

## ارزیابی شاخص‌های کمی ماهواره‌ای در تعیین سطح پهنه‌های آبی با استفاده از سنجنده‌های ماهواره‌ای (مطالعه موردی: تالاب زریبار استان کردستان)

فاطمه جوادی<sup>۱\*</sup>، سحر رضایان<sup>۲</sup>، سید علی جوزی<sup>۳</sup>

۱. کارشناسی ارشد رشته مهندسی منابع طبیعی، ارزیابی و آمایش سرزمین، کارشناس مؤسسه تحقیقات آب، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، تهران

۲. دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود

۳. استاد گروه محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۱۰/۱۶؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۳/۱۳)

### چکیده

بررسی آب‌های سطحی و تعیین گسترش مکانی آنها اهمیت زیادی برای درک چرخه هیدرولوژی و مدیریت منابع آب دارد. در حال حاضر، سنجش از دور به رویکردی متداول در پایش منابع آب سطحی تبدیل شده است. هدف اصلی تحقیق حاضر، تعیین بهترین شاخص ماهواره‌ای برای استخراج مساحت تالاب زریبار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 5, 7, 8 است. مساحت تالاب با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده حداکثر احتمال بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ محاسبه و این روش به عنوان مبنا در تعیین بهترین شاخص در نظر گرفته شده است. شاخص‌های NDVI، NDWI، MNDWI، SWI، AWEI در روش مبنا به عنوان متداول‌ترین شاخص‌ها در تعیین پهنه‌های آبی مقایسه شده‌اند که مقادیر هر یک از شاخص‌ها در تصاویر گرفته‌شده محاسبه شده و مقادیر آستانه شاخص‌ها در هر تصویر تعیین و در نهایت، با استفاده از روش مبنا صحت‌سنجی شده است. در این میان، شاخص‌های MNDWI و AWEI و SWI در مقایسه با روش مبنا با مقادیر همبستگی به ترتیب معادل ۰/۷۶، ۰/۷۶ و ۰/۷۴ و RMSE به ترتیب برای هر شاخص معادل ۱۰۸/۸۰، ۱۱۱/۳۰ و ۱۱۳/۸۰ هکتار و همچنین مقادیر خطای MAE معادل ۸۴/۶۳، ۹۴/۲۸ و ۸۷/۳۰ هکتار، بهترین شاخص‌ها در تعیین مساحت تالاب هستند. استفاده از شاخص‌های تعیین‌شده با توجه به سهولت و سرعت انجام محاسبات، امکان ایجاد سری زمانی تغییرات مساحت تالاب به منظور مدیریت بهینه این پهنه آبی را فراهم می‌آورد.

**کلیدواژگان:** پهنه آبی، تالاب زریبار، روش طبقه‌بندی نظارت‌شده، شاخص ماهواره‌ای، ماهواره لندست.

## مقدمه

تالاب‌ها در میان اکوسیستم‌های طبیعی با توجه به تنوع زیستی زیادی که دارند، مهم‌اند. تالاب‌ها عملکرد و ارزش زیست‌محیطی زیادی دارند و زیستگاه مناسبی برای گونه‌های گیاهی و فون هستند. همچنین، خاصیت شارژ زمین و آب، تنوع زیستی، کاهش سیل و تنظیم آلودگی و تأمین آب برای اکوسیستم را دارند. در دهه‌های اخیر با گرمایش جهانی زمین و افزایش آثار رو به رشد فعالیت‌های انسانی و تغییرات رودخانه‌ها، آب شدن یخچال‌ها و دیگر تغییرات مکانی و زمانی، کاهش سطح تالاب‌ها و دیگر منابع آب سطحی بیشتر نمایان شده است. بررسی روند تغییرات مکانی و زمانی پهنه‌های آبی بر مدیریت صحیح و حفاظت این اکوسیستم‌های ارزشمند، تأثیر زیادی دارد و حفاظت از این منابع ارزشمند مستلزم پایش و نظارت بر تغییرات گذشته، حال و آینده است. در میان روش‌های مرسوم، پایش پهنه‌های آبی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور<sup>۱</sup>، به عنوان ابزاری معتبر برای نظارت بر تالاب‌ها شناخته شده است. سنجش از دور نسبت به روش‌های سنتی در پهنه‌بندی آب‌های سطحی کارایی بیشتری دارد و هزینه کم، منابع اطلاعات قابل اعتماد و تولید اطلاعات با فرکانس و تکرارپذیری زیاد، پوشش پهناور لحظه‌ای، سرعت و دقت از جمله مزایای استفاده از این روش است.

رویکردهای متفاوتی برای استخراج پهنه‌های آبی از تصاویر چندباندی به عنوان یک بخش مهم از چرخه آب کره زمین، گسترش پیدا کرده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های تک‌باندی، طبقه‌بندی نظارت‌نشده، طبقه‌بندی نظارت‌شده و شاخص‌ها اشاره کرد. از میان تمام این روش‌ها، تکنیک‌های طبقه‌بندی استفاده‌شده برای استخراج پهنه‌های آبی در مقایسه با روش‌های تک‌باندی دقت بیشتری دارند [۱] و به‌طور گسترده‌ای در پهنه‌بندی گستره‌های آبی استفاده می‌شوند. استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای آب نیز نوعی روش قابل اعتماد است، زیرا روشی کاربردوست، مؤثر با هزینه کم محاسباتی است. از آنجا که بسیاری از این روش‌ها در سنجش از دور برای شناسایی پهنه‌های آبی استفاده می‌شوند و طبقه‌بندی‌های متفاوتی از پهنه‌های آبی تولید می‌کنند، باید این روش‌ها، مورد سنجش قرار گیرند.

به این منظور در مطالعه حاضر کارایی شاخص‌های آبی برای استخراج پهنه آبی تالاب زیربار ارزیابی و تحلیل شد. استفاده از شاخص از نظر سرعت محاسبات و دقت برای تحلیل و پایش پهنه‌های آبی، روشی مناسب محسوب می‌شود. هدف اصلی مطالعه حاضر، تعیین مناسب‌ترین شاخص‌های ماهواره‌ای در استخراج مساحت پهنه آبی تالاب زیربار است. بنابراین، سعی شده است تا مناسب‌ترین شاخص‌ها با کمترین میزان خطای محاسبات در پهنه آبی تالاب زیربار شناسایی شده و صحت‌سنجی شوند. برای مقایسه شاخص‌ها روش طبقه‌بندی نظارت‌شده حداکثر احتمال به عنوان روش مرجع در تعیین مساحت تالاب در نظر گرفته شده است و روند تغییرات پهنه آبی تالاب طی دوره آماری ۱۱ ساله (۱۳۸۵ تا ۱۳۹۶) استخراج شده و با روند تغییرات بارش منطقه مقایسه شده است.

