلف حوضه، میانگین مقادیر روند به صورت جداگانه در پنج کلاس کاربری متمایز محاسبه شد (شکل ۲). کلاس‌های مورد استفاده عبارت‌اند از: کشاورزی، دیم، مرتع، بایر و شهری. در هر کلاس مشخص، مقادیر روند حاصل برای تبخیر و تعرق برای هر کلاس با توجه به پیکسل‌های قرار گیرنده در آن به صورت ماهانه و برای کل بازه میانگین‌گیری شده و گزارش می‌گردد.



شکل ۱- ساختار کلی مدل توسعه داده شده جهت برآورد روند تغییرات تبخیر و تفرق واقعی

۳-۱- پارامترهای آماری

جهت تحلیل و بررسی بیشتر داده‌ها، مقادیر میانگین، کمینه و بیشینه‌ی روندها به ازای هر ماه و برای کل حوضه محاسبه گردیدند. هم‌چنین برای ارائه‌ی تحلیلی جامع‌تر، روند تغییرات بارش، دما و رطوبت نسبی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. روند هر یک از متغیرهای مورد ارزیابی از روش من-کندال^۱ (Mann, 1945; Kendall, 1955) محاسبه شده است.

۴-۱- تغییرات تخمینی نسبی

با استفاده از مقادیر روند به دست آمده، برای هر پیکسل در هر ماه مشخص، مقادیر تغییرات نسبی تخمینی برای آن پیکسل محاسبه می‌گردد. به این منظور، از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

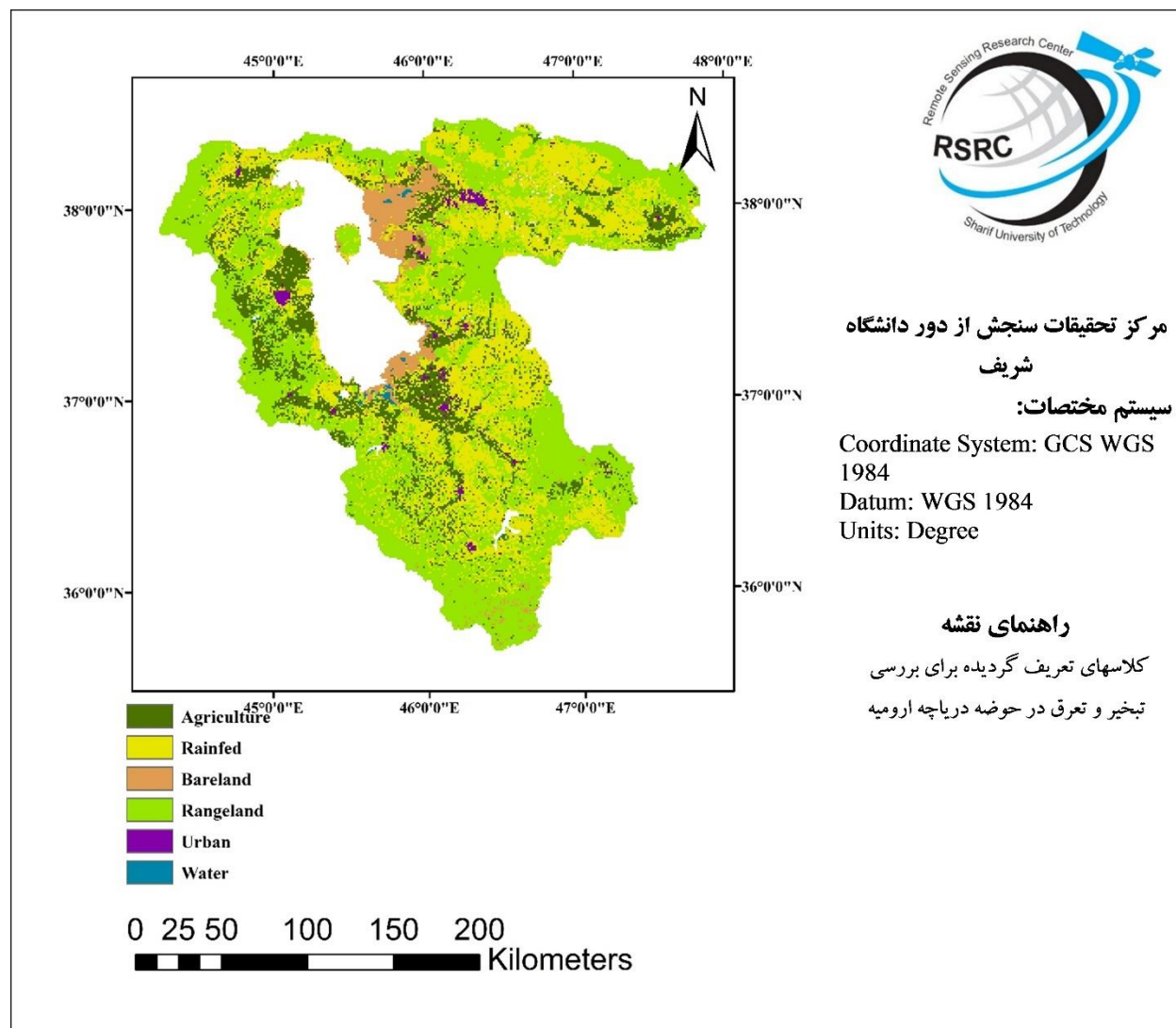
$$\Delta ET = m \Delta t \quad (2)$$

$$\Delta ET_{rel} = \Delta ET / ET_0$$

در رابطه‌ی بالا، ΔET میزان تغییرات تبخیر و تفرق، m مقدار روند، Δt تغییرات زمانی، ΔET_{rel} تغییرات تبخیر و تفرق نسبی، و ET_0 مقدار تبخیر و تفرق اولین لایه‌ی استفاده شده (ET_0) است. به غیر از ماه‌های ژانویه و فوریه،

^۱ Mann-Kendall

ET_0 بقیه‌ی ماه‌ها متعلق به لایه‌ی مربوطه سال ۲۰۰۰ بوده و برای دو ماه ذکر شده، از لایه‌های موجود در سال ۲۰۰۱ استفاده گردیده است.



شکل ۲- اراضی کاربری تعریف گردیده در مطالعه جاری (سمیه سیماء، ۱۳۹۴)

۲- نتایج به دست آمده

۲-۱- مقادیر روند

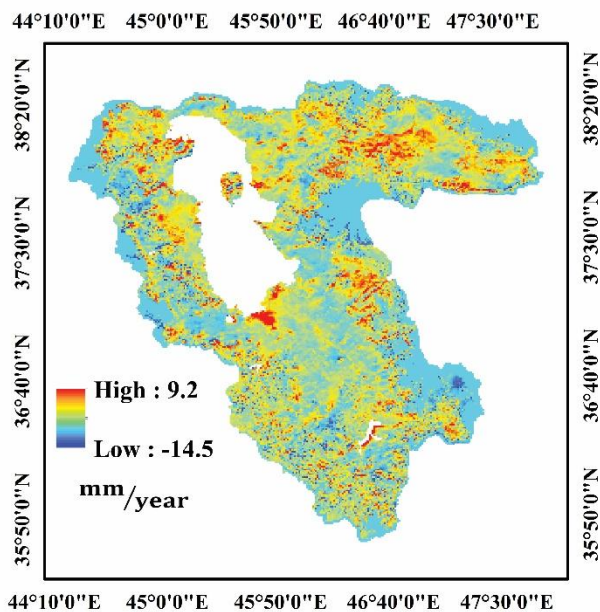
مقادیر روند به دست آمده به صورت ماهیانه و برای کل حوضه از شکل ۳ تا شکل ۸ نشان داده شده‌اند. بر اساس نتایج حاصل، مقدار حداکثر قدر مطلق روند تغییرات برابر ۱۴/۵ میلی‌متر در سال است. نکته حائز اهمیت این است که مشاهده می‌گردد که در حوضه هم روند مثبت تغییرات دیده می‌شود و هم روند منفی. به منظور تحلیل هر چه بهتر

روندهای به دست آمده در سطح حوضه، مقادیر میانگین، کمینه و بیشینه برای سطح حوضه و برای ماه‌های مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. در صورتی که تنها به میانگین روندها در سطح حوضه توجه گردد، ممکن است به صورت اشتباه نتیجه‌گیری شود که روند تغییرات در سطح حوضه چشمگیر نبوده و قدر مطلق مقدار آن برای تمامی ماه‌ها کوچک‌تر از یک میلی‌متر در سال است (به غیر از ماه جولای که مقداری در حدود یک میلی‌متر در سال را داراست). اگر به مقادیر به دست آمده برای روندها توجه گردد (از شکل ۳ تا شکل ۸)، مشخص می‌گردد که ارزیابی بر اساس میانگین کل حوضه ممکن است گمراه‌کننده باشد، چرا که مقادیر مثبت و منفی به دست آمده برای روندها، یکدیگر را خنثی می‌کنند. بر اساس مقادیر قدر مطلق بیشینه و کمینه به دست آمده برای روندها، مشخص می‌گردد که در طی ماه‌های بهار و تابستان مقادیر اکسترمم دارای مقدار بزرگ‌تری نسبت به اکسترمم ماه‌های دیگر می‌باشند.

۲-۲- مقادیر روند به ازای کاربری‌های مختلف

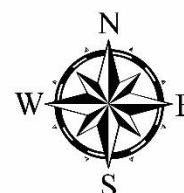
میانگین مقادیر روند به دست آمده به ازای کاربری‌های مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر نشان داده شده، در ماه ژانویه با در نظرگیری این نکته که مقادیر روند به دست آمده برای تمامی کلاس‌های تعریف شده مثبت است، مقادیر ET در این ماه برای همه‌ی کلاس‌ها افزایش یافته است. در ماه فوریه، مقادیر روند برای تمامی کلاس‌ها به غیر از مرتع منفی بوده و به غیر از این کلاس، روند تغییرات تبخیر و تعرق در این کلاس بر خلاف ژانویه کاهش یافته است. در ماه مارچ، تمامی کلاس‌ها دارای روند منفی می‌باشند. در ماه آوریل، دو کلاس دیم و شهری دارای روند تغییرات افزایشی و کلاس‌های دیگر دارای روند تغییرات کاهش می‌باشند. در ماه می، مانند ماه مارچ در همه‌ی کلاس‌های در نظر گرفته شده روندها کاهش یافته است. در ماه ژوئن، دو کلاس کشاورزی و شهری دارای روند افزایشی بوده و کلاس‌های دیگر دارای روند کاهش می‌باشند. در ماه جولای، تمامی کلاس‌ها به غیر از زمین‌های بایر دارای یک روند افزایشی هستند. در سه ماه بعدی از سال (آگوست، سپتامبر و اکتبر) در تمامی کلاس‌ها روند افزایشی دیده می‌شود. در دو ماه انتهایی از سال روند تغییرات برای همه‌ی کلاس‌ها کاهش یافته است.

