



ستاد احیای دریاچه ارومیه



دانشگاه صنعتی شریف

مرکز تحقیقات سنجش از دور (RSRC)

گزارش پروژه

به روزرسانی رابطه‌ی تراز آب-مساحت-حجم دریاچه‌ی ارومیه و تهیه‌ی نقشه‌ی بسیمتری آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌های

لندست

مجری طرح:

محمد دانش یزدی

تهیه‌کننده:

یاسمین قدیانی

کد سند

TR-۹۸-۰۳

دی ۱۳۹۸

شناسه سند			
عنوان سند		به روزرسانی روابط تراز سطح آب-مساحت-حجم دریاچه‌ی ارومیه و تهیه‌ی نقشه‌ی بسیمتری آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست	
نوع سند		گزارش فنی (TR) ■	خلاصه مدیریتی (ES) □
		یادداشت تحقیقی (RN) □	یادداشت فنی (TN) □
		پروپوزال (PR) □	خروجی غیررسمی (RM) □
کد سند		TR-۹۸-۰۳۰۳	
شماره‌ی قرارداد			
تاریخ قرارداد			
کارفرما		ستاد احیای دریاچه ارومیه	
گروه فنی		محمد دانش یزدی، مسعود تجربشی	
هماهنگ کننده اجرایی			
مدیر فنی طرح			
کارشناسان فنی طرح			
تاریخ انتشار		۱۳۹۸	
ویرایش		اول	

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

مرکز تحقیقات سنجش از دور (RSRC)، دانشگاه صنعتی شریف، ساختمان پژوهشگاه زیست فناوری، شماره‌ی ۲۰۱

تلفن : ۶۶۱۶۴۱۳۸، ۶۶۱۶۴۱۸۵، ۶۶۰۳۶۰۱۶ نمابر:

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 شکوفا شدن برکات این گردش آزاد اطلاعات در اقصی نقاط کشور خواهیم بود.

کلیه تعابیر، 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

تخمین هر چه دقیق تر حجم آب موجود در دریاچه‌ی ارومیه از جمله اطلاعاتی است که می‌تواند نقش کلیدی در ارزیابی اثربخشی طرح‌های احیای دریاچه داشته باشد. در این راستا پژوهش حاضر با دو هدف انجام شده است. هدف اول، به روز رسانی رابطه‌ی میان تراز آب-مساحت-حجم دریاچه‌ی ارومیه است. بدین منظور، برای تعیین مساحت آب، تصاویر ماهواره‌ی لندست از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۷ شمسی مورد بررسی قرار گرفتند و مساحت پیکره‌ی آبی دریاچه با کمک روش k-means در آن‌ها به دست آمد. در نهایت، دو رابطه‌ی خطی (دارای نقطه‌ی تلاقی با سطح تراز آب ۱۲۷۱/۲۵ متر) با ضریب همبستگی ۰/۹۲ و ۰/۹۹ برای توصیف منحنی سطح تراز آب و مساحت آن شناسایی شدند. هدف دوم، تعیین حجم آب موجود در دریاچه‌ی ارومیه با تعیین بسیمتری آن است. به این منظور، نقاط حاصل از عمق‌سنجی در سطح دریاچه طی شش دوره در سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ شمسی برای تهیه‌ی نقشه‌ی بسیمتری آن مورد استفاده قرار گرفتند. در ابتدا نقاط داخل بدنه‌ی آبی شناسایی و سپس تصویری در داخل بازه‌ی زمانی داده‌برداری انتخاب شد. سپس مدلی ترکیبی از درخت تصمیم و شبکه‌ی عصبی مصنوعی توسعه داده شد تا اعماق نقاط (حاصل از محاسبه‌ی اختلاف تراز سطح آب در بازه‌ی مورد نظر و تراز گزارش شده از کف دریاچه) را بر اساس ویژگی‌هایی چون مقادیر انعکاس و تعدادی از شاخص‌های مرتبط با مطالعات آب در پیکسل‌های متناظر در تصاویر منتخب تخمین بزنند. با توجه به اعماق اندازه‌گیری شده، ضریب همبستگی برای روابط به دست آمده در دوره‌های داده‌برداری به ترتیب ۰/۸۹، ۰/۹۵، ۰/۹۱، ۰/۸۱ و ۰/۵۲ است. در مرحله‌ی بعد با استفاده از رابطه‌ی به دست آمده، عمق نقاط درون دریاچه محاسبه شده و محاسبه‌ی حجم آب موجود در دریاچه در هر دوره میسر گشت. در نهایت نقشه‌ی بسیمتری با محاسبه‌ی تفاضل تراز سطح آب و عمق آن در داخل بدنه‌ی آبی برای هر شش دوره استخراج و نقشه‌ی تفاضل میان تراز بستر در هر دو دوره‌ی متوالی گزارش شد. در نهایت با میانگین‌گیری از شش نقشه‌ی بسیمتری، نقشه‌ای به نمایندگی از کل شش دوره به دست آمد که با استفاده از آن نمودار حجم آب موجود در دریاچه بر اساس تراز سطح آب در محدوده‌ی ترازهای بیشینه و کمینه‌ی شش دوره‌ی داده‌برداری ترسیم گردید.

کلمات کلیدی: دریاچه‌ی ارومیه، بسیمتری، تراز، مساحت، حجم، سنجش از دور، لندست.

فهرست مطالب

چکیده.....	۳
۱- مقدمه.....	۱
۱-۱- هدف پژوهش.....	۲
۲-۱- سوالات پژوهش.....	۲
۲- مروری بر ادبیات فنی.....	۴
۱-۲- بررسی و مقایسه‌ی روش‌های موجود در تعیین بسیمتری.....	۴
۲-۲- روش‌های مورد استفاده در تعیین نقشه‌ی بسیمتری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای.....	۵
۳-۲- مطالعات مرتبط با دریاچه‌ی ارومیه برای استخراج نقشه‌ی بسیمتری.....	۸
۳- داده‌های مورد استفاده.....	۱۰
۱-۳- تصاویر ماهواره لندست.....	۱۰
۲-۳- نقاط عمق‌سنجی شده.....	۱۳
۳-۳- تراز سطح آب دریاچه.....	۱۴
۴- روش‌شناسی.....	۱۶
۱-۴- تعیین مساحت و محدوده‌ی دریاچه.....	۱۶
۱-۱-۴- استخراج محدوده دریاچه به کمک شاخص <i>NDWI</i>	۱۷
۲-۱-۴- استخراج محدوده دریاچه با استفاده از روش <i>k-means</i>	۱۸
۲-۴- تعیین بسیمتری دریاچه.....	۲۱
۱-۲-۴- استخراج محدوده دریاچه با استفاده از روش <i>SVM</i>	۲۱
۲-۲-۴- حذف داده‌های پرت با استفاده از فاصله‌ی مایلانویس.....	۲۲
۳-۲-۴- برازش خطی چند متغیره.....	۲۳
۴-۲-۴- درخت تصمیم.....	۲۶
۵-۲-۴- شبکه‌ی عصبی مصنوعی.....	۲۹
۵- نتایج.....	۴۰
۱-۵- به‌روزرسانی روابط تراز سطح آب-مساحت-حجم دریاچه ارومیه.....	۴۰
۲-۵- اعتبارسنجی مرز تعیین‌شده‌ی دریاچه با عملیات میدانی.....	۴۸

۵۸.....	۳-۵- استخراج نقشه‌ی بسیمتری دریاچه‌ی ارومیه.....
۱۰۷.....	۶. محدودیتها، چالشها و پیشنهادات.....
۱۰۹.....	۷- نتیجه گیری و جمع بندی.....
۱۱۱.....	- پیوست.....
۱۲۲.....	مراجع.....

فهرست شکل‌ها

۱۲.....	شکل ۱: نمونه‌ای از تصاویر ماهواره‌ایلندست ۷ در تاریخ ۱۲ شهریور ۱۳۸۹ (۳ سپتامبر ۲۰۱۰).....
۲۸.....	شکل ۲: مفهوم کلی درخت تصمیم. (الف) نمایی از فضای دو بُعدی متغیرها و نواحی تقسیم شده؛ (ب) نمایی سه از فضای متغیرها، نواحی تقسیم شده و مقدار اختصاص داده شده به هر ناحیه؛ (ج) درخت تصمیم متناظر با این مسئله (برداشت از [۱۸]).....
۳۱.....	شکل ۳: (الف) نمایی از دو نورون در کنار هم (برداشت از HTTP://TEEREX.IR/) (ب) نمای نزدیک سیناپس (برداشت از HTTPS://STUDY.COM/).....
۳۲.....	شکل ۴: نورون مدل سازی شده توسط مک کالوج و پیت (برداشت از [۲۳]).....
۳۳.....	شکل ۵: انواع توابع فعال سازی متداول (الف) تابع پله‌ای با حد آستانه (ب) تابع خطی تکه‌ای (ج) تابع سیگموئید (د) تابع گاوسی (برداشت از HTTPS://WWW.SAEDSAYAD.COM/).....
۳۵.....	شکل ۶: طبقه بندی ساختارهای هر دو نوع شبکه‌های پیش خور و بازگشتی (برداشت از [۲۴]).....
۴۱.....	شکل ۷: تعیین حدود دریاچه با کمک NDWI با حدود آستانه‌ی (الف) صفر (ب) ۰/۱ - (ج) ۰/۰۵ -.....
۴۲.....	شکل ۸: (الف) تصویر RGB دریاچه در روز ۳ بهمن ۱۳۹۷ (۲۳ ژانویه ۲۰۱۹) (ب) NDWI دریاچه در روز ۳ بهمن ۱۳۹۷ (۲۳ ژانویه ۲۰۱۹).....
۴۳.....	شکل ۹: نقطه‌ی اول (الف) موقعیت راستای انتخاب شده در دریاچه (ب) نمای نزدیک راستای انتخاب شده (ج) پروفیل NDWI در راستای دلخواه به همراه موقعیت تقریبی نقطه شکست (د) موقعیت راستای انتخاب شده و موقعیت تقریبی نقطه‌ی شکست.....
۴۴.....	شکل ۱۰: (الف) مساحت دریاچه (ب) مرز دریاچه بر روی تصویر RGB.....
۴۵.....	شکل ۱۱: نمودار مساحت دریاچه بر حسب تراز سطح آن از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۷ شمسی.....
۴۵.....	شکل ۱۲: دو خط برازش داده شده بر نمودار مساحت دریاچه بر حسب تراز سطح آن از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۷ شمسی.....
۴۶.....	شکل ۱۳: نمونه‌ای از پروفیل‌های طولی دریاچه.....

- شکل ۱۴: مساحت‌های به‌دست‌آمده در این پژوهش و مقایسه‌ی آن با مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه‌ی کریمی و همکاران (۱۳۹۴)
- ۴۷.....
- شکل ۱۵: نقشه‌های حاصل از قرارگیری خطوط داده‌برداری شده در کنار تصویر RGB دریاچه در تاریخ ۲۷ تیر ۱۳۹۸ (۱۸ جولای ۲۰۱۹) (الف) خط داده‌برداری اول (ب) خط داده‌برداری دوم (ج) خط داده‌برداری سوم ۵۱
- شکل ۱۶: نقشه‌های حاصل از قرارگیری خطوط داده‌برداری شده در کنار بدنه‌ی آبی شناسایی شده‌ی دریاچه در تاریخ ۲۷ تیر ۱۳۹۸ (۱۸ جولای ۲۰۱۹) (الف) خط داده‌برداری اول (ب) خط داده‌برداری دوم (ج) خط داده‌برداری سوم ۵۴
- شکل ۱۷: هیستوگرام NDWI در مرزهای آبی تعیین شده توسط عملیات میدانی در تاریخ ۱۸ جولای ۲۰۱۹ (الف) خط داده‌برداری اول (ب) خط داده‌برداری دوم (ج) خط داده‌برداری سوم (د) هر سه خط داده‌برداری ۵۶
- شکل ۱۸: نمودار روزانه‌ی تراز سطح آب دریاچه در هر یک از دوره‌های عمق‌سنجی (الف) دوره‌ی اول (ب) دوره‌ی دوم (ج) دوره‌ی سوم (د) دوره‌ی چهارم (ه) دوره‌ی پنجم (و) دوره‌ی ششم ۶۰
- شکل ۱۹: بدنه‌ی آبی دریاچه در تصاویر منتخب شش دوره به همراه نقاط اندازه‌گیری شده در داخل و بیرون دریاچه در زمان متناظر (الف) دوره‌ی اول (ب) دوره‌ی دوم (ج) دوره‌ی سوم (د) دوره‌ی چهارم (ه) دوره‌ی پنجم (و) دوره‌ی ششم ۶۸
- شکل ۲۰: نقاط دارای عمق منفی هر یک از دوره‌ها (الف) دوره‌ی اول (ب) دوره‌ی دوم (ج) دوره‌ی سوم (د) دوره‌ی چهارم (ه) دوره‌ی پنجم (و) دوره‌ی ششم ۷۴
- شکل ۲۱: فلوچارت مدل ترکیبی پیشنهادی برای تعیین عمق در این پژوهش ۷۸
- شکل ۲۲: هیستوگرام‌های خطای مطلق اعماق حاصل از مدل‌سازی نسبت به اعماق واقعی در هر یک از نقاط اندازه‌گیری شده در هر یک از دوره‌ها (الف) دوره‌ی اول (ب) دوره‌ی دوم (ج) دوره‌ی سوم (د) دوره‌ی چهارم (ه) دوره‌ی پنجم (و) دوره‌ی ششم ۸۱
- شکل ۲۳: نقشه‌های عمق آب در دوره‌های داده‌برداری (الف) دوره‌ی اول (ب) دوره‌ی دوم (ج) دوره‌ی سوم (د) دوره‌ی چهارم (ه) دوره‌ی پنجم (و) دوره‌ی ششم ۸۷
- شکل ۲۴: هیستوگرام اعماق به‌دست‌آمده در هر یک از دوره‌های داده‌برداری (الف) دوره‌ی اول (ب) دوره‌ی دوم (ج) دوره‌ی سوم (د) دوره‌ی چهارم (ه) دوره‌ی پنجم (و) دوره‌ی ششم ۹۰
- شکل ۲۵: حجم آب محاسبه‌شده برای دریاچه در شش دوره‌ی داده‌برداری با استفاده از مدل پیشنهادی این پژوهش و مقایسه‌ی آن با رابطه‌ی پیشنهادی توسط کریمی و همکاران ۹۱
- شکل ۲۶: نقشه‌ی بسیمتری دریاچه در پنج دوره‌ی داده‌برداری (الف) دوره‌ی اول (ب) دوره‌ی دوم (ج) دوره‌ی سوم (د) دوره‌ی چهارم (ه) دوره‌ی پنجم (و) دوره‌ی ششم ۹۸
- شکل ۲۷: نقشه‌های اختلاف تراز بستر بین هر دو دوره‌ی متوالی (الف) دوره‌های اول و دوم (ب) دوره‌های دوم و سوم (ج) دوره‌های سوم و چهارم (د) دوره‌های چهارم و پنجم (ه) دوره‌های پنجم و ششم ۱۰۳
- شکل ۲۸: تراز بستر میانگین در شش دوره‌ی داده‌برداری ۱۰۵
- شکل ۲۹: حجم آب موجود در دریاچه بر حسب تراز سطح آب ۱۰۶

فهرست جداول

- جدول ۱: تاریخ شروع و پایان فعالیت هر یک از ماهواره‌های لندست ۱۰
- جدول ۲: مشخصات باندهای موجود در تصاویر ماهواره‌های لندست مورد استفاده در این پژوهش ۱۲
- جدول ۳: جزئیات عملیات‌های عمق‌سنجی دریاچه‌ی ارومیه ۱۴
- جدول ۴: شاخص‌های آماری NDWI در سه خط انجام داده‌برداری ۵۷
- جدول ۵: شاخص‌های آماری تراز سطح آب دریاچه در بازه‌های زمانی انجام داده‌برداری ۶۰
- جدول ۶: تبدیل تاریخ‌های شمسی به میلادی برای یافتن نزدیک‌ترین تصویر از نظر زمانی در هر دوره ۶۱
- جدول ۷: تاریخ برداشت تصویر منتخب در هر دوره به همراه تراز متناظر سطح آب ۶۱
- جدول ۸: مشخصات هواشناسی ایستگاه ارومیه در زمان دریافت هر یک از تصاویر ۶۲
- جدول ۹: شاخص‌های آماری عمق نقاط داده‌برداری شده در بازه‌های زمانی انجام داده‌برداری ۷۵
- جدول ۱۰: متغیرهای آماری مدل‌سازی داده‌های عمق با استفاده از سه روش MLR، ANN و RTB در هر یک از دوره‌های عمق‌سنجی ۷۶
- جدول ۱۱: متغیرهای آماری R^2 ، MAE و RMSE مدل پیشنهادی ۷۹
- جدول ۱۲: تراز سطح آب، اعماق میانگین، کمینه و بیشینه و حجم آب دریاچه در شش دوره‌ی داده‌برداری ۸۸
- جدول ۱۳: روند تغییر تراز سطح آب دریاچه، میانگین تغییر مطلق تراز بستر و میزان تغییر حجم بستر در هر دو دوره‌ی متوالی داده‌برداری ۱۰۴
- جدول ۱۴: اطلاعات مربوط به تراز سطح آب و مساحت دریاچه در تصاویر قابل قبول ۱۱۱
- جدول ۱۵: مقایسه‌ی مساحت دریاچه در تصاویر قابل قبول با مساحت حاصل از پژوهش کریمی و همکاران بر حسب کیلومتر مربع ۱۱۵

۱- مقدمه

یکی از اهداف مدیریت به هم پیوسته‌ی منابع آب، برقراری تعادل میان عرضه و تقاضای آب برای دستیابی به بالاترین نفع برای هر یک ذینفعان بخش‌های مختلف کشاورزی، شهری، صنعتی و زیست‌محیطی است. بدیهی است که منفعت مصرف‌کننده‌ها در بهره‌برداری از منابع آبی در بالاترین سطح ممکن است. اما تحت شرایط تنش آبی، این امر می‌تواند در تقابل آشکار با میزان منابع آب در دسترس برای عرضه باشد. به عنوان مثال، افزایش بهره‌برداری از این منابع در صورت ثابت ماندن بخش تغذیه‌کننده‌ی منابع آبی یکی از چندین سناریویی است که می‌تواند با توجه به شدت نرخ بهره‌برداری، در بلندمدت و یا حتی کوتاه‌مدت به وضعیت بحرانی منابع موجود بینجامد. با توجه به این مسئله، حجم آب موجود در مخازنی مانند دریاچه‌ها یکی از اطلاعات مهم در مدیریت این منابع آبی است.

حجم آب ذخیره‌شده در منابع آبی از برقراری تعادل میان ورودی‌ها، شامل بارش و منابع ورودی سطحی و زیرزمینی، و خروجی‌ها، شامل تبخیر و مصارف قابل محاسبه است. پیچیدگی تخمین هر یک از این متغیرها، در کنار عدم قطعیت‌های موجود، ضرورت اندازه‌گیری مستقیم تراز سطح آب و حجم آن را تبیین می‌کند. به عنوان نمونه، از جمله طرح‌های مهم احیای دریاچه‌ی ارومیه، کاهش ۴۰ درصد مصرف آب در بخش کشاورزی است که یکی از راه‌های ارزیابی تأثیرگذاری آن با بررسی تغییر در میزان آب ورودی به دریاچه است؛ اما از آنجا که آخرین ایستگاه‌های هیدرومتری موجود بر رودخانه‌های منتهی به دریاچه همگی دارای فاصله‌ی قابل ملاحظه‌ای از آن هستند، امکان تعیین دقیق میزان آب ورودی به دریاچه از اطلاعات این ایستگاه‌ها وجود ندارد. بنابراین تخمین تغییرات زمانی حجم آب دریاچه به کمک دیگر داده‌های موجود از جمله داده‌های سنجش از دور^۱ می‌تواند در ارزیابی اثربخشی طرح‌های احیای دریاچه مفید واقع شود.

با توجه به ضرورت این مسئله، یکی از اهداف این پژوهش، توسعه‌ی یک مدل پویا برای تخمین مساحت دریاچه به کمک تراز سطح آب و همچنین تخمین حجم آب موجود در دریاچه ارومیه با کمک نقشه‌ی بسیمتری آن است. بسیمتری^۲ علم تعیین توپوگرافی^۳ بستر محیط‌های آبی است [۱] و از کاربردهای آن می‌توان به ترسیم پروفیل‌های بستر، تعیین میزان فرسایش سواحل و حرکت رسوبات، تعیین میزان انحلال و ترسیب

Remote Sensing^۱

Bathymetry^۲

Topography^۳

نمک بستر در آب‌های شور، تعیین حجم آب موجود در مخازن طبیعی و یا مصنوعی و تهیه‌ی نقشه‌های ناوبری^۱ در آب‌های عمیق اشاره نمود [۱]. از سوی دیگر، اطلاعات مربوط به بسیمتری نقش مهمی در برنامه‌ریزی فعالیت‌های نزدیک به سواحل، خصوصاً در دریاچه‌های آزاد دارند. مدیریت بنادر، جایگذاری لوله‌ها در بستر آب، ماهیگیری، برداشت نفت و آبی‌پروری^۲ از جمله‌ی این فعالیت‌ها هستند [۱]. اهمیت شناخت بسیمتری محیط‌های آبی موجب شد تا هدف دوم این پژوهش، یعنی تهیه‌ی نقشه‌ی بسیمتری دریاچه‌ی ارومیه شکل گیرد. کمی‌سازی تغییرات مکانی و زمانی بسیمتری دریاچه از سویی می‌تواند به تخمین حجم آب داخل دریاچه کمک کند و از سویی دیگر برای مطالعاتی چون بررسی ترسیب یا انحلال نمک در دریاچه نیز حائز اهمیت باشد.

۱-۱- هدف پژوهش

اهداف این پژوهش به طور مشخص عبارتند از:

- ۱- به روزرسانی رابطه‌ی میان تراز سطح آب-مساحت-حجم در دریاچه ارومیه و
- ۲- تعیین نقشه‌ی بسیمتری دریاچه در دوره‌های دارای اطلاعات میدانی از رقوم ارتفاعی بستر دریاچه. علی‌رغم اینکه مطالعات مشابه در گذشته توسط سیما و تجربی در سال ۲۰۱۳ [۲] و کریمی و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۳] انجام شده‌اند، در این پژوهش تلاش بر آن بوده با برداشتن یک گام رو به جلو و بکارگیری ابزارهای نوین تر در کنار اطلاعات میدانی، نتایج دقیق‌تری در مقایسه با نتایج مطالعات پیشین بدست آید.

۱-۲- سؤالات پژوهش

سؤالاتی که این پژوهش به دنبال پاسخ برای آنها است عبارتند از:

- ۱- رابطه‌ی تراز سطح آب-مساحت-حجم دریاچه‌ی ارومیه به چه فرمی است؟
- ۲- آیا فرم رابطه‌ی تراز سطح آب-مساحت-حجم دریاچه‌ی ارومیه با زمان متغیر است؟
- ۳- تفاوت روابط به‌دست آمده در این پژوهش با روابط پیشنهادی توسط مطالعات پیشین چیست؟
- ۴- رابطه‌ی عمق آب با میزان انعکاس باندهای تصاویر ماهواره‌ای چگونه است؟

^۱ Navigational Charts

^۲ Aquaculture

به روزرسانی رابطه‌ی تراز آب-مساحت-حجم دریاچه‌ی ارومیه و تهیه‌ی نقشه‌ی بسیمتری آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌های

لندست

۵- نقشه‌ی بسیمتری دریاچه ارومیه در هر یک از دوره‌های داده‌برداری به چه صورت است؟

۲- مروری بر ادبیات فنی

۲-۱- بررسی و مقایسه‌ی روش‌های موجود در تعیین بسیمتری

یکی از روش‌های سنتی برای تعیین بسیمتری، استفاده از کابل و یا طناب‌هایی دارای خطوط راهنما^۱ است که به بدنه‌ی کشتی متصل بوده و در بخش انتهایی خود وزنه‌ای حمل می‌کردند [۱] و [۴]. با رها کردن طناب در هر نقطه از بدنه‌ی منبع آبی و رسیدن وزنه به بستر آب، عمق آب با توجه به خطوط راهنما تعیین می‌شده است [۴]. از معایب این روش، اندازه‌گیری عمق فقط در یک نقطه در هر بار اجرای عملیات است که این محدودیت موجب صرف زمان زیاد برای انجام چندین اندازه‌گیری شده و بنابراین ناکارآمد تلقی می‌شود [۱].

برای غلبه بر یک چنین چالش‌هایی، این روش‌ها به سرعت با تکنیک پژواک صدای آکوستیک^۲ جایگزین شدند [۱]. در این تکنیک از یکی از دو رویکرد پژواک صدای تک‌میله‌ای^۳ یا به اختصار SBES و یا پژواک صدای چندمیله‌ای^۴ یا به اختصار MBES استفاده می‌شود [۱]؛ بدین صورت که مبدل‌ها^۵ به کناره‌ی بدنه‌ی کشتی متصل شده و علاوه بر ارسال امواج صوتی به بستر دریا، امواج منعکس شده را دریافت می‌کنند [۱]. در نهایت، عمق آب با استفاده از مقدار زمانی که امواج صرف می‌کنند تا به بستر رسیده و پس از انعکاس به گیرنده برسند قابل محاسبه است [۱]. رویکرد SBES قادر به ارسال و دریافت امواج تنها از یک نقطه است [۱]. در مقابل، MBES امواج صدا را در تمام جهات ارسال کرده و آن‌ها را از چندین نقطه دریافت می‌کند؛ بنابراین دارای مزیت انجام نقشه‌برداری در محدوده‌ی بزرگ‌تری است [۱]. این روش قادر به تعیین صحیح عمق آب‌های زلال و محیط‌های ساحلی است؛ در مقابل، عملکرد این روش در محیط‌های کدر به دلیل نفوذ امواج به کف اقیانوس نامناسب است [۱].

با گسترش استفاده از داده‌های حاصل از سنجش از دور، روش‌های مبتنی بر این فناوری به منظور تعیین بسیمتری پیکره‌های آبی به تدریج پا به عرصه‌ی ظهور گذاشتند که از میان آن‌ها می‌توان به استفاده از

^۱ Lead Lines

^۲ Acoustic Echo-Sounding Technique

^۳ Single-Beam Echo Sounder

^۴ Multi-Beam Echo Sounder

^۵ Transducers

سنجنده‌های فعال^۱ همانند سونار^۲ و یا LiDAR^۳ در کنار تصاویر چندطیفی حاصل از سنجنده‌های غیرفعال
همانند تصاویر ماهواره‌های IKONOS، WorldView و لندست^۴ اشاره نمود [۱].

تکنیک استفاده از تصاویر LiDAR هوابرد برای تعیین بسیمتری^۵ یا به اختصار ALB نیز خصوصاً برای
تعیین بسیمتری اقیانوس‌ها مورد استفاده می‌گیرد که از میان سیستم‌های مبتنی بر آن می‌توان به SHOLAS^۶،
CHARTS^۷، LADS^۸ و EAARL^۹ اشاره کرد [۱]. این روش می‌تواند به طور کارآمدی عمق آب‌های
کم عمق و عمیق را محاسبه کند؛ اما محدودیت اصلی آن، هزینه‌ی بالای خرید و نگهداری تجهیزاتش است
[۱]. در مقابل، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای استخراج نقشه‌های بسیمتری یکی از مؤثرترین روش‌های
جایگزین برای این هدف است، چرا که هر تصویر آن سطح گسترده‌ای از زمین را تحت پوشش قرار می‌دهد،
نیازمند صرف هزینه‌ی کم‌تری است و عبور ماهواره بر فراز زمین تکرار می‌شود [۱]. از سوی دیگر، استفاده از
تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه و انرژی مورد نیاز برای انجام هر یک از روش‌های جایگزین،
به تهیه‌ی نقشه‌ها در زمان‌های مختلف و در سراسر پهنه‌ی آبی نیز کمک کند [۵]. تصاویر ماهواره‌هایی چون
QuickBird، IKONOS و WorldView دارای وضوح مکانی و طیفی بالایی هستند اما به علت تجاری بودن
نیازمند پرداخت هزینه هستند [۱]. در مقابل، تصاویر ماهواره‌ی لندست به طور رایگان در اختیار عموم هستند
و در این پژوهش نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۲- روش‌های مورد استفاده در تعیین نقشه‌ی بسیمتری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

روش‌های متعددی برای تعیین نقشه‌ی بسیمتری پهنه‌های آبی با کمک تصاویر ماهواره‌ای موجود هستند که از
آن میان می‌توان به روش‌های تجربی استفاده شده توسط استامف^{۱۰} و همکاران در سال ۲۰۰۳ و دو روش

^۱ Active Sensors

^۲ Sonar

^۳ Light Detection and Ranging

^۴ Landsat

^۵ Airborne LiDAR Bathymetry

^۶ Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey

^۷ Hydrographic Airborne Rapid Total Survey

^۸ Laser Airborne Depth Sounder

^۹ Experimental Advanced Airborne Research Lidar

^{۱۰} Stumpf

استفاده‌شده توسط سو^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۸ اشاره کرد [۱]. هم‌چنین روش‌های تحلیلی لایزنگا^۲ در سال‌های ۱۹۷۸ و ۱۹۸۱، لایزنگا در سال ۲۰۰۶ و فیلیپات^۳ در سال ۱۹۸۹ از سایر روش‌های موجود هستند [۱]. برای استفاده از روش‌های تحلیلی، ورودی‌هایی از قبیل مشخصات اتمسفر و مواد سازنده‌ی بستر مورد نیاز هستند که این امر استفاده از این روش‌ها را دشوار می‌کند [۱]. در مقابل، استفاده از روش‌های تجربی که تنها نیازمند چند پارامتر هستند بسیار ساده‌تر بوده که می‌توانند برای استخراج نقشه‌ی بسیمتری مورد استفاده قرار گیرند [۱]. البته شایان ذکر است که دقت نقشه‌ی بسیمتری به دست آمده با کمک تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی می‌بایست تا حد امکان بهبود یابد، چرا که دقت نتایج به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای در عمل نسبت به سایر تکنیک‌ها، همانند SBES، MBES و LiDAR پایین‌تر شمرده می‌شود.

الگوریتم تبدیل نسبت^۴ یکی از روش‌های تعیین بسیمتری با کمک تصاویر ماهواره‌ای است. این روش که با هدف کاهش تعداد متغیرهای مورد استفاده، از دو باند موجود در تصاویر استفاده می‌کند، برای اولین بار در سال ۲۰۰۳ برای تعیین بسیمتری اقیانوس توسط استامف توسعه یافت [۱]. این روش علاوه بر توانایی بالا در تعیین اعماق بیش از ۲۵ متر در محیط‌های ساحلی دارای آب زلال، در تعیین عمق محیط‌های ساحلی دارای آب کدر نیز کارا است [۱]. در این روش، رابطه‌ی ۱ برای تعیین عمق در نواحی آبی نزدیک به ساحل مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$Z = m_1 \left(\frac{\ln(L_{\text{obs}}(\text{Band}_i))}{\ln(L_{\text{obs}}(\text{Band}_j))} \right) - m_0 \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

که در آن L_{obs} تابش^۵ مشاهده‌شده‌ی باندها، m_1 و m_0 ضرایب ثابتی که به صورت تجربی تعیین می‌شوند و i و j باندهای آبی و سبز، و Z عمق آب بر حسب متر است. مزیت استفاده از این رابطه نسبت به سایر روابط در آن است که از پارامترهای اندکی برای محاسبه‌ی عمق استفاده می‌کند.

Su^۱

Lyzenga^۲

Philpot^۳

Ratio Transform Algorithm^۴

Radiance^۵

در سال ۲۰۱۵، جاگالینگام^۱ و همکاران مطالعه‌ای در خصوص تعیین نقشه‌ی بسیمتری ساحل جنوب غربی هندوستان^۲ با کمک تصاویر حاصل از لندست ۸ انجام دادند [۱]. در این پژوهش از اعمال الگوریتم تبدیل نسبت بر روی دو باند آبی و سبز بر روی تصاویر این ماهواره استفاده شد [۱]. در نهایت، شاخص‌های آماری از قبیل ضریب تشخیص^۳ با نماد R^2 ، خطای جذر میانگین مربعات^۴ با نماد RMSE و میانگین خطای مطلق^۵ با نماد MAE میان مقادیر محاسبه‌شده از الگوریتم و مقادیر اندازه‌گیری‌شده به دست آمدند که از وجود همبستگی بالا میان این دو مقدار حکایت می‌کردند [۱].

روش لایزنگا از وابستگی اجزای پخش^۶ داخل آب و انعکاس سطح بستر در تابش کل به عمق آب برای تخمین آن استفاده می‌کند [۶]. این روش از پیکسل‌هایی با مقادیر مشخص عمق به عنوان داده‌های آموزشی^۷ برای توسعه‌ی مدلی استفاده می‌کند که بر اساس مقادیر تابش باندها، عمق آب را تخمین بزند [۶]. این روش حساسیت کمی نسبت به تغییرات در جنس بستر و یا مشخصات آب دارد [۶]؛ با این حال، دارای فرضیات آماری و یا فیزیکی است که در عمل غیرواقعی بوده و بنابراین دقت مدل را کاهش می‌دهند [۶].

در سال ۲۰۱۱ کانو^۸ و همکاران پژوهشی با هدف بسط دادن روش لایزنگا در سال ۲۰۰۶ برای تعیین نقشه‌ی بسیمتری در آب‌های کم‌عمق انجام دادند [۶]. محل‌های مورد مطالعه در این پژوهش دو صخره‌ی مرجانی، یکی نزدیک به ساحل جزیره‌ی ایشیگاکي^۹ در ژاپن^{۱۰} و دیگری نزدیک به ساحل جزیره‌ی تینیان^{۱۱} در ایالات متحده بودند [۶]. محدودیت روش لایزنگا علیرغم محبوبیت آن، دقت ناکافی است [۶]. در این پژوهش، کانو و همکاران برای افزایش دقت، روش لایزنگا به سه صورت، با اصلاح فرضیات غیر واقعی اپتیکی و آماری آن توسعه داده شد [۶]. سپس روش لایزنگا، سه روش اصلاحی و ترکیبشان برای تعیین عمق در

Jagalingam^۱

India^۲

Coefficient of Determination^۳

Root-Mean-Square Error^۴

Mean Absolute Error^۵

Scattering^۶

Training Data^۷

Kanno^۸

Ishigaki^۹

Japan^{۱۰}

Tinian^{۱۱}

محل‌های مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند [۶]. نتایج حاکی از این بودند که در صورت وجود تعداد کافی از مشاهدات، روش‌های اصلاحی دقیق‌تر از روش اصلی هستند و نتیجه‌ی حاصل از اعمال سه اصلاحیه نیز از بالاترین دقت برخوردار است [۶].

در سال ۲۰۱۰ سیحون^۱ و یالچین^۲ مطالعه‌ای بر روی تعیین عمق در آب‌های کم‌عمق با استفاده از تلفیق فناوری سنجش از دور و شبکه‌ی عصبی مصنوعی^۳ در ساحل غربی فوکا^۴ در ترکیه^۵ انجام دادند [۵]. مزیت این روش امکان‌پذیری استفاده از مقادیر انعکاس در تصاویر، بدون نیاز به در نظر گرفتن اثر عوامل محیط زیستی، همانند جنس بستر و گیاهان موجود در آن است [۵]. ساختار این روش به گونه‌ای است که امکان برقراری روابط غیرخطی میان مقادیر باندها در تصاویر چندطیفی را با اعماق اندازه‌گیری‌شده ایجاد می‌کند [۵]. دو مدل با استفاده از تصاویر سه بانده اول تصاویر سنجنده‌ی ASTER^۶ و تصاویر ماهواره‌ی QuickBird توسعه یافتند که مطابق انتظار، نتیجه‌ی حاصل از ماهواره‌ی QuickBird با توجه به وضوح مکانی بالاتر آن بهتر بود [۵]. نتایج نشان داد که این مدل قادر است اعماق را تا مقادیر ۴۰ تا ۴۵ متر با دقت خوبی تخمین بزند.

۲-۳- مطالعات مرتبط با دریاچه‌ی ارومیه برای استخراج نقشه‌ی بسیمتری

در سال ۲۰۱۳، سیما و تجریشی با استفاده از ترازهای سطح آب ارائه شده توسط رادار ارتفاع‌سنج^۷ و مساحت‌های موجود در پایگاه داده‌ی HYDROWEB رابطه‌ی میان تراز سطح آب و مساحت را برای دریاچه‌ی ارومیه به دست آوردند [۲]. در ادامه نیز با کمک انتگرال‌گیری از رابطه‌ی به‌دست‌آمده در مرحله‌ی قبل، رابطه‌ی میان تراز سطح آب و حجم دریاچه را محاسبه نمودند. پس از انجام این مراحل، با استفاده از روابط به‌دست‌آمده در گام قبل، پارامترهای لازم برای بازسازی دو مدل تعیین حجم، یعنی مدل‌های توانی^۸ یا

^۱ Ceyhun

^۲ Yalçin

^۳ Artificial Neural Networks

^۴ Foca

^۵ Turkey

^۶ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

^۷ Altimeter

^۸ Power Model

به اختصار PM و هرم ناقص^۱ یا به اختصار TPM را به دست آورده و نتایج حاصل از آن را با مقادیر حجم به‌دست‌آمده از رابطه‌ی میان تراز سطح آب و حجم مقایسه کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل PM مقادیر مساحت دریاچه را بیش از مقدار واقعی تخمین می‌زند، در حالی که مدل TPM مقادیر را کم‌تر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند [۲]. در نهایت، با استفاده از رابطه‌ی به‌دست‌آمده میان تراز سطح آب و حجم دریاچه، و همچنین با توجه به مقدار تراز سطح آب در زمان انجام پژوهش، نیاز به ورود $13/2$ کیلومتر مکعب آب به دریاچه برای رسیدن به سطح تراز اکولوژیک، یعنی $1274/1$ متر، نتیجه‌گیری شد [۲].

در سال ۲۰۱۶، کریمی و همکاران مطالعه‌ی دیگری به منظور تعیین بسیمتری دریاچه‌ی ارومیه انجام داده و رابطه‌ای میان مقادیر باندهای آبی، سبز، قرمز و فرورسرخ نزدیک^۲ یا به اختصار NIR تصویر ماهواره‌ی لندست ۸ مربوط به ۱۲ آوریل ۲۰۱۳ و اعماق اندازه‌گیری‌شده در نقاطی از دریاچه در همان روز به دست آوردند [۳]. مقایسه‌ی نتایج و اعماق مشاهده‌شده نشان می‌دهد که رابطه‌ی به‌دست‌آمده با داشتن RMSE برابر با $0/27$ سانتی‌متر و R^2 برابر با $0/91$ ، از دقت خوبی برخوردار است [۳]. میانگین^۳ عمق اندازه‌گیری‌شده $4/9$ متر بوده و بیشینه‌ی آن ۱۱ متر است که در بخش شمالی دریاچه اتفاق می‌افتد [۳]. در مرحله‌ی بعد با استفاده از رابطه‌ی به‌دست‌آمده، نقشه‌ی بسیمتری دریاچه را در سپتامبر ۲۰۱۵ به دست آوردند [۳]. تفاوت این دو نقشه نشان داد که طی این دو سال، ۶۴ سانتی‌متر ترسیب نمک روی داده است [۳]. در نهایت، با استفاده از ۷۸ تصویر ماهواره‌ی لندست و سنجنده‌های MODIS^۴ و AVHRR^۵ مساحت دریاچه طی سال‌های ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۴ را به دست آورده و مساحت دریاچه را به صورت رابطه‌ای از درجه‌ی چهار برحسب تراز سطح آب توصیف کردند. سپس با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده در مرحله‌ی قبل، رابطه‌ای برای تعیین حجم آب موجود در دریاچه بر حسب سطح تراز آن توسعه دادند [۳].

^۱ Truncated Parameter Model

^۲ Near-infrared

^۳ Average

^۴ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

^۵ Advanced Very High Resolution Radiometer

۳- داده‌های مورد استفاده

۳-۱- تصاویر ماهواره لندست

انجام این پژوهش عمدتاً مبتنی بر فناوری سنجش از دور است، بدین معنی که مساحت دریاچه و هم‌چنین مقادیر انعکاس باندها با کمک تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده‌اند. تصاویر مورد استفاده در این پژوهش، از ماهواره‌های موجود در پروژه‌ی لندست بوده و همگی مربوط به سطح ۲ محصولات این ماهواره‌ها هستند که تصحیحات اتمسفری^۱ بر روی آن‌ها اعمال شده و اعداد موجود در هر پیکسل نمایانگر انعکاس آن هستند. پروژه‌ی لندست طولانی‌ترین پروژه‌ی در حال اجرا با هدف تصویربرداری از سطح زمین است [۷] و تا به حال هشت ماهواره تحت این پروژه به فضا پرتاب شده‌اند. در جدول ۱، تاریخ‌های شروع و پایان فعالیت هر یک از ماهواره‌های لندست آورده شده است [۷]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اولین ماهواره از این سری در ۲۳ ژوئیه^۲ ۱۹۷۲ به فضا پرتاب شد و آخرین ماهواره از این سری که لندست ۸ نام دارد در ۱۱ فوریه^۳ ۲۰۱۳ آغاز به کار کرد. در این میان نکته‌ی قابل توجه زمان شروع و پایان برابر لندست ۶ است که به دلیل شکست این ماهواره در قرارگیری در مدار رخ داده است [۷].

جدول ۱: تاریخ شروع و پایان فعالیت هر یک از ماهواره‌های لندست

نام ماهواره	تاریخ پرتاب به فضا	تاریخ پایان عملیات
لندست ۱	۲۳ ژوئیه ۱۹۷۲	۶ ژانویه ^۴ ۱۳۷۸
لندست ۲	۲۲ ژانویه ۱۹۷۵	۲۵ فوریه ۱۹۸۲
لندست ۳	۵ مارس ۱۹۷۸ ^۵	۳۱ مارس ۱۹۸۳
لندست ۴	۱۶ ژوئیه ۱۹۸۲	۱۴ دسامبر ^۶ ۱۹۹۳

^۱ Atmospheric Correction

^۲ July

^۳ February

^۴ January

^۵ March

^۶ December

نام ماهواره	تاریخ پرتاب به فضا	تاریخ پایان عملیات
لندست ۵	۱ مارس ۱۹۸۴	۵ ژوئن ۲۰۱۳ ^۱
لندست ۶	۵ اکتبر ۱۹۹۳ ^۲	۱۵ اکتبر ۱۹۹۳
لندست ۷	۱۵ آوریل ۱۹۹۹ ^۳	در حال فعالیت
لندست ۸	۱۱ فوریه ۲۰۱۳	در حال فعالیت

در این پژوهش نقشه‌ی بسیمتری دریاچه‌ی ارومیه با استفاده از تصاویر آخرین ماهواره‌ی لندست، یعنی لندست ۸ به دست آمده و مساحت دریاچه نیز از آگوست ۱۹۸۴ (برابر با مرداد ۱۳۶۳ شمسی) تا سپتامبر ۲۰۱۱ (معادل مرداد ۱۳۹۰) با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست ۴-۵ و از آوریل ۲۰۱۳ (تیر ۱۳۹۲) تا فوریه ۲۰۱۹ (اسفند ۱۳۹۷) با استفاده از تصاویر لندست ۸ استخراج شده‌اند. علت عدم استفاده از تصاویر لندست ۷، وجود خرابی در سخت افزار مربوط به اصلاح خطوط اسکن شده^۴ یا به اختصار SLC از ماه مه^۵ سال ۲۰۰۳ است که در نتیجه‌ی آن، خطوطی در تصویر فاقد داده هستند و تصویر حالتی زیگزاگ مانند پیدا می‌کند [۸]. شکل ۱، نمونه‌ای از تصاویر ماهواره‌ی لندست ۷ مقارن با تاریخ ۱۲ شهریور ۱۳۸۹ (۳ سپتامبر ۲۰۱۰) را برای محدوده‌ی دریاچه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱ (ب) مشاهده می‌شود، در بخش‌هایی از تصویر پیکسل‌ها فاقد داده هستند. البته الگوریتم‌هایی برای پر کردن نقاط فاقد داده^۶ توسعه یافته، اما با توجه به وجود داده‌های ماهواره‌ی لندست ۴-۵ در مدت مشابه، بهتر است تصاویر این ماهواره‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

June^۱

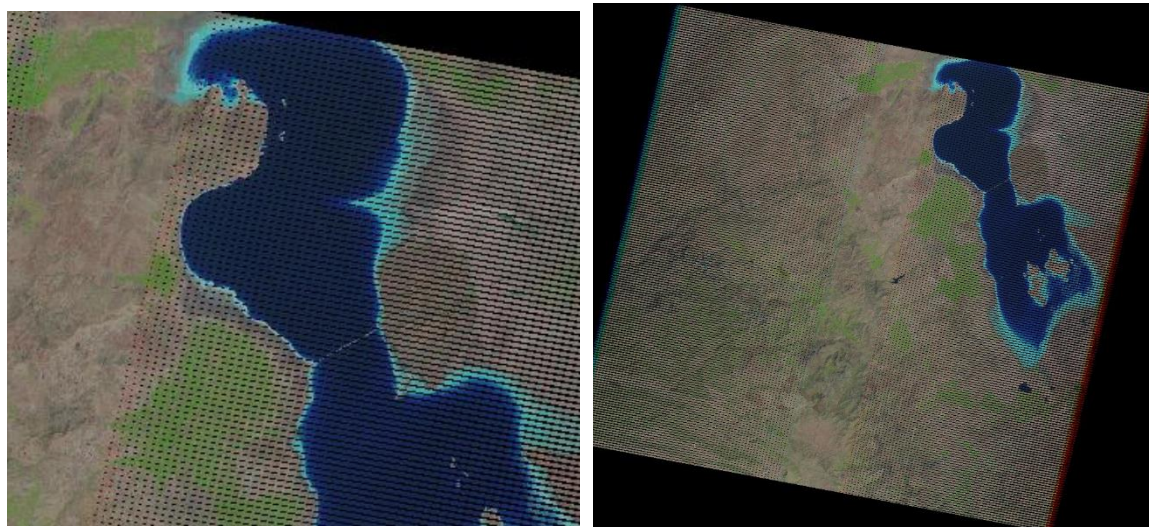
October^۲

April^۳

Scan Line Corrector^۴

May^۵

Gap-Filling^۶



(ب)

(الف)

شکل ۱: نمونه‌ای از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ در تاریخ ۱۲ شهریور ۱۳۸۹ (۳ سپتامبر ۲۰۱۰)

جدول ۲، مشخصات باندهای موجود در تصاویر ماهواره‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد [۹]. سنجنده‌ی موجود در لندست ۴-۵، نقشه‌بردار موضوعی^۱ یا به اختصار TM بوده و سنجنده‌های مورد استفاده در ماهواره‌ی لندست ۸، سنجنده‌های تصویربردار عملیاتی زمین^۲ یا به اختصار OLI و اسکنر حرارتی فروسرخ^۳ یا به اختصار TIRS هستند [۹]. تصاویر مورد نیاز در این پژوهش قابل دریافت از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده^۴ یا به اختصار USGS، به آدرس <https://earthexplorer.usgs.gov> هستند.

جدول ۲: مشخصات باندهای موجود در تصاویر ماهواره‌های لندست مورد استفاده در این پژوهش

ماهواره	شماره‌ی باند	نام باند	طول موج (میکرومتر)	سایز معادل پیکسل (متر)
لندست ۴-۵	۱	Blue	۰/۴۵-۰/۵۲	۳۰
	۲	Green	۰/۵۲-۰/۶۰	۳۰
	۳	Red	۰/۶۳-۰/۶۹	۳۰
	۴	NIR	۰/۷۶-۰/۹۰	۳۰
	۵	Shortwave Infrared (SWIR) 1	۱/۵۵-۱/۷۵	۳۰

^۱ Thematic Mapper

^۲ Operational Land Imager

^۳ Thermal Infra-Red Scanner

^۴ United States Geological Survey

ماهواره	شماره‌ی باند	نام باند	طول موج (میکرومتر)	سایز معادل پیکسل (متر)
لندست ۸	۶	Thermal	۱۰/۴۰-۱۲/۵۰	۱۲۰
	۷	Shortwave Infrared (SWIR) 2	۲/۰۸-۲/۳۵	۳۰
	۱	Ultra Blue (coastal/aerosol)	۰/۴۳۵-۰/۴۵۱	۳۰
	۲	Blue	۰/۴۵۲-۰/۵۱۲	۳۰
	۳	Green	۰/۵۳۳-۰/۵۹۰	۳۰
	۴	Red	۰/۶۳۶-۰/۶۷۳	۳۰
	۵	NIR	۰/۸۵۱-۰/۸۷۹	۳۰
	۶	Shortwave Infrared (SWIR) 1	۱/۵۶۶-۱/۶۵۱	۳۰
	۷	Shortwave Infrared (SWIR) 2	۲/۱۰۷-۲/۲۹۴	۳۰
	۸	Panchromatic	۰/۵۰۳-۰/۶۷۶	۱۵
	۹	Cirrus	۱/۳۶۳-۱/۳۸۴	۳۰
۱۰	Thermal Infrared (TIRS) 1	۱۰/۶۰-۱۱/۱۹	۱۰۰	
۱۱	Thermal Infrared (TIRS) 2	۱۱/۵۰-۱۲/۵۱	۱۰۰	

۳-۲- نقاط عمق‌سنجی شده

برای دستیابی به هدف تولید نقشه‌های بسیمتری دریاچه‌ی ارومیه در دوره‌های داده‌برداری، نیاز است تا برای فراهم آوردن داده‌های آموزشی^۱، عمق تعدادی نقطه در هر یک از این دوره‌ها معلوم باشد که این امر با انجام عملیات عمق‌سنجی محقق می‌شود. عملیات عمق‌سنجی در شش مرحله از پاییز ۱۳۹۶ تا فروردین ۱۳۹۸ انجام گرفته است که مشخصات دقیق‌تر این شش سری عملیات در جدول ۳ قابل مشاهده است. تمامی اطلاعات مربوط به این داده‌برداری‌ها از ستاد احیای دریاچه‌ی ارومیه دریافت شده‌اند. لازم به ذکر است که اطلاعات اخذ شده در مراحل اول تا پنجم، در واقع تراز کف در هر نقطه هستند و با توجه به نبود داده‌ی مستقیم عمق آب در این مراحل، لازم است مقدار عمق آب در هر نقطه محاسبه گردد.

