



ستاد احیای دریاچه ارومیه



دانشگاه صنعتی شریف
مرکز تحقیقات سنجش از دور (RSRC)

تخمین میانگین ماهانه سطح دریاچه ارومیه در فاصله سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ میلادی با استفاده از سنجنده MODIS

مدیر فنی
مصطفی جوادیان

کارشناسان
محمد عبدلی
امین مهرمنش

کد سند
OC11RN9604046

تیر ۹۶



شناسه سند			
عنوان سند		تخمین میانگین ماهانه سطح دریاچه ارومیه در فاصله سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ میلادی با استفاده از سنجنده MODIS	
نوع سند		گزارش فنی (TR) ■	خلاصه مدیریتی (ES) □
		یادداشت تحقیقی (RN) □	یادداشت فنی (TN) □
		مقاله (AR) □	خروجی غیر رسمی (RM) □
کد سند		TR-۹۶-۱۰	
شماره قرارداد			
تاریخ قرارداد		۱۳۹۶	
کارفرما			
گروه فنی		دکتر حمید طاهری شهرآیینی، دکتر پیمان دانشکار آراسته	
مدیر اجرایی		سهیلا یونس زاده جلیلی	
مدیر فنی طرح		مصطفی جوادیان	
کارشناسان فنی طرح		محمد عبدلی، امین مهرمنش	
تاریخ انتشار		۱۳۹۶	
ویرایش		ششم	

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

بررسی تغییرات مساحت پهنه‌های آبی به دلایل مختلف زیست‌محیطی، هیدرولوژیکی و اقتصادی-اجتماعی همواره مورد توجه محققان بوده است. دریاچه ارومیه در سال‌های اخیر با مشکل جدی کاهش تراز دریاچه رو به رو بوده است. با توجه به این نکته، بررسی تغییرات مساحت این دریاچه در این سال‌ها می‌تواند اطلاعات خوبی را در اختیار سیاست‌گذاران قرار دهد. در این مطالعه، سری زمانی تغییرات مساحت تراز دریاچه ارومیه از ماه مارس سال ۲۰۰۰ تا ماه آوریل سال ۲۰۱۷ با استفاده از سنجنده MODIS به دست آمده است. برای اینکار از شاخص NDWI که از باندهای سبز و مادون قرمز به دست می‌آید استفاده شده است. با توجه به روند تغییرات تراز در ماه‌های مختلف، در مجموع ۵۴۸ تصویر محصول بازتاب سطحی سنجنده MODIS (MOD09) انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد یک روند نزولی در سطح دریاچه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ دیده می‌شود. این روند در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ بسیار اندک است اما از سال ۲۰۰۸ تا سال ۲۰۱۷ هر سال به طور متوسط ۲۴۵ کیلومتر مربع از سطح دریاچه کاسته شده است. صحت‌سنجی نتایج با مقادیر بسیمتری سال ۹۴ موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام شد. مقدار RMSE بین این دو مجموعه داده برابر ۲۰۹ کیلومتر مربع و مقدار RMSE تقسیم بر میانگین مقادیر بسیمتری برابر ۵/۹ درصد بدست آمد که نشان از نزدیکی نتایج محاسبه شده با مقادیر بسیمتری دارد. همین‌طور مساحت‌های محاسبه شده در این تحقیق با نتایج پروژه سازمان فضایی ایران که با استفاده از ماهواره Landsat8 انجام شده است نیز مقایسه شد که نتایج نشان می‌دهد اختلاف بسیار کمی بین این مساحت‌ها وجود دارد و در واقع حساسیت این مطالعه به سنجنده مورد استفاده قابل توجه نبوده است.

کلمات کلیدی: مساحت سطحی، دریاچه ارومیه، NDWI، MODIS، بسیمتری.

فهرست مطالب

۱- مقدمه	۱
۱-۱- هدف تحقیق	۳
۱-۲- سوالات تحقیق	۳
۲- مروری بر ادبیات موضوع	۳
۳- مواد و روش ها	۱۰
۳-۱- داده‌های مورد استفاده	۱۰
۳-۱-۱- سنجنده مورد استفاده جهت استخراج سطح دریاچه	۱۰
۳-۱-۲- ماهواره مورد استفاده جهت استخراج حد آستانه شاخص NDWI	۱۰
۳-۱-۳- اطلاعات تراز ارتفاعی بسیمتری و بارش	۱۱
۳-۲- روش شناسی	۱۱
۳-۲-۱- شاخص NDWI	۱۲
۳-۲-۲- انتخاب حد آستانه شاخص NDWI	۱۳
۳-۲-۳- تعداد روزهای مناسب جهت میانگین‌گیری در ماه	۱۵
۳-۲-۴- محاسبه سطح به روش اتوماتیک	۱۶
۳-۲-۵- روشهای تحلیل آماری	۱۸
۴- نتایج	۲۰
۴-۱- صحت‌سنجی نتایج با استفاده از بسیمتری	۲۲
۴-۲- مقایسه نتایج با تحقیقات سازمان فضایی ایران	۲۴
۴-۳- تحلیل آماری نتایج	۲۶
۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	۳۰
۶- مراجع	۳۰
۷- پیوست	۳۳

۱- مقدمه

دریاچه‌ی ارومیه در شمال غربی ایران، یکی از بزرگ‌ترین دریاچه‌های دائمی فوق‌شور در جهان و بزرگ‌ترین دریاچه از این نوع در خاورمیانه است. حداکثر سطح دریاچه در دوران پرآبی در حدود ۶۱۰۰ کیلومترمربع ارزیابی شده است؛ با این حال، از سال ۱۹۹۵ میلادی وسعت دریاچه کاهش داشته و مطابق اطلاعات به‌دست آمده از تحلیل داده‌های ماهواره‌ی لندست، در اوت سال ۲۰۱۱ میلادی به ۲۳۶۶ کیلومترمربع رسیده است (Pengra, 2012). بدنه‌ی آبی دریاچه نسبتاً کم عمق بوده (عمق متوسط ۵/۴ متر) و طول دریاچه از ۱۳۰ تا ۱۴۵ کیلومتر در راستای شمالی- جنوبی متغیر است؛ حداکثر عرض گزارش شده برای دریاچه معادل ۵۸ کیلومتر می‌باشد. میزان نوسانات سطح آب در سال‌های کم آب و پر آب در حدود ۶ متر است (برنامه‌ی مدیریت جامع دریاچه ارومیه، ۱۳۸۹).

مدیریت جامع حوضه‌های آبخیز در گرو دانش عمیق از اطلاعات پایه حوضه و از جمله سطح روزانه و دقیق پیکره- های آبی حوضه می‌باشد. تاکنون تلاش‌های بسیاری جهت احیای دریاچه ارومیه و بازگشت آب به آن صورت گرفته و یکی از بهترین شاخص‌ها برای بررسی برآیند تأثیرات اقدامات اجرایی در طول زمان، بررسی تغییرات مساحت دریاچه می‌باشد.

تعیین سطح پیکره‌های آبی به روش‌های گوناگون نظیر روش نقشه‌برداری زمینی، برآورد از طریق بررسی روابط بسیمتری، استفاده از فن‌های سنجش از دور و ... صورت می‌پذیرد؛ در بین شیوه‌های فوق، روش استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به دلیل پوشش وسیع مکانی، قدرت تفکیک بالا، هزینه کم، آرشیو زمانی غنی تصاویر ماهواره‌ای و سهولت روش‌های تعیین مساحت کاربرد فراوانی در مطالعات هیدرولوژیکی داشته است.

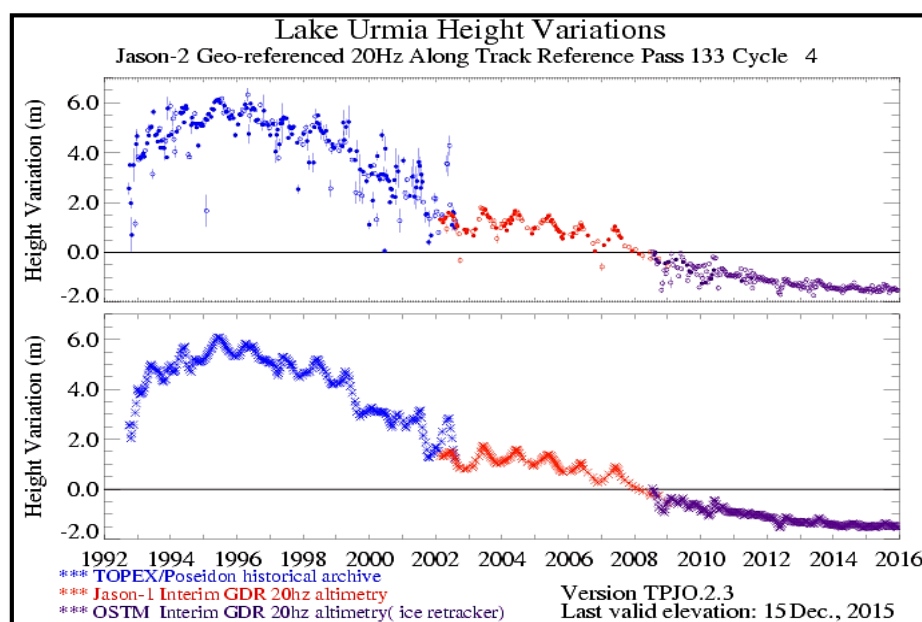
فناوری سنجش از دور امروزه این امکان را برای محققین علوم زمین فراهم آورده تا بتوانند با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و پردازش‌هایی که بر روی این تصاویر صورت می‌گیرد، اطلاعات لازم را در ارتباط با شناخت بیشتر و آشکارسازی تغییرات در محیط پیرامون انسان‌ها در سیاره زمین را شناسایی نمایند. یکی از حوزه‌هایی که برنامه EOS سازمان NASA^۱ بر روی آن تمرکز نموده، پایش پهنه‌های آبی در جهان است. علاوه بر ماهواره‌های اپتیکال، امروزه از ماهواره‌های راداری نیز در ارتباط با پایش سطح تراز این نوع از پهنه‌ها استفاده می‌شود. به عنوان مثال ماهواره‌های راداری TOPEX/POSEIDON و همچنین OSTM^۲ از جمله نمونه فعالیت‌هایی هستند که در آن از سنجنده‌های

^۱ National Aeronautic and Space Administration

^۲ Ocean Surface Topography Mission

راداری برای مطالعات مربوط به حوزه‌های آب‌شناسی استفاده شده است. با استفاده از فناوری سنجنش ازدور اپتیکال می‌توان به مطالعه و ارزیابی پیکره‌های آبی پرداخت. مطالعات سنجنش ازدوری که می‌توان با استفاده از آن به مطالعه در این زمینه پرداخت شامل مطالعات مربوط به آب‌های سطح زمین و همچنین مطالعات آب‌های زیرزمینی می‌شود. مطالعات مربوط به آب‌های سطحی با استفاده از سنجنش ازدور اپتیکال از ابعاد گوناگونی می‌تواند مورد توجه قرار بگیرد.

برآورد مساحت سطحی آب دریاچه ارومیه می‌تواند اطلاعات مناسبی را در ارتباط با میزان افزایش و کاهش میزان آب دریاچه در بازه‌های زمانی مختلف در اختیار کاربران قرار دهد. در حقیقت روش ماهواره‌ای برآورد مساحت سطحی دریاچه در ارتباط با ارزیابی شرایط موجود و اثر فعالیت‌های مختلف بر روی آب دریاچه، مؤثر و کاربردی است. همچنین روش‌های تحقیقاتی مبتنی بر سنجنش ازدور، عموماً روش‌هایی هستند که با هزینه اندک اطلاعات زیادی را در اختیار کاربران قرار دهند. مشاهده تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های به‌دست آمده در مطالعات محققین نشان‌دهنده تغییرات بسیار زیاد در ارتباط با سطح و تراز آب این دریاچه در طول دهه اخیر است. برای مثال داده‌های راداری مانند TOPEX/POSEIDON و همچنین OSTM به‌خوبی تغییرات سطح تراز آب دریاچه ارومیه را از دهه ۹۰ میلادی تاکنون نشان می‌دهند (شکل ۱).



شکل ۱- تغییرات سطح تراز دریاچه ارومیه، بر اساس داده‌های راداری ماهواره‌های TPEX, JASON, POSEIDON

۱-۱- هدف تحقیق

هدف اصلی این تحقیق، محاسبه سری زمانی سطح دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ میلادی است. در کنار این هدف، بررسی الگوریتم‌های مختلف استخراج پهنه‌های آبی با استفاده از فناوری سنجنش‌ازدور و همین‌طور تحلیل آماری نتایج از اهداف دیگر این تحقیق می‌باشد.

۲-۱- سوالات تحقیق

سوالاتی که برای این تحقیق در نظر گرفته شده است عبارتند از:

- چه روش‌هایی جهت استخراج مساحت پهنه‌های آبی با استفاده از سنجنش از دور وجود دارد؟
- با توجه به شرایط دریاچه ارومیه، چه روشی برای استخراج مساحت این دریاچه مناسب‌تر است؟
- سری زمانی تغییرات متوسط ماهانه سطح دریاچه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ چگونه است؟
- مساحت‌های بدست آمده از طریق فناوری سنجنش از دور چه مقدار با نتایج بسیمتری اختلاف دارند؟
- تحلیل آماری سری زمانی سطح دریاچه به چه صورتی است و آیا می‌توان سری زمانی آن را مدل‌سازی کرد؟

۲- مروری بر ادبیات موضوع

روش‌های مختلفی به منظور شناسایی^۳ و طبقه‌بندی^۴ پهنه‌های آبی و یا آشکار سازی تغییرات زمانی^۵ آن‌ها وجود دارد. در یک تقسیم‌بندی می‌توان این روش‌ها را به دو دسته در سطح پیکسل و در سطح جزء پیکسل (روش جداسازی طیفی^۶) تقسیم نمود. الگوریتم‌های طبقه‌بندی در سطح پیکسل فرض می‌کنند که پیکسل‌ها خالص هستند (وجود یک عنصر در پیکسل‌ها) در حالی که الگوریتم‌های طبقه‌بندی در سطح زیر پیکسل اساساً بر خالص بودن پیکسل‌ها قرار می‌دهند. از نقطه نظر دیگری این روش‌ها را می‌توان به دو دسته نظارت شده و نظارت نشده تقسیم نمود. به طور کلی می‌توان گفت که روش‌های نظارت نشده نیازمند هزینه، زمان و اطلاعات کمتری نسبت به روش‌های نظارت شده می‌باشند (Kerle, Janssen et al. 2004).

به عنوان مثال Ma و همکاران (۲۰۱۴) بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ با استفاده از روش جداسازی طیفی به تخمین سطح دریاچه Hongji Ianna در چین پرداختند. آن‌ها با بهره‌گیری از تصاویر ۲۵۰ متری سنجنده MODIS،

^۳ Target detection

^۴ Classification

^۵ Change detection

^۶ unmixing

ابتدا به تعیین پیکسل‌های خالص تصویر و سپس تخمین فراوانی پیکسل‌های آب در پیکسل‌های مختلط با خاک پرداختند. در مرحله بعد با میانگین‌گیری فراوانی‌های به دست آمده از این دو باند و تعیین پیکسل‌هایی که دارای فراوانی آب و خاک هستند، مرز بین آب و خشکی را تعیین و از این طریق سطح دریاچه را به دست آوردند. این روش نه تنها به انتخاب صحیح پیکسل‌های خالص بستگی دارد، بلکه متأثر از تعداد باندهای مورد استفاده نیز می‌باشد. همچنین به منظور انجام طبقه‌بندی به صورت نظارت شده از خط ساحلی استخراج شده از تصاویر TM به منظور ارزیابی نتایج استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده ثبات روش جداسازی طیفی برای استفاده در سال‌های مختلف می‌باشد.

در تحقیقی دیگر Pekel و همکاران (۲۰۱۴) بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ از تبدیل RGB به HSV^۷ به منظور استخراج خودکار سطوح آبی در قاره آفریقا با استفاده از سری زمانی تصاویر ۲۵۰ و ۵۰۰ متر سنجنده MODIS بهره گرفته‌اند. در این تحقیق به ترتیب باندهای MIR، NIR و R به مقادیر H، S و V تبدیل می‌گردند. با اعمال این تبدیل تفکیک‌پذیری کلاس‌های مختلف که عمدتاً آب و خاک می‌باشند، از یکدیگر بیشتر شده و با در نظر گرفتن چندین حد آستانه، این دو کلاس قابل تمایز از یکدیگر می‌گردند. همچنین از دو روش تفسیر چشمی و استفاده از داده‌های استخراج شده از یک تصویر با توان تفکیک بالا برای ارزیابی دقت استفاده شده است. دقت برآورد شده با استفاده از این روش‌ها به ترتیب ۹۶٫۶ و ۹۱٫۵ درصد می‌باشد.

OUMA و Tateishi (۲۰۰۷) نیز بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴ با ترکیب اطلاعات بافت و طیف به تعیین خطوط ساحلی دریاچه Nakuru در کنیا پرداختند. اطلاعات بافت توسط تبدیل ویولت استخراج و سپس پیکسل‌های آب در تصاویر Landsat TM، ETM+، MSS با استفاده از روش شبکه عصبی تعیین گردیدند. در نهایت با تلفیق این داده‌ها با استفاده از یک الگوریتم انتخاب ویژگی، خطوط ساحلی و سطح دریاچه محاسبه گردیدند. نتایج در مقایسه با روش‌های متداول طبقه‌بندی مانند روش حداکثر شباهت، ISODATA و PCA که فقط از اطلاعات طیفی استفاده می‌نمایند، دقت بهتری را نشان می‌دهد.