شاخص‌های مختلف آب در چند دهه اخیر ارائه شده‌اند [۲]. NDVI، NDWI، MNDWI، AWEI، SWI و WRI تعدادی از شاخص‌های به کار گرفته‌شده در زمینه تحلیل پهنه‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای هستند. هانکیو ژو در سال ۲۰۰۶ شاخص NDWI را اصلاح کرده و شاخصی تحت عنوان MNDWI<sup>۲</sup> ارائه کرد [۳]. مزیت این شاخص نسبت به شاخص NDWI این است تفکیک مناطق ساخت‌وساز شده را از پوشش گیاهی و خاک به خوبی انجام می‌دهد. در شاخص اصلاح‌شده به جای باند NIR از باند MIR<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. فیسیا و همکاران (۲۰۱۴) برای استخراج پهنه‌های آبی از تصاویر ماهواره Landsat5 در پنج کشور دانمارک، سوئیس، اتیوپی، نیوزیلند و آفریقای جنوبی به منظور ارزیابی شاخص AWEI<sup>۴</sup> استفاده کردند [۴]. پژوهشگران یادشده در محاسبه این شاخص از باندهای آبی، قرمز و مادون قرمز استفاده کردند. شاخص AWEI sh برای حذف نقاطی که جزء طبقه غیر آب هستند، به کار گرفته می‌شود. همچنین، در مناطق سایه و تاریک با پیش‌زمینه شهری نیز به کار گرفته می‌شود. AWEI nsh نیز شاخصی برای بهبود AWEI sh ارائه شده است که نقاطی را که با استفاده از شاخص AWEIsh قادر به حذف نیست را با استفاده از این شاخص با دقت

2. Modified Normalized Difference Water Index  
3. Middle Intra Red  
4. Automated Water Extraction Index

1. Remote Sensing

بیشتری جدا کنیم. YANG Haibo و همکاران (۲۰۱۱) برخی روش‌های استخراج پهنه‌های آبی شامل شاخص‌ها و روش‌های طبقه‌بندی برای مخزن سد میون را با هم مقایسه کردند. در مطالعه یادشده این روش‌ها در مقایسه با نتایج روش طبقه‌بندی نظارت‌شده به عنوان مرجع مقایسه شدند که NDWI و MNDWI بهترین شاخص‌ها در استخراج اطلاعات پهنه‌های آبی هستند [۵].

Vivek Kumar و همکاران (۲۰۱۵) برای استخراج تغییرات سطح آب بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴ در منطقه بنگلور واقع در کشور هند از شاخص‌های ماهواره‌ای و طبقه‌بندی نظارت‌شده استفاده کردند. بر اساس نتایج مطالعه یادشده روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال و شاخص‌های MNDWI و WRI دقت بیشتری داشتند [۶].

Yan Zhou و همکاران (۲۰۱۷) برای حوضه Poyang تعدادی شاخص که به طور گسترده برای استخراج پهنه‌های آبی استفاده می‌شوند را در تصاویر مختلف ماهواره‌ای مقایسه کردند. بر اساس مطالعه یادشده الگوریتم‌های مبتنی بر شاخص NDWI استخراج‌شده از تصاویر Landsat 8 و Sentinel-2 بهترین نتایج را داشتند [۷].

همکاران (۲۰۱۹) از شاخص NDWI و تصاویر لندست برای استخراج پهنه‌های آبی حوضه کریشنا استفاده کردند. بر اساس مطالعه یادشده شاخص NDWI برای تعیین سطح پهنه‌های آبی حوضه یادشده مناسب بوده است [۸].

گمشادزایی (۱۳۹۴) شاخص‌های SWI<sup>۱</sup>، NDWIF<sup>۲</sup>، AWEI<sup>۳</sup> و ترکیبی را برای شناسایی پهنه‌های آبی بررسی و مقایسه کرده است. این شاخص‌ها برای دریاچه چیتگر، تالاب هامون و میانکاله محاسبه شده است. با توجه به میزان دقت کلی و میزان خطای کاپای محاسبه‌شده برای هر سه محدوده مطالعاتی، شاخص SWI دارای بهترین عملکرد از نظر دقت پردازش بوده است. در محاسبه این شاخص از ۶ باند مرئی و مادون قرمز تصاویر ۸ و ۵ Landsat استفاده شده است [۹]. خسروی و همکاران (۱۳۹۶) از ۶ شاخص ماهواره‌ای برای ارزیابی تغییرات سطح دریاچه پریشان بین سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۴ استفاده کردند. این شاخص‌ها شامل NDMI،

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعه‌شده

دریاچه زریبار با حدود ۲ هزار هکتار مساحت و در فاصله ۳ کیلومتری غرب شهر مریوان، در استان کردستان واقع شده و از مکان‌های دیدنی و گردشگری این استان است. دریاچه زریبار در طول جغرافیایی ۴۶°۸' و عرض جغرافیایی ۳۵°۳۲' و ارتفاع ۱۲۸۵ متری از سطح دریا قرار گرفته است. طول تالاب ۵ کیلومتر و عرض آن ۱/۶ کیلومتر است. حجم تقریبی آب دریاچه حدود ۴۶ میلیون مترمکعب برآورد شده است. این دریاچه در محدوده مطالعاتی مریوان واقع در حوضه اصلی مرزی غرب با کد ۲۱۰۹ قرار دارد. محدوده مطالعاتی مریوان با وسعت ۴۹۴/۷۰ کیلومترمربع که ۱۱۰/۵۰ کیلومترمربع آن دشت به همراه تالاب زریبار و نیزارهای اطراف آن بوده و ۳۸۴/۲۰ کیلومترمربع آن ارتفاعات منطقه را شامل می‌شود. محیط حوضه معادل ۱۱۲/۲ کیلومتر و شیب متوسط حوضه، معادل ۲۴/۲ درصد است. حداکثر ارتفاع حوضه، معادل ۲۶۳/۵ متر و حداقل ارتفاع آن، معادل ۱۱۲/۵ متر است [۱۱].