جدول ۳: جزئیات عملیات‌های عمق‌سنجی دریاچه‌ی ارومیه

دوره‌ی برداشت	محدوده‌ی اجرای پروژه	تاریخ داده برداری
اول	۱۲ خط اطراف پل میان‌گذر با طول ۱۰ کیلومتر و فاصله‌ی ۵۰۰ متری	مهر ۱۳۹۶
دوم	۱۲ خط اطراف پل میان‌گذر با طول ۱۰ کیلومتر و فاصله‌ی ۵۰۰ متری	اواخر اسفند ۱۳۹۶ و فروردین ۱۳۹۷
سوم	۱۲ خط در محدوده‌ی کل دریاچه با فواصل و طول‌های متفاوت	۱۶ تیر الی ۱۸ شهریور ۱۳۹۷
چهارم	۱۲ خط اطراف پل میان‌گذر با طول ۱۰ کیلومتر و فاصله‌ی ۵۰۰ متری	پاییز ۱۳۹۷
پنجم	۲۴ خط در محدوده‌ی کل دریاچه با فواصل و طول‌های متفاوت	۵ الی ۲۵ اسفند ۱۳۹۷
ششم	نقاط پراکنده در سراسر دریاچه	۱۹ الی ۲۴ فروردین ۱۳۹۸

مرحله‌ی اول پروژه توسط شرکت مهندسی مشاور مبنای مهکشند به منظور عمق‌سنجی، نقشه‌برداری و تهیه پروفایل بستر دریاچه ارومیه با انجام اندازه‌گیری در ۱۲ خط عرضی موازی با پل میان‌گذر، ۶ خط در سمت شمال و ۶ خط در سمت جنوب آن، در مهر سال ۱۳۹۶ انجام شده است. عمق‌سنجی‌ها به صورت رفت و برگشتی انجام گرفته‌اند، لذا ۲۴ خط اندازه‌گیری در شمال و جنوب دریاچه ثبت شده که مجموعاً شامل ۶۶۵۲ نقطه هستند. مراحل دوم تا پنجم پروژه توسط مهندسی مشاور تیوکاوان اطلس انجام گرفته‌اند که به ترتیب ۶۶۳۰ نقطه در اسفند ۱۳۹۶ و فروردین ۱۳۹۷، ۳۳۶۱ نقطه در تابستان ۱۳۹۷، ۲۵۲۷ نقطه در پاییز ۱۳۹۷ و ۹۱۷۸ نقطه در اسفند ۱۳۹۷ داده‌برداری شده‌اند. داده‌های سری ششم نیز توسط سازمان زمین‌شناسی کشور در فروردین ۱۳۹۸ برداشت شدند. نکته‌ی قابل توجه در مورد داده‌های سری اول تا پنجم این است که لزوماً در داخل بدنه‌ی آبی دریاچه واقع نشده‌اند و بنابراین لازم است پیش از به‌کارگیری‌شان در تولید نقشه‌های بسیمتری، مورد بررسی قرار گیرند تا از قرارگیری‌شان در درون بدنه‌ی آبی اطمینان حاصل گردد.

۳-۳- تراز سطح آب دریاچه

به روزرسانی رابطه‌ی تراز آب-مساحت-حجم دریاچه‌ی ارومیه و تهیه‌ی نقشه‌ی بسیمتری آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌های
لندست

داده‌های تراز سطح آب دریاچه که در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ترازهای قرائت شده در ایستگاه
تگلمانخانه (به مختصات $37^{\circ} 36' 00.9''$ شمالی و $45^{\circ} 15' 25.9''$ شرقی)، واقع در غرب دریاچه و در نیمه‌ی
جنوبی آن است. این داده‌ها از ستاد احیای دریاچه‌ی ارومیه و برای محدوده‌ی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۸ دریافت
شده‌اند.



شکل ۲: موقعیت ایستگاه تبخیرسنجی گلمانخانه در مجاورت دریاچه‌ی ارومیه

۴- روش‌شناسی

۴-۱- تعیین مساحت و محدوده‌ی دریاچه

همان‌طور که در فصل‌های قبل اشاره گردید، هدف از انجام این پژوهش، به‌روزرسانی روابط میان تراز-مساحت-حجم دریاچه و تهیه‌ی نقشه‌ی بسیمتری آن است. هدف اول به‌طور مستقیم و هدف دوم به‌طور غیرمستقیم نیازمند تعیین حدود دریاچه و مساحت آن است. تعیین دقیق محدوده‌ی دریاچه از دو جهت برای تعیین نقشه‌ی بسیمتری حائز اهمیت است. اول اینکه تمامی نقاط ارائه شده در نتایج عمق‌سنجی در داخل محدوده‌ی آبی نیستند و بعضاً در خشکی واقع شده‌اند (به شکل ۲۰ رجوع شود). با توجه به این مسئله لازم است نقاط داخل بدنه‌ی آبی و نقاط قرار گرفته در خشکی از یکدیگر تمیز داده شوند تا روابط تنها بر اساس نقاط اندازه‌گیری شده‌ای که در داخل بدنه‌ی آبی واقع شده‌اند، توسعه داده شوند. از سوی دیگر، در نهایت لازم است برای تولید نقشه‌های بسیمتری، مقادیر عمق تنها در محدوده‌ی دریاچه، و نه خارج از آن به دست آیند و نقشه‌های عمق و بسیمتری تنها برای پیکسل‌های دارای آب تولید شوند. با توجه به اهمیت این بخش، در ادامه روش‌های مورد استفاده در این پژوهش برای تعیین محدوده‌ی دریاچه آورده شده‌اند.

با توجه به اینکه در برخی از زمان‌ها در اطراف دریاچه عوارضی دیده می‌شود (از جمله کانال‌های طبیعی و یا مصنوعی اطراف آن) که جزئی از بدنه‌ی آبی شناسایی می‌شوند. برای جدا کردن دریاچه از این عوارض تا حد ممکن، در بخش تعیین مساحت برای به‌روزرسانی روابط میان تراز-مساحت دریاچه، فیلتری روی تصاویر به‌دست آمده اعمال شد. فیلتر مورد استفاده در این پژوهش، ماتریس کانولوشن^۱ از نوع محو‌جعبه‌ای نرمال شده^۲ مطابق رابطه‌ی ۲ است که ابعاد آن با آزمودن چند مقدار به صورت 11×11 انتخاب شد.

$$\text{Convolution Filter} = \frac{1}{121} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{bmatrix}_{11 \times 11} \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

پس از استخراج پیکسل‌های معرف دریاچه، مساحت دریاچه در هر یک از تصاویر استخراج شده با توجه به سائز معادل پیکسل‌ها، یعنی ۳۰ متر (بر اساس جدول ۲)، محاسبه می‌شوند.

^۱ Covolution Matrix

^۲ Normalized Box Blur

۴-۱-۱- استخراج محدوده دریاچه به کمک شاخص NDWI

در این پژوهش ابتدا از شاخص NDWI برای تفکیک بدنه‌ی دریاچه از سایر عارضه‌های موجود در تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد؛ اما به علت رضایت‌بخش نبودن مرزهای آبی شناسایی‌شده در نتایج حاصل از این روش، در نهایت الگوریتم k-means که در ادامه شرح داده شده، مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال در این قسمت از گزارش، اساس مفهومی و مراحل لازم به منظور استخراج دریاچه از تصویر با کمک شاخص NDWI توضیح داده می‌شود.

یکی از روش‌های شناسایی پدیده‌های طبیعی در تصاویر ماهواره‌ای، استفاده از شاخص‌های تعریف‌شده بر اساس مقادیر انعکاس باندها است. یکی از انواع شاخص‌های متداول در شناسایی پدیده‌های طبیعی، شاخص‌های تفاضل نرمال‌شده^۱ هستند. شاخص‌های نرمال‌شده که برای شناسایی هر پدیده به صورت خاص تعریف می‌شوند، اعدادی بین ۱- و ۱ هستند که به صورت نسبت تفاضل مقدار انعکاس دو باند مشخص به مجموع مقدار انعکاس همان دو باند در مخرج محاسبه می‌گردند. دو باند مورد استفاده در محاسبه‌ی شاخص بر اساس حساسیت مقادیر باندها نسبت به آن پدیده‌ی خاص انتخاب می‌شوند. از انواع شاخص‌های نرمال‌شده می‌توان به شاخص تفاضل نرمال‌شده‌ی پوشش گیاهی^۲ یا به اختصار NDVI، شاخص تفاضل نرمال‌شده‌ی آب^۳ یا به اختصار NDWI و شاخص تفاضل نرمال‌شده‌ی برف^۴ یا به اختصار NDSI اشاره نمود.

شاخص NDWI که در سال ۱۹۹۶ توسط مک‌فیترز^۵ معرفی شد، شاخص نرمال‌شده‌ی شناسایی آب است [۱۰]. دو باند مورد استفاده در محاسبه‌ی این شاخص، باندهای سبز و NIR هستند. استفاده از این دو باند در محاسبه‌ی این شاخص موجب می‌شود که از ویژگی‌های خاص آب نسبت به سایر پدیده‌ها، یعنی بالا بودن انعکاس آب در باند سبز، پایین بودن انعکاس آن در باند NIR و همین‌طور بالا بودن انعکاس عوارض زمینی پوشش گیاهی و خاک در باند NIR استفاده شود [۱۰]. رابطه‌ی^۳، نحوه‌ی محاسبه‌ی این شاخص برای هر پیکسل را نشان می‌دهد که در آن Green و NIR به ترتیب مقدار انعکاس پیکسل مورد بررسی در باندهای سبز و NIR هستند [۱۰].

^۱ Normalized Difference Indices

^۲ Normalized Difference Vegetation Index

^۳ Normalized Difference Water Index

^۴ Normalized Difference Snow Index

^۵ McFeeters

$$\text{NDWI} = \frac{\text{Green} - \text{NIR}}{\text{Green} + \text{NIR}} \quad \text{رابطه‌ی ۳}$$

یکی از گام‌های مهم در تشخیص عوارض با کمک شاخص‌ها، تعیین حد آستانه‌ای است که مرز عارضه مورد نظر با سایر پدیده‌های موجود در طبیعت را مشخص کند. شاخص NDWI نیز عموماً با حد آستانه‌ی صفر و یا نزدیک به آن، به منظور تفکیک محیط آبی از غیرآبی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۱-۲- استخراج محدوده‌ی دریاچه با استفاده از روش k-means

k-means یکی از روش‌های متداول انجام خوشه‌بندی نظارت‌نشده^۱ است که توسط چندین دانشمند به شیوه‌ها و با فرضیات متفاوتی پیشنهاد شده است [۱۱]. ورودی‌های این روش مانند سایر خوشه‌بندی‌های نظارت‌نشده، مجموعه‌ی X شامل N بردار X_i با مختصات مشخص است و هدف، قرار دادن هر یک از X_i ‌ها در یکی از k خوشه است. پیش از انجام خوشه‌بندی تنها تعداد خوشه‌ها مشخص هستند و خصوصیات هر یک از آن‌ها کاملاً نامعلوم است. در این مسئله داده‌ها را می‌توان بر اساس رابطه‌ی ۴ به صورت زیر نوشت:

$$X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_N\} \quad \text{رابطه‌ی ۴}$$

که در آن هر یک از بردارهای x_i ، نقطه‌ای دارای M مختصه است. این روش در ابتدا k نقطه‌ی دلخواه، به نام c_j هر یک با M مختصه، نظیر نقاط مجموعه‌ی X را به عنوان مرکز خوشه‌ها^۲ انتخاب می‌کند. در مرحله‌ی بعد فاصله‌ی اقلیدسی هر یک از N نقطه را نسبت به مرکز هر یک از خوشه‌ها محاسبه کرده و هر نقطه را به خوشه‌ای با کم‌ترین فاصله تخصیص می‌دهد. رابطه‌ی ۵، نحوه‌ی محاسبه‌ی طول اقلیدسی را نشان می‌دهد:

$$\text{Euclidean Distance} = \sqrt{(x_{i,1} - c_{j,1})^2 + (x_{i,2} - c_{j,2})^2 + \dots + (x_{i,M} - c_{j,M})^2} \quad \text{رابطه‌ی ۵}$$

که در آن x_{ik} مختصه‌ی k ام x_i است و c_{jk} مختصه‌ی k ام c_j است که مرکز خوشه‌ی j ام می‌باشد.

پس از اتمام خوشه‌بندی تمام نقاط، مجدداً مرکز هر خوشه محاسبه شده و واریانس^۳ نقاط داخل هر خوشه با توجه به مرکز خوشه‌ها تعیین می‌شود. این روند تا جایی تکرار می‌شود که مرکز خوشه‌ها پس از تعیین مجدد، دارای تفاوت اندکی با مرحله‌ی قبل باشد.

^۱ Unsupervised Clustering

^۲ Cluster Centroids

^۳ Variance

بر اساس مقایسه‌ی نتایج حاصله با تصاویر با رنگ واقعی^۱ و یا RGB در این پروژه، سه کلاس قادر است به خوبی بدنه‌ی آبی را از سایر سطوح تفکیک کند. خصوصیات موجود برای هر نقطه NDVI، NDWI، سپیدایی^۲ و باندهای NIR و SWIR1 این سنجنده هستند. در این پژوهش NDWI مطابق رابطه‌ی ۳ محاسبه شده است. برای محاسبه‌ی NDVI نیز مطابق تعریف آن از رابطه‌ی ۶ استفاده می‌گردد [۱۲].

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}} \quad \text{رابطه‌ی ۶}$$

برای محاسبه‌ی سپیدایی از رابطه‌ی به دست آمده توسط دا سیلوا^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۶ استفاده شده است که مطابق رابطه‌ی ۷، سپیدایی بالای اتمسفر^۴ را به صورت ترکیبی از مقادیر انعکاس باندها با ضرایب استفاده شده در رابطه‌ی زیر محاسبه می‌کند [۱۳]:

$$\alpha_{\text{toa}} = 0.3\text{Blue} + 0.277\text{Green} + 0.233\text{Red} + 0.143\text{NIR} + 0.036\text{SW1} + 0.012\text{SW2} \quad \text{رابطه‌ی ۷}$$

که در آن α_{toa} سپیدایی بالای اتمسفر است و سایر موارد، هر یک مقادیر انعکاس سطحی^۵ در باند متناظر بر اساس جدول ۲ هستند. سپس با کمک رابطه‌ی ۸ آن را به سپیدایی سطح^۶ تبدیل می‌کند:

$$\alpha = \frac{\alpha_{\text{toa}} - \alpha_{\text{atm}}}{\tau_{\text{oc}}^2} \quad \text{رابطه‌ی ۸}$$

که در آن α و α_{atm} به ترتیب سپیدایی سطح^۷ و اتمسفر^۸ بوده و τ_{oc} انتقال اتمسفری^۹ در محدوده‌ی تابش خورشید است. α_{atm} به طور معمول بین مقادیر ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴۰ قرار می‌گیرد و در پژوهش مورد اشاره از مقدار ۰/۰۳۰ برای آن استفاده شد [۱۳]. τ_{oc} نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_{\text{oc}} = 0.35 + 0.627 \exp \left[-\frac{0.00146P_0}{K_t \cos Z} - 0.075 \left(\frac{W}{\cos Z} \right)^{0.4} \right] \quad \text{رابطه‌ی ۹}$$

True Color^۱

Albedo^۲

da Silva^۳

Top of Atmosphere^۴

Surface Reflectance^۵

Surface Albedo^۶

Surface Albedo^۷

Atmospheric Albedo^۸

Atmospheric Transmittance^۹

که در آن P_0 فشار اتمسفری محلی بر حسب کیلوپاسکال، K_t ضریب کدورت هوا، Z زاویه‌ی سمت‌الرأس و W آب قابل بارش بر حسب میلی‌متر هستند. مقدار K_t برای هوای صاف ۱/۰ و برای هوای بسیار کدر و یا آلوده ۰/۵ است که در این پژوهش، مقدار ۱/۰ مورد استفاده قرار گرفت. W نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W = 1.14e_a P_0 + 2.1 \quad \text{رابطه‌ی ۱۰}$$

که در آن e_a فشار جزئی^۱ بخار آب اتمسفری بر حسب کیلوپاسکال است. فشار جزئی در این پژوهش با توجه به رابطه‌ی ۱۱ محاسبه شده است:

$$e_a = \frac{H_r}{100} \times P_{sat} \quad \text{رابطه‌ی ۱۱}$$

در این رابطه، H_r و P_{sat} به ترتیب رطوبت نسبی^۲ و فشار اشباع هوا هستند.

P_{sat} نیز مطابق، بر اساس گوف-گراچ^۳ [۱۴]، بر حسب دمای هوا در واحد کلوین^۴ محاسبه می‌گردد.

$$\begin{aligned} \text{Log}_{10}(P_{sat}) = & -7.90298 \left(\frac{373.16}{T-1} \right) + 5.02808 \text{Log}_{10} \left(\frac{373.16}{T} \right) \\ & - 1.3816 \times 10^{-7} \left(10^{11.344 \left(\frac{1-T}{373.16} \right)} - 1 \right) + 8.1328 \times 10^{-3} \left(10^{-3.49149 \left(\frac{373.16}{T-1} \right)} - 1 \right) + \\ & \text{Log}_{10}(1013.246) \end{aligned} \quad \text{رابطه‌ی ۱۲}$$

^۱ Partial Pressure

^۲ Relative Humidity

^۳ Goff-Gratch Equation

^۴ Kelvin

۴-۲- تعیین بسیمتری دریاچه

در این پژوهش، ابتدا تصاویر ثبت شده توسط ماهواره‌ی لندست ۸ برای هر یک از دوره‌های زمانی متناظر با عملیات میدانی انجام شده، مطابق با جدول ۳، دریافت گردید و سپس بدنه‌ی آبی اصلی دریاچه در هر تصویر، برای افزایش دقت، با کمک طبقه‌بندی^۱ به روش ماشین بردار پشتیبان^۲ یا به اختصار SVM شناسایی شد. لازم به ذکر است که در برخی موارد به علت ابری بودن تصاویر داخل محدوده‌ی زمانی، تصاویر موجود در بازه‌های پیش و یا پس از انجام نمونه‌برداری نیز در صورت نبود تغییر قابل ملاحظه در تراز سطح آب دریاچه مورد ارزیابی قرار گرفتند. در مرحله‌ی بعد، با توجه به مختصات نقاط اندازه‌گیری شده در هر مرحله، نقاط قرار گرفته در داخل بدنه‌ی آبی از سایر داده‌ها تفکیک شده و لذا نقاط خارج از بدنه‌ی آبی (یعنی نقاطی که روی قسمت خشک دریاچه برداشت شده‌اند) از حیطه‌ی بررسی خارج شدند. در مرحله‌ی بعد با استفاده از سه روش برازش خطی چند متغیره^۳ یا به اختصار MLR، شبکه‌ی عصبی مصنوعی یا به اختصار ANN و درخت برازش با دسته‌بندی^۴ یا به اختصار BRT رابطه‌ی میان عمق آب در هر پیکسل متناظر با هر یک از نقاط داخل بدنه و مقادیر انعکاس باندهای یک تا هفت ماهواره‌ی لندست ۸ در همان پیکسل و تعدادی از شاخص‌های مرتبط با مطالعات آب به دست آمد. سپس از این رابطه برای تخمین تغییرات مکانی عمق آب در سطح دریاچه استفاده گردید و در نهایت، با در دست داشتن رابطه‌ی بدست آمده بین عمق آب و متغیرهای مورد بررسی می‌توان نقشه تراز کف دریاچه را برای سایر پیکسل‌های تصویر به دست آورد. در ادامه، هر یک از روش‌های مورد استفاده در این پژوهش توضیح داده شده‌اند.

۴-۲-۱- استخراج محدوده‌ی دریاچه با استفاده از روش SVM

ماشین بردار پشتیبان^۵ یا به اختصار SVM یک الگوریتم یادگیری ماشین با نظارت است که می‌تواند برای هر دو هدف طبقه‌بندی و برازش به کار رود؛ البته لازم به ذکر است که SVMها بیش تر در حل مسائل طبقه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اساس روش SVMها، یافتن هایپرپلینی^۶ است که به بهترین شکل مجموعه‌ی

^۱ Classification

^۲ Support Vector Machine

^۳ Multiple Linear Regression

^۴ Bagged Regression Trees

^۵ Support Vector Machine

^۶ Hyperplane

داده‌ها را طبقه‌بندی کند. بردارهای پشتیبان^۱ که همان داده‌های نزدیک به هایپرپلین هستند، نقاطی از مجموعه‌ی داده‌ها هستند که در صورت حذف، موقعیت هایپرپلین تقسیم‌کننده را تغییر می‌دهند. به همین دلیل، می‌توان آن‌ها را عناصر مهم مجموعه‌ی داده‌ها دانست.

در صورتی که طبقه‌بندی تنها بر اساس دو ویژگی انجام گیرد، هایپرپلین خطی است که مجموعه‌ی داده‌ها را از هم جدا می‌کند. با داشتن سه ویژگی، هایپرپلین هایپرپلان دیگر نمی‌تواند یک خط باشد و به یک صفحه تبدیل خواهد شد. هر چه فاصله‌ی بیش‌تری میان داده‌ها و هایپرپلین وجود داشته باشد، اطمینان بیش‌تری نسبت به صحت طبقه‌بندی وجود دارد. پس از افزودن داده‌های آزمایشی جدید، بر اساس محدوده‌ی قرارگیری هر یک نسبت به هایپرپلین، در مورد کلاسی که به آن اختصاص دارند، تصمیم گرفته می‌شود. فاصله‌ی میان هایپرپلین و نزدیک‌ترین نقطه‌ی داده‌های هر کلاس به عنوان حاشیه^۲ شناخته می‌شود. از میان بی‌نهایت امکان موجود، هایپرپلینی انتخاب می‌شود که بیش‌ترین حاشیه‌ی ممکن با هر یک از داده‌های آموزشی را داشته باشد. این روش از دقت بالایی برخوردار است و قادر است برای مجموعه داده‌های فاقد داده‌ی پرت به خوبی کار کند. علاوه بر آن، استفاده از زیرمجموعه‌ای از داده‌های آموزشی کارایی آن را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، استفاده از این روش برای مجموعه داده‌های بزرگ‌تر مناسب نیست، چرا که زمان مورد نیاز برای آموزش با این روش می‌تواند بالا باشد. علاوه بر آن، کارایی آن در مجموعه داده‌های با نویز^۳ بالا و یا با کلاس‌های دارای همپوشانی از کارایی کم‌تری برخوردار است.

۴-۲-۲- حذف داده‌های پرت با استفاده از فاصله‌ی ماهالانویس

تشخیص داده‌های پرت^۴ در محاسبات و تجزیه و تحلیل‌های داده‌ها، امری مهم محسوب می‌شود. مقادیر پرت ممکن است بر اثر خطای اندازه‌گیری یا موارد خاص دیگری به وجود آمده باشند و نمی‌توانند گویای رفتار واقعی و دائمی پدیده‌ی تصادفی مورد بررسی باشند.

نقطه‌ی پرت، نقطه‌ای است که از مقادیر مربوط به یک توزیع خاص دور باشد؛ بنابراین، برای تشخیص نقاط پرت، احتیاج به اندازه‌گیری فاصله‌ی نقاط از یک توزیع وجود دارد. به طور سنتی، برای اندازه‌گیری

^۱ Support Vectors

^۲ Margin

^۳ Noise

^۴ Outliers

فاصله میان نقاط از فاصله اقلیدسی (رابطه‌ی ۵) استفاده می‌شود که در واقع، طول کوتاه‌ترین خط مستقیم بین دو نقطه است. دو مشکلی اساسی هنگام استفاده از فاصله‌ی اقلیدسی وجود دارد. مشکل اول در صورت وجود رابطه یا همبستگی بین محورها ایجاد می‌شود. در حالت دو بُعدی، اگر مقادیرهای مربوط به محور افقی و عمودی با یکدیگر ارتباط یا همبستگی داشته باشند، فاصله اقلیدسی بزرگتر از حالتی است که مستقل باشند. به این ترتیب به نظر می‌رسد که فاصله اقلیدسی وزن بیشتری به مشاهدات مرتبط با هم می‌دهد. مشکل اساسی دوم استفاده از فاصله اقلیدسی، در هنگام محاسبه‌ی میانگین و انحراف از معیار داده‌ها خود را نشان می‌دهد. اگر مجموعه‌ی داده‌ی مورد بررسی شامل نقاط پرت باشد، میانگین و انحراف از معیار تحت تأثیر قرار می‌گیرند؛ این در حالی است که داده‌های پرت واقعاً متعلق به توزیع اصلی داده‌ها نیستند.

در این پژوهش نیز، پیش از توسعه‌ی مدل تعیین عمق، نقاط بررسی شده در هر دوره باید مورد بررسی قرار گرفته و داده‌های پرت از میانشان حذف گردند. با توجه به این چالش‌های موجود در فاصله‌ی اقلیدسی، مفهومی به نام فاصله‌ی ماهالانویس^۱ مطابق با رابطه‌ی ۱۳، جایگزین مناسبی برای آن است. این مفهوم که در سال ۱۹۳۶ توسط فردی به همین نام ابداع شد، روشی برای تعیین داده‌های پرت چندمتغیره^۲ است که برای تعیین پرت بودن و یا نبودن هر نقطه‌ی دلخواه P ، فاصله‌ی آن را بر اساس تعداد انحراف از معیار^۳ها از توزیع داده‌ها یا D حساب می‌کند [۱۵]. در واقع، بر این اساس داده‌ها حالتی استاندارد پیدا می‌کنند و لذا برای داده‌هایی با واحدهای مختلف و یا دارای همبستگی قابل استفاده است.

$$D_{\text{Mahalanobis}}(x_i, \omega_j) = (x_i - \mu_{\omega_j})^T C_{\omega_j}^{-1} (x_i - \mu_{\omega_j}) \quad \text{رابطه‌ی ۱۳}$$

که در آن، x_i نقطه‌ی مورد بررسی، ω_j توزیعی که قرار است فاصله‌ی نقطه با آن سنجیده شود، μ_{ω_j} میانگین آن توزیع و C_{ω_j} ماتریس کوواریانس^۴ است.

در این پژوهش داده‌هایی پرت تشخیص داده می‌شوند که در آزمون Chi-Square با درجات آزادی به تعداد متغیرهای مستقل، p -value کم‌تر از ۰/۰۰۱ داشته باشند.

۴-۲-۳- برآزش خطی چند متغیره

^۱ Mahalanobis Distance

^۲ Multivariate

^۳ Standard Deviation

^۴ Covariance Matrix

برازش خطی چندمتغیره یا به اختصار MLR، یکی از روش‌های مدل‌سازی است که متغیری وابسته را بر مبنای
پیش از یک متغیر مستقل، با رابطه‌ای خطی تخمین می‌زند [۱۶] در واقع هدف، توسعه‌ی تابعی به صورت
رابطه‌ی ۱۴ است:

$$Y_i = \alpha + \beta_1 x_i^1 + \beta_2 x_i^2 + \dots + \beta_n x_i^n \quad \text{رابطه‌ی ۱۴}$$

که در آن، Y_i تخمین تابع از i آمین مشاهده است و x_i^j ، j آمین متغیر مستقل آمین مشاهده می‌باشد.
یکی از روش‌های پیاده‌سازی برازش خطی چندمتغیره، استفاده از روش حداقل مربعات وزنی^۱ یا به اختصار
OLS است. برای استفاده از روش حداقل مربعات وزنی برای حل مجموعه‌ی معادلات خطی به صورتی که
در ادامه توضیح داده می‌شود، لازم است دو شرط برقرار باشد. شرط اول این است که سیستم نامعین^۲ باشد،
یعنی تعداد معادلات از تعداد مجهولات بیش تر باشد. این شرط معمولاً برقرار است چرا که به ازای هر مشاهده،
یک معادله نوشته می‌شود و تعداد معادلات نظیر تعداد مشاهدات یعنی m است. از سوی دیگر تعداد مجهولات،
یعنی ضریب هر یک از متغیرهای مستقل، متناظر با تعداد آن‌ها، یعنی n است. با توجه به مسئله‌ی مورد بررسی
در این پژوهش و بالا بودن تعداد داده‌ها، سیستم همواره نامعین است. همچنین، شرط دوم آن است که ماتریس
مشاهدات، یعنی $X_{m \times n}$ ، دارای رتبه‌ی کامل^۳ باشد. با توجه به توضیح موجود در بند قبل، این ماتریس در
این مسئله غیر مربعی^۴ است. ماتریس‌های غیر مربعی در صورتی از رتبه‌ی کامل هستند که از حیث بُعد
کوچک‌تر از مرتبه‌ی کامل باشند. این بدین معنی است که در صورتی که تعداد سطرها از ستون‌ها بیش تر
باشد، اگر ستون‌های ماتریس مستقل خطی^۵ باشند ماتریس از مرتبه‌ی کامل است و بالعکس، در صورتی که
تعداد ستون‌ها از سطرها بیش تر باشد، اگر سطرهای ماتریس مستقل خطی باشند، ماتریس از مرتبه‌ی کامل
است. در این مسئله تعداد مشاهدات، m ، بیش از تعداد متغیرها، یعنی n است. پس در این ماتریس تعداد سطرها
بیش از تعداد ستون‌ها است. بنابراین، برای اینکه این ماتریس از مرتبه‌ی کامل باشد، لازم است که ستون‌های
آن مستقل خطی باشند. از آنجایی که هر یک از ستون‌های این ماتریس یکی از متغیرهای مستقل هستند، لازم
است پیش از شروع به حل، از اینکه این متغیرها مستقل خطی هستند اطمینان حاصل گردد.
پیش از شروع به حل مسئله لازم است مقادیر عددی^۶ زیر برای بردار دلخواه $\langle X \rangle_{1 \times n}$ ، بر اساس رابطه‌ی
۱۵ و رابطه‌ی ۱۶ تعریف شوند:

Least Squares Method^۱
over determined^۲
Full Rank^۳
Nonsquare Matrix^۴
Linearly Independent^۵
Scalar^۶

$$\| \langle X \rangle \|_2 = \sqrt{|x_1|^2 + |x_2|^2 + \dots + |x_n|^2} \quad \text{رابطه‌ی ۱۵}$$

$$\| \langle X \rangle \|_2^2 = \sum_{i=1}^n |x_n|^2 = \langle X \rangle \langle X \rangle^T \quad \text{رابطه‌ی ۱۶}$$

که به $\| \langle X \rangle \|_2$ فاصله‌ی اقلیدسی $\langle X \rangle$ ، و به $\| \langle X \rangle \|_2^2$ ، مجموع مربعات $\langle X \rangle$ و یا انرژی $\langle X \rangle$ آن اطلاق می‌شود. در تمام روابط نوشته شده، فرض بر این است که درایه‌های بردارها و ماتریس‌ها حقیقی هستند. در غیر این صورت باید به جای ماتریس ترانهاده^۳ از ترانهاده‌ی مزدوج^۴ استفاده کرد.

برای تعیین ضرایب در برازش خطی چندمتغیره با استفاده از حداقل مربعات وزنی، از رویکرد کمینه کردن خطا استفاده می‌شود. خطای معادله یا $\langle E \rangle$ در این مسئله، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\langle E \rangle = \langle Y \rangle - [X] \langle B \rangle \quad \text{رابطه‌ی ۱۷}$$

که در آن، $\langle Y \rangle$ برداری با m سطر و یک ستون است که هر یک از سطرهاى آن، برابر با عمق یکی از نقاط داده برداری شده است. $[X]$ که پیش‌تر مورد اشاره قرار گرفت، ماتریسی با m سطر به ازاء مشاهدات و n ستون به ازای متغیرهای مستقل است. $\langle B \rangle$ بردار ضرایب، با n ستون به ازاء n متغیر است و هدف از حل مسئله نیز تعیین آن می‌باشد. خطای معادله یا همان $\langle E \rangle$ نیز برداری با m سطر و یک ستون است که هر یک از سطرهاى آن، معرف خطای تخمین عمق در نقطه‌ی متناظر است. رویکرد حداقل مربعات وزنی برای یافتن $\langle B \rangle$ ، حداقل کردن انرژی خطا است. بنابراین با توجه به رابطه‌ی ۱۶ و رابطه‌ی ۱۷ داریم:

$$J(\langle B \rangle) = \| \langle Y \rangle - [X] \langle B \rangle \|_2^2 = (\langle Y \rangle - [X] \langle B \rangle)^T (\langle Y \rangle - [X] \langle B \rangle) \quad \text{رابطه‌ی ۱۸}$$

با توجه به اینکه برای هر دو ماتریس A و B دلخواه داریم:

$$(A \ B)^T = B^T \ A^T \quad \text{رابطه‌ی ۱۹}$$

می‌توان رابطه‌ی ۱۸ را به صورت رابطه‌ی ۲۰ نوشت:

$$J(\langle B \rangle) = \langle Y \rangle^T \langle Y \rangle - \langle B \rangle^T [X]^T \langle Y \rangle - \langle Y \rangle^T [X] \langle B \rangle + \langle B \rangle^T [X]^T [X] \langle B \rangle \quad \text{رابطه‌ی ۲۰}$$

از طرفی، می‌توان جمله‌ی سوم رابطه‌ی ۲۰ را بر اساس رابطه‌ی ۲۱ نوشت:

$$\langle Y \rangle^T [X] \langle B \rangle = \langle Y \rangle^T (\langle B \rangle^T [X]^T)^T = (\langle B \rangle^T [X]^T \langle Y \rangle)^T \quad \text{رابطه‌ی ۲۱}$$

از آنجا که تمامی جملات سازنده انرژی، عددی بوده و دارای بعد یک هستند، طبق رابطه‌ی ۲۲ می‌توان نوشت:

^۱ Euclidean Distance

^۲ Energy

^۳ Transpose Matrix

^۴ Conjugate Transpose Matrix

$$\langle Y \rangle^T \llbracket X \rrbracket \langle B \rangle = \left(\langle B \rangle^T \llbracket X \rrbracket^T \langle Y \rangle \right)^T \quad \text{رابطه‌ی ۲۲}$$

بنابراین، می‌توان رابطه‌ی ۲۰ را به صورت رابطه‌ی ۲۳ بازنویسی کرد:

$$J(\langle B \rangle) = \langle Y \rangle^T \langle Y \rangle - 2 \langle B \rangle^T \llbracket X \rrbracket^T \langle Y \rangle + \langle B \rangle^T \llbracket X \rrbracket^T \llbracket X \rrbracket \langle B \rangle \quad \text{رابطه‌ی ۲۳}$$

شرط لازم برای اطمینان حاصل کردن از کمینه شدن خطا بر اساس رابطه‌ی ۲۴ این است که:

$$\frac{\partial J(\langle B \rangle)}{\partial \langle B \rangle} = 0 \quad \text{رابطه‌ی ۲۴}$$

بنابراین، با مشتق‌گیری از رابطه‌ی ۲۳ و جایگذاری در رابطه‌ی ۲۴، مطابق رابطه‌ی ۲۵ داریم:

$$\frac{\partial J(\langle B \rangle)}{\partial \langle B \rangle} = -2 \llbracket X \rrbracket^T \langle Y \rangle + \llbracket X \rrbracket^T \llbracket X \rrbracket \langle B \rangle + \llbracket X \rrbracket^T \llbracket X \rrbracket \langle B \rangle = \quad \text{رابطه‌ی ۲۵}$$

$$-2 \llbracket X \rrbracket^T \langle Y \rangle + 2 \llbracket X \rrbracket^T \llbracket X \rrbracket \langle B \rangle = 0$$

پس طبق رابطه‌ی ۲۶ داریم:

$$\llbracket X \rrbracket^T \langle Y \rangle = \llbracket X \rrbracket^T \llbracket X \rrbracket \langle B \rangle \quad \text{رابطه‌ی ۲۶}$$

حال، با فرض اینکه حاصل ضرب $\llbracket X \rrbracket^T \llbracket X \rrbracket$ معکوس‌پذیر^۱ باشد، با ضرب معکوس آن در دو طرف

رابطه‌ی ۲۶، مسئله اصلی به صورت رابطه‌ی ۲۷ زیر حل می‌شود:

$$\langle B \rangle = \left(\llbracket X \rrbracket^T \llbracket X \rrbracket \right)^{-1} \llbracket X \rrbracket^T \langle Y \rangle \quad \text{رابطه‌ی ۲۷}$$

۴-۲-۴- درخت تصمیم

درخت تصمیم^۲ به مفهوم مدرن آن در سال ۱۹۸۴ توسط بریمن^۳ و همکاران [۱۷] و در سال ۲۰۰۱ توسط هیستی^۴ و همکاران [۱۸] معرفی شد. درخت تصمیم در واقع بر مبنای ضوابطی، فضای حاصل از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده^۵ یا همان متغیرهای مستقل را به نواحی‌ای تقسیم‌بندی می‌کند، به طوری که مشاهدات قرار گرفته در یک بخش، همگن‌ترین پاسخ را نسبت به متغیرهای پیش‌بینی‌کننده داشته باشند [۱۹]. در مورد مسائل طبقه‌بندی^۶، مقدار نسبت داده‌شده به هر ناحیه کلاسی با بیش‌ترین احتمال قرارگیری در آن ناحیه است و در مسائل برازش^۷، میانگین پاسخ مشاهدات قرار گرفته در آن ناحیه، با فرض توزیع نرمال خطاها، بدان نسبت داده

^۱Invertible Matrix

^۲Decision Tree

^۳Breiman

^۴Hastie

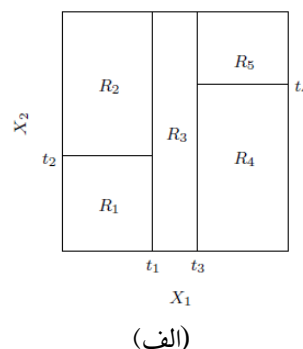
^۵Predictor

^۶Classification

^۷Regression

می‌شود. از آنجا که مجموعه‌ای از قوانین برای تقسیم فضای پیش‌بینی‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد، این فضا را می‌توان با درخت خلاصه کرد که چنین رویکردهایی روش درخت تصمیم‌گیری نامیده می‌شوند. یکی از مزایای این روش‌ها این است که برای تفسیر، ساده و مفید هستند. فرض کنید هدف، پیش‌بینی پاسخ یا کلاس R بر اساس ورودی‌های X_1, X_2, \dots, X_p باشد. در این روش، این کار با رشد یک درخت دودویی^۱ انجام می‌گیرد که شامل تعدادی گره^۲ و تعدادی شاخه^۳ است. در هر گره‌ی داخلی درخت، یک ضابطه روی یکی از ورودی‌ها، به عنوان مثال X_i ، اعمال می‌شود. سپس، بسته به نتیجه‌ی آزمون، مسیر در یکی از دو زیرشاخه‌ی سمت چپ یا راست ادامه می‌یابد. با ادامه‌ی این روند در نهایت مسیر، یک گره‌ی نهایی یا برگ^۴ وجود دارد. هر یک از مسیرهای ممکن در این درخت در واقع یکی از نواحی هستند که پیش‌تر مورد اشاره قرار گرفتند و گره‌های نهایی در حقیقت، مقادیر اختصاص داده‌شده به هر یک از نواحی هستند.

شکل ۳، مثالی شماتیک از یک درخت تصمیم است. دو متغیر X_1 و X_2 متناظر با متغیرهای مستقل هستند و متغیر وابسته، R است. R_i ها برگ‌های درخت و t_i ها، نقاط شکست^۵ هستند.



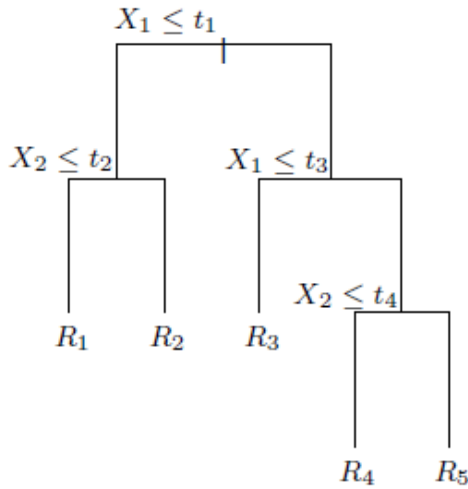
Binary^۱

Node^۲

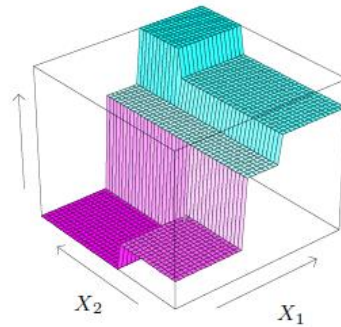
Branch^۳

Leaf^۴

Split Points^۵



(ج)



(ب)

شکل ۳: مفهوم کلی درخت تصمیم. (الف) نمایی از فضای دو بُعدی متغیرها و نواحی تقسیم‌شده؛ (ب) نمایی سه از فضای متغیرها، نواحی تقسیم‌شده و مقدار اختصاص داده‌شده به هر ناحیه؛ (ج) درخت تصمیم متناظر با این مسئله (برداشت از [۱۸])

در ساخت درخت تصمیم، متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و نقاط شکست به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که خطاهای تخمین توسط مدل را کمینه کنند. در واقع در هر مرحله، برای هر متغیر مستقل X_i ، نقطه‌ی بهینه‌ی شکست یا s ، به گونه‌ای انتخاب می‌شود که خطا را که به صورت رابطه‌ی ۲۸ تعریف می‌شود کمینه کند.

$$\min_s [\text{MSE}(y_i | x_{ik} < s) + \text{MSE}(y_i | x_{ik} \geq s)] \quad \text{رابطه‌ی ۲۸}$$

سپس از میان متغیرهای وابسته، متغیری انتخاب می‌شود که کم‌ترین MSE را نتیجه دهد. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که میزان MSE از حد آستانه‌ای کم‌تر شود. این الگوریتم، الگوریتمی بالا به پایین^۱ و حریصانه^۲ از نوع تقسیم دودویی بازگشتی^۳ نامیده می‌شود. از آن‌جا که در گره‌ی ابتدایی تمامی مشاهدات متعلق به یک دسته هستند و با پیشروی در الگوریتم به نواحی جداگانه تقسیم می‌شوند، بالا به پایین نام دارد و به این دلیل حریصانه نامیده می‌شود که در هر مرحله، نقطه‌ی شکست و متغیر تعیین‌کننده تنها با توجه به نتیجه‌ی MSE در آن مرحله انتخاب می‌شوند و گام‌های بعدی در نظر گرفته نمی‌شوند.

^۱ Top-Down

^۲ Greedy

^۳ Recursive Binary Splitting

استفاده از مدل‌های گروهی^۱ در یادگیری ماشین، تکنیکی است که تصمیمات چندین مدل ضعیف‌تر^۲ را برای بهبود عملکرد مدل کلی ترکیب می‌کند و نتیجه‌ی ترکیب آن‌ها از نظر دقت پیش‌بینی نسبت به استفاده از یک مدل واحد بهتر است. خطا در مدل‌های یادگیری عموماً ناشی از نویز، انحراف^۳ و واریانس است و مدل‌های گروهی با حداقل رساندن این عوامل، باعث بهبود پایداری و دقت الگوریتم‌های یادگیری می‌شوند. روش‌های زیادی برای ترکیب کردن مدل‌های متعدد وجود دارد که از آن میان می‌توان به استفاده از میانه^۴، میانگین و یا میانگین وزنی^۵ مدل‌ها اشاره نمود. با این حال، روش‌های پیش‌رفته‌تر نیز برای استفاده از مدل‌های گروهی وجود دارند. یکی از این روش‌ها، روش دسته‌بندی^۶ یا تجمع بوت‌استرپ^۷ است.

در تجمع بوت‌استرپ ابتدا، زیرمجموعه‌های تصادفی از مجموعه‌ی داده‌های آموزشی با جایگذاری ایجاد می‌شود. سپس، برای هر نمونه یک مدل درخت تصمیم ساخته می‌شود. سرانجام، نتایج این مدل‌های مختلف با استفاده از میانگین نتایج (برای مسائل برازش) و یا اکثریت (برای مسائل طبقه‌بندی) ترکیب می‌شوند. از آنجا که هر یک از مدل‌ها با استفاده از زیرمجموعه‌های مختلفی از داده‌ها ایجاد شده و در پایان از خروجی جمعی آن‌ها استفاده می‌شود، مشکل بیش‌برازش^۸ مدل حل گشته، خطای واریانس را کاهش می‌یابد و ممکن است پیش‌بینی مطمئن‌تر از یک مدل واحد تولید نماید.

۴-۲-۵- شبکه‌ی عصبی مصنوعی

با وجود برتری‌هایی همچون پیچیدگی و بالا بودن سرعت پردازش در کامپیوترها، ضعف‌هایی چون محدودیت در محیط فعالیت و تعداد پردازنده‌ها، عدم یکپارچگی پردازنده و حافظه و نداشتن قابلیت یادگیری، استفاده از کامپیوترها در حل مسائل را با محدودیت مواجه می‌کند. شبکه‌ی عصبی مصنوعی که به اختصار ANN خوانده می‌شود، یکی از الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین^۹ است که تلاش دارد با الهام گرفتن از ساختار سیستم

^۱ Ensemble Models

^۲ Weak Learner

^۳ Bias

^۴ Median

^۵ Weighted Average

^۶ Bagging

^۷ Bootstrap Aggregating

^۸ Overfitting

^۹ Machine Learning

عصبی بیولوژیکی، کاستی‌های موجود در سیستم‌های کامپیوتری را مرتفع سازد. این حوزه که اولین بار در دهه‌ی ۴۰ میلادی با پژوهش نوآرانه‌ی مک کالوچ^۱ و پیتس^۲ کلید خورد [۲۰]، در مواردی همچون طبقه‌بندی نمونه‌ها بر اساس مشاهدات، خوشه‌بندی نمونه‌ها بر مبنای ویژگی‌هایشان، تقریب توابع^۳، پیش‌بینی^۴ سری‌های زمانی، بهینه‌سازی^۵، ایجاد حافظه با قابلیت دسترسی بر اساس محتوا^۶ به جای آدرس و کنترل ورودی‌های سیستم‌ها برای دستیابی به خروجی دلخواه دارای کاربرد است [۲۱].

نورون^۷ سلول تشکیل‌دهنده‌ی سیستم عصبی بدن است. مطابق با شکل ۴ (الف) که دو نورون را در کنار هم نمایش می‌دهد، هر نورون دارای یک بخش اصلی به نام بدنه‌ی سلولی یا سوما^۸ و دو بخش شاخه‌مانند به نام‌های دندریت^۹ و آکسون^{۱۰} است. انتقال اطلاعات در بین نورون‌ها با دریافت سیگنال از طریق دندریت‌ها از نورون قبلی و انتقال سیگنال‌های تولیدشده در نورون توسط سوما، از طریق آکسون به سلول بعدی انجام می‌پذیرد. مطابق شکل ۴ (ب)، انتقال اطلاعات میان دو نورون از طریق درگاهی به نام سیناپس^{۱۱} و با انتقال موادی شیمیایی به نام پیام‌رسان عصبی^{۱۲} روی می‌دهد. در این میان، سیناپس بر مبنای سیگنال‌های عبوری، تنظیم می‌شود و به نوعی، این قابلیت را داراست که با کمک فعالیت‌هایی که در آن‌ها مشارکت دارد آموزش ببیند. در غشاء مغزی^{۱۳} حدود ۱۰^{۱۱} نورون وجود دارد که هر یک به ۱۰^۳ الی ۱۰^۴ نورون دیگر متصل هستند و در مجموع، مغز انسان شامل ۱۰^{۱۴} الی ۱۰^{۱۵} اتصال بین نورونی است.

McCulloch^۱

Pitts^۲

Function Approximation^۳

Prediction^۴

Optimization^۵

Content-Addressable Memory^۶

Neuron^۷

Soma^۸

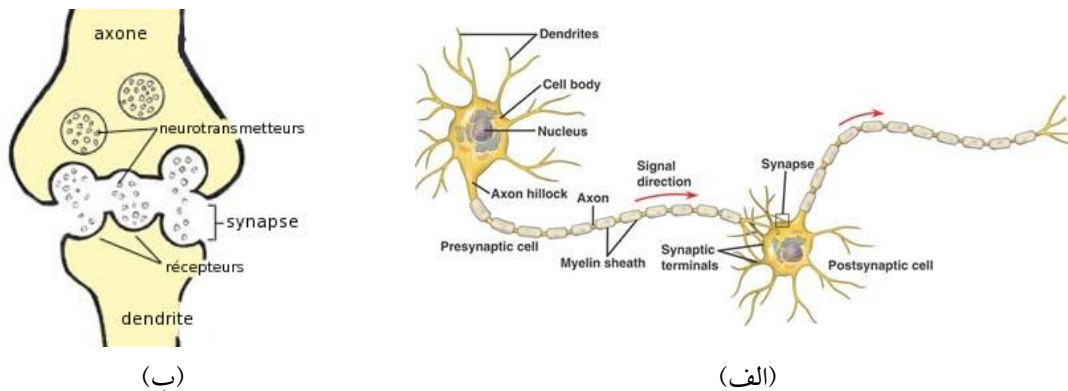
Dendrite^۹

Axon^{۱۰}

Synapse^{۱۱}

Neurotransmitters^{۱۲}

Cerebral Cortex^{۱۳}

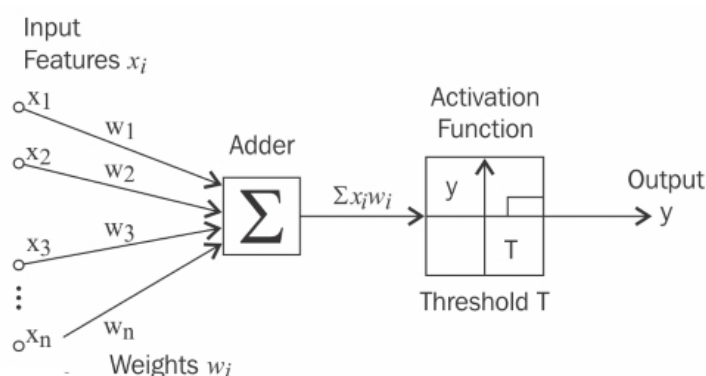


شکل ۴: (الف) نمایی از دو نورون در کنار هم (برداشت از <http://teerex.ir/>) (ب) نمای نزدیک سیناپس (برداشت از <https://study.com/>)

انتقال سیگنال میان این سلول‌ها با فرکانسی حدود چندصد هرتز^۱، یا زمان چند میلی‌ثانیه صورت می‌گیرد که میلیون‌ها بار کندتر از فرکانس انتقال اطلاعات در مدارهای الکترونیکی است. با اینهمه، تصمیمات مبتنی بر ادراک، معمولاً تنها ظرف چندصد میلی‌ثانیه توسط انسان‌ها گرفته می‌شوند. بنابراین، گویی تصمیمات در مغز انسان با فرآیندهایی موازی صورت می‌گیرند که هر تصمیم تنها طی حدود صد مرحله گرفته می‌شود. علاوه بر آن، با توجه به زمان پردازش، حجم اطلاعات منتقل شده از یک نورون به نورون دیگر باید بسیار کوچک باشد. این بدین معنی است که اطلاعات مهم به صورت مستقیم انتقال نمی‌یابند، بلکه به نوعی در اتصالات بین نورونی توزیع می‌گردند. شبکه‌ی عصبی مصنوعی در واقع در تلاش است الگوریتمی بر مبنای پردازش موازی اطلاعات و توزیع داده‌ها در اتصالات بین نورونی برای حل مشکلات ارائه کند [۲۲].

مک‌کالوچ و پیت اولین بار رابطه‌ای دودویی^۲ با یک حد آستانه^۳ را بر اساس شکل ۵ به عنوان شبیه‌ساز محاسباتی یک نورون مصنوعی معرفی کردند که پرسپترون^۴ نامیده می‌شود.

Hertz^۱
Binary^۲
Threshold^۳
Perceptron^۴



شکل ۵: نورون مدل‌سازی شده توسط مک کالوچ و پیت (برداشت از [۲۳])

این نورون در ابتدا مطابق رابطه‌ی ۲۹ مجموع وزن دار n سیگنال ورودی x_j را محاسبه می‌کند. اگر این مقدار از حد آستانه‌ی w_0 بالاتر باشد، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر را به آن اختصاص می‌دهد. در واقع مقدار w_0 در رابطه‌ی ۲۹، همان مقدار T در شکل ۵ است که برای سادگی، بدین صورت در نظر گرفته می‌شود.

$$y = \theta \left(\sum_{j=1}^n w_j x_j - w_0 \right) \quad \text{رابطه‌ی ۲۹}$$

در این رابطه، θ تابع پله‌ای^۱ در صفر و w_j ، وزن سیناپس برای تأمین ورودی است. وزن‌های مثبت نشان‌دهنده‌ی محرک^۲ بودن سیناپس و وزن‌های منفی نمایانگر بازدارنده^۳ بودن آن هستند.