با توجه به وجود پیچیدگی‌هایی در استفاده از روش‌های طبقه‌بندی در سطح زیر پیکسل (به عنوان مثال معرفی دقیق اعضای خالص به الگوریتم) و یا انتخاب تعداد لایه‌های مناسب در روش شبکه عصبی، برخی از محققین جهت شناسایی و یا طبقه‌بندی پهنه‌های آبی از تعدادی شاخص استفاده می‌نمایند. شاخص‌ها به جای استفاده از کل منحنی طیفی از برخی طول موج‌ها و نسبت مقادیر آن‌ها استفاده می‌کنند. به عبارت دیگر از آنجایی که طیف‌های مرجع

^۷ Hue, saturation, value

اغلب فقط در چند طول موج دارای اختلاف‌هایی با یکدیگر بوده و در سایر طول موج‌ها طیف‌ها با یکدیگر شباهت زیاد دارند، از نسبت دو یا چند باند جهت طبقه‌بندی استفاده می‌گردد. روش‌های نسبت باندی در مقایسه با روش‌هایی که مبنای آن‌ها مقایسه دو منحنی طیفی می‌باشد، دارای این مزیت می‌باشند که به میزان کمی تحت تأثیر خطاهای مربوط به فرآیند تصحیح اتمسفری هستند (van Ruitenbeek, Debba et al. 2006).

یکی از شاخص‌هایی که توسط محققان بسیاری جهت استخراج آب از تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است، شاخص NDWI می‌باشد. این شاخص اولین بار توسط Mac Feeters ارائه شده است. (McFeeters, 1996). در ادامه به برخی از تحقیقات با استفاده از این شاخص و دیگر شاخص‌های مرتبط با آب اشاره می‌شود.

SL Zhou و همکاران (۲۰۱۶) در سال‌های ۱۹۷۳ تا ۲۰۱۴ به بررسی تغییرات زمانی در ۱۲ دریاچه آب شور در حوضه آبریز Qaidam چین پرداختند. آن‌ها با استفاده از تصاویر Landsat TM, ETM+, MSS و HJ-1A/1B و بهره‌گیری از شاخص NDWI سطح دریاچه‌ها را تعیین نمودند. در کنار تصاویر ماهواره‌ای از داده‌های مربوط به بارش و دما نیز جهت مدل‌سازی رابطه بین این پارامترها با سطح دریاچه‌ها استفاده گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که دو دریاچه در سال ۲۰۱۴ به علت کم عمق بودن با استفاده از این روش قابل شناسایی نبودند.

در تحقیقی که توسط Feyisa و همکاران (۲۰۱۴) انجام شده است، با بهره‌گیری از تصاویر Landsat 5 TM و استفاده از شاخص AWEI سطح تعدادی دریاچه در کشورهای دانمارک، سوئیس، اتیوپی، آفریقای جنوبی و نیوزیلند محاسبه شده است. آن‌ها همچنین از شاخص MNDWI و روش طبقه‌بندی کننده حداکثر شباهت به منظور مقایسه با نتایج شاخص AWEI استفاده نموده‌اند. نتایج نشان می‌دهد در مناطقی که نوزهای محیطی و نیز سایه وجود داشته است، شاخص MNDWI و روش حداکثر شباهت قادر به تشخیص آب نبودند؛ اما شاخص AWEI به علت توانایی در افزایش جدایی‌پذیری طیفی بین پیکسل‌های آب و پیکسل‌های غیر آب دارای کارآمدی لازم جهت شناسایی پهنه‌های آبی می‌باشد.

Sarp و همکاران (۲۰۱۷) بین سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۱ به بررسی تغییرات زمانی دریاچه Burdur در ترکیه پرداختند. آن‌ها با استفاده از تصاویر Landsat TM, ETM+ و شاخص‌های NDWI، MNDWI، AWEI و روش طبقه‌بندی Support Vector Machine (SVM) سطح دریاچه را محاسبه نمودند. نتایج نشان می‌دهد به ترتیب روش‌های SVM، MNDWI، NDWI و AWEI از بیش‌ترین دقت برخوردار بودند. برای ارزیابی دقت نتایج نیز از تصاویر Google Earth با توان تفکیک مکانی بالا استفاده گردیده است.

Campos و همکاران (۲۰۱۲) بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ از سه شاخص NDWIG/NIR، NDWINIR/MIR و NDWIG/MIR جهت استخراج پهنه‌های آبی در کشور موریتانی استفاده نمودند. شاخص‌ها بر روی تصاویر Landsat 5 TM و Landsat 7 ETM+ محاسبه و از تعداد ۵۵۱ نقطه کنترل جهت ارزیابی نتایج به دست آمده از شاخص‌ها استفاده شده است. تعدادی نقطه کنترل نیز جهت محاسبه حد آستانه شاخص‌ها در نظر گرفته شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که شاخص‌های NDWIG/MIR و NDWINIR/MIR به ترتیب برای تشخیص آب‌های دائمی و فصلی دارای بهترین دقت هستند، درحالی که شاخص NDWIG/NIR برای تشخیص پهنه‌های آبی ناکارآمد می‌باشد.

Ayana و همکاران (۲۰۱۴) بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ با استفاده از سنجنده MODIS و شاخص ENDVI (تلفیق ۲ شاخص NDVI و NDWI) سطح دریاچه Tana در اتیوپی را محاسبه نمودند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با وجود قدرت تفکیک مکانی نسبتاً پایین سنجنده MODIS، این سنجنده از قابلیت بالایی جهت استخراج ارتفاع و سطح دریاچه برخوردار می‌باشد. جهت ارزیابی نتایج ابتدا یک مدل عمق سنجی با استفاده از تصاویر ۲۵۰ و ۵۰۰ متری سنجنده MODIS ایجاد و سپس دقت آن با استفاده از داده‌های ارتفاعی که به صورت روزانه از دریاچه به دست آمدند تعیین گردید.

Yan Zhou و همکاران (۲۰۱۷) جهت استخراج پهنه آبی Poyang در چین با بهره‌گیری از تصاویر Landsat 7، 8 و Sentinel-2 به ارزیابی ۵ شاخص TCW، NDWI، MNDWI، AWEI و LSWI پرداختند. خروجی حاصل از تصاویر Landsat 8 و Sentinel-2 دقت‌های بهتری نسبت به تصاویر Landsat 7 دارند. همچنین اگرچه کلیه شاخص‌ها دارای دقت قابل قبول می‌باشند، اما نتایج حاصل از شاخص NDWI با ۹۵ درصد دارای بالاترین دقت نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد.

Gautam و همکاران (۲۰۱۵) به مشاهده تغییرات زمانی رخ داده در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴ در محدوده دریاچه‌های شهر Bangalore در هند پرداختند. در این تحقیق با بهره‌گیری از تصویر Landsat ETM و استفاده از شاخص‌های WRI، NDWI و MNDWI اقدام به محاسبه سطح دریاچه شده است. نتایج تحقیق کاهش سطح دریاچه‌ها را در این بازه زمانی نشان می‌دهد. بهترین نتایج از شاخص WRI به دست آمده، که با استفاده از نقشه‌برداری‌های زمینی صحت‌سنجی شده است. نتایج تحقیق متأثر از عوارضی مانند خاک مرطوب و گیاه می‌باشد که در برخی موارد به جای پیکسل آب انتخاب شده‌اند.

Tang و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از تصاویر Landsat 5 TM سطح رودخانه Yangtze در چین را برای سال ۱۹۹۸ محاسبه نمودند. شاخص‌های استفاده‌شده در این تحقیق عبارت‌اند از NDWI، MNDWI و NEW. نتایج نشان

می‌دهد که این شاخص‌ها توانایی لازم برای استخراج آب را دارند اما در مناطقی که تصویر ابری می‌باشد، در تشخیص آب از ابر دچار مشکل هستند. از این رو با تلفیق باند ۱ و ۷ تصویر Landsat 5 TM و شاخص NDVI، شاخص VNDWI را تولید نمودند که قادر است تأثیرات ابر و سایه آن را حذف نموده و پیکسل‌های آب را با دقت بهتری استخراج نماید.

در حوضه دریاچه ارومیه نیز تحقیقات بسیاری با استفاده از شاخص‌های مرتبط با آب و از جمله شاخص NDWI صورت پذیرفته است که از آن جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود.

Taravat و همکاران (۲۰۱۶) بین سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۵ به اندازه‌گیری تغییرات زمانی و مکانی رخ داده در دریاچه‌های ارومیه در ایران، Van در ترکیه و Sevan در ارمنستان پرداختند. در این تحقیق با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره Landsat (5-TM, 7-ETM+, 8-OLI) و استفاده از شاخص‌های WRI، NDWI، MNDWI، AWEI، NDWI-PCs، NDMI ارتفاعی ماهواره‌های Topex/Poseidon، Jason-1، Jason-2، ENVISAT و GFO و نیز داده‌های هواشناسی به منظور تعیین پارامترهای دریاچه‌ها استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده کارآمدی بهتر روش شبکه عصبی می‌باشد. در این بازه زمانی درحالی که سطح دریاچه‌های Van و Sevan افزایش داشته است، سطح دریاچه ارومیه با کاهش ۶۵ درصدی روبرو بوده است.

Tourian و همکاران (۲۰۱۵) بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴ با بهره‌گیری از داده‌های ارتفاعی ماهواره‌های ENVISAT، CryoSat-2، تصاویر ۲۵۰ متری سنجنده MODIS و نیز عمق سنجی میدانی، دریاچه ارومیه را پایش نمودند. داده‌های ماهواره‌های ENVISAT و CryoSat-2 نشان می‌دهند که در این بازه زمانی به طور میانگین در هر سال ارتفاع دریاچه ۳۴ سانتیمتر کاهش پیدا کرده است. نتایج طبقه‌بندی تصاویر مادیس با استفاده از روش طبقه‌بندی ISODATA نیز به طور میانگین حاکی از کاهش ۲۲۰ کیلومترمربع از سطح دریاچه در هر سال می‌باشد. همچنین عمق سنجی نیز به طور میانگین کاهش ۱٫۰۳ کیلومترمکعب از حجم دریاچه را در هر سال نشان می‌دهد. علاوه بر داده‌های ذکر شده از داده‌های مربوط به بارش و تبخیر و تعرق نیز جهت تحلیل نرخ تغییرات دریاچه استفاده شده است. این اطلاعات نشان می‌دهند که بعد از سال ۲۰۰۸ حوزه آبریز با کاهش بارش روبرو بوده است. این کاهش بارش، افزایش برداشت از چاه‌های اطراف دریاچه و کاهش سطح دریاچه با شتاب بیشتر را به دنبال داشته است.

Rokni و همکاران (۲۰۱۴) تغییرات زمانی و مکانی ایجادشده در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ در دریاچه ارومیه را تعیین نمودند. در این تحقیق با بهره‌گیری از تصاویر Landsat (5-TM, 7-ETM+, 8-OLI) و استفاده از شاخص‌های

NDWI، MNDWI و NDWI-PCs اقدام به محاسبه سطح دریاچه‌ها شده است که دقت هر یک از این شاخص‌ها توسط ضریب کاپا برآورد گردیده است. نتایج نشان می‌دهند که شاخص NDWI دارای دقت بهتری نسبت به سایر شاخص‌ها می‌باشد. همچنین روش NDWI-PCs به منظور آشکار سازی تغییرات آب‌های سطحی از کارآمدی لازم برخوردار می‌باشد.

Alesheikh و همکاران (۲۰۰۷) بین سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۱ با بهره‌گیری از تصاویر Landsat 4 TM، Landsat 5 TM و ETM+ 7 به مشاهده تغییرات خط ساحلی دریاچه ارومیه پرداختند. در این تحقیق با استفاده همزمان از روش نسبت باندی و آستانه گذاری بر روی هیستوگرام‌های فراوانی، سطح دریاچه محاسبه گردیده است. نتایج نشان‌دهنده کاهش ۱۰۰۰ کیلومترمربعی سطح دریاچه در این سال‌ها می‌باشد. برای ارزیابی نتایج پس از تلفیق یک تصویر چند طیفی ETM+ با تصویر پانکروماتیک متناظرش، خط ساحلی با تفسیر چشمی از آن استخراج گردیده و به عنوان مبنای مقایسه نتایج در نظر گرفته شده است. علاوه بر این از داده‌های ارتفاعی ماهواره TOPEX/Posidon نیز جهت ارزیابی تغییرات ارتفاعی استفاده شده است. خلاصه ای از مرور بر ادبیات انجام شده در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱- خلاصه مرور منابع سطح دریاچه

منابع	نوع یا ویژگی دریاچه یا رودخانه	باندهای مورد استفاده	روش مورد استفاده	تصویر مورد استفاده	نحوه صحت سنجی
۱ Ma, Wu et al. (2014)	دارای اقلیم خشک و نیمه خشک	باندهای R و NIR	جداسازی طیفی	تصاویر ۲۵۰ و ۵۰۰ متر سنجنده مادیس	استفاده از تصاویر Landsat TM
۲ Pekel, et al. (2014)	-	R و NIR، MIR	تبدیل RGB به HSV	تصاویر ۲۵۰ و ۵۰۰ متر سنجنده مادیس	تفسیر چشمی و تصویر توان تفکیک بالا
۳ Gautam,) Gaurav et al. (2015)	-	باندهای R، G، NIR و MIR	شاخص‌های NDWI، WRI و MNDWI	Landsat ETM	نقشه برداری زمینی

ادامه جدول ۱ - خلاصه مرور منابع سطح دریاچه

۴ Zhou, Zhang) (et al. 2016	آب شور	باند G و NIR	شاخص NDWI	Landsat HJ- TM, ETM+, MSS 1A/1B	تفسیر چشمی
۵ Zhou, Dong) (et al. 2017	دارای آب‌های کم عمق و نیز عمیق	باند G و NIR	TCW، NDWI و AWEI، LSWI و MNDWI	Landsat 8، Landsat 7 و Sentinel-2	تصویر با توان تفکیک مکانی بالا

داده‌های زمینی	Landsat TM , ETM+, MSS	شبکه عصبی	باندهای G, R , NIR و MIR	-	Ouma and) (Tateishi 2007	۶
تصاویر Google earth	Landsat TM, ETM+	MNDWI , SVM AWEI و NDWI	باندهای G, R , NIR و MIR	-	Sarp and) (Ozcelik 2017	۷
داده‌های زمینی	Landsat 5 TM	MNDWI , AWEI	باند G و NIR	-	Feyisa,) Meilby et al. (2014	۸
نقاط کنترل زمینی	Landsat 5 TM Landsat 7 ETM+	NDWI	باندهای G, MIR و NIR	رودخانه فصلی و دائمی	Campos,) Sillero et al. (2012	۹
داده‌های ارتفاعی جمع‌آوری شده به صورت روزانه	تصاویر ۲۵۰ و ۵۰۰ متر سنجنده مادیس	ENDVI	باندهای R , NIR و MIR	-	Ayana,) Philpot et al. (2014	۱۰
داده‌های زمینی	Landsat 5 TM	MNDWI , NDWI و NEW	باندهای G, R , NIR و MIR	-	Tang, Ou et) (al. 2012	۱۱
داده‌های ارتفاعی ماهواره‌های 'Topex/Poseidon ' Jason-2 , Jason-1 GFO و ENVISAT	7- Landsat (5-TM, ETM+ , 8-OLI)	MNDWI , NDWI , WRI , NDWI-PCs , NDMI ,	باندهای G, R , NIR و MIR	-	Taravat,) Rajaei et al. (2016	۱۲
داده‌های ماهواره‌های و ENVISAT CryoSat-2	تصاویر ۲۵۰ متر سنجنده مادیس	ISODATA	باندهای R و NIR	-	Tourian,) Elmi et al. (2015	۱۳
ماتریس خطا و ضریب کاپا	7- Landsat (5-TM, ETM+ , 8-OLI)	MNDWI , NDWI NDWI-PCs	باندهای G, R , NIR و MIR	-	Rokni,) Ahmad et al. (2014	۱۴
تصویر پانکروماتیک ETM+ و داده‌های ارتفاعی ماهواره TOPEX/Posidon	, Landsat 4 TM , Landsat 7 ETM+ Landsat 5 TM	روش نسبت باندهای و آستانه گذاری بر روی هیستوگرام‌های فراوانی	باندهای G, R , NIR و MIR	-	Alesheikh,) Ghorbanali et (al. 2007	۱۵

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- داده‌های مورد استفاده

۳-۱-۱- سنجنده مورد استفاده جهت استخراج سطح دریاچه

انتخاب سنجنده مناسب اولین و مهم‌ترین مرحله در حصول موفقیت برای یک منظور خاص در این زمینه می‌باشد (Phinn 1998). مقیاس، قدرت تفکیک تصویر و نیاز کاربر یا کارفرما مهم‌ترین عواملی هستند که انتخاب داده سنجنش‌ازدوری را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

سنجنده MODIS با داشتن ۳۶ باند طیفی و نیز پهنای باند ۲۰ نانومتر قابلیت ثبت جزئیات طیفی بسیاری را دارد. اگرچه این سنجنده دارای دقت‌های مکانی نسبتاً پایین می‌باشد؛ اما بالا بودن قدرت تفکیک طیفی و زمانی آن از یک طرف و از سوی دیگر در دسترس بودن تصاویر این سنجنده، استفاده از آن را توجیه می‌نماید. جهت استخراج سطح دریاچه از تصاویر بازتاب سطحی (محصول MOD 09) این سنجنده با توان تفکیک‌های مکانی ۲۵۰ متر و ۵۰۰ متر استفاده می‌شود. پس از حذف تصاویر ابری، به‌منظور استفاده از تصویر با بهترین توان تفکیک مکانی (۲۵۰ متر) که دارای باند NIR می‌باشد، تصاویر ۵۰۰ متر به ۲۵۰ متر تبدیل می‌گردند. جدول ۲ مشخصات ۷ باند نخست سنجنده MODIS را که در این تحقیق برای محاسبه سطح دریاچه و صحت سنجی بصری استفاده شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات ۷ باند نخست سنجنده MODIS

شماره باند	طول موج (نانومتر)	دقت مکانی
۱	۶۲۰-۶۷۰	۲۵۰ متر
۲	۸۴۱-۸۷۶	
۳	۴۵۹-۴۷۹	۵۰۰ متر
۴	۵۴۵-۵۶۵	
۵	۱۲۳۰-۱۲۵۰	
۶	۱۶۲۸-۱۶۵۲	
۷	۲۱۰۵-۲۱۵۵	

۳-۱-۲- ماهواره مورد استفاده جهت استخراج حد آستانه شاخص NDWI

نسل جدید سری ماهواره‌های Landsat، ماهواره Landsat8 می‌باشد که در تاریخ ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ پرتاب شده است. این هشتمین ماهواره از سری ماهواره‌های Landsat، و هفتمین ماهواره‌ای است که با موفقیت در مدار قرار گرفته

است. Landsat8 اخذ مستمر داده را با استفاده از دو سنجنده که سنجنده اول تصویربردار عملیاتی زمین (OLI) و سنجنده دوم، سنجنده مادون قرمز حرارتی (TIRS) می‌باشد را تضمین نموده است. در این تحقیق از تصاویر این ماهواره برای انتخاب حد آستانه تفکیک پهنه‌های آبی شاخص منتخب بهره گرفته شده است. مشخصات باندهای مورد استفاده این ماهواره در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳- مشخصات شش باند نخست ماهواره لندست ۸

شماره باند	نام باند	محدوده طیفی (میکرومتر)	توان تفکیک مکانی (متر)
۱	آتروسل ساحلی	۰/۴۳ تا ۰/۴۵	۳۰
۲	آبی	۰/۴۵ تا ۰/۵۱	۳۰
۳	سبز	۰/۵۳ تا ۰/۵۹	۳۰
۴	قرمز	۰/۶۴ تا ۰/۶۷	۳۰
۵	مادون قرمز نزدیک	۰/۸۵ تا ۰/۸۸	۳۰
۶	مادون قرمز طول موج کوتاه ۱	۱/۵۷ تا ۱/۶۵	۳۰

۳-۱-۳- اطلاعات تراز ارتفاعی بسیمتری و بارش

جهت صحت سنجی سطوح برآورد شده با استفاده از سنجنده MODIS، از خروجی بسیمتری دریاچه ارومیه که توسط موسسه تحقیقات آب در سال ۱۳۹۴ توسعه داده شده، استفاده شده است. به منظور استخراج بسیمتری (عمق سنجی) دریاچه ارومیه، عمق آب کلیه نواحی دریاچه با دستگاه عمق سنج آب با ارسال پالس الکترومغناطیسی ۵۰ و ۲۰۰ کیلوهرتز و ثبت اطلاعات برگشتی، با دقت قابل اطمینانی در نواحی قابل تردد دریاچه اندازه گیری شده است. همچنین به منظور افزایش دقت و کالیبراسیون دستگاه، در نواحی مشخصی نیز به صورت دستی از سیستم طناب و وزنه برای تعیین مستقیم عمق استفاده شده است. در روش شناسی الگوریتم بسیمتری نیز از تصاویر ماهواره Landsat نیز در کنار الگوریتم‌های میدانی بهره گرفته شده است. برای اخذ اطلاعات بارش از آمار روزانه بارش در ایستگاه ارومیه استفاده گردید.