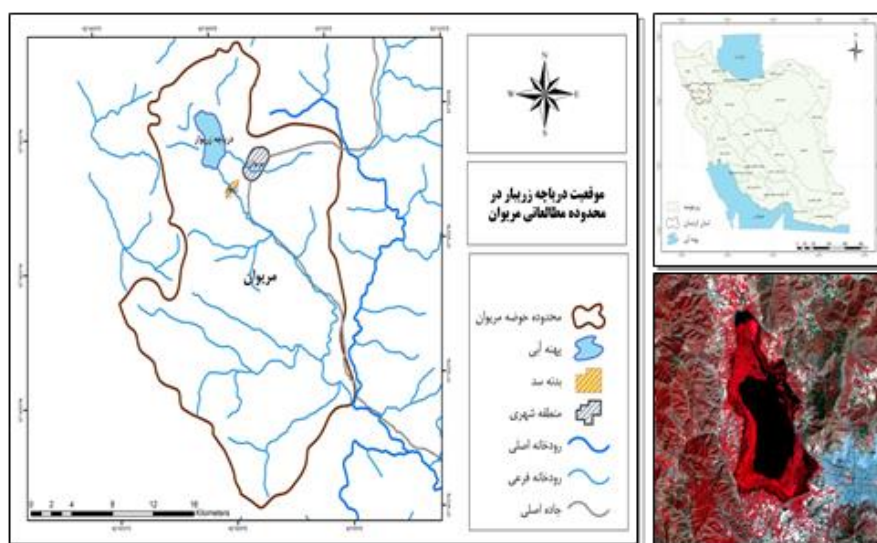
#### روش تحقیق

برای تعیین مناسب‌ترین شاخص‌های ماهواره‌ای در استخراج مساحت پهنه آبی تالاب زریبار مطابق شکل ۲ مراحل ذیل طی شده است. در گام نخست، اقدام به انتخاب و اخذ تصاویر شد. بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ شمسی معادل با ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ میلادی، تصاویر ماهواره لندست انتخاب شد. پس از

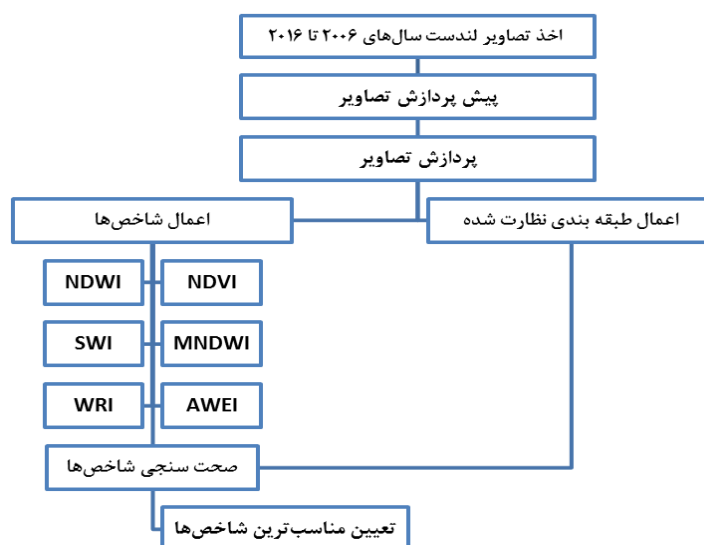
1. Surface Wetness Index  
2. Normalized Difference Water Index of McFeeters  
3. Extraction Water Index

است و برای مقایسه یک روش اندازه‌گیری با یک روش جایگزین اندازه‌گیری استفاده می‌شود و ضریب همبستگی که برای تعیین نوع و درجه رابطه یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگری کار می‌رود، استفاده شده است. بنابراین، ابتدا پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست انجام گرفته و در مرحله بعدی، روش طبقه‌بندی نظارت‌شده حداکثر احتمال روی تصاویر اعمال شده است. در گام بعدی، شاخص‌ها روی تصاویر Landsat 5, 7, 8 با تفکیک مکانی ۳۰ متر اعمال شده و مساحت استخراج‌شده توسط شاخص‌ها در تصاویر مختلف با روش مبنا مقایسه و صحت‌سنجی شده است.

انجام پیش‌پردازش‌های معمول که در ادامه شرح داده خواهد شد، پردازش روی تصاویر در دو بخش استخراج مساحت با استفاده از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال و اجرای شاخص‌ها روی تصاویر انجام شد. به منظور نشان دادن میزان صحت و دقت شاخص‌ها، از خطای جذر میانگین مربعات یا خطای جذر میانگین مربع‌ها (RMSE) که تفاوت میان مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل یا برآوردگر آماری و مقدار واقعی است و برای مقایسه خطاهای پیش‌بینی‌شده توسط یک مجموعه داده، استفاده شد. همچنین، از میانگین خطای مطلق (MAE) که اندازه‌گیری تفاوت بین دو متغیر پیوسته



شکل ۱. موقعیت تالاب زریبار



شکل ۲. نمودار مراحل انجام تحقیق

جدول ۱. تاریخ اخذ تصاویر استفاده‌شده

| Satellite   | Sensor | تاریخ      | Satellite | Sensor | تاریخ      | Resolution |
|-------------|--------|------------|-----------|--------|------------|------------|
|             |        | ۱۳۸۵/۴/۳۱  |           |        |            |            |
|             |        | ۱۳۸۵/۵/۱۶  |           |        |            |            |
|             |        | ۱۳۸۶/۰۲/۱۷ |           |        | ۱۳۹۲/۰۵/۲۰ |            |
|             |        | ۱۳۸۶/۰۳/۰۲ |           |        | ۱۳۹۲/۱۰/۲۸ |            |
|             |        | ۱۳۸۶/۰۵/۰۴ |           |        | ۱۳۹۲/۰۵/۲۲ |            |
|             |        | ۱۳۸۶/۰۵/۲۰ |           |        | ۱۳۹۳/۱۱/۱۸ |            |
|             |        | ۱۳۸۶/۰۶/۰۵ |           |        | ۱۳۹۴/۰۳/۲۴ |            |
| Landsat 7,5 | TM/ETM | ۱۳۸۸/۰۵/۰۹ | Landsat8  | OLI    | ۱۳۹۴/۰۴/۰۹ | 30m        |
|             |        | ۱۳۸۸/۰۵/۲۵ |           |        | ۱۳۹۴/۰۵/۲۶ |            |
|             |        | ۱۳۸۸/۱۱/۰۳ |           |        | ۱۳۹۵/۰۲/۲۶ |            |
|             |        | ۱۳۸۸/۰۸/۱۶ |           |        | ۱۳۹۵/۰۴/۱۲ |            |
|             |        | ۱۳۸۹/۰۳/۱۳ |           |        | ۱۳۹۵/۰۴/۲۸ |            |
|             |        | ۱۳۸۹/۱۰/۰۳ |           |        | ۱۳۹۵/۰۶/۰۹ |            |
|             |        | ۱۳۹۰/۰۱/۲۷ |           |        |            |            |
|             |        | ۱۳۹۰/۰۴/۳۰ |           |        |            |            |
|             |        | ۱۳۹۰/۰۵/۳۱ |           |        |            |            |