مک کالوچ و پیت نشان دادند که انتخاب مناسب وزن‌ها، به آرایش مناسبی از نورون‌ها توانایی انجام محاسبات سراسری را می‌دهد. در واقع در این جا ارتباطات نمادی از دندریت‌ها و آکسون‌ها و وزن‌ها معرف سیناپس‌ها هستند. از سوی دیگر، تابع موجود در رابطه‌ی ۲۹، که تابع فعال‌سازی^۴ نامیده می‌شود، فعالیت سوما را شبیه‌سازی می‌کند. اما این تابع، در بطن خود دارای ساده‌سازی‌هایی است که مانع از شبیه‌سازی رفتار واقعی نورون‌ها می‌شود. این محدودیت موجب شد تا توابع فعال‌سازی دیگری بر مبنای تابع مک کالوچ و پیت

Step^۱

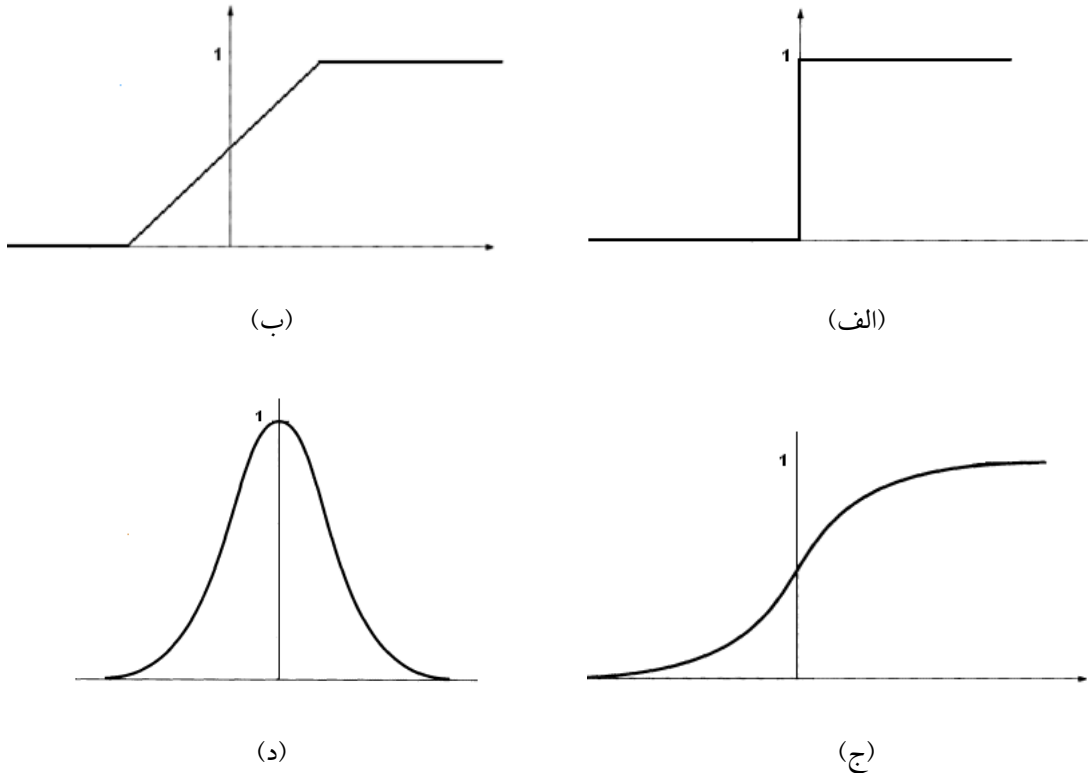
Excitatory^۲

Inhibitory^۳

Activation Function^۴

به روزرسانی رابطه‌ی تراز آب-مساحت-حجم دریاچه‌ی ارومیه و تهیه‌ی نقشه‌ی بسیمتری آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست

گسترش یابند که از آن میان می‌توان به توابع خطی تکه‌ای^۱، سیگموئید^۲ و گاوسی^۳ اشاره نمود. مجموعه‌ی این توابع فعال‌سازی متداول در شکل ۶ قابل مشاهده هستند.



شکل ۶: انواع توابع فعال‌سازی متداول (الف) تابع پله‌ای با حد آستانه (ب) تابع خطی تکه‌ای (ج) تابع سیگموئید (د) تابع گاوسی (برداشت از <https://www.saedsayad.com/>)

تابع سیگموئید که تابع لجستیک^۴ نیز نامیده می‌شود، پرکاربردترین تابع فعال‌سازی در شبکه‌ی عصبی است که صعودی بوده و تابع فعال‌سازی هموارتری ارائه می‌دهد. تابع استاندارد سیگموئید در رابطه‌ی ۳۰ آورده شده است که در آن β پارامتر شیب است.

$$g(x) = 1 / (1 + \exp\{-\beta x\}) \quad \text{رابطه‌ی ۳۰}$$

^۱Piecewise Linear Regression

^۲Sigmoid

^۳Gaussian

^۴Logistic

شبکه‌ی عصبی مصنوعی را می‌توان به صورت گرافی جهت‌دار^۱ و وزن‌دار دانست که نورون‌ها رأس‌ها^۲ و جهات وزن‌دار حرکت یال‌هایش^۳ هستند که ارتباط میان نورون‌های ورودی و خروجی را برقرار می‌سازند. بر اساس معماری و ساختار این گراف‌ها، می‌توان شبکه‌های عصبی مصنوعی را به دو دسته‌ی شبکه‌های پیش‌خور^۴ و بازگشتی^۵ تقسیم کرد. تفاوت این دو معماری در این است که ساختار شبکه‌های بازگشتی دارای حلقه است، در حالی که در شبکه‌های پیش‌خور، حلقه‌ای وجود ندارد. به طور کلی، شبکه‌های پیش‌خور حالت ایستا^۶ دارند، بدین معنی که به ازای ورودی‌های مدل، تنها یک سری خروجی تولید می‌کنند. در مقابل، شبکه‌های بازگشتی دارای حالت پویا^۷ هستند، چراکه به دلیل وجود مسیرهای بازگشتی، ورودی‌های نورون‌ها دچار تغییر شده و متعاقباً وضعیت شبکه تغییر می‌یابد. بنابراین، شبکه‌های پیش‌خور نیازمند حافظه‌ی کم‌تری هستند، چرا که پاسخشان به یک ورودی خاص مستقل از وضعیت قبلی شبکه است. شکل ۷، شبکه‌های متداول برای هر دو نوع شبکه‌های پیش‌خور و بازگشتی را نشان می‌دهد.

Directed Graph^۱

Vertices^۲

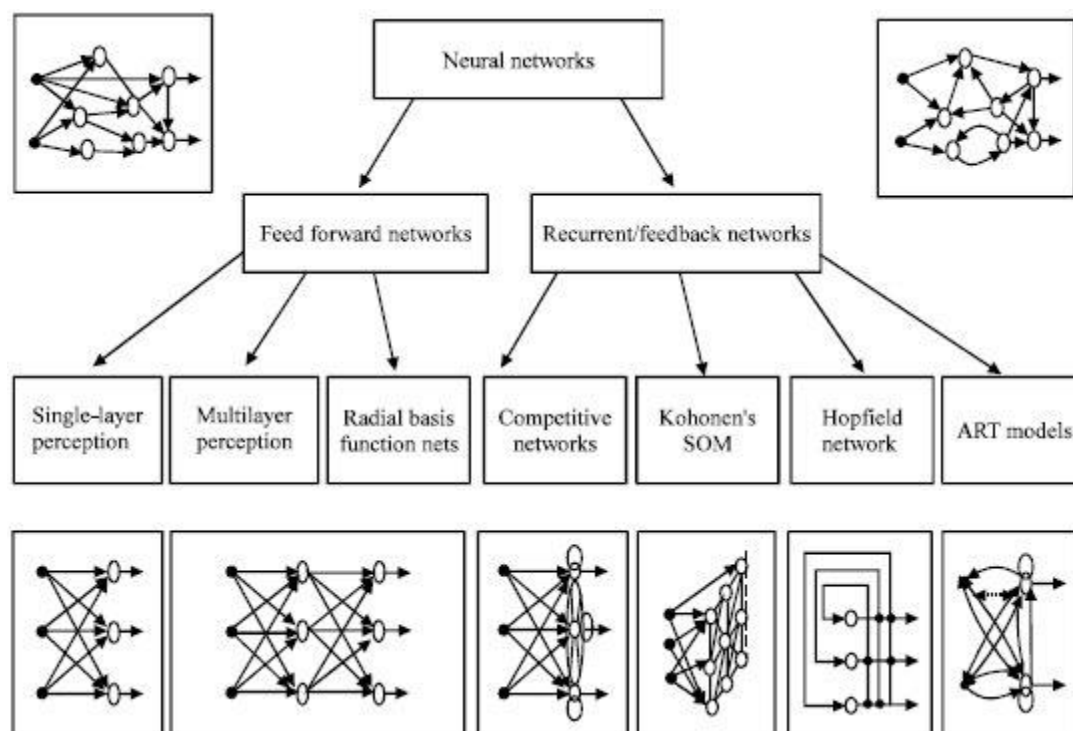
Edges^۳

Feedforward^۴

Recurrent/Feedback^۵

Static^۶

Dynamic^۷



شکل ۷: طبقه‌بندی ساختارهای هر دو نوع شبکه‌های پیش‌خور و بازگشتی (برداشت از [۲۴])

متداول‌ترین نوع شبکه‌های پیش‌خور، پرسپترون^۱ چندلایه یا به اختصار MLP است. در این معماری، همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، نورون‌ها به صورت لایه‌های متوالی قرار گرفته‌اند و میان نورون‌های لایه‌های مختلف، اتصالات یکطرفه برقرار است.

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، شبکه‌ی عصبی مصنوعی زیرمجموعه‌ی روش‌های یادگیری ماشین است. یادگیری در این مدل را می‌توان به روزرسانی معماری شبکه و وزن‌های اتصالات بیان کرد. به روزرسانی وزن‌های اتصالات عموماً با کمک الگوهای آموزشی از پیش تعریف‌شده و به صورت فرآیندی تکراری انجام می‌گیرد.

برای طراحی و اجرای یک فرآیند یادگیری شبکه‌ی عصبی مصنوعی، در ابتدا لازم است ویژگی‌های مسئله و مدل مورد نیاز به درستی تعریف شوند. اولین مسئله تعیین الگوی یادگیری^۲ است. به طور کلی، سه نوع

^۱Multilayer Perceptron

^۲Learning Paradigm

الگوی یادگیری وجود دارد که عبارتند از با نظارت^۱، بدون نظارت^۲ و دوگانه^۳. در یادگیری با نظارت، برای هر ورودی، خروجی مورد انتظاری نیز موجود است. در این نوع از یادگیری، وزن‌ها به گونه‌ای تعیین می‌شوند که خروجی‌های مدل تا جای ممکن به خروجی‌های واقعی نزدیک باشد. مسئله‌ی مورد بررسی در این پژوهش، یعنی توسعه‌ی مدلی برای تخمین عمق نقاط مختلف دریاچه‌ی ارومیه، نیز مسئله‌ای از نوع یادگیری با نظارت است؛ چرا که بنا است شبکه بر مبنای عمق نقاط که مورد داده‌برداری قرار گرفته‌اند آموزش ببیند. در مقابل، در یادگیری بدون نظارت، پاسخ درستی وجود ندارد؛ بلکه مدل تلاش می‌کند ساختار و روابط موجود میان داده‌ها را مطالعه کرده و بر مبنای این روابط، داده‌ها را طبقه‌بندی کند. یادگیری دوگانه نیز ترکیبی از این دو نوع یادگیری است و معمولاً در آن، بخشی از ضرایب با استفاده از یادگیری با نظارت و بخشی دیگر با استفاده از یادگیری بدون نظارت به دست می‌آیند.

ظرفیت^۴، پیچیدگی نمونه‌ها^۵ و پیچیدگی محاسبات^۶ سه رکن اصلی در انتخاب ضابطه‌ی مناسب برای یادگیری سیستم هستند. ظرفیت تعیین می‌کند که چند الگو قابل ذخیره هستند و یک شبکه قادر است چه توابع و مرزهای تصمیمی^۷ را ایجاد کند. پیچیدگی نمونه‌ها تعیین می‌کند که چه تعداد داده‌ی آموزشی مورد نیاز است تا تعمیم مدل به سایر داده‌ها معتبر باشد. وجود داده‌های کم باعث می‌شود مدل دچار بیش‌برازش شود، بدین معنی که عملکرد خوبی بر روی داده‌های آموزشی داشته باشد اما قادر نباشد در مورد داده‌های آزمون^۸ (داده‌های مشاهداتی که برای آموزش مدل مورد استفاده قرار نگرفته‌اند) پاسخ قابل قبولی ارائه دهد. پیچیدگی محاسبات نیز به زمان مورد نیاز برای انجام یادگیری توسط شبکه اشاره می‌کند. تعداد زیادی از الگوریتم‌ها نیازمند زمان زیادی برای آموزش هستند و بدین دلیل از کارایی مناسبی برخوردار نیستند.

Supervised¹

Unsupervised²

Hybrid³

Capacity⁴

Sample Complexity⁵

Computational Complexity⁶

Decision Boundaries⁷

Test Data⁸

به طور کلی چهار ضابطه‌ی کلی برای یادگیری^۱ سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند که عبارتند از:
ضابطه‌ی تصحیح خطا^۲، یادگیری بولتزمن^۳، ضابطه‌ی هبین^۴ و ضوابط یادگیری رقابتی^۵. بر مبنای مقاله‌ی جین
و همکاران، ضابطه‌ی یادگیری اصلی برای یادگیری با نظارت با معماری پرسپترون یک و یا چندلایه تصحیح
خطا است. از یادگیری با نظارت با معماری پرسپترون یک و یا چندلایه از میان کاربردهایی که پیش تر یاد شد،
می‌توان برای طبقه‌بندی نمونه‌ها بر اساس مشاهدات، تقریب توابع، پیش‌بینی سری‌های زمانی، و کنترل
ورودی‌های سیستم‌ها برای دستیابی به خروجی دلخواه استفاده نمود. با توجه به کاربرد این روش در پژوهش
حاضر، از میان چهار روش موجود، ضابطه‌ی تصحیح خطا در ادامه توضیح داده شده است.

۴-۲-۴-۱- ضابطه‌ی تصحیح خطا

در یادگیری با نظارت، برای هر ورودی، خروجی دلخواهی نیز به شبکه ارائه می‌شود. در طول فرآیند یادگیری،
مقدار خروجی شبکه که با y نمایش داده می‌شود، لزوماً با خروجی دلخواه یعنی d برابر نیست. ضابطه‌ی تصحیح
خطا از خطای تخمین، یعنی $(d - y)$ برای اصلاح ضرایب و کاهش این خطا استفاده می‌کند. بر اساس رابطه‌ی
۲۹، در صورتی که مجموع عبارت داخل پرانتز مثبت باشد، خروجی یا همان مقدار y یک و در غیر این صورت
صفر است. بنابراین، معادله‌ی خطی‌ای بر اساس رابطه‌ی ۳۱، برای مسئله‌ی طبقه‌بندی دو کلاسه، مرز تصمیمی
را به صورت یک هایپرپلین^۶ در فضای n بُعدی ایجاد می‌کند.

$$\sum_{j=1}^n w_j x_j - w_0 = 0 \quad \text{رابطه‌ی ۳۱}$$

رزنبلات^۷ در سال ۱۹۶۲، فرآیندی برای یادگیری و تعیین ضرایب و حد آستانه در یک پرسپترون توسعه
داد [۲۵] که الگوریتم یادگیری پرسپترون نام دارد و در ادامه‌ی این بخش توضیح داده شده است. وی ثابت
کرد که اگر نمونه‌های مشاهداتی متعلق به دو کلاس با قابلیت جداپذیری خطی باشند، یادگیری پرسپترون پس

^۱ Learning Rule

^۲ Error Correction Rule

^۳ Boltzmann Learning

^۴ Hebbian Rule

^۵ Competitive Learning Rules

^۶ Hyperplane

^۷ Rosenblatt

از تعداد محدودی تکرار، همگرا می‌شود. این نظریه، نظریه‌ی همگرایی پرسپترون^۱ نام دارد. البته لازم به ذکر است که در عمل، اطلاعی از اینکه آیا نمونه‌ها قابلیت جداپذیری خطی دارند یا خیر در دست نیست. الگوریتم پس‌انتشار^۲ نیز یکی از روش‌های یادگیری مبتنی بر ضابطه‌ی تصحیح خطا است. در واقع، الگوریتم یادگیری پرسپترون^۳ و الگوریتم پس‌انتشار هر دو روش‌های یادگیری مبتنی بر ضابطه‌ی تصحیح خطا هستند که برای یادگیری با نظارت با معماری پرسپترون یک و یا چندلایه مورد استفاده قرار می‌گیرند و در پژوهش حاضر قابل استفاده هستند. در ادامه، الگوریتم‌های پیاده‌سازی هر دو روش توضیح داده شده‌اند.

الف) الگوریتم یادگیری پرسپترون

- (۱) تخمین اولیه‌ی ضرایب و حد آستانه بر اساس اعداد کوچک تصادفی
- (۲) تعیین میزان خروجی مدل بر اساس ضرایب و حدود آستانه‌ی تعیین شده در گام قبل
- (۳) به‌روزرسانی وزن‌ها بر اساس رابطه‌ی ۳۲:

$$w_j^{t+1} = w_j^t + \eta(d - y) x_j \quad \text{رابطه‌ی ۳۲}$$

که در آن d خروجی مورد انتظار، t تعداد تکرار محاسبه و $0 < \eta < 1$ طول گام است.

ب) الگوریتم پس‌انتشار

- (۱) تخمین اولیه‌ی ضرایب بر اساس اعداد کوچک تصادفی
- (۲) انتخاب یکی از داده‌های ورودی
- (۳) تعیین میزان خروجی مدل بر اساس ضرایب تعیین شده در گام اول
- (۴) محاسبه‌ی δ_i^L در لایه‌ی خروجی بر اساس رابطه‌ی ۳۳:

$$\delta_j^L = g'(h_i^t) [d_i^u - y_i^L] \quad \text{رابطه‌ی ۳۳}$$

که در آن h_i^t ورودی کل به آمین واحد در لایه است و g' مشتق تابع فعال‌سازی g است.

- (۵) محاسبه‌ی مقادیر δ برای لایه‌های قبلی، با جمع کردن خطا رو به عقب، به شکل رابطه‌ی ۳۴:

$$\delta_j^I = g'(h_i^I) \sum_j w_{ij}^{I+1} \delta_j^{I+1}, I = (L-1), \dots, 1 \quad \text{رابطه‌ی ۳۴}$$

- (۶) به‌روزرسانی وزن‌ها با استفاده از رابطه‌ی ۳۵:

Perceptron Convergence Theorem^۱

Backpropagation Algorithm^۲

Perceptron Learning Algorithm^۳

$$w_{ji}' = \eta \delta_i^I y_j^{I-1}$$

رابطه‌ی ۳۵

(۷) بازگشت به گام دو و تکرار روند برای داده‌ی جدید تا زمانی که خطا در لایه‌ی خروجی کم‌تر از

حدی از پیش تعریف شده باشد یا تعداد تکرارها به بیشینه‌ی تعداد خود برسد.

۵- نتایج

در این بخش از گزارش، نتایج با توجه به هدف اصلی از انجام این مطالعه، در دو بخش به‌روزرسانی روابط تراز سطح آب-مساحت-حجم دریاچه‌ی ارومیه و تهیه‌ی نقشه‌ی بسیمتری آن ارائه می‌شوند.

۵-۱- به‌روزرسانی روابط تراز سطح آب-مساحت-حجم دریاچه ارومیه

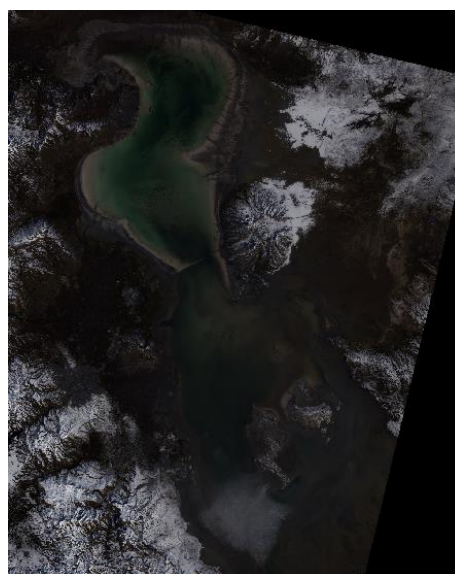
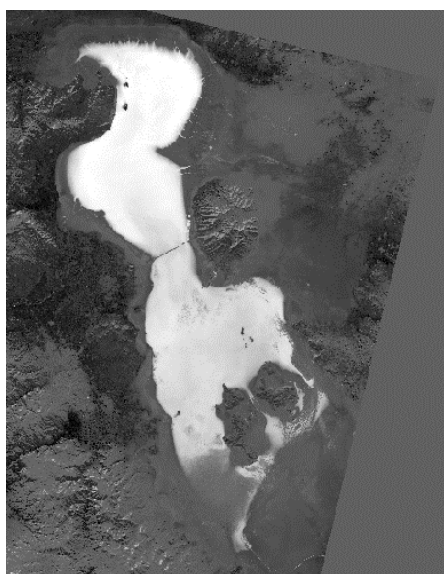
در این بخش از پژوهش، بدنه‌ی آبی دریاچه با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست ۴-۵ و ۸، از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۸ شمسی استخراج شده و مساحت آن مورد محاسبه قرار گرفته است. از تصاویر ماهواره‌های لندست ۴-۵ برای بررسی مساحت از آگوست ۱۹۸۴ (برابر با مرداد ۱۳۶۳ شمسی) تا سپتامبر ۲۰۱۱ (معادل مرداد ۱۳۹۰ شمسی) و از تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸ برای تعیین مساحت دریاچه از آوریل ۲۰۱۳ (تیر ۱۳۹۲) تا مارس ۲۰۱۹ (اسفند ۱۳۹۷) استفاده شده است. در بازه‌ی زمانی اول، در مجموع ۷۵ و در بازه‌ی زمان دوم ۹۷ تصویر که دریاچه در آن‌ها از وضوح قابل قبولی برخوردار بود، مورد ارزیابی قرار گرفته و بدنه‌ی آبی به هر دو روش استفاده از شاخص NDWI و خوشه‌بندی به روش k-means در آن‌ها استخراج شد. سپس هر یک از تصاویر مورد بررسی قرار گرفته و تصاویری که بر اساس انطباق ظاهری با تصویر RGB نماینده‌ی مناسبی از دریاچه بودند باقی مانده و بقیه‌ی تصاویر حذف شدند.

برای یافتن دید کلی، در شکل ۸، مرزهای شناسایی‌شده‌ی دریاچه به کمک شاخص NDWI در حدود آستانه‌ی صفر، ۰/۱- و ۰/۰۵- نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده حساسیت بالایی را به حدود آستانه‌ی شاخص NDWI در شناسایی بدنه‌ی آبی نشان می‌دهند. حتی تغییرات حد آستانه در حدود ۰/۰۵ هم، تغییرات بالای مساحت شناسایی‌شده را به همراه دارد و مقایسه‌ی این سه تصویر با تصویر متناظر RGB نشان می‌دهد که مساحت به دست آمده با حد آستانه‌ی صفر بیش از همه به تصویر مساحت مورد انتظار از دریاچه نزدیک است.



شکل ۸: تعیین حدود دریاچه با کمک NDWI با حدود آستانه‌ی (الف) صفر (ب) -0.1 (ج) -0.05 .

در راستای انجام پژوهش، در ابتدا، یکی از تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸ برای تعیین حد آستانه‌ی مناسب استفاده از NDWI با هدف تشخیص بدنه‌ی آبی، مورد بررسی قرار گرفت. این تصویر که از محصولات سطح ۲ این ماهواره بوده و متعلق به تاریخ ۳ بهمن ۱۳۹۷ (۲۳ ژانویه ۲۰۱۹) است، به طور کلی واضح بوده و جز در مناطق جنوبی فاقد ابر است. در شکل ۹ (الف)، تصویر RGB دریاچه در این تاریخ، که حاصل از اختصاص دادن رنگ‌های آبی، سبز و قرمز، به ترتیب به باندهای ۲، ۳ و ۴ ماهواره‌ی لندست ۸ است، مشاهده می‌شود. شکل ۹ (ب) نیز NDWI محاسبه‌شده برای تصویر دریاچه در تاریخ ۳ بهمن ۱۳۹۷ را نشان می‌دهد.

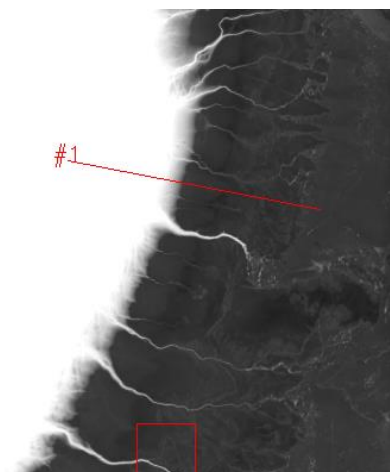


(ب)

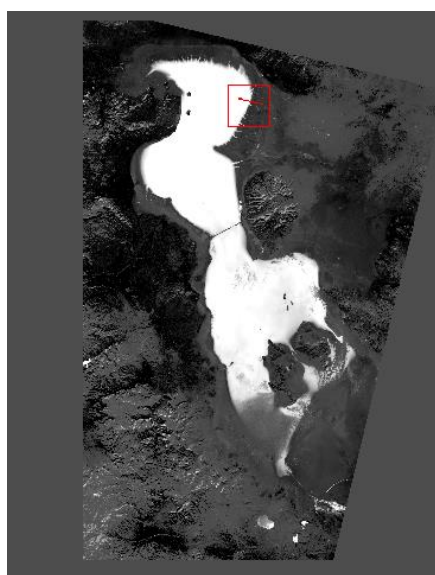
(الف)

شکل ۹: (الف) تصویر RGB دریاچه در روز ۳ بهمن ۱۳۹۷ (۲۳ ژانویه ۲۰۱۹) (ب) NDWI دریاچه در روز ۳ بهمن ۱۳۹۷ (۲۳ ژانویه ۲۰۱۹)

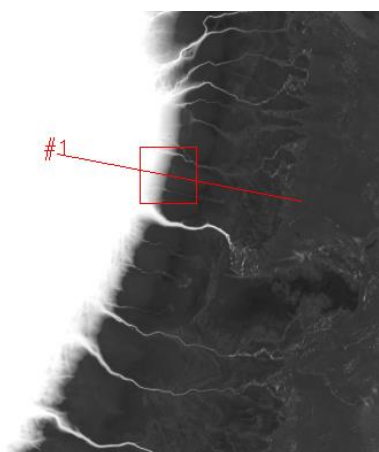
سپس در نرم‌افزار ENVI Classic، ۵۰ نقطه در اطراف دریاچه که به طور نسبی دارای مرز واضح‌تری با نواحی ساحلی بودند شناسایی شده و پروفیل این شاخص در راستایی دلخواه برایشان ترسیم گردید. شکل ۱۰ نمونه‌ای از یکی از این نقاط به همراه پروفیل NDWI در آن راستا را نمایش می‌دهد. با بررسی پروفیل این راستا، بر اساس شکل ۱۰ (ج) مشاهده می‌شود که پروفیل راستای مورد نظر با وجود دارا بودن روند نزولی از ابتدا، در نقطه‌ای دارای شکست و تغییر روند اساسی در مقدار پیکسل‌ها که همان NDWI است می‌شود. با بررسی تصویر و تعیین تقریبی نقاط شکست معین می‌شود که این نقطه به صورت بصری منطبق بر خط ساحلی است. این نقطه در شکل ۱۰ (ج)، محل تلاقی دو خط عمودی و افقی ترسیم شده با رنگ سفید بر روی نمودار بوده که منطبق بر مرکز مربع در شکل ۱۰ (د) است. با توجه به این نکته و مطالعه‌ی جاگالینگام و همکاران که از رویکرد مشابهی برای تعیین مرزهای آبی، تنها با توجه به نقطه‌ی شکست در مقادیر انعکاس باند NIR استفاده کردند [۱]، می‌توان حد آستانه را به صورت نقطه‌ی شکست پروفیل NDWI در راستایی تعریف کرد که نقاط داخل و بیرون دریاچه را در بر بگیرد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، این نقطه که مطابق شکل به صورت تقریبی ۹۸٪ بر روی پروفیل است، NDWI‌ای برابر با ۰/۰۶۵۷۶- دارد.



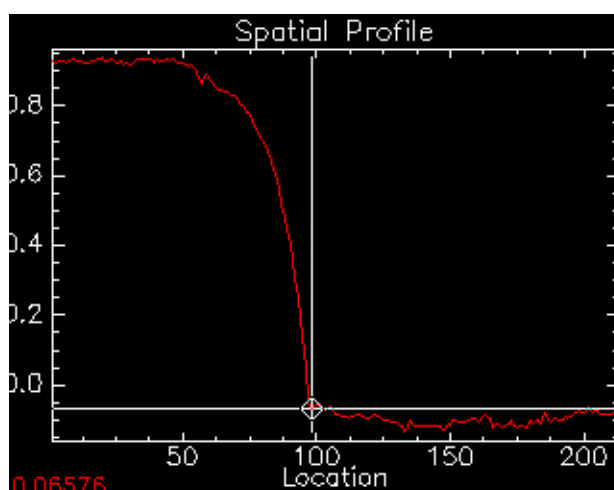
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۰: نقطه‌ی اول (الف) موقعیت راستای انتخاب شده در دریاچه (ب) نمای نزدیک راستای انتخاب شده (ج) پروفیل NDWI در راستای دلخواه به همراه موقعیت تقریبی نقطه شکست (د) موقعیت راستای انتخاب شده و موقعیت تقریبی نقطه‌ی شکست

با توجه به حساسیت بالای تعیین مرزها با کمک این شاخص، بهتر است برای شناسایی دقیق نقطه شکست و کاهش خطاهای انسانی از آزمون‌های استاندارد استفاده گردد. یکی از آزمون‌های مرسوم برای شناسایی نقاط تغییر روند^۱ در نمودارها، آزمون پتیت^۲ است [۲۶]. بنابراین می‌توان با استخراج مقادیر دقیق NDWI در ۵۰ پروفیل و اجرای آزمون پتیت بر روی آن‌ها، نقاط تغییر روند، که متناظر با حد آستانه‌ی NDWI هستند را شناسایی کرد. نکته‌ای که در مورد این روش حائز اهمیت است، توانایی آن در تشخیص اولین نقطه‌ی شکست است. بنابراین مطابق نتیجه‌ی این آزمون، همان‌طور که انتظار می‌رود تمامی نقاط شناسایی شده نقاط مرزی دریاچه نیستند، چرا که ممکن است تغییر روندی پیش از نقطه‌ی تلاقی با مرز آبی رخ داده باشد که مقدار مورد نظر ما نباشد، اما توسط آزمون به عنوان نقطه‌ی شکست شناسایی شود. به همین منظور شرط کوچک‌تر بودن NDWI در نقطه‌ی تغییر روند از میزانی خاص تعیین شد تا در صورتی که نقاط شناسایی شده، شاخصی بیش از این مقدار داشتند، خود نقطه و نقاط قبلیشان کنار گذاشته شده و آزمون مجدداً روی باقی نقاط انجام گیرد. با توجه به مقادیر به دست آمده به صورت مشاهداتی از پروفیل‌های نقاط، بیش تر نقاط تغییر روند دارای شاخصی کم تر و یا نزدیک به صفر هستند، لذا مقادیر کمی بیش از صفر به عنوان حد بالای NDWI مناسب

^۱ Change-Point

^۲ Pettitt's Test

به نظر می‌رسند. با تعیین حد بالای ۰/۱ برای این شاخص، مقدار حد آستانه‌ی میانگین برابر ۰/۰۴۰۶- به دست
آمد.

در شکل ۱۱، مساحت دریاچه در صورت اعمال این حد آستانه به همراه مرز دریاچه بر روی تصویر RGB مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خصوصاً در نواحی غربی، مقدار به دست آمده از آزمون پتیت نیز مانند مقدار حدودی تعیین شده در مرحله‌ی قبل، قادر نیست صورت دقیق مرز دریاچه را شناسایی کند. علاوه بر آن، مقدار آستانه‌ی مناسب NDWI در یک تصویر لزوماً در سایر تصاویر نیز عملکرد مناسبی از خود نشان نخواهد داد. بنابراین، با توجه به اثبات ناکارآمدی این روش، در این پژوهش از روش k-means برای شناسایی بدنه‌ی آبی استفاده شد. در جدول ۱۴ پیوست، اطلاعات مربوط به مساحت به دست آمده برای دریاچه و همچنین تراز سطح آب متناظر در هر روز (که اطلاعات آن از ستاد احیای دریاچه‌ی ارومیه اخذ شده است) آورده شده است.



(ب)

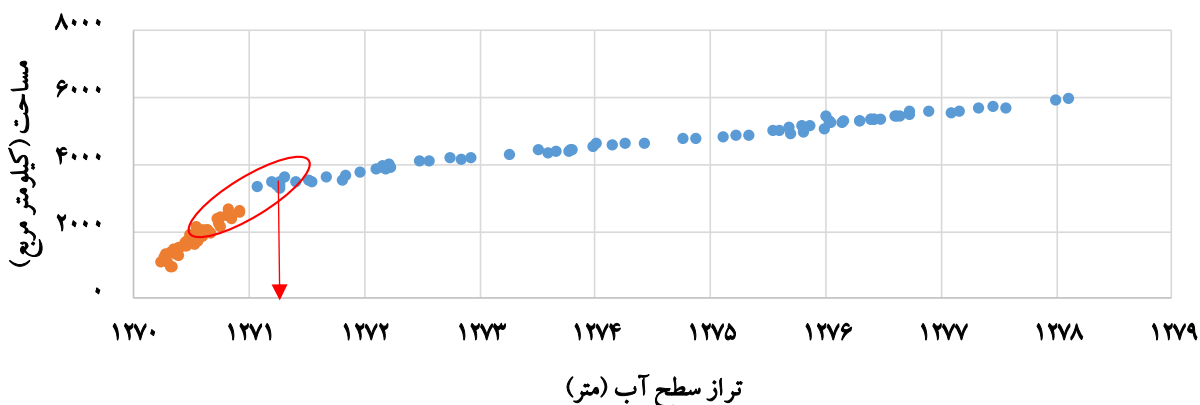


(الف)

شکل ۱۱: (الف) مساحت دریاچه (ب) مرز دریاچه بر روی تصویر RGB

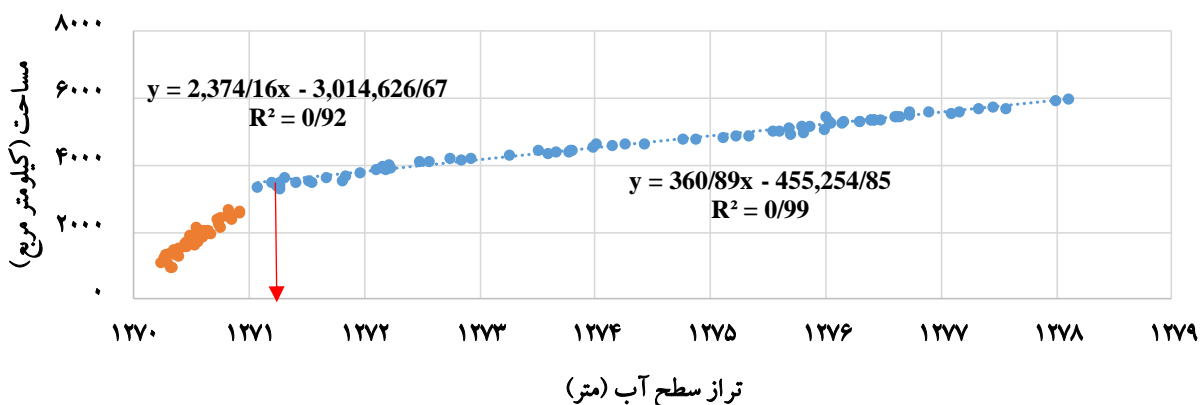
در صورتی که مساحت محاسبه‌شده‌ی دریاچه بر اساس روش k-means بر حسب تراز آن ترسیم گردد، نموداری مطابق شکل ۱۲ ترسیم می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به نظر می‌رسد از تراز متناظر با

حدود ۱۲۷۱ متر، معادله‌ی حاکم میان تراز سطح آب و مساحت آن دچار تغییر شده و از آن نقطه می‌توان نمودار را به دو بخش تقسیم کرد.



شکل ۱۲: نمودار مساحت دریاچه بر حسب تراز سطح آن از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۷ شمسی

در شکل ۱۳، دو نمودار خطی به‌دست آمده برای توصیف مساحت دریاچه بر حسب تراز آن به همراه معادلاتشان قابل مشاهده هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه‌ی خطی اول، برای ترازهای پایین‌تر از نقطه‌ی تلاقی، با مقدار R^2 نزدیک به ۰/۹۲ و رابطه‌ی خطی دوم، برای ترازهای بالاتر از آن، با مقدار R^2 نزدیک به ۰/۹۹ به خوبی قادر به توصیف این منحنی است.

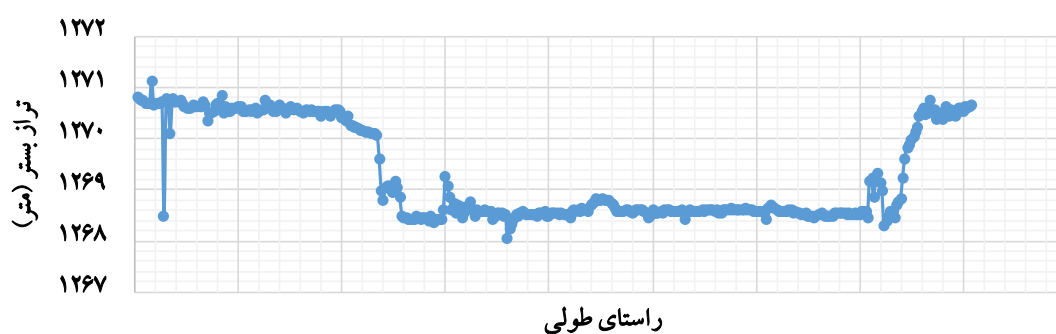


شکل ۱۳: دو خط برازش داده‌شده بر نمودار مساحت دریاچه بر حسب تراز سطح آن از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۷ شمسی

مقدار MAE معادلات اول و دوم نیز به ترتیب ۱۱۱/۵۸ و ۶۳/۲۵ کیلومتر مربع است که به طور متوسط ۶/۴۶ و ۱/۳۹ درصد از مساحت دریاچه را شامل می‌شود. مقدار RMSE این دو تخمین با این دو معادله نیز به

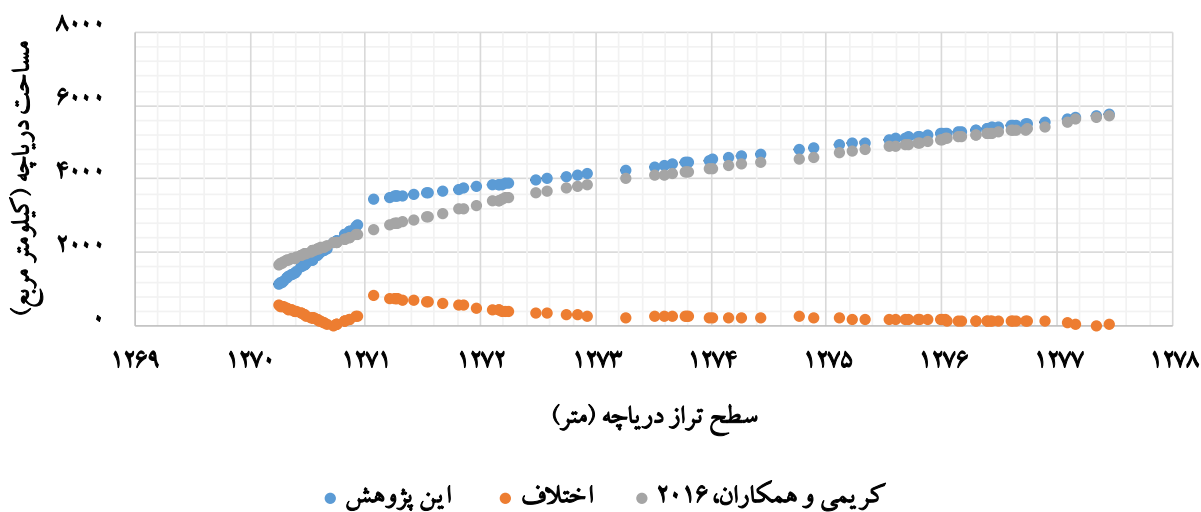
ترتیب ۱۳۹/۴۵ و ۸۵/۶۰ کیلومتر مربع است که برابر با ۸/۱۳ و ۱/۸۸ درصد میانگین کل مساحت‌ها به دست آمده است. با بررسی معادلات دو خط برازش داده شده، نقطه‌ی تلاقی این دو نمودار تقریباً برابر با تراز سطح ۱۲۷۱/۲۵ متر به دست می‌آید.

وجود دو رابطه‌ی خطی متفاوت میان تراز سطح و مساحت دریاچه‌ی ارومیه این فرضیه را ایجاد می‌کند که نمای جانبی بستر دریاچه در واقع از دو ذوزنقه تشکیل شده است که در تراز ۱۲۷۱/۲۵ متر با یکدیگر تلاقی دارند. بررسی چند پروفیل داده‌برداری، از جمله پروفیل موجود در شکل ۱۴ نیز این فرضیه را تقویت می‌کند.



شکل ۱۴: نمونه‌ای از پروفیل‌های طولی دریاچه

در جدول ۱۵ بخش پیوست، مساحت‌های به‌دست آمده در این پژوهش با مقادیر به‌دست آمده از رابطه‌ی ارائه‌شده توسط کریمی و همکاران در سال ۱۳۹۴ مقایسه شده و میزان اختلافشان گزارش شده است. در شکل ۱۵، تفاوت میان نتایج حاصل از این دو پژوهش مورد مقایسه قرار می‌گیرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تا پیش از تراز ۱۲۷۰/۸ متر، مساحت گزارش شده در پژوهش پیشین بیش از مساحت به‌دست آمده در پژوهش حاضر است. در ترازهایی بالاتر از این سطح، مساحت ارائه‌شده در این پژوهش بالاتر است، اما به تدریج تفاضل کم‌تر شده و دو مساحت گزارش شده به سمت یکدیگر میل می‌کنند.

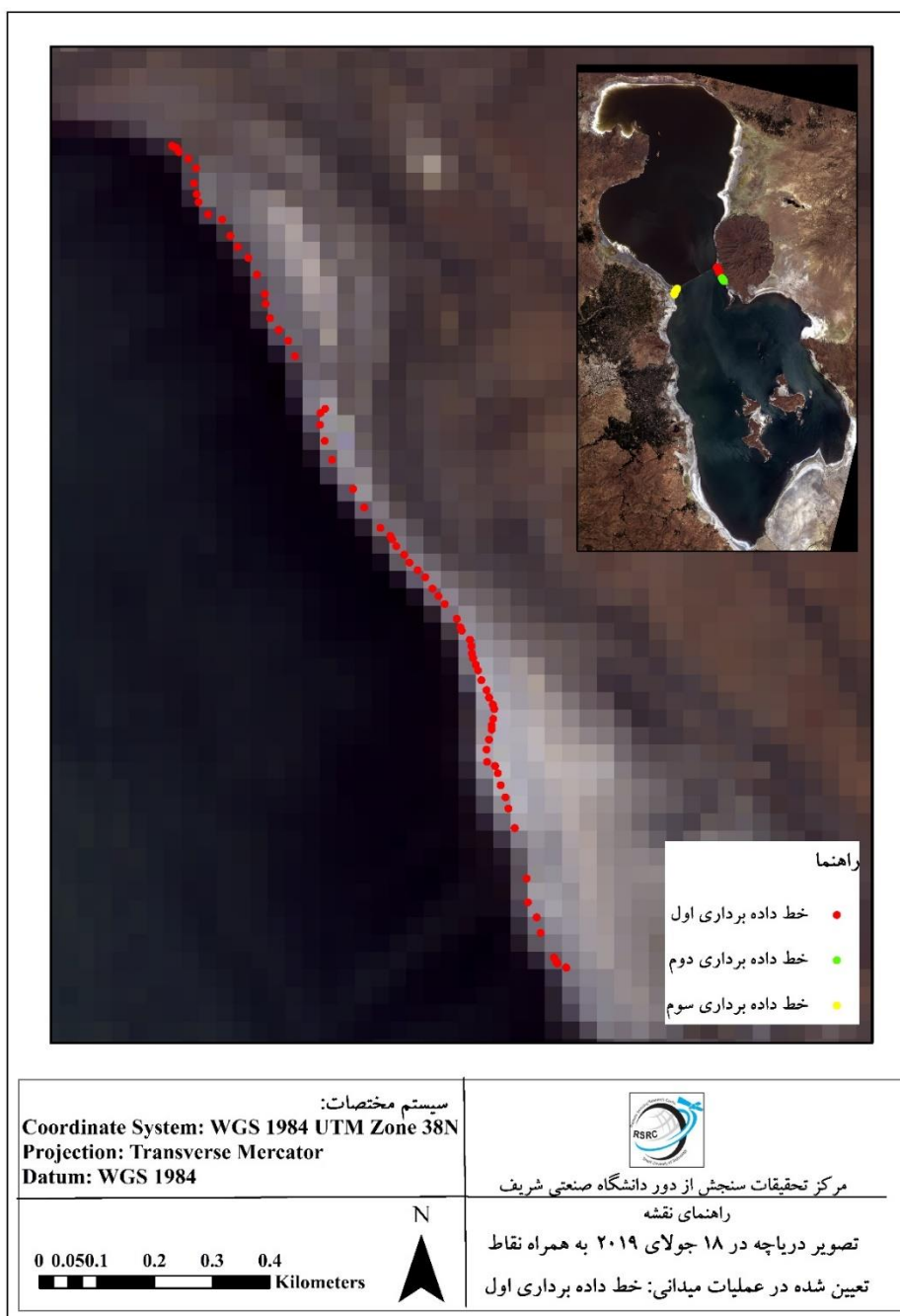


شکل ۱۵: مساحت‌های به دست آمده در این پژوهش و مقایسه‌ی آن با مقادیر به دست آمده از رابطه‌ی کریمی و همکاران (۱۳۹۴)

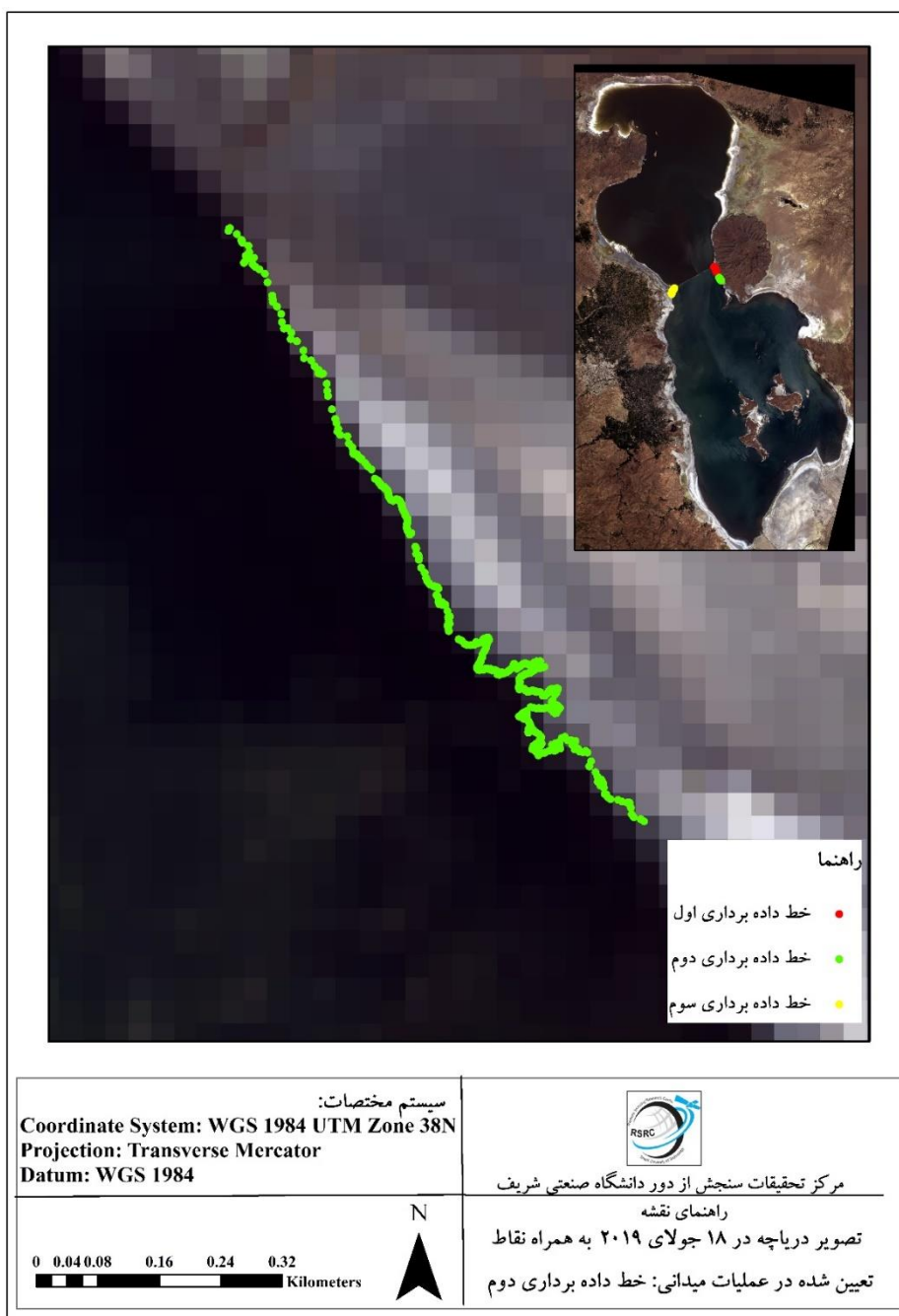
به طور میانگین $286/76$ کیلومتر مکعب (یا $10/85$ درصد) اختلاف میان مساحت‌های به دست آمده در این پژوهش و مساحت‌های به دست آمده بر اساس مطالعه‌ی کریمی و همکاران در سال ۲۰۱۶ وجود دارد. این تفاوت را می‌توان ناشی از تفاوت در روش تعیین مساحت و همچنین استفاده از تصاویر سنجنده‌ی MODIS در پژوهش قبل دانست، چراکه هر پیکسل در تصاویر این سنجنده معادل ۵۰۰ متر است؛ این در حالی است که هر پیکسل در ماهواره‌های لندست ۳۰ متر را تحت پوشش قرار می‌دهد. این اختلاف موجب می‌شود تا تصاویر ماهواره‌های لندست قادر باشند با دقت بالاتری دریاچه را از محیط پیرامون آن تفکیک کنند. از سوی دیگر، توجه به این نکته حائز اهمیت است که رابطه‌ی پیشین تنها با بررسی ۷۸ تصویر از سال ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۴ به دست آمده است. این در حالی است که در پژوهش حاضر ۱۱۶ تصویر از سال ۱۳۶۳ (۱۹۸۴) تا ۱۳۹۷ (۲۰۱۹) بررسی شده‌اند. به دست آوردن رابطه‌ی میان متغیرها با تعداد بالاتری از تصاویر در این پژوهش در کنار استفاده از تصاویر با وضوح بالاتر مزیت پژوهش حاضر نسبت به مطالعه‌ی پیشین محسوب می‌شود.