۳-۲- روش شناسی

برای انتخاب الگوریتم استخراج سطح دریاچه، با توجه به مرور منابع انجام شده، محدودیت‌های زمانی و نیز موارد متعدد استفاده از شاخص NDWI در تحقیقات پیشین (جدول ۱) و از طرفی دیگر وجود پیچیدگی‌هایی در

استفاده از روش‌های طبقه‌بندی در سطح زیر پیکسل (مثلاً معرفی دقیق اعضای خالص به الگوریتم)، از شاخص NDWI استفاده شده است. روش انجام این تحقیق به صورت یک فلوچارت در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- فلوچارت روش شناسی استخراج مساحت سطحی دریاچه ارومیه

۳-۲-۱- شاخص NDWI

McFeeters (۱۹۹۶) شاخص NDWI را به صورت رابطه (۱) ارائه نمود که ترکیبی از باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک می باشد.

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}} \quad (1)$$

این شاخص به عنوان یک روش طبقه‌بندی در سطح پیکسل، یک روش نسبت بانندی محسوب می شود که به جای استفاده از کل منحنی طیفی از برخی طول موج‌ها و نسبت مقادیر آن‌ها استفاده می نماید. به عبارت دیگر از آنجایی که طیف‌های مرجع اغلب فقط در چند طول موج دارای اختلاف‌هایی با یکدیگر بوده و در سایر طول موج‌ها طیف‌ها با یکدیگر شباهت زیاد دارند، از نسبت دو یا چند باند جهت طبقه‌بندی استفاده می گردد. روش‌های نسبت بانندی در مقایسه با روش‌هایی که مبنای آن‌ها مقایسه دو منحنی طیفی می باشد، به میزان کمی تحت تأثیر خطاهای مربوط به فرآیند تصحیح اتمسفری هستند (van Ruitenbeek, Debba et al. 2006).

به صورت پیش فرض در این شاخص مقادیر خروجی بالای صفر به عنوان کلاس آب در نظر گرفته می شود. نکته حائز اهمیت در استفاده از این شاخص به منظور استخراج پیکسل های آب، این است که قبل از استفاده از آن به منظور افزایش سرعت و کیفیت فرآیند طبقه بندی می بایست عوارضی که خارج از مرز حداکثری دریاچه هستند حذف گردند.

۳-۲-۲- انتخاب حد آستانه شاخص NDWI

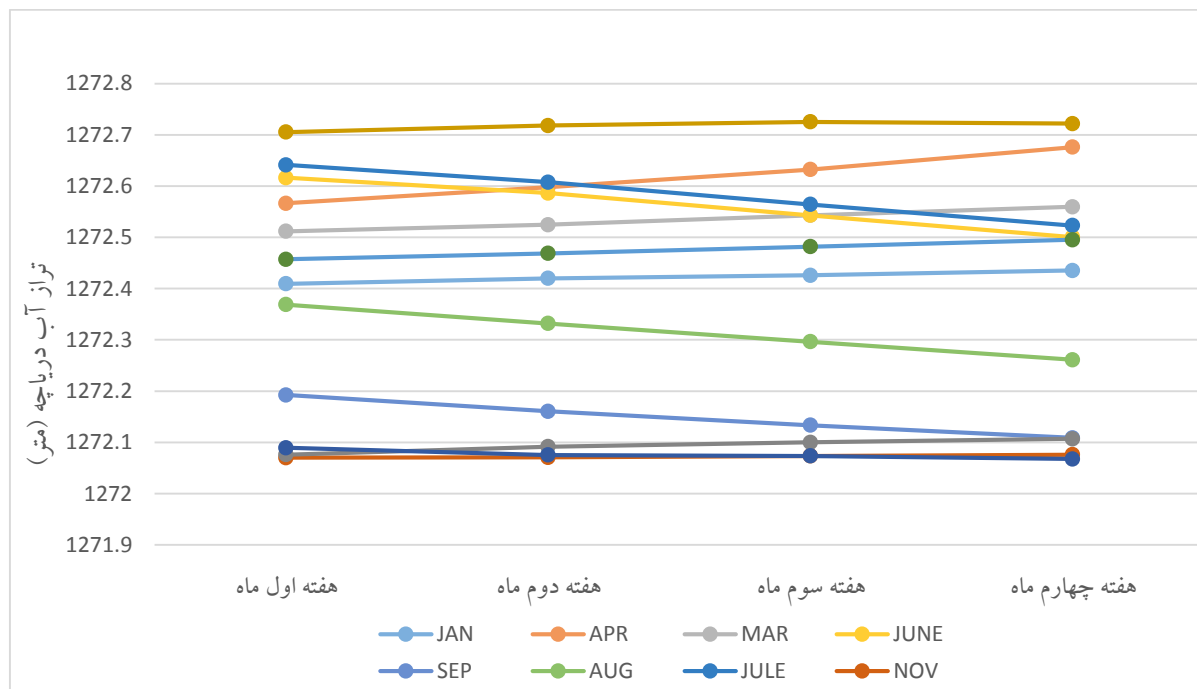
به طور کلی حد آستانه ۰ تا ۱+ در NDWI به پیکره های آبی اختصاص دارد. با توجه به شرایط خاص دریاچه ارومیه و وجود زمین های غرقاب-شوره زار و شوره زارهای متعدد در اطراف آن، در این مطالعه به حد آستانه عمومی ارائه شده اکتفا نشده و حد آستانه بومی برای تشخیص پیکره دریاچه ارومیه از زمین های اطراف آن نیز تعیین شده است. لذا حدود ۵ تصویر از ماهواره لندست اخذ و پس از اصلاحات رادیومتریک و اتمسفری، جهت محاسبه شاخص NDWI مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور ۸ نقطه مرجع در اطراف مرز دریاچه انتخاب و حدود آستانه NDWI منطبق با مرز دقیق آب و خشکی و مناطق مرطوب و غرقاب (تفسیر چشمی) ثبت گردید. در نهایت از این حدود آستانه میانگین گیری شده و حد آستانه NDWI در تفکیک اراضی آبی و غرقاب از مناطق خشکی به صورت جداگانه محاسبه گردید (جدول ۴). بر اساس این جدول میانگین حدود آستانه شاخص NDWI برای اراضی نمک زار و غرقاب در حد ۰,۰۲۸- تا ۰,۰۴۰ و برای تفکیک اراضی آبی خالص در حد ۰,۰۴۰ می باشد. در مجموع میانگین کل آستانه ای که برای مرز دریاچه محاسبه شد عدد ۰/۰۰۶۱ بود که به با تقریب همان صفر در نظر گرفته شد. در واقع این عملیات به خوبی توانست مقدار حد آستانه ای که در تحقیقات پیشین از آن استفاده شده بود را اثبات کند. البته لازم به ذکر است که نمی توان از تفاوت های دو سنجنده MODIS و OLI به راحتی عبور کرد و قطعاً مقدار حد آستانه به دست آمده با استفاده از سنجنده OLI نمی تواند کاملاً مشابه سنجنده MODIS باشد چرا که طول باندهای آن ها با یکدیگر متفاوت است. اما به دلیل اینکه با پیکسل های بزرگ سنجنده MODIS مرز دریاچه به خوبی مشهود نیست عملیات انتخاب حد آستانه با سنجنده MODIS منطقی به نظر نمی رسد و به ناچار از سنجنده OLI ماهواره Landsat8 استفاده شد.

جدول ۴- حدود آستانه بومی شاخص NDWI در تفکیک اراضی آبی و غرقاب-شوره زار

شماره	تاریخ	نقاط	آستانه پهنه آبی	آستانه غرقاب	شماره	تاریخ	نقاط	آستانه پهنه آبی	آستانه غرقاب
۱	۱۲ آذر ۹۵	۱	-۰,۰۲	-	۴	۱۸ اسفند ۹۴	۱	۰,۰۵۱۶۹	-
		۲	۰,۰۳۷	-			۲	۰,۰۲۳	-
		۳	۰,۰۹	۰,۰۰۷ تا ۰,۰۹			۳	۰,۰۱۵۲۵	-
		۴	۰,۰۹۷	۰,۰۳۷ تا ۰,۰۹۷			۴	۰,۰۰۹۳	-
		۵	۰,۰۵۴	۰,۰۴ تا ۰,۰۵۴			۵	-۰,۰۰۸۵	-
		۶	۰,۱۰۵۷	۰,۰۵۱۶ تا ۰,۱۰۵۷			۶	۰,۰۱۲۶۸	-
		۷	۰,۰۴۸	۰,۰۵۲ تا ۰,۰۴۸			۷	-۰,۰۰۵۸۶	-
		۸	۰,۱۵۰۳۹	۰,۰۶۸ تا ۰,۱۵۰۳۹			۸	۰,۰۲۰۱۱	-
		۲	۲۸ آذر ۹۵	۱			۰,۰۰۹	۰,۰۰۹ تا ۰,۰۶۲	۵
۲	۰,۰۱۸			۰,۰۳۹ تا ۰,۰۱۸	۲	۰,۰۴۶۴۴۸	-		
۳	۰,۰۳۲			۰,۰۵۶ تا ۰,۰۳۲	۳	-۰,۰۲۶۳۸	-		
۴	۰,۱۳۰۲۹			-	۴	۰,۰۳۸	۰,۰۵۹ تا ۰,۰۳۸		
۵	۰,۰۱۷			-	۵	۰,۱۰۸۷	-		
۶	۰,۰۲۲			۰,۰۲۲ تا ۰,۰۲۲	۶	-۰,۰۲۰۱۵	-		
۷	۰,۰۳۳۴			۰,۰۳۴ تا ۰,۰۳۳۴	۷	۰,۰۵۹۵۴	۰,۰۴۸۲۷ تا ۰,۰۵۹۵۴		
۸	۰,۰۰۱			-	۸	۰,۰۲۹۸۲	-		
۳	۲۱ تیر ۹۵	۱	۰,۰۹۶۶	-	میانگین آستانه پهنه آبی ۰,۰۴۰				میانگین کل ۰,۰۰۶۱
		۲	۰,۰۵۱۲۶	۰,۰۵۱۹ تا ۰,۰۵۱۲۶					
		۳	-۰,۰۰۶۴	۰,۰۱۵ تا ۰,۰۰۶۴					
		۴	۰,۰۰۴۸۴	-					
		۵	۰,۱۰۱۴	۰,۰۵۳۳۷ تا ۰,۱۰۱۴	میانگین آستانه غرق آب و شوره‌زار ۰,۰۲۸ تا ۰,۰۴۰				
		۶	۰,۰۴۶۹۳	۰,۰۳۶۸۲ تا ۰,۰۴۶۹۳					
		۷	۰,۰۹۷۳	-					
		۸	۰,۰۷۱۰۹	۰,۰۴۱۲۹ تا ۰,۰۷۱۰۹					

۳-۲-۳- تعداد روزهای مناسب جهت میانگین‌گیری در ماه

برای تعیین تعداد تصاویر بهینه در هر ماه جهت محاسبه میانگین ماهانه سطح دریاچه، از میزان تغییرات تراز آب دریاچه مربوط به روابط بسیمتری موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو (۱۳۹۴) استفاده گردید. برای این منظور ابتدا مقدار متوسط هفتگی تراز آب دریاچه در فاصله زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ محاسبه گردید. سپس میانگین ۱۷ ساله تراز آب دریاچه در هفته‌های اول هر ماه محاسبه و این فرایند در مورد هفته‌های دوم، سوم و چهارم تکرار گردید. در گام بعدی نحوه تغییرات تراز ۱۷ ساله‌ی هر ماه در هفته‌های اول تا چهارم ترسیم (شکل ۳) و شیب خط برازش داده‌شده محاسبه گردید (جدول ۵).



شکل ۳- تغییرات میانگین هفده ساله تراز آب دریاچه برای هفته‌های اول تا چهارم به تفکیک هر ماه

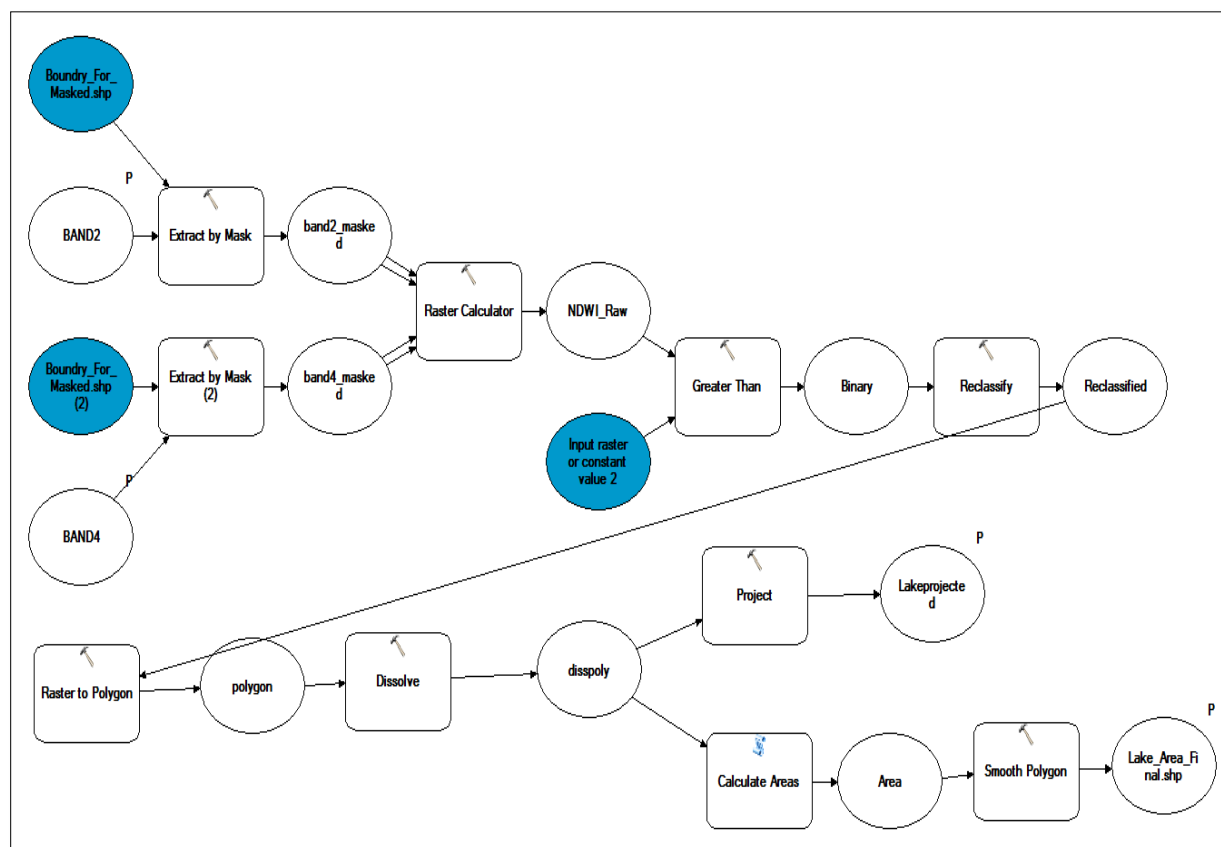
با مرتب کردن شیب خط‌ها از شیب کم به زیاد، ماه‌ها به سه گروه دسته‌بندی شدند. به عبارت دیگر برای ماه‌های نوامبر، می، اکتبر و ژانویه به عنوان گروه اول، دو تصویر به عنوان تعداد تصویر مناسب برای محاسبه میانگین سطح دریاچه انتخاب گردید. علت این موضوع شیب کم تغییرات تراز در ماه‌های مذکور می‌باشد. به همین ترتیب، برای گروه دوم شامل ماه‌های دسامبر، فوریه، مارس و سپتامبر سه تصویر و برای گروه سوم، آگوست، آوریل، ژوئن و جولای، چهار تصویر پیشنهاد می‌شود. با توجه به ابری بودن روزهای زیادی از ماه‌های سرد هر سال، در مجموع ۵۴۸ تصویر در این تحقیق استفاده شد تا میانگین ماهانه سطح دریاچه برای ۲۰۶ ماه محاسبه گردد.