از دور و ارزیابی وجود داشتن یا نداشتن پوشش گیاهی یک منطقه کاربرد دارد. این شاخص همان‌طور که از نام آن پیداست، مقادیر نرمال دارد، یعنی دارای قدر مطلق مساوی و یا کمتر از یک است و مقدار آن بین  $[-1, +1]$  است [۱۲]. این شاخص گیاهی از معروف‌ترین، ساده‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌های گیاهی شناخته‌شده تا کنون است. فرمول این شاخص عبارت است از (رابطه ۱):

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

شاخص آب تفاضلی نرمال‌شده  $NDWI^2$  شاخصی برای استخراج پهنه‌های آبی در تصاویر ماهواره‌ای که از دو باند GREEN و  $NIR^3$  برای محاسبه آن استفاده می‌شود. مقادیر محاسبه‌شده برای پهنه‌های آبی بزرگ‌تر از صفر هستند و از رابطه ۲ محاسبه می‌شوند [۱۳].

$$NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR) \quad (2)$$

شاخص اصلاحی آب تفاضلی نرمال‌شده  $MNDWI^4$  شاخص  $NDWI$  اصلاح‌شده است. مزیت آن نسبت به شاخص  $NDWI$  این است که مناطق ساخت‌وساز شده را

#### تصاویر گرفته‌شده

تصاویر ماهواره Landsat 8 سنجنده OLI و ماهواره‌های Landsat 5,7 سنجنده ETM, TM از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ استفاده شده است. سعی شده است تصاویر استفاده‌شده در دوره زمانی مطالعه حاضر برای هر سال در فصول کم‌آبی و پرآبی انتخاب شوند (تصاویر سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۲ این سنجنده قابل استفاده نیستند) تاریخ اخذ تصاویر استفاده‌شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

#### شاخص‌های ماهواره‌ای

در مطالعه حاضر ۶ شاخص مرسوم در مطالعات انجام‌شده در استخراج پهنه‌های آبی، در محدوده دریاچه زریبار مقایسه شده‌اند، این شاخص‌ها به شرح ذیل هستند:

#### شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی $NDVI^1$

از شاخص پوشش گیاهی برای تشخیص سلامتی، شادابی و همچنین تراکم پوشش گیاهی استفاده می‌شود. شاخص پوشش گیاهی برای نمایش توده حیاتی (بیوماس) پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ، تولیدات گیاهی و تفکیک پوشش گیاهی بسیار مناسب به کار می‌رود. همچنین، در ارتباط با مسائل مرتبط با پوشش گیاهی از این شاخص استفاده می‌شود و در تحلیل‌ها و اندازه‌گیری‌های سنجش

2. Normalized Difference Water Index (NDWI)

3. Near Infra-Red

4. Modified Normalized Difference water Index (MNDWI)

1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

شاخص رطوبت سطح SWI<sup>۳</sup>

شاخص رطوبت سطح بیشترین مقادیر برای پهنه‌های آبی و کمترین مقادیر برای زمین‌های خشک، صخره‌ای، بایر و شنی را دارد. این شاخص مناطق را به دو کلاس آب و غیر آب تقسیم می‌کند [۱۴].

$$SWI = (0.2626 * BLUE) + (0.0926 * RED) + (-0.0656 * NIR) + (0.2141 * GREEN) + (-0.7629 * MIR) + (-0.5388 * SWIR) \quad (۵)$$

شاخص نسبی آب WRI<sup>۴</sup>

این شاخص نسبت کل بازتابش باندهای قرمز و سبز به باندهای مادون قرمز میانی و نزدیک است. مقادیر بزرگ‌تر از یک، آب هستند (رابطه ۶) [۱۵].

$$WRI = (GREEN + RED) / (NIR + MIR) \quad (۶)$$

در جدول ۲ روش محاسبه هر یک از شاخص‌ها و حد آستانه استاندارد هر یک از شاخص‌ها در تعیین پهنه‌های آبی آمده است.

جدول ۲. روش محاسبه و حد آستانه استاندارد شاخص‌ها

| ردیف | عنوان شاخص | فرمول محاسبه شاخص  | ملاحظات                             |
|------|------------|--|-------------------------------------|
| ۱    | NDWI       | $NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$   | مقادیر مثبت در پهنه های آبی         |
| ۲    | SWI        | $SWI = ((BLUE * 0.2626) + (GREEN * 0.2141) + (RED * 0.0926) + (NIR * -0.0656) + (MIR * -0.7629) + (SWIR * -0.5388))$ | مقادیر مثبت در پهنه های آبی         |
| ۳    | MNDWI      | $MNDWI = (Green - MIR) / (Green + MIR)$  | مقادیر مثبت در پهنه های آبی         |
| ۴    | WRI        | $WRI = (Green + Red) / (NIR + MIR)$  | مقادیر بزرگ‌تر از ۱ در پهنه های آبی |
| ۵    | NDVI       | $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$   | مقادیر منفی در پهنه های آبی         |
| ۶    | AWEI       | $AWEI = 4 * (Green - Mir) - (0.25 * NIR + 2.75 * SWIR)$  | مقادیر مثبت در پهنه های آبی         |

رادئومتر یکی می‌شود. این خطاها به دو دسته تقسیم می‌شوند، یکی خطاهای دستگاهی که بر اثر نقص در سنجنده یا ایستگاه گیرنده به وجود می‌آیند و دیگری، خطاهای اتمسفریک که بر اثر فعل و انفعالات فوتون‌ها و توسط مولکول‌ها و ذرات معلق گردوغبار در اتمسفر زمین ایجاد می‌شوند. برای اینکه مجموعه داده‌های مختلف، قابل مقایسه با هم باشند، به اعمال تصحیح رادئومتریک روی آنان نیاز است [۱۷]. تصحیحات رادئومتریک سبب بهبود

به‌خوبی از پوشش گیاهی و خاک تفکیک می‌کند. در این شاخص اصلاح‌شده به جای باند NIR از باند MIR<sup>۱</sup> استفاده می‌شود (رابطه ۳) [۳].

$$MNDWI = (GREEN - MIR) / (GREEN + MIR) \quad (۳)$$

شاخص اتوماتیک جداسازی آب (AWEI)<sup>۲</sup>

کاربرد اصلی این شاخص، جداسازی پیکسل‌های آب و غیر آب از یکدیگر با استفاده از تفاضل باندها و استفاده از ضرایب مختلف است. از پنج باند برای جداسازی آب و سایر سطوح تیره استفاده شده است. این شاخص بر جداسازی پیکسل‌های آبی از سایر پیکسل‌های تاریک همانند سایه و مناطق ساخت‌وساز شده استوار است. مقادیر بیش از صفر، آب بوده و مقادیر کمتر از صفر، غیر آب هستند (رابطه ۴) [۴].