۵-۲- اعتبارسنجی مرز تعیین‌شده‌ی دریاچه با عملیات میدانی

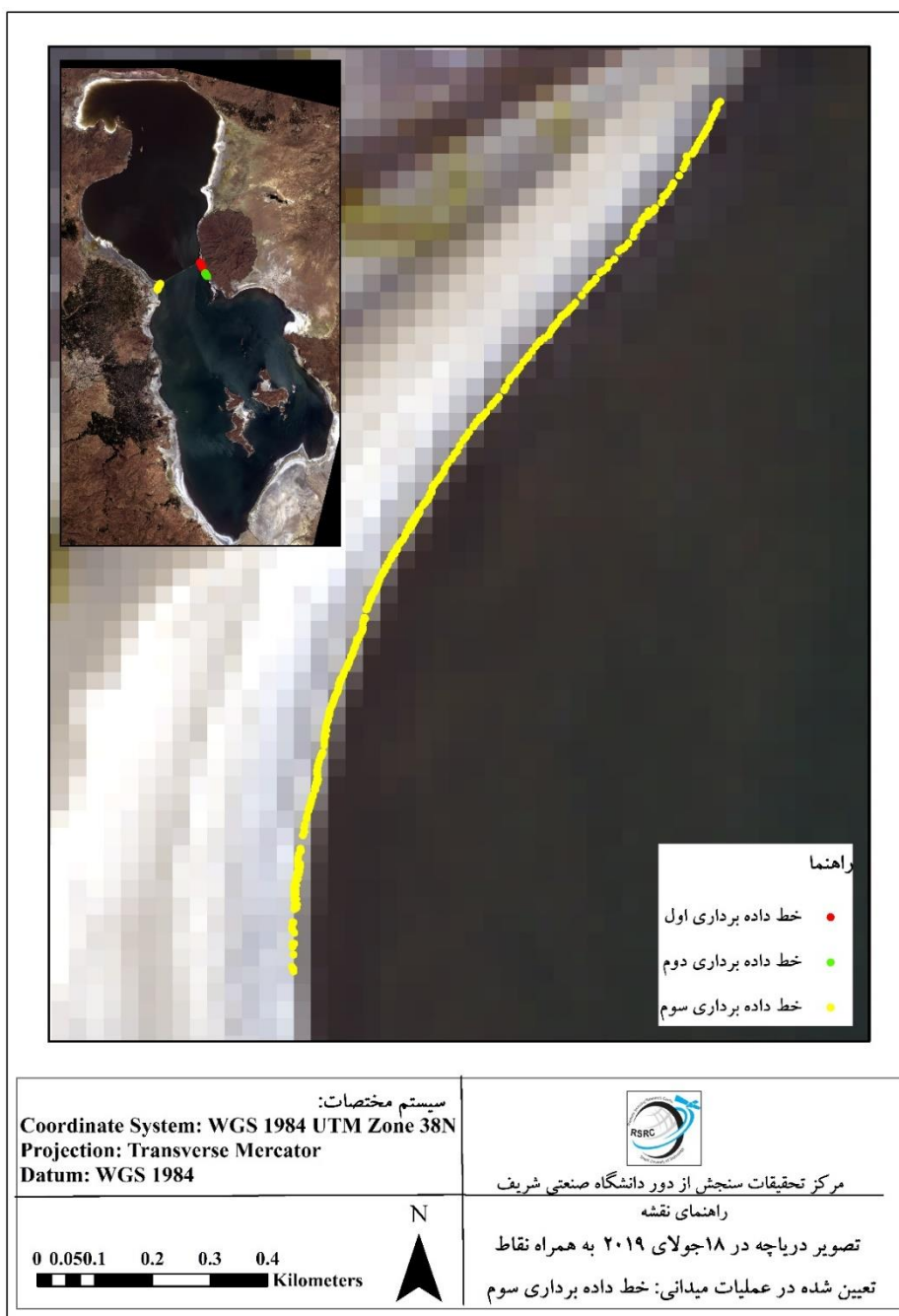
از آنجا که بدنه‌ی آبی دریاچه و مرز آبی آن در هر دو بخش این پژوهش بر اساس فناوری سنجش از دور به دست آمده‌اند نیاز است توسط داده‌های میدانی اعتبارسنجی شوند. به همین منظور طی یک عملیات میدانی در دریاچه‌ی ارومیه، موقعیت تعدادی نقطه روی بخش‌هایی از مرز آبی دریاچه در دو تاریخ دوشنبه ۲۴ تیر و چهارشنبه ۲۶ تیر ۱۳۹۸ توسط دستگاه GPS ثبت گردید. انتخاب این بازه از این جهت صورت پذیرفت که نزدیک به زمان عبور ماهواره‌ی لندست ۸، در تاریخ پنجشنبه ۲۷ تیر ۱۳۹۸، مقارن با ۱۸ جولای ۲۰۱۹ بوده و علاوه بر آن بر اساس پیش‌بینی‌های هواشناسی، هوا آفتابی (بعضاً با آفتاب درخشان) باشد. این نقاط پس از دریافت از دستگاه GPS برای مقایسه در کنار تصاویر RGB قرار گرفتند. در شکل ۱۶، نقشه‌های حاصل از قرارگیری سه خط داده‌برداری در کنار تصویر RGB دریاچه در روز ۲۷ تیر ۱۳۹۸ (۱۸ جولای ۲۰۱۸) مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که داده‌های مربوط به دو خط اول و دوم در روز ۲۴ تیر، مقارن با ۱۵ جولای برداشت شده‌اند و خط داده‌برداری سوم مربوط به روز ۱۷ جولای است.



(الف)



(ب)



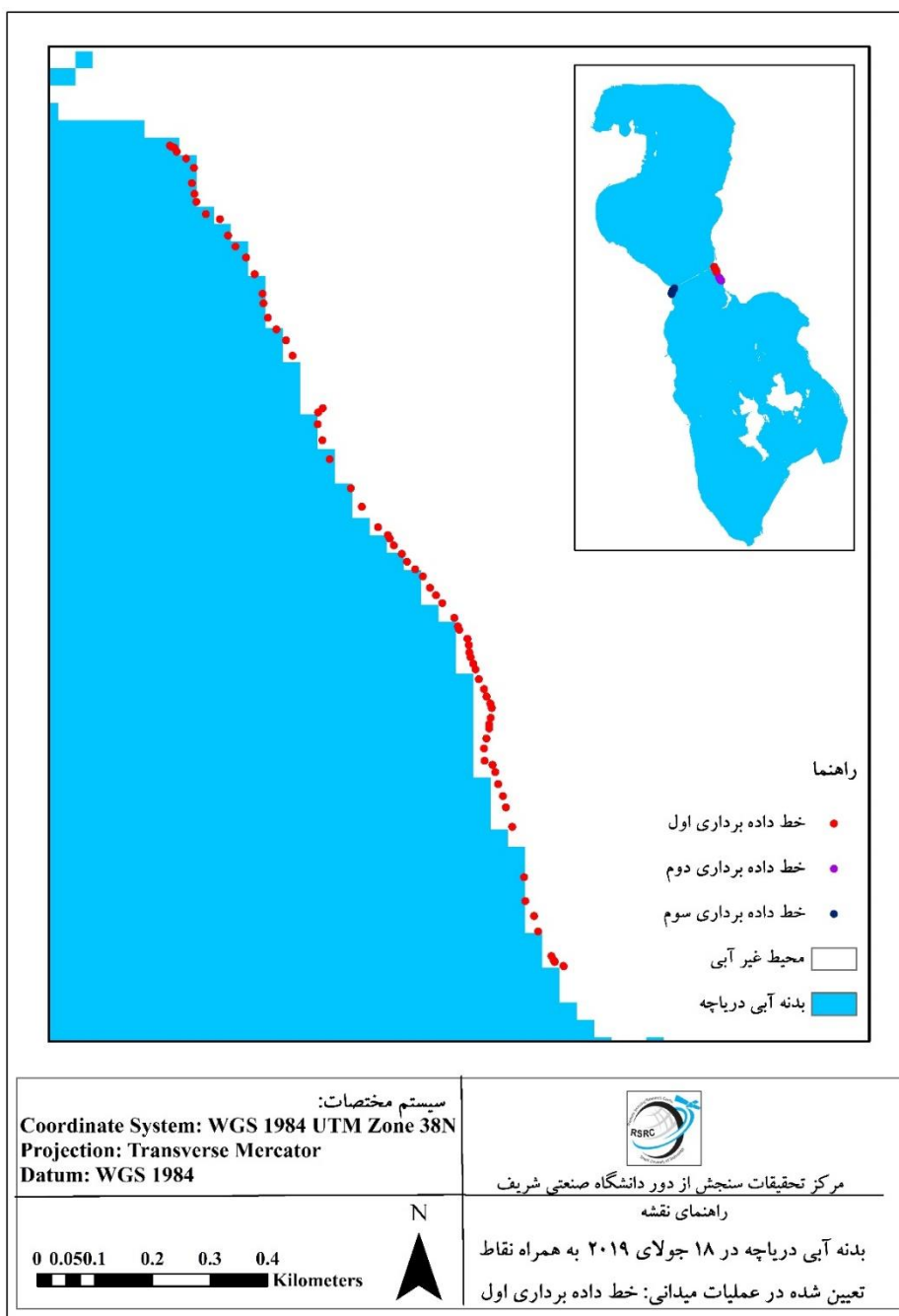
(ج)

شکل ۱۶: نقشه‌های حاصل از قرارگیری خطوط داده برداری شده در کنار تصویر RGB دریاچه در تاریخ ۲۷ تیر ۱۳۹۸ (۱۸

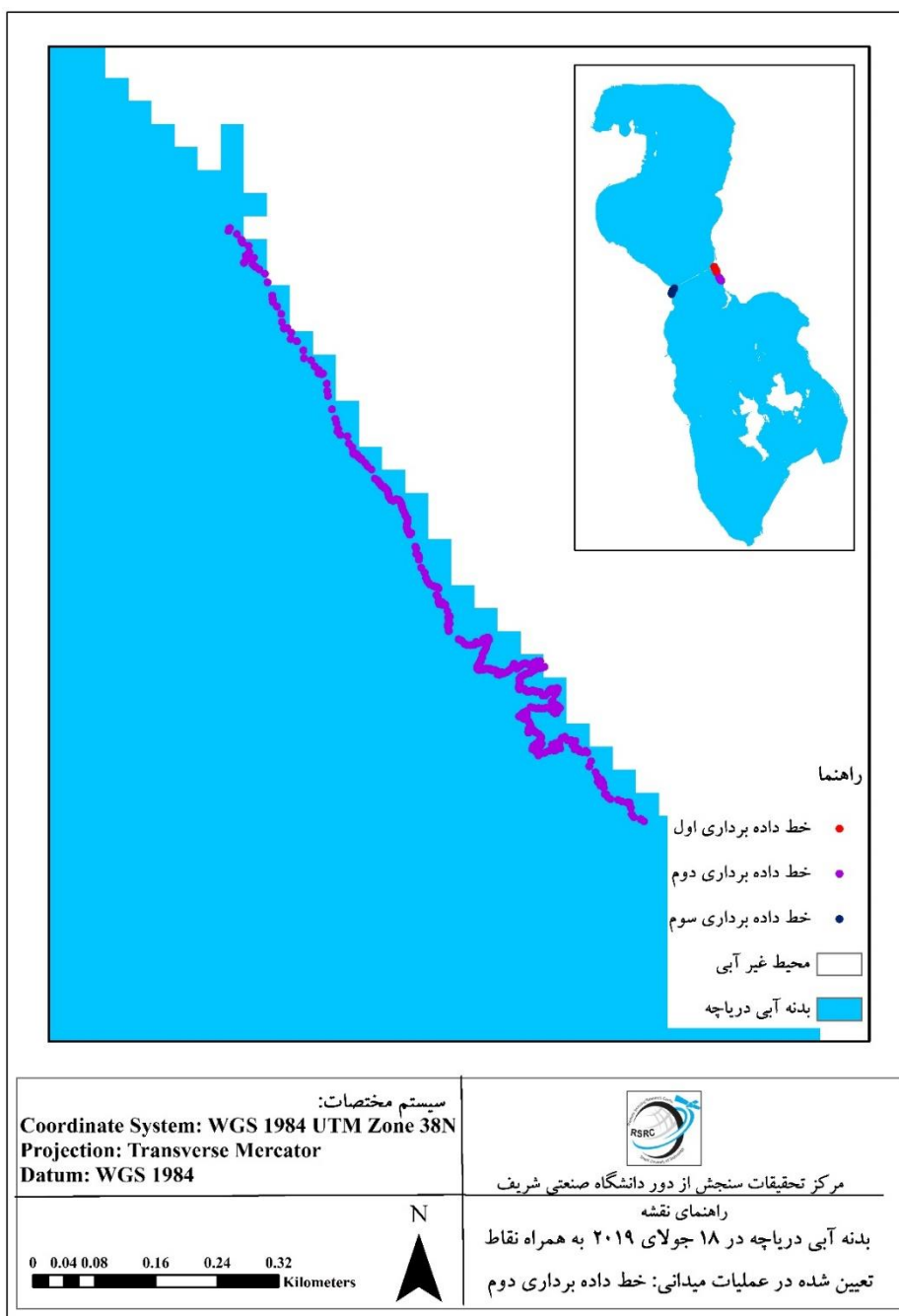
جولای ۲۰۱۹) الف) خط داده برداری اول ب) خط داده برداری دوم ج) خط داده برداری سوم

در مرحله‌ی بعد نیز بدنه‌ی آبی دریاچه به روش k-means استخراج شده و نقاط روی خط داده برداری در

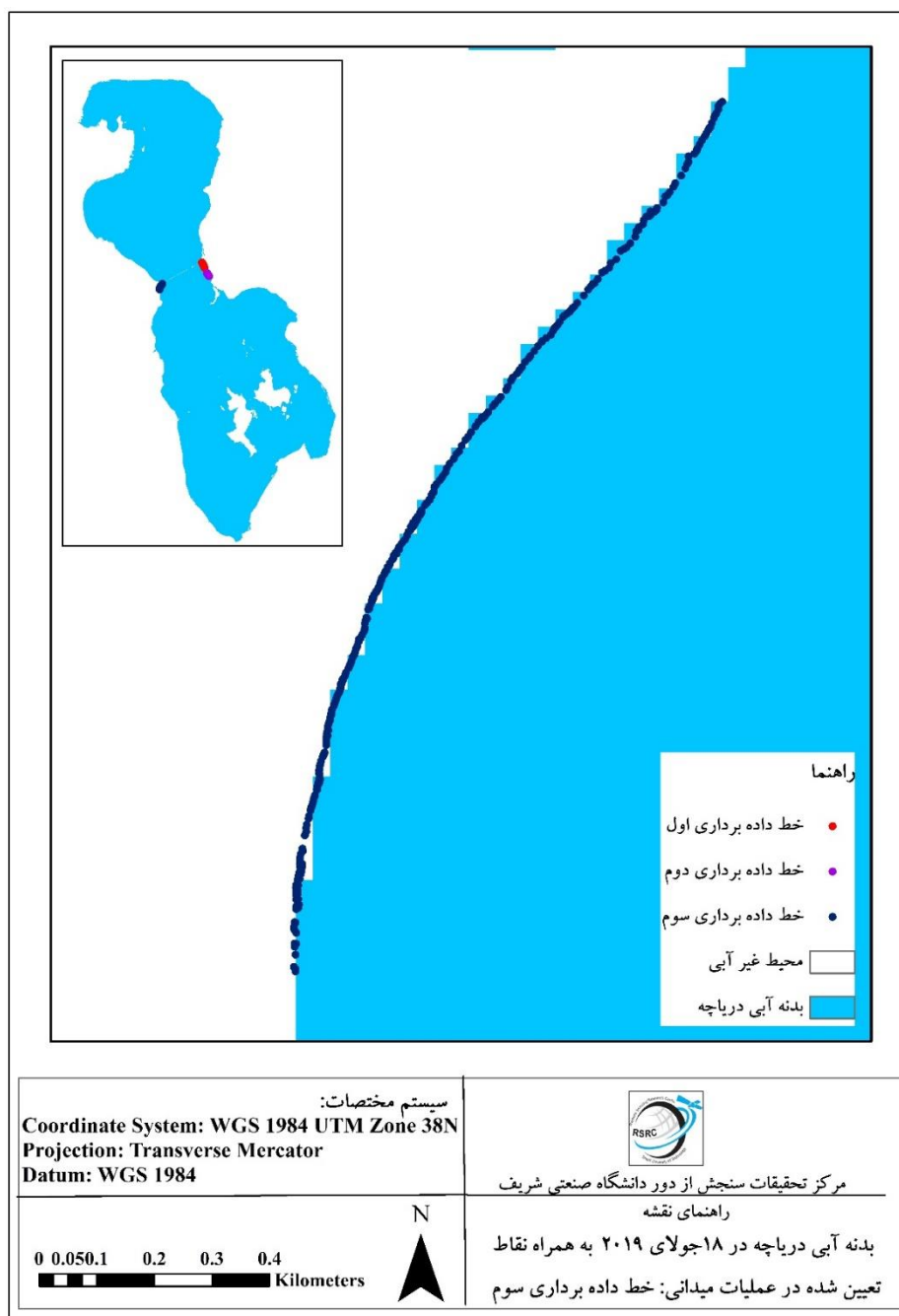
کنار مرز آبی شناسایی شده قرار گرفتند که در شکل ۱۷ قابل ملاحظه هستند.



(الف)



(ب)



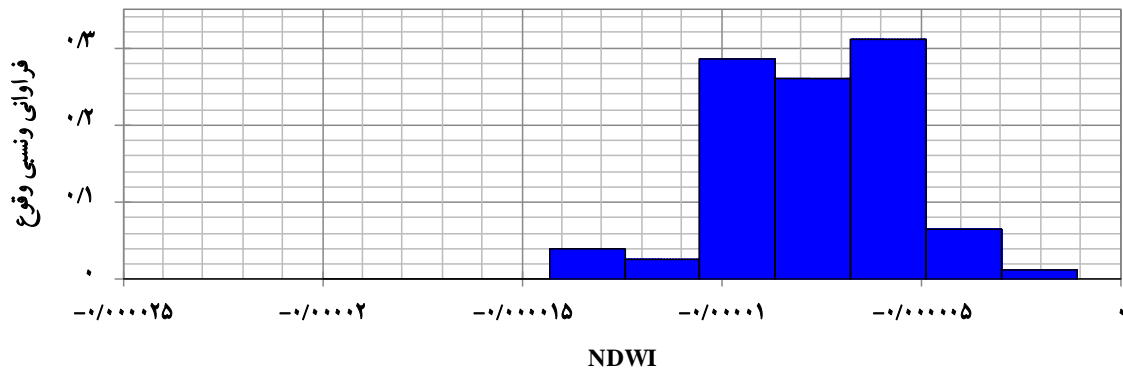
(ج)

شکل ۱۷: نقشه‌های حاصل از قرارگیری خطوط داده‌برداری شده در کنار بدنه‌ی آبی شناسایی‌شده‌ی دریاچه در تاریخ ۲۷ تیر ۱۳۹۸ (۱۸ جولای ۲۰۱۹) الف) خط داده‌برداری اول ب) خط داده‌برداری دوم ج) خط داده‌برداری سوم

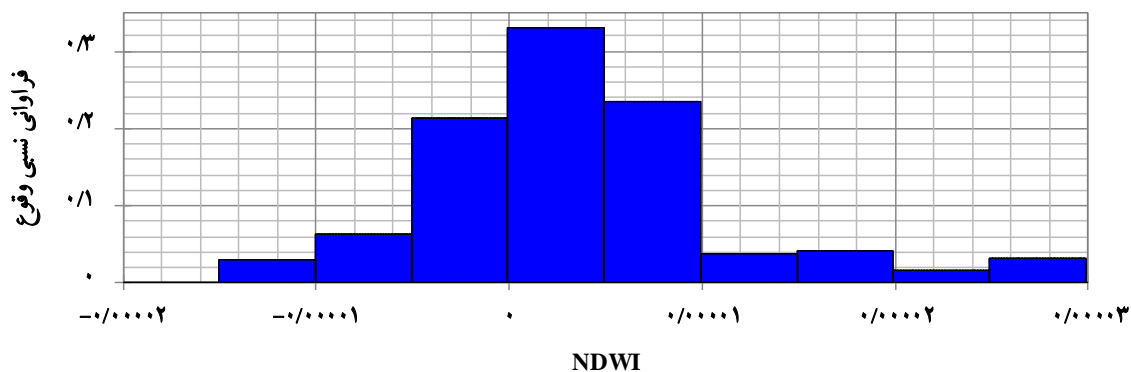
همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل ۱۷ ج) انطباق بیش‌تری میان نقاط برداشت‌شده و مرز شناسایی‌شده وجود دارد. در حالی که در شکل‌های الف) و ب) تفاوت بیش‌تری میان نقاط مرزی شناسایی‌شده به روش

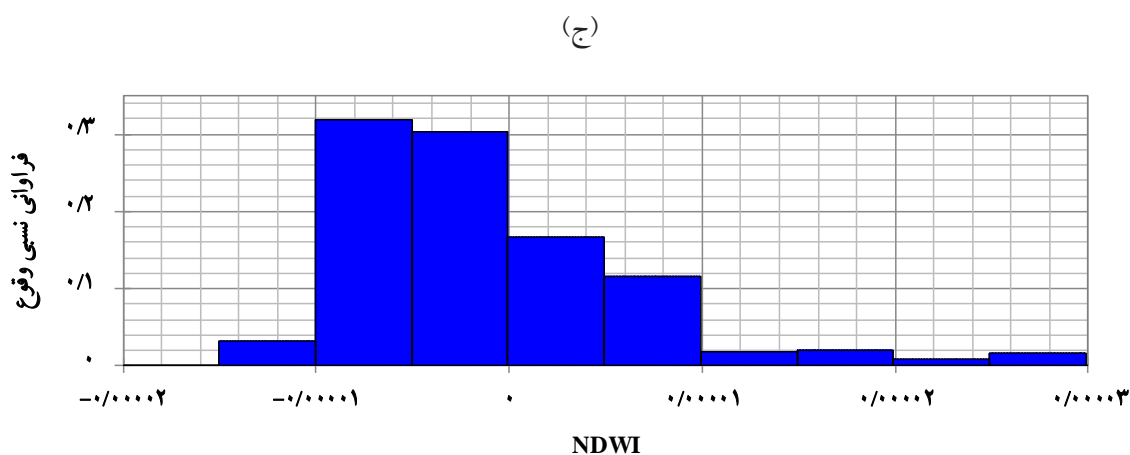
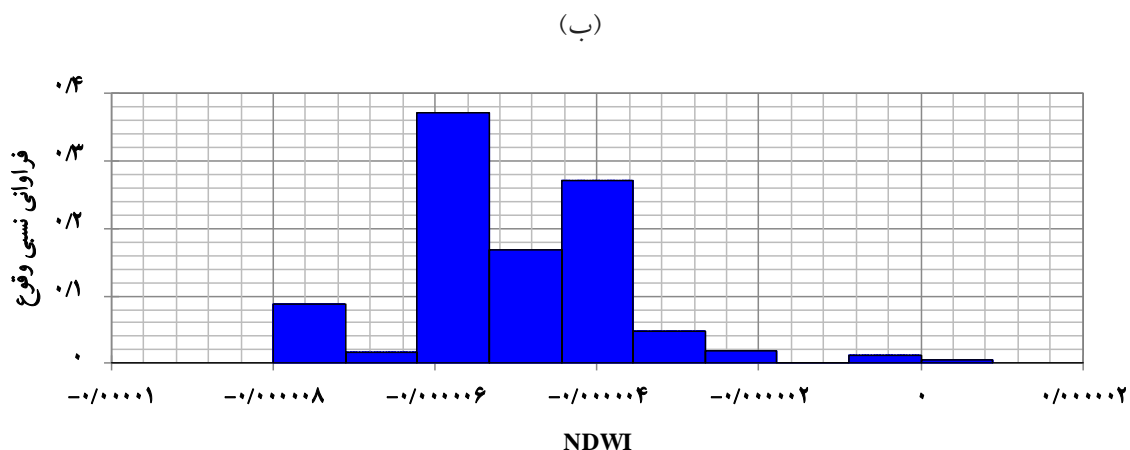
زمینی و به کمک فناوری سنجش از دور وجود دارد. یکی از دلایل احتمالی برای تفاوت میان این دو مرز، تغییرات بالای مرز آبی است. در عملیات میدانی انجام گرفته در روز اول مشاهده شد که مرز دریاچه با سرعت بالایی شروع به پیشروی و تغییر می‌کند. علاوه بر وجود تفاوت در مرز آبی واقعی در زمان ثبت تصویر و زمان برداشت داده‌ها، رطوبت باقی مانده در زمین پس از پسروی آب می‌تواند عاملی برای بروز خطا در هنگام تعیین مرز بدنه‌ی آبی با کمک فناوری سنجش از دور باشد. علاوه بر این، یکی از دلایل تفاوت بالاتر میان دو مرز در نیمه‌ی شرقی نسبت به غربی، می‌تواند شیب کم‌تر زمین در این بخش و در نتیجه تغییرات بالاتر مرز آبی باشد که باید مورد بررسی قرار گیرد. البته در استفاده از فناوری سنجش از دور، محدودیت وضوح مکانی تصاویر ماهواره‌ای نیز عاملی دیگر است که نباید نادیده گرفته شود.

در ادامه برای بررسی NDWI در مرزهای آبی، مقدار این شاخص برای پیکسل‌های متناظر با هر یک از سه خط برداشت داده بر اساس تصویر ثبت شده در تاریخ ۱۸ جولای ۲۰۱۹ استخراج شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. هیستوگرام مقادیر NDWI برای هر خط داده‌برداری و همین‌طور مجموع نقاط بر روی سه خط در قابل مشاهده است.



(الف)





(د) شکل ۱۸: هیستوگرام NDWI در مرزهای آبی تعیین شده توسط عملیات میدانی در تاریخ ۱۸ جولای ۲۰۱۹ (الف) خط داده‌برداری اول (ب) خط داده‌برداری دوم (ج) خط داده‌برداری سوم (د) هر سه خط داده‌برداری

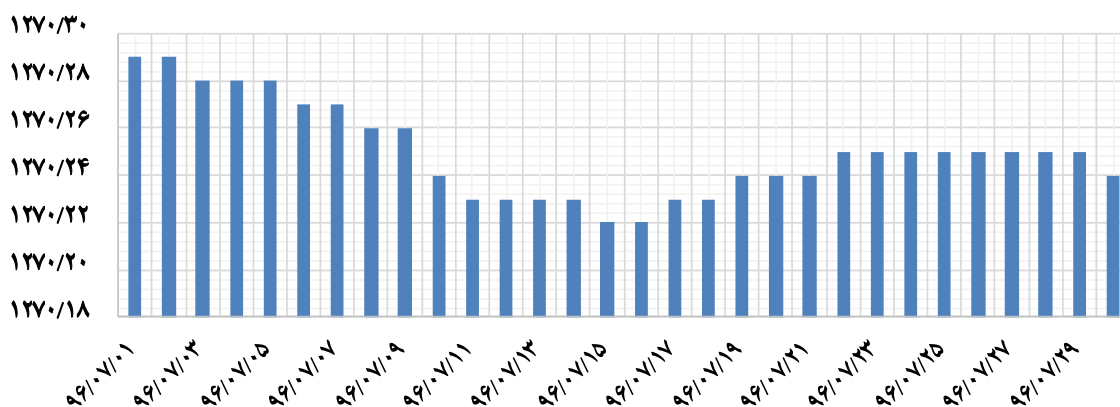
همانگونه که مشاهده می‌شود، در خطوط اول و سوم داده‌برداری، اغلب نقاط مرزی دارای مقدار NDWI منفی هستند، حال آنکه این مقدار در نقاط روی خط سوم بیش از صفر است. در جدول ۴ نیز متغیرهای آماری NDWI در مرزهای شناسایی شده‌ی دریاچه آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار این شاخص در محدوده‌ی $10^{-5} \times 1/41$ تا $10^{-5} \times 2/89$ تغییر کرده و دارای مقدار میانگین $10^{-7} \times 9/23$ است. لازم به ذکر است که در بخش اولیه، یعنی تعیین مساحت دریاچه با کمک NDWI، حد آستانه‌ی این شاخص بر اساس ۵۰ پروفیل رسم شده به طور میانگین $10^{-7} \times 0/406$ به دست آمده بود. مقدار جدید میانگین آستانه‌ی NDWI، یعنی $10^{-7} \times 9/23$ به دلیل داشتن مقدار کمتر، تعداد کمتری از پیکسل‌ها را به عنوان محیط آبی شناسایی می‌کند.

جدول ۴: شاخص‌های آماری NDWI در سه خط انجام داده‌برداری

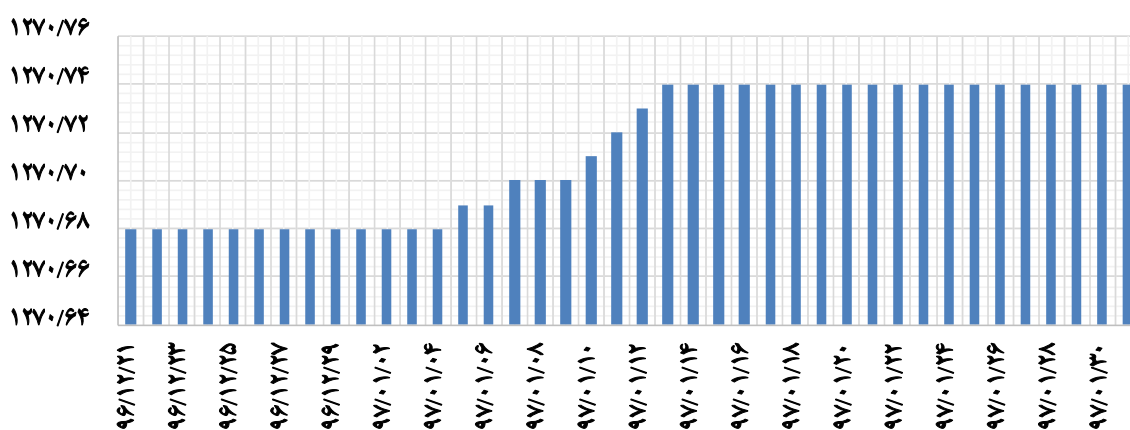
خط داده‌برداری	میانگین	پیشینه	کمینه	انحراف از معیار
اول	$-7/63 \times 10^{-6}$	$-2/07 \times 10^{-6}$	$-1/31 \times 10^{-5}$	$2/44 \times 10^{-6}$
دوم	$3/76 \times 10^{-6}$	$2/89 \times 10^{-5}$	$-1/41 \times 10^{-5}$	$7/50 \times 10^{-6}$
سوم	$-4/99 \times 10^{-6}$	$7/92 \times 10^{-7}$	$-7/93 \times 10^{-6}$	$1/36 \times 10^{-6}$
هر سه خط	$-9/23 \times 10^{-7}$	$2/89 \times 10^{-5}$	$-1/41 \times 10^{-5}$	$7/15 \times 10^{-6}$

۳-۵- استخراج نقشه‌ی بسیمتری دریاچه‌ی ارومیه

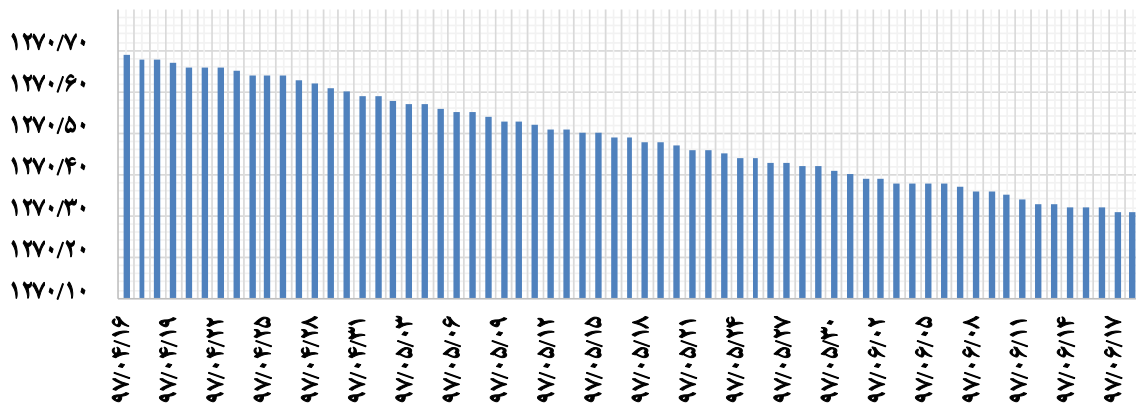
اطلاعات در دسترس از اندازه‌گیری‌های میدانی انجام‌شده، تراز کف دریاچه در هر نقطه‌ی پیمایش‌شده، به همراه مختصات آن نقطه است که به کمک آن می‌توان عمق آب را در هر یک از نقاط بدست آورد. با توجه به مشخص نبودن تاریخ برداشت نقاط در یک دوره (که مطابق جدول ۳ بعضاً به لحاظ زمانی، طولانی است)، در ابتدا تغییرات تراز سطح آب در هر دوره مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقادیر روزانه‌ی تراز سطح آب در هر یک از دوره‌های داده‌برداری بر حسب تاریخ قرائت داده‌ی متناظر، ترسیم شده و در شکل ۱۹ نشان داده شده است.



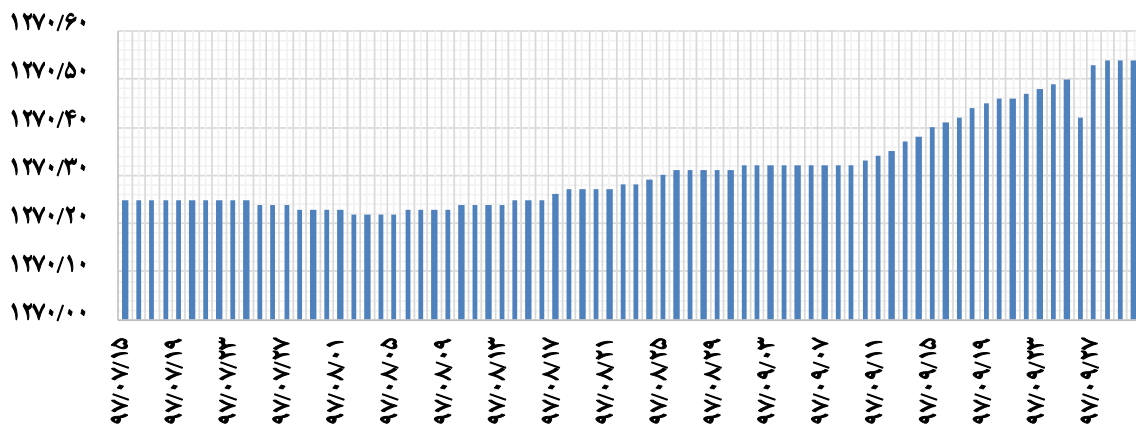
(الف)



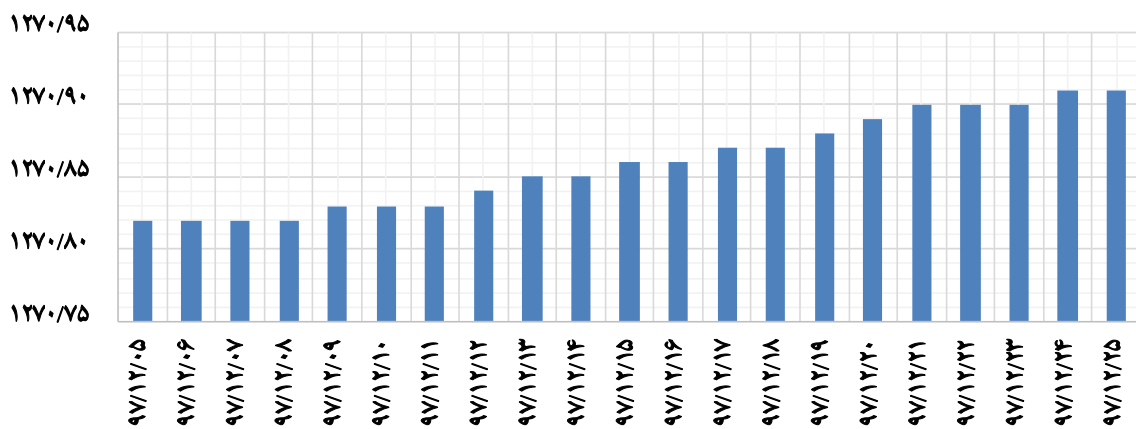
(ب)



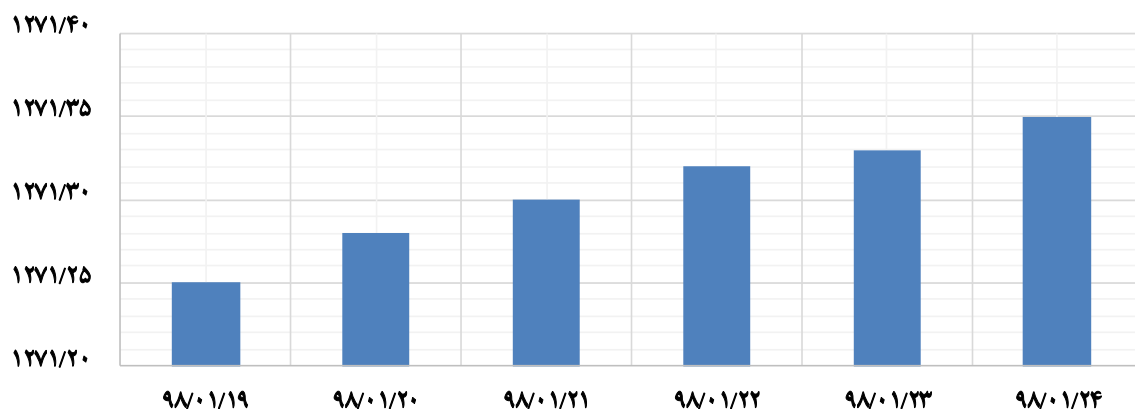
(ا)



(ب)



(ج)



(و)

شکل ۱۹: نمودار روزانه‌ی تراز سطح آب دریاچه در هریک از دوره‌های عمق‌سنجی (الف) دوره‌ی اول (ب) دوره‌ی دوم (ج) دوره‌ی سوم (د) دوره‌ی چهارم (ه) دوره‌ی پنجم (و) دوره‌ی ششم

در جدول ۵ نیز شاخص‌های آماری میانگین و انحراف از معیار تراز سطح آب دریاچه، به همراه مقادیر بیشینه، کمینه و دامنه‌ی تغییرات آن در بازه‌های زمانی فوق مشاهده می‌شود.

جدول ۵: شاخص‌های آماری تراز سطح آب دریاچه در بازه‌های زمانی انجام داده‌برداری

دوره‌ی برداشت	میانگین (متر)	بیشینه (متر)	کمینه (متر)	دامنه‌ی تغییرات (متر)	انحراف از معیار (متر)
اول	۱۲۷۰/۲۵	۱۲۷۰/۲۹	۱۲۷۰/۲۲	۰/۰۷	۰/۰۲۰
دوم	۱۲۷۰/۷۱	۱۲۷۰/۷۴	۱۲۷۰/۶۸	۰/۰۶	۰/۰۲۸
سوم	۱۲۷۰/۴۹	۱۲۷۰/۶۹	۱۲۷۰/۳۱	۰/۳۸	۰/۱۱۵
چهارم	۱۲۷۰/۳۱	۱۲۷۰/۵۴	۱۲۷۰/۲۲	۰/۳۲	۰/۰۹۲
پنجم	۱۲۷۰/۸۶	۱۲۷۰/۹۱	۱۲۷۰/۸۲	۰/۰۹	۰/۰۳۲
ششم	۱۲۷۰/۳۱	۱۲۷۱/۲۵	۱۲۷۱/۳۵	۰/۱۰	۰/۰۳۶

همان‌طور که در شکل ۱۹ و جدول ۵ مشاهده می‌شود، میزان تغییرات تراز سطح آب در برخی از دوره‌ها خصوصاً مراحل سوم و چهارم بسیار زیاد است که خود منبع احتمالی خطا است، چراکه با توجه به تغییرات بالای تراز سطح آب، امکان ترسیب و یا انحلال نمک موجود در کف دریاچه در این بازه افزایش می‌یابد. بنابراین، منطقی است که داده‌های برداشت‌شده در هر زیربازه از هر مرحله باید به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و از تجمیعشان خودداری گردد. اما در این پژوهش، اطلاعات دقیق‌تری از زمان اندازه‌گیری عمق

به روزرسانی رابطه‌ی تراز آب-مساحت-حجم دریاچه‌ی ارومیه و تهیه‌ی نقشه‌ی بسیمتری آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست

هر نقطه در هر یک از دوره‌ها وجود ندارد. بنابراین، این مسئله تفکیک نقاط را ناممکن کرده و موجب می‌شود تمامی نقاط مربوط به یک دوره به صورت یکپارچه بررسی شده و در نهایت خطای مدل‌سازی افزایش یابد. با در نظر گرفتن چالش ناشی از نبود اطلاعات از زیربازه‌ها، لازم است تصویری به نمایندگی از هر بازه انتخاب شده و به عنوان مبنای مدل‌سازی آن دوره مورد استفاده قرار گیرد. به همین منظور، تصاویر ثبت شده از دریاچه توسط ماهواره‌ی لندست ۸ در بازه‌ی زمانی متناظر با هر یک از دوره‌های داده‌برداری در کنار ۱۰ روز قبل و پس از شروع و پایان دوره مشخص شده و مورد بررسی قرار گرفتند. برای انتخاب تصویر مناسب، در ابتدا نبود ابر و یا غبار بر فراز دریاچه معیار قرار داده شد. در مرحله‌ی بعد از میان تصاویر واضح، اولویت با تصویری است که در بازه‌ی انجام عمق‌سنجی قرار داشته باشد، نه روزهای پیش و یا پس از آن. در جدول ۶، تاریخ‌های شروع و اتمام هریک از دوره‌های عمق‌سنجی بر اساس تقویم میلادی برای یافتن تصاویر منطبق در تصاویر ماهواره‌ای آورده شده است.

جدول ۶: تبدیل تاریخ‌های شمسی به میلادی برای یافتن نزدیک‌ترین تصویر از نظر زمانی در هر دوره

تاریخ شمسی		تاریخ میلادی		دوره‌ی برداشت
شروع اندازه‌گیری	پایان اندازه‌گیری	شروع اندازه‌گیری	پایان اندازه‌گیری	
۱۳۹۶/۰۷/۰۱	۱۳۹۶/۰۷/۳۰	۲۰۱۷/۰۹/۲۳	۲۰۱۷/۱۰/۲۲	اول
۱۳۹۶/۱۲/۲۱	۱۳۹۷/۰۱/۳۱	۲۰۱۸/۰۳/۱۲	۲۰۱۸/۰۴/۲۰	دوم
۱۳۹۷/۰۴/۱۶	۱۳۹۷/۰۶/۱۸	۲۰۱۸/۰۷/۰۷	۲۰۱۸/۰۹/۰۹	سوم
۱۳۹۷/۰۷/۱۵	۱۳۹۷/۰۹/۳۰	۲۰۱۸/۱۰/۰۷	۲۰۱۸/۱۲/۲۱	چهارم
۱۳۹۷/۱۲/۰۵	۱۳۹۷/۱۲/۲۵	۲۰۱۹/۰۲/۲۴	۲۰۱۹/۰۳/۱۶	پنجم
۱۳۹۸/۰۱/۱۹	۱۳۹۸/۰۱/۲۴	۲۰۱۹/۰۴/۰۸	۲۰۱۹/۰۴/۱۳	ششم

در جدول ۷ نیز، تاریخ تصویر نماینده‌ی هر دوره، به همراه تراز متناظر آن آمده است. جدول ۷: تاریخ برداشت تصویر منتخب در هر دوره به همراه تراز متناظر سطح آب

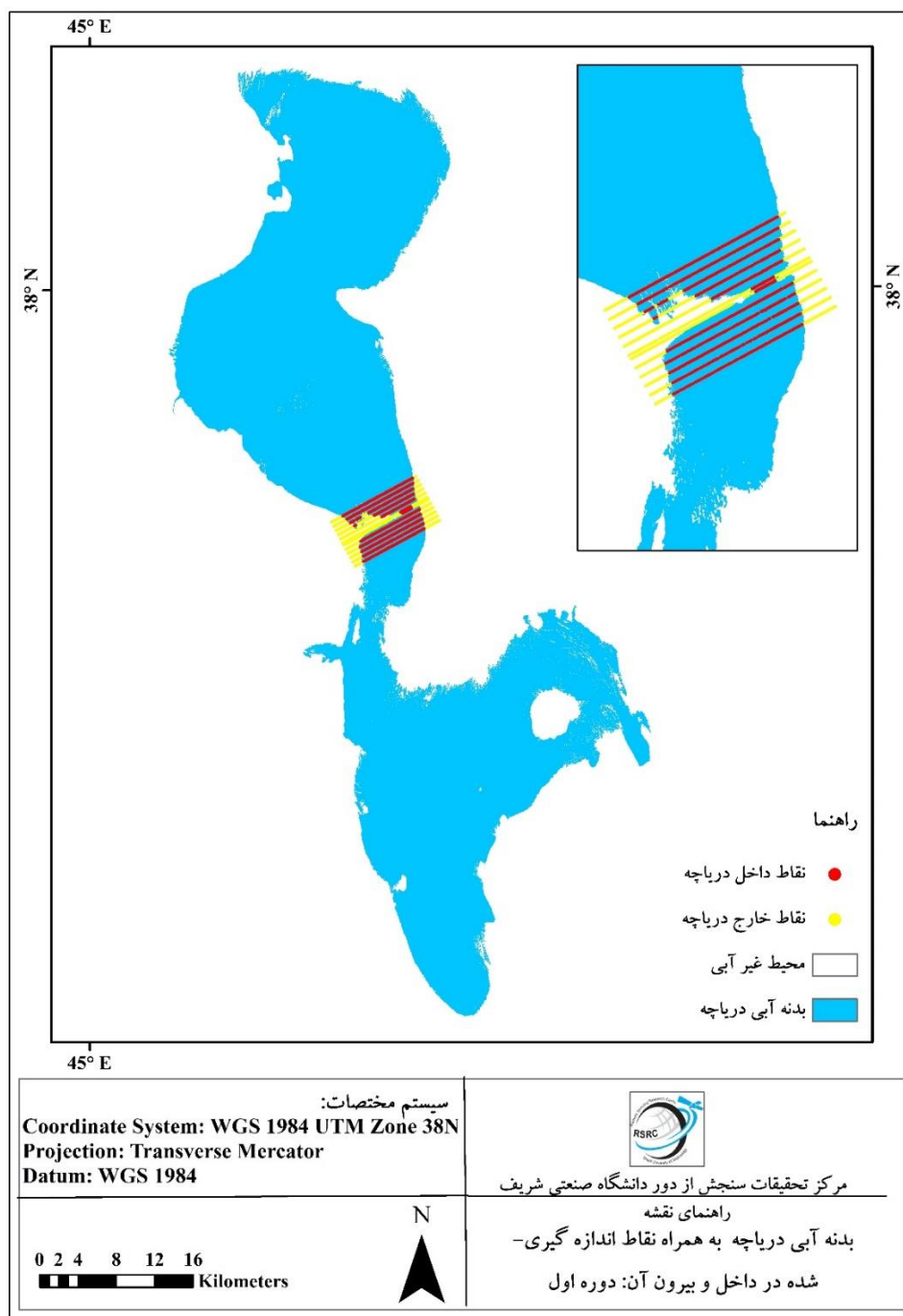
دوره‌ی برداشت	تاریخ ثبت تصویر	تراز سطح آب (متر)
اول	۲۳ شهریور ۱۳۹۶	۱۲۷۰/۳۲
دوم	۶ اردیبهشت ۱۳۹۷	۱۲۷۰/۷۵
سوم	۲۶ شهریور ۱۳۹۷	۱۲۷۰/۳۷
چهارم	۱ دی ۱۳۹۷	۱۲۷۰/۵۴
پنجم	۱۵ اسفند ۱۳۹۷	۱۲۷۰/۸۲

دوره‌ی برداشت	تاریخ ثبت تصویر	تراز سطح آب (متر)
ششم	۲۴ فروردین ۱۳۹۸	۱۲۷۱/۳۵

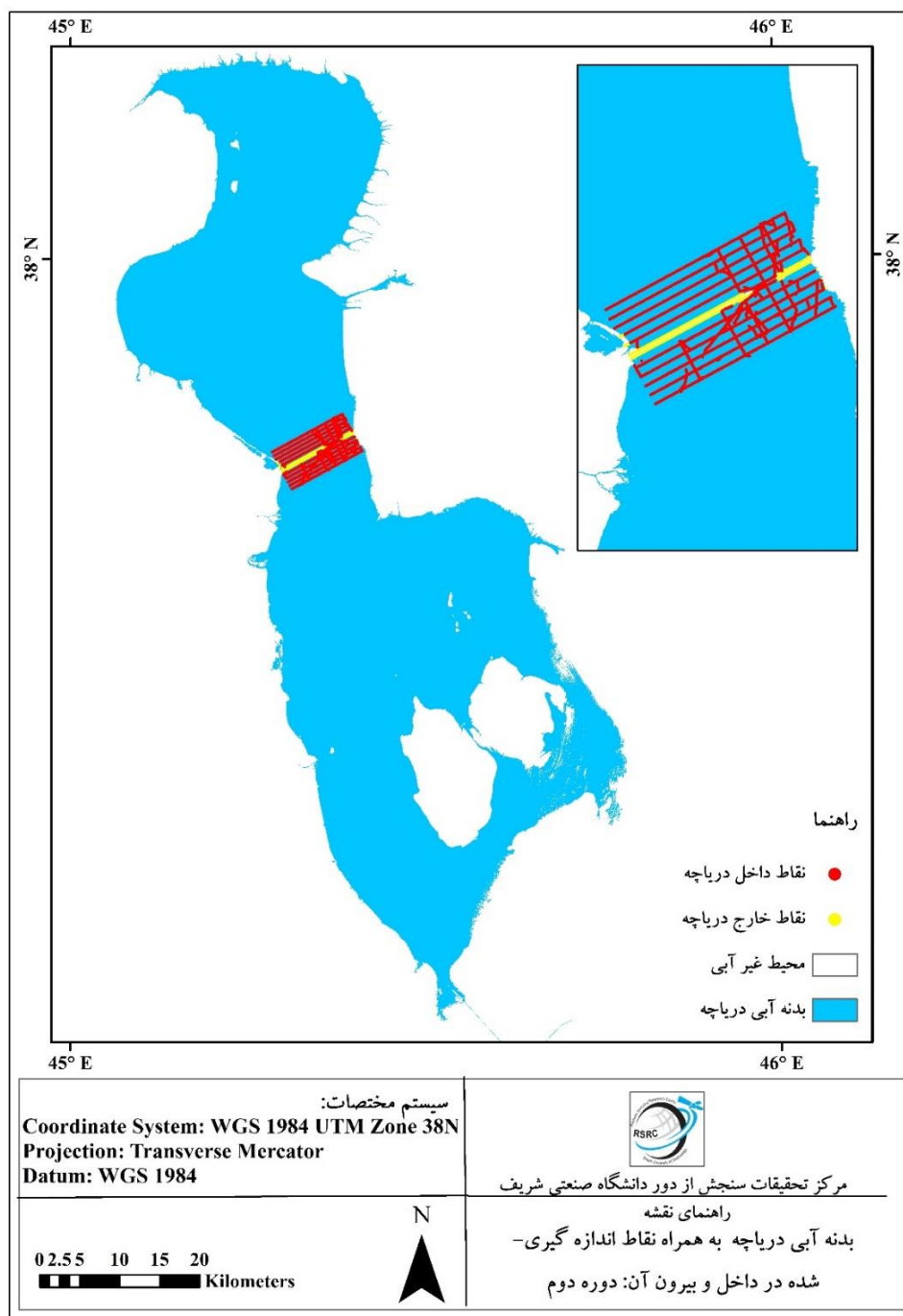
در اولین مرحله از بررسی نقاط، لازم است نقاط داده‌برداری شده در هر دوره نسبت به سطح دریاچه در آن دوره مورد بررسی قرار گیرند تا نقاط داخل بدنه‌ی آبی از نقاط خارج از آن تفکیک گردند؛ چرا که برای تعیین عمق سایر نقاط دریاچه نیاز به داده‌های مربوط به نقاطی وجود دارد که در داخل بدنه‌ی آبی واقع شده‌اند. در این بخش، با توجه به تعداد کم‌تر تصاویر، برای افزایش دقت، تعیین بدنه‌ی آبی دریاچه با کمک روش طبقه‌بندی با نظارت ماشین بردار پشتیبان^۱ یا به اختصار SVM صورت گرفته و برای اطمینان از برابری تراز در سراسر دریاچه، از بخش‌هایی از آن که منفک از بدنه‌ی اصلی تشخیص داده شده‌اند صرف نظر شده است. در جدول ۸، مشخصات مورد نیاز برای محاسبه‌ی سپیدایی آمده است. شکل ۱۰ بدنه‌ی آبی دریاچه در تصاویر منتخب شش دوره به همراه نقاط اندازه‌گیری شده در داخل و بیرون دریاچه در زمان متناظر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دوره‌های اول و خصوصاً سوم، تعداد نسبتاً زیادی از نقاط در خارج از بدنه‌ی آبی دریاچه واقع شده‌اند و برای انجام این پژوهش مفید نیستند و باید از داده‌های آموزشی حذف گردند.