جدول ۵- دسته‌بندی شیب تغییرات تراز آب دریاچه در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

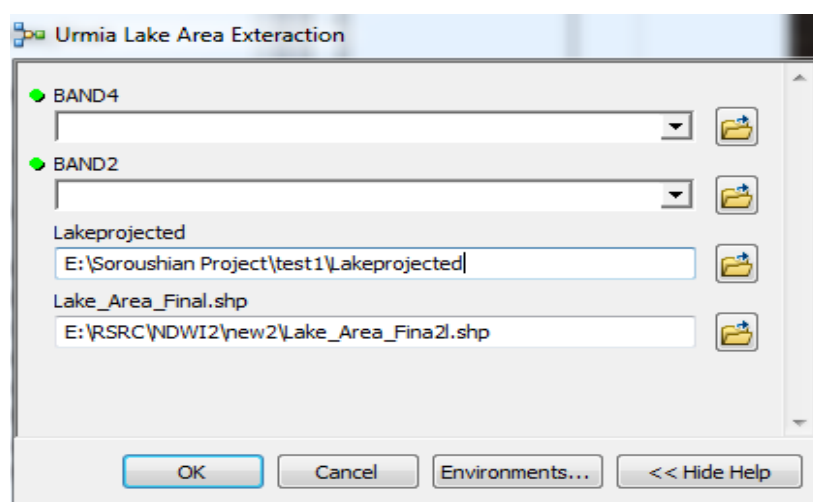
گروه اول			گروه دوم			گروه سوم		
تعداد تصویر	شیب خط روند	ماه	تعداد تصویر	شیب خط روند	ماه	تعداد تصویر	شیب خط روند	ماه
دو تصویر	۰/۰۰۲۱	نوامبر	سه تصویر	۰/۰۱۰۲	دسامبر	چهار تصویر	۰/۰۳۵۸	آگوست
	۰/۰۰۵۶	می		۰/۰۱۲۸	فوریه		۰/۰۳۶۳	آوریل
	۰/۰۰۶۷	اکتبر		۰/۰۱۶۱	مارس		۰/۰۳۹	ژوئن
	۰/۰۰۸۴	ژانویه		۰/۰۲۷۸	سپتامبر		۰/۰۳۹۸	جولای

۳-۲-۴- محاسبه سطح به روش اتوماتیک

به جهت حجم بالای عملیات پردازش تصاویر برای محاسبه مساحت سطحی دریاچه ارومیه، فرآیند اتوماسیون الگوریتم محاسبه مساحت به وسیله شاخص NDWI با استفاده از Model Builder نرم‌افزار ArcGIS در مرکز سنجش‌ازدور انجام پذیرفت. در این مدل ابتدا باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک سنجنده MODIS به آن معرفی می‌شود تا پردازش مدل آغاز شود. پردازش‌هایی همچون جداسازی محدوده حداکثری دریاچه ارومیه، تولید لایه Raster سطح دریاچه ارومیه و تغییر سیستم مختصاتی در درون مدل انجام می‌شود تا در نهایت به لایه‌ی سطح دریاچه ارومیه به همراه مقدار مساحت آن نائل شود. ساختار مدل در شکل‌های ۴ و ۵ و خروجی آن در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴- ساختار شماتیک مدل ساخته شده برای محاسبه اتوماتیک سطح آب دریاچه



شکل ۵- منوی ورودی و خروجی مدل



شکل ۶- خروجی مدل اتوماتیک ساخته‌شده برای محاسبه سطح دریاچه

۳-۲-۵- روش‌های تحلیل آماری

۳-۲-۵-۱- آزمون ایستایی Mann- Kendall

یکی از معتبرترین آزمون‌های تشخیص وجود روند در یک سری زمانی آزمون من-کندال است که توسط Mann (۱۹۴۵) ارائه و بعدها توسط Kendall (۱۹۷۵) بهبود یافت. این آزمون بر متغیر τ که کندال آن را به عنوان معیاری جهت تعیین رابطه بین x و y ارائه کرد، استوار است. در این آزمون فرض صفر (H_0) بدین معنی است که داده‌های سری زمانی به صورت مستقل با متغیرهای تصادفی توزیع شده است و در نتیجه روند مشخصی وجود ندارد (فرآیند ایستا^۸). برای مقایسه داده‌ها باهم آماره‌ای به نام S تعریف می‌شود که رابطه این آماره به صورت رابطه ۲ می‌باشد.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

که در آن $\text{sgn}(x_j - x_i)$ تابع علامت، x_i و x_j داده‌های متوالی و n تعداد سال‌های آماری مورد مطالعه است.

^۸ Stationary

درواقع در این آزمون هر داده با تمامی داده‌های پس از خود مقایسه می‌شود. در این مرحله می‌توان به جای استفاده از مقادیر اصلی داده‌ها از مرتبه داده‌ها در سری زمانی موردنظر استفاده شده و مرتبه‌ها را به همین روش مقایسه نمود. واریانس S نیز از رابطه ۳ بدست می‌آید.

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

که در آن n تعداد سال‌ها می‌باشد. در شرایطی که تعداد نمونه از ۱۰ بزرگ‌تر باشد، مقدار آماره Z که شاخص تعیین نتیجه آزمون است، از رابطه ۴ به دست می‌آید (Gilbert et al., 1987).

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

این آزمون، یک آزمون دوطرفه است. در صورتی که برای سطح اطمینان^۹ α مشخص، $|Z| \leq Z_{\frac{\alpha}{2}}$ باشد فرض صفر پذیرفته است و داده‌ها روندی ندارند و ایستا می‌باشند. α سطح معنی‌داری است که حد اطمینان آزمون من-کندال می‌باشد (Hirsch et al., 1982).

در صورتی که داده‌ها ایستا نباشند و نیاز به ایستا بودن داده‌ها باشد، می‌توان با استفاده از روش‌های مختلفی همچون تفاضل‌گیری، تبدیل لگاریتمی و نمایی، داده‌های ایستا تولید کرد و در نهایت به صورت معکوس، داده‌های اصلی را از داده‌های تبدیل یافته‌ی مدل استخراج کرد. به عنوان مثال در روش تفاضل‌گیری، هر داده از داده قبلی خود کسر می‌شود تا تفاضل مرتبه اول داده‌ها به دست آید. اگر تفاضل مرتبه اول نیز ایستا نبود، مجدداً هریک از این تفاضل‌های مرتبه اول از هم کسر می‌شود تا تفاضل مرتبه دوم داده‌ها حاصل شود (علی‌محمدی و همکاران، ۱۳۹۱).

۳-۲-۵-۲- آزمون همگنی Petit

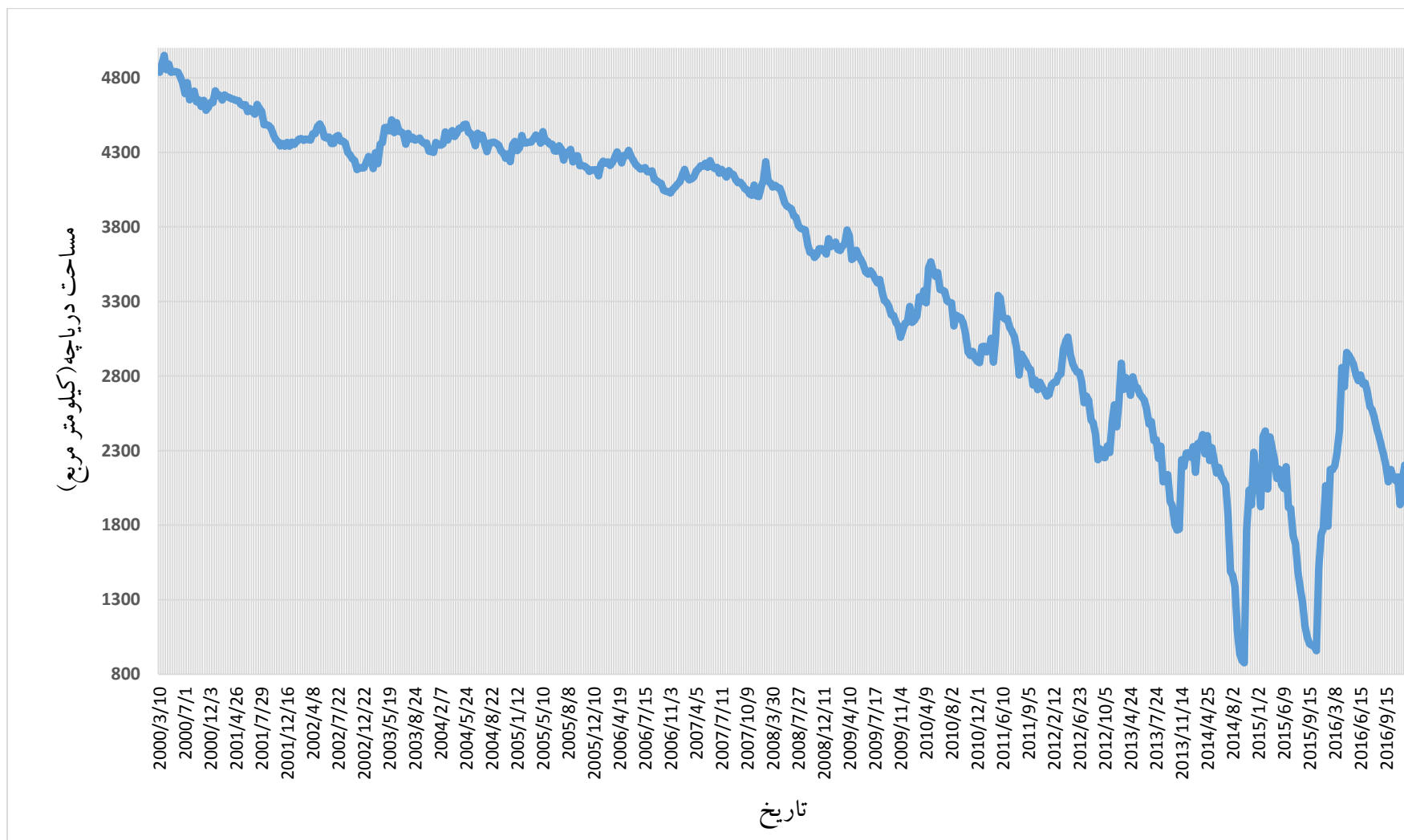
آزمون همگنی پتی که توسط Pettit در سال ۱۹۷۹ ارائه شد، یک آزمون ناپارامتری است که نیازمند فرض نرمال بودن سری زمانی نیست. این آزمون دارای فرض صفر به صورت استقلال مقادیر مختلف سری زمانی از یکدیگر و همگنی آن‌هاست. در مقابل در صورتی که شکستگی و ناپیوستگی در مقدار میانگین سری زمانی وجود داشته باشد، مطابق فرض یک این آزمون، سری زمانی ناهمگن است. این روش در یافتن ناهمگنی‌های نقاط میانی سری زمانی

^۹ Significance level

توانایی زیادی دارد و از جمله آزمون‌هایی است که زمان بروز ناهمگنی را نیز گزارش می‌دهد. در این مطالعه از آزمون همگنی پتی به دلیل این که حسایت بیش‌تری در ناهمگنی‌های میانی دارد استفاده شد.

۴- نتایج

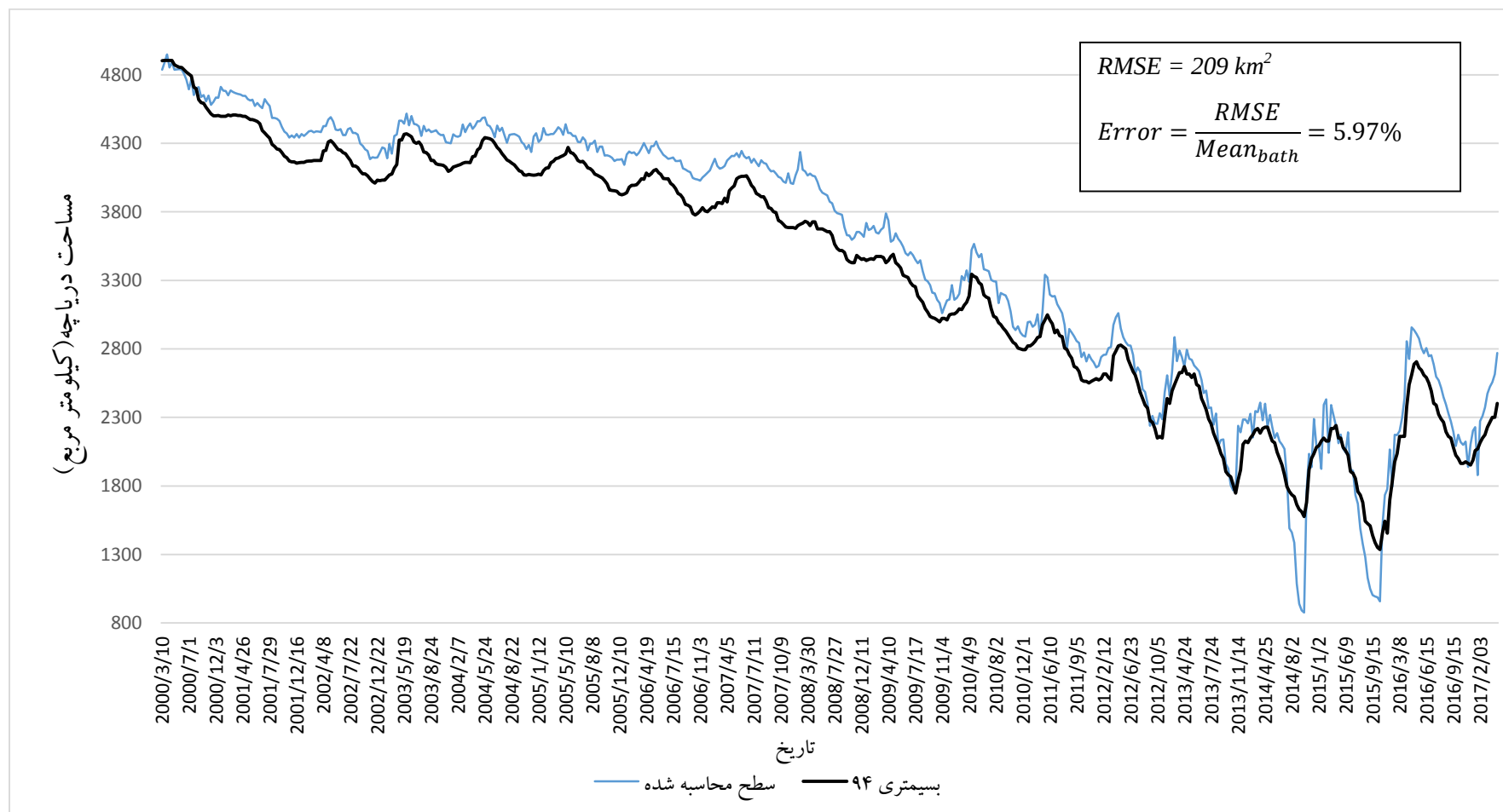
سری زمانی سطح دریاچه ارومیه از ماه مارس سال ۲۰۰۰ تا ماه می سال ۲۰۱۷ با استفاده از سنجنده MODIS توسط شاخص NDWI محاسبه شد که نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است. مقادیر میانگین ماهانه ۲۰۶ ماه این بازه نیز در پیوست گزارش ثبت شده است (جدول ۸ پیوست).



شکل ۷- سری زمانی سطح دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷

۴-۱- صحت‌سنجی نتایج با استفاده از بسیمتری

شکل ۸ سری زمانی تغییرات سطح دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷، با استفاده از سنجنده MODIS و بسیمتری سال ۱۳۹۴ موسسه تحقیقات آب را نشان می‌دهد. نمودارهای مقایسه‌های هر سال به تفکیک در پیوست گزارش قرار داده شده است (شکل‌های ۱۵ تا ۳۲).



شکل ۸- تغییرات سطح دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷، با استفاده از سنجنده MODIS و بسیمتری سال ۱۳۹۴

در دید کلی نتایج بدست آمده با استفاده از سنجنده MODIS تشابه زیادی با بسیمتری سال ۱۳۹۴ دارد و افزایش و کاهش سطوح کاملاً بر هم منطبق بوده و مقدار بیشینه و کمینه کاملاً در یک راستا قرار دارند. باین حال تفاوت‌هایی نیز بین این دو روش مشاهده می‌شود که عبارت‌اند از:

- بیشتر بودن سطح دریاچه تخمین زده شده از روش NDWI با استفاده از سنجنده MODIS در حالت کلی (به جز دو بازه کوتاه): این اختلاف می‌تواند به دلیل بالا بودن تفکیک مکانی سنجنده (۲۵۰ متر) باشد که باعث می‌شود در پیکسل‌هایی که در مرز دریاچه قرار گرفته‌اند و قسمتی از آن‌ها در خشکی و قسمتی در آب قرار دارند، دچار خطا گردد.

