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

محمد عبدلی[۱*]، مصطفی جوادیان[۲]، مسعود تجریشی[۳]

۱ و ۲- کارشناس مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف (RSRC)

۳ - استاد دانشکده مهندسی عمران و رئیس مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف (RSRC)

E-mail :abdoli.mohamad1992@gmail.com

خلاصه

بررسی تغییرات مساحت پهنه های آبی به دلایل مختلف زیست محیطی، هیدرولوژیکی و اقتصادی-اجتماعی همواره مورد توجه محققان بوده است. دریاچه ارومیه در سال های اخیر با مشکل جدی کاهش تراز دریاچه رو به رو بوده است. در این مطالعه، سری زمانی تغییرات مساحت دریاچه ارومیه از ماه مارس سال ۲۰۰۰ تا ماه آوریل سال ۲۰۱۷ میلادی با استفاده از سنجنده MODIS به دست آمده است. برای اینکار از شاخص NDWI که از باندهای سبز و مادون قرمز به دست می آید استفاده شده است. با توجه به روند تغییرات تراز در ماه های مختلف، در مجموع ۵۴۸ تصویر محصول بازتاب سطحی سنجنده MODIS (MOD09) انتخاب شد. نتایج نشان می دهد یک روند نزولی در سطح دریاچه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ دیده می شود. 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. صحت سنجی 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.

کلمات کلیدی: سطح دریاچه، دریاچه ارومیه، شاخص NDWI، سری زمانی.

۱. مقدمه

دریاچه‌ی ارومیه در شمال‌غربی 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 ارزیابی‌شده است؛ بااین‌حال، از سال ۱۹۹۵ میلادی وسعت دریاچه کاهش داشته و مطابق اطّلاعات به‌دست‌آمده از تحلیل داده‌های ماهواره‌ی لندست، در اوت سال ۲۰۱۱ میلادی به ۲۳۶۶ کیلومترمربع رسیده است [۱] . بدنه‌ی آبی دریاچه نسبتاً کم‌عمق بوده (عمق متوسط ۵/۴ متر) و طول دریاچه از ۱۳۰ تا ۱۴۵ کیلومتر در راستای شمالی- جنوبی متغیّر است؛ حداکثر عرض گزارش‌شده برای دریاچه معادل ۵۸ کیلومتر می‌باشد. میزان نوسانات سطح آب در سال‌های کم‌آب و پرآب در حدود ۶ متر است[۲]. 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. تعیین سطح پیکره‌های آبی به روش‌های گوناگون نظیر روش نقشه‌برداری زمینی، برآورد از طریق بررسی روابط بسیمتری، استفاده از فن‌های سنجش‌ازدور 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. با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور اپتیکال می‌توان به مطالعه و ارزیابی پیکره‌های آبی پرداخت.

۲،۱ کارشناس مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف (RSRC)

۳ استاد دانشکده مهندسی عمران و رئیس مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف (RSRC)

روش‌های مختلفی به منظور شناسایی و طبقه‌بندی پهنه‌های آبی و یا آشکار سازی تغییرات زمانی آن‌ها وجود دارد. در یک تقسیم‌بندی می‌توان این روش‌ها را به دو دسته در سطح پیکسل و در سطح جزء پیکسل(روش جداسازی طیفی) تقسیم نمود. الگوریتم‌های طبقه‌بندی در سطح پیکسل فرض می‌کنند که پیکسل‌ها خالص هستند (وجود یک عنصر در پیکسل‌ها) درحالی‌که الگوریتم‌های طبقه‌بندی در سطح زیر پیکسل اساس را بر خالص نبودن 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[۳]. با توجه به وجود پیچیدگی‌هایی در استفاده از روش‌های طبقه‌بندی در سطح زیر پیکسل و یا انتخاب تعداد لایه‌های مناسب در روش شبکه عصبی، برخی از محققین جهت شناسایی و یا طبقه‌بندی پهنه‌های آبی از شاخص‌های خاصی 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 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[۴]. 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[۵].