$$AWEI = 4 * (GREEN - MIR) - (0.25 * NIR + 2.75 * SWIR) \quad (۴)$$

## پردازش تصاویر و ارزیابی شاخص

تصاویر خام ماهواره‌ای، معمولاً انحراف‌هایی نسبت به پلتفرم، سنسور، جو و زمین دارند و این انحراف‌ها و جابه‌جایی‌ها باید قبل از پردازش و تهیه خروجی از تصاویر، اصلاح شوند. به دلیل تفاوت در ویژگی سنجنده‌ها، شرایط جوی، زاویه خورشید و زاویه مشاهده سنسور، دستیابی به سازگاری رادئومتری در میان مجموعه داده‌های سنجش از دور مشکل است [۱۶]. این عوامل سبب بروز خطای

3. Surface wetness index  
4. Water Ratio Index

1. Middle InfraRed  
2. Automated Water Extraction Index

بهترین الگوی پیشنهادی است [۶]. دسته‌بندی پیکسل‌های تصاویر ماهواره‌ای برای نمایش ویژگی‌های پوشش یا کاربری زمین را طبقه‌بندی می‌گویند. در طبقه‌بندی تصویر، از اطلاعات بازتابندگی تک‌تک پیکسل‌ها استفاده می‌شود (در روش‌های پیکسل‌مبنا). در واقع، طبقه‌بندی تصاویر، به معنای برچسب‌گذاری پیکسل‌ها با استفاده از اطلاعات معنادار در جهان واقعی است. روش‌های طبقه‌بندی به دو دسته کلی طبقه‌بندی نظارت‌نشده<sup>۴</sup> و نظارت‌شده<sup>۵</sup> تقسیم می‌شوند. در روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده که در مطالعه حاضر استفاده شده است، از نمونه‌های آموزشی به‌عنوان کلیدی که نشان‌دهنده اثر طیفی مربوط به یک عارضه خاص و مد نظر کاربر است، برای طبقه‌بندی تصاویر استفاده می‌شود. این روش‌ها، با توجه به دانش اولیه کاربر از کلاس‌های پوشش سطح زمین و تحلیل‌های آماری این کلاس‌ها، روی تصاویر چندباندی اجرا می‌شوند. روش‌های طبقه‌بندی فقط به اطلاعات طیفی تصاویر بستگی دارد و با ارزش نوری هر پیکسل در ارتباط است. برای انجام این نوع طبقه‌بندی، ابتدا به پیکسل‌های آموزشی یا همان پیکسل‌های معلوم نیاز است. این پیکسل‌ها، برای هر کلاس باید به طور جداگانه تعریف شوند. در این روش طبقه‌بندی، نمونه‌های آموزشی باید بر اساس محدوده‌های مکانی همگن تعیین شوند (محدوده همگن محدوده‌ای است که پیکسل‌های آن فقط نشان‌دهنده یکی از عوارض سطح زمین باشند مانند خاک، آب، پوشش گیاهی، نمک، ابر، سایه). به این ترتیب که نمونه‌ها روی تصاویر فقط در محدوده همگن هر کاربری انتخاب می‌شوند. بردار میانگین و ماتریس کوواریانس کلاس‌ها با استفاده از الگوی آموزشی انتخاب شده از نمونه‌های شناخته‌شده از هر کلاس خاص، تخمین زده می‌شود. در این روش با فرض توزیع آماری نرمال هر کلاس در هر باند، احتمال تعلق یک پیکسل به یک کلاس، محاسبه می‌شود. تا زمانی که یک دامنه برای احتمالات در نظر گرفته نشود، تمام پیکسل‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. هر پیکسل به کلاسی تعلق می‌گیرد که بیشترین احتمال را دارد. اگر بزرگ‌ترین احتمال از دامنه‌ای که تعریف شده، کوچک‌تر باشد، آن پیکسل بدون طبقه‌بندی باقی می‌ماند.

کیفیت رادیومتری تصاویر، افزایش وضوح و در نتیجه، افزایش اطلاعات قابل استخراج از تصاویر می‌شوند.

به نسبت کل مقدار نوری که از یک سطح انعکاس یافته است، به بخشی از مقدار نور تابیده‌شده روی آن سطح، بازتابندگی<sup>۱</sup> گفته می‌شود. به بیان دیگر، بخشی از کل انرژی تابیده‌شده روی سطح است که منعکس شده و مقدار آن با توجه به توزیع طول موج تابشی، متفاوت است. بازتابندگی از سطح یک جسم، در واقع بیانگر اثربخشی آن جسم، در انعکاس انرژی تابشی است. تبدیل مقدار عددی تصاویر ماهواره‌ای به درجه بازتابندگی، یکی از روش‌های تصحیح رادیومتریکی تصاویر است که طی این مرحله، مقادیر عددی تصاویر ماهواره‌ای به عددهای بین صفر تا یک تبدیل می‌شوند. در صورتی که پارامترهای ضریب جابه‌جایی<sup>۲</sup> و افزایش<sup>۳</sup> مقدار تابش خورشید، ارتفاع خورشید و زمان اخذ تصویر در متادیتا موجود باشد، دسترسی به این مقدار عددی بازتابندگی امکان‌پذیر است. مقدار بازتابندگی برای ماهواره‌های Landsat و Landsat 5 با استفاده از رابطه<sup>۷</sup> به دست می‌آید.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d_2}{ESUN_{\lambda} \sin \theta} \quad (7)$$

در این رابطه،  $L_{\lambda}$  مقدار تابندگی طیفی (رادیانس) در واحد  $d, W/(m^2 * sr * \mu m)$  فاصله زمین تا خورشید در واحد نجومی،  $ESUN_{\lambda}$  تابش خورشید در واحد  $W/(m^2 * \mu m)$  و  $\theta$  ارتفاع خورشید به درجه است. در گام نخست، تبدیل مقادیر عددی تصاویر به مقادیر بازتابندگی به عنوان تصحیح رادیومتریکی تصاویر انجام و پس از انجام پیش‌پردازش در گام بعدی، مقادیر مساحت تالاب زیربار با استفاده از تکنیک‌های متداول سنجش از دوری استخراج شد. برای تعیین مساحت گستره‌های آبی، روش‌های مختلفی وجود دارد که روش‌های طبقه‌بندی و استفاده از شاخص‌ها معمول‌ترین آنهاست. از متداول‌ترین روش‌های استخراج گستره‌های آبی، طبقه‌بندی نظارت‌شده است. در مطالعه حاضر از الگوریتم طبقه‌بندی حداکثر احتمال برای اندازه‌گیری تغییر در پهنه آبی استفاده شد. روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال، یکی از روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده و

تالاب به طور مستقیم تحت تأثیر جریان‌های فصلی ورودی از بالای تالاب است. بنابراین، در انتخاب نمونه‌های آموزشی سعی شد تا نمونه‌های آموزشی از نقاط دارای عمق کمتر که تحت تأثیر جریان‌های فصلی هستند نیز تحت عنوان کلاس آب انتخاب شوند. در شکل ۳ ب نمونه‌ای از نقشه طبقه‌بندی تالاب زربار در آگوست ۲۰۱۶ نشان داده شده است. در شکل ۳ ج تا ی نیز میزان مساحت برآورد شده توسط هریک از شاخص‌ها برای تصویر آگوست ۲۰۱۶ نشان داده شده است.