January

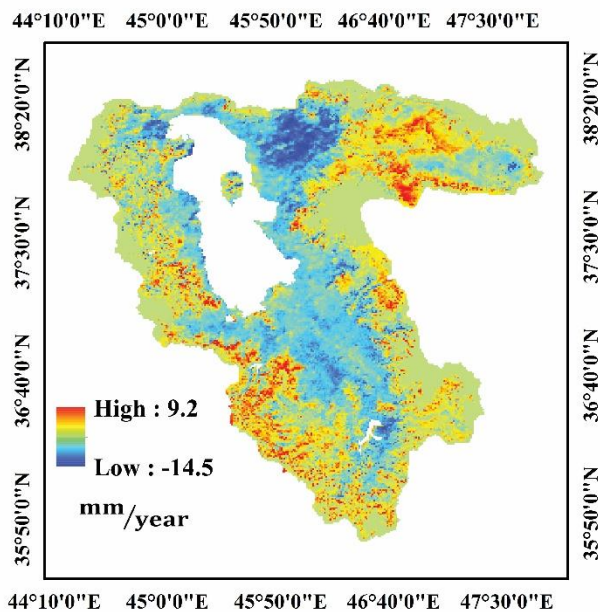


Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree

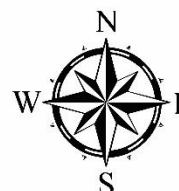


February



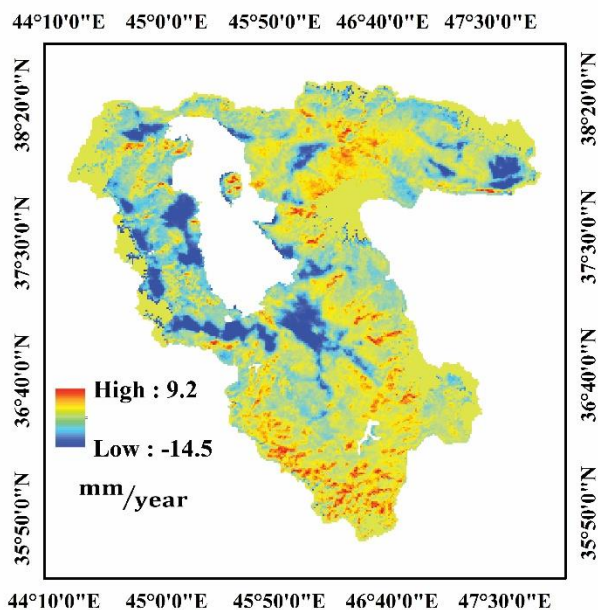
Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree



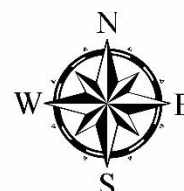
شکل ۳- مقادیر روند به دست آمده تبخیر و تعرق در حوضه دریاچه ارومیه (میلی‌متر در سال) برای ماه‌های ژانویه تا فوریه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

March

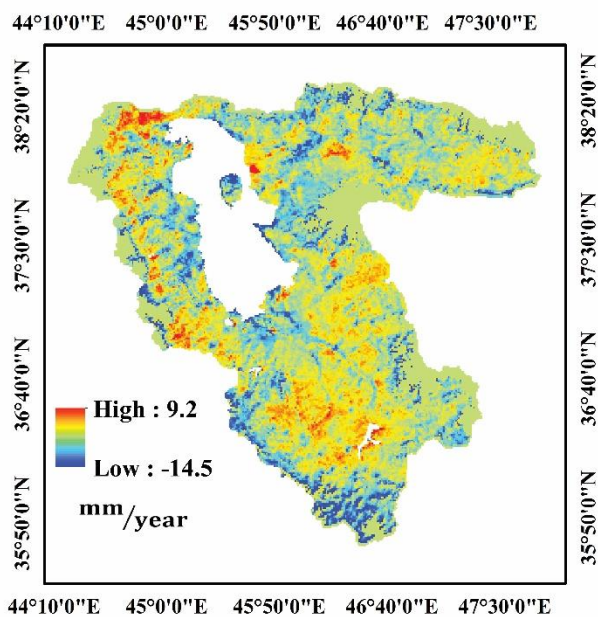


Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree

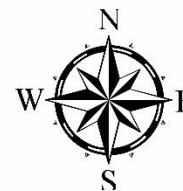


April



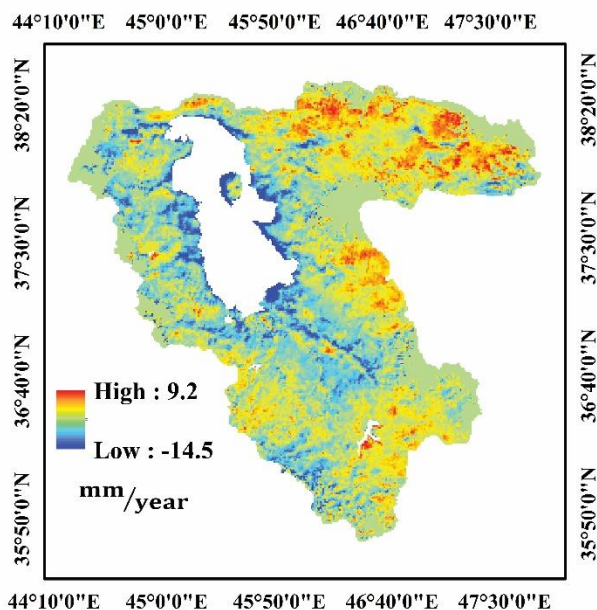
Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree



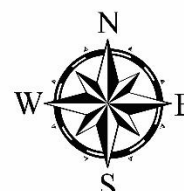
شکل ۴- مقادیر روند به دست آمده تبخیر و تعرق در حوضه دریاچه ارومیه (میلی‌متر در سال) برای ماه‌های مارچ تا آپریل طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

May

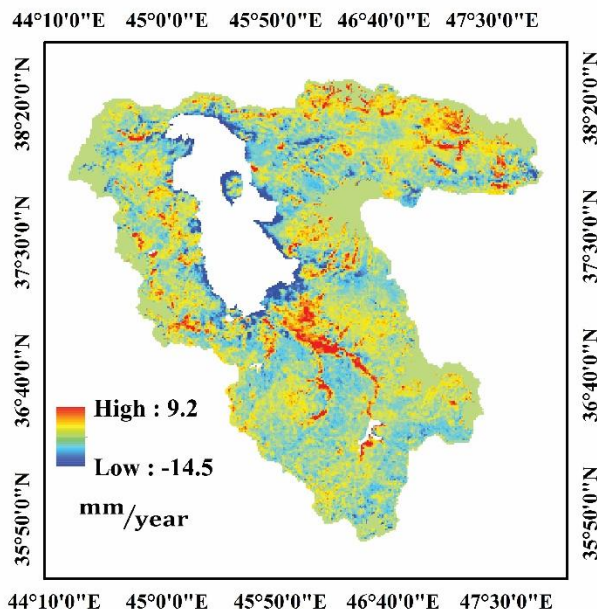


Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree

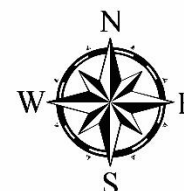


June



Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

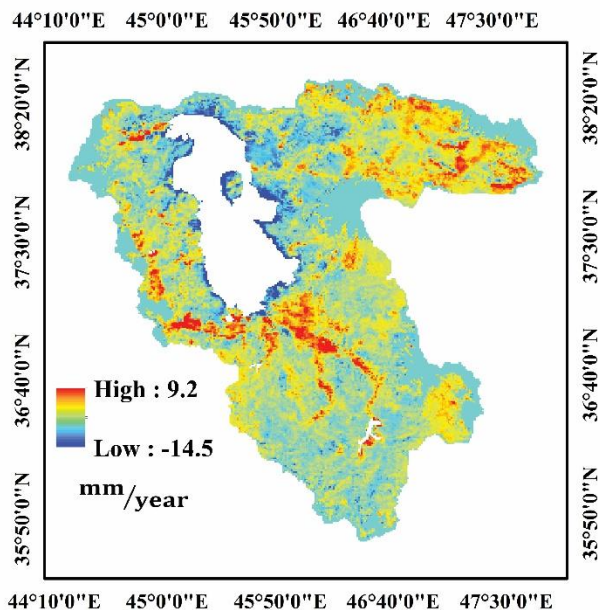
Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree



شکل ۵- مقادیر روند به دست آمده تبخیر و تعرق در حوضه دریاچه ارومیه (میلی متر در سال) برای ماه‌های می تا ژوئن طی سال‌های

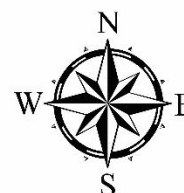
۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

July

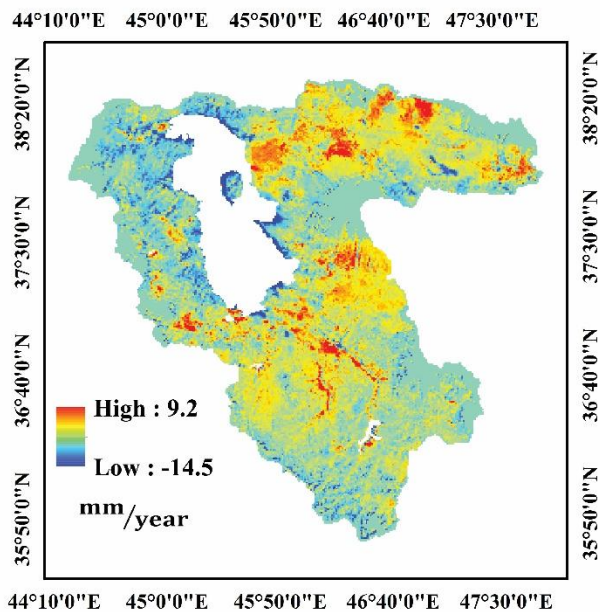


Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree

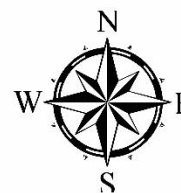


August



Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

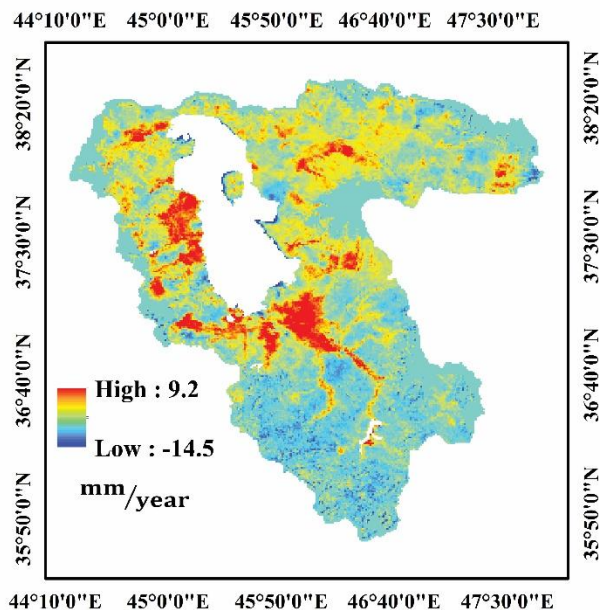
Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree



شکل ۶- مقادیر روند به دست آمده تبخیر و تعرق در حوضه دریاچه ارومیه (میلی متر در سال) برای ماه‌های جولای تا آگوست طی

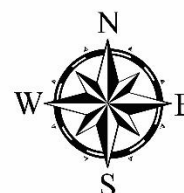
سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

September

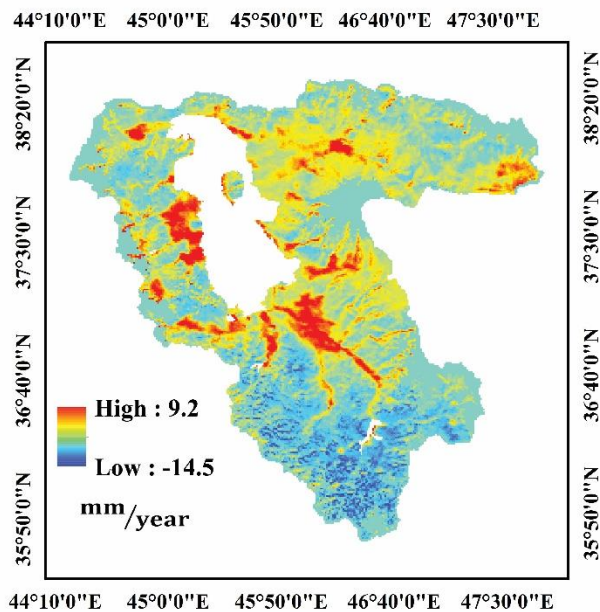


Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree

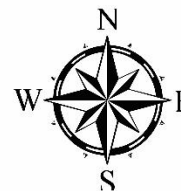


October



Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

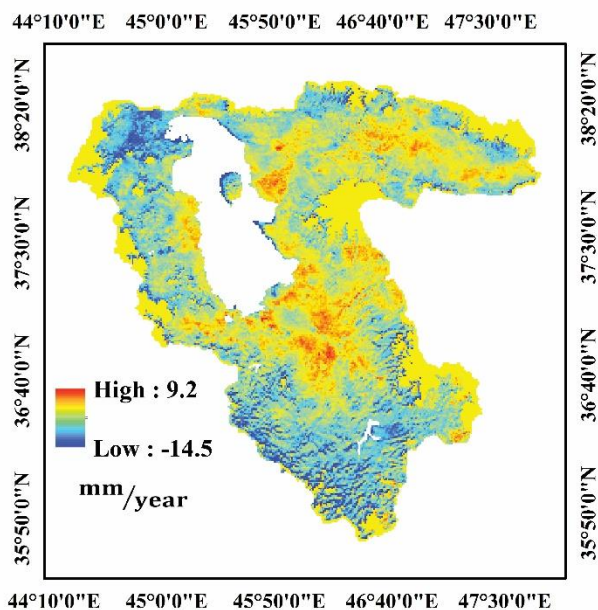
Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree



شکل ۷- مقادیر روند به دست آمده تبخیر و تعرق در حوضه دریاچه ارومیه (میلی متر در سال) برای ماه‌های سپتامبر تا اکتبر طی سال-

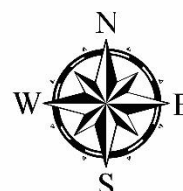
های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

November

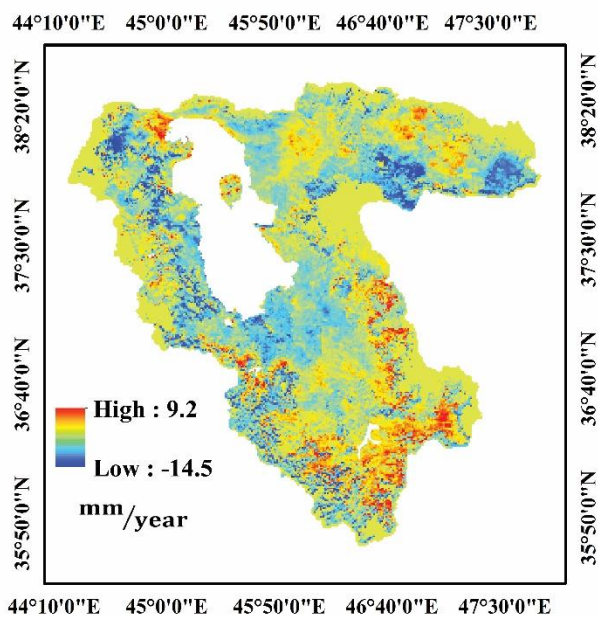


Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree

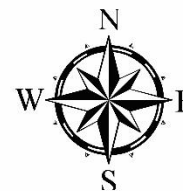


December



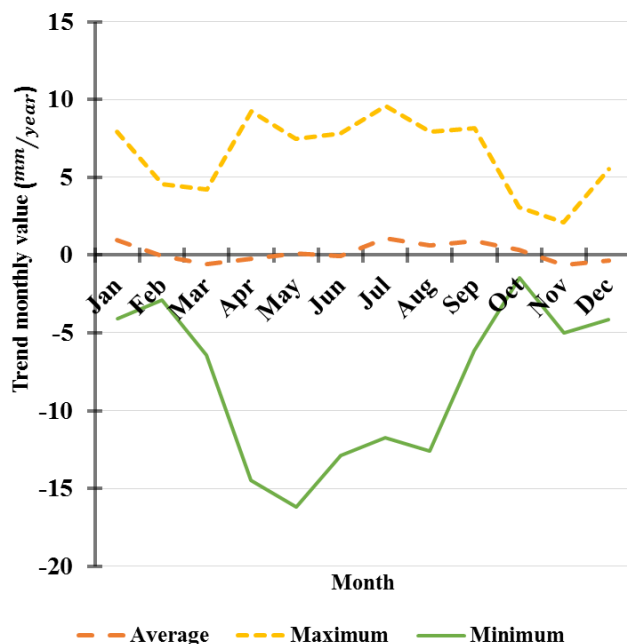
Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree

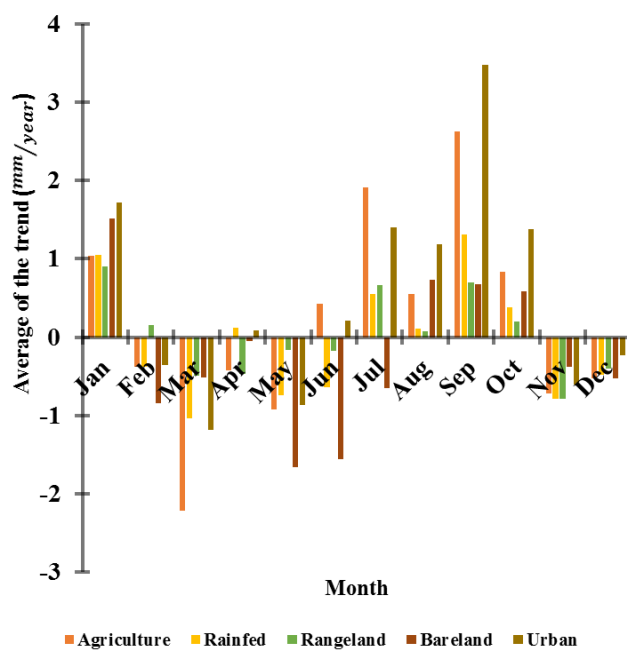


شکل ۸- مقادیر روند به دست آمده تبخیر و تعرق در حوضه دریاچه ارومیه (میلی متر در سال) برای ماه‌های نوامبر تا دسامبر طی سال-

های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی



شکل ۹- مقادیر میانگین، بیشینه و کمینه‌ی روندهای به دست آمده (میلی متر در سال) در ماه‌های مختلف در بازه‌ی مطالعاتی



شکل ۱۰- مقادیر میانگین روندهای تبخیر و تعرق (میلی متر در سال) در ماه‌های مختلف در کلاس‌های کشاورزی، دیم، مرتع، بایر و شهری

مقدار بیشینه روند تغییرات افزایشی برای کلاس کشاورزی مرتبط با ماه سپتامبر بوده (با مقداری برابر ۲/۶۲) و مقدار بیشینه روند تغییرات کاهشی نیز برای این کلاس به ماه مارچ اختصاص دارد (با مقدار منفی ۲/۲۲). برای کلاس دیم، به مانند کلاس کشاورزی، به ترتیب مقدار بیشینه روند تغییرات افزایشی (با مقداری برابر ۱/۳۱) و کاهشی (با مقدار منفی ۱/۰۴) مرتبط با ماه‌های سپتامبر و مارچ است. برای کلاس مرتع، بیشینه روند تغییرات افزایشی مربوط به ماه ژانویه بوده (با مقداری برابر ۰/۹) در حالی که بیشینه روند تغییرات کاهشی در ماه دسامبر (با مقدار منفی ۰/۷۹) مشاهده می‌گردد. در کلاس زمین‌های بایر، بیشینه روند تغییرات افزایشی در ماه ژانویه رخ می‌دهد (با مقدار ۱/۵۱). بیشینه روند تغییرات کاهشی به ماه می اختصاص دارد (با مقدار منفی ۱/۶۶). بیشینه روند تغییرات افزایشی (با مقداری برابر ۳/۴۸) و کاهشی (با مقدار منفی ۰/۷۹) به ترتیب مربوط به کلاس شهری و مرتبط با ماه‌های سپتامبر و مارچ است. یکی از عوامل احتمالی تأثیرگذار بر نتایج به دست آمده برای فصل بهار، بارش فراوان و در نتیجه وجود ابرهای فراوان در تصویر دریافتی است. این موضوع می‌تواند بر روی مقادیر روندها تأثیرگذار باشد، چراکه مقادیر لایه‌های تبخیر و تعرق ورودی به نرم‌افزار تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. افزون بر این موضوع، نتایج گواه بر این موضوع هستند که به احتمال زیاد تغییراتی در فصل کشت ایجاد گردیده است، چراکه در فصل تابستان مقادیر تبخیر و تعرق بیشتری نسبت به فصل بهار که فصل اصلی کشت در حوضه محسوب می‌شود مشاهده می‌گردد. مقادیر افزایشی در فصل تابستان نشان‌دهنده‌ی احتمالی کشت بیشتر و در نتیجه آبیاری بیشتر در حوضه است. نتایج حاکی از آن می‌باشند که عوامل انسانی در افزایش مقادیر تبخیر و تعرق تأثیرگذار بوده‌اند، چراکه مقادیر تبخیر و تعرق در کلاس کشاورزی افزایش چشمگیرتری نسبت به کلاس دیم و مرتع داشته است. همچنین، با بررسی کلاس کشاورزی مشخص می‌گردد که روند تغییرات شیب بیشتری در دو ماه سپتامبر و اکتبر نسبت به ماه‌های دیگر داشته است (شکل ۱۰) که می‌تواند نمایانگر تغییر الگوی کشت در حوضه باشد.