جدول ۸: مشخصات هواشناسی ایستگاه ارومیه در زمان دریافت هر یک از تصاویر

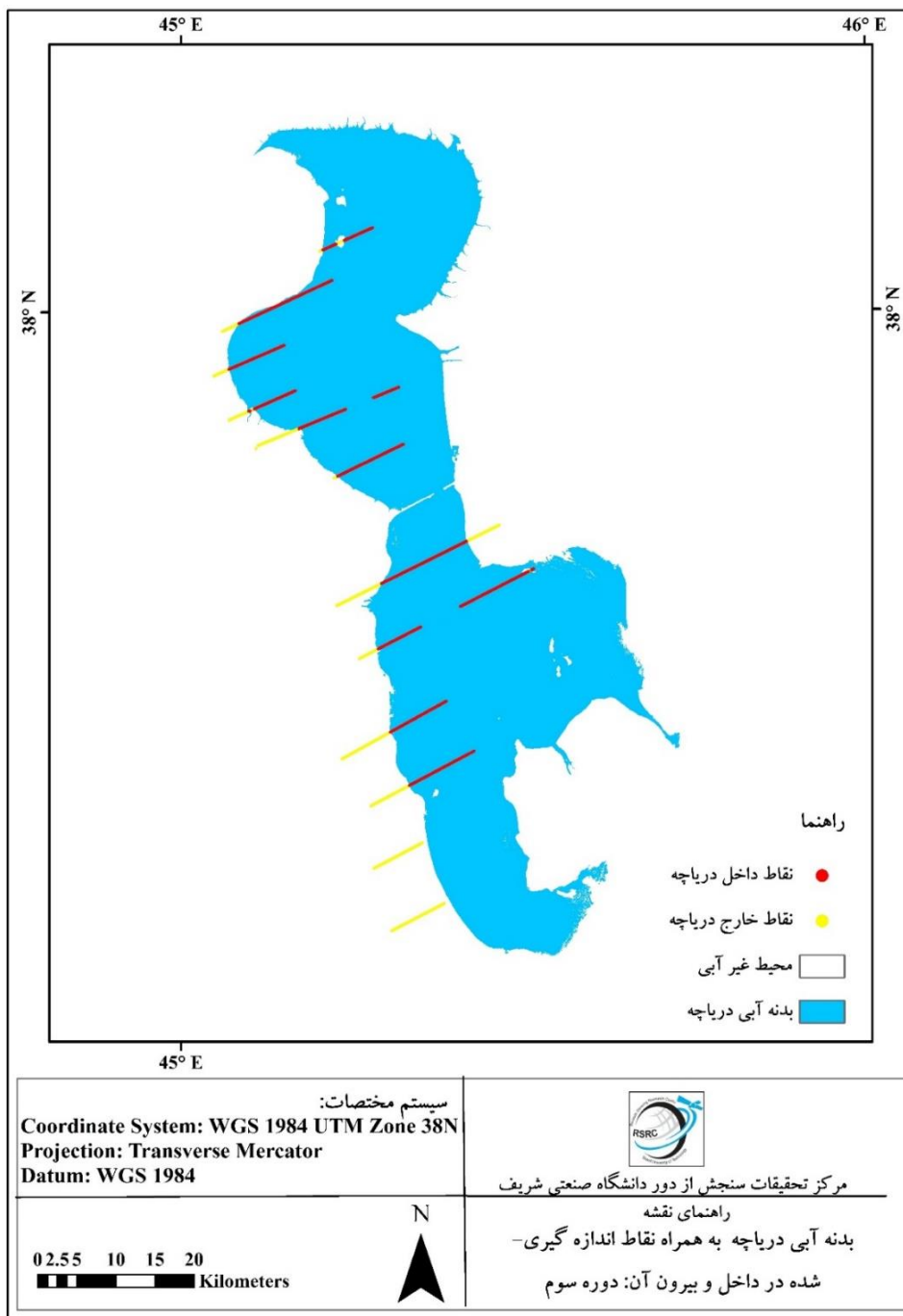
مرحله	دمای میانگین	فشار	رطوبت نسبی
اول	۲۷/۶۲۵۷۳۶۳۷	۸۷۰۱۳/۸۷۲۵۳	۳۱/۰
دوم	۱۹/۰۹۵۷۲۰۰۵	۸۶۹۲۲/۶۰۷۰۰	۵۰/۲
سوم	۳۰/۲۶۴۰۵۱۵۱	۸۶۱۲۸/۸۲۳۵۵	۳۷/۰
چهارم	۴/۱۷۳۷۰۶۱۷۶	۸۷۰۵۳/۷۷۱۵۶	۸۳/۵
پنجم	۵/۹۴۲۹۲۲۷۰۲	۸۷۱۰۷/۳۰۹۹۶	۵۲/۶
ششم	۱۴/۹۱۰۱۶۱۸۹	۸۶۷۲۶/۳۴۷۵۷	۴۴/۳



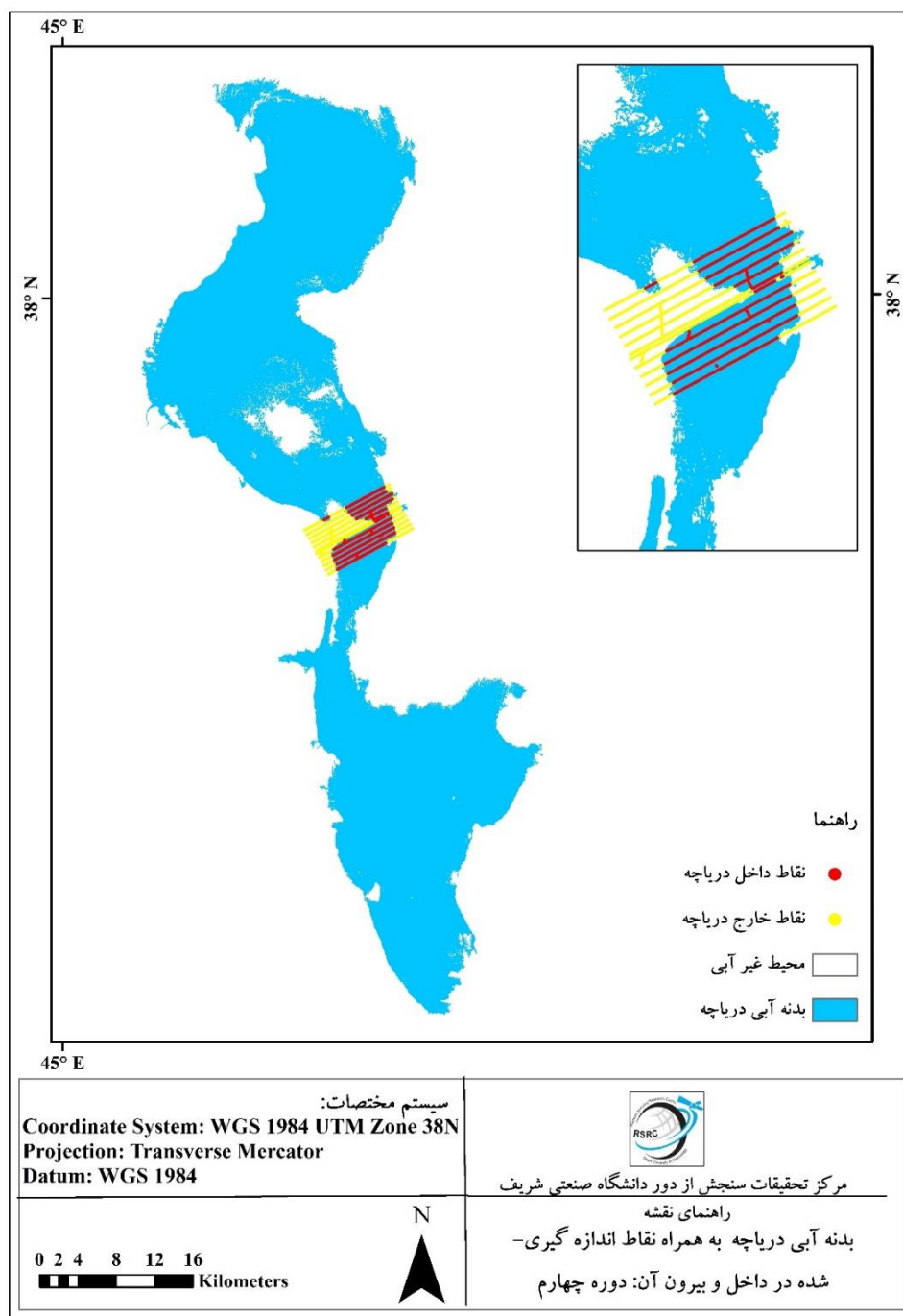
(الف)



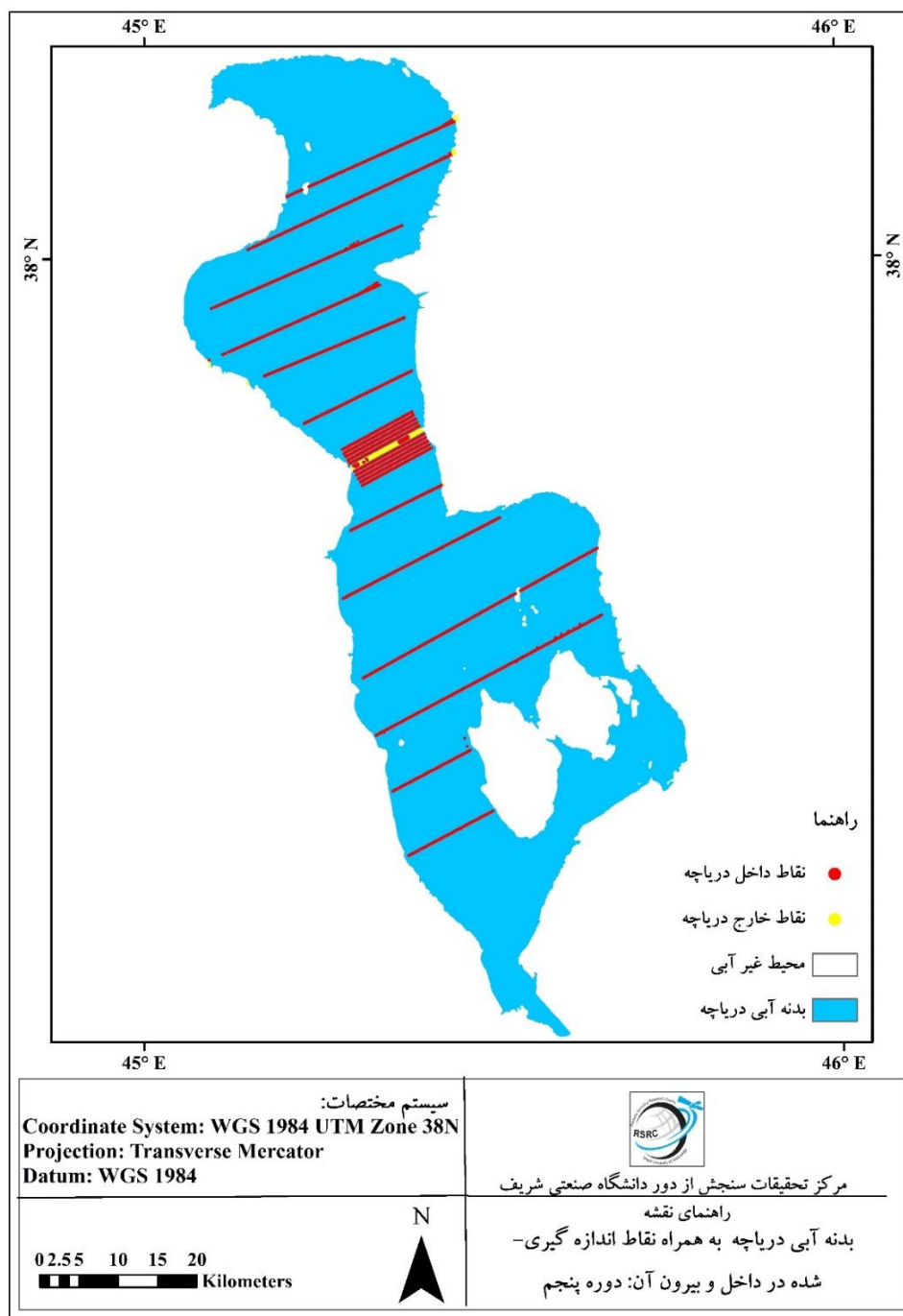
(ب)



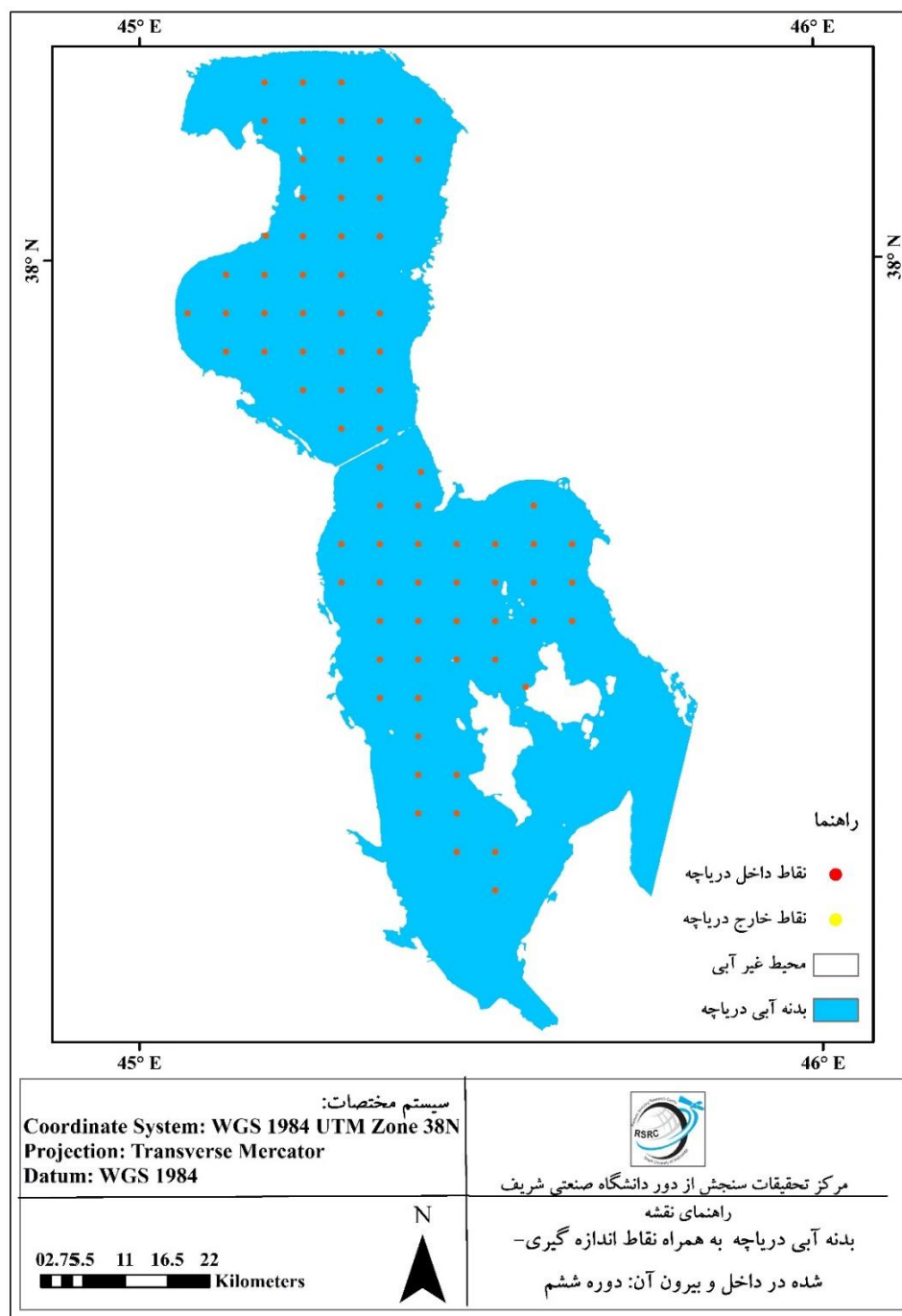
(ج)



(د)



(ه)



(و)

شکل ۲۰: بدنه‌ی آبی دریاچه در تصاویر منتخب شش دوره به همراه نقاط اندازه‌گیری شده در داخل و بیرون دریاچه در زمان متناظر (الف) دوره‌ی اول (ب) دوره‌ی دوم (ج) دوره‌ی سوم (د) دوره‌ی چهارم (ه) دوره‌ی پنجم (و) دوره‌ی ششم

سپس با توجه به اینکه نتیجه‌ی عمق‌سنجی در مراحل اول تا پنجم به صورت تراز کف دریاچه بیان شده، لازم است برای تعیین عمق هر نقطه، تفاضل میان تراز سطح آب و تراز کف دریاچه محاسبه گردد (در مرحله‌ی

ششم، اعماق مستقیماً اندازه‌گیری شده‌اند). بدین منظور نیز از داده‌های جمع‌آوری شده توسط ستاد احیای دریاچه ارومیه استفاده شد تا تراز آب در روزهای متناظر با تصویر انتخاب شده به دست آید. عمق نقاط داده‌برداری شده با استفاده از محاسبه‌ی اختلاف تراز کف دریاچه برای هر پیکسل و تراز سطح آب در تصویر مربوطه مطابق با رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

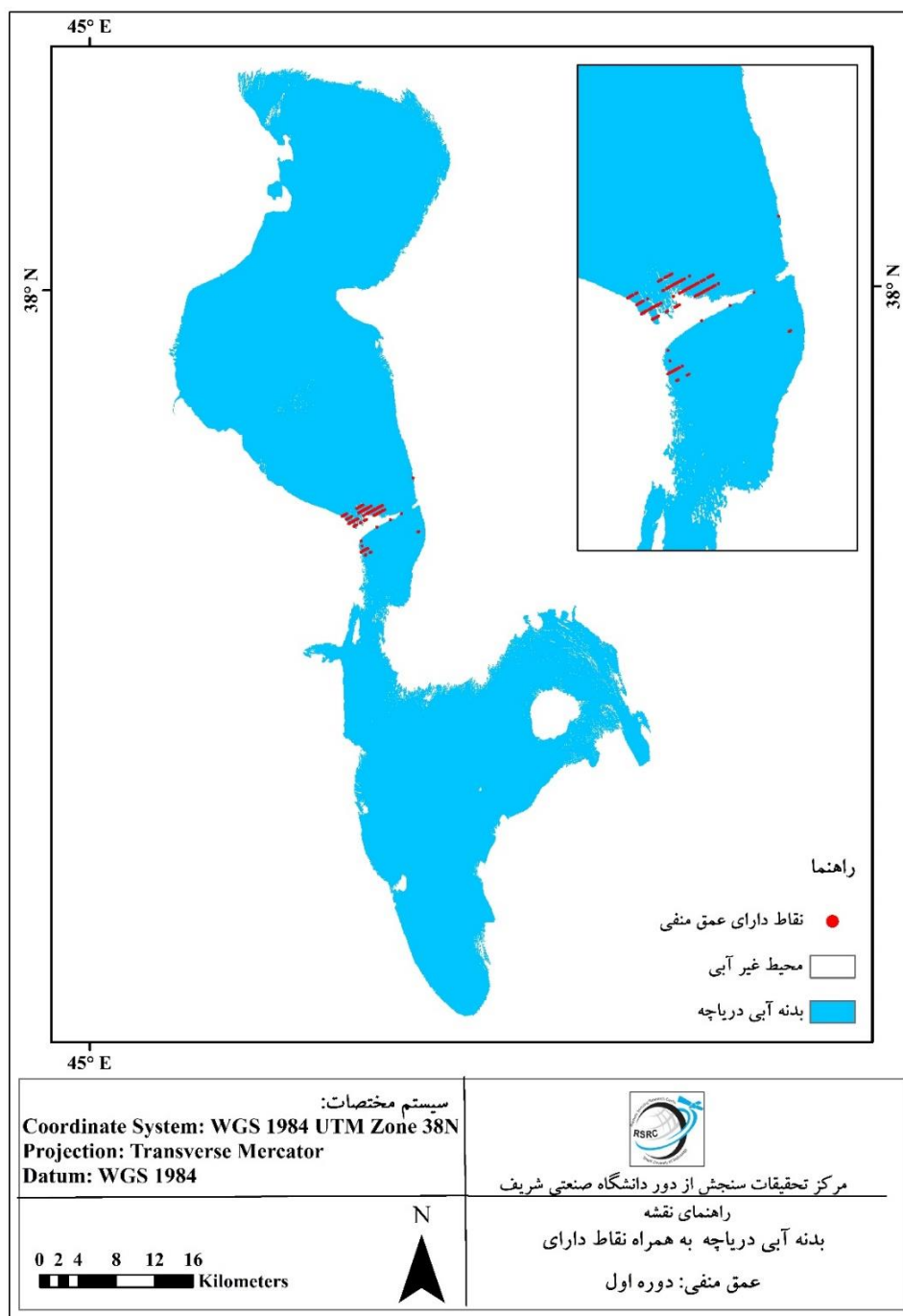
$$E_b = E_s - Z \quad \text{رابطه‌ی ۳۶}$$

که در آن E_b و E_s به ترتیب ترازهای کف و سطح آب در هر پیکسل هستند و Z ، عمق آب در آن پیکسل است. با محاسبه‌ی عمق نقاط داده‌برداری شده در تمامی دوره‌ها، مشخص می‌شود که تمامی مراحل به جز دوره‌ی ششم دارای نقاط داده‌برداری شده با عمق منفی هستند. چند دلیل احتمالی برای وجود نقاطی با عمق منفی، علی‌رغم قرارگیری در داخل بدنه‌ی آبی وجود دارد:

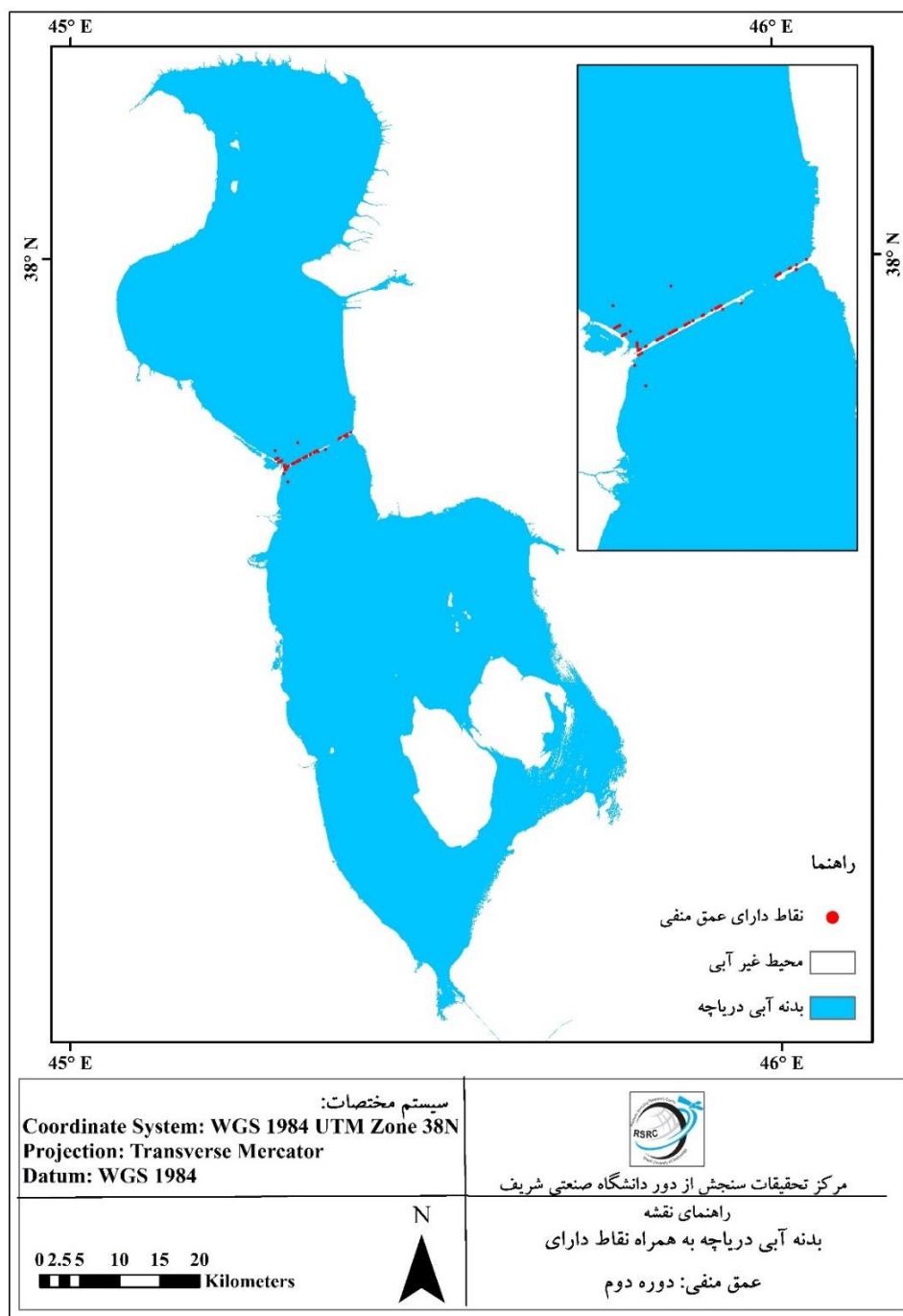
(۱) ممکن است در واقعیت عوارضی سر از آب بیرون آورده باشند که محدودیت وضوح مکانی تصاویر ماهواره‌ای، تشخیصشان را ناممکن کند، اما در عملیات میدانی به عنوان عارضه‌ای خارج از آب ترازشان ثبت شده باشد.

(۲) تشخیص بدنه‌ی آبی در این بخش از پژوهش، برای افزایش دقت، با کمک طبقه‌بندی به روش SVM انجام شده است. وجود خطا در شناسایی پیکسل‌های حاوی آب با این روش می‌تواند یکی از منابع خطا باشد.

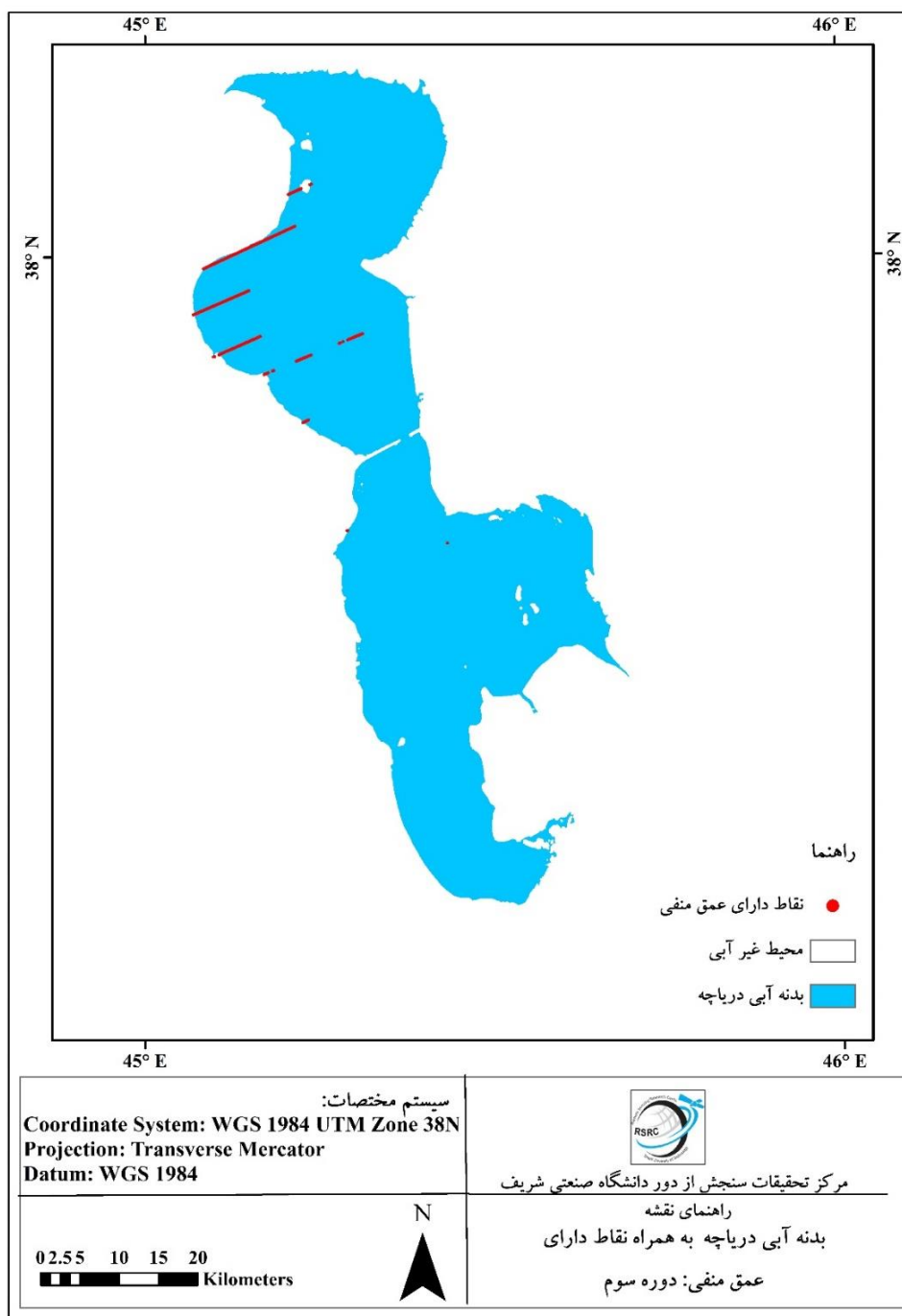
(۳) با توجه به انجام برخی از داده‌برداری‌ها در محدوده‌های زمانی بزرگ، ممکن است تفاوت زیادی میان زمان برداشت داده از برخی نقاط و زمان ثبت تصویر مورد بررسی وجود داشته باشد. از سوی دیگر، ممکن است در این بازه‌ی زمانی در برخی از نقاط تغییرات بالایی در تراز کف رخ داده باشد. بنابراین با وجود اینکه در تصویر مورد بررسی پیکسل خاصی آب تشخیص داده شده است، ممکن است در زمان برداشت داده‌ی مورد نظر، به علت بالاتر بودن تراز کف، این پیکسل آب نبوده باشد. برای بررسی بیش‌تر نقاط دارای عمق منفی، در شکل ۲۱ مکان نقاط با عمق محاسبه‌شده‌ی منفی در ادوار اول تا پنجم نمونه‌برداری مشاهده می‌شود. با توجه به نبود نقطه‌ی دارای عمق منفی در دوره‌ی ششم، نقشه‌ای برای این مرحله تهیه نشده است.



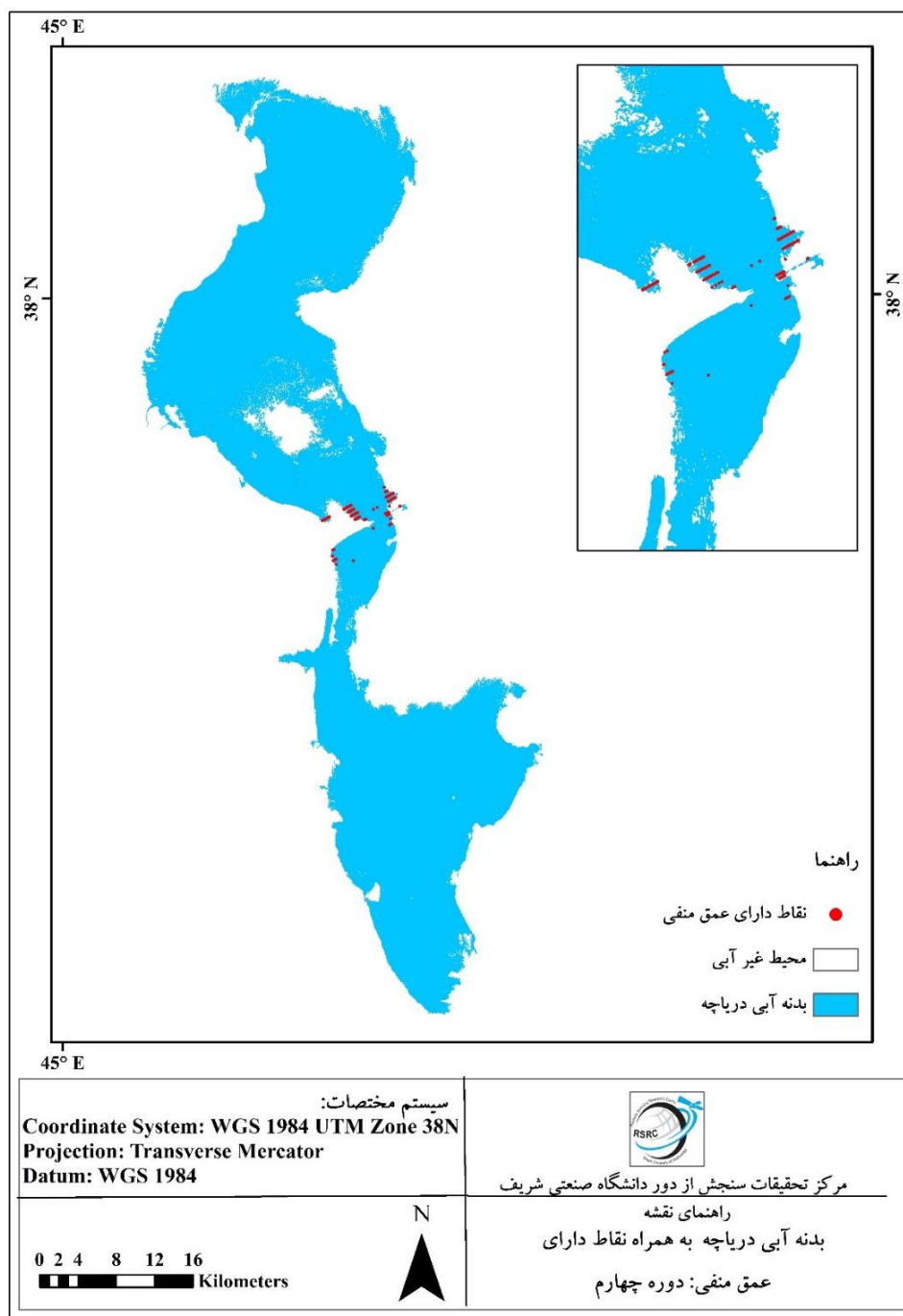
(الف)



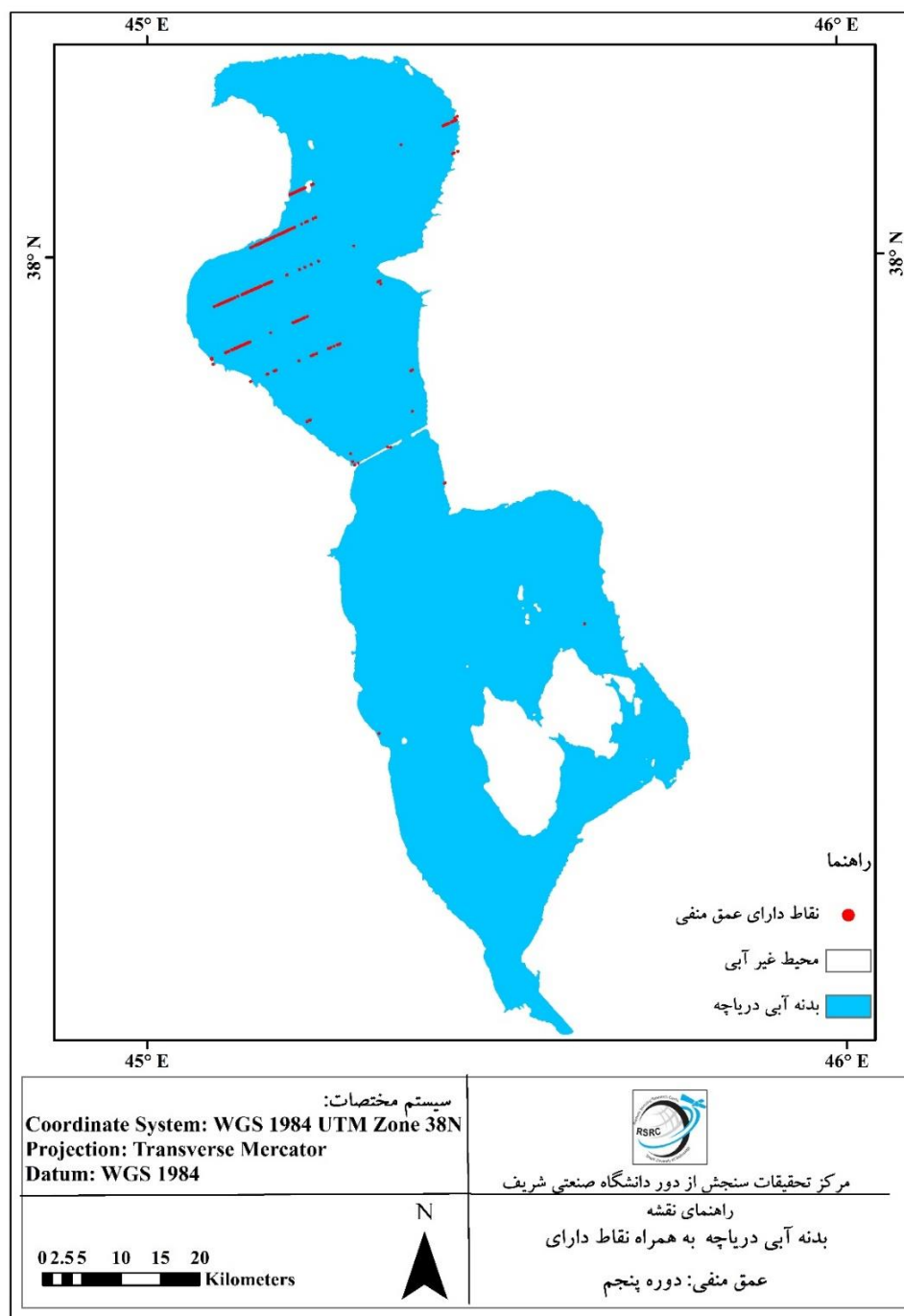
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۲۱: نقاط دارای عمق منفی هر یک از دوره‌ها (الف) دوره‌ی اول (ب) دوره‌ی دوم (ج) دوره‌ی سوم (د) دوره‌ی چهارم
 (ه) دوره‌ی پنجم (و) دوره‌ی ششم

در ادامه نقاط خارج از بدنه‌ی دریاچه و نقاط دارای عمق منفی کنار گذاشته شدند و تنها از نقاطی استفاده شد که دارای عمق مثبت هستند. به دلیل تفاوت شرایط در زمان ثبت هر یک از تصاویر مانند فصل برداشت نقاط در میان فصول چهارگانه، برهم‌نهی نقاط اندازه‌گیری شده در تمامی ادوار و استفاده از مقادیر انعکاس هر یک از باندها ناممکن است. علاوه بر این، در صورت تغییرات بالای تراز کف دریاچه در هر یک از بازه‌های داده‌برداری، ممکن است تنها تراز کف در برخی از نقاط در زمان ثبت هر یک از تصاویر معتبر باشد که خود منبعی از خطا است. در صورت تجمیع تمامی داده‌ها، خطاهای به وجود آمده بر هم جمع شده و خطای بیش‌تری در رابطه‌ی کلی ایجاد می‌کنند. بنابراین هر یک از مراحل اندازه‌گیری باید به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرند. این مسئله در مطالعه‌ی کریمی و همکاران نیز نشان داده شده است؛ چرا که به کار بردن رابطه‌ی به‌دست آمده در سال ۱۳۹۲ در سال ۱۳۹۴، ضریب همبستگی بین اعماق اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده را از مقدار ۰/۹۴ به ۰/۳۳ کاهش داده است [۳]. لازم به ذکر است که در این بخش نیز باید شرط قرارگیری مقدار انعکاس باندها برای هر پیکسل در بازه‌ی قابل قبول، یعنی ۱ تا ۱۰۰۰۰، نیز چک گردد. علاوه بر این مقادیر انعکاس به‌کاررفته در تعیین روابط، بر اساس ضریب معرفی شده، با تقسیم اعداد موجود در باندها بر ۱۰۰۰۰ به دست می‌آیند. در مرحله‌ی بعد لازم است داده‌های دارای عمق مثبت نیز در هر دوره مورد بررسی قرار گرفته و داده‌های پرت با استفاده از فاصله‌ی ماهالانویس و با ضابطه‌ی $p\text{-value} < 0/001$ حذف گردند.

در جدول ۵ شاخص‌های آماری میانگین و انحراف از معیار عمق نقاط داده‌برداری شده، به همراه اعماق بیشینه و کمینه در بازه‌های زمانی فوق مشاهده می‌شود. نقاط مورد بررسی در این بخش نقاطی هستند که علاوه بر موجود بودن داده‌ی مربوط به تراز کف، در داخل بدنه‌ی اصلی دریاچه نیز واقع شده باشند، دارای عمق مثبت باشند و داده‌ی پرت نیز محسوب نشوند.

جدول ۹: شاخص‌های آماری عمق نقاط داده‌برداری شده در بازه‌های زمانی انجام داده‌برداری

دوره‌ی برداشت	میانگین (متر)	بیشینه (متر)	کمینه (متر)	انحراف از معیار (متر)
اول	۰/۹۹۶۹	۲/۳۵۷۵	۰/۰۰۴۲	۰/۵۸۸۹
دوم	۰/۹۰۵۸	۲/۵۱۰۰	۰/۰۱۹۰	۰/۳۵۳۳
سوم	۰/۶۲۳۸	۱/۸۰۴۰	۰/۰۰۱۰	۰/۳۲۸۱
چهارم	۰/۵۵۲۱	۲/۶۰۱۰	۰/۰۰۵۰	۰/۴۰۸۹
پنجم	۰/۹۹۵۲	۲/۴۰۹۰	۰/۰۰۱۰	۰/۴۱۰۰

دوره‌ی برداشت	میانگین (متر)	بیشینه (متر)	کمینه (متر)	انحراف از معیار (متر)
ششم	۱/۴۸۰۷	۲/۲۳۰۰	۰/۷۶۰۰	۰/۳۱۱۸

سپس با توجه به نقاط باقی مانده در هر یک از مراحل داده‌برداری، نیاز است تا رابطه‌ای میان مشخصات پیکسل‌های معرف هر نقطه، شامل مقادیر انعکاس باندها و شاخص‌هایی از جمله سیدایی، NDWI و NDVI، و مقادیر عمق آن پیکسل به دست آید. باندهای مورد استفاده در این پژوهش، باندهای یک تا هفت لندست هستند که تصحیحات اتمسفری روی آنها اعمال شده است.

در جدول ۱۰، متغیرهای آماری مدل‌سازی داده‌های عمق با استفاده از سه روش ANN، MLR و BRT در هر یک از دوره‌های عمق‌سنجی آورده شده است. همان‌طور که جدول ۱۰ نشان می‌دهد، روش‌های ANN و BRT نسبت به روش MLR دارای ضریب همبستگی بالاتر و خطای کمتری هستند.

جدول ۱۰: متغیرهای آماری مدل‌سازی داده‌های عمق با استفاده از سه روش ANN، MLR و BRT در هر یک از دوره‌های

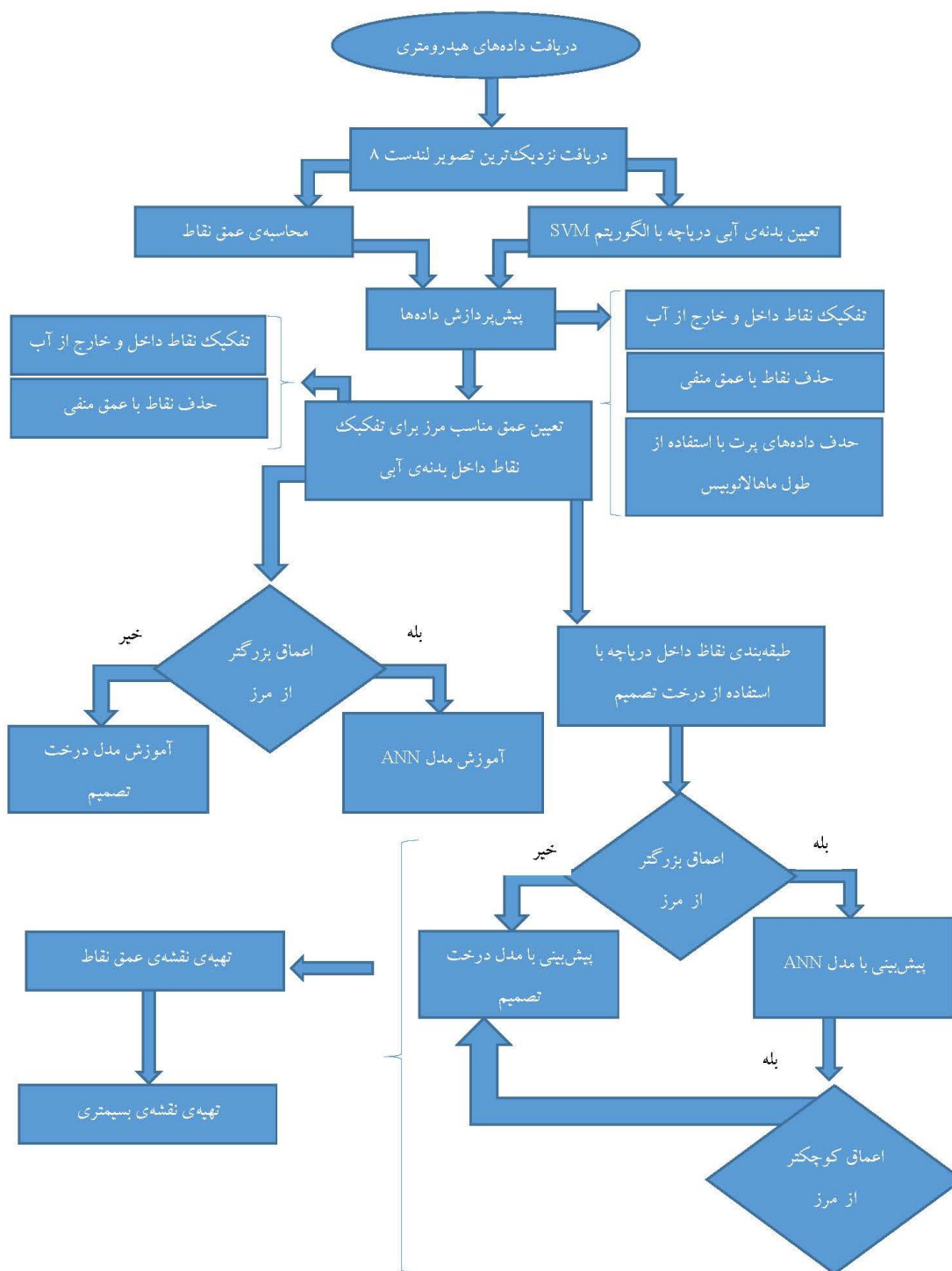
عمق‌سنجی

دوره داده- برداری	روش	میانگین عمق داده‌های برداشت‌شده (متر)	میانگین عمق پیش‌بینی شده در مدل (متر)	R^2	MAE (m)	RMSE (m)
۱	MLR	۰/۹۸۲	۰/۹۸۱	۰/۹۵۲	۰/۰۷۷	۰/۱۳۰
	ANN		۰/۹۸۰	۰/۹۷۲	۰/۰۵۷	۰/۰۹۹
	BRT		۰/۹۸۱	۰/۹۷۴	۰/۰۴۶	۰/۰۹۶
۲	MLR	۰/۹۰۲	۰/۸۹۹	۰/۶۱۶	۰/۱۶۵	۰/۲۲۰
	ANN		۰/۸۹۹	۰/۷۷۹	۰/۱۲۱	۰/۱۶۷
	BRT		۰/۹۰۳	۰/۸۸۸	۰/۰۷۵	۰/۱۱۹
۳	MLR	۰/۶۱۹	۰/۶۱۸	۰/۷۳۷	۰/۱۲۸	۰/۱۶۹
	ANN		۰/۶۱۸	۰/۸۷۷	۰/۰۸۴	۰/۱۱۵
	BRT		۰/۶۲۲	۰/۹۳۴	۰/۰۵۷	۰/۰۸۶
۴	MLR	۰/۴۹۵	۰/۴۹۴	۰/۶۹۵	۰/۱۶۶	۰/۲۳۱
	ANN		۰/۴۹۲	۰/۹۲۱	۰/۰۶۱	۰/۱۱۸
	BRT		۰/۴۹۱	۰/۹۱۵	۰/۰۶۵	۰/۱۲۳
۵	MLR	۰/۹۸۶	۰/۹۸۶	۰/۵۰۲	۰/۲۲۴	۰/۲۹۲

RMSE (m)	MAE (m)	R ²	میانگین عمق پیش‌بینی شده در مدل (متر)	میانگین عمق داده‌های برداشت شده (متر)	روش	دوره داده-برداری
۰/۲۱۸	۰/۱۵۷	۰/۷۲۲	۰/۹۸۷		ANN	
۰/۱۷۳	۰/۱۱۹	۰/۸۳۰	۰/۹۹۰		BRT	
۰/۲۴۵	۰/۱۸۴	۰/۳۸۲	۱/۴۵۴	۱/۴۸۱	MLR	۶
۰/۲۰۱	۰/۱۵۲	۰/۶۰۶	۱/۵۲۷		ANN	
۰/۲۳۵	۰/۱۸۱	۰/۴۷۱	۱/۵۳۴		BRT	

با این حال، هر یک از این روش‌ها خود دارای محدودیت‌هایی هستند. روش ANN به برخی از پیکسل‌ها، علی‌رغم قرارگیری در بدنه‌ی آبی، عمق منفی نسبت می‌دهد. با اطمینان از صحت مرزهای آبی تشخیص داده‌شده، این داده‌ها به عنوان خطای مدل شناسایی می‌شوند. اما با توجه به اینکه متغیر مورد بررسی در این بخش از پژوهش عمق آب است، نمی‌توان مقادیر منفی را به عنوان پاسخ مدل پذیرفت. از سویی دیگر، ساختار مدل BRT به نوعی است که موجب می‌شود تنها پاسخ مدل به هر نمونه، در این جا هر پیکسل بدنه‌ی آبی، مقداری بین داده‌های آموزشی باشد؛ بنابراین، با توجه به مثبت بودن تمامی داده‌های آموزشی، مدل مقادیر منفی را به صورت پاسخ ارائه نخواهد کرد. اما از سوی دیگر، مقادیر بیشینه‌ی آن نیز محدود به مقادیر بیشینه‌ی داده‌های آموزشی است. مجموعه‌ی این عوامل باعث شدند که در این پژوهش، ترکیبی از دو روش ANN و BRT به عنوان روشی جایگزین برای حل این مشکلات ارائه گردد. فلوجارت روش پیشنهادی برای این پژوهش در شکل ۲۲ آورده شده است. بر این اساس، همان‌طور که در فلوجارت قابل مشاهده است، نقاط اندازه‌گیری شده، که در واقع همان داده‌های آموزشی هستند، بر اساس میزان عمق به دو دسته‌ی اعماق کم و اعماق بالا تقسیم می‌شوند. در مرحله‌ی بعد، با استفاده از درخت تصمیم و استفاده از این نقاط به عنوان داده‌های آموزشی، نقاط داخل بدنه‌ی آبی که قرار است پیش‌بینی بر روی عمقشان انجام گیرد به دو دسته‌ی مشابه تقسیم می‌شوند. برای هر دو دسته‌ی اعماق کم و بالا به ترتیب مدل‌های BRT و ANN با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده آموزش دیده و سپس برای پیش‌بینی عمق دسته‌ی نظیرشان مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نهایت، در صورتی که عمق پیش‌بینی شده در مدل ANN کم‌تر از مرز مورد نظر در تفکیک عمق به دو دسته

قرار نگیرد، عمق پیکسل مورد نظر مجدداً با استفاده از روش BRT محاسبه می‌گردد. در نهایت نیز نقشه‌ی بسیمتری با در دست داشتن نقشه‌ی عمق دریاچه در هر دوره، قابل محاسبه خواهد بود.