برای افزایش میزان دقت شاخص‌ها، سعی شده است برای هر تصویر مقادیر حد آستانه شاخص‌ها با استفاده از روش هیستوگرام و بصری تعیین شود تا مقادیر شاخص‌ها بهبود یابند. در گام بعدی سعی شده است بهترین و نزدیک‌ترین شاخص‌ها انتخاب و صحت‌سنجی شوند. در جدول ۳ مقادیر مساحت به دست آمده از هریک از شاخص‌ها و مقادیر به دست آمده از روش طبقه‌بندی تصاویر ارائه شده است. از میان شاخص‌های ماهواره‌ای به کاررفته در مطالعه حاضر تمامی شاخص‌ها به جز شاخص WRI نتایجی نزدیک به مقادیر طبقه‌بندی نشان داده‌اند. در خروجی‌های شاخص NDVI پهنه آبی تفکیک شده به وسیله این شاخص به علت پوشش گیاهی موجود روی سطح دریاچه تا حدودی با پوشش گیاهی اطراف دریاچه اختلاط داشته است، بنابراین در تفکیک پهنه آبی و پوشش گیاهی در انتخاب حد آستانه باید با دقت بیشتری عمل شود تا از اختلاط این دو پوشش جلوگیری شود. در خور یادآوری است مقادیر آستانه‌های اعمال شده در فصول کم‌آبی و پرآبی تالاب از روند یکسانی پیروی می‌کنند. همان‌طور که از نمودارهای شکل ۴ برمی‌آید، مقادیر به دست آمده از تمامی شاخص‌ها به جز شاخص WRI از همبستگی مناسبی با مقادیر به دست آمده از روش مرجع دارند و با توجه به کوچک بودن مساحت تالاب، می‌توان از این شاخص‌ها برای پایش مستمر پهنه تالاب زربار استفاده کرد.

در نرم‌افزار ENVI، برای اجرای این نوع طبقه‌بندی روی هر پیکسل در تصویر رابطه ۸ اعمال می‌شود.

$$g_i(x) = \ln p(w_i) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_i| - \frac{1}{2} (x - m_i)' \Sigma_i^{-1} (x - m_i) \quad (8)$$

در این رابطه،  $i$  کلاس‌ها،  $x$  داده‌های  $n$  بعدی و  $n$  تعداد باندهاست.  $p(\omega_i)$  احتمال وجود کلاس  $\omega_i$  در تصویر است که این احتمال برای تمام کلاس‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.

$|\Sigma_i|$  حد ماتریس کوواریانس داده‌ها در کلاس  $\omega_i$ ،  $\Sigma_i^{-1}$  معکوس ماتریس کوواریانس و  $m_i$  یک کلاس خاص است. طبقه‌بندی حداکثر احتمال روی تمامی تصاویر Landsat اعمال شده و مساحت دریاچه برای هریک از تصاویر استخراج شد. بر اساس مطالعات پیشین و بررسی عملکرد این روش طبقه‌بندی در استخراج پهنه‌های آبی [۵، ۶ و ۱۸] این روش به عنوان روش مرجع برای تعیین بهترین شاخص در مطالعات حاضر استفاده شده است. شاخص‌های بررسی شده شامل NDVI، NDWI، MNDWI، SWI، AWEI و WRI هستند که با روش مبنا صحت‌سنجی شده‌اند. این شاخص‌ها برای تصاویر ماهواره‌ای اعمال شده و به منظور تعیین میزان صحت نتایج به دست آمده، مقادیر شاخص‌ها با مقادیر استخراج شده از روش طبقه‌بندی به عنوان روش مرجع در این مطالعات، مقایسه شد. برای تعیین میزان صحت و دقت هر یک از شاخص‌ها در گام نخست و تعیین بهترین شاخص برای تعیین مساحت تالاب، مقادیر جذر میانگین مربعات<sup>۱</sup> (RMSE) میانگین خطای مطلق<sup>۲</sup> (MAE) و مقادیر همبستگی میان شاخص‌ها و روش مرجع تعیین و در نهایت مناسب‌ترین شاخص تعیین شد.

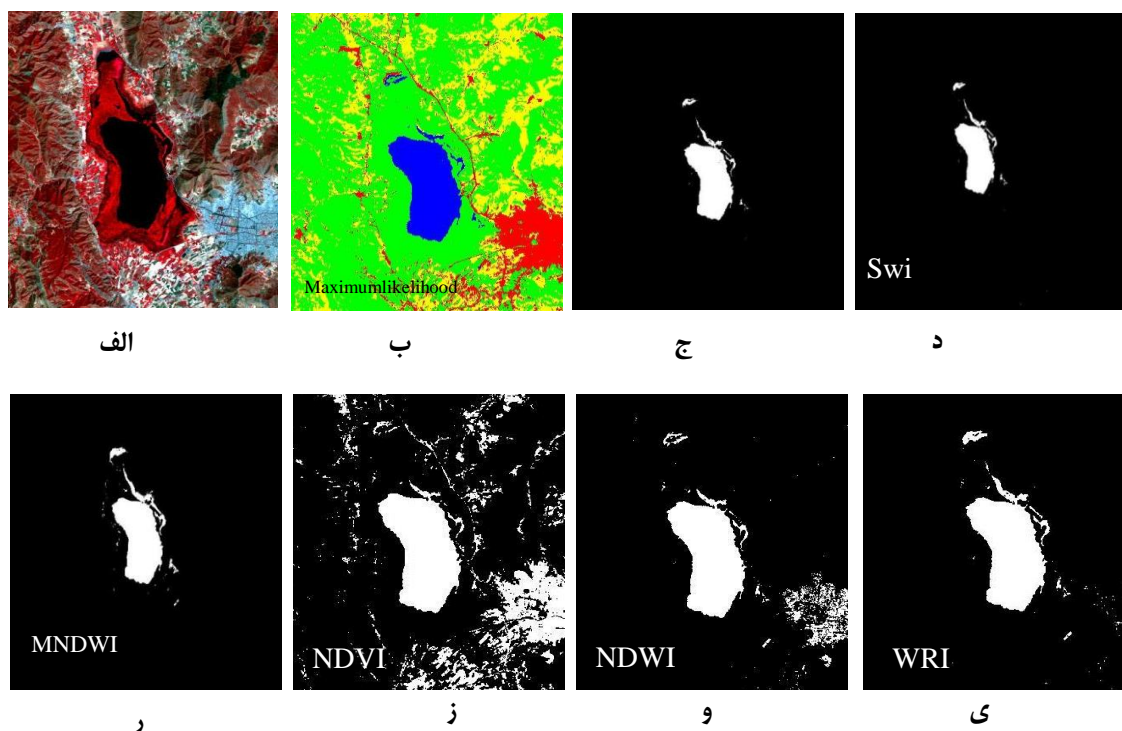
## یافته‌ها

### ارزیابی شاخص‌ها

همان‌طور که در روش تحقیق گفته شد، ابتدا با استفاده از روش طبقه‌بندی مقادیر مساحت پهنه آبی تالاب در هریک از تصاویر تعیین شد. همان‌طور که در بخش انتخاب نمونه‌های آموزشی گفته شد، با توجه به اینکه بخشی از