Ayana و همکاران با استفاده از سنجنده MODIS و شاخص ENDVI (تلفیق۲ شاخص NDVI وNDWI) 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[۶]. Zhou و همکاران 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 [۷]. Sarp و همکاران 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 (SVM)[1] سطح دریاچه را محاسبه نمودند. نتایج نشان دادند که به ترتیب روش‌های SVM ، MNDWI ، NDWI و AWEI از بیش‌ترین دقت برخوردار بودند [۸]. 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 می توان به موارد ذیل اشاره نمود.

Taravat و همکاران بین سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۵ به اندازه گیری تغییرات دریاچه 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، NDMI، NDWI-PCs، AWEI و روش شبکه عصبی اقدام به محاسبه سطح دریاچه‌ها شده است. نتایج نشان‌دهنده کارآمدی بهتر روش شبکه عصبی می‌باشد. در این بازه زمانی درحالی‌که سطح دریاچه‌های Van و Sevan افزایش داشته است، سطح دریاچه ارومیه با کاهش ۶۵ درصدی روبرو بوده است[۹]. Rokni و همکاران تغییرات زمانی و مکانی ایجادشده در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ در دریاچه ارومیه را تعیین نمودند. در این تحقیق با بهره‌گیری از تصاویر Landsat 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[۱۰]. با توجه به مطالعات انجام شده، در این تحقیق برای استخراج پهنه آبی از شاخص NDWI استفاده گردید. هدف اصلی این تحقیق، برآورد سری زمانی ماهانه سطح دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ میلادی و مقایسه با روش بسیمتری می‌باشد.

۲. داده های مورد استفاده

۲. 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. مقیاس، قدرت تفکیک تصویر و نیاز کاربر یا کارفرما مهم‌ترین عواملی هستند که انتخاب داده سنجش‌ازدوری 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 ازیک‌طرف و از سوی دیگر در دسترس بودن تصاویر این سنجنده،

[1] Support Vector Machine

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 ۱ 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 ۱– مشخصات ۷ باند نخست سنجنده MODIS

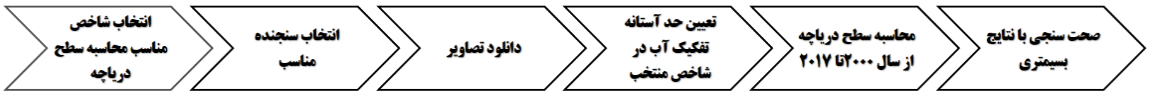
شماره باند	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
طول‌موج (نانومتر)	۶۷۰-۶۲۰	۸۷۶-۸۴۱	۴۷۹-۴۵۹	۵۶۵-۵۴۵	۱۲۵۰-۱۲۳۰	۱۶۵۲-۱۶۲۸	۲۱۵۵-۲۱۰۵
دقت مکانی	۲۵۰ متر		۵۰۰ متر				

۲.۲. ماهواره مورداستفاده 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 مادون‌قرمز 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.

۳. روش‌شناسی

برای انتخاب الگوریتم ا ستخراج سطح دریاچه، با توجه به مرور منابع انجام شده، محدودیت‌های زمانی و نیز موارد متعدد ا ستفاده از شاخص NDWI در تحقیقات پیشین و از طرفی دیگر وجود پیچیدگی‌هایی در ا ستفاده از روش‌های طبقه‌بندی در سطح زیر پیکسل (مثلاً معرفی دقیق اعضای خالص به الگوریتم)، از شاخص NDWI استفاده شده است. روش انجام این تحقیق به‌صورت یک فلوچارت در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱– فلوچارت روش‌شناسی استخراج مساحت سطحی دریاچه ارومیه

۱.۳. شاخص NDWI

McFeeters شاخص NDWI را به‌صورت رابطه (۱) ارائه نمود که ترکیبی از باندهای سبز و مادون‌قرمز نزدیک می‌باشد.