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، ماه‌های سپتامبر و مارچ ماه‌هایی می‌باشند که به ترتیب بیشینه تغییرات روند-های افزایشی و کاهشی در آن‌ها مشاهده می‌گردد. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۳ تا شکل ۸، اهمیت انجام محاسبات و تحلیل به صورت پیکسل به پیکسل بیش از پیش نمایان می‌شود، چراکه بر اساس نتایج برای کل حوضه (میانگین کل)، دو ماه مذکور جزو ماه‌های اکسترم به حساب نمی‌آیند. میانگین روندهای به دست آمده برای کلاس کشاورزی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی برابر ۰/۱۸ میلی‌متر در سال است، اما طبق محصول تبخیر و تعرق MOD16 میانگین روند برابر منفی ۰/۰۹ میلی‌متر در سال است. در صورتی که از محصول آماده‌ی MODIS استفاده شود به اشتباه این‌گونه برداشت می‌شود که مقدار تبخیر و تعرق کاهش یافته است در حالی که استفاده از الگوریتم

متریك معلوم گردید كه روند افزایشی بوده است. اختلاف بین مقادیر به دست آمده ناشی از این مطلب است كه محصول تبخیر و تعرق MODIS دارای کیفیت بالایی نبوده (مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه شریف، ۱۳۹۶) و مقادیر به دست آمده از آن حداقل برای كل حوضه‌ی دریاچه‌ی ارومیه قابل استناد نیستند.

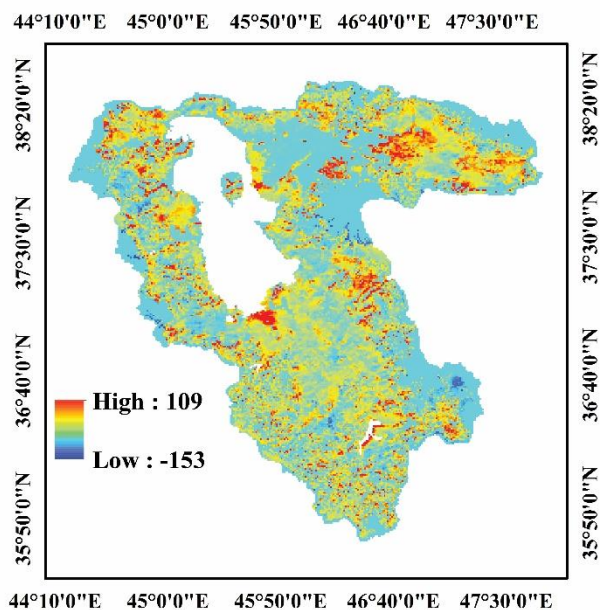
۲-۳- ارزیابی تغییرات تخمینی نسبی

بر اساس معادله‌ی ۲، مقادیر ΔET_{rel} برای ماه‌های مختلف در شكل ۱۱ تا شكل ۱۶ نشان داده شده‌اند. برای كل ماه‌های سال، بیشینه مقدار ΔET_{rel} برابر ۱۰۹ و مقدار كمینه آن برابر با منفی ۱۵۳ است. در جدول ۱، مقادیر میانگین ΔET_{rel} برای ماه‌های مختلف و برای كلاس‌های تعریف گردیده، مشخص شده است. همچنین در جدول ۱، مقادیر كمینه، بیشینه و میانگین ΔET_{rel} برای كل حوضه بیان گردیده‌اند. ΔET_{rel} بیانگر نسبت تبخیر و تعرق در انتهای زمان مورد بررسی (سال ۲۰۱۶) به ابتدای بازه تحلیل (سال ۲۰۰۰) است. به بیان ساده‌تر، این شاخص نشان می‌دهد كه نسبت تبخیر و تعرق در ابتدا و انتهای بازه‌ی تحلیل چگونه بوده است.

جدول ۱- مقادیر ΔET_{rel} برای كلاس‌های مختلف به ازای ماه‌های مختلف طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

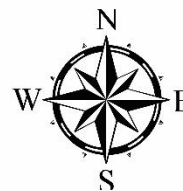
ماه	كمینه	بیشینه	میانگین	كلاس شهری	كلاس زمین بایر	كلاس مرتع	كلاس دیم	كلاس كشاورزی
ژانویه	-۴۵.۲۵	۱۱۸.۷۰	۱۲.۱۸	۱۳.۷۲	۱۴.۵۴	۱۱.۷۸	۱۲.۷۲	۱۳.۰۳
فوریه	-۴۳.۰۵	۶۸.۳۶	۲.۹۶	-۰.۱۵	-۰.۴۶	۳.۷۳	۱.۴۳	۱.۶۳
مارچ	-۹۵.۴۶	۶۷.۱۰	-۱.۰۳	-۰.۶۷	-۳.۱۶	-۲.۷۹	-۱.۵۱	-۴.۰۲
آوریل	-۹۸.۴۶	۱۴۷.۵۷	۲.۶۰	-۰.۸۶	۵.۹۹	۱.۳۹	۶.۳۸	۲.۴۸
می	-۹۸.۹۶	۱۰۸.۸۸	۳.۸۰	۰.۱۹	-۷.۳۶	۲.۰۱	-۱.۱۲	۰.۷۳
ژوئن	-۶۵.۹۹	۱۱۸.۸۶	۰.۱۸	۰.۱۰	-۰.۹۳	۰.۰۳	-۰.۸۱	۰.۰۴
جولای	-۲۱.۳۱	۱۲۵.۹۲	۰.۸۵	۰.۲۸	۰.۰۰	۰.۵۱	۰.۳۱	۰.۴۷
آگوست	-۶۱.۸۰	۱۲۶.۸۲	۴.۶۸	۱.۰۶	۶.۳۲	۱.۱۷	۱.۵۰	۱.۱۳
سپتامبر	-۳۶.۲۲	۱۳۰.۲۹	۱.۸۵	۲.۰۳	۲.۲۴	۱.۷۶	۳.۵۶	۳.۰۵
اکتبر	-۱۱.۸۱	۳۴.۵۳	۰.۱۸	۰.۵۵	۰.۳۷	۰.۰۰	۰.۱۷	۰.۴۷
نوامبر	-۴۴.۵۴	۳۳.۲۳	-۱.۴۹	-۰.۴۶	-۰.۷۱	-۱.۹۷	-۱.۹۵	-۱.۷۵
دسامبر	-۵۲.۶۳	۴۱.۸۱	-۰.۳۷	-۰.۱۶	-۰.۳۱	-۱.۱۳	-۱.۱۵	-۱.۱۵

January

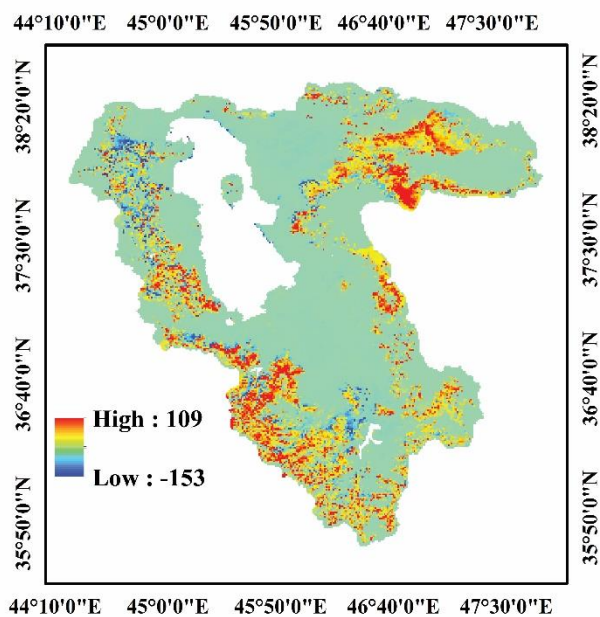


Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree

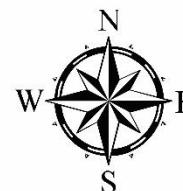


February



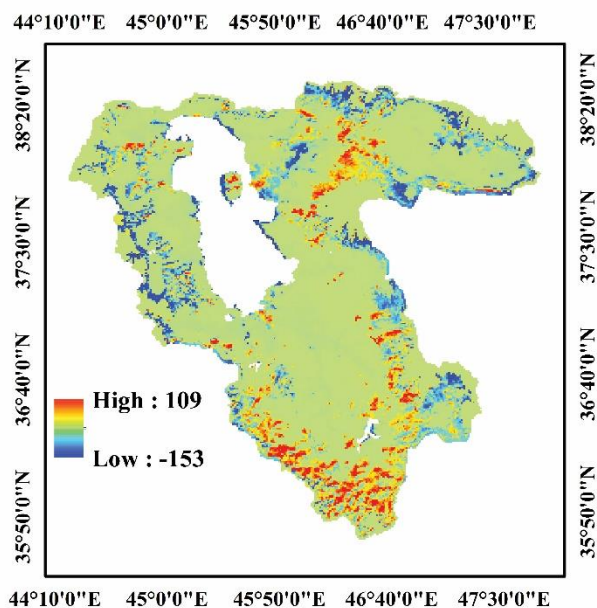
Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree



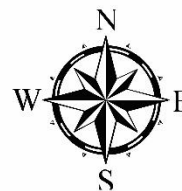
شکل ۱۱- مقادیر تغییرات نسبی روند تبخیر و تعرق برای ماه‌های ژانویه تا فوریه در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

March

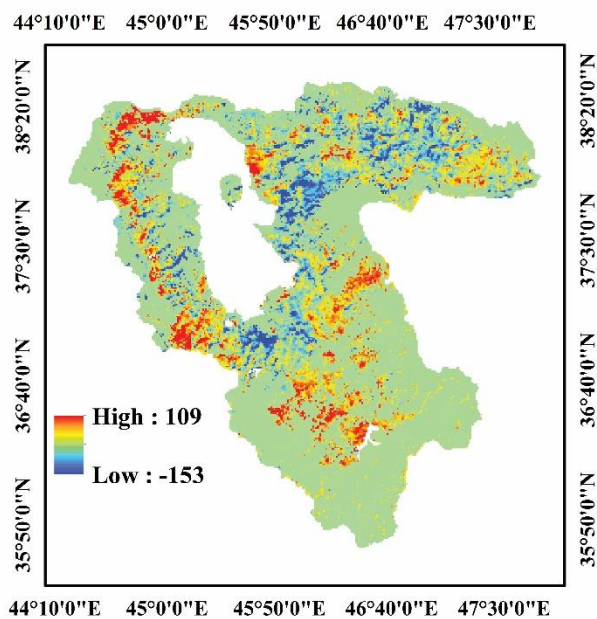


Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree

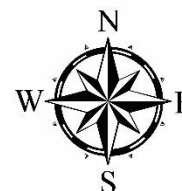


April



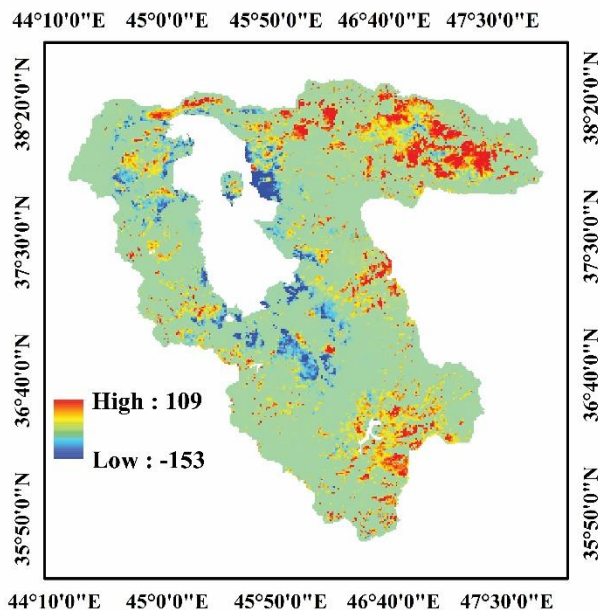
Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree



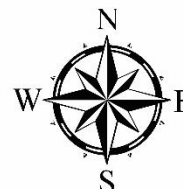
شکل ۱۲- مقادیر تغییرات نسبی روند تبخیر و تعرق برای ماه‌های مارچ تا آپریل در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

May

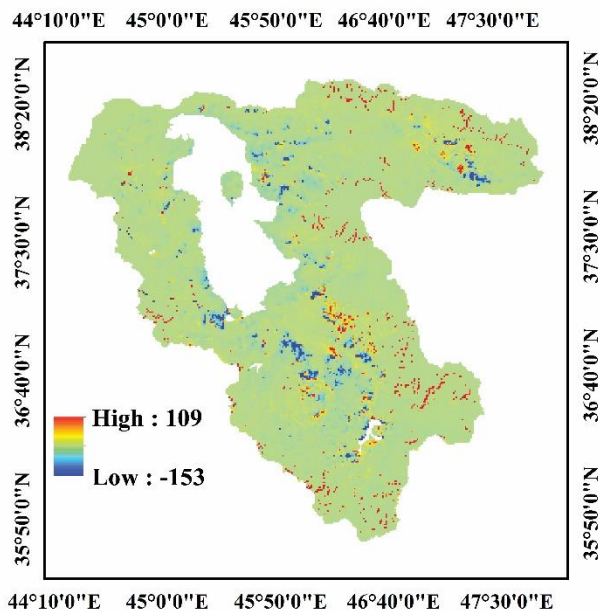


Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree

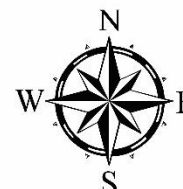


June



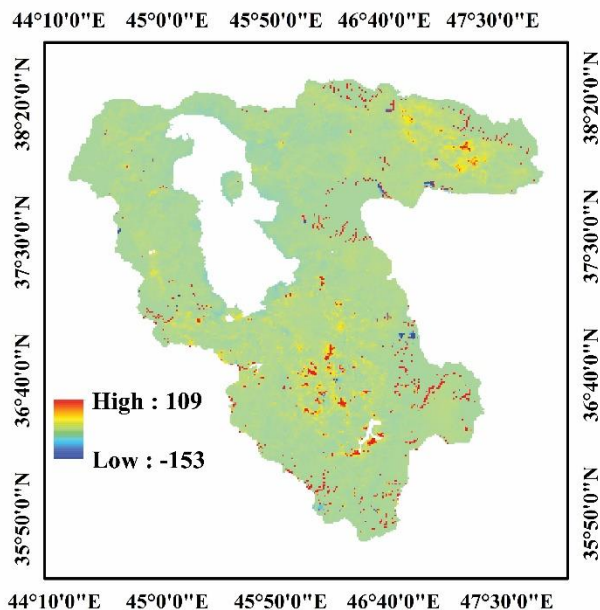
Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree



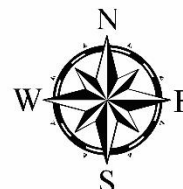
شکل ۱۳- مقادیر تغییرات نسبی روند تبخیر و تعرق برای ماه‌های می تا ژوئن در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

July

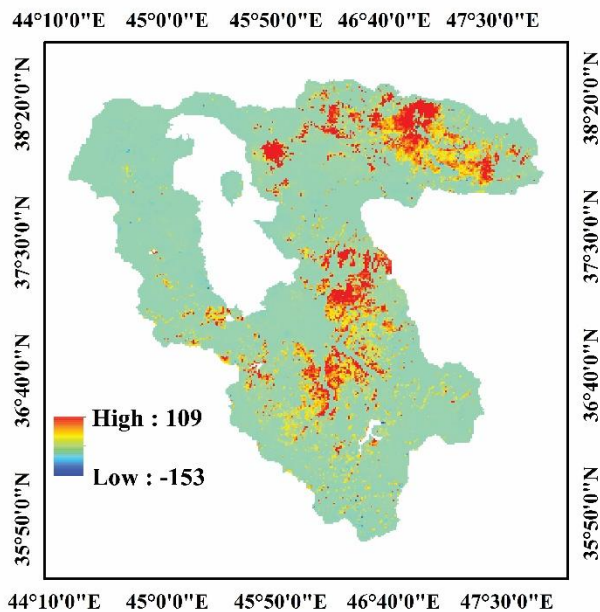


Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree

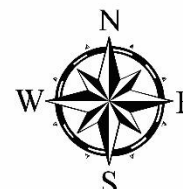


August



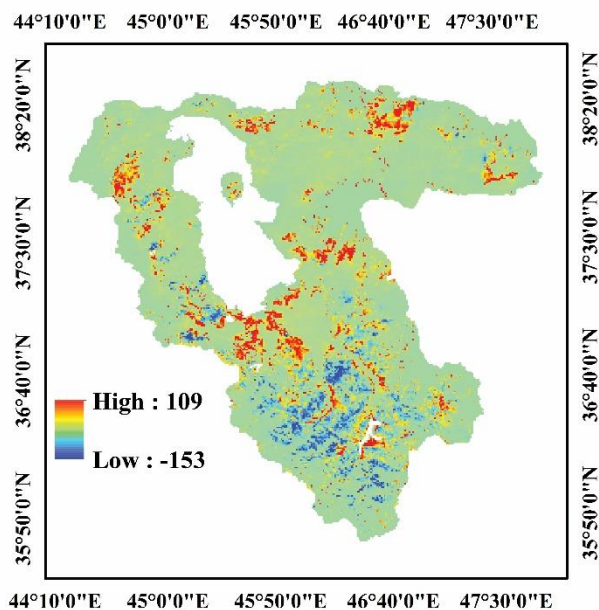
Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree



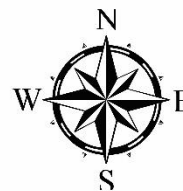
شکل ۱۴- مقادیر تغییرات نسبی روند تبخیر و تعرق برای ماه‌های جولای تا آگوست در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

September

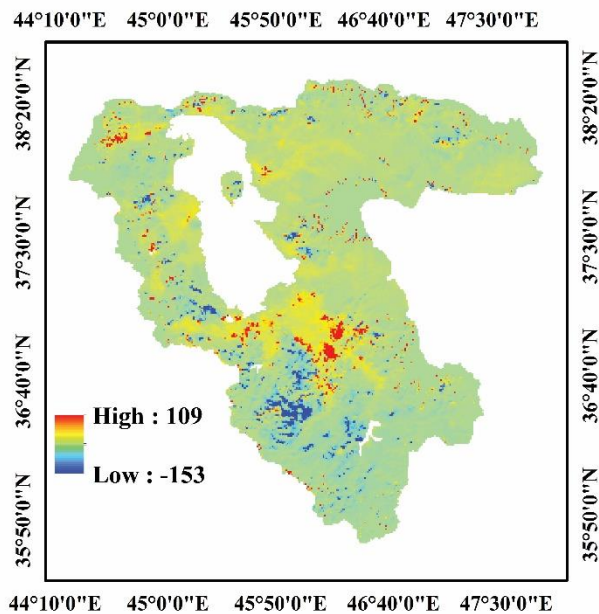


Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree

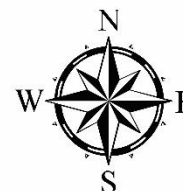


October



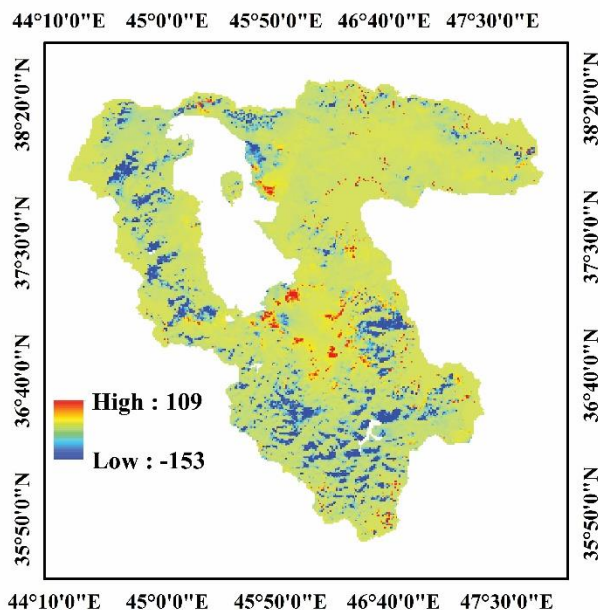
Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree



شکل ۱۵- مقادیر تغییرات نسبی روند تبخیر و تعرق برای ماه‌های سپتامبر تا اکتبر در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

November

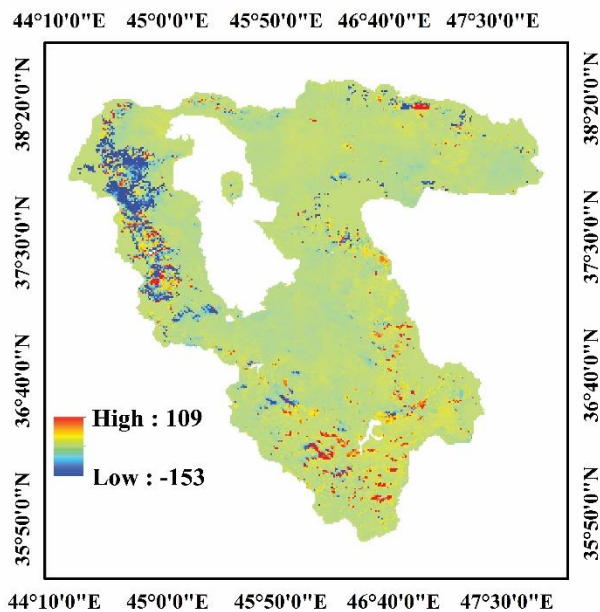


Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree

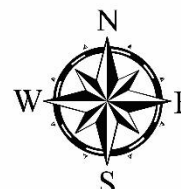


December



Sharif University
Remote Sensing
Research Center
(RSRC)

Coordinate System:
GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree



شکل ۱۶- مقادیر تغییرات نسبی روند تبخیر و تعرق برای ماه‌های نوامبر تا دسامبر در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

بر اساس جدول ۱، مشخص می‌گردد که برای کلاس کشاورزی، تغییرات تخمینی نسبی برای همه‌ی ماه‌ها به غیر از مارچ، نوامبر و دسامبر افزایشی بوده که بیشترین افزایش نسبی مربوط به ماه ژانویه است. نکته قابل توجه این است که برای تمامی کلاس‌های تعریف شده، بیشترین تغییرات تخمینی نسبی افزایشی نیز مربوط به ماه ژانویه بوده است. در ماه‌های مارچ، نوامبر و دسامبر در همه‌ی کلاس‌های تعریف گردیده، تغییرات تخمینی نسبی کاهش‌ی است. تغییرات مقادیر تخمینی نسبی در فصل بهار و تابستان در کلاس‌های مختلف بر این موضوع دلالت دارند که تغییرات اقلیمی منطقه دارای نقش بسزایی در روند تغییرات تبخیر و تفرق ایفا کرده‌اند، هرچند که نوسانات الگوی کشت نیز می‌توانند بر این موضوع تأثیر مستقیم گذاشته باشند.

۲-۴- بررسی روند میزان بارش و ارتباط آن با روند تبخیر و تفرق

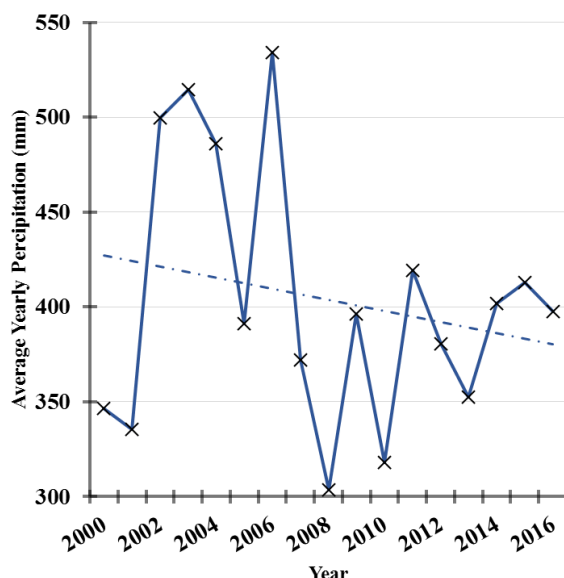
در شکل ۱۷، میزان بارش سالیانه به دست آمده از ماهواره TRMM^۱ بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی نشان داده شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده، مشخص است که میزان بارش در سطح حوضه روند نزولی داشته اما شیب تغییرات آن شدید نیست (کمتر از یک میلی‌متر در سال). آزمون من-کندال نشان داد که روند تغییرات بارش غیر معنادار^۲ بوده است. با مقایسه‌ی مقدار روند به دست آمده برای بارش و مقایسه‌ی آن با مقدار روند تبخیر و تفرق در حوضه، مشخص می‌گردد که روند تبخیر و تفرق در حوضه افزایشی بوده، در حالی که روند بارش در حوضه کاهش‌ی است. در صورتی که روند تبخیر و تفرق در حوضه را برای اراضی کاربری مختلف مقایسه نماییم، مشخص می‌شود که مقدار روند تغییرات برای اراضی کشاورزی و شهری افزایشی بوده‌اند در حالی که روند تغییرات مربوط به اراضی دیم و بایر کاهش‌ی هستند. هم‌چنین روند کلی خاصی برای اراضی مرتع دیده نمی‌شود. روندهای به دست آمده برای تبخیر و تفرق در مطابقت با روند به دست آمده برای بارش است چراکه با کاهش بارش، انتظار می‌رود تا میزان کشت دیم نیز متعاقباً کاهش بیاید. با توجه به افزایش کشت غیرمجاز در حوضه، افزایش میزان تبخیر و تفرق در حوضه (مخصوصاً بخش مربوط به اراضی کشاورزی) مورد انتظار بوده، مطلبی که مقادیر روند به دست آمده آن را تصدیق می‌نماید. کاهش بارش در حوضه، می‌تواند موجب افزایش دمای سطح^۳ می‌گردد. یکی از پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر مقدار تبخیر و تفرق لحظه‌ای در الگوریتم متریک، دمای سطح است. افزایش دمای سطح در اراضی با کاربری مختلف تأثیر متفاوتی بر مقدار تبخیر و تفرق می‌گذارد. در زمین‌های کشاورزی که مقدار آب در دسترس زیاد است،

^۱ Tropical Rainfall Measuring Mission

^۲ Insignificant

^۳ Land Surface Temperature (LST)

افزایش دمای سطح موجب افزایش تبخیر و تفرق گردیده در حالی که در زمین‌های بایر که آب قابل دسترس کم است، افزایش دمای سطح موجب کاهش تبخیر و تفرق می‌گردد.



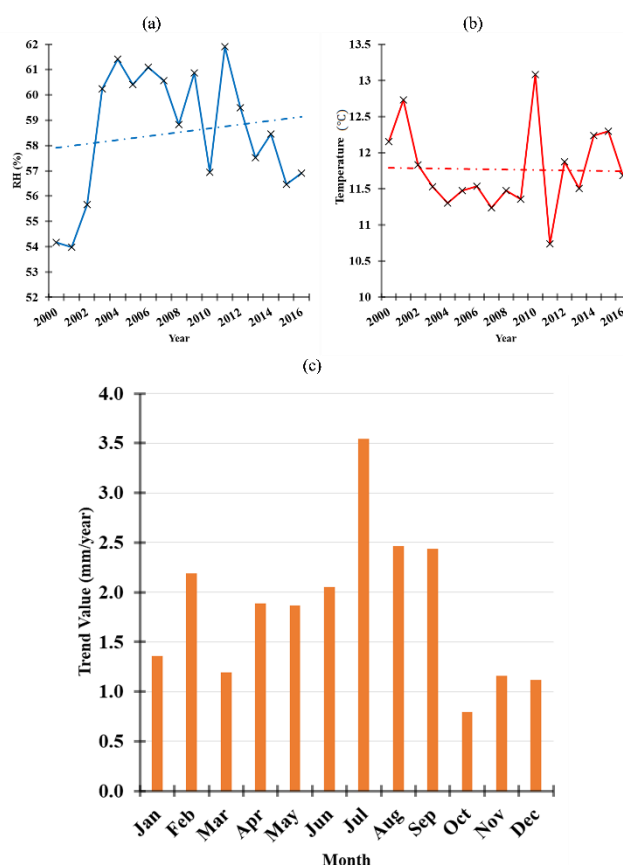
شکل ۱۷- میزان بارش سالیانه در حوضه دریاچه ارومیه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

۲-۵- مقایسه روند تبخیر و تفرق مرجع و مقایسه آن با روند تبخیر و تفرق محاسبه شده

تبخیر و تفرق مرجع که با استفاده از داده‌های هواشناسی محاسبه می‌گردد، تابع دما و رطوبت نسبی بوده و بررسی روند آن این امکان را فراهم می‌نماید که تغییرات اقلیمی حوضه رصد گردد. روند تغییرات رطوبت نسبی و دما در ایستگاه ارومیه در شکل ۱۸ (الف و ب) نشان داده شده‌اند. با استفاده از مقادیر تبخیر و تفرق مرجع (ماه‌یانه) برای بازه‌ی زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی، مقادیر روند آن‌ها به صورت ماه‌یانه محاسبه گردیده و در شکل ۱۸ (ج) نشان داده شده است. دلیل استفاده از اطلاعات ایستگاه هواشناسی ارومیه این مطلب است که تبخیر و تفرق مرجع (یونجه) بر اساس رابطه‌ی پنمن-مانتیس برای کل حوضه طبق اطلاعات این ایستگاه محاسبه شده است.