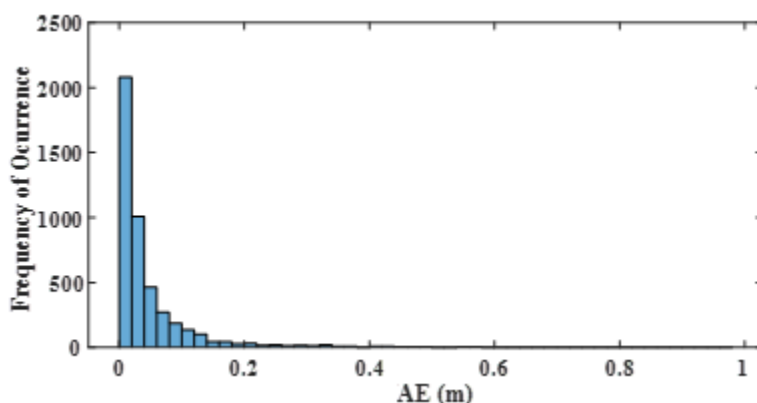
شکل ۲۲: فلوچارت مدل ترکیبی پیشنهادی برای تعیین عمق در این پژوهش

در جدول ۱۱، متغیرهای آماری R^2 ، MAE و RMSE مربوط به مدل ترکیبی پیشنهادی مشاهده می‌شود.

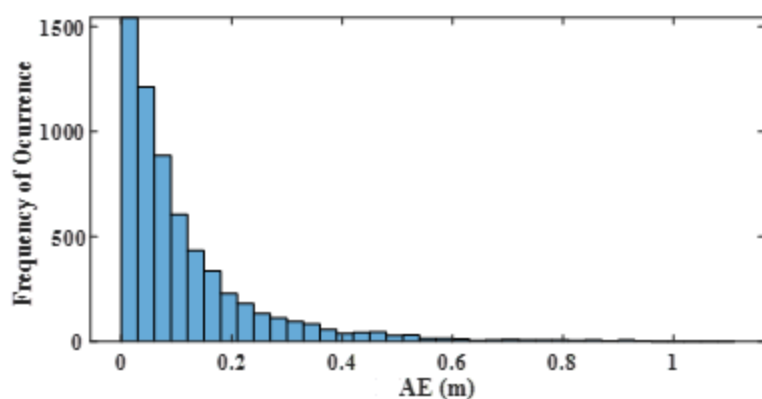
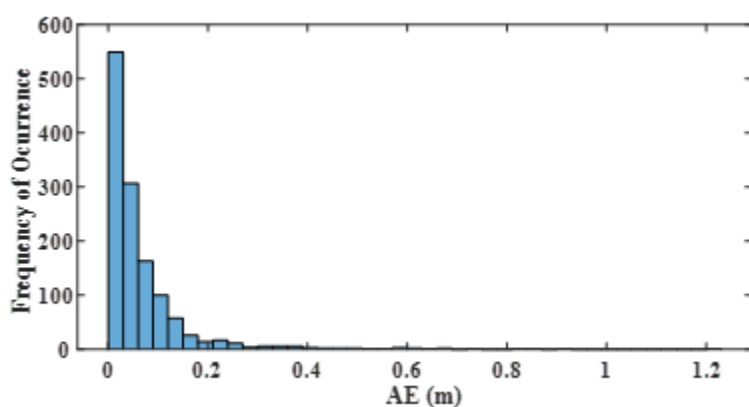
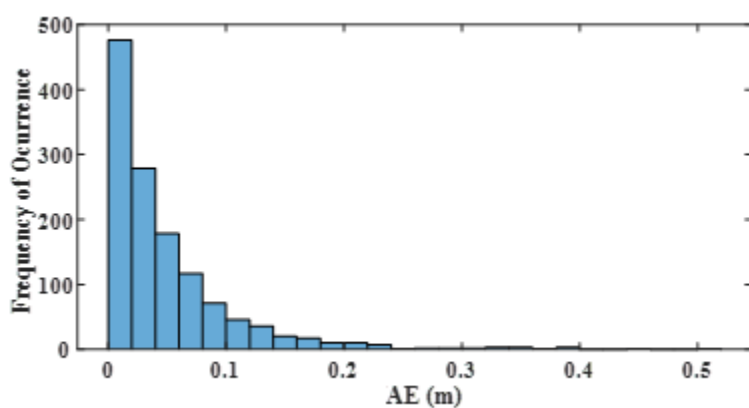
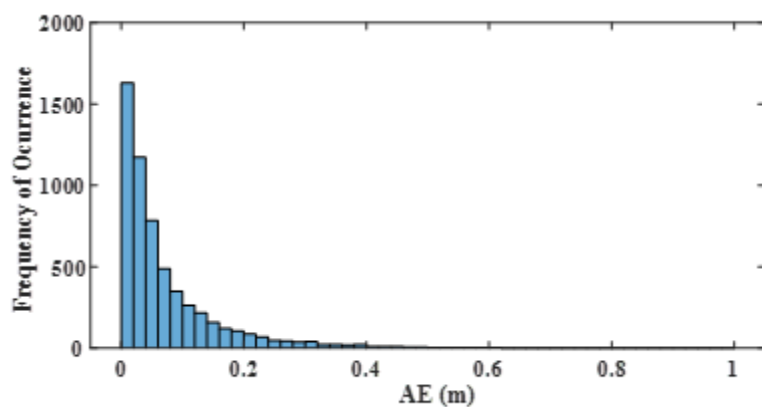
جدول ۱۱: متغیرهای آماری R^2 ، MAE و RMSE مدل پیشنهادی

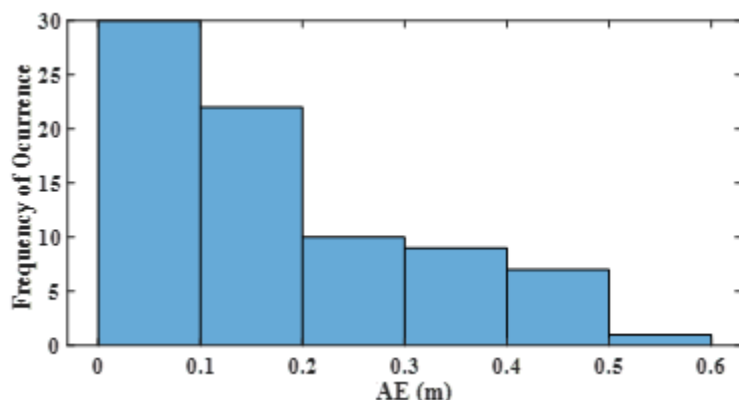
مرحله	R^2	MAE (m)	RMSE (m)
اول	۰/۹۷۱۸	۰/۰۴۹۹	۰/۰۹۹۰
دوم	۰/۸۸۹۹	۰/۰۷۳۹	۰/۱۱۷۵
سوم	۰/۹۴۷۲	۰/۰۴۹۴	۰/۰۷۶۰
چهارم	۰/۹۱۴۳	۰/۰۶۶۹	۰/۱۲۰۲
پنجم	۰/۸۱۱۷	۰/۱۱۶۵	۰/۱۷۸۸
ششم	۰/۵۲۴۷	۰/۱۷۲۸	۰/۲۲۰۴

در شکل ۲۳، هیستوگرام خطای مطلق اعماق^۱ یا به اختصار AE حاصل از مدل‌سازی نسبت به اعماق واقعی در هر یک از نقاط اندازه‌گیری شده در هر یک از دوره‌ها مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۲۳ و جدول ۱۱، میزان خطای عمق تخمین زده شده بر اساس اعماق اندازه‌گیری شده در تمامی دوره‌ها در مقایسه با ادبیات فنی در بازه‌ی قابل قبولی قرار دارد. مقدار شاخص R^2 تنها در دوره‌ی ششم در بازه‌ی قابل قبولی قرار ندارد که البته با توجه به کم بودن تعداد مشاهدات در این دوره قابل پیش‌بینی است. در سایر دوره‌ها مقدار این شاخص از بالا بودن دقت مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی عمق نقاط اندازه‌گیری شده حکایت می‌کند.



(الف)

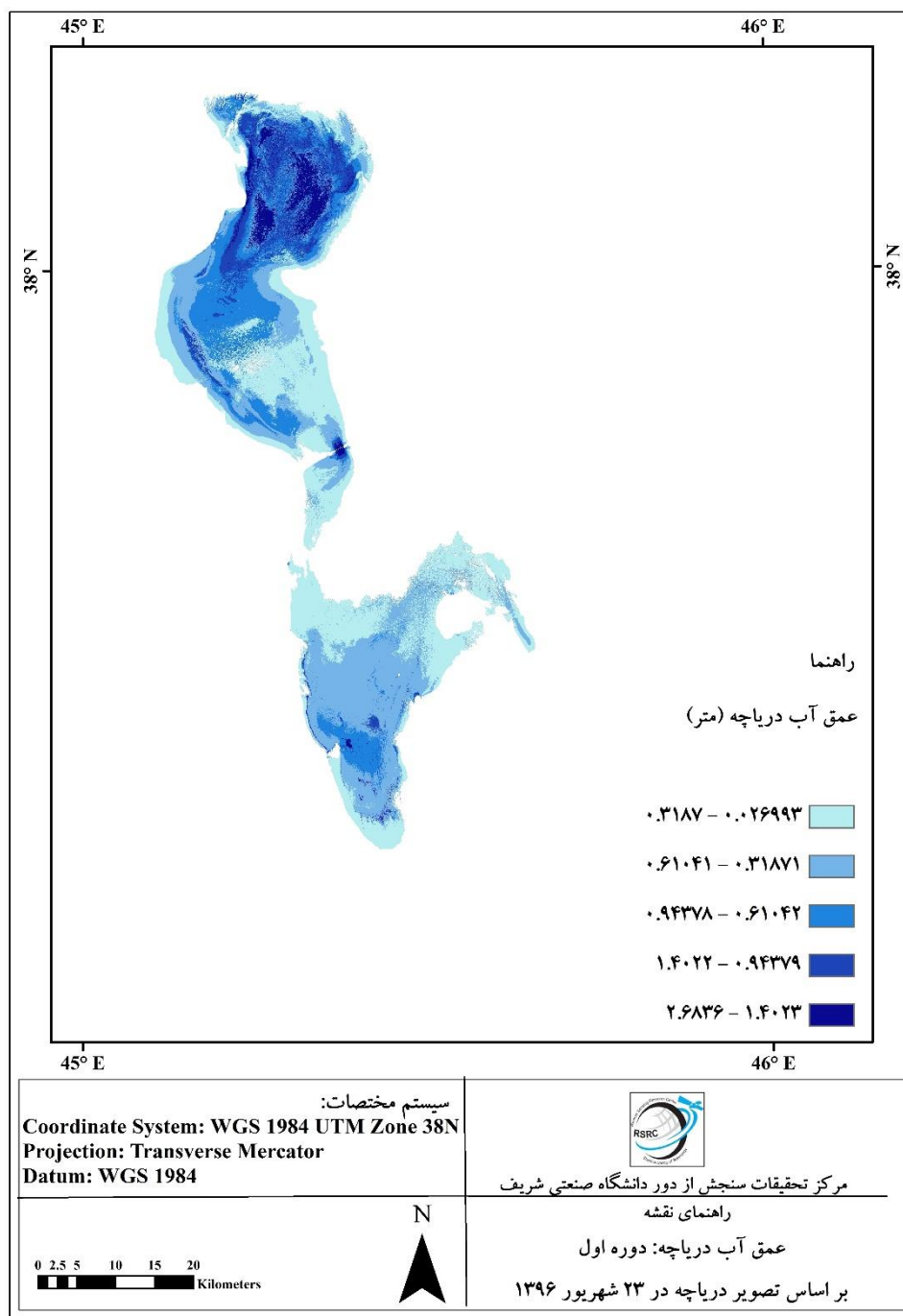




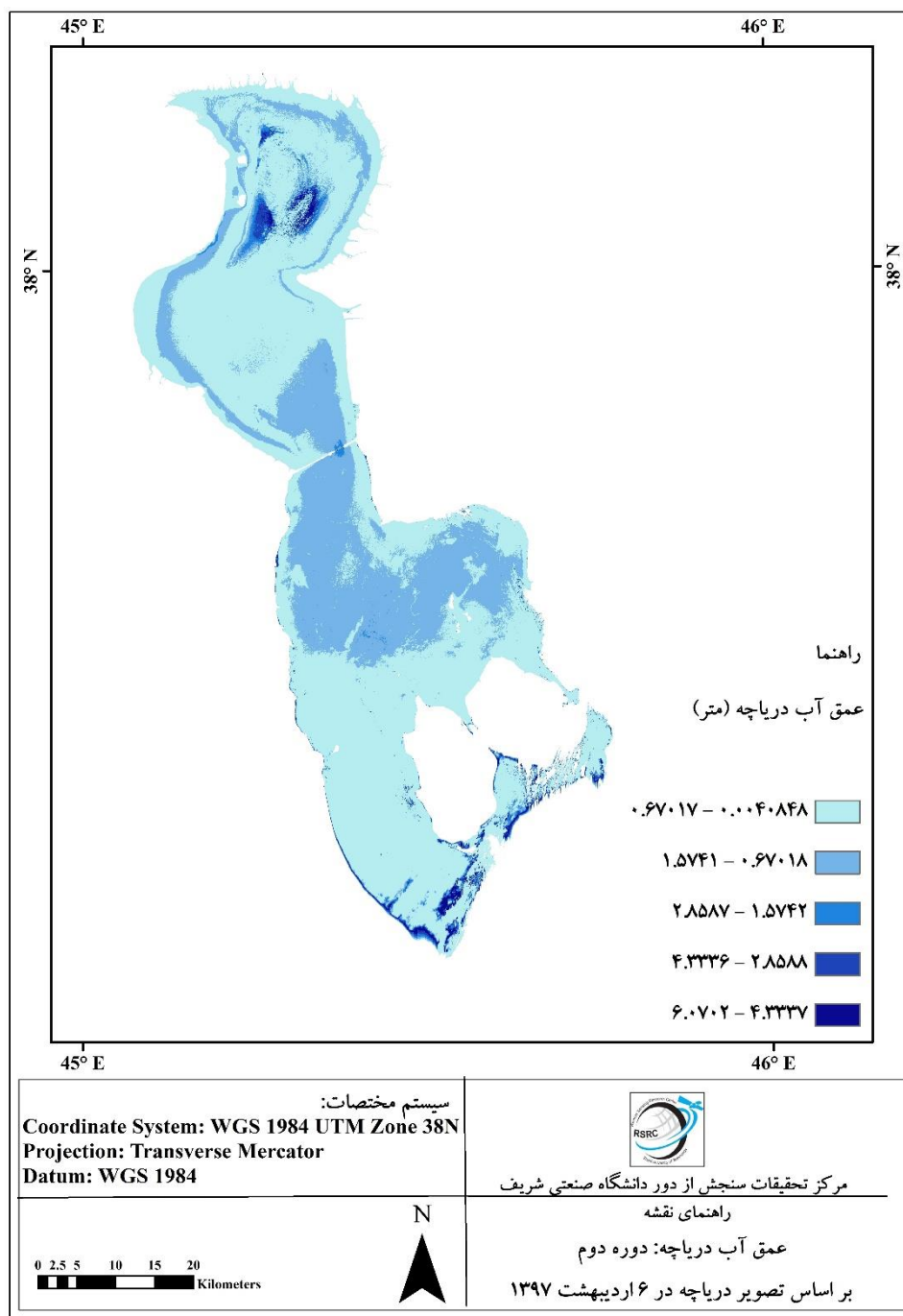
(و)

شکل ۲۳: هیستوگرام‌های خطای مطلق اعماق حاصل از مدل‌سازی نسبت به اعماق واقعی در هر یک از نقاط اندازه‌گیری شده در هر یک از دوره‌ها (الف) دوره‌ی اول (ب) دوره‌ی دوم (ج) دوره‌ی سوم (د) دوره‌ی چهارم (ه) دوره‌ی پنجم (و) دوره‌ی ششم

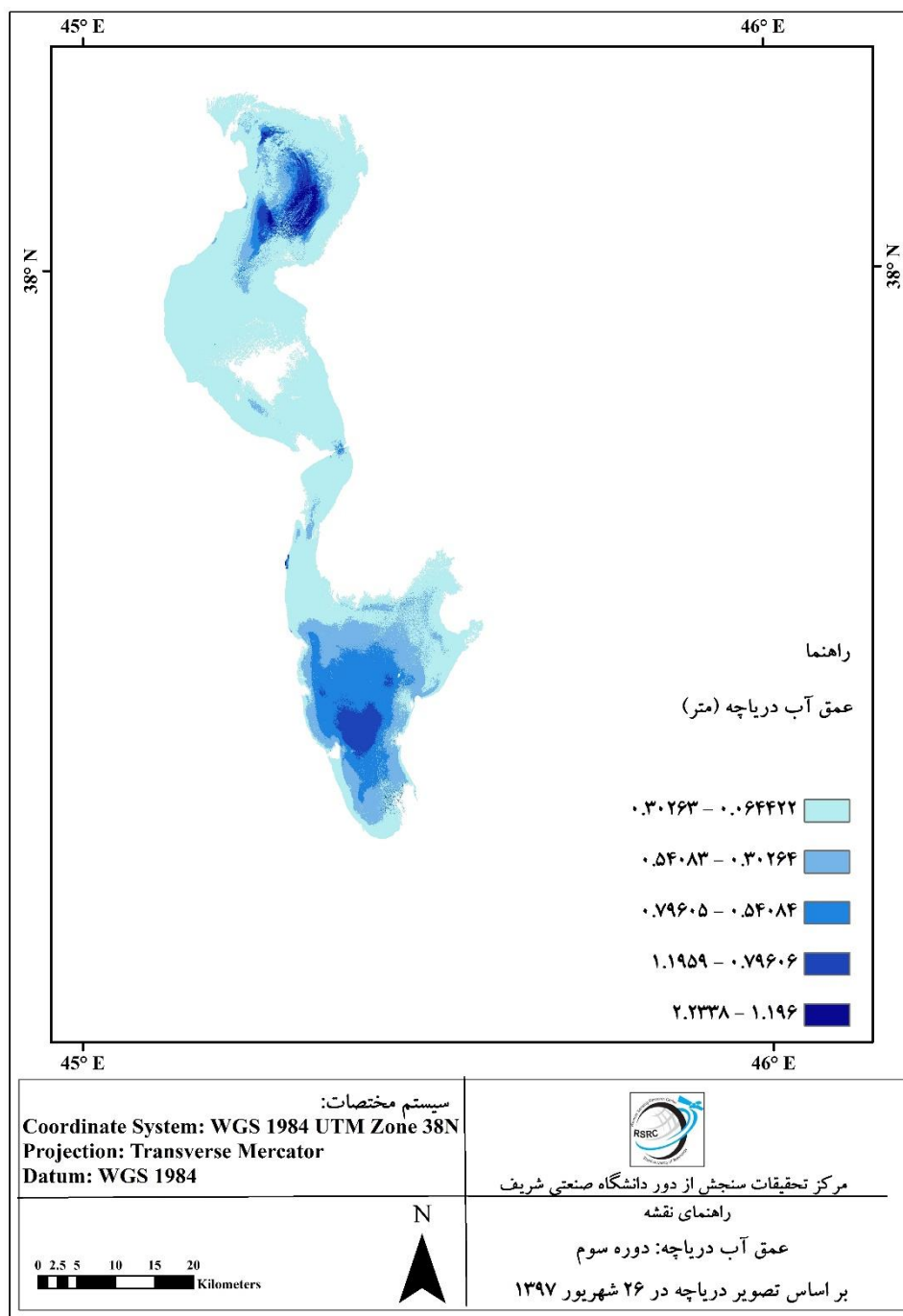
در نهایت، می‌توان از مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی عمق آب در سایر نقاط دریاچه استفاده نمود. شکل ۲۴ نقشه‌های عمق دریاچه را که از مدل ترکیبی پیشنهادی این پژوهش به دست آمده‌اند در شش دوره‌ی داده‌برداری، نشان می‌دهد.



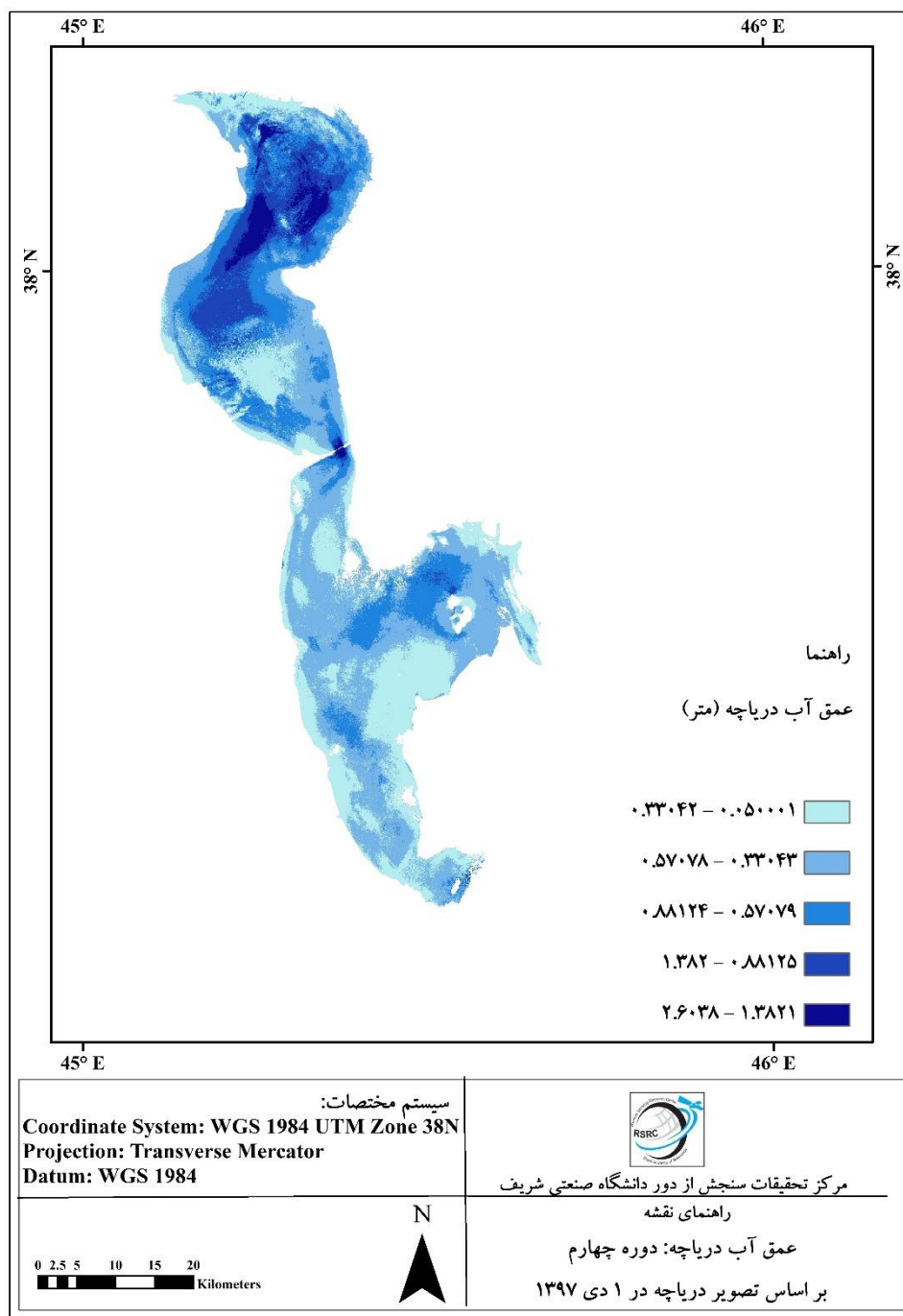
(الف)



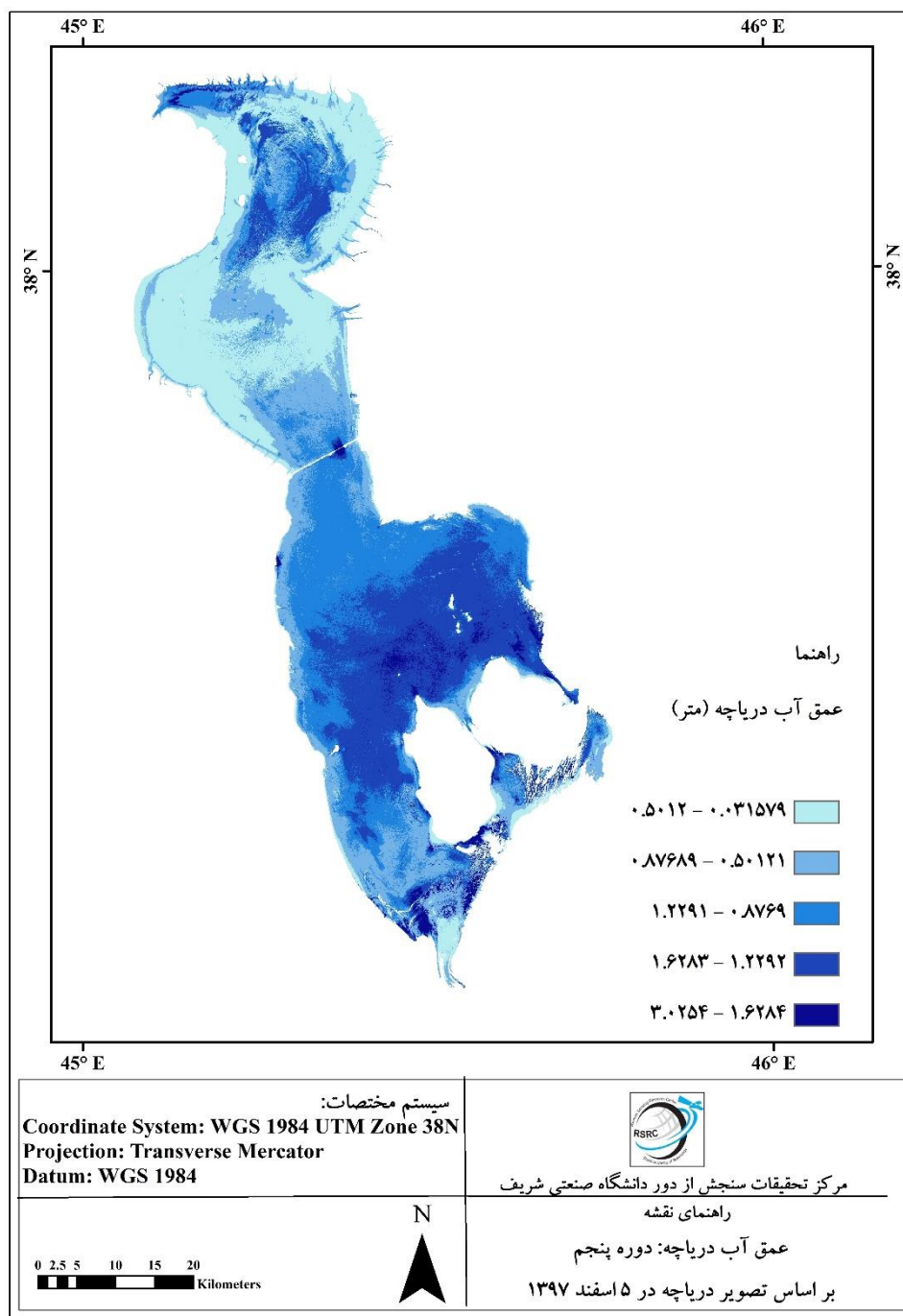
(ب)



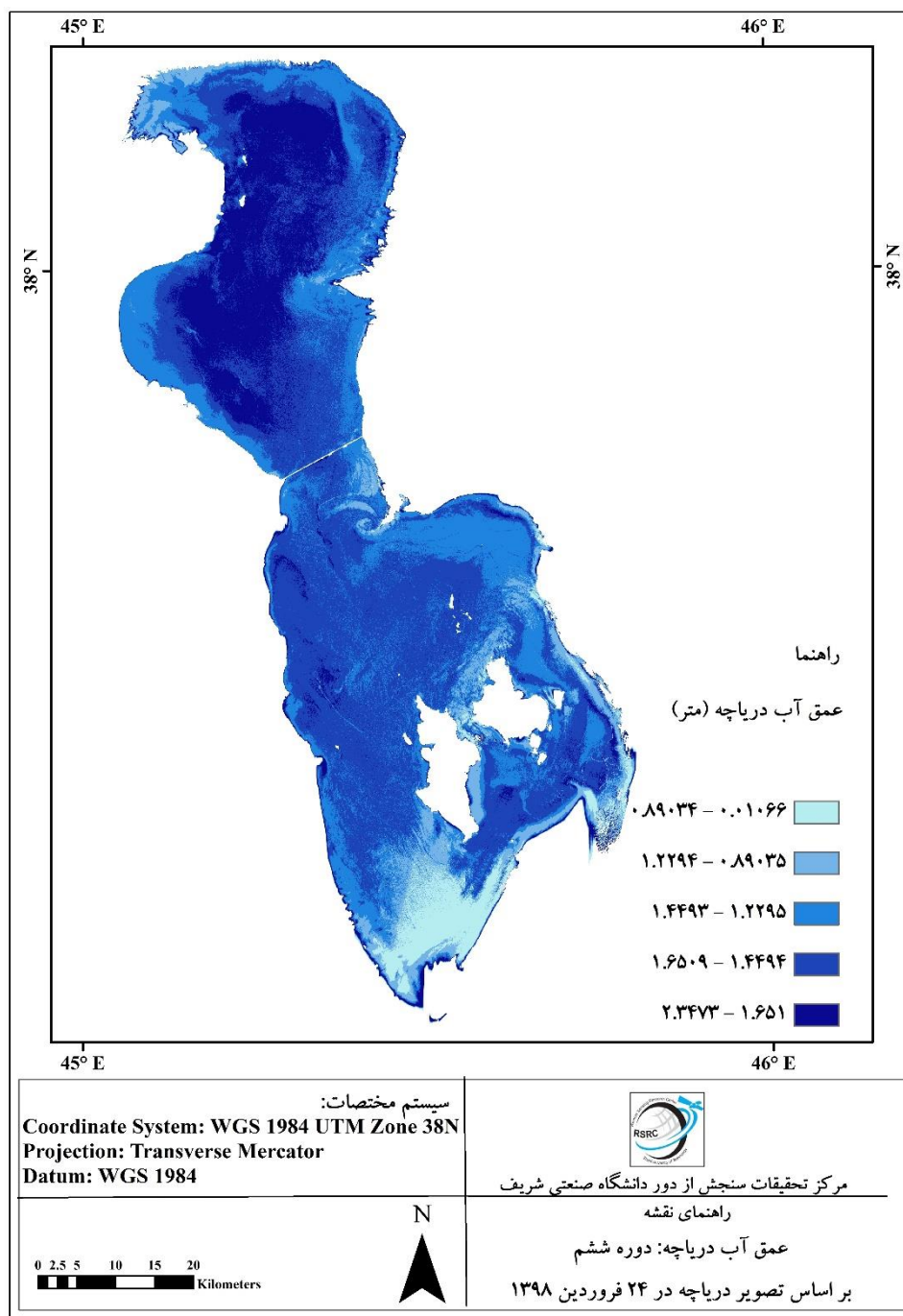
(ج)



(د)



(ه)



(و)

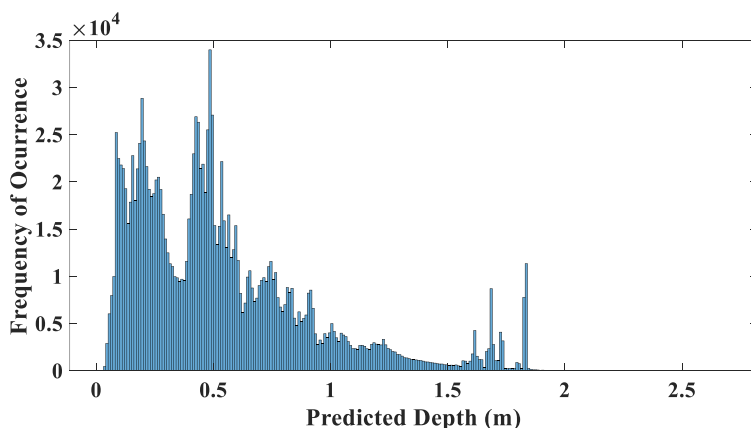
شکل ۲۴: نقشه‌های عمق آب در دوره‌های داده‌برداری (الف) دوره‌ی اول (ب) دوره‌ی دوم (ج) دوره‌ی سوم (د) دوره‌ی چهارم (ه) دوره‌ی پنجم (و) دوره‌ی ششم

برای بررسی بیش‌تر اعماق به‌دست‌آمده در شش دوره‌ی داده‌برداری، تراز سطح آب، اعماق میانگین، کمینه و بیشنه و همین‌طور حجم آب دریاچه در شش دوره‌ی داده‌برداری آمده است. با توجه به اندازه‌ی ۳۰ متری پیکسل‌های ماهواره‌های لندست، با تجمیع عمق آب در محدوده‌ی دریاچه و ضرب آن در ساینز پیکسل‌ها (۳۰ × ۳۰ متر مربع) می‌توان حجم آب ذخیره‌شده در دریاچه را محاسبه نمود.

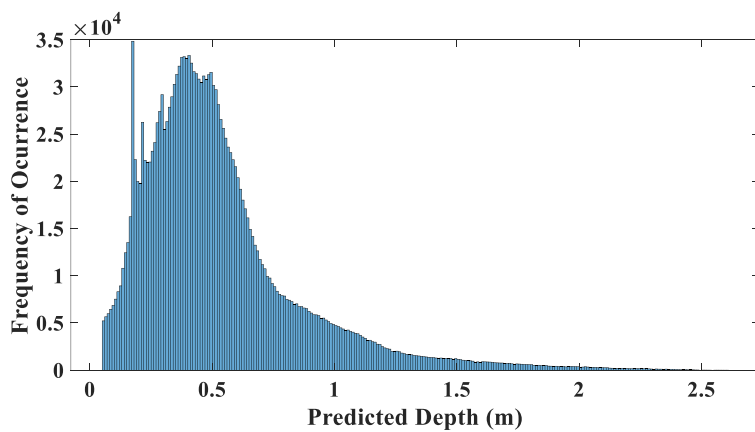
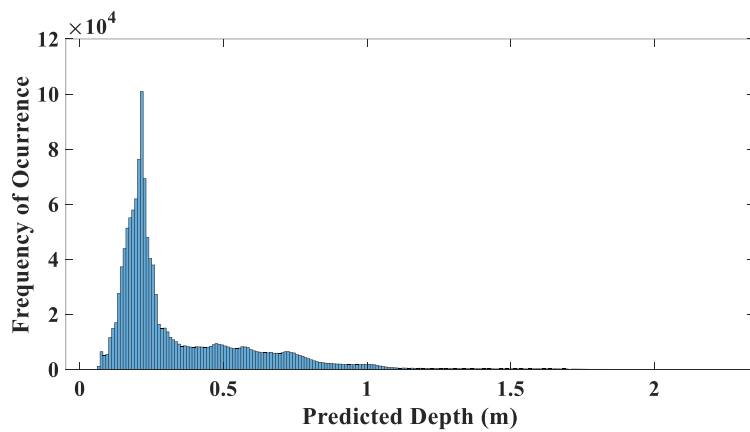
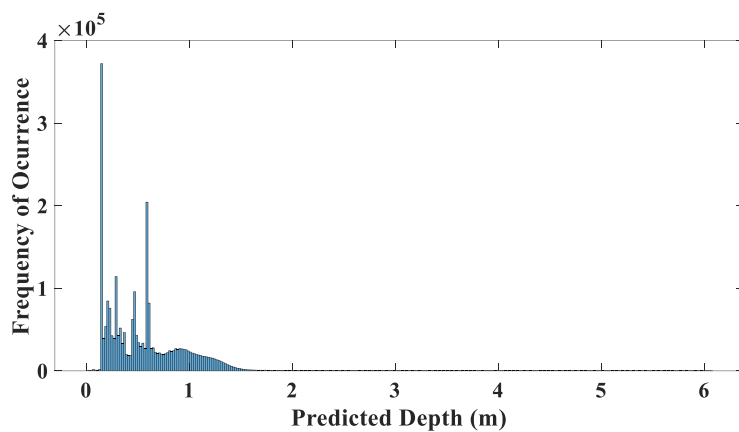
جدول ۱۲: تراز سطح آب، اعماق میانگین، کمینه و بیشنه و حجم آب دریاچه در شش دوره‌ی داده‌برداری

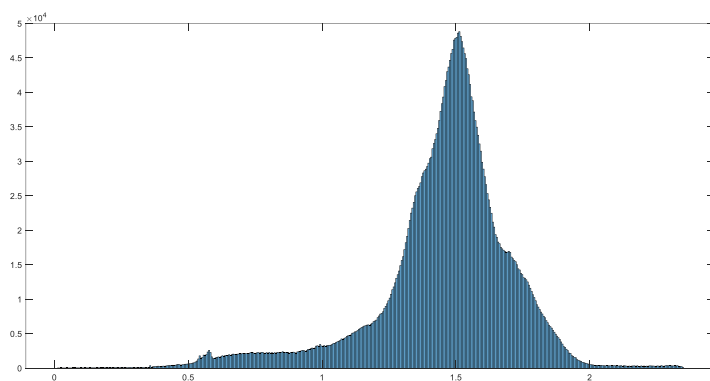
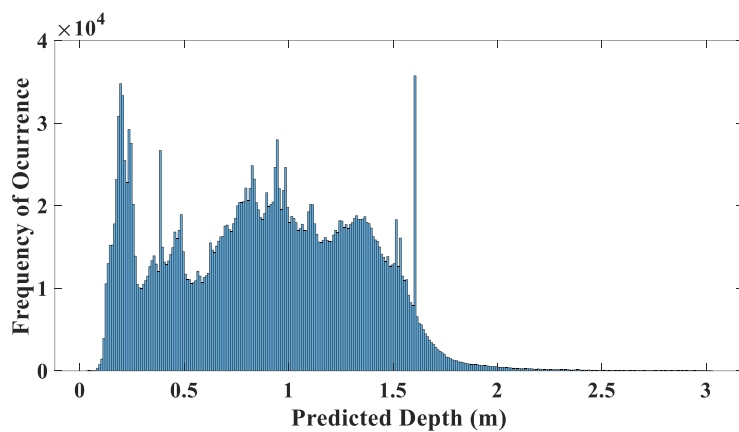
مرحله	تراز سطح (m)	عمق میانگین (m)	عمق کمینه (m)	عمق بیشینه (m)	حجم (km ³)
اول	۱۲۷۰/۳۲	۰/۵۳۸۹	۰/۰۲۷۰	۲/۶۸۳۶	۰/۷۰۱۹
دوم	۱۲۷۰/۷۵	۰/۶۵۵۱	۰/۰۰۴۱	۶/۰۷۰۲	۱/۵۱۱۱
سوم	۱۲۷۰/۲۷	۰/۳۳۸۵	۰/۰۶۴۴	۲/۲۳۳۸	۰/۳۹۲۹
چهارم	۱۲۷۰/۵۴	۰/۵۳۰۴	۰/۰۵۰۰	۲/۶۰۳۸	۰/۸۷۵۷
پنجم	۱۲۷۰/۸۲	۰/۸۸۸۲	۰/۰۳۱۶	۳/۰۲۵۴	۲/۱۰۳۵
ششم	۱۲۷۱/۳۵	۱/۴۵۵۱	۰/۰۱۰۷	۲/۳۴۷۳	۴/۶۶۵۳

همان‌طور که در شکل ۲۴ و جدول ۱۲ مشاهده می‌شود، مقادیر بیشینه‌ی عمق، خصوصاً در دوره‌های دوم، چهارم و پنجم در بازه‌ی مورد انتظاری قرار ندارد. برای بررسی فراوانی نقاط با اعماق به‌دست‌آمده در هر تصویر، در شکل ۲۵ هیستوگرام اعماق محاسبه‌شده در دامنه‌ی تغییرات آن برای هر دوره نشان داده می‌شود



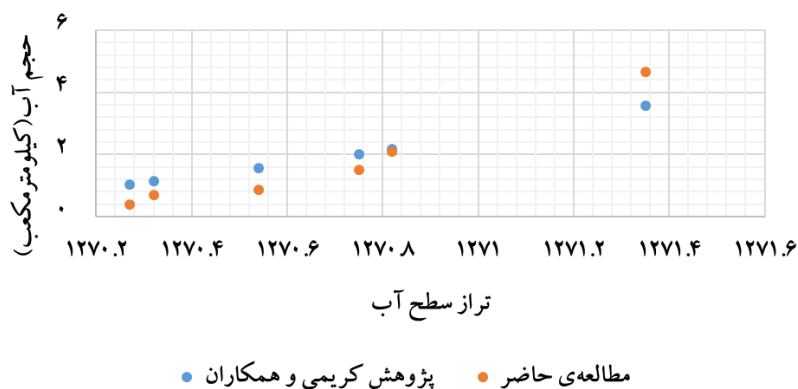
(الف)





شکل ۲۵: هیستوگرام اعماق به دست آمده در هر یک از دوره‌های داده‌برداری (الف) دوره‌ی اول (ب) دوره‌ی دوم (ج) دوره‌ی سوم (د) دوره‌ی چهارم (ه) دوره‌ی پنجم (و) دوره‌ی ششم

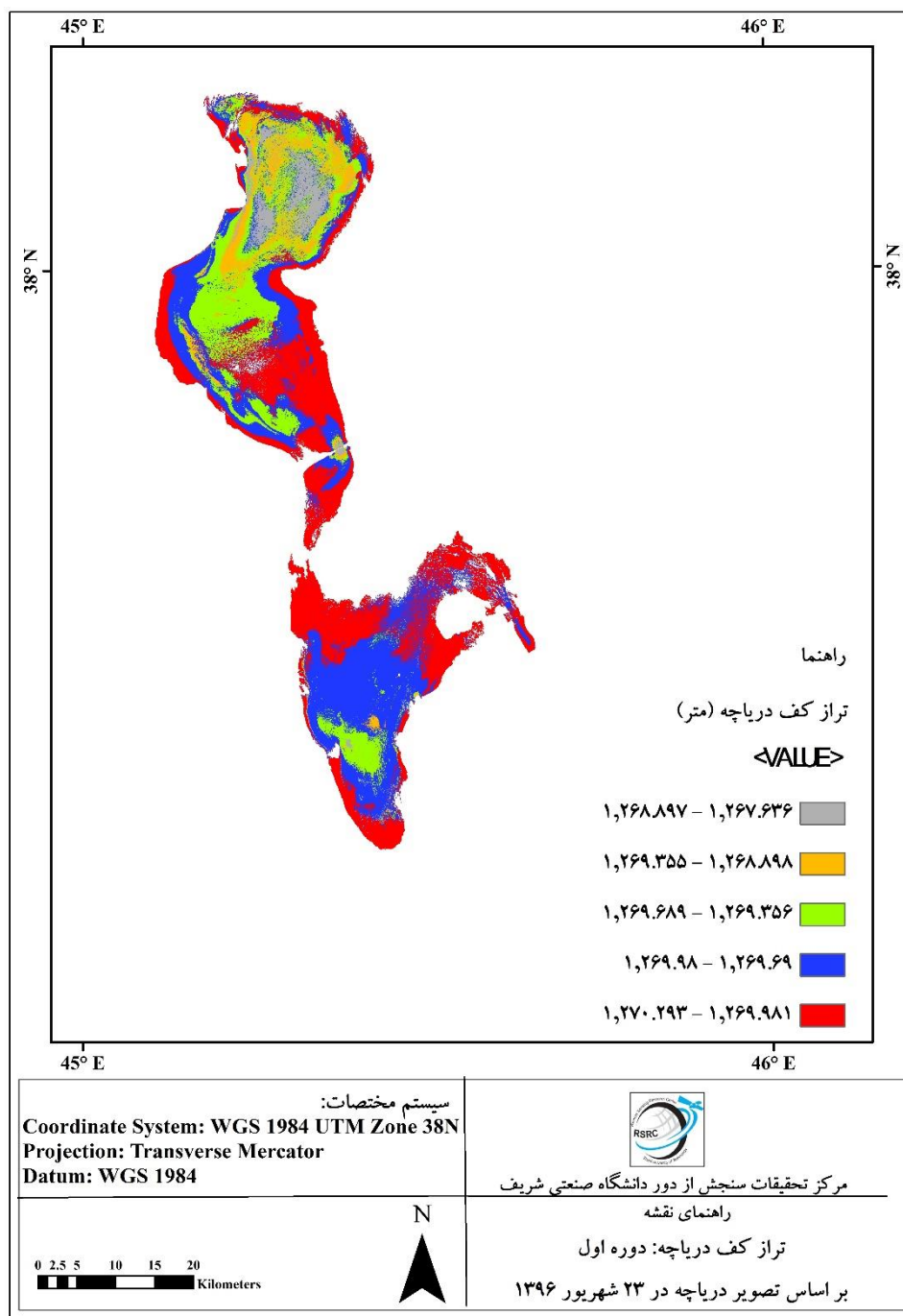
علاوه بر آن، برای اطمینان از صحت حجم آب محاسبه‌شده برای دریاچه در شش دوره‌ی داده‌برداری، این مقادیر با رابطه‌ی توسعه‌داده‌شده برای تعیین حجم آب دریاچه توسط کریمی و همکاران در شکل ۲۶ مقایسه شده است [۳].



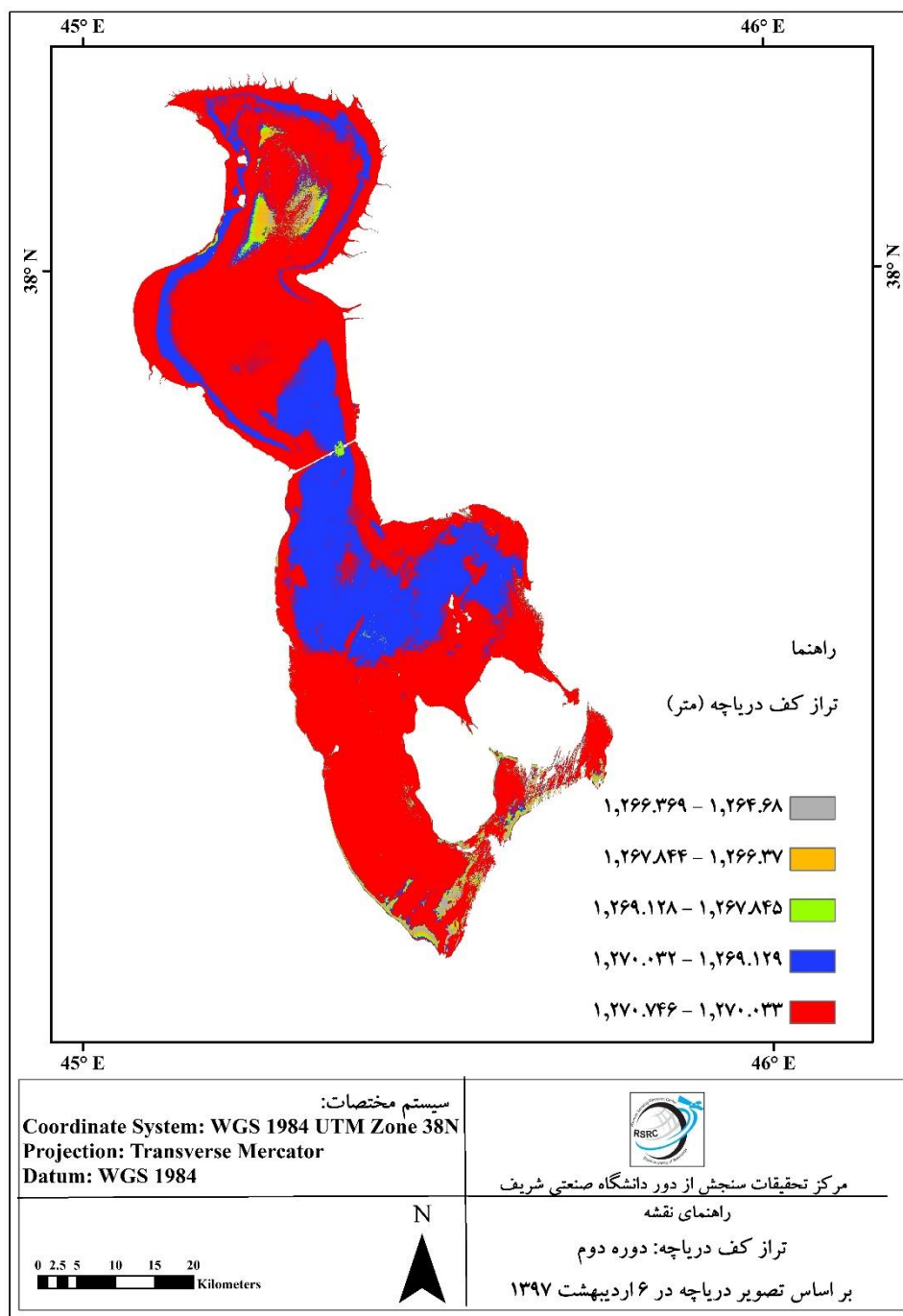
شکل ۲۶: حجم آب محاسبه‌شده برای دریاچه در شش دوره‌ی داده‌برداری با استفاده از مدل پیشنهادی این پژوهش و مقایسه‌ی آن با رابطه‌ی پیشنهادی توسط کریمی و همکاران

همان‌طور که مشاهده می‌شود، حجم آب دریاچه در مطالعه‌ی حاضر در ترازهای پایین، کمتر از حجم آب تخمین زده شده در مطالعه‌ی کریمی و همکاران به دست می‌آید. اما به تدریج و با افزایش تراز سطح، این دو مقدار به هم نزدیک می‌شوند و سپس مجدداً از یکدیگر فاصله می‌گیرند، تا جایی که مساحت تخمین زده شده در این پژوهش بیش از مطالعه‌ی کریمی و همکاران است. رابطه‌ی میان حجم آب به دست آمده در این پژوهش و مطالعه‌ی پیشین، در هر سطحی از تراز قابل پیش‌بینی است؛ چرا که با مقایسه‌ی شکل ۲۶ و شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که سطوح شناسایی‌شده‌ی دریاچه در این دو دوره دارای روند مشابهی هستند و لذا، چنین رابطه‌ای در احجام تخمین زده شده نیز قابل پیش‌بینی است.