$$\mathrm{NDWI} = \frac{\rho_{\mathrm{Green}} - \rho_{\mathrm{NIR}}}{\rho_{\mathrm{Green}} + \rho_{\mathrm{NIR}}} \qquad (۱)$$

به‌صورت پیش‌فرض در این شاخص مقادیر خروجی بالای صفر به‌عنوان کلاس آب در نظر گرفته می‌شود. نکته حائز اهمیت در استفاده از این شاخص به‌منظور استخراج پیکسل‌های آب، این است که قبل از استفاده از آن به‌منظور افزایش سرعت و کیفیت فرآیند طبقه‌بندی می‌بایست عوارضی که خارج از مرز حداکثری دریاچه هستند حذف گردند.

۲.۳. انتخاب حد آستانه شاخص NDWI و تعیین تعداد تصاویر بهینه در هر ماه

به‌طور کلی حد آستانه ۰ تا ۱+ در NDWI به پیکره‌های آبی اختصاص دارد. با توجه به شرایط خاص دریاچه ارومیه و وجود زمین‌های غرقاب-شوره زار و شوره‌زارهای متعدد در اطراف آن، در این مطالعه به حد آستانه عمومی ارائه‌شده اکتفا نشده و حد آستانه بومی برای تشخیص پیکره دریاچه ارومیه از زمین‌های 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 مورداستفاده قرار گرفت. برای این منظور ۸ نقطه مرجع در اطراف مرز دریاچه انتخاب وحدود آستانه NDWI منطبق با مرز دقیق آب و خشکی و مناطق مرطوب و غرقاب (تفسیر چشمی) ثبت گردید. درنهایت از این حدود آستانه میانگین‌گیری شده و حد آستانه NDWI در تفکیک

اراضی آبی و غرقاب از مناطق خشکی به‌صورت جداگانه محاسبه گردید(جدول۲) . 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 می‌باشد. در مجموع میانگین کل آستانه‌ای که برای مرز دریاچه محاسبه شد عدد ۰/۰۰۶۱ بود که به با تقریب همان صفر در نظر گرفته شد. درواقع این عملیات به خوبی توانست مقدار حد آستانه‌ای که در تحقیقات پیشین از آن استفاده شده بود را اثبات کند.

جدول ۲– حدود آستانه بومی شاخص NDWI در تفکیک اراضی آبی و غرقاب–شوره زار

شماره	تاریخ	نقاط	آستانه پهنه آبی	آستانه غرقاب
۱	۱۲آذر۹۵	۱	-۰,۰۲	-
		۲	۰,۰۳۷	-
		۳	۰,۰۹	۰,۰۰۷-تا ۰,۰۹
		۴	۰,۰۹۷	۰,۰۳۷تا ۰,۰۹۷
		۵	۰,۰۵۴	۰,۰۴-تا ۰,۰۵۴
		۶	۰,۱۰۵۷	۰,۰۵۱۶تا ۰,۱۰۵۷
		۷	۰,۰۴۸	۰,۰۵۲-تا ۰,۰۴۸
		۸	۰,۱۵۰۳۹	۰,۰۶۸تا ۰,۱۵۰۳۹
۲	۲۸آذر۹۵	۱	۰,۰۰۹	۰,۰۶۲-تا ۰,۰۰۹
		۲	۰,۰۱۸	۰,۰۳۹-تا۰,۰۱۸
		۳	۰,۰۳۲	۰,۰۵۶- تا ۰,۰۳۲
		۴	۰,۱۳۰۲۹	-
		۵	۰,۰۱۷	-
		۶	۰,۰۲۲	۰,۰۲۲-تا ۰,۰۲۲
		۷	۰,۰۳۳۴	۰,۰۳۴-تا ۰,۰۳۳۴
		۸	۰,۰۰۱	-
۳	۲۱تیر ۹۵	۱	۰,۰۹۶۶	-
		۲	۰,۰۵۱۲۶	۰,۰۵۱۹-تا ۰,۰۵۱۲۶
		۳	-۰,۰۰۶۴	۰,۰۱۵-تا۰,۰۰۶۴-
		۴	۰,۰۰۴۸۴	-
		۵	۰,۱۰۱۴	۰,۰۵۳۳۷-تا ۰,۱۰۱۴
		۶	۰,۰۴۶۹۳	۰,۰۳۶۸۲-تا۰,۰۴۶۹۳
		۷	۰,۰۹۷۳	-
		۸	۰,۰۷۱۰۹	۰,۰۴۱۲۹-تا۰,۰۷۱۰۹