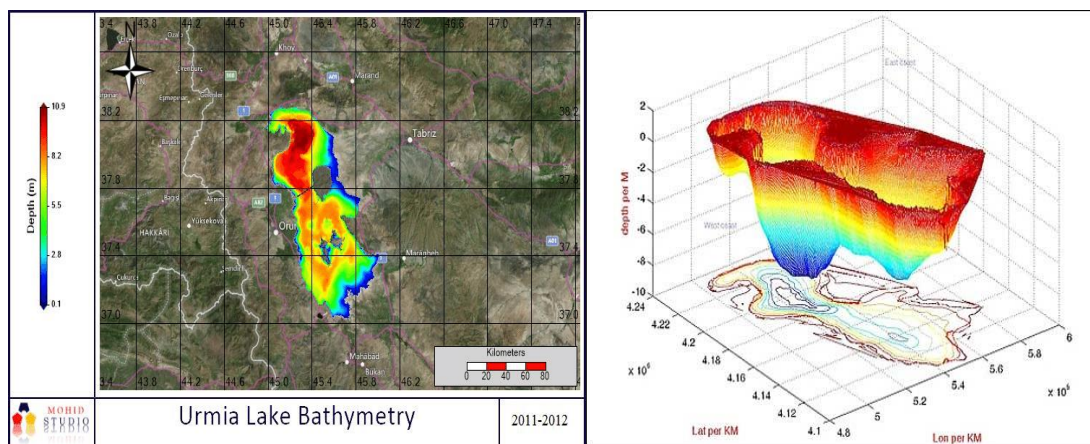
- افزایش قابل توجه سطح دریاچه در روز ۲۸ فوریه ۲۰۰۸: در این روز سطح دریاچه با افزایش قابل توجهی مواجه شده است که با روند کلی سری زمانی تناقض دارد؛ لذا برای پی بردن به علت این موضوع، بارش به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر بر سطح دریاچه مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار بارش روزانه روزهای ۲۰ تا ۲۸ فوریه ۲۰۰۸ ایستگاه ارومیه مورد بررسی قرار گرفت که بارش روز بیست و ششم ماه با ۱۵ میلی‌متر قابل توجه بود. با توجه به این مقدار بارش می‌توان افزایش قابل توجه سطح در این روز را به بارش مرتبط دانست. تأثیر بارش بر سطح را می‌توان به دو بخش مستقیم و غیرمستقیم بررسی نمود.

در بخش مستقیم می‌توان گفت که آب حاصل از بارش باعث افزایش تراز و در نتیجه باعث افزایش سطح گردیده است. ولی در بخش غیرمستقیم می‌توان افزایش سطح را ناشی از خیس شدن مرز دریاچه یا ایجاد آب‌بندان‌هایی با عمق خیلی کم در اثر بارش در مرز دریاچه دانست که باعث می‌شود شاخص NDWI در تشخیص مرز واقعی دریاچه دچار اشتباه شده و مساحت بیشتری را محاسبه کند.

- کاهش قابل توجه سطح دریاچه در ماه‌های سپتامبر ۲۰۱۴ و اکتبر ۲۰۱۵: ماه‌های ذکر شده مربوط به کمترین ترازهای ثبت شده دریاچه ارومیه می‌باشد که انتظار داریم سطح دریاچه نیز به حداقل خود برسد، ولی با توجه به اینکه اختلاف دو روش در تخمین سطح حداقل قابل توجه می‌باشد، لازم است تا علت آن را بررسی نماییم.

با توجه به شکل ۹ که الگوی سه‌بعدی بستر و پهنه‌بندی بسیمتری دریاچه ارومیه را نشان می‌دهند می‌توان گفت که در ترازهای حداقل که در بازه ۱۲۷۰/۲۰ تا ۱۲۷۰/۲۰ متر می‌باشند، قسمت شمالی و جنوبی دریاچه از هم جدا می‌شود. همچنین در قسمت‌های میانی دریاچه سطح قابل توجهی با عمق یکسان وجود دارد که با کاهش ۲۰ سانتی‌متری در تراز دریاچه شاهد خشک شدن سطح قابل توجهی از دریاچه خواهیم شد.

با توجه به انطباق خیلی خوب سری‌های زمانی بسیمتری ۹۴ و سطح تخمین زده‌شده، مدل بسیمتری ۹۴ تا زمانی که شمال و جنوب دریاچه از هم جدا نشده است نتایج خیلی خوبی نشان می‌دهد. ولی به نظر می‌رسد که در سطح‌های حداقلی دریاچه که شمال و جنوب دریاچه از یکدیگر جدا می‌شوند، به‌خوبی کالیبره نشده و نتایج را بیشتر از حد واقعی نشان می‌دهد.



شکل ۹- الگوی سه‌بعدی بستر و پهنه‌بندی بسیمتری دریاچه ارومیه (Razi et al., 2016)

۴-۲- مقایسه نتایج با تحقیقات سازمان فضایی ایران

سازمان فضایی ایران در پروژه‌ای تحت عنوان "پایش نوسانات سطح آب دریاچه ارومیه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در بازه زمانی سال‌های ۱۳۵۵ تا ۱۳۹۵" سطح دریاچه را به‌صورت ماهانه محاسبه کرده است. در این پروژه از تصاویر ماهواره Landsat و در برخی موارد از سنجنده MODIS استفاده شده است. در مورد الگوریتمی که در این پروژه استفاده شده اطلاعاتی در دست نیست و فقط نتایج مربوط به برخی از روزهای سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ در دسترس عموم قرار دارد. جهت مقایسه نتایج به‌دست آمده در تحقیق حاضر با نتایج سازمان فضایی، مقدار سطح دریاچه با نزدیک‌ترین روزهای محاسبه‌شده در این تحقیق نسبت به روزهای متناظر پروژه سازمان فضایی درون‌یابی شد و سپس اختلاف بین نتایج به دست آمد. این اطلاعات در جدول ۶ گزارش شده است.

جدول ۶ - مقایسه نتایج سطح دریاچه ارومیه مرکز سنجش از دور با سازمان فضایی ایران (بر حسب کیلومتر مربع)

تاریخ روز مورد مطالعه	سطح استخراج شده توسط تصاویر سنجنده OLI سازمان فضایی با استفاده از	سطح استخراج شده توسط مرکز سنجش از دور با استفاده از تصاویر سنجنده مادیس	مقدار اختلاف
۱۴ مارس ۲۰۱۷	۲۲۰۳	۲۳۷۳	۱۷۰
۳ مارس ۲۰۱۷	۲۱۹۹	۲۳۱۰	۱۱۱
۱۸ فوریه ۲۰۱۷	۲۲۱۰	۲۲۹۵	۸۵
۱۴ نوامبر ۲۰۱۶	۱۹۳۰	۲۰۶۱	۹۱
۲۹ اکتبر ۲۰۱۶	۱۹۱۹	۲۱۱۱	۱۹۲
۱۳ اکتبر ۲۰۱۶	۱۹۴۰	۲۱۲۰	۱۸۰
۲۷ سپتامبر ۲۰۱۶	۱۹۰۵	۲۰۹۳	۱۸۸
۱۱ سپتامبر ۲۰۱۶	۲۱۱۹	۲۲۳۳	۱۱۴
۲۷ آگوست ۲۰۱۶	۲۲۶۹	۲۳۲۹	۶۰
۱۱ آگوست ۲۰۱۶	۲۳۵۰	۲۴۴۸	۹۵
۲۵ جولای ۲۰۱۶	۲۵۶۴	۲۵۹۷	۳۳
۱۰ جولای ۲۰۱۶	۲۷۰۷	۲۷۲۰	۱۳
۲۵ ژوئن ۲۰۱۶	۲۷۸۷	۲۷۶۷	-۲۰
۷ ژوئن ۲۰۱۶	۲۸۳۸	۲۸۰۹	-۲۹
۲۲ می ۲۰۱۶	۲۹۰۹	۲۹۱۰	۱
۹ می ۲۰۱۶	۲۹۲۸	۲۹۳۷	۹
۲۰ آوریل ۲۰۱۶	۲۶۹۰	۲۷۲۷	۳۷
۵ آوریل ۲۰۱۶	۲۷۰۲	۲۸۵۶	۱۵۴

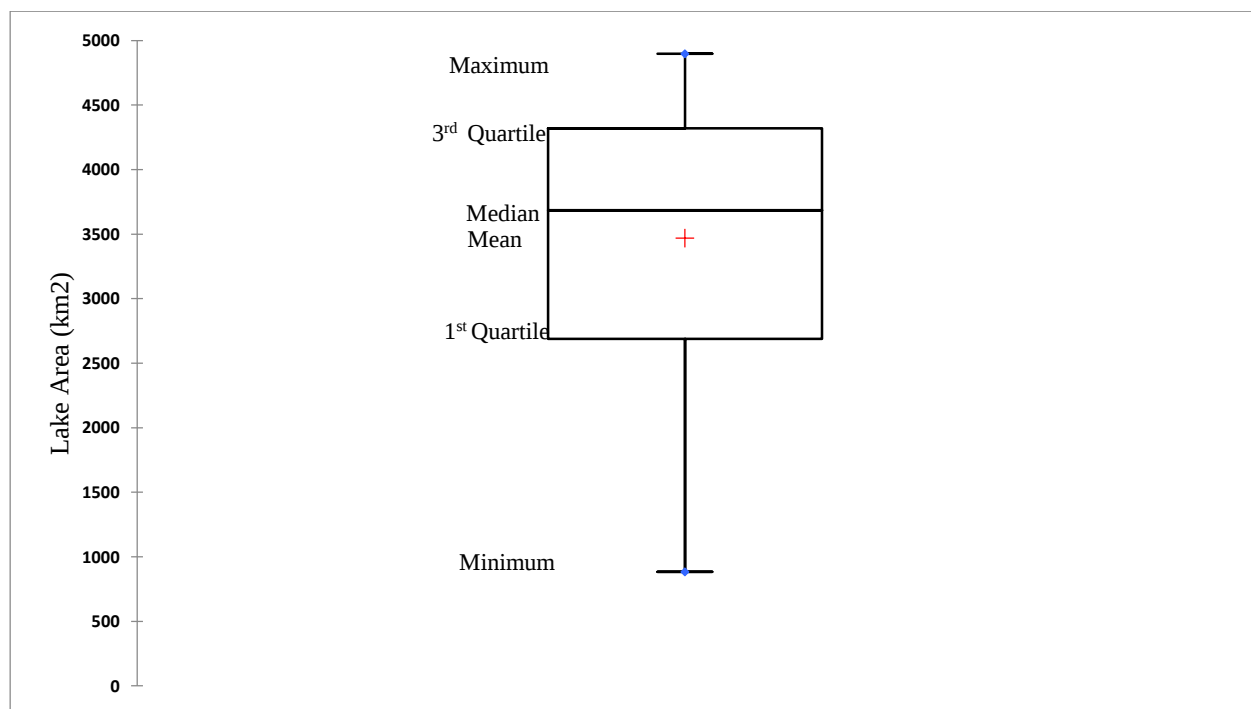
همان‌طور که از مقایسه اعداد جدول ۶ مشخص است، در مجموع سطح محاسبه شده توسط سازمان فضایی و مرکز سنجش از دور، مطابقت‌های خوبی با یکدیگر دارند و اختلاف کمتر از ۳ درصد است. با بررسی اختلافات مقادیر مشاهده می‌شود که در اکثر روزها مقدار سطح محاسبه شده توسط مرکز سنجش از دور کمی بیش‌تر از مقدار محاسبه شده توسط سازمان فضایی ایران است. به‌طور کلی چندین دلیل برای این اختلاف قابل‌تصور است که عبارت‌اند از:

- بزرگ بودن اندازه پیکسل سنجنده MODIS نسبت به سنجنده OLI

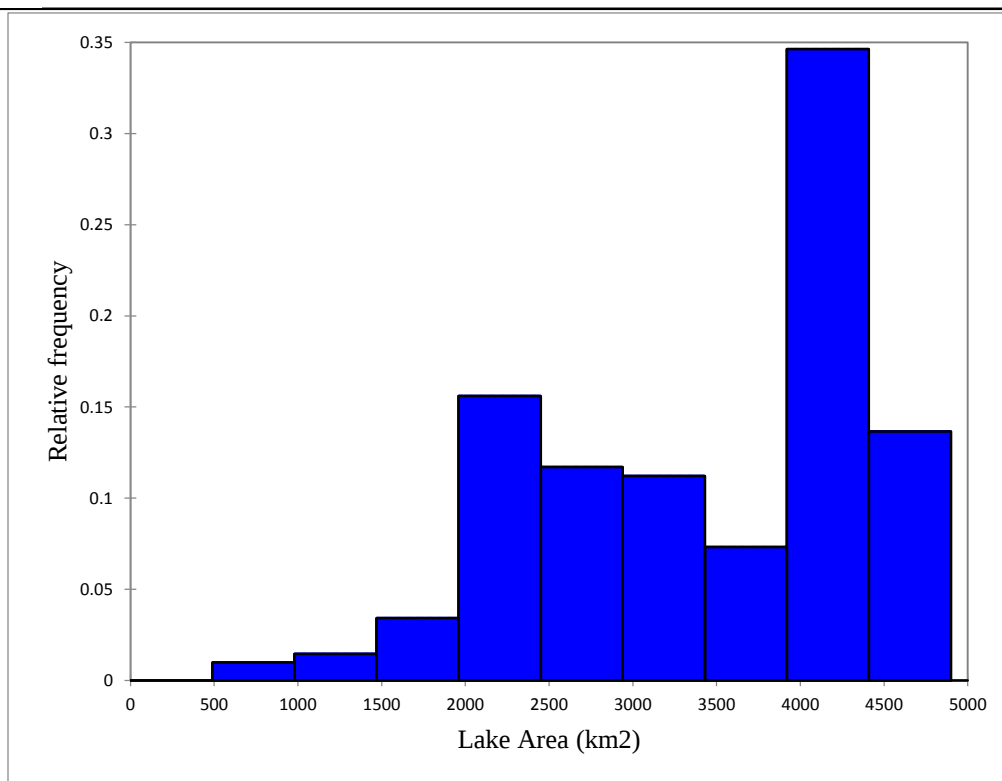
- احتمال تفاوت در روش استخراج پیکسل‌های آب
- احتمال تفاوت در حد آستانه‌های در نظر گرفته شده
- تفاوت در تعیین مرز بین رودخانه‌های ورودی به دریاچه با مرز دریاچه

۴-۳- تحلیل آماری نتایج

خصوصیات کلی آماری (Statistic) سری زمانی محاسبه شده برای میانگین ماهانه سطح دریاچه (۲۰۶ ماه) با استفاده از نمودار جعبه‌ای (Box Plot) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، مقادیر میانگین، میانه، چارک اول، چارک سوم، بیشینه و کمینه این سری زمانی به ترتیب برابر ۳۴۷۰، ۳۶۸۴، ۲۶۸۸، ۴۳۲۰، ۴۸۹۸ و ۸۸۴ کیلومترمربع بوده است. همچنین این شکل نشان می‌دهد که تابع توزیع داده متقارن نیست و چولگی (Skewness) دارد. هیستوگرام داده‌ها نیز در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این هیستوگرام نشان می‌دهد که بازه ۴۰۰۰ تا ۴۵۰۰ کیلومترمربع برای سطح دریاچه در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷، بیش‌ترین فراوانی را داشته است و فراوانی سطوح زیر ۲۰۰۰ کیلومتر پایین است. در یک مفهوم کلی، شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان از وزن بیش‌تر سال‌های پرآب در این ۱۷ سال دارد.



شکل ۱۰ - نمودار جعبه‌ای (Box Plot) مقادیر سطح دریاچه ارومیه



شکل ۱۱ - هیستوگرام مقادیر سطح دریاچه ارومیه

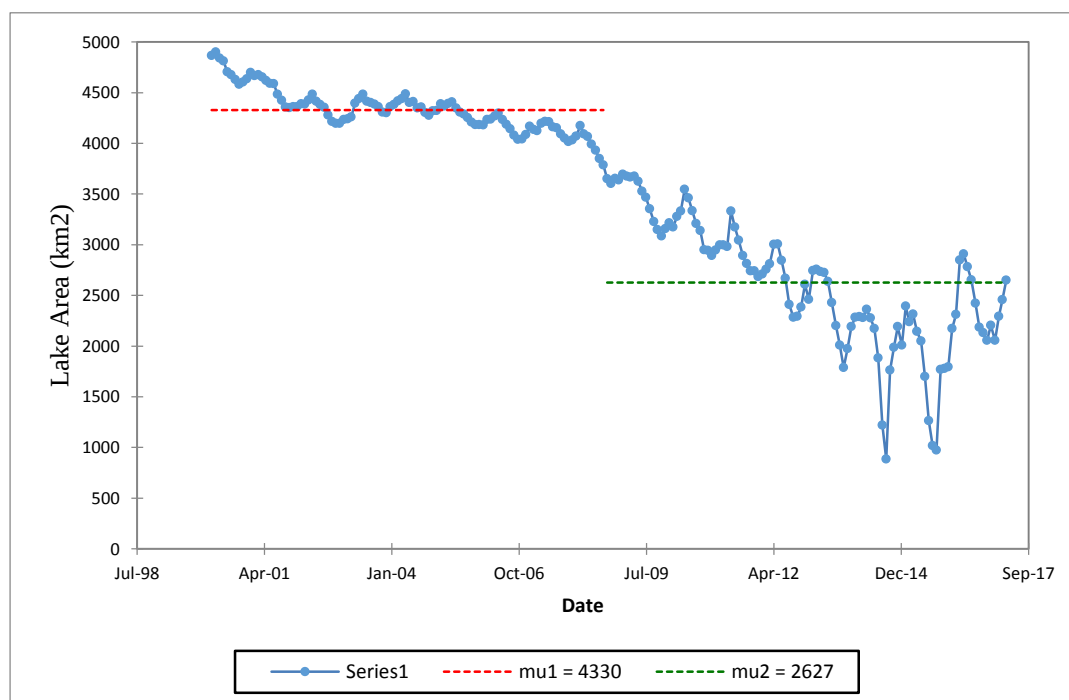
آزمون ایستایی Mann-Kendall روی نتایج سطح دریاچه اعمال شد. همان‌طور که به صورت بصری نیز مشخص است، نتایج نشان می‌دهد که این سری زمانی ایستا نیست و دارای روندی با شیب ۱۴/۸۶- است. نتایج آزمون Mann-Kendall در جدول ۷ نشان داده شده است که با توجه به کوچک‌تر بودن مقدار آماره P از α عدم ایستایی نتیجه گرفته شده است.