با توجه به مقادیر به دست آمده برای مقادیر روند تبخیر و تفرق مرجع (شکل ۱۸ ج)، مشخص گردیده است که مقادیر روند برای تمامی ماه‌ها (و به سبب آن فصول) افزایشی می‌باشند، اقلیم منطقه به صورت کلی گرم‌تر شده و همچنین نیاز به آبیاری جهت کشاورزی نیز افزایش یافته است. روند تغییرات دما (شکل ۱۸ ب) گواه بر این موضوع می‌باشد. روند به دست آمده برای دما در تطابق کامل با مقادیر روند به دست آمده برای رطوبت نسبی است (شکل ۱۸ الف) است. با افزایش دما، ظرفیت نگهداری رطوبت افزایش یافته و در نتیجه مقدار رطوبت نسبی کاهش

می‌یابد. البته باید در نظر داشت که نتایج آزمون من-کندال گواه بر این موضوع هستند که روند تغییرات دما و رطوبت غیر معنادار است. با در نظر گیری مقادیر به دست آمده برای بارش میانگین در حوضه (شکل ۱۷)، این انتظار وجود دارد که فشار بر منابع آب زیرزمینی در حوضه نیز افزایش بیابد. نتایج به دست آمده برای روند تبخیر و تعرق مرجع، نشان دهنده‌ی این موضوع است گرچه روندها برای تمامی ماه‌ها افزایشی بوده‌اند، مقدار این افزایش در طی ماه‌های گرم بیشتر بوده است (جولای، آگوست و سپتامبر). مطابق انتظار، با افزایش دما در فصل تابستان مقدار تبخیر و تعرق مربوط به این ماه‌ها نیز افزایش یافته است (شکل ۶). نتایج بر این مطلب دلالت دارند که تغییرات اقلیمی مخصوصاً در فصل تابستان نقش بسزایی در افزایش تبخیر و تعرق حوضه داشته است.



شکل ۱۸- روند تغییرات (الف) رطوبت نسبی، (ب) دما و (ج) شیب تغییرات تبخیر و تعرق مرجع در ایستگاه ارومیه

۲-۶- بررسی روند تغییرات اراضی کشاورزی^۱ در حوضه دریاچه ارومیه

جهت بررسی روند تغییر اراضی کشاورزی در حوضه، از محصول MCD12Q1 استفاده گردید. مساحت اراضی کشاورزی برای سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۶، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶ تخمین زده شده و در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج مندرج در جدول ۲، مشاهده می‌گردد که بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۶ و هم‌چنین بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ یک روند صعودی در مساحت اراضی کشاورزی دیده می‌شود؛ در حالی که بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ شاهد یک روند نزولی در مساحت اراضی کشاورزی می‌باشیم. نکته قابل توجه این موضوع است که با شدت گیری خشک شدن دریاچه در سالیان اخیر نه تنها روند کاهشی بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ ادامه پیدا نکرده، بلکه شاهد یک روند افزایشی شدیدتر نیز می‌باشیم. موضوعی که قطعاً به عدم نظارت صحیح و مدیریت ناکارآمد منابع آب در حوضه مربوط می‌شود.

جدول ۲- مقدار اراضی کشاورزی در حوضه (کیلومتر مربع) به ازای سال‌های مختلف

سال	مقدار اراضی کشاورزی در حوضه (کیلومتر مربع)
۲۰۰۱	۶۸۰۱
۲۰۰۶	۶۹۵۶
۲۰۱۰	۶۶۱۸
۲۰۱۶	۷۱۷۷

برای بررسی هر چه بهتر روند تغییرات اراضی کشاورزی و به علت عدم دسترسی به کاربری اراضی دینامیک^۲ (سالیانه و یا فصلی دقیق)، با استفاده از دو شاخص LAI و NDVI مساحت اراضی سبز (مرتفع و کشاورزی صرف) مشخص گردیدند (شکل ۱۹). برای تشخیص اراضی مرتفع و کشاورزی، از شاخص NDVI بزرگ‌تر از ۰/۳ و از شاخص LAI بزرگ‌تر از یک استفاده شده است. به علت این که از دو شاخص ناممسان برای به دست آوردن اراضی کشاورزی و مرتفع استفاده شده است، مساحت‌های به دست آمده غیر یکسان می‌باشند. باید توجه داشت که روند به دست آمده برای مساحت‌ها برای هر دو روش صعودی بوده و مقدار آن نیز بر اساس آزمون من-کندال معنادار^۳ به دست آمد.

^۱ Crop Land

^۲ Dynamic Land Use Map

^۳ Significant

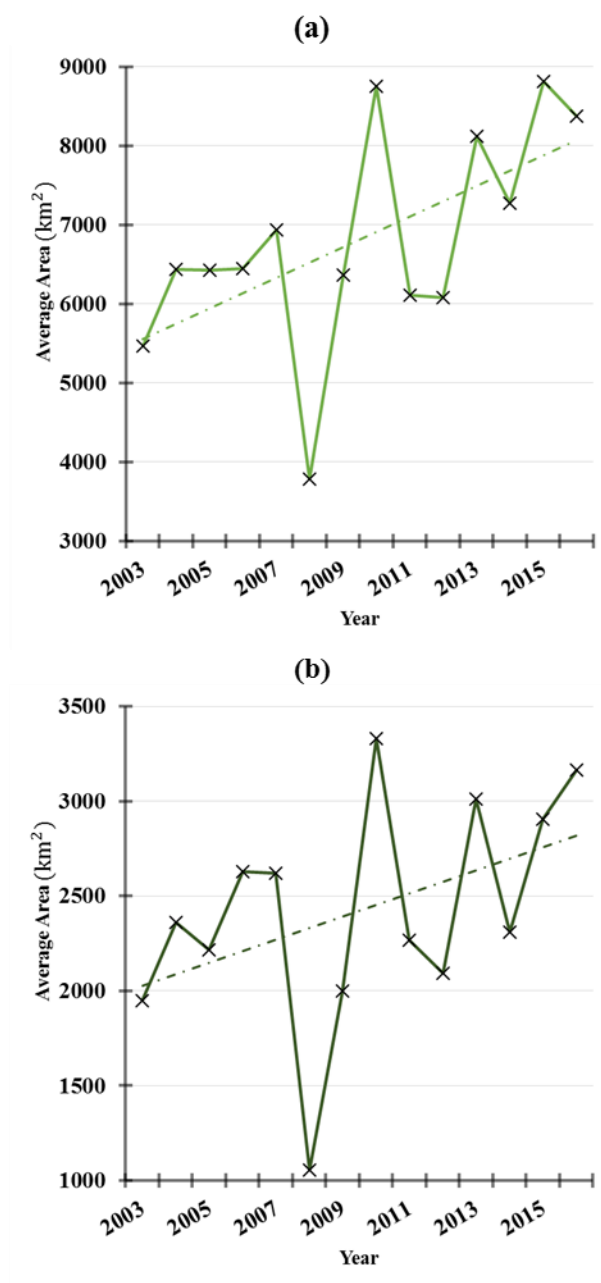
بر اساس مساحت‌های به دست آمده برای اراضی کشاورزی (جدول ۲) افزایش تبخیر و تفرق برای قسمت‌های کشاورزی مطابق انتظار بوده چرا که با افزایش اراضی کشاورزی و متعاقباً سطح زیر کشت در حوضه، مقدار آب مصرفی در این زمین‌ها افزایش می‌یابد. موضوع مهم دیگری که باید مورد ارزیابی دقیق مسئولان قرار بگیرد، روند افزایش تبخیر و تفرق مرجع و رابطه آن با روند تغییر اراضی کشاورزی موجود در منطقه است. طبق نتایج حاصل برای تبخیر و تفرق مرجع، مقادیر آن برای تمامی ماه‌ها افزایش یافته‌اند. این موضوع که نشان دهنده تغییر کلی اقلیم منطقه است، نمایان می‌سازد که اقلیم منطقه به صورت کلی گرم‌تر شده و آب مورد نیاز جهت کشاورزی نیز افزایش یافته است. افزایش در حدود ۴۰۰ کیلومتر مربعی در اراضی کشاورزی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶، با فرض مصرف یک متر مکعب آب در هر متر مربع و به صورت سالانه، منجر به نرخ افزایشی تقریبی ۲۴ میلیون متر مکعبی مصرف سالانه گردیده است.

باید توجه گردد که عدد مذکور تنها افزایش نرخ مصرف مربوط به افزایش اراضی کاربری است. با فرض بهره‌وری ۴۰ درصد در فرایند آبیاری، و با در نظرگیری مقدار میانگین افزایش سالیانه ۰/۱۸ میلی متر تبخیر و تفرق در بخش کشاورزی، حدود سه میلیون متر مکعب به صورت سالیانه از طریق تبخیر و تفرق به مصرف کشاورزی اضافه گردیده است. این برآورد نشان می‌دهد که تنها در بخش کشاورزی، به صورت سالیانه در حدود ۲۷ میلیون متر مکعب (مجموع افزایش تبخیر و تفرق و افزایش سطح زیر کشت) به مصرف در حوضه اضافه گردیده است.

۲-۷- بررسی روند تغییرات تبخیر و تفرق در محدوده سد بوکان

در این بخش با توجه به درخواست ستاد احیای دریاچه ارومیه، روند تغییرات تبخیر و تفرق در محدوده سد بوکان به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. با بازدیدهای میدانی صورت گرفته از منطقه به وسیله کارشناسان مرکز سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف و هم‌چنین نظرات کارشناسان بومی، میزان سطح زیر کشت در اطراف سد بوکان در سالیان اخیر رشد داشته است. برای مثال، دو تصویر ماهواره‌ای از منطقه برای سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶ میلادی در شکل ۲۰ نشان داده شده‌اند. به منظور صحت سنجی این موضوع، به صورت اختصاصی روند تغییرات در اطراف سد در حد فاصل بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی برای فصل‌هایی که در آن‌ها کشت و زرع صورت می‌گیرد (از ماه می تا سپتامبر) مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل ۲۱، منطقه‌ی انتخابی جهت بررسی بیشتر نشان داده شده است. روند تغییرات (به صورت میانگین) برای منطقه‌ی انتخابی برابر ۳/۵ میلی متر در سال به دست آمد که نسبت به میانگین فصلی مشابه برای کل حوضه (۵۳/۰ میلی متر) از مقدار قابل توجه‌تری برخوردار است (حدود ۷ برابر). این نتیجه نشان می‌دهد که میزان کشت و کار در این محدوده در سالیان اخیر روند رو به رشدی داشته است. با در نظرگیری روند