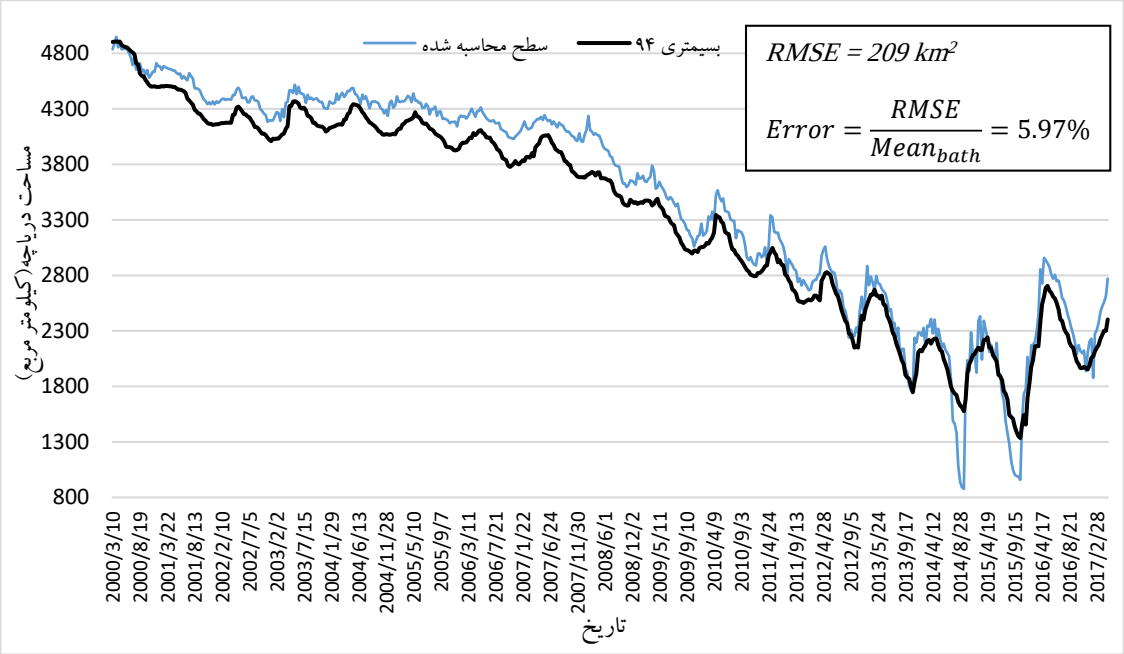
شماره	تاریخ	نقاط	آستانه پهنه آبی	آستانه غرقاب
۴	۱۸اسفند۹۴	۱	۰,۰۵۱۶۹	-
		۲	۰,۰۲۳	-
		۳	۰,۰۱۵۲۵	-
		۴	۰,۰۰۹۳	-
		۵	-۰,۰۰۸۵	-
		۶	۰,۰۱۲۶۸	-
		۷	-۰,۰۰۵۸۶	-
		۸	۰,۰۲۰۱۱	-
۵	۵خرداد ۹۵	۱	۰,۰۰۰۵۴	۰,۰۸۴-تا۰,۰۰۰۵۴
		۲	۰,۰۴۶۴۴۸	-
		۳	-۰,۰۲۶۳۸	-
		۴	۰,۰۳۸	۰,۰۵۹-تا۰,۰۳۸
		۵	۰,۱۰۸۷	-
		۶	-۰,۰۲۰۱۵	-
		۷	۰,۰۵۹۵۴	۰,۰۴۸۲۷-تا ۰,۰۵۹۵۴
		۸	۰,۰۲۹۸۲	-