جدول ۷ - خلاصه نتایج آزمون ایستایی Mann-Kendall

Kendall's tau	-0.843
S	-17798.000
Var(S)	978327.333
p-value (Two-tailed)	< 0.0001
alpha	0.05

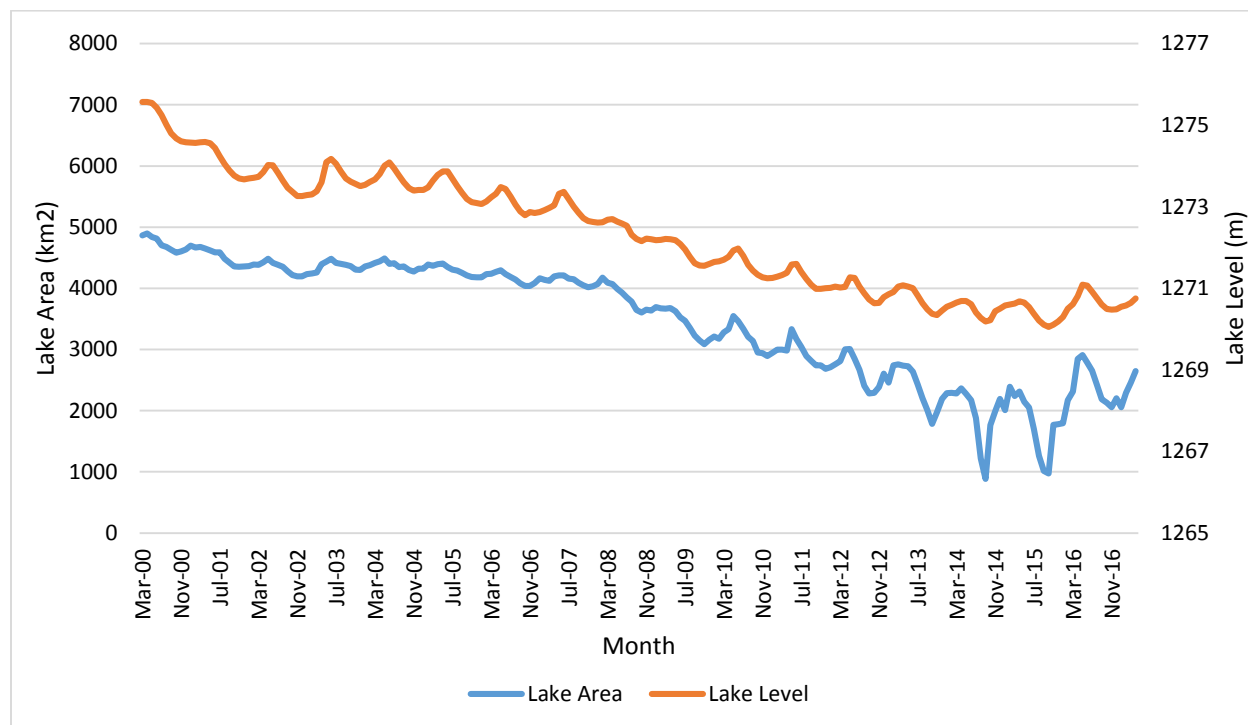
آزمون همگنی Pettit نیز روی نتایج سطح دریاچه اعمال شد تا وجود یا عدم وجود همگنی در این سری زمانی بررسی شود. نتایج نشان می‌دهد که ناهمگنی بین داده‌ها وجود دارد. داده‌ها به دو گروه تقسیم شده‌اند. یک گروه

شامل سطوح از سال ۲۰۰۰ تا اواسط ۲۰۰۸ و گروه دیگر از اواسط ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ می‌باشد. این ناهمگنی به‌صورت بصری نیز قابل مشاهده بود چراکه از حدود سال ۲۰۰۸ روند کاهش سطح دریاچه شدت می‌گیرد (شکل ۱۲).

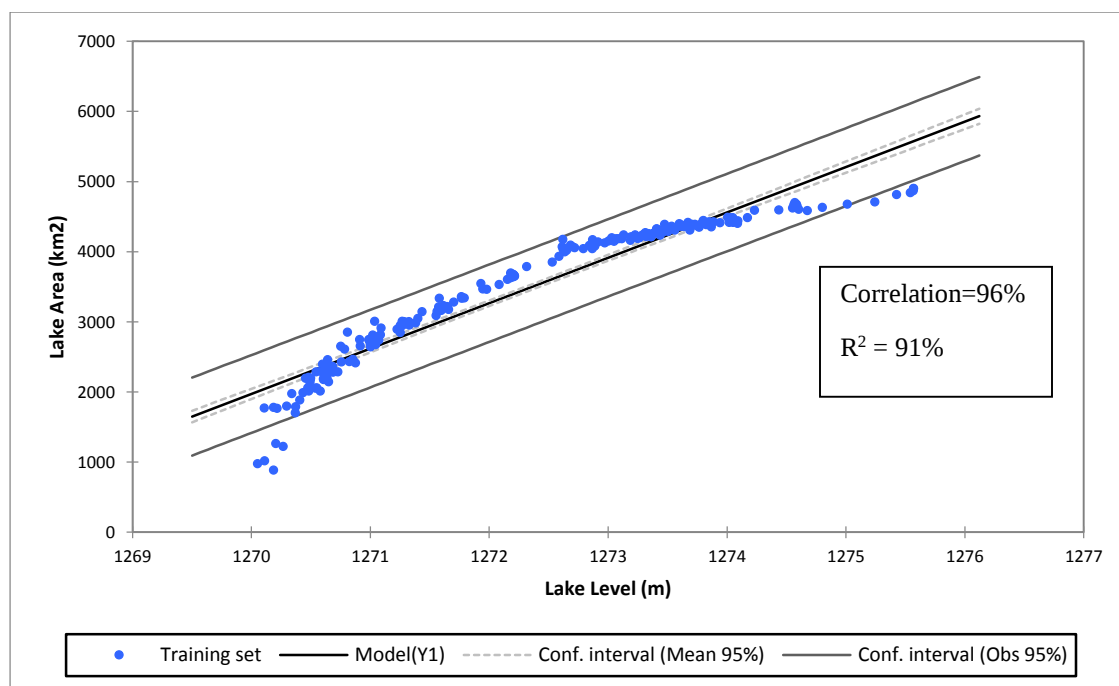


شکل ۱۲ - آزمون همگنی Pettit روی نتایج سطح دریاچه ارومیه

در شکل ۱۳، سری‌های زمانی ماهانه سطح دریاچه محاسبه شده در این تحقیق و سری زمانی تراز دریاچه اخذ شده از ستاد احیای دریاچه ارومیه در کنار یکدیگر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اغلب فراز و فرودهای دو نمودار با یکدیگر همخوانی مناسبی دارند. ضریب همبستگی (Correlation) و R^2 بین این دو سری داده به ترتیب برابر ۹۶ و ۹۱ درصد بدست آمد که حاکی از قرابت بالای این دو سری زمانی است. نمودار رگرسیون بین این دو سری داده در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۳ - سری‌های زمانی ماهانه تراز و سطح دریاچه ارومیه



شکل ۱۴ - رگرسیون بین سری‌های زمانی ماهانه تراز و سطح دریاچه ارومیه

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، سری زمانی تغییرات سطح دریاچه ارومیه با استفاده از سنجنده MODIS برآورد شده است. برای اینکار از شاخص NDWI که از باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک بدست می‌آید بهره گرفته شده است. جهت انتخاب حد آستانه تفکیک پهنه‌های آبی از غیر آبی نیز از تصاویر با تفکیک مکانی بالای سنجنده OLI ماهواره Landsat8 استفاده شده است. مقدار حد آستانه تقریباً برابر صفر بدست آمد. همان‌طور که انتظار میرفت، نتایج حاصل از استخراج سری زمانی ماهانه سطح دریاچه از تصاویر سنجنده MODIS، حاکی از یک روند نزولی در سطح دریاچه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ است. این روند در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ بسیار اندک اما از سال ۲۰۰۸ تا سال ۲۰۱۷ هر سال به طور متوسط ۲۴۵ کیلومتر مربع از سطح دریاچه کاسته شده است.

صحت‌سنجی نتایج با مقادیر بسیمتری سال ۹۴ موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام شد. مقدار RMSE بین این دو مجموعه داده برابر ۲۰۹ کیلومتر مربع و مقدار RMSE تقسیم بر میانگین مقادیر بسیمتری برابر ۵/۹ درصد بدست آمد که نشان از نزدیکی نتایج محاسبه شده با مقادیر بسیمتری دارد. به طور متوسط، مقادیر بدست آمده توسط مرکز سنجش از دور کمی بیش‌تر از مقادیر بسیمتری است که عمده علت آن را در بزرگ بودن پیکسل سنجنده MODIS (۲۵۰ متری) دانست که تعدادی از پیکسل‌های مختلط را آب فرض کرده است. البته اختلافات قابل توجهی نیز در برخی از روزها دیده شد. در زمان‌هایی که دریاچه در کمترین تراز تاریخی خود قرار داشته است (سپتامبر ۲۰۱۴ و اکتبر ۲۰۱۵)، اختلاف قابل توجهی تا ۸۰۰ کیلومتر مربع بین نتایج دیده می‌شود. با بررسی الگوی سه‌بعدی بستر و پهنه‌بندی بسیمتری دریاچه ارومیه مشاهده شد که در ترازهای حداقل که در بازه ۱۲۷۰ تا ۱۲۷۰/۲۰ متر می‌باشند، قسمت شمالی و جنوبی دریاچه از هم جدا می‌شود. همچنین در قسمت‌های میانی دریاچه سطح قابل توجهی با عمق یکسان وجود دارد که با کاهش ۲۰ سانتی‌متری در تراز دریاچه شاهد خشک شدن سطح قابل توجهی از دریاچه خواهیم شد. به نظر می‌رسد که این مسئله در رگرسیون بسیمتری مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو دیده نشده و باعث چنین اختلافی شده است.

۶- مراجع

برنامه‌ی مدیریت جامع دریاچه ارومیه «حفظ تالاب‌ها، برای مردم، برای طبیعت». (۱۳۸۹). تهیه شده با همکاری سازمان‌های دولتی، تشکلهای زیست‌محیطی و جوامع محلی حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه.

علی‌محمدی، ر. (۱۳۹۱). تاثیر مرتبه تفاضل‌گیری در برازش مدل به داده‌های سری زمانی. اولین همایش بین‌المللی اقتصادسنجی، سندج.

Alesheikh, A. A., Ghorbanali, A., & Nouri, N. (2007). Coastline change detection using remote sensing. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 4(1), 61-66.

Ayana, E. K., Philpot, W. D., Melesse, A. M., & Steenhuis, T. S. (2014). Bathymetry, Lake Area and Volume Mapping: A Remote-Sensing Perspective. In *Nile River Basin* (pp. 253-267). Springer International Publishing.

Campos, J. C., Sillero, N., & Brito, J. C. (2012). Normalized difference water indexes have dissimilar performances in detecting seasonal and permanent water in the Sahara-Sahel transition zone. *Journal of Hydrology*, 464, 438-446.

Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35.

Gautam, V. K., Gaurav, P. K., Murugan, P., & Annadurai, M. (2015). Assessment of Surface Water Dynamics in Bangalore Using WRI, NDWI, MNDWI, Supervised Classification and KT Transformation. *Aquatic Procedia*, 4, 739-746.

Gilbert, R.O. (1987). *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*, Wiley, NY.

Hirsch, R. M., J. R. Slack, and R. A. Smith. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Resources Research*, Vol. 18, pp.107-121.

Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*, 4th edition, Charles Griffin, London.

Kerle, N., Janssen, L. L., & Huurneman, G. C. (2004). Principles of remote sensing. *ITC, Educational textbook series*, 2.

Ma, B., Wu, L., Zhang, X., Li, X., Liu, Y., & Wang, S. (2014). Locally adaptive unmixing method for lake-water area extraction based on MODIS 250m bands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 109-118.

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica, Journal of the Econometric Society*, p.p 245-259.

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal Of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432.

Ouma, Y. O., & Tateishi, R. (2007). Lake water body mapping with multiresolution based image analysis from medium-resolution satellite imagery. *International Journal Of Environmental Studies*, 64(3), 357-379.

Pekel, J. F., Vancutsem, C., Bastin, L., Clerici, M., Vanbogaert, E., Bartholomé, E., & Defourny, P. (2014). A near real-time water surface detection method based on HSV transformation of MODIS multi-spectral time series data. *Remote Sensing Of Environment*, 140, 704-716.

Pekel, J. F., Vancutsem, C., Bastin, L., Clerici, M., Vanbogaert, E., Bartholomé, E., & Defourny, P. (2014). A near real-time water surface detection method based on HSV transformation of MODIS multi-spectral time series data. *Remote Sensing Of Environment*, 140, 704-716.

Pengra, B. (2012). The Drying of Iran's Lake Urmia and its Environmental Consequences. Article reproduced from United Nations Environment Programme (UNEP) Global Environmental Alert Service (GEAS). *Environmental Development* 2, 128-137.

Pettitt AN. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal Of Applied Statistics* 28: 126–135.

Phinn, S. R. (1998). "A framework for selecting appropriate remotely sensed data dimensions for environmental monitoring and management." *International Journal Of Remote Sensing* 19(17): 3457-3463.

Razia, H. H., Mazaherib, M., Samanic, J. M. V., & Fernandezd, M. C. (2016). Investigating Urmia Lake Partial Restoration and Ecological Water Level Using MOHID-2D Water Hydrodynamic Model, Geographic and Environmental Impacts of Urmia Lake Conditions, Tabriz.

Sarp, G., & Ozcelik, M. (2017). Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey. *Journal of Taibah University for Science*, 11(3), 381-391.

Tang, Z., Ou, W., Dai, Y., & Xin, Y. (2012, October). Extraction of water body based on LandSat TM5 imagery—a case study in the Yangtze River. In *International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture* (pp. 416-420). Springer, Berlin, Heidelberg.

Taravat, A., Rajaei, M., Emadodin, I., Hasheminejad, H., Mousavian, R., & Biniyaz, E. (2016). A spaceborne multisensory, multitemporal approach to monitor water level and storage variations of lakes. *Water*, 8(11), 478.

Tourian, M. J., Elmi, O., Chen, Q., Devaraju, B., Roohi, S., & Sneeuw, N. (2015). A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran. *Remote Sensing of Environment*, 156, 349-360.

van Ruitenbeek, F. J., Debba, P., van der Meer, F. D., Cudahy, T., van der Meijde, M., & Hale, M. (2006). Mapping white micas and their absorption wavelengths using hyperspectral band ratios. *Remote Sensing of Environment*, 102(3), 211-222.

Van Ruitenbeek, F. J., et al. (2006). "Mapping white micas and their absorption wavelengths using hyperspectral band ratios." *Remote Sensing Of Environment* 102(3): 211-222.

Zhou, S. L., Zhang, W. C., & Wang, F. (2016, November). Spatial-temporal variations and their dynamics of the saline lakes in the Qaidam Basin over the past 40 years. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 46, No. 1, p. 012043). IOP Publishing.

Zhou, Y., Dong, J., Xiao, X., Xiao, T., Yang, Z., Zhao, G., ... & Qin, Y. (2017). Open Surface Water Mapping Algorithms: A Comparison of Water-Related Spectral Indices and Sensors. *Water*, 9(4), 256.

۷- پیوست

جدول ۸- مقادیر میانگین ماهانه سطح دریاچه ارومیه

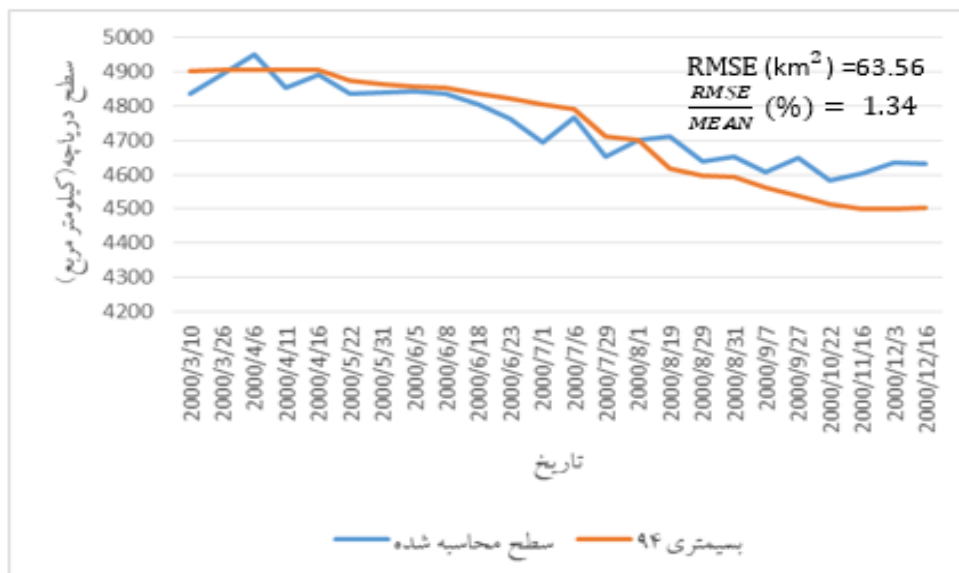
Month	Lake Area (KM ²)	Month	Lake Area (KM ²)
Jan 2000	-	Jan 2003	4232.74
Feb 2000	-	Feb 2003	4241.156667
March 2000	4863.64	March 2003	4260.305
April 2000	4898.39	April 2003	4394.265667
May 2000	4838.12	May 2003	4438.745
June 2000	4811.1225	June 2003	4482.54
July 2000	4704.606667	July 2003	4414.01
August 2000	4675.1225	August 2003	4399.4225
September 2000	4627.84	September 2003	4384.94
October 2000	4581.1	October 2003	4360.77
November 2000	4602.15	November 2003	4306.275
December 2000	4633.365	December 2003	4299.74
Jan 2001	4698.055	Jan 2004	4359.565
Feb 2001	4665.495	Feb 2004	4380.31
March 2001	4675.273333	March 2004	4415.12
April 2001	4652.0075	April 2004	4439.025
May 2001	4617.215	May 2004	4486.715
June 2001	4589.6325	June 2004	4399.33
July 2001	4586.36	July 2004	4410.89
August 2001	4483.156667	August 2004	4347.575
September 2001	4422.233333	September 2004	4357.936667
October 2001	4356.35	October 2004	4301.385
November 2001	4349.965	November 2004	4273.615
December 2001	4358.746667	December 2004	4320.213333
Jan 2002	4361.07	Jan 2005	4320.44
Feb 2002	4386.76	Feb 2005	4387.675
March 2002	4385.036667	March 2005	4366.206667
April 2002	4424.7	April 2005	4392.2225
May 2002	4481.605	May 2005	4407.275
June 2002	4414.625	June 2005	4348.2275
July 2002	4383.41	July 2005	4305.385
August 2002	4354.823333	August 2005	4288.01
September 2002	4279.143333	September 2005	4253.94
October 2002	4214.32	October 2005	4209
November 2002	4196.355	November 2005	4182.825
December 2002	4196.355	December 2005	4182.366667