1. Root-mean-square Error  
2. Mean Absolute Error





شکل ۳. مقایسه مقادیر شاخص‌ها و طبقه‌بندی تصویر دریاچه زریبار در تاریخ ۳۰ آگوست ۲۰۱۶

جدول ۳. مقادیر مساحت تالاب زریبار با استفاده از روش طبقه‌بندی و شاخص‌های ماهواره‌ای (هکتار)

| MNDWI | WRI  | AWEI | SWI  | NDWI | NDVI | طبقه‌بندی | تاریخ      |
|-------|------|------|------|------|------|-----------|------------|
| ۱۱۴۰  | ۱۲۴۷ | ۱۲۶۸ | ۱۳۰۲ | ۹۹۴  | ۹۴۶  | ۱۱۲۵/۴۵   | ۱۳۸۵/۵/۱۶  |
| ۱۲۷۶  | ۱۲۹۵ | ۱۴۴۸ | ۱۵۱۹ | ۱۴۲۰ | ۱۲۳۱ | ۱۵۵۷/۲۷   | ۱۳۸۶/۲/۱۷  |
| ۱۵۴۷  | ۱۵۸۵ | ۱۶۱۳ | ۱۶۳۳ | ۱۳۴۷ | ۱۳۷۹ | ۱۶۳۸/۹    | ۱۳۸۶/۳/۲   |
| ۱۱۹۷  | ۱۰۰۸ | ۱۱۲۶ | ۱۲۱۲ | ۱۰۴۸ | ۱۱۰  | ۱۲۴۲/۶۳   | ۱۳۸۶/۵/۴   |
| ۱۲۱۲  | ۱۰۷۷ | ۱۱۳۱ | ۱۲۵۹ | ۱۰۱۴ | ۱۰۰۹ | ۱۲۶۲/۶۱   | ۱۳۸۶/۵/۲۰  |
| ۱۱۱۶  | ۹۹۸  | ۱۰۶۳ | ۱۱۲۱ | ۱۰۰۹ | ۹۹۵  | ۱۱۸۳/۴۱   | ۱۳۸۶/۶/۵   |
| ۹۷۵   | ۸۹۱  | ۸۹۵  | ۸۸۹  | ۹۱۱  | ۸۵۴  | ۹۹۰/۰۹    | ۱۳۸۸/۵/۹   |
| ۹۳۲   | ۱۲۷۹ | ۹۱۴  | ۹۲۴  | ۸۸۶  | ۸۵۵  | ۱۰۳۸/۱۵   | ۱۳۸۸/۵/۲۵  |
| ۹۶۷   | ۹۹۵  | ۹۵۰  | ۹۳۴  | ۱۰۱۶ | ۹۵۵  | ۹۰۶/۶۶    | ۱۳۸۸/۱۱/۳  |
| ۱۰۳۹  | ۹۱۶  | ۱۰۲۲ | ۱۰۰۵ | ۹۴۶  | ۹۰۲  | ۱۱۱۴/۲    | ۱۳۸۹/۳/۱۰  |
| ۹۹۰   | ۱۱۱۶ | ۹۴۱  | ۹۷۷  | ۹۱۶  | ۸۸۴  | ۹۷۵/۱۵    | ۱۳۸۹/۵/۲۷  |
| ۹۳۴   | ۸۹۸  | ۹۰۳  | ۹۰۷  | ۸۸۹  | ۹۰۵  | ۹۰۳/۷۸    | ۱۳۸۹/۸/۱۶  |
| ۸۶۶   | ۸۹۲  | ۸۸۵  | ۹۱۰  | ۹۱۸  | ۸۹۷  | ۹۳۳/۱۲    | ۱۳۸۹/۱۰/۳  |
| ۱۰۲۲  | ۹۶۲  | ۹۹۶  | ۱۰۶۶ | ۹۴۸  | ۹۱۷  | ۹۴۸/۸۷    | ۱۳۹۰/۴/۳۰  |
| ۹۷۸   | ۸۵۳  | ۹۷۹  | ۹۱۵  | ۸۹۶  | ۹۶۷  | ۹۹۷/۰۲    | ۱۳۹۰/۵/۳۱  |
| ۹۵۷   | ۹۶۰  | ۹۹۰  | ۹۹۵  | ۹۳۷  | ۸۹۸  | ۱۱۹۲/۹۵   | ۱۳۹۲/۴/۱۹  |
| ۹۵۳   | ۸۹۸  | ۹۴۸  | ۹۳۰  | ۹۲۶  | ۸۹۷  | ۱۱۲۷/۰۷   | ۱۳۹۲/۵/۲۰  |
| ۱۰۳۸  | ۹۷۷  | ۹۹۰  | ۱۰۴۶ | ۹۵۱  | ۸۹۸  | ۱۱۸۸/۰۹   | ۱۳۹۲/۶/۵   |
| ۹۵۷   | ۹۴۸  | ۹۷۷  | ۱۰۱۴ | ۹۷۴  | ۹۵۳  | ۱۰۴۴/۹    | ۱۳۹۲/۱۰/۲۸ |
| ۹۵۲   | ۱۰۱۳ | ۹۹۵  | ۹۳۸  | ۹۲۵  | ۹۰۳  | ۱۰۲۶/۷۲   | ۱۳۹۳/۵/۲۲  |
| ۱۱۶۴  | ۱۰۱۵ | ۱۲۳۳ | ۱۱۸۳ | ۱۰۲۲ | ۹۲۷  | ۱۱۲۶/۱۷   | ۱۳۹۴/۳/۲۴  |
| ۱۰۱۹  | ۹۸۶  | ۱۱۳۳ | ۱۰۱۴ | ۹۶۶  | ۸۹۱  | ۱۲۴۵/۹۶   | ۱۳۹۴/۴/۹   |
| ۹۴۷   | ۹۳۸  | ۹۱۵  | ۹۱۴  | ۹۰۳  | ۸۸۷  | ۹۹۲/۷۹    | ۱۳۹۶/۵/۲۶  |
| ۱۰۱۷  | ۹۲۸  | ۹۴۸  | ۹۷۵  | ۹۶۷  | ۹۲۳  | ۱۱۵۰/۷۴   | ۱۳۹۵/۴/۲۸  |
| ۹۹۰   | ۹۲۹  | ۹۶۵  | ۹۷۳  | ۹۰۶  | ۹۱۳  | ۹۹۱/۸     | ۱۳۹۵/۶/۱۴  |