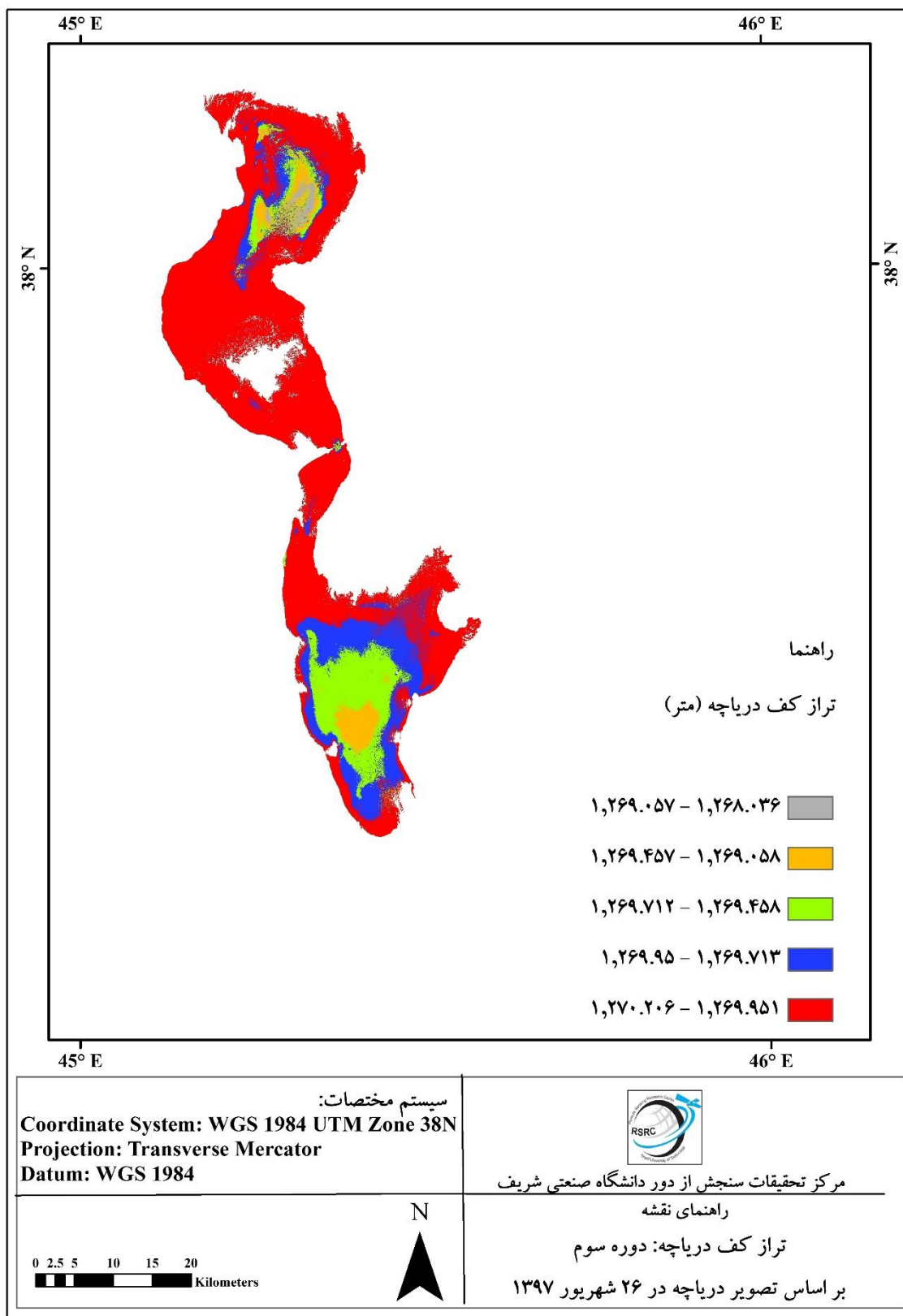
در نهایت، می‌توان با تفاضل عمق محاسبه‌شده‌ی آب از تراز سطح آب، تراز بستر دریاچه در بدنه‌ی آبی آن را مطابق رابطه‌ی ۳۶ محاسبه نمود. شکل ۲۷، نقشه‌های بسیمتری به دست آمده برای هر شش دوره‌ی داده‌برداری را نشان می‌دهد.



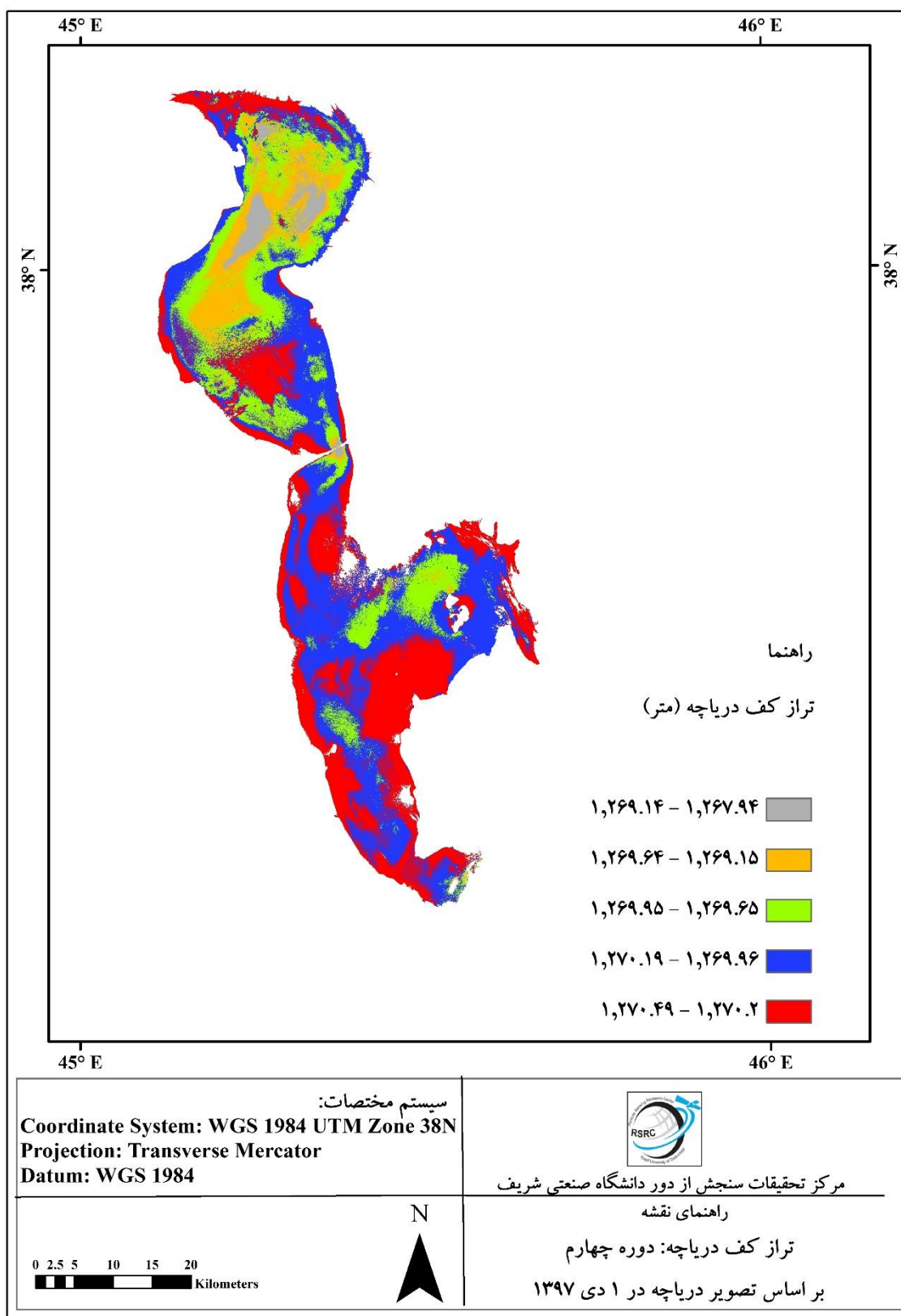
(الف)



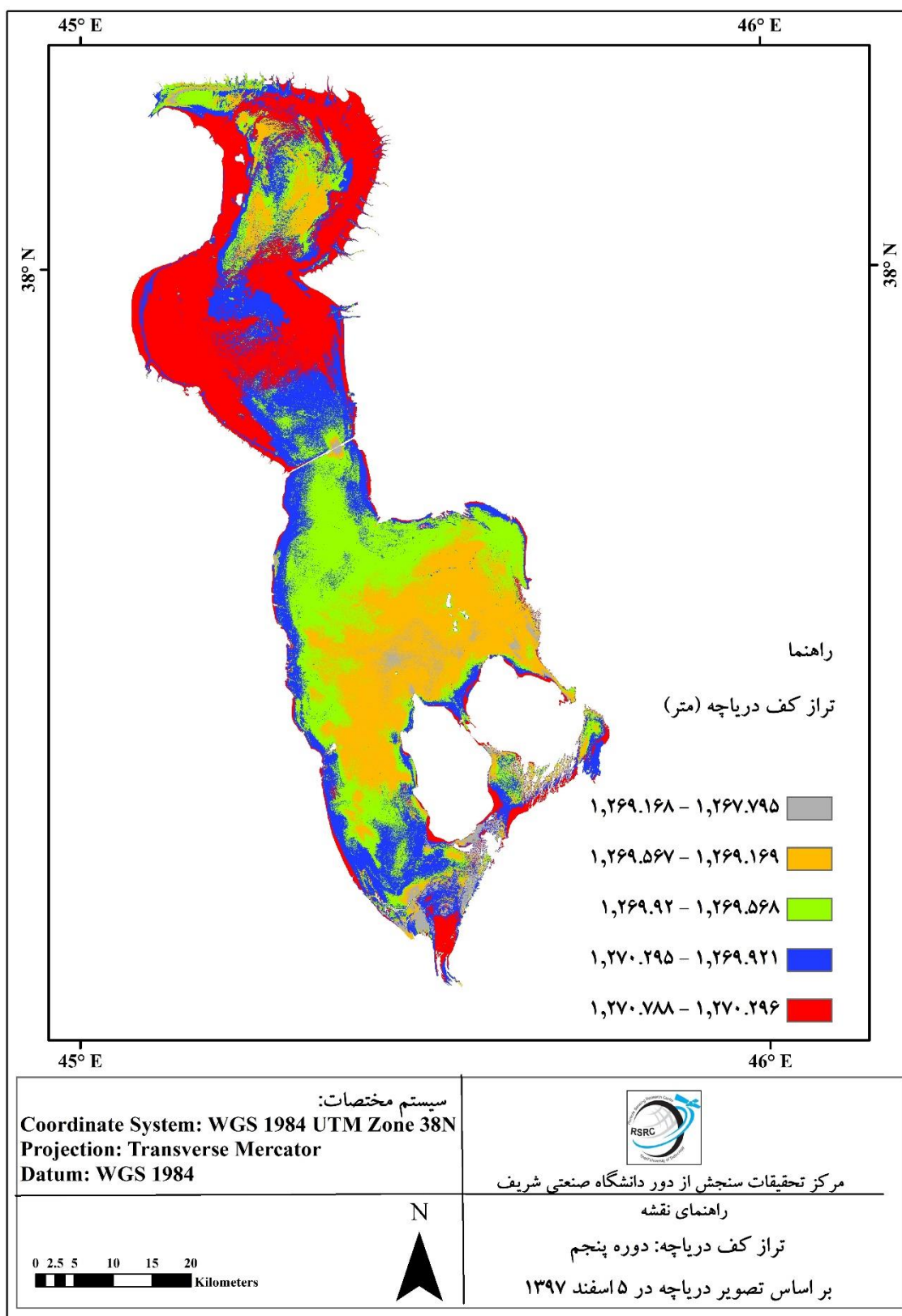
(ب)



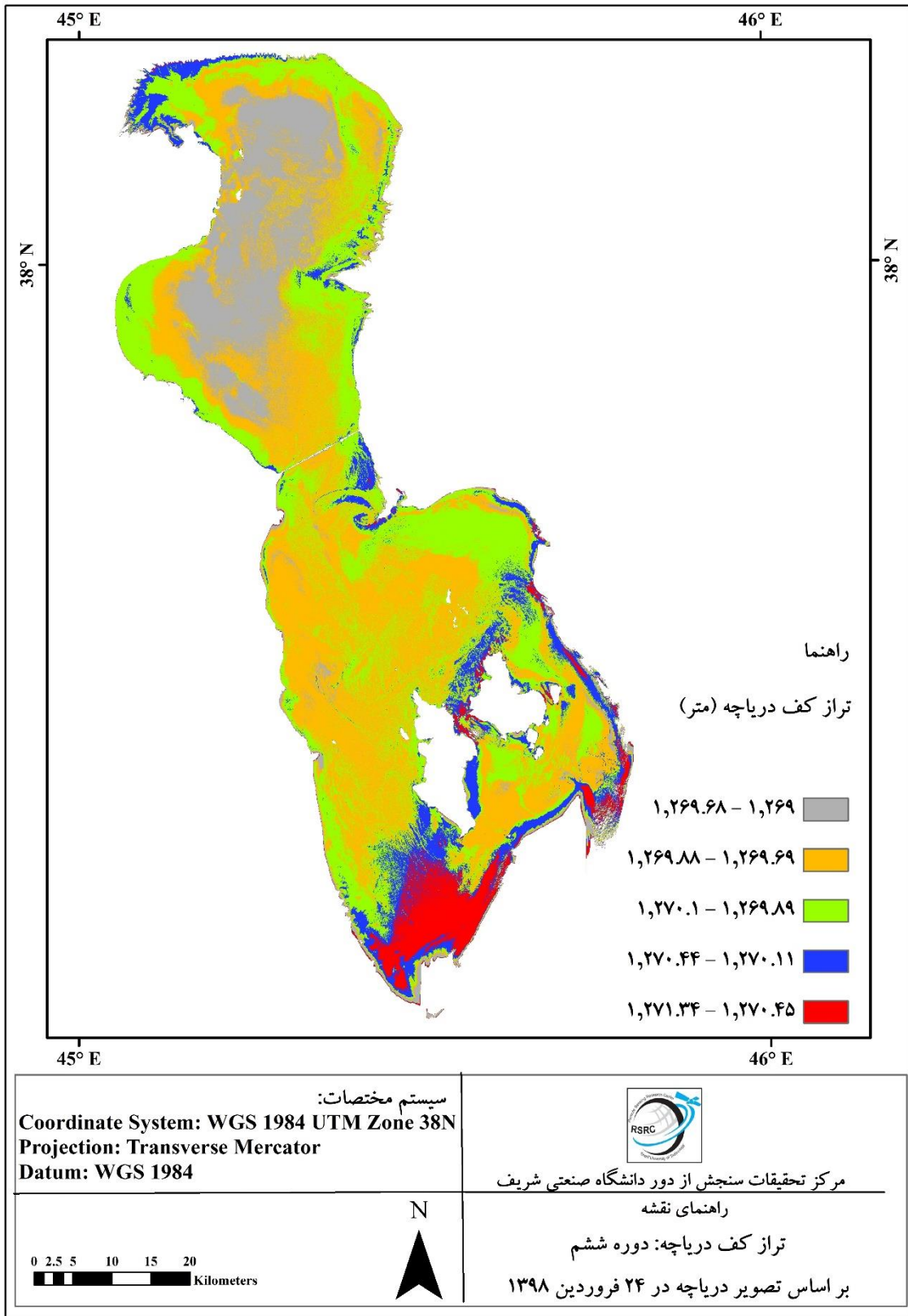
(ج)



(د)



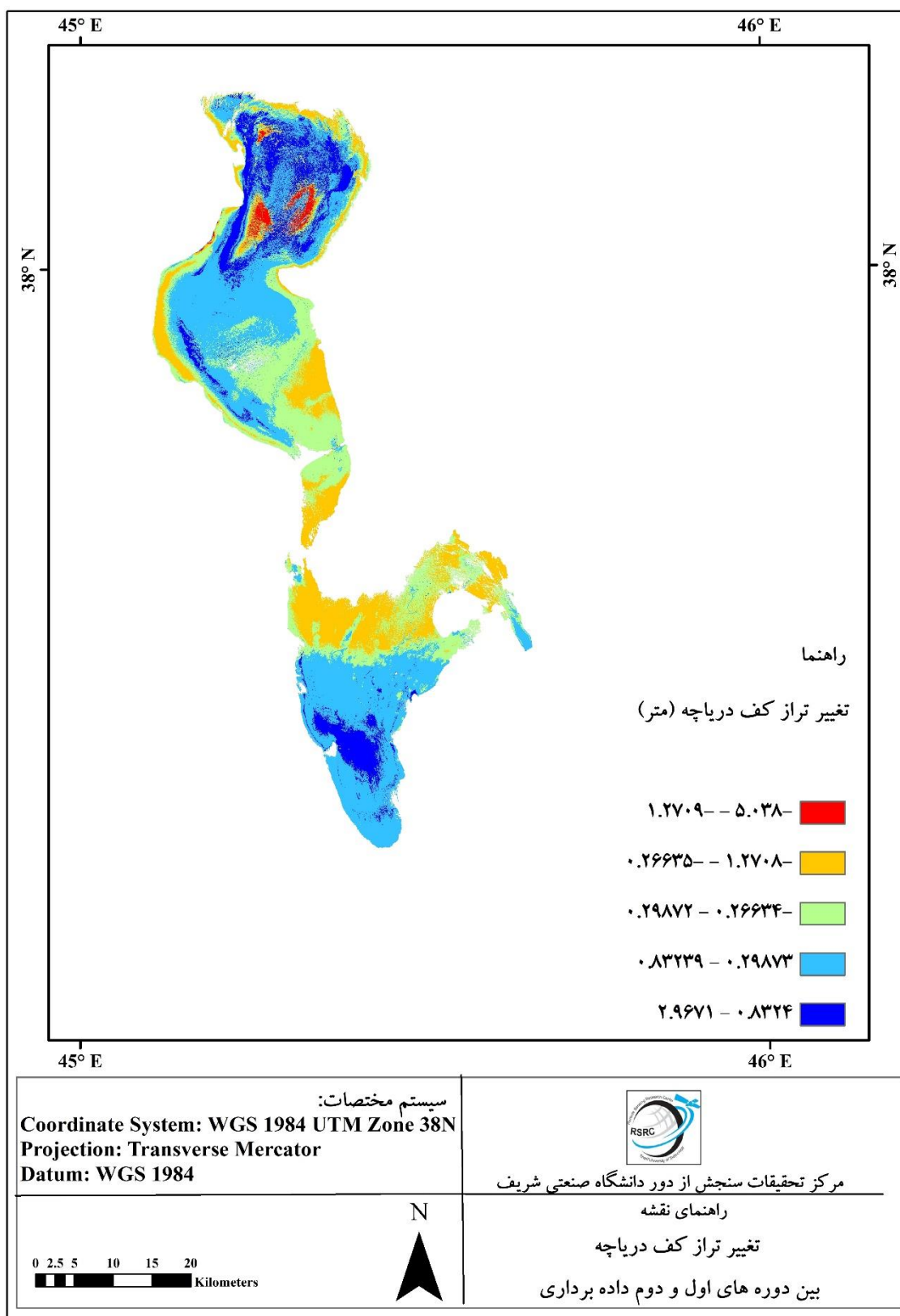
(ه)



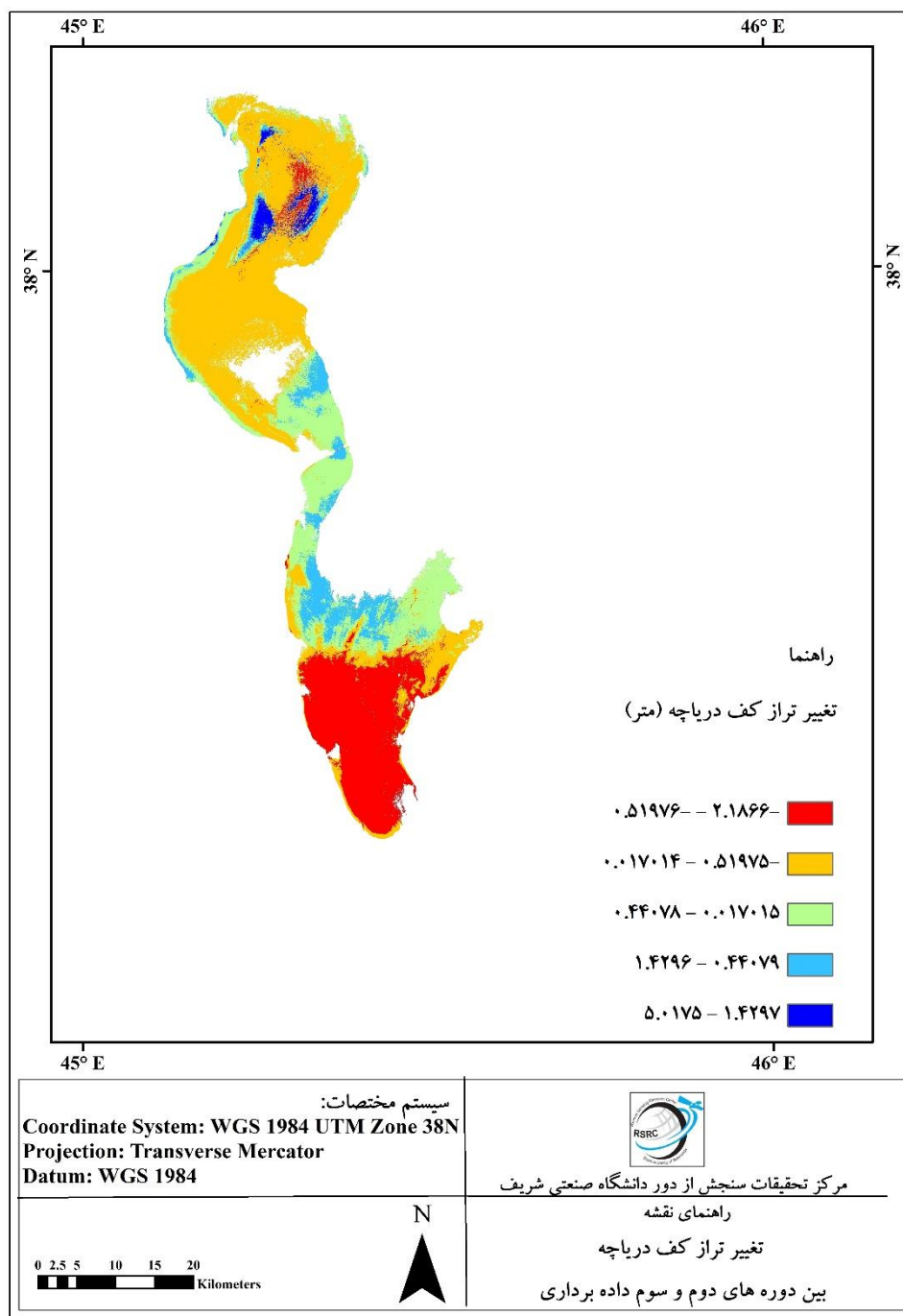
(و)

شکل ۲۷: نقشه‌ی بسیمتری دریاچه در پنج دوره‌ی داده‌برداری (الف) دوره‌ی اول (ب) دوره‌ی دوم (ج) دوره‌ی سوم (د) دوره‌ی چهارم (ه) دوره‌ی پنجم (و) دوره‌ی ششم

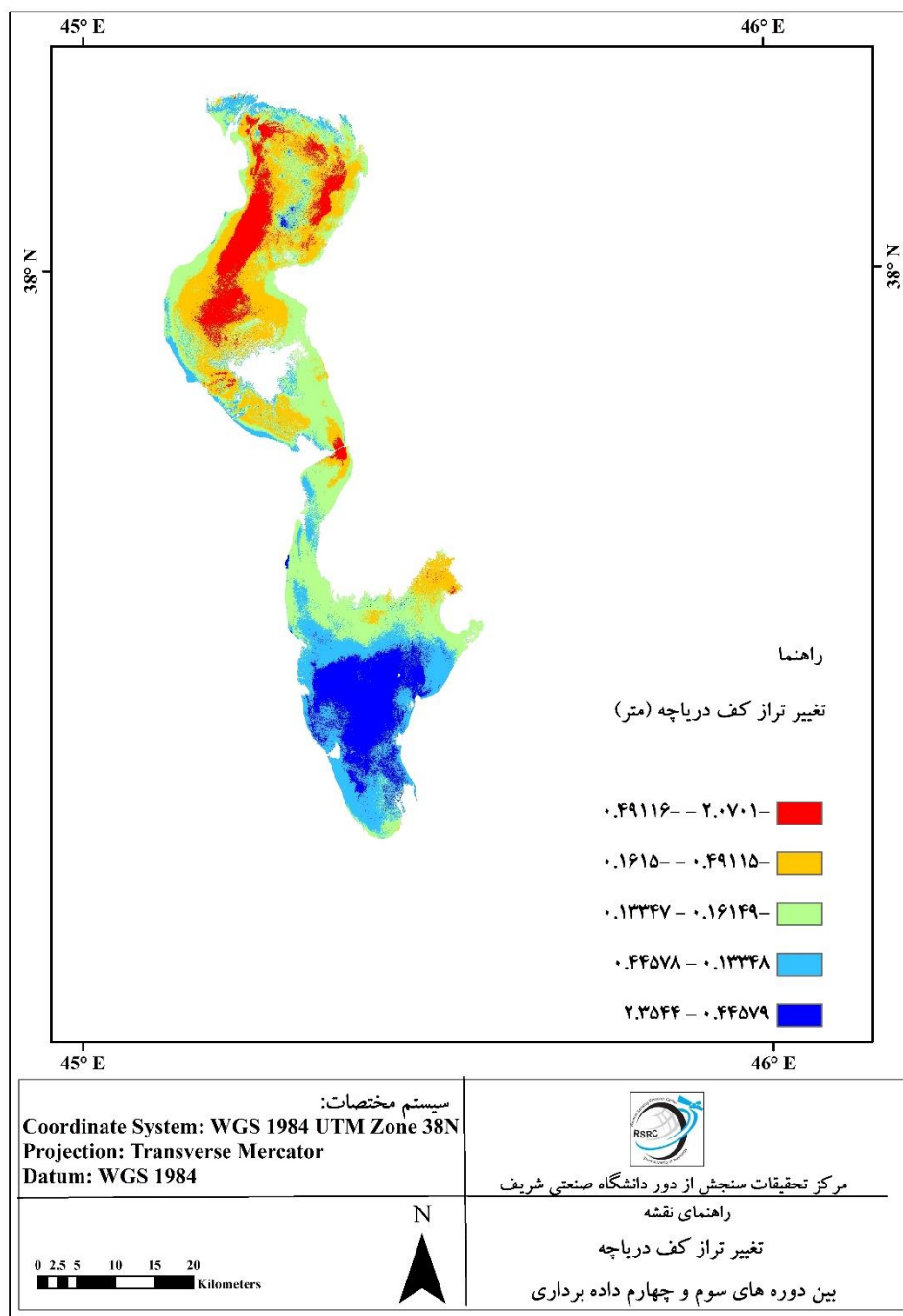
با محاسبه‌ی اختلاف میان نقشه‌های بسیمتری دریاچه در هر دو دوره‌ی متوالی داده‌برداری، نقشه‌های میزان تغییر تراز بستر بین هر دو دوره به دست می‌آید. شکل ۲۸ نقشه‌ی اختلاف تراز بستر دریاچه بین هر دو دوره‌ی متوالی داده‌برداری را نشان می‌دهد.



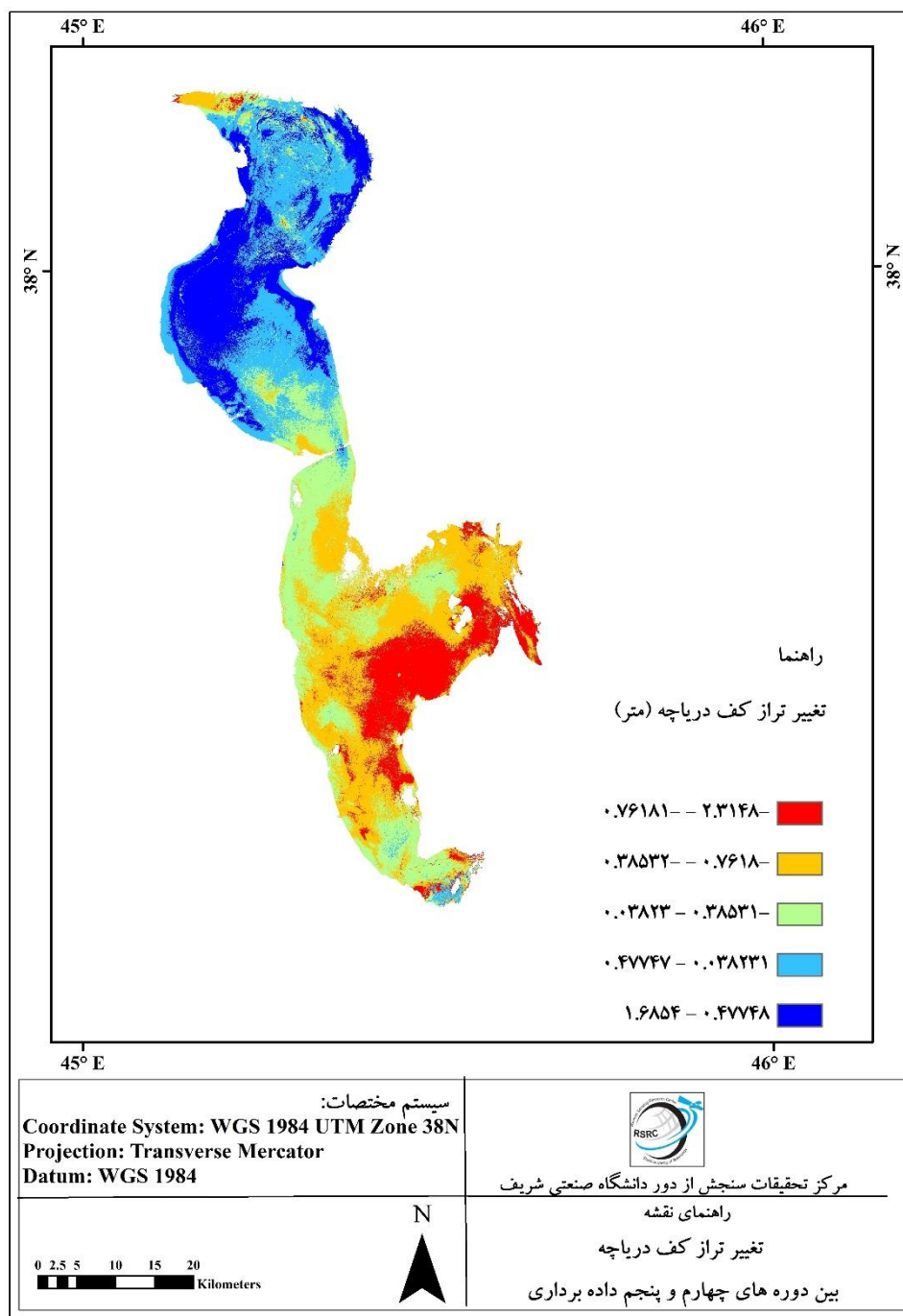
(الف)



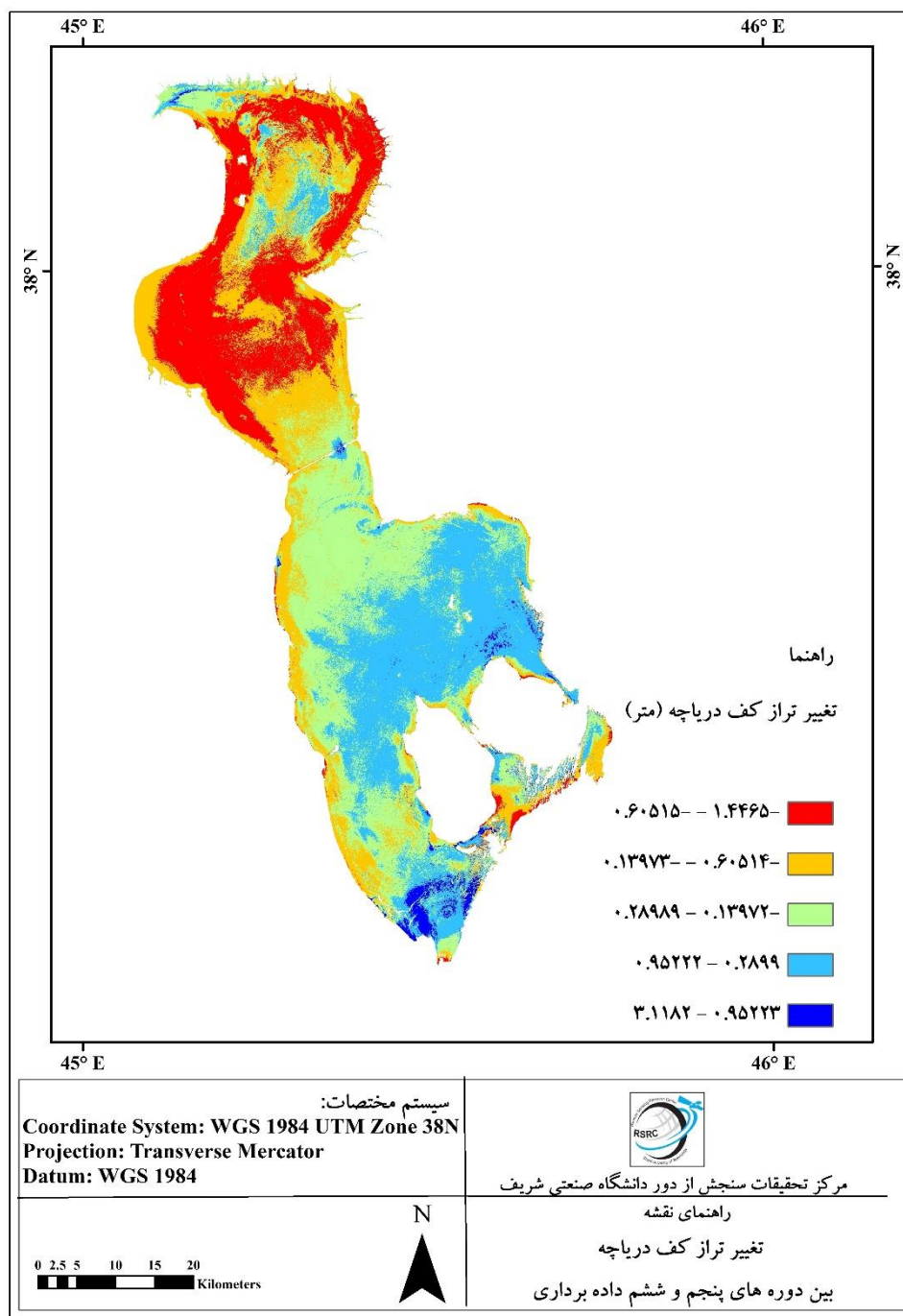
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۲۸: نقشه‌های اختلاف تراز بستر بین هر دو دوره‌ی متوالی (الف) دوره‌های اول و دوم (ب) دوره‌های دوم و سوم (ج)

دوره‌های سوم و چهارم (د) دوره‌های چهارم و پنجم (ه) دوره‌های پنجم و ششم

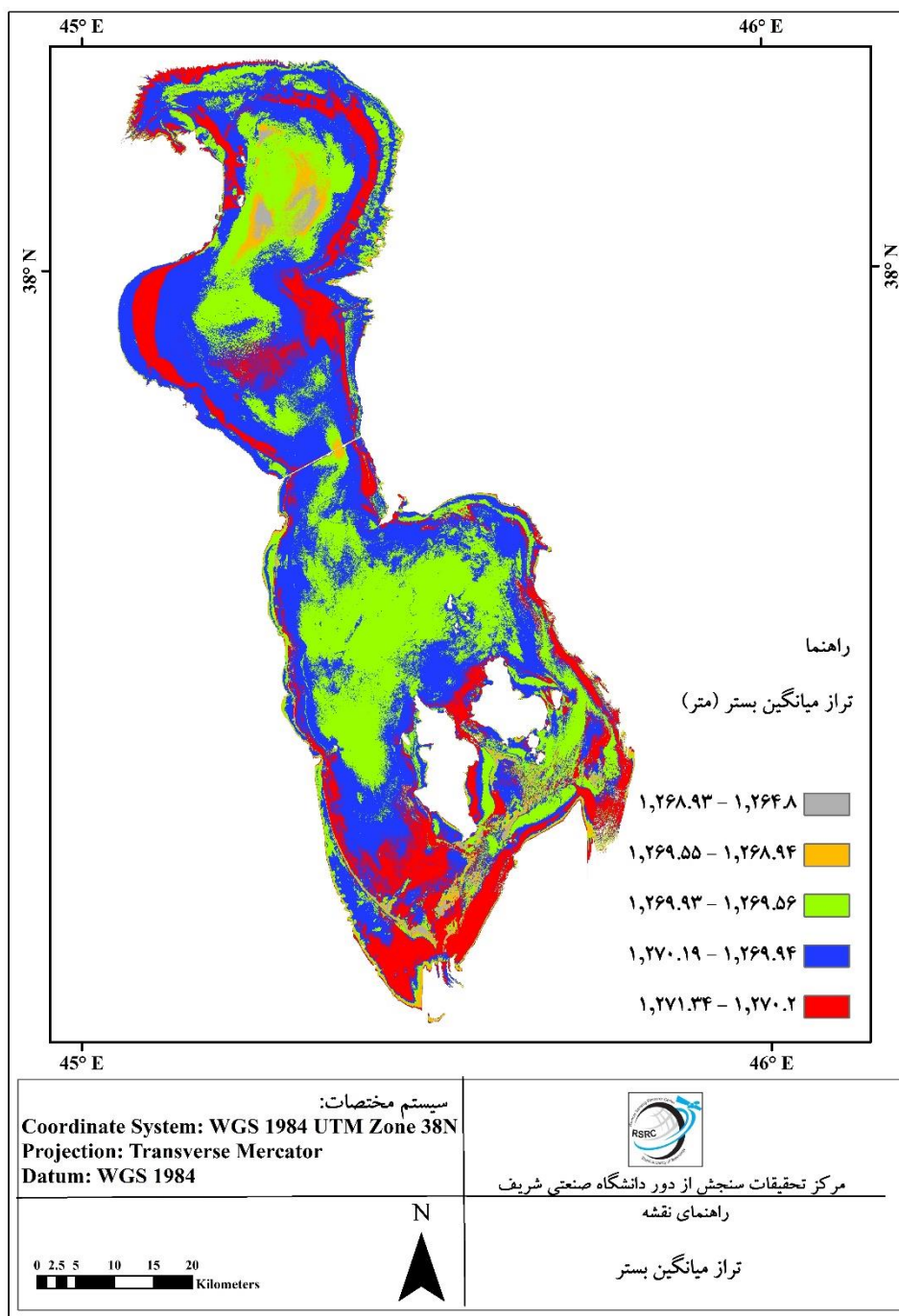
در جدول ۱۳ نیز میانگین تغییر مطلق تراز بستر دریاچه و میزان تغییر حجم بستر آورده شده است. علاوه بر آن، روند تغییر تراز سطح آب دریاچه میان هر دو تصویر پیاپی به منظور مقایسه‌ی مقادیر تغییر حجم رسوبات بستر با روند مورد انتظار آن آورده شده است. انتظار می‌رود تغییر تراز بستر دریاچه با توجه به شور بودن آب آن، در اثر ترسیب و انحلال نمک روی داده باشد و یا در اثر ورود و یا ته‌نشینی رسوبات و گل و لای ورودی‌های دریاچه باشد. اگر تغییر بستر ناشی از انحلال و ترسیب نمک در نظر شود، همان‌گونه که انتظار می‌رود، با افزایش تراز سطح آب در گذر از دوره‌های اول به دوم، سوم به چهارم، چهارم به پنجم و پنجم به ششم، افزایش کلی تراز سطح بستر را می‌توان در اثر انحلال نمک به دلیل افزایش آب در دسترس دانست. بنا بر دلیلی مشابه، با کاهش تراز در گذر از دوره‌های دوم به سوم، انتظار می‌رود با ترسیب نمک به دلیل کاهش آب در دسترس، میزان تراز کلی بستر افزایش یابد. اما نکته‌ی قابل توجه کاهش تراز سطح بستر در گذر از دوره‌های دوم به سوم، علی‌رغم کاهش تراز سطح بستر است. با توجه به قرارگیری قرارگیری دوره‌ی دوم در فصل بهار و دوره‌ی سوم در فصل تابستان، می‌توان این فرضیه را مطرح کرد که در دوره‌ی دوم، وجود گل و لای در رودخانه‌های ورودی در بستر دریاچه و ترسیب آن‌ها موجب افزایش تراز بستر شده است و بنابراین، کاهش تراز دریاچه در دوره‌ی سوم، به میزان مورد انتظار تراز کلی بستر را افزایش نداده است.

جدول ۱۳: روند تغییر تراز سطح آب دریاچه، میانگین تغییر مطلق تراز بستر و میزان تغییر حجم بستر در هر دو دوره‌ی متوالی داده‌برداری

مرحله	روند تغییر تراز سطح آب دریاچه	تغییر تراز سطح آب (متر)	میانگین تغییر مطلق تراز بستر (m)	میزان تغییر حجم بستر (km ³)
اول و دوم	افزایش	۰/۴۳۰۰	۰/۵۳۹۶	۰/۳۳۶۸
دوم و سوم	کاهش	-۰/۴۸۰۰	۰/۴۰۵۵	-۰/۱۲۷۱
سوم و چهارم	افزایش	۰/۲۷۰۰	۰/۲۹۷۰	-۰/۰۰۳۲
چهارم و پنجم	افزایش	۰/۲۸۰۰	۰/۴۹۳۳	-۰/۱۹۷۶
پنجم و ششم	افزایش	۰/۵۳۰۰	۰/۴۴۱۹	-۰/۲۰۱۵

حال، در صورتی که میان نقشه‌های تراز کف در شش دوره میانگین گرفته شود، نقشه‌ی حاصله برابر با

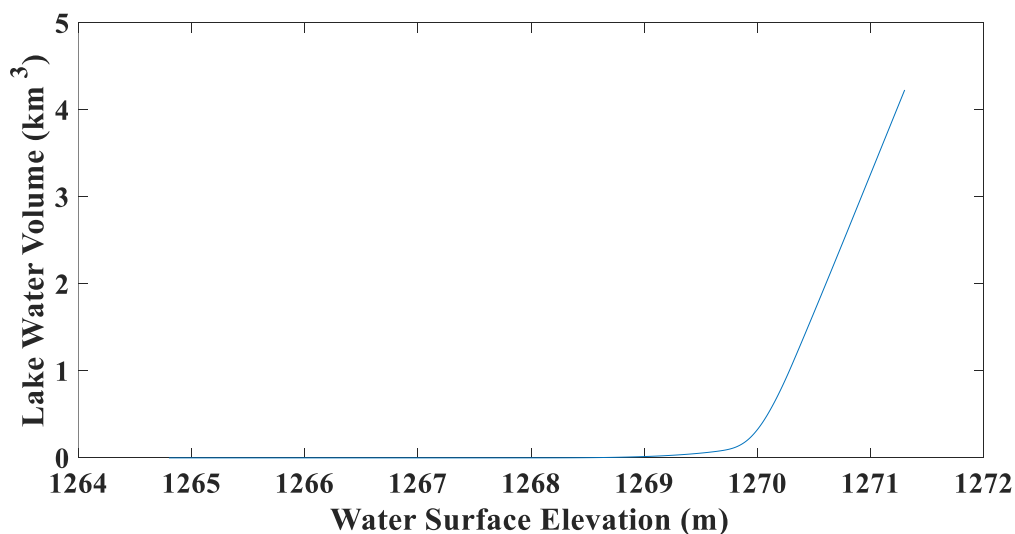
شکل ۲۹ خواهد بود.



شکل ۲۹: تراز بستر

میانگین در شش دوره‌ی داده‌برداری

حال، اگر حجم آب دریاچه متناظر با ترازهای سطح موجود در بازه‌ی بیشینه و کمینه‌ی تراز بستر محاسبه گشته، نمودار حجم آب موجود در دریاچه بر حسب تراز سطح آب به صورت خواهد بود.



شکل ۳۰: حجم آب موجود در دریاچه بر حسب تراز سطح آب

از این نمودار می‌توان برای تخمین حجم آب موجود در دریاچه در بازه‌های تراز سطح آب میان بیشینه و کمینه‌ی تراز نقاط دریاچه استفاده نمود. در استفاده از این نمودار توجه به دو نکته حائز اهمیت است. یکی از این نکات این است که شکل ۲۹ به صورت میانگینی از ترازهای بستر در کل دوره‌ها به دست آمده است. بنابراین، شاید برای هر یک از دوره‌ها به تنهایی نماینده‌ی مناسبی از تراز بسترشان نباشد. با این حال، قادر است دید مناسبی از شکل کلی تراز به دست دهد و برای تعیین عمق نقاط فاقد داده استفاده شود. مورد دوم این است که ممکن است در برخی از ترازاها، مقداری از آب در چاله‌هایی کوچک‌تر تشکیل شود اما در بدنه‌ی اصلی دریاچه نباشد. بنابراین، لحاظ کردن آن هم از این نظر که شاید جزئی از دریاچه به حساب نیاید و هم از این منظر که چاله‌ها احتمالاً تراز برابری با دریاچه ندارند درست نخواهد بود.

۶. محدودیت‌ها، چالش‌ها و پیشنهادات

در بخش به‌روزرسانی روابط تراز سطح آب-مساحت-حجم دریاچه ارومیه، علی‌رغم اینکه در زمان دریافت تصاویر ماهواره‌ای تنها تصاویر نسبتاً واضح دریاچه ثبت شده بودند، با این حال از میان ۱۱۲ تصویر لندست ۴- ۵ تنها ۷۵ مورد و از بین ۹۷ تصویر مورد بررسی ماهواره‌ی لندست ۸ تنها ۴۱ تصویر قابل قبول بودند. دلیل عمده‌ی این مسئله را می‌توان وجود اختلال شامل غبار، مه و یا ابر بر فراز دریاچه دانست. علت دیگر آن را می‌توان وقوع بارش در زمان‌های نزدیک به تصویربرداری دانست که موجب بالا رفتن رطوبت در پیکسل‌های غیر آبی شده و موجب می‌شود در صورت نزدیکی به دریاچه به عنوان بخشی از بدنه‌ی آبی آن شناسایی شوند. نکته‌ی دیگری که در این مورد وجود دارد صرف نظر کردن از تعدادی از این تصاویر به علت جدا شدن بخش‌های شمالی و جنوبی دریاچه در آن‌هاست. البته ممکن است در برخی از این تصاویر در واقعیت ارتباطی اندک میان بخش شمالی و جنوبی دریاچه وجود داشته باشد. اما با توجه به اینکه هر پیکسل معادل ۳۰ متر بر روی زمین است، و یا با توجه به خطاهای موجود در روش استخراج بدنه‌ی آبی قابل شناسایی نباشد. علت صرف نظر از این تصاویر، ایجاد خطا در نتایج این پژوهش با توجه به اهداف آن است؛ چرا که در صورت جدا شدن دو بخش شمالی و جنوبی دریاچه دیگر نمی‌توان تراز دو بخش جدا شده را یکی دانست و ایستگاه قرائت واقع در گلخانه، با توجه به موقعیت قرارگیری آن، تنها معرف تراز سطح آب بخش جنوبی است. از آنجا که یکی از اهداف این پژوهش به‌روزرسانی رابطه‌ی میان تراز سطح آب-مساحت-حجم دریاچه است، یکسان نبودن تراز در دو بخش شمالی و جنوبی دریاچه موجب ایجاد خطا در نتایج خواهد شد. از طرفی، هدف دیگر این پژوهش نیز تعیین نقشه‌ی بسیمتری دریاچه است که با توجه به روشی که پیش‌تر توضیح داده شد، نیازمند به‌کارگیری مستقیم اطلاعات تراز دریاچه است. بنابراین، وجود تفاوت در تراز شمال و جنوب دریاچه انجام این بخش را با خطا مواجه می‌کند.

در بخش استخراج نقشه‌ی بسیمتری دریاچه‌ی ارومیه نیز نقاط برداشت شده در این پروژه فاقد اطلاعاتی از جمله تاریخ دقیق برداشت بودند که مانع از انتخاب مناسب‌ترین تصویر برای هر گروه از داده‌های برداشت شده در یک تاریخ در بازه‌ی مورد مطالعه می‌گردد. از سوی دیگر، انتخاب تراز برای تعیین عمق نقاط را با خطا همراه می‌کند. البته در صورت وجود اطلاعات مربوط به عمق، شاید مناسب باشد که شرکت پیمانکار علاوه بر تاریخ دقیق برداشت نقاط، این اطلاعات را نیز در اختیار بگذارد؛ چرا که با توجه به وجود تغییرات در تراز

سطح آب به علت وجود عواملی از جمله باد، ممکن است تراز قرائت شده در ایستگاه گلخانه‌مانند نماینده مناسبی از تراز دریاچه نباشد. در صورت وجود این اطلاعات می‌توان در مرحله‌ی بعد تصمیم گرفت که آیا تصاویر موجود دارای تاریخ‌های ثبت مناسبی هستند و یا اینکه لازم است از تصاویر ماهواره‌ای مانند Sentinel برای ادامه‌ی پروژه استفاده شود چرا که به علت وجود فواصل زمانی کم‌تر میان دو گذر متوالی این ماهواره بر فراز دریاچه، امکان بررسی تصاویر بیش‌تر در هر بازه وجود دارد (خصوصاً در بازه‌های زمانی که مکرراً دارای تصاویر ابری هستند، می‌تواند کارآمدتر باشد). انتظار می‌رود که خطاهای ناشی از این امر در دوره‌های سوم و چهارم داده‌برداری بالاتر باشد، چرا که مطابق جدول ۵ و جدول ۶ نه تنها طول دوران داده‌برداری در این دو مرحله بسیار طولانی است، بلکه اختلاف تراز سطح آب دریاچه در این دو دوره بین ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر است. این امر موجب می‌شود که در صورت وقوع ترسیب و یا انحلال در این دو دوره، خطا نسبت به دوره‌های پیشین، با اختلاف کم‌تر بین مقادیر تراز سطح آب بیشینه و کمینه، بالاتر باشد.