ادامه جدول ۸ - مقادیر میانگین ماهانه سطح دریاچه ارومیه

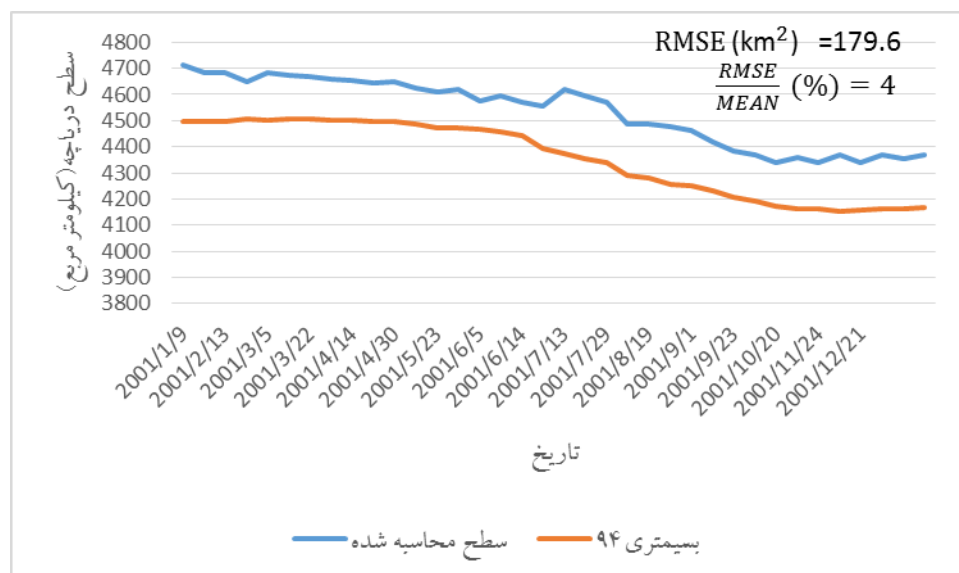
Month	Lake Area (KM ²)	Month	Lake Area (KM ²)
Jan 2006	4179.845	Jan 2009	3694
Feb 2006	4234.166667	Feb 2009	3674.333333
March 2006	4236.19	March 2009	3665.666667
April 2006	4268.64	April 2009	3675.5
May 2006	4296.485	May 2009	3623.5
June 2006	4233.1375	June 2009	3526.75
July 2006	4186.195	July 2009	3466.5
August 2006	4143.2475	August 2009	3353.25
September 2006	4078.09	September 2009	3227
October 2006	4037.645	October 2009	3147
November 2006	4039.74	November 2009	3084.5
December 2006	4085.506667	December 2009	3157.5
Jan 2007	4166.255	Jan 2010	3212.5
Feb 2007	4135.54	Feb 2010	3173
March 2007	4123.816667	March 2010	3278.333333
April 2007	4194.7425	April 2010	3331.5
May 2007	4213.09	May 2010	3544.5
June 2007	4210.125	June 2010	3461.5
July 2007	4159.5825	July 2010	3335.25
August 2007	4150.3375	August 2010	3207.75
September 2007	4091.32	September 2010	3138.666667
October 2007	4051.43	October 2010	2949.5
November 2007	4015.94	November 2010	2942.5
December 2007	4030.94	December 2010	2893.5
Jan 2008	4068	Jan 2011	2945.5
Feb 2008	4173	Feb 2011	2997.5
March 2008	4090	March 2011	2997.666667
April 2008	4067.666667	April 2011	2981.5
May 2008	3992	May 2011	3331
June 2008	3930.666667	June 2011	3172.25
July 2008	3848.666667	July 2011	3043.666667
August 2008	3784.333333	August 2011	2891
September 2008	3648	September 2011	2813.333333
October 2008	3603.5	October 2011	2741
November 2008	3654	November 2011	2741.5
December 2008	3636	December 2011	2682.5

ادامه جدول ۸ - مقادیر میانگین ماهانه سطح دریاچه ارومیه

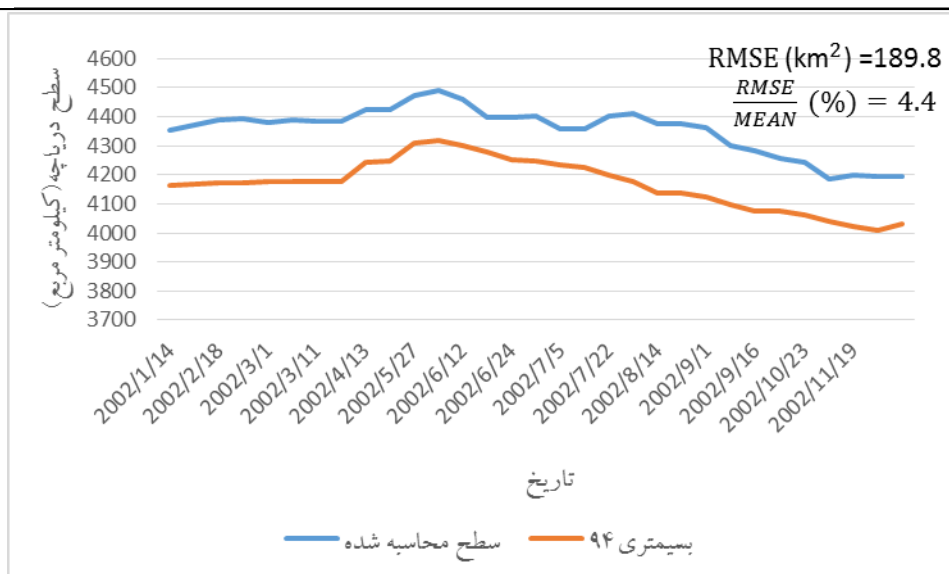
Month	Lake Area (KM ²)	Month	Lake Area (KM ²)
Jan 2012	2708	Jan 2015	2007
Feb 2012	2757.5	Feb 2015	2392
March 2012	2809.5	March 2015	2237
April 2012	3003.5	April 2015	2313
May 2012	3005.5	May 2015	2143.5
June 2012	2846	June 2015	2049.75
July 2012	2669	July 2015	1700.25
August 2012	2408.5	August 2015	1262.333333
September 2012	2283.5	September 2015	1015.666667
October 2012	2292	October 2015	973
November 2012	2385	November 2015	1768.333333
December 2012	2607	December 2015	1778
Jan 2013	2459	Jan 2016	1793
Feb 2013	2742.666667	Feb 2016	2172.5
March 2013	2756.5	March 2016	2311.666667
April 2013	2735	April 2016	2847
May 2013	2724	May 2016	2907.666667
June 2013	2636.5	June 2016	2783
July 2013	2428.25	July 2016	2652.5
August 2013	2200.75	August 2016	2422.5
September 2013	2009	September 2016	2185.666667
October 2013	1786.5	October 2016	2130.666667
November 2013	1974.5	November 2016	2055
December 2013	2192	December 2016	2203
Jan 2014	2284	Jan 2017	2054
Feb 2014	2289.333333	Feb 2017	2291.5
March 2014	2279.666667	March 2017	2456.666667
April 2014	2362.333333	April 2017	2647.666667
May 2014	2276		
June 2014	2173.25		
July 2014	1880.5		
August 2014	1218.75		
September 2014	884		
October 2014	1761		
November 2014	1985.5		
December 2014	2190.5		



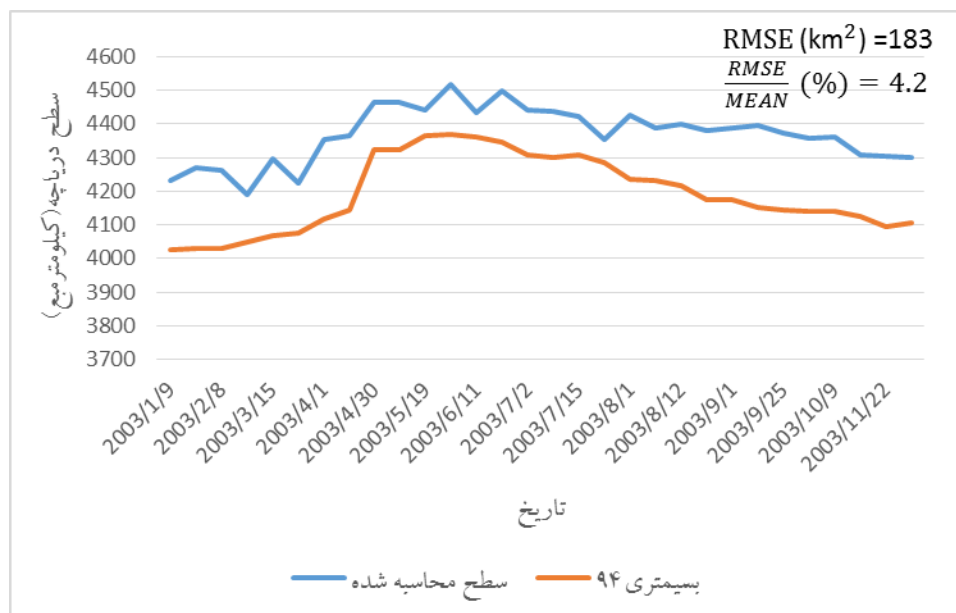
شکل ۱۵- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسیمتری ۹۴ در سال ۲۰۰۰



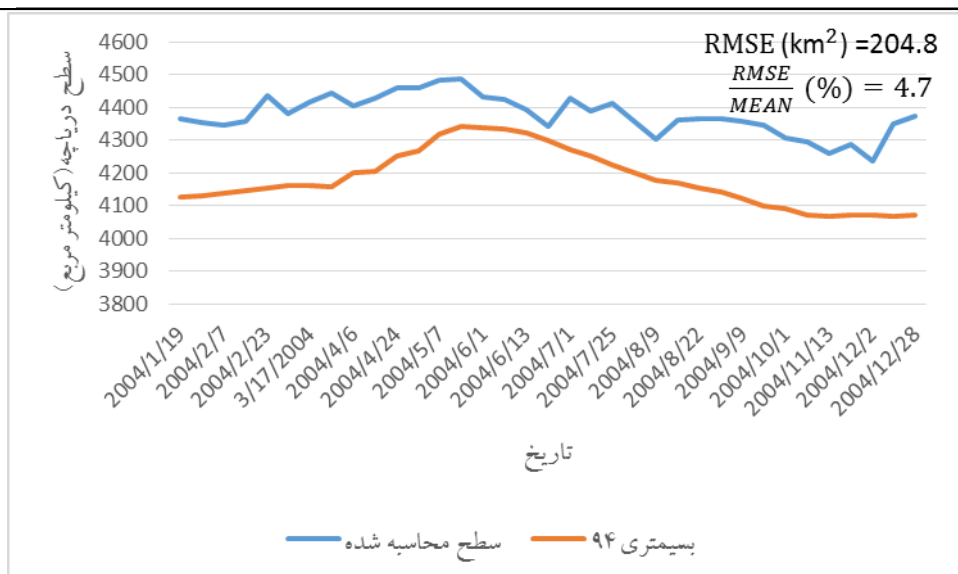
شکل ۱۶- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسیمتری ۹۴ در سال ۲۰۰۱



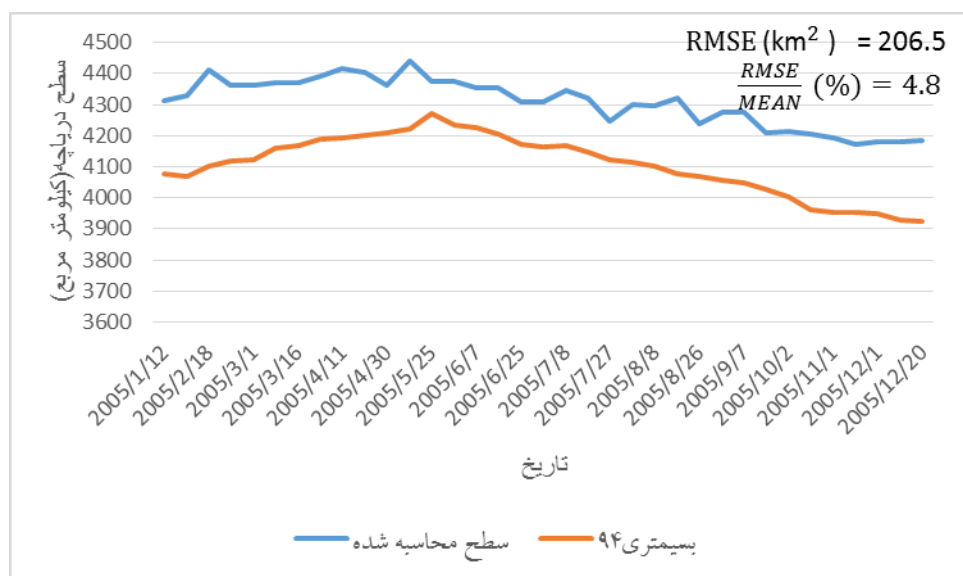
شکل ۱۷- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسمتری ۹۴ در سال ۲۰۰۲



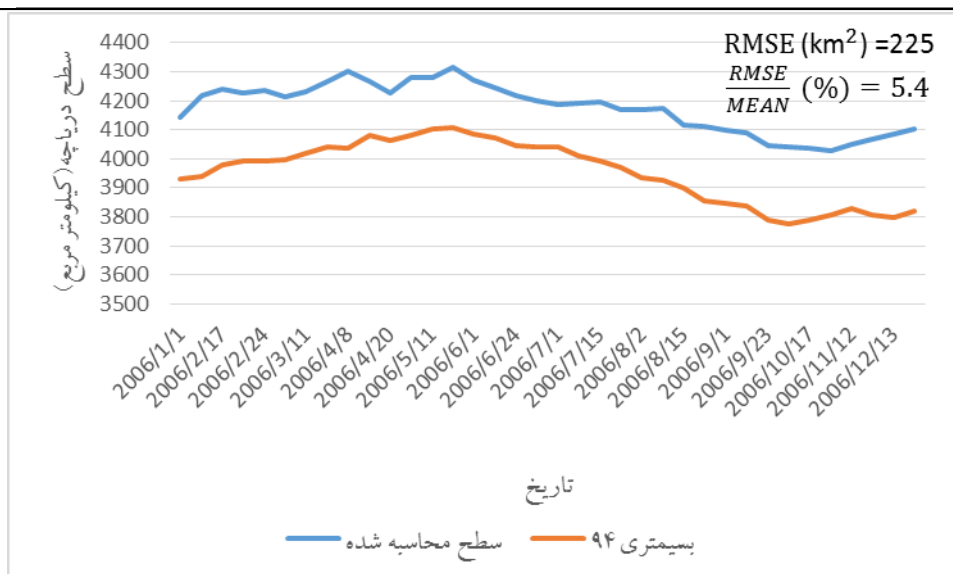
شکل ۱۸- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسمتری ۹۴ در سال ۲۰۰۳



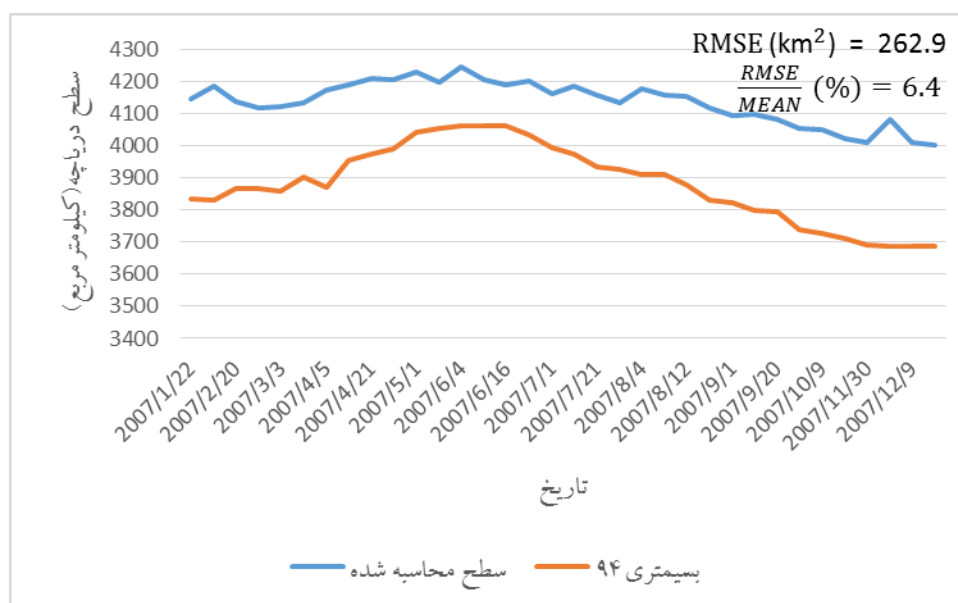
شکل ۱۹- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسیمتری ۹۴ در سال ۲۰۰۴



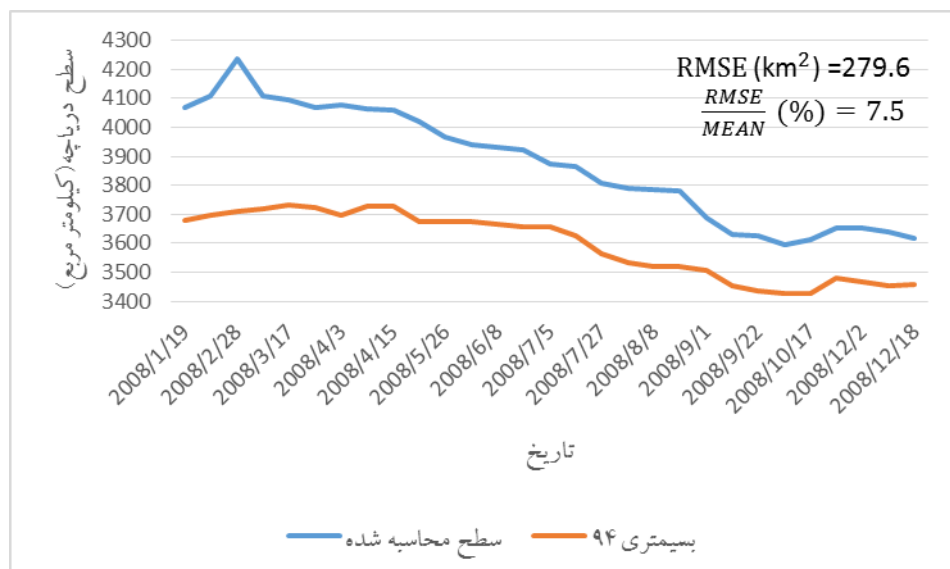
شکل ۲۰- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسیمتری ۹۴ در سال ۲۰۰۵