میانگین آستانه پهنه آبی	۰,۰۴۰	**میانگین کل**	۰,۰۰۶۱
میانگین آستانه غرق آب و شوره‌زار	۰,۰۲۸- تا ۰,۰۴۰		

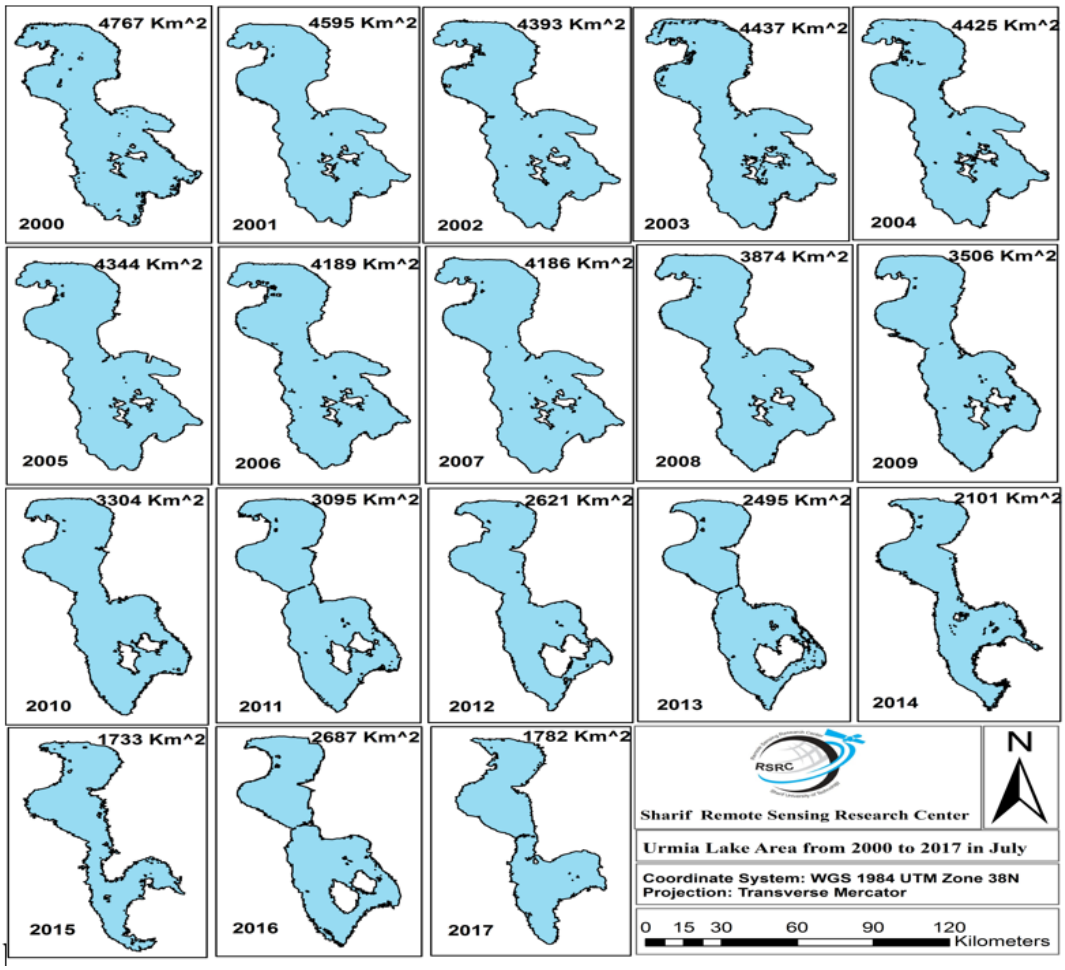
برای تعیین تعداد تصاویر بهینه در هر ماه جهت محاسبه میانگین ماهانه سطح دریاچه، از میزان تغییرات بلندمدت تراز آب دریاچه مربوط به روابط بسیمتری موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو (۱۳۹۴) در هر ماه استفاده گردید تا با توجه به تغییرات تراز در هر ماه بین دو تا چهار تصویر انتخاب شود. درمجموع ۵۴۸ تصویر در این تحقیق استفاده شد تا میانگین ماهانه سطح دریاچه برای ۲۰۶ ماه محاسبه گردد.