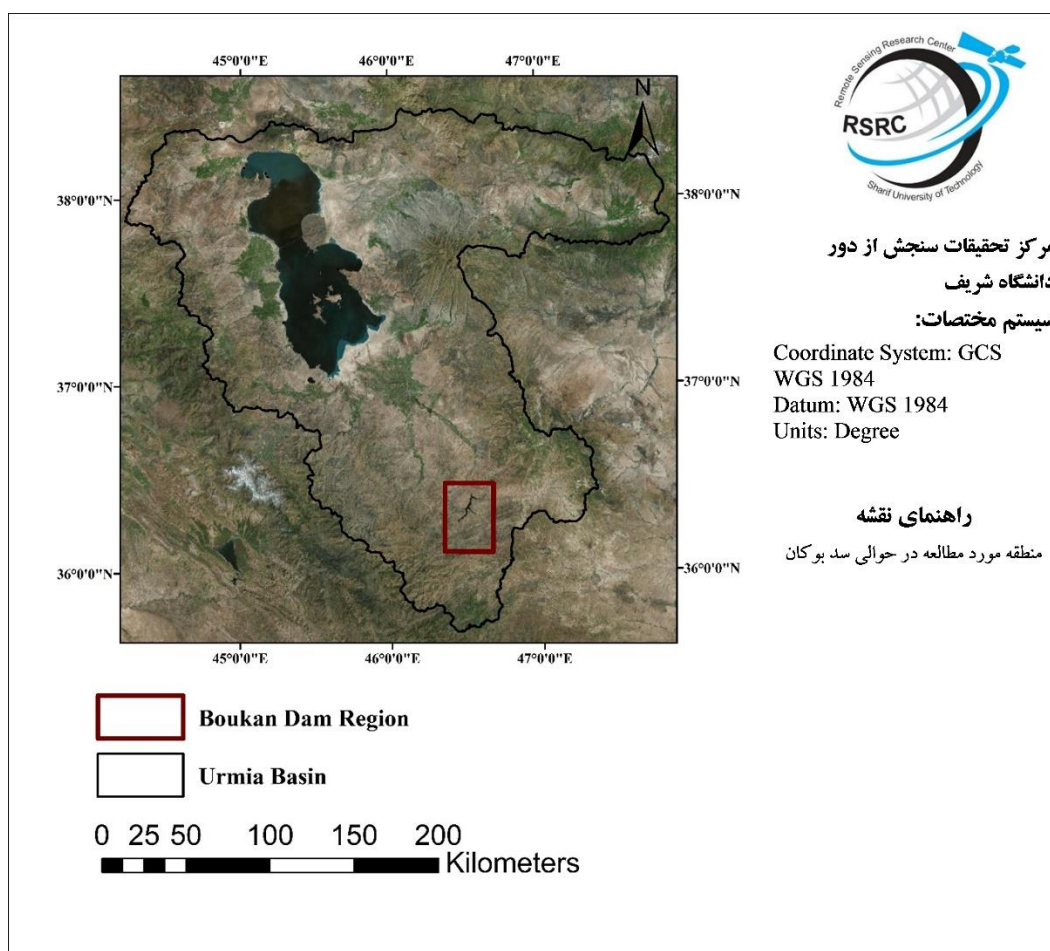
کلی کاهش بارش در حوضه، افزایش کشت در محدوده مذکور می‌تواند باعث کاهش دریافت حق آب دریاچه از سد بوکان گردیده باشد.



شکل ۱۹- تغییرات اراضی مرتع و کشاورزی در حوضه بر اساس شاخص (الف) NDVI و (ب) LAI



شکل ۲۰- تصاویر منطقه مطالعاتی بوکان متعلق به دو سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶ (تصاویر برداشتی از Google Earth)



شکل ۲۱- منطقه مورد بررسی در حوالی سد بوکان

۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با برآزش یک رگرسیون خطی به سری زمانی لایه‌های تبخیر و تعرق، شیب تغییرات برای هر ماه و به صورت پیکسل به پیکسل برای حوضه‌ی دریاچه ارومیه محاسبه گردید. با تعریف اراضی با کاربری‌های مختلف، مقادیر روند به دست آمده برای کلاس‌های تعریف شده (کشاورزی، مرتع، دیم، بایر و شهری) محاسبه گردیدند. هم‌چنین، با استفاده از داده‌های بارش ماهواره TRMM، روند بارش سالیانه در حوضه مورد بررسی قرار گرفته و با روند به دست آمده برای تبخیر و تعرق مقایسه گردید. در گام بعدی، با برآزش یک معادله درجه اول به داده‌های ماهیانه تبخیر و تعرق، شیب تغییرات برای این داده‌ها نیز محاسبه گردید. به منظور ارزیابی بهتر و جامع‌تر از مقادیر روند به دست آمده، تغییرات تخمینی نسبی تبخیر و تعرق نیز محاسبه گردید. به مانند مقادیر روند تبخیر و تعرق، مقادیر تغییرات تخمینی نسبی به تفکیک اراضی نیز گزارش گردیدند.

با به دست آوردن مقادیر روند برای تبخیر و تعرق (به صورت ماهیانه و به تفکیک اراضی) مشخص گردید که در طی ماه‌های فصل بهار و تابستان مقادیر اکسترمم روندها بزرگ‌تر از مقادیر به دست آمده به نسبت به بقیه‌ی ماه‌ها می‌باشند. هم‌چنین با در نظرگیری کلاس‌های تعریف گردیده برای اراضی مختلف، ماه‌های سپتامبر و مارچ به ترتیب ماه‌هایی می‌باشند که بیشینه تغییرات روندهای افزایشی و کاهشی در آن‌ها مشاهده می‌گردد. هم‌چنین در حد فاصل بین ماه‌های آگوست تا سپتامبر در تمامی کلاس‌ها روند افزایشی دیده می‌شود.

با توجه به گرم بودن این ماه‌ها و کاهش بارش در ماه‌های مذکور، افزایش تبخیر و تعرق در این ماه‌ها می‌تواند نشان دهنده‌ی مدیریت ناصحیح منابع آبی در سطح حوضه باشد. نتایج حاصل برای مقادیر اراضی کشاورزی گواه بر این موضوع هستند که در طی دهه‌ی اخیر نه تنها اراضی کشاورزی حوضه کاهش نیافته‌اند، بلکه به علت مدیریت ناصحیح افزایش هم داشته‌اند. هم‌چنین، روند تغییرات تبخیر و تعرق در بخش کشاورزی نمایانگر مصرف بیشتر آب در اراضی کشاورزی هستند، به صورتی که به صورت تقریبی در حدود ۲۷ میلیون متر مکعب به صورت سالیانه به مقدار مصرف اراضی کشاورزی حوضه در طی مدت بررسی (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶) اضافه گردیده است. افزایش مقدار تبخیر و تعرق در بخش کشاورزی هم ناشی از تغییرات اقلیمی منطقه و هم متأثر از تغییرات الگوی کشت و تغییر در فصل کشت است.

با مقایسه‌ی مقدار روند به دست آمده برای بارش و مقایسه آن با مقدار روند تبخیر و تعرق در حوضه، روشن می‌گردد که روند تبخیر و تعرق در حوضه افزایشی بوده، اما روند بارش در حوضه به صورت تقریبی کاهشی است. روند تبخیر و تعرق در حوضه برای اراضی کاربری مختلف نشان می‌دهد که به صورت کلی مقدار روند تغییرات

اراضی کشاورزی و شهری افزایشی بوده‌اند، در حالی که روند تغییرات اراضی دیم و بایر کاهشی هستند. مقادیر به دست آمده برای تبخیر و تعرق مرجع (که برای همه‌ی ماه‌ها افزایشی بوده‌اند) نشان دهنده‌ی این موضوع هستند که اقلیم منطقه طی سالیان اخیر تغییر داشته است، موضوعی که می‌تواند موجب تغییر در الگوی کشت و زمان کشت در حوضه شده باشد. روند ماهیانه‌ی مقادیر تبخیر و تعرق مرجع و هم‌چنین روند کاهشی بارش در سطح حوضه مطابق با روند افزایشی تبخیر و تعرق در ماه‌هایی که کشاورزی در حوضه به صورت گسترده انجام می‌شود (از آگوست تا سپتامبر) است. هرچند باید توجه داشت که روند به دست آمده برای دما و رطوبت نسبی غیر معنادار بوده و برای اثبات تغییرات اقلیمی منطقه نیاز به شواهد بیشتری وجود دارد.

ارزیابی مقادیر تبخیر و تعرق در حوالی سد بوکان نشان داد که روند تغییرات در این منطقه دارای شیب مثبت شدیدتری نسبت به میانگین حوضه بوده و مقدار تبخیر و تعرق در این ناحیه به صورت چشمگیری در دو دهه‌ی گذشته افزایش داشته است. روند افزایشی تأیید کننده‌ی نظر کارشناسان در مورد افزایش کشت و زرع در منطقه مذکور است. موضوعی که با کاهش بارش در منطقه همسو نبوده و احتمالاً نمایانگر استفاده بیشتر از آب‌های سطحی جهت آبیاری در منطقه است.

۴- مراجع

مرکز تحقیقات سنجش از راه دور دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۶. بررسی و مقایسه روش‌های برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، گزارش به شماره‌ی ۹۶-۱۱-RN.

مرکز تحقیقات سنجش از راه دور دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۷. برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی. پروژه‌ی تبخیر و تعرق JICA (گزارش نهایی در حال تکمیل).

Allen, R. G., M. Tasumi, and R. Trezza (2007), Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model, J.Irrig. Drain. Eng., 133(4), 380-394.

Calcagno, G., G. Mendicino, G. Monacelli, A. Senatore, and P. Versace (2007), Distributed estimation of actual evapotranspiration through remote sensing techniques, in Methods and Tools for Drought Analysis and Management, edited by G. Rossi et al., pp.125-147, Springer, Netherlands.

Droogers, P., W. W. Immerzeel, and I. J. Lorite (2010), Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations, Agric. Water Manage., 97, 1351-1359.

Kendall, M.G., (1955), Rank Correlation Methods. Griffin, London.

Mann, H.B., (1945), Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13, 245-259.

Zwart, S. J., W. G. M. Bastiaanssen, C. de Fraiture, and D. J. Molden (2010), WATPRO: A remote sensing based model for mapping water productivity of wheat, *Agric. Water Manage.*, 97(10), 1628–1636.



Urmia Lake Restoration Program



Sharif University of Technology
Remote Sensing Research Center

Actual Evapotranspiration (AET) trend analysis in the Lake Urmia Basin using MODIS imagery from 2000 to 2006

Author

Mohammad Sina Jahangir

Document ID

RN – 98 -22

September 2019