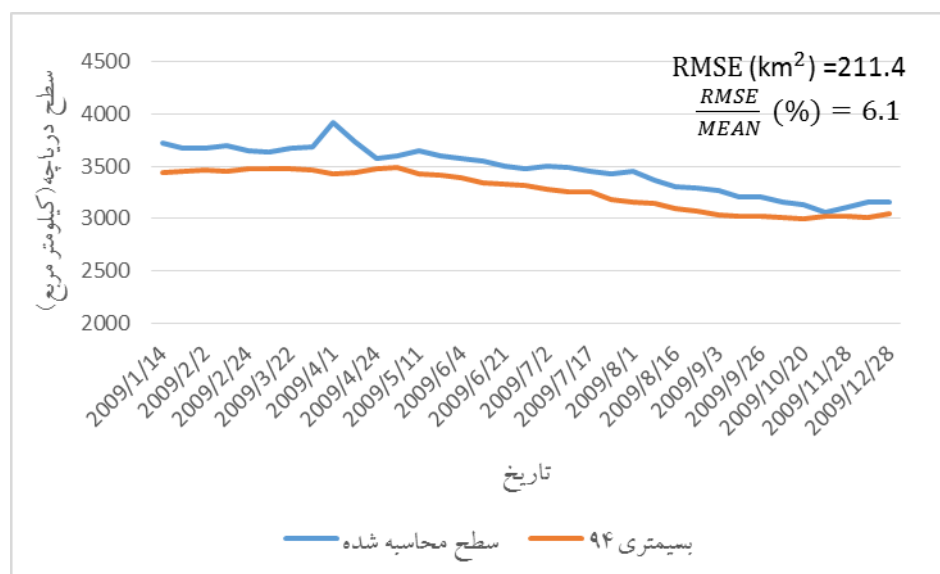
شکل ۲۱- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسیمتری ۹۴ در سال ۲۰۰۶



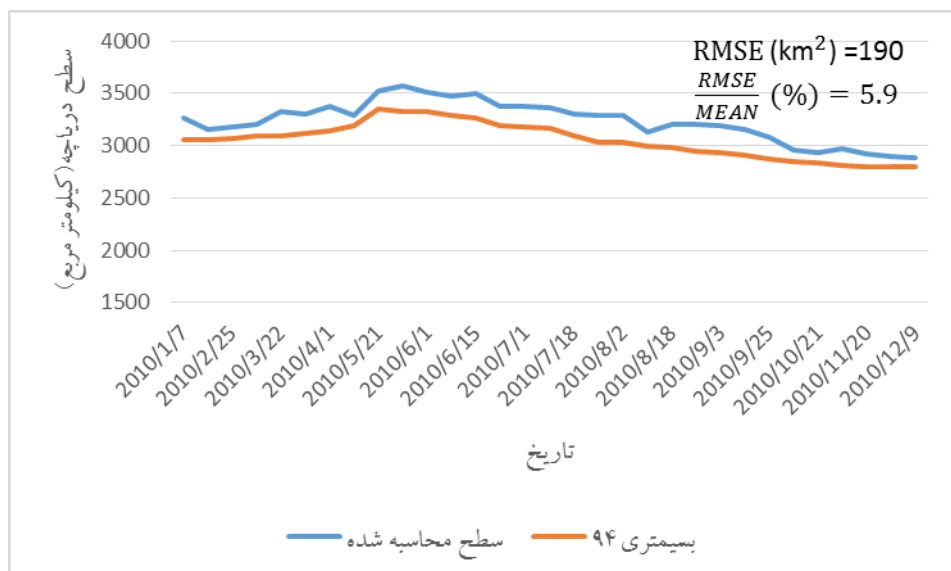
شکل ۲۲- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسیمتری ۹۴ در سال ۲۰۰۷



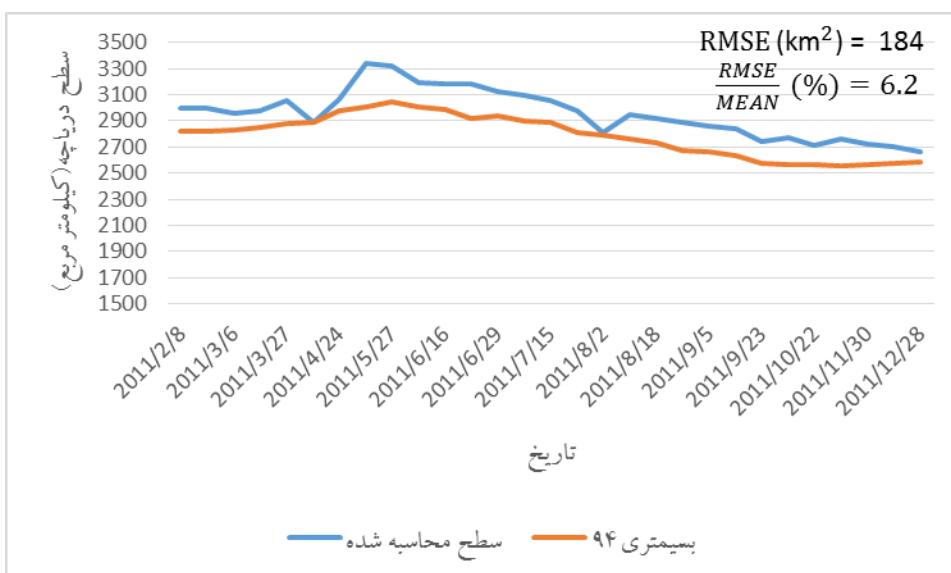
شکل ۲۳- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسمتری ۹۴ در سال ۲۰۰۸



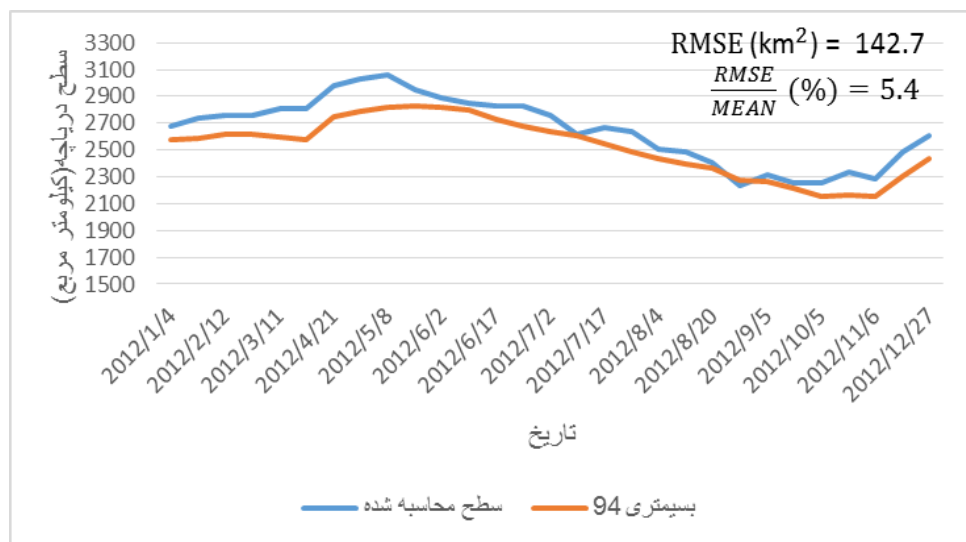
شکل ۲۴- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسمتری ۹۴ در سال ۲۰۰۹



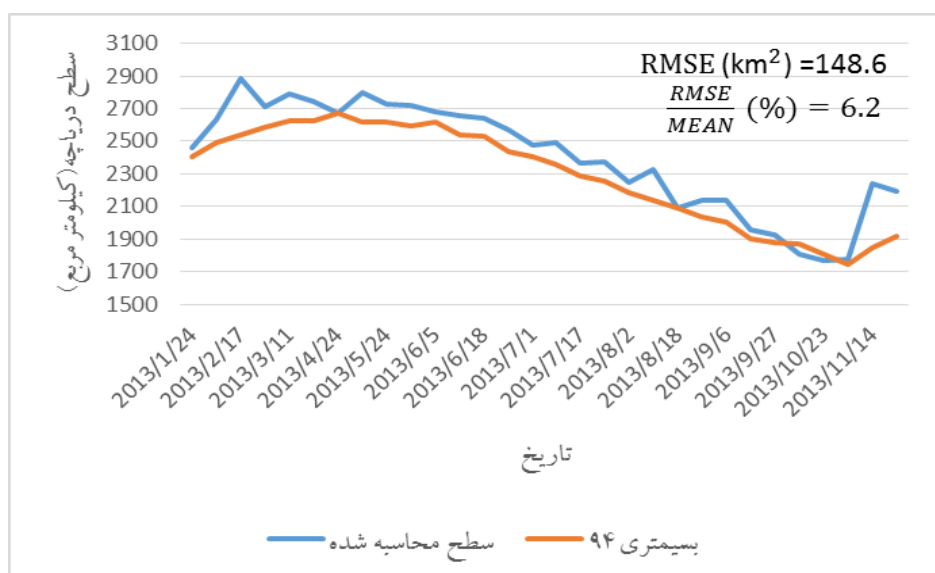
شکل ۲۵- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسیمتری ۹۴ در سال ۲۰۱۰



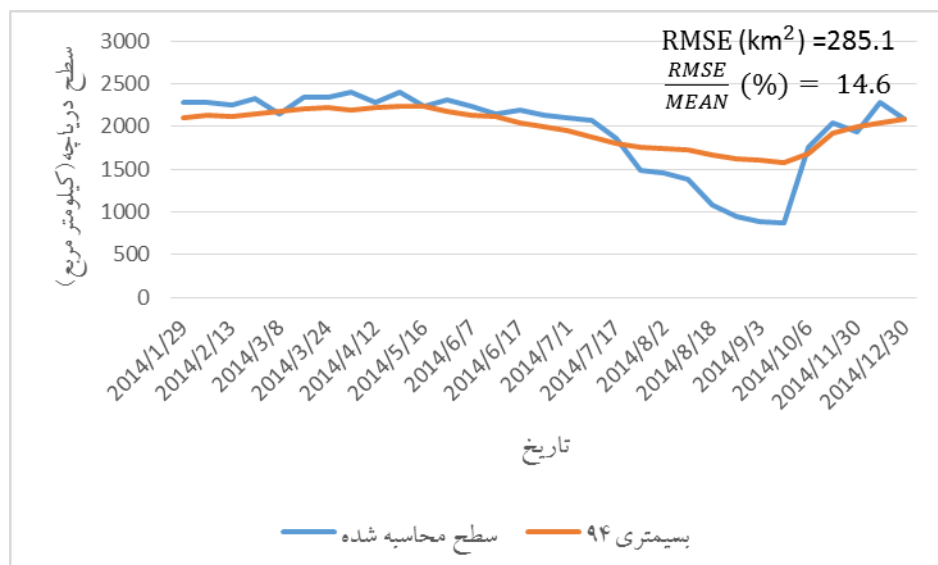
شکل ۲۶- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسیمتری ۹۴ در سال ۲۰۱۱



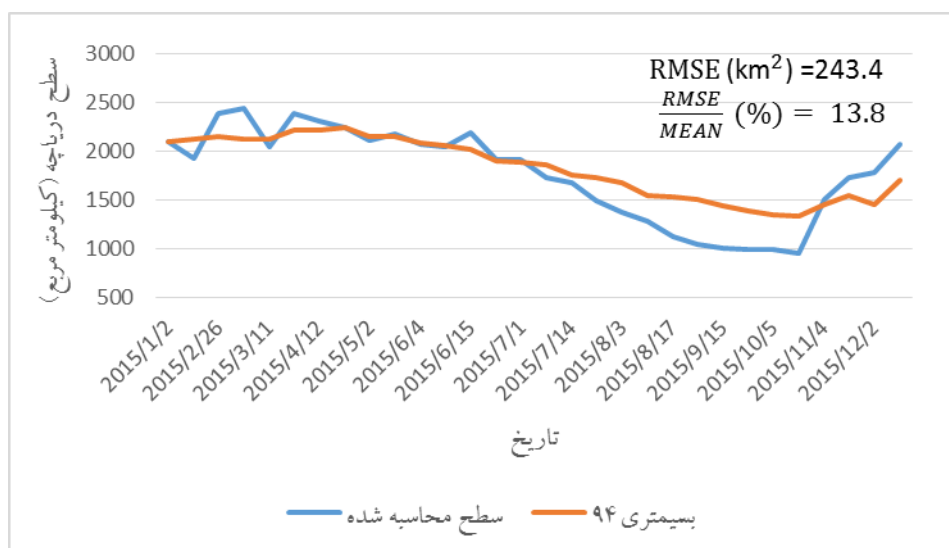
شکل ۲۷- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسیمتری ۹۴ در سال ۲۰۱۲



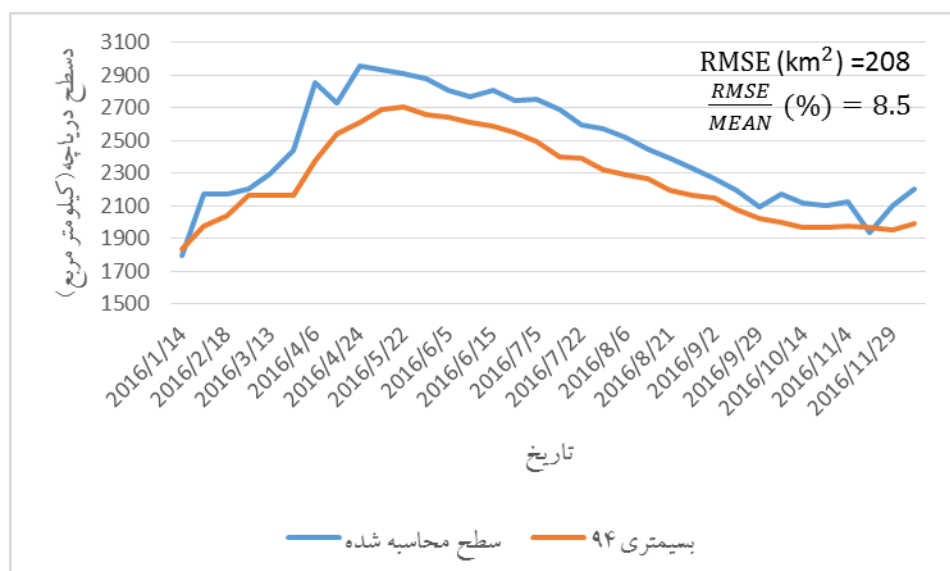
شکل ۲۸- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسیمتری ۹۴ در سال ۲۰۱۳



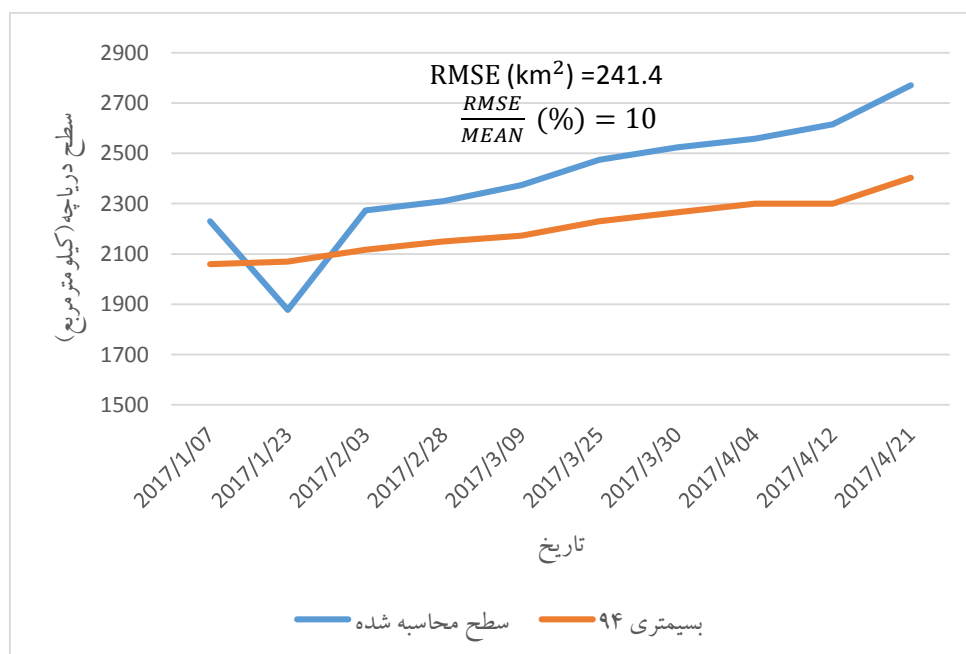
شکل ۲۹- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسیمتری ۹۴ در سال ۲۰۱۴



شکل ۳۰- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسیمتری ۹۴ در سال ۲۰۱۵



شکل ۳۱- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسیمتری ۹۴ در سال ۲۰۱۶



شکل ۳۲- مقایسه نتایج تخمین سطح دریاچه با استفاده از MODIS با بسیمتری ۹۴ در سال ۲۰۱۷



Urmia Lake Restoration Program



Sharif University of Technology
Remote Sensing Research Center

Estimation of Urmia Lake Monthly Area between 2000-2017 by MODIS

Technical Manager

Mostafa Javadian

Authors

Mohammad Abdoli

Amin Mehrmanesh

Document ID

TR-96-10

June 2017