۴. نتایج

سطح دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ میلادی با استفاده از سنجنده MODIS توسط شاخص NDWI محاسبه شد که سری زمانی آن در شکل ۲ و سطح دریاچه در شکل ۳ نشان داده شده است. سطح دریاچه در ماه جولای به عنوان نماینده هرسال در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- سری زمانی سطح دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ میلادی و بسیمتری ۱۳۹۴



شکل ۳– سطح دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ میلادی در ماه جولای

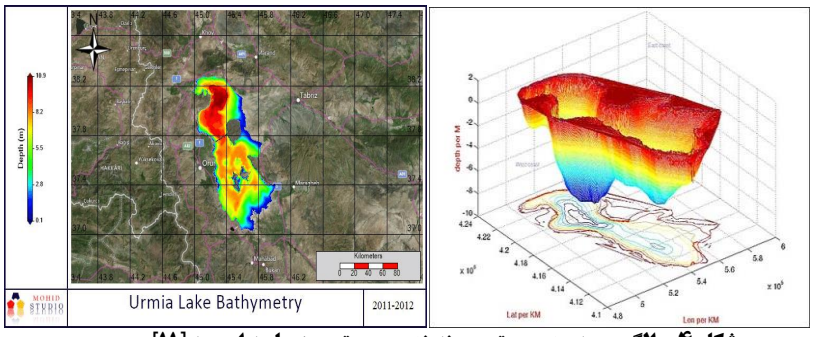
۴.۱. صحت‌سنجی نتایج با استفاده از بسیمتری

جهت صحت سنجی سطوح برآورد شده با استفاده از سنجنده MODIS، ازخروجی بسیمتری دریاچه ارومیه که توسط موسسه تحقیقات آب در سال ۱۳۹۴ توسعه داده شده، استفاده شده است. به‌منظور 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 قابل‌اطمینانی در نواحی قابل تردد دریاچه اندازه‌گیری شده است .در روش‌شناسی الگوریتم بسیمتری نیز از تصاویر ماهواره Landsat نیز در کنار الگوریتم‌های میدانی بهره گرفته شده است.

شکل ۲ سری زمانی تغییرات سطح دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰تا ۲۰۱۷، با استفاده از سنجنده MODIS و بسیمتری سال ۱۳۹۴ موسسه تحقیقات آب را نشان می‌دهد. 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. با این‌حال 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(۲۵۰متر) باشد که باعث می‌شود در پیکسل‌هایی که در مرز دریاچه قرارگرفته‌اند و قسمتی از آن‌ها در خشکی و قسمتی در آب قرار دارند، دچار خطا گردد.
- افزایش قابل‌توجه سطح دریاچه در روز ۲۸ فوریه ۲۰۰۸: در این روز سطح دریاچه با افزایش قابل‌توجهی 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 موردبررسی قرار گرفت. برای این کار بارش روزانه روزهای ۲۰تا ۲۸ فوریه۲۰۰۸ ایستگاه ارومیه موردبررسی قرار گرفت که بارش روز بیست و ششم ماه با ۱۵ میلی‌متر قابل‌توجه بود. با توجه به این مقدار بارش می‌توان افزایش قابل‌توجه 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 درنتیجه 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 قابل‌توجه سطح دریاچه در ماه‌های سپتامبر ۲۰۱۴و اکتبر۲۰۱۵: ماه‌های ذکرشده مربوط به کمترین ترازهای ثبت‌شده 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 قابل‌توجه می‌باشد، لازم است تا علت آن را بررسی نماییم.