نکته‌ی دیگر توزیع مکانی نقاط برداشت داده‌های میدانی است که بر مبنای آن‌ها عمق‌سنجی انجام گرفته است. در دوره‌های اول، دوم و چهارم، همگی این نقاط در محدوده‌ی پل میانگذر هستند و این به آن معنی است که نقاط آموزشی برای الگوریتم استفاده‌شده عملاً در بازه‌ی خاصی از عمق قرار می‌گیرند و لزوماً توانایی خوبی در تشخیص اعماق بیشتر (در سایر نقاط دریاچه بخصوص بخش شمالی) را ندارند. از سوی دیگر، در دوره‌ی ششم، با وجود پراکندگی مکانی مناسب مشاهدات، اولاً تعداد مشاهدات بسیار اندک است و ثانیاً، مقادیر عمق بازه‌ی بسیار محدودی را پوشش می‌دهد. این دو مورد نیز می‌توانند موجب بروز خطا در مدل‌سازی و در نهایت در نقشه‌های تولیدی شوند.

۷- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش دو هدف عمده دنبال شدند. هدف اول تعیین رابطه‌ای برای تعیین سطح دریاچه‌ی ارومیه بر اساس تراز سطح آب و دیگری تعیین نقشه‌ی بسیمتری دریاچه‌ی ارومیه بر اساس شش دوره‌ی داده‌برداری است. در مرحله‌ی اول تصاویر دریاچه از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۷ شمسی بر اساس تصاویر ثبت‌شده توسط ماهواره‌های لندست ۴-۵ و لندست ۸ دریافت شدند. هدف اولیه تعیین سطح دریاچه با کمک NDWI و تعیین حد آستانه‌ای برای آن با هدف جدا کردن بدنه‌ی آبی دریاچه از سایر بخش‌ها بود؛ اما با توجه به ثابت نبودن حد آستانه‌ی NDWI برای استخراج سطح دریاچه و دریافت خروجی‌های نامطلوب، از خوشه‌بندی به روش k-means برای این کار استفاده شد. سپس مساحت‌های استخراج‌شده مورد بررسی قرار گرفته و تصاویر مورد قبول تعیین شدند. در نهایت نیز رابطه‌ای میان تراز سطح آب دریاچه و مساحت آن، بر اساس مساحت‌های استخراج‌شده و ترازهای دریافت‌شده از ستاد احیای دریاچه‌ی ارومیه برقرار شد. بر اساس نمودار به‌دست آمده به نظر می‌رسد می‌توان رابطه‌ی میان تراز سطح آب و مساحت دریاچه را به صورت دو رابطه‌ی خطی، با نقطه‌ی تلاقی در تراز ۱۲۷۱/۲۵ متر، با ضرایب همبستگی ۰/۹۲ و ۰/۹۹ توصیف نمود. در نهایت این رابطه با رابطه‌ی به‌دست آمده توسط کریمی و همکاران در سال ۲۰۱۶ مقایسه شد. نتیجه‌ی به‌دست آمده از اختلاف میانگین ۲۸۷ کیلومتر مربع میان مساحت‌های حاصل از رابطه‌ی به‌دست آمده در این پژوهش و رابطه‌ی به‌دست آمده توسط کریمی و همکاران در سال ۲۰۱۶ حکایت می‌کند که به طور متوسط برابر با ۱۱ درصد از مساحت دریاچه است. برای اطمینان از صحت مساحت‌های حاصله، عملیات میدانی در دو تاریخ دوشنبه ۲۴ تیر و چهارشنبه ۲۶ تیر ۱۳۹۸ انجام شد. بدین صورت که با استفاده از دستگاه GPS مرز دریاچه در بررسی میدانی ثبت گردید و در نهایت مکان هندسی نقاط ثبت‌شده با مرز شناسایی‌شده در نزدیک‌ترین تصویر ماهواره‌ی لندست ۸ از نظر زمانی، مقارن با پنجشنبه ۲۷ تیر ۱۳۹۸ و یا ۱۸ جولای ۲۰۱۹ مقایسه گردید. نتایج بیانگر تشخیص قابل قبول مرز دریاچه توسط الگوریتم به‌کاررفته در این پژوهش بودند. در نهایت مقدار میانگین NDWI برای پیکسل‌های متناظر با مرز آبی دریاچه استخراج شد که دارای مقدار میانگین $10^{-7} \times 9/23$ بود. در بخش بعدی از پژوهش، نقشه‌های بسیمتری دریاچه در شش دوره‌ی داده‌برداری به دست آمد. بدین منظور اطلاعات شش دوره‌ی داده‌برداری از مهر ۱۳۹۶ تا فروردین ۱۳۹۸ از ستاد احیای دریاچه‌ی ارومیه اخذ شد. سپس در هر دوره‌ی داده‌برداری، تصویری واضح از دریاچه انتخاب و برای افزایش دقت در انجام طبقه‌بندی،

با استفاده از طبقه‌بندی بانظارت به روش SVM، بدنه‌ی آبی دریاچه در آن استخراج شد. سپس نقاط داده‌برداری شده به دو دسته‌ی داخل و خارج بدنه‌ی آبی تقسیم شده و تنها نقاط داخل بدنه‌ی آبی مورد بررسی قرار گرفتند. سپس عمق نقاط داخل بدنه‌ی آبی با استفاده از تفاضل میان تراز کف گزارش شده در نقطه‌ی مورد نظر و تراز سطح آب در روز متناظر به دست آمد. با توجه به منفی بودن عمق برخی از نقاط، تنها نقاط با عمق مثبت مورد بررسی قرار گرفتند. در مرحله‌ی بعد با استفاده از فاصله‌ی ماهانابولیس داده‌های پرت حذف شدند و سپس برای هر مرحله مدلی ترکیبی از رگرسیون درختی و شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی عمق نقاط با استفاده از مقادیر انعکاس باندها در پیکسل متناظر با هر نقطه‌ی مشاهداتی توسعه داده شد. از سوی دیگر، با توجه به مطلوب بودن شاخص‌های R^2 ، MAE و RMSE در تمامی دوره‌ها به جز دوره‌ی ششم، این مدل به خوبی قادر است رابطه‌ی میان اعماق و مقادیر پیکسل‌ها را توضیح دهد

در نهایت، نقشه‌های بسیمتری دوره‌های متوالی برای بررسی میزان ترسیب و انحلال نمک مورد مطالعه قرار گرفتند. همان‌گونه که انتظار می‌رود، با افزایش تراز سطح آب در گذر از دوره‌های اول به دوم، سوم به چهارم، چهارم به پنجم و پنجم به ششم، تراز سطح بستر به طور کلی افزایش می‌یابد. بنا بر دلیلی مشابه، با کاهش تراز در گذر از دوره‌های دوم به سوم، انتظار می‌رود با ترسیب نمک به دلیل کاهش آب در دسترس، میزان تراز کلی بستر افزایش یابد. اما نکته‌ی قابل توجه کاهش تراز سطح بستر در گذر از دوره‌های دوم به سوم، علی‌رغم کاهش تراز سطح بستر است. با توجه به قرارگیری دوره‌ی دوم در فصل بهار و دوره‌ی سوم در فصل تابستان، می‌توان این فرضیه را مطرح کرد که در دوره‌ی دوم، وجود گل و لای در رودخانه‌های ورودی در بستر دریاچه و ترسیب آن‌ها موجب افزایش تراز بستر شده است و بنابراین، کاهش تراز دریاچه در دوره‌ی سوم، به میزان مورد انتظار تراز کلی بستر را افزایش نداده است.

پیوست

جدول ۱۴: اطلاعات مربوط به تراز سطح آب و مساحت دریاچه در تصاویر قابل قبول

تاریخ میلادی	تراز سطح آب (m)	مساحت (km ²)	تاریخ میلادی	تراز سطح آب (m)	مساحت (km ²)
۱۹۸۴/۰۸/۱۸ ۱۹۸۴/۰۸/۲۷	۱۲۷۲/۲۱	۴۰۲۳/۳۷	۲۰۰۹/۰۵/۰۳	۵۰۳۷/۸۰۲	
۱۹۸۵/۰۷/۲۹ ۱۹۸۵/۰۸/۰۵	۱۲۷۲/۱۵	۳۹۲۹/۸۴۳	۲۰۰۹/۰۵/۱۹	۵۲۶۶/۲۹۶	
۱۹۸۶/۰۹/۰۲ ۱۹۸۶/۰۹/۰۹	۱۲۷۲/۱	۳۸۷۴/۷۲۶	۲۰۰۹/۰۶/۰۵	۵۰۶۶/۳۸۶	
۱۹۸۸/۰۷/۰۵ ۱۹۸۸/۰۷/۱۲	۱۲۷۱/۹۶	۳۷۸۴/۱۹۱	۲۰۰۹/۰۷/۰۶	۵۶۲۸/۰۲۳	
۱۹۸۸/۰۸/۲۲ ۱۹۸۸/۰۸/۲۹	۱۲۷۱/۸۴	۳۷۱۳/۹۶۳	۲۰۰۹/۰۷/۲۲	۵۴۹۱/۷۳۹	
۱۹۸۸/۱۰/۲۵ ۱۹۸۸/۱۱/۰۱	۱۲۷۱/۶۷	۳۶۵۱/۰۹۶	۲۰۰۹/۰۸/۲۳	۵۴۰۴/۹۴۸	
۱۹۸۹/۰۱/۰۴ ۱۹۸۹/۰۱/۰۵	۱۲۷۱/۵۲	۳۵۴۷/۲۱	۲۰۰۹/۱۰/۲۹	۵۳۹۷/۸۴۶	
۱۹۸۹/۰۴/۰۳ ۱۹۸۹/۰۴/۱۰	۱۲۷۱/۸۱	۳۵۷۴/۳۵	۲۰۱۰/۰۷/۰۹	۵۶۰۶/۷۹۲	
۱۹۸۹/۰۵/۲۱ ۱۹۸۹/۰۵/۲۸	۱۲۷۱/۵۴	۳۴۸۸/۹۷۸	۲۰۱۰/۰۸/۱۰	۵۵۴۴/۶۰۱	
۱۹۸۹/۰۶/۱۳ ۱۹۸۹/۰۶/۲۲	۱۲۷۱/۴۱	۳۴۹۴/۳۲۳	۲۰۱۰/۰۹/۱۱	۵۴۶۲/۳۸۴	
۱۹۸۹/۰۷/۱۵ ۱۹۸۹/۰۷/۱۶	۱۲۷۱/۲۶	۳۳۹۲/۰۵۱	۲۰۱۰/۱۱/۱۴	۵۴۰۰/۷۱۶	
۱۹۸۹/۰۷/۲۴ ۱۹۸۹/۰۷/۳۱	۱۲۷۱/۲۶	۳۳۲۴/۱۰۵	۲۰۱۰/۱۱/۳۰	۵۳۶۴/۰۶۵	

تاریخ میلادی	تراز سطح آب (m)	مساحت (km ²)	تاریخ میلادی	تراز سطح آب (m)	مساحت (km ²)
۱۹۸۹/۰۸/۲۴ ۱۹۸۹/۰۹/۱۰	۱۲۷۱/۲۴	۳۴۳۲/۳۴۷	۲۰۱۰/۱۲/۱۶	۱۲۷۶/۱۳۵	۵۳۰۱/۷۵۵
۱۹۹۰/۰۵/۳۱ ۱۹۹۰/۰۶/۰۹	۱۲۷۱/۳۱	۳۶۵۵/۰۲۲	۲۰۱۱/۰۳/۰۶	۱۲۷۶/۲۹۵	۵۳۲۳/۰۷۵
۱۹۹۰/۰۶/۲۵ ۱۹۹۰/۰۷/۰۲	۱۲۷۱/۲۷	۳۴۹۸/۹۳	۲۰۱۱/۰۷/۲۸	۱۲۷۶/۱۶	۵۳۱۳/۶۷۴
۱۹۹۰/۰۸/۱۹ ۱۹۹۰/۰۸/۲۰	۱۲۷۱/۲	۳۴۸۷/۷۷۹	۲۰۱۱/۰۸/۱۳	۱۲۷۵/۸۶۵	۵۱۷۶/۲۹۴
۱۹۹۰/۰۹/۱۳ ۱۹۹۰/۰۹/۲۰	۱۲۷۱/۰۷	۳۳۶۴/۷۹۳	۲۰۱۱/۰۹/۱۴	۱۲۷۵/۶۸	۵۱۲۳/۳۱۸
۱۹۹۱/۰۷/۲۱ ۱۹۹۱/۰۷/۳۰	۱۲۷۰/۸۵	۲۴۱۴/۹۰۹	۲۰۱۳/۰۷/۰۱	۱۲۷۵/۹۸	۵۰۷۲/۶۰۹
۱۹۹۱/۰۸/۲۲ ۱۹۹۱/۰۸/۳۱	۱۲۷۰/۷۵	۲۱۴۹/۶۱۳	۲۰۱۳/۰۷/۱۷	۱۲۷۵/۸۰۵	۴۹۹۴/۰۰۴
۱۹۹۱/۰۹/۰۷ ۱۹۹۱/۰۹/۱۶	۱۲۷۰/۶۶	۱۹۹۱/۶۱۷	۲۰۱۳/۰۸/۰۲	۱۲۷۵/۷	۴۹۲۷/۵۹۵
۱۹۹۲/۰۷/۱۶ ۱۹۹۲/۰۷/۲۳	۱۲۷۰/۵۸	۱۸۹۳/۲۵۴	۲۰۱۳/۰۸/۱۸	۱۲۷۶/۰۲۵	۵۳۱۷/۸۵۹
۱۹۹۲/۰۸/۲۴ ۱۹۹۲/۰۹/۰۲	۱۲۷۰/۵۲	۱۶۶۳/۰۳۲	۲۰۱۳/۰۹/۰۳	۱۲۷۵/۷۸۵	۵۲۰۴/۰۹۷
۱۹۹۵/۰۸/۱۰ ۱۹۹۵/۰۸/۱۷	۱۲۷۰/۳۹	۱۴۹۰/۲۰۳	۲۰۱۳/۰۹/۱۹	۱۲۷۸/۱	۵۹۹۸/۹۷۸
۱۹۹۵/۰۸/۲۶ ۱۹۹۵/۰۹/۰۲	۱۲۷۰/۳۶	۱۳۵۲/۳	۲۰۱۳/۱۰/۰۵	۱۲۷۷/۹۹	۵۹۶۵/۹۷۵
۱۹۹۸/۰۶/۱۵ ۱۹۹۸/۰۶/۲۲	۱۲۷۰/۳۳	۹۷۴/۱۱۰۵	۲۰۱۳/۱۰/۲۱	۱۲۷۷/۵۵۵	۵۷۳۲/۳۱۲

تاریخ میلادی	تراز سطح آب (m)	مساحت (km ²)	تاریخ میلادی	تراز سطح آب (m)	مساحت (km ²)
۱۹۹۸/۰۷/۰۱ ۱۹۹۸/۰۷/۰۸	۱۲۷۷/۴۴۵	۵۷۶۴/۹۸۱	۲۰۱۴/۰۶/۱۸	۱۲۷۰/۵۵	۱۷۱۹/۰۴۹
۱۹۹۸/۰۷/۱۷ ۱۹۹۸/۰۷/۲۴	۱۲۷۷/۳۳	۵۷۰۳/۲	۲۰۱۴/۰۷/۰۴	۱۲۷۰/۴۴	۱۵۷۴/۴۱۹
۱۹۹۸/۰۸/۱۸ ۱۹۹۸/۰۸/۲۵	۱۲۷۷/۱۵۵	۵۶۰۶/۸۲۸	۲۰۱۴/۰۷/۲۰	۱۲۷۰/۳۲	۹۵۱/۳۹۳۶
۱۹۹۸/۰۹/۰۳ ۱۹۹۸/۰۹/۱۰	۱۲۷۷/۰۸	۵۵۶۵/۸۲۷	۲۰۱۵/۰۵/۲۰	۱۲۷۰/۶۱	۲۰۷۶/۸۳۵
۱۹۹۸/۱۰/۲۱ ۱۹۹۸/۱۰/۲۸	۱۲۷۶/۵۹۵	۵۴۹۸/۷۶۶	۲۰۱۵/۰۶/۰۵	۱۲۷۰/۵۹	۱۸۸۷/۰۶۶
۱۹۹۹/۰۸/۱۷ ۱۹۹۹/۰۸/۲۴	۱۲۷۶	۵۴۵۴/۴۲	۲۰۱۵/۰۶/۲۱	۱۲۷۰/۴۶	۱۶۰۹/۳۴۲
۱۹۹۹/۰۶/۰۲ ۱۹۹۹/۰۶/۰۹	۱۲۷۶/۳۸۵	۵۴۰۱/۱۴۳	۲۰۱۵/۰۷/۰۷	۱۲۷۰/۳۸	۱۳۰۷/۸۲۲
۱۹۹۹/۰۶/۱۸ ۱۹۹۹/۰۶/۲۵	۱۲۷۶/۲۹	۵۳۴۹/۳۲۳	۲۰۱۵/۰۷/۲۳	۱۲۷۰/۲۹	۱۱۲۶/۴۵۱
۲۰۰۰/۰۶/۲۰ ۲۰۰۰/۰۶/۲۷	۱۲۷۵/۳۳	۴۹۱۹/۸۶۹	۲۰۱۶/۰۲/۱۶	۱۲۷۰/۵۴	۲۱۵۱/۰۸۳
۲۰۰۰/۰۷/۰۶ ۲۰۰۰/۰۷/۱۳	۱۲۷۵/۲۲	۴۹۱۴/۷۲۳	۲۰۱۶/۰۷/۰۹	۱۲۷۰/۹۱	۲۵۸۸/۶۴۷
۲۰۰۰/۰۷/۲۲ ۲۰۰۰/۰۷/۲۹	۱۲۷۵/۱۱	۴۸۶۰/۷۳۲	۲۰۱۶/۰۷/۲۵	۱۲۷۰/۸۱	۲۵۱۵/۱۶
۲۰۰۰/۰۸/۲۳ ۲۰۰۰/۰۸/۳۰	۱۲۷۴/۸۷۵	۴۸۰۰/۳۱۴	۲۰۱۶/۰۹/۱۱	۱۲۷۰/۵۸	۲۰۵۴/۷۰۴
۲۰۰۰/۰۹/۰۸ ۲۰۰۰/۰۹/۱۵	۱۲۷۴/۷۶	۴۷۹۱/۶۰۱	۲۰۱۶/۰۹/۲۷	۱۲۷۰/۵۳	۱۸۸۹/۳۰۳

تاریخ میلادی	تراز سطح آب (m)	مساحت (km ²)	تاریخ میلادی	تراز سطح آب (m)	مساحت (km ²)
۲۰۰۱/۰۶/۰۷	۱۲۷۴/۴۲	۴۶۶۳/۹۲۲	۲۰۱۶/۱۰/۱۳	۱۲۷۰/۴۸	۱۹۱۰/۳۷۲
۲۰۰۱/۰۶/۱۴					
۲۰۰۱/۰۶/۳۰	۱۲۷۴/۲۶	۴۶۴۰/۱۰۵	۲۰۱۷/۰۵/۲۵	۱۲۷۰/۹۲	۲۶۵۶/۳۷۱
۲۰۰۱/۰۷/۰۹					
۲۰۰۱/۰۷/۱۶	۱۲۷۴/۱۵	۴۶۲۷/۱۰۳	۲۰۱۷/۰۶/۱۰	۱۲۷۰/۸۵	۲۴۹۸/۱۵۸
۲۰۰۱/۰۷/۲۵					
۲۰۰۱/۰۸/۱۰	۱۲۷۴/۰۱	۴۶۴۹/۳۶۸	۲۰۱۷/۰۶/۲۶	۱۲۷۰/۷۴	۲۲۷۳/۱۰۱
۲۰۰۱/۰۸/۱۷					
۲۰۰۲/۰۶/۱۰	۱۲۷۳/۹۸	۴۵۷۶/۶۸۶	۲۰۱۷/۰۷/۱۲	۱۲۷۰/۶۴	۲۰۷۸/۶۷۸
۲۰۰۲/۰۶/۱۷					
۲۰۰۲/۰۷/۰۳	۱۲۷۳/۸	۴۴۸۲/۲۷۹	۲۰۱۷/۲۷/۲۸	۱۲۷۰/۵۴	۱۹۳۱/۲۷۹
۲۰۰۲/۰۷/۲۶					
۲۰۰۲/۰۷/۱۲	۱۲۷۳/۷۸	۴۴۵۴/۱۱۱	۲۰۱۷/۰۸/۱۳	۱۲۷۰/۴۶	۱۷۴۲/۴۷۴
۲۰۰۲/۰۷/۱۹					
۲۰۰۴/۰۸/۱۸	۱۲۷۳/۶۶	۴۴۲۹/۶۹۳	۲۰۱۷/۰۸/۲۹	۱۲۷۰/۳۸	۱۵۵۳/۸۹۶
۲۰۰۴/۰۸/۲۵					
۲۰۰۵/۰۶/۱۸	۱۲۷۳/۷۷	۴۴۳۳/۷۹۶	۲۰۱۷/۰۹/۱۴	۱۲۷۰/۳۲	۱۴۰۴/۴۶۹
۲۰۰۵/۰۶/۲۵					
۲۰۰۵/۰۷/۲۰	۱۲۷۳/۵۹	۴۳۹۷/۹۴۷	۲۰۱۸/۰۴/۲۶	۱۲۷۰/۷۵	۲۴۷۶/۲۷۷
۲۰۰۵/۰۷/۲۷					
۲۰۰۵/۰۸/۰۵	۱۲۷۳/۵۰۵	۴۴۸۹/۲۶۱	۲۰۱۸/۰۶/۱۳	۱۲۷۰/۸۲	۲۵۶۵/۸۷۴
۲۰۰۵/۰۸/۱۲					
۲۰۰۷/۰۶/۲۴	۱۲۷۳/۲۵	۴۳۲۲/۰۰۸	۲۰۱۸/۰۶/۲۹	۱۲۷۰/۷۲	۲۳۹۵/۵۹۱
۲۰۰۷/۰۷/۰۱					
۲۰۰۷/۰۸/۱۱	۱۲۷۲/۹۲	۴۲۴۳/۹۴۴	۲۰۱۸/۰۷/۱۵	۱۲۷۰/۶۴	۲۰۶۱/۸۲۴
۲۰۰۷/۰۹/۰۳					

به روزرسانی رابطه‌ی تراز آب-مساحت-حجم دریاچه‌ی ارومیه و تهیه‌ی نقشه‌ی بسیمتری آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌های

لندست

تاریخ میلاادی	تراز سطح آب (m)	مساحت (km ²)	تاریخ میلاادی	تراز سطح آب (m)	مساحت (km ²)
۲۰۰۷/۰۹/۱۲ ۲۰۰۷/۰۹/۱۹	۱۲۷۰/۵۳	۱۸۸۵/۸۶	۲۰۱۸/۰۷/۳۱	۱۲۷۲/۸۳۵	۴۲۰۴/۴۵۵
۲۰۰۷/۰۹/۲۸ ۲۰۰۷/۱۰/۰۵	۱۲۷۰/۴۴	۱۶۹۸/۸۰۱	۲۰۱۸/۰۸/۱۶	۱۲۷۲/۷۳۵	۴۲۳۴/۵۴۳
۲۰۰۸/۰۶/۱۷ ۲۰۰۸/۰۶/۲۶	۱۲۷۰/۳۵	۱۴۷۸/۸۵۵	۲۰۱۸/۰۹/۰۱	۱۲۷۲/۵۶۵	۴۱۲۶/۰۱۸
۲۰۰۸/۰۷/۰۳ ۲۰۰۸/۰۷/۲۸	۱۲۷۰/۲۷	۱۳۷۶/۴۲۹	۲۰۱۸/۰۹/۱۷	۱۲۷۲/۴۷	۴۱۲۰/۳۳۸
۲۰۰۸/۱۱/۲۴	۱۲۷۰/۲۶	۱۲۴۱/۱۷۲	۲۰۱۸/۱۰/۰۳	۱۲۷۲/۲۳	۳۹۲۰/۸۷
۲۰۰۹/۰۲/۱۲	۱۲۷۰/۲۴	۱۱۰۸/۰۵۹	۲۰۱۸/۱۰/۱۹	۱۲۷۲/۱۸	۳۸۷۸/۸۹۱
۲۰۰۹/۰۴/۰۱	۱۲۷۰/۸۲	۲۶۷۹/۱۶۲	۲۰۱۹/۰۲/۲۴	۱۲۷۲/۱۵	۳۹۹۰/۷۶۸

جدول ۱۵: مقایسه‌ی مساحت دریاچه در تصاویر قابل قبول با مساحت حاصل از پژوهش کریمی و همکاران بر حسب کیلومتر

مربع

تاریخ میلاادی	کریمی و همکاران [3]	پژوهش حاضر	اختلاف	درصد	تاریخ میلاادی	کریمی و همکاران [3]	پژوهش حاضر	اختلاف	درصد
۱۹۸۴/۰۸/۱۸ ۱۹۸۴/۰۸/۲۷	۴۸۹۳/۴۱	۵۰۷۷/۴۳	۱۸۴/۰۲	۳/۶۲	۲۰۰۹/۰۵/۰۳	۳۴۷۴/۸۴	۳۸۷۷/۴۶	۱۰/۳۸	۱۰/۳۸
۱۹۸۵/۰۷/۲۹ ۱۹۸۵/۰۸/۰۵	۵۱۰۵/۶۹	۵۲۵۹/۶۸	۱۵۳/۹۹	۲/۹۳	۲۰۰۹/۰۵/۱۹	۳۴۲۹/۲۰	۳۸۵۵/۸۰	۱۱/۰۶	۱۱/۰۶
۱۹۸۶/۰۹/۰۲ ۱۹۸۶/۰۹/۰۹	۴۹۱۴/۴۶	۵۰۹۹/۰۸	۱۸۴/۶۲	۳/۶۲	۲۰۰۹/۰۶/۰۵	۳۳۹۱/۱۶	۳۸۳۷/۷۶	۱۱/۶۴	۱۱/۶۴
۱۹۸۸/۰۷/۰۵ ۱۹۸۸/۰۷/۱۲	۵۴۳۳/۰۰	۵۵۶۶/۴۴	۱۳۳/۴۴	۲/۴۰	۲۰۰۹/۰۷/۰۶	۳۲۸۴/۸۱	۳۷۸۷/۲۳	۱۳/۲۷	۱۳/۲۷

تاریخ میلادی	کریمی و همکاران [3]	پژوهش حاضر	اختلاف	درصد	تاریخ میلادی	کریمی و همکاران [3]	پژوهش حاضر	اختلاف	درصد
۱۹۸۸/۰۸/۲۲ ۱۹۸۸/۰۸/۲۹	۵۳۲۳/۳۹	۵۴۷۴/۴۱	۱۵۱/۰۱	۲/۷۶	۲۰۰۹/۰۷/۲۲	۳۱۹۳/۹۳	۳۷۴۳/۹۲	۱۴/۶۹	۱۴/۶۹
۱۹۸۸/۱۰/۲۵ ۱۹۸۸/۱۱/۰۱	۵۲۵۳/۶۸	۵۳۹۵/۰۱	۱۴۱/۳۳	۲/۶۲	۲۰۰۹/۰۸/۲۳	۳۰۷۴/۵۱	۳۶۸۲/۵۷	۱۶/۵۱	۱۶/۵۱
۱۹۸۹/۰۱/۰۴ ۱۹۸۹/۰۱/۰۵	۵۲۵۶/۸۱	۵۳۹۸/۶۲	۱۴۱/۸۱	۲/۶۳	۲۰۰۹/۱۰/۲۹	۲۹۷۸/۳۹	۳۶۲۸/۴۴	۱۷/۹۲	۱۷/۹۲
۱۹۸۹/۰۴/۰۳ ۱۹۸۹/۰۴/۱۰	۵۳۵۳/۷۴	۵۵۰۸/۶۹	۱۵۴/۹۵	۲/۸۱	۲۰۱۰/۰۷/۰۹	۳۱۷۱/۲۱	۳۷۳۳/۱۰	۱۵/۰۵	۱۵/۰۵
۱۹۸۹/۰۵/۲۱ ۱۹۸۹/۰۵/۲۸	۵۳۵۰/۵۵	۵۵۰۵/۰۸	۱۵۴/۵۴	۲/۸۱	۲۰۱۰/۰۸/۱۰	۲۹۹۱/۲۱	۳۶۳۵/۶۶	۱۷/۷۳	۱۷/۷۳
۱۹۸۹/۰۶/۱۳ ۱۹۸۹/۰۶/۲۲	۵۳۱۵/۴۱	۵۴۶۵/۳۹	۱۴۹/۹۸	۲/۷۴	۲۰۱۰/۰۹/۱۱	۲۹۰۳/۸۳	۳۵۸۸/۷۴	۱۹/۰۸	۱۹/۰۸
۱۹۸۹/۰۷/۱۵ ۱۹۸۹/۰۷/۱۶	۵۲۷۴/۰۱	۵۴۱۸/۴۷	۱۴۴/۴۶	۲/۶۷	۲۰۱۰/۱۱/۱۴	۲۸۰۰/۹۳	۳۵۳۴/۶۱	۲۰/۷۶	۲۰/۷۶
۱۹۸۹/۰۷/۲۴ ۱۹۸۹/۰۷/۳۱	۵۲۴۵/۸۶	۵۳۸۵/۹۹	۱۴۰/۱۳	۲/۶۰	۲۰۱۰/۱۱/۳۰	۲۸۰۰/۹۳	۳۵۳۴/۶۱	۲۰/۷۶	۲۰/۷۶
۱۹۸۹/۰۸/۲۴ ۱۹۸۹/۰۹/۱۰	۵۱۴۹/۲۸	۵۲۹۳/۹۶	۱۴۴/۶۸	۲/۷۳	۲۰۱۰/۱۲/۱۶	۲۷۸۵/۲۹	۳۵۲۷/۳۹	۲۱/۰۴	۲۱/۰۴
۱۹۹۰/۰۵/۳۱ ۱۹۹۰/۰۶/۰۹	۵۲۱۶/۱۴	۵۳۵۱/۷۰	۱۳۵/۵۷	۲/۵۳	۲۰۱۱/۰۳/۰۶	۲۸۳۵/۲۳	۳۵۵۲/۶۵	۲۰/۱۹	۲۰/۱۹

تاریخ میلادی	کریمی و همکاران [3]	پژوهش حاضر	اختلاف	درصد	تاریخ میلادی	کریمی و همکاران [3]	پژوهش حاضر	اختلاف	درصد
۱۹۹۰/۰۶/۲۵ ۱۹۹۰/۰۷/۰۲	۵۱۶۰/۷۶	۵۳۰۲/۹۸	۱۴۲/۲۳	۲/۶۸	۲۰۱۱/۰۷/۲۸	۲۸۰۷/۷۹	۳۵۳۸/۲۲	۲۰/۶۴	۲۰/۶۴
۱۹۹۰/۰۸/۱۹ ۱۹۹۰/۰۸/۲۰	۵۰۲۳/۳۴	۵۱۹۶/۵۲	۱۷۳/۱۸	۳/۳۳	۲۰۱۱/۰۸/۱۳	۲۷۵۰/۱۵	۳۵۱۲/۹۵	۲۱/۷۱	۲۱/۷۱
۱۹۹۰/۰۹/۱۳ ۱۹۹۰/۰۹/۲۰	۴۹۴۴/۲۸	۵۱۲۹/۷۶	۱۸۵/۴۸	۳/۶۲	۲۰۱۱/۰۹/۱۴	۲۶۳۵/۹۵	۳۴۶۶/۰۴	۲۳/۹۵	۲۳/۹۵
۱۹۹۱/۰۷/۲۱ ۱۹۹۱/۰۷/۳۰	۵۰۷۷/۸۵	۵۲۳۸/۰۲	۱۶۰/۱۷	۳/۰۶	۲۰۱۳/۰۷/۰۱	۲۴۰۲/۷۸	۲۵۷۱/۵۴	۱۶۸/۷۶	۷/۱۳
۱۹۹۱/۰۸/۲۲ ۱۹۹۱/۰۸/۳۱	۴۹۹۴/۹۰	۵۱۷۴/۸۷	۱۷۹/۹۶	۳/۴۸	۲۰۱۳/۰۷/۱۷	۲۲۸۸/۳۳	۲۳۳۴/۱۲	۴۵/۷۹	۲/۰۷
۱۹۹۱/۰۹/۰۷ ۱۹۹۱/۰۹/۱۶	۴۹۵۱/۲۹	۵۱۳۶/۹۷	۱۸۵/۶۸	۳/۶۱	۲۰۱۳/۰۸/۰۲	۲۱۸۵/۱۱	۲۱۲۰/۴۵	۶۴/۶۶	۳/۱۴
۱۹۹۲/۰۷/۱۶ ۱۹۹۲/۰۷/۲۳	۵۰۹۸/۸۰	۵۲۵۴/۲۶	۱۵۵/۴۶	۲/۹۶	۲۰۱۳/۰۸/۱۸	۲۰۹۳/۳۶	۱۹۳۰/۵۱	۱۶۲/۸۵	۸/۴۹
۱۹۹۲/۰۸/۲۴ ۱۹۹۲/۰۹/۰۲	۴۹۸۵/۴۲	۵۱۶۷/۶۵	۱۸۲/۲۳	۳/۵۳	۲۰۱۳/۰۹/۰۳	۲۰۲۴/۵۵	۱۷۸۸/۰۶	۲۳۶/۴۹	۱۳/۰۸
۱۹۹۵/۰۸/۱۰ ۱۹۹۵/۰۸/۱۷	-	۶۰۰۳/۱۲	-	-	۲۰۱۳/۰۹/۱۹	۱۸۶۸/۳۰	۱۴۷۹/۴۲	۳۸۸/۸۸	۲۵/۰۶
۱۹۹۵/۰۸/۲۶ ۱۹۹۵/۰۹/۰۲	-	۵۹۶۳/۴۲	-	-	۲۰۱۳/۱۰/۰۵	۱۸۳۱/۹۵	۱۴۰۸/۲۰	۴۲۳/۷۵	۲۸/۴۵

تاریخ میلادی	کریمی و همکاران [3]	پژوهش حاضر	اختلاف	درصد	تاریخ میلادی	همکاران [3]	پژوهش حاضر	اختلاف	درصد
۱۹۹۸/۰۶/۱۵ ۱۹۹۸/۰۶/۲۲	-	۵۸۰۶/۴۳	-	-	۲۰۱۳/۱۰/۲۱	۱۷۹۵/۵۹	۱۳۳۶/۹۷	۴۵۸/۶۱	۳۲/۱۶
۱۹۹۸/۰۷/۰۱ ۱۹۹۸/۰۷/۰۸	۵۷۱۷/۱۷	۵۷۶۶/۷۳	۴۹/۵۶	۰/۸۶	۲۰۱۴/۰۶/۱۸	۲۰۵۸/۹۶	۱۸۵۹/۲۹	۱۹۹/۶۷	۱۰/۷۲
۱۹۹۸/۰۷/۱۷ ۱۹۹۸/۰۷/۲۴	۵۷۰۲/۱۱	۵۷۲۵/۲۳	۲۳/۱۲	۰/۴۰	۲۰۱۴/۰۷/۰۴	۱۹۲۸/۹۰	۱۵۹۸/۱۳	۳۳/۷۷	۲۰/۰۲
۱۹۹۸/۰۸/۱۸ ۱۹۹۸/۰۸/۲۵	۵۶۱۵/۱۱	۵۶۶۲/۰۷	۴۶/۹۷	۰/۸۳	۲۰۱۴/۰۷/۲۰	۱۷۸۳/۴۷	۱۳۱۳/۲۳	۴۷۰/۲۴	۳۳/۴۸
۱۹۹۸/۰۹/۰۳ ۱۹۹۸/۰۹/۱۰	۵۵۵۴/۶۹	۵۶۳۵/۰۱	۸۰/۳۱	۱/۴۳	۲۰۱۵/۰۵/۲۰	۲۱۲۷/۷۷	۲۰۰۱/۷۴	۱۲۶/۰۳	۶/۳۹
۱۹۹۸/۱۰/۲۱ ۱۹۹۸/۱۰/۲۸	۵۳۱۰/۶۲	۵۴۵۹/۹۷	۱۴۹/۳۶	۲/۷۴	۲۰۱۵/۰۶/۰۵	۲۱۰۴/۸۳	۱۹۵۴/۲۵	۱۵۰/۵۸	۷/۷۸
۱۹۹۹/۰۸/۱۷ ۱۹۹۹/۰۸/۲۴	۵۰۸۷/۳۳	۵۲۴۵/۲۴	۱۵۷/۹۱	۳/۰۱	۲۰۱۵/۰۶/۲۱	۱۹۵۳/۱۴	۱۶۴۵/۶۱	۳۰۷/۵۲	۱۸/۱۷
۱۹۹۹/۰۶/۰۲ ۱۹۹۹/۰۶/۰۹	۵۲۴۴/۲۹	۵۳۸۴/۱۹	۱۳۹/۸۹	۲/۶۰	۲۰۱۵/۰۷/۰۷	۱۸۵۶/۱۸	۱۴۵۵/۶۸	۴۰۰/۵۰	۲۶/۱۶
۱۹۹۹/۰۶/۱۸ ۱۹۹۹/۰۶/۲۵	۵۲۱۴/۵۷	۵۳۴۹/۹۰	۱۳۵/۳۳	۲/۵۳	۲۰۱۵/۰۷/۲۳	۱۷۴۷/۱۱	۱۲۴۲/۰۱	۵۰۵/۱۰	۳۷/۷۱
۲۰۰۰/۰۶/۲۰ ۲۰۰۰/۰۶/۲۷	۴۸۲۰/۱۹	۵۰۰۳/۴۴	۱۸۳/۲۵	۳/۶۶	۲۰۱۶/۰۲/۱۶	۲۰۴۷/۴۹	۱۸۳۵/۵۵	۲۱۱/۹۴	۱۱/۴۹

تاریخ میلادی	کریمی و همکاران [3]	پژوهش حاضر	اختلاف	درصد	تاریخ میلادی	کریمی و همکاران [3]	پژوهش حاضر	اختلاف	درصد
۲۰۰۰/۰۷/۰۶ ۲۰۰۰/۰۷/۱۳	۴۷۷۵/۱۷	۴۹۶۳/۷۴	۱۸۸/۵۸	۳/۸۰	۲۰۱۶/۰۷/۰۹	۲۴۷۱/۴۵	۲۷۱۳/۹۹	۲۴۲/۵۴	۹/۸۸
۲۰۰۰/۰۷/۲۲ ۲۰۰۰/۰۷/۲۹	۴۷۱۵/۲۴	۴۹۲۴/۰۵	۲۰۸/۸۱	۴/۲۴	۲۰۱۶/۰۷/۲۵	۲۳۵۷/۰۰	۲۴۷۶/۵۷	۱۱۹/۵۷	۵/۱۹
۲۰۰۰/۰۸/۲۳ ۲۰۰۰/۰۸/۳۰	۴۶۰۲/۸۷	۴۸۳۹/۲۴	۲۳۶/۳۷	۴/۸۸	۲۰۱۶/۰۹/۱۱	۲۰۹۳/۳۶	۱۹۳۰/۵۱	۱۶۲/۸۵	۸/۴۹
۲۰۰۰/۰۹/۰۸ ۲۰۰۰/۰۹/۱۵	۴۵۵۴/۶۲	۴۷۹۷/۷۳	۲۴۳/۱۲	۵/۰۷	۲۰۱۶/۰۹/۲۷	۲۰۳۶/۰۲	۱۸۱۱/۸۱	۲۲۴/۲۱	۱۲/۲۸
۲۰۰۱/۰۶/۰۷ ۲۰۰۱/۰۶/۱۴	۴۴۵۲/۶۹	۴۶۷۵/۰۳	۲۲۲/۳۳	۴/۷۶	۲۰۱۶/۱۰/۱۳	۱۹۷۷/۳۸	۱۶۹۳/۱۰	۲۸۴/۲۸	۱۶/۴۲
۲۰۰۱/۰۶/۳۰ ۲۰۰۱/۰۷/۰۹	۴۴۰۵/۳۱	۴۶۱۷/۲۹	۲۱۱/۹۷	۴/۵۹	۲۰۱۷/۰۵/۲۵	۲۴۸۲/۸۹	۲۷۳۷/۷۳	۲۵۴/۸۳	۱۰/۳۲
۲۰۰۱/۰۷/۱۶ ۲۰۰۱/۰۷/۲۵	۴۳۵۶/۳۸	۴۵۷۷/۵۹	۲۲۱/۲۱	۴/۸۳	۲۰۱۷/۰۶/۱۰	۲۴۰۲/۷۸	۲۵۷۱/۵۴	۱۶۸/۷۶	۷/۱۳
۲۰۰۱/۰۸/۱۰ ۲۰۰۱/۰۸/۱۷	۴۲۹۲/۰۲	۴۵۲۷/۰۶	۲۳۵/۰۵	۵/۱۹	۲۰۱۷/۰۶/۲۶	۲۲۷۶/۸۶	۲۳۱۰/۳۸	۳۳/۵۲	۱/۵۳
۲۰۰۲/۰۶/۱۰ ۲۰۰۲/۰۶/۱۷	۴۲۷۸/۹۲	۴۵۱۶/۲۴	۲۳۷/۳۱	۵/۲۵	۲۰۱۷/۰۷/۱۲	۲۱۶۲/۱۷	۲۰۷۲/۹۶	۸۹/۲۱	۴/۴۱
۲۰۰۲/۰۷/۰۳ ۲۰۰۲/۰۷/۲۶	۴۲۰۲/۴۵	۴۴۵۱/۲۸	۲۴۸/۸۳	۵/۵۹	۲۰۱۷/۲۷/۲۸	۲۰۴۷/۴۹	۱۸۳۵/۵۵	۲۱۱/۹۴	۱۱/۴۹

تاریخ میلادی	کریمی و همکاران [3]	پژوهش حاضر	اختلاف	درصد	تاریخ میلادی	کریمی و همکاران [3]	پژوهش حاضر	اختلاف	درصد
۲۰۰۲/۰۷/۱۲ ۲۰۰۲/۰۷/۱۹	۴۱۹۳/۹۵	۴۴۴۴/۰۶	۲۵۰/۱۱	۵/۶۳	۲۰۱۷/۰۸/۱۳	۱۹۵۳/۱۴	۱۶۴۵/۶۱	۳۰۷/۵۲	۱۸/۱۷
۲۰۰۴/۰۸/۱۸ ۲۰۰۴/۰۸/۲۵	۴۱۵۱/۸۳	۴۴۰۰/۷۵	۲۴۸/۹۲	۵/۶۶	۲۰۱۷/۰۸/۲۹	۱۸۵۶/۱۸	۱۴۵۵/۶۸	۴۰۰/۵۰	۲۶/۱۶
۲۰۰۵/۰۶/۱۸ ۲۰۰۵/۰۶/۲۵	۴۱۸۹/۷۰	۴۴۴۰/۴۵	۲۵۰/۷۵	۵/۶۵	۲۰۱۷/۰۹/۱۴	۱۷۸۳/۴۷	۱۳۱۳/۲۳	۴۷۰/۲۴	۳۳/۴۸
۲۰۰۵/۰۷/۲۰ ۲۰۰۵/۰۷/۲۷	۴۱۲۸/۹۹	۴۳۷۵/۴۹	۲۴۶/۵۰	۵/۶۳	۲۰۱۸/۰۴/۲۶	۲۲۸۸/۳۳	۲۳۳۴/۱۲	۴۵/۷۹	۲/۰۷
۲۰۰۵/۰۸/۰۵ ۲۰۰۵/۰۸/۱۲	۴۱۰۱/۲۵	۴۳۴۴/۸۱	۲۴۳/۵۶	۵/۶۱	۲۰۱۸/۰۶/۱۳	۲۳۶۸/۴۴	۲۵۰۰/۳۱	۱۳۱/۸۷	۵/۶۸
۲۰۰۷/۰۶/۲۴ ۲۰۰۷/۰۷/۰۱	۴۰۱۸/۴۴	۴۲۵۲/۷۸	۲۳۴/۳۴	۵/۵۱	۲۰۱۸/۰۶/۲۹	۲۲۵۳/۹۲	۲۲۶۲/۹۰	۸/۹۸	۰/۴۲
۲۰۰۷/۰۸/۱۱ ۲۰۰۷/۰۹/۰۳	۳۸۴۸/۷۱	۴۱۳۳/۶۹	۲۸۴/۹۸	۶/۸۹	۲۰۱۸/۰۷/۱۵	۲۱۶۲/۱۷	۲۰۷۲/۹۶	۸۹/۲۱	۴/۴۱
۲۰۰۷/۰۹/۱۲ ۲۰۰۷/۰۹/۱۹	۳۷۹۷/۹۶	۴۱۰۳/۰۱	۳۰۵/۰۵	۷/۴۳	۲۰۱۸/۰۷/۳۱	۲۰۳۶/۰۲	۱۸۱۱/۸۱	۲۲۴/۲۱	۱۲/۲۸
۲۰۰۷/۰۹/۲۸ ۲۰۰۷/۱۰/۰۵	۳۷۴۰/۰۶	۴۰۶۶/۹۲	۳۲۶/۸۶	۸/۰۴	۲۰۱۸/۰۸/۱۶	۱۹۲۸/۹۰	۱۵۹۸/۱۳	۳۳۰/۷۷	۲۰/۰۲
۲۰۰۸/۰۶/۱۷ ۲۰۰۸/۰۶/۲۶	۳۶۵۸/۹۶	۴۰۰۵/۵۷	۳۴۶/۶۲	۸/۶۵	۲۰۱۸/۰۹/۰۱	۱۸۱۹/۸۳	۱۳۸۴/۴۶	۴۳۵/۳۷	۲۹/۶۵

تاریخ میلادی	کریمی و همکاران [3]	پژوهش حاضر	اختلاف	درصد	تاریخ میلادی	کریمی و همکاران [3]	پژوهش حاضر	اختلاف	درصد
۲۰۰۸/۰۷/۰۳ ۲۰۰۸/۰۷/۲۸	۳۶۱۳/۲۲	۳۹۷۱/۲۹	۳۵۸/۰۶	۹/۰۲	۲۰۱۸/۰۹/۱۷	۱۷۲۲/۸۷	۱۱۹۴/۵۲	۵۲۸/۳۵	۴۰/۷۸
۲۰۰۸/۱۱/۲۴	۳۴۹۰/۰۵	۳۸۸۴/۶۷	۳۹۴/۶۲	۱۰/۱۶	۲۰۱۸/۱۰/۰۳	۱۷۱۰/۷۵	۱۱۷۰/۷۸	۵۳۹/۹۷	۴۲/۴۱
۲۰۰۹/۰۲/۱۲	۳۴۵۲/۰۲	۳۸۶۶/۶۳	۴۱۴/۶۱	۱۰/۷۲	۲۰۱۸/۱۰/۱۹	۱۶۸۱/۳۳	۱۱۲۳/۳۰	۵۵۸/۰۳	۴۵/۴۳
۲۰۰۹/۰۴/۰۱	۳۴۲۹/۲۰	۳۸۵۵/۸۰	۴۲۶/۶۱	۱۱/۰۶	۲۰۱۹/۰۲/۲۴	۲۳۶۸/۴۴	۲۵۰۰/۳۱	۱۳۱/۸۷	۵/۶۸
میانگین									
بیشینه									
کمینه									

مراجع

- [1] P. Jagalingam, B. J. Akshaya, and A. V. Hegde, "Bathymetry mapping using landsat 8 satellite imagery," *Procedia Eng.*, vol. 116, no. 1, pp. 560–566, 2015.
- [2] S. Sima and M. Tajrishy, "Using satellite data to extract volume – area – elevation relationships for Urmia Lake , Iran," *J. Great Lakes Res.*, vol. 39, no. 1, pp. 90–99, 2013.
- [3] N. Karimi and M. H. Bagheri, "Deriving and Evaluating Bathymetry Maps and Stage Curves for Shallow Lakes Using Remote Sensing Data," *Water Resour. Manag.*, 2016.
- [4] National Geospatial-Intelligence Agency, "NGA Explains: What is hydrography?," 2018. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=gtKMrMy6arw>.
- [5] Ö. Ceyhun and A. Yalçın, "Remote sensing of water depths in shallow waters via artificial neural networks," *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, vol. 89, no. 1, pp. 89–96, 2010.
- [6] A. Kanno, Y. Koibuchi, and M. Isobe, "Shallow Water Bathymetry from Multispectral Satellite Images: Extensions of Lyzenga's Method for Improving Accuracy," *Coast. Eng. J.*, vol. 53, no. 4, pp. 431–450, 2012.
- [7] "Landsat program." [Online]. Available: <https://gisgeography.com/landsat-program-satellite-imagery-bands/>.
- [8] "Landsat 7." [Online]. Available: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-7/>.
- [9] "Question: What are the band designations for the Landsat satellites?," USGS. [Online]. Available: <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>.
- [10] S. K. McFeeters, "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 17, no. 7, pp. 1425–1432, 1996.
- [11] H. Bock, "Origins and extensions of the k -means algorithm in cluster analysis," *Hist. Probab. Stat.*, vol. 4, no. December, pp. 1–18, 2008.
- [12] J. Rouse Jr, R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering, "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS," in *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium*, 1974.
- [13] B. B. da Silva, A. C. Braga, C. C. Braga, L. M. M. de Oliveira, S. M. G. L. Montenegro, and B. Barbosa Junior, "Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid," *Rev. Bras. Eng. Agrá\~cola e Ambient.*, vol. 20, pp. 3–8, 2016.
- [14] J. A. Goff and S. Gratch, "List 1947, Smithsonian meteorological tables," *Trans. Am. Soc. Vent. Eng.*, vol. 52, p. 95, 1946.
- [15] P. C. Mahalanobis, "On the generalized distance in statistics," 1936.
- [16] I. Selesnick, "Least squares with examples in signal processing," *Connexions*, vol. 4, 2013.
- [17] L. Breiman, J. Friedman, R. Olshen, and C. Stone, *Classification and Regression Trees*. Monterey, CA: Wadsworth and Brooks, 1984.
- [18] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [19] J. Elith, J. R. Leathwick, and T. Hastie, "A working guide to boosted regression trees," *J. Anim. Ecol.*, vol. 77, no. 4, pp. 802–813, 2008.
- [20] W. S. McCulloch and W. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous

-
- activity,” *Bull. Math. Biophys.*, vol. 5, no. 4, pp. 115–133, 1943.
- [21] D. N. N. S. (US), *DARPA Neural Network Study: October 1987-February 1988*. AFCEA International Press, 1988.
- [22] A. K. Jain, J. Mao, and K. M. Mohiuddin, “Artificial neural networks: A tutorial,” *Computer (Long Beach, Calif.)*, vol. 29, no. 3, pp. 31–44, 1996.
- [23] R. M. Forte, *Mastering predictive analytics with R*. Packt Publishing Ltd, 2015.
- [24] J. Gandhi and S. Parekh, “Deployment of Neural Network on Multi-Core Architecture,” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 1, no. 3, 2012.
- [25] F. Rosenblatt, “Principles of neurodynamics. perceptrons and the theory of brain mechanisms,” 1961.
- [26] A. N. Pettitt, “A Non-parametric to the Approach Problem,” *R. Stat. Soc.*, vol. 28, no. 2, pp. 126–135, 1979.



Urmia Lake Restoration Program



Sharif University of Technology
Remote Sensing Research Center

Updating Water Level-Area-Volume Relationship and Deriving the Bathymetry Map of the Lake Urmia using Landsat Imagery

Principial Investigator:

Mohammad Danesh-Yazdi

Research Team:

Yasmin Ghadyani

Document ID

TR-98-03

December 2019