با توجه به شکل ۴ که الگوی سه‌بعدی بستر و پهنه‌بندی بسیمتری دریاچه ارومیه را نشان می‌دهند می‌توان گفت که در ترازهای حداقل که در بازه ۱۲۷۰تا ۱۲۷۰/۲۰ متر می‌باشند، قسمت شمالی و جنوبی دریاچه از هم جدا می‌شود. همچنین در قسمت‌های میانی دریاچه سطح قابل‌توجهی با عمق یکسان وجود دارد که با کاهش ۲۰ سانتی‌متری در تراز دریاچه شاهد خشک شدن سطح قابل‌توجهی 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 درسطح‌های حداقلی دریاچه که شمال و جنوب دریاچه از یکدیگر جدا می‌شوند، به‌خوبی کالیبره نشده و نتایج را بیشتر از حد واقعی نشان می‌دهد.

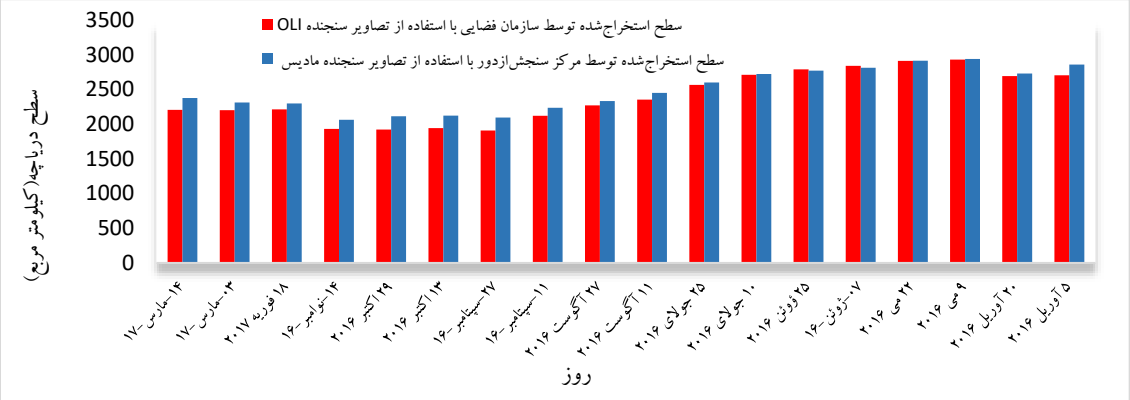


شکل ۴– الگوی سه‌بعدی بستر و پهنه‌بندی بسیمتری دریاچه ارومیه [۱۱]

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[۱۲]. در این پروژه از تصاویر ماهواره Landsat و در برخی موارد از سنجنده MODIS استفاده شده است. جهت مقایسه نتایج به‌دست‌آمده 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.

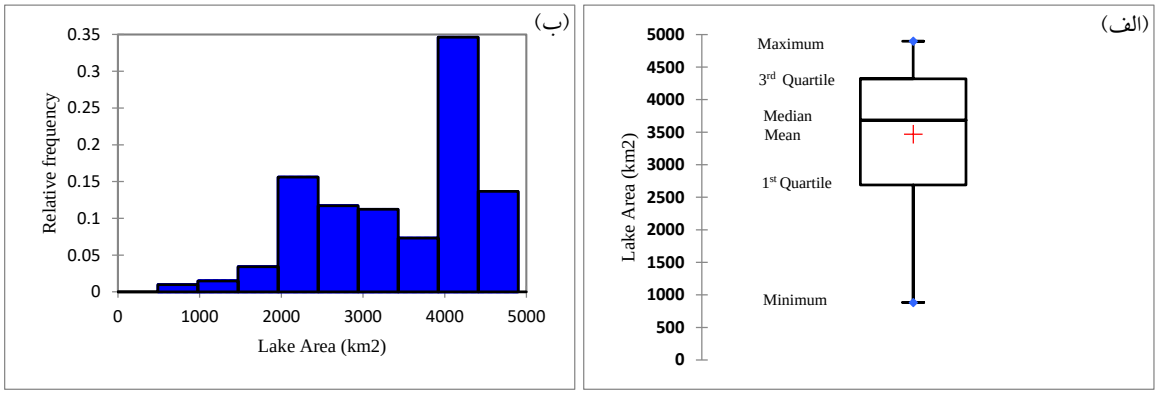
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می شود، در مجموع سطح محاسبه‌شده توسط سازمان فضایی و مرکز سنجش‌ازدور، مطابقت‌های خوبی با یکدیگر دارند و اختلاف کمتر از ۳ درصد است. با بررسی اختلافات مقادیر مشاهده می شود که در اکثر روزها مقدار سطح محاسبه شده توسط مرکز سنجش از دور کمی بیش‌تر از مقدار محاسبه‌شده توسط سازمان فضایی ایران است . به‌طورکلی 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 گرفته‌شده و تفاوت در تعیین مرز بین رودخانه‌های ورودی به دریاچه با مرز دریاچه.



شکل ۵– مقایسه نتایج سطح دریاچه ارومیه مرکز سنجش از دور با سازمان فضایی ایران (بر حسب کیلومتر مربع)

۴ . ۳ . تحلیل آماری نتایج

خصوصیات کلی آماری (Statistic) سری زمانی محاسبه‌شده برای میانگین ماهانه سطح دریاچه (۲۰۶ ماه) با استفاده از نمودار جعبه‌ای (Box Plot) در شکل۶ – الف نشان داده‌شده است. همان‌طور که 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 ۶- ب نشان داده‌شده است. این هیستوگرام نشان می‌دهد که بازه ۴۰۰۰ تا ۴۵۰۰ کیلومترمربع برای سطح دریاچه در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷، بیش‌ترین فراوانی را داشته و فراوانی سطوح زیر ۲۰۰۰ کیلومتر پایین است.. در یک مفهوم کلی، شکل‌های ۶-الف و ۶- ب نشان از وزن بیش‌تر سال‌های پرآب در این ۱۷سال دارد.



شکل ۶- هیستوگرام و نمودار جعبه‌ای (Box Plot) مقادیر 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 قرمزنزدیک بدست می‌آید بهره گرفته شده است.جهت انتخاب حد آستانه تفکیک پهنه‌های آبی از غیرآبی 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 بیش تر از مقادیر بسیمتری است که عمده علت آن را در بزرگ بودن پیکسل سنجنده MODIS (۲۵۰متری) 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 می شود. با بررسی الگوی سه‌بعدی بستر و پهنه‌بندی بسیمتری دریاچه ارومیه مشاهده شد که در ترازهای حداقل که در بازه ۱۲۷۰تا ۱۲۷۰/۲۰ متر می‌باشند، قسمت شمالی و جنوبی دریاچه از هم جدا می‌شود. همچنین در قسمت‌های میانی دریاچه سطح قابل‌توجهی با عمق یکسان وجود دارد که با کاهش ۲۰ سانتی‌متری در تراز دریاچه شاهد خشک شدن سطح قابل‌توجهی 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.

۵. مراجع

۱/ 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.

۲. 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.

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

٤/ 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.

۵/ 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.

۶/ 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.

۷/ Zhou, S. L., Zhang, W. C., & Wang, F. (2016). 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.

۸/ 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.

۹/ 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.

۱۰/ Rokni, K., Ahmad, A., Solaimani, K., & Hazini, S. (2015). A new approach for surface water change detection: Integration of pixel level image fusion and image classification techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *34*, 226-234.

۱۱/ 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.

۱۲. سازمان فضایی ایران. (۱۳۹۵). پایش نوسانات سطح آب دریاچه ارومیه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در بازه زمانی سال‌های ۱۳۵۵ تا ۱۳۹۵