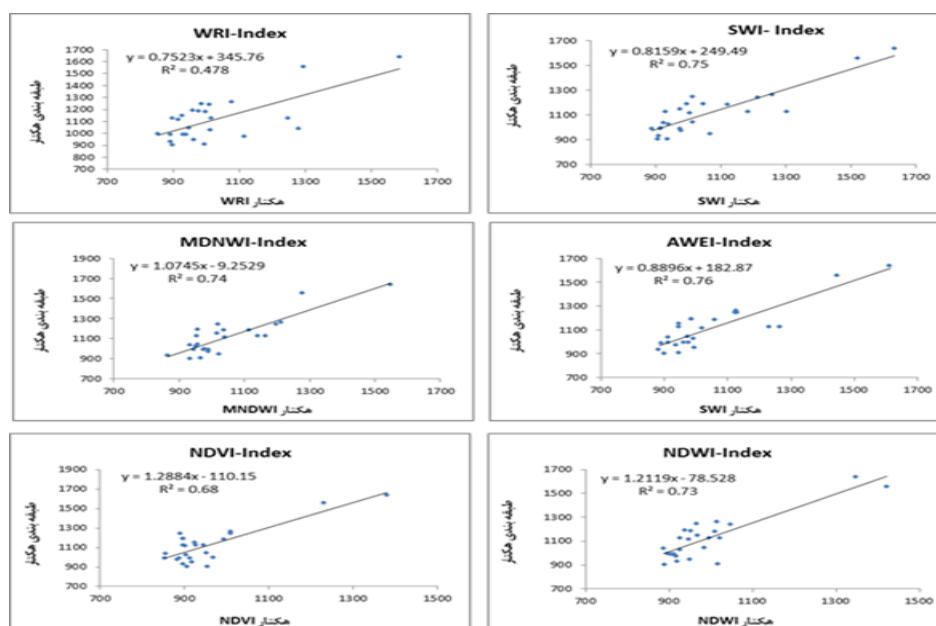
شکل ۳ نمونه‌ای از تصاویر استخراج شده از تالاب با استفاده از روش طبقه‌بندی و اعمال شاخص‌ها در تاریخ ۳۰ آگوست ۲۰۱۶ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ نیز قابل مشاهده است، در مقایسه شاخص‌ها، SWI، AWEI و MNDWI شباهت بیشتری با تصویر ماهواره‌ای و تصویر طبقه‌بندی شده در آن تاریخ دارند. همچنین، در شکل ۴ نمودار همبستگی هریک از شاخص‌های بررسی شده و روش مبنا نشان داده شده است.

بر اساس نمودارهای شکل ۴، بیشترین میزان ضریب تبیین بین سطح به‌دست‌آمده از روش مبنا و شاخص‌های ماهواره‌ای مربوط به شاخص SWI است که ضریب تبیین ۰/۷۶ دارد. این شاخص از ترکیب باندهای آبی، قرمز، سبز، مادون قرمز نزدیک، میانه و دور استفاده می‌کند که این باندها طول موج ۰/۴۵ تا ۲/۱۶ میکرومتر بازتابش می‌کنند. همچنین، نتایج نشان داد کمترین ضریب تبیین مربوط به شاخص WRI است که به مقدار ۰/۴۸ است.

برای صحت‌سنجی مقادیر شاخص‌های به‌دست‌آمده و تعیین مناسب‌ترین شاخص‌ها، مقادیر RMSE و MAE و میزان همبستگی مقادیر آنها در مقایسه با روش طبقه‌بندی به‌عنوان روش مرجع تعیین شد. مقادیر RMSE و MAE و میزان همبستگی شاخص‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، سه شاخص SWI، AWEI و MNDWI با بیشترین مقدار همبستگی به‌ترتیب معادل ۰/۷۶، ۰/۷۴ و ۰/۷۶ و کمترین مقادیر خطای RMSE به‌ترتیب برای هر شاخص معادل ۱۰۸/۸۰، ۱۱۱/۳۰ و ۱۱۳۰/۸۰ هکتار و مقادیر خطای MAE معادل ۸۴/۶۳، ۸۷/۳۰ و ۹۴/۲۸ هکتار مناسب‌ترین شاخص‌ها در استخراج مساحت پهنه آبی تالاب زیربار شناخته شده است. دو شاخص NDVI و NDWI با مقادیر همبستگی معادل ۰/۶۸ و ۰/۷۴ و میزان خطای RMSE معادل ۱۹۵/۳۱ و ۱۶۱/۲۸ هکتار و میزان خطای MAE به‌ترتیب معادل ۱۶۸/۳۰ و ۱۳۹/۱۰ هکتار بعد از سه شاخص یادشده قرار گرفته‌اند.

جدول ۴. مقادیر RMSE و MAE و همبستگی شاخص‌ها

| شاخص  | RMSE(ha) | MAE(ha) | R <sup>2</sup> |
|-------|----------|---------|----------------|
| NDVI  | ۱۹۵/۳۱   | ۱۶۸/۳۰  | ۰/۶۸           |
| NDWI  | ۱۶۱/۲۹   | ۱۳۹/۱۰  | ۰/۷۴           |
| MNDWI | ۱۱۳/۸۰   | ۸۷/۳۰   | ۰/۷۴           |
| SWI   | ۱۰۸/۸۰   | ۸۴/۶۳   | ۰/۷۶           |
| WRI   | ۱۶۳/۱۰   | ۱۴۰/۴۴  | ۰/۴۸           |
| AWEI  | ۱۱/۳۰    | ۹۴/۲۸   | ۰/۷۶           |



شکل ۴. نمودار همبستگی شاخص‌های منتخب و روش طبقه‌بندی

جدول ۵. اولویت‌بندی شاخص‌ها

| شاخص  | RMSE(ha) | MAE(ha) | R <sup>2</sup> |
|-------|----------|---------|----------------|
| SWI   | ۱۰۸/۸۰   | ۸۴/۶۳   | ۰/۷۶           |
| AWEI  | ۱۱۱/۳۰   | ۹۴/۲۸   | ۰/۷۶           |
| MNDWI | ۱۱۳/۸۰   | ۸۷/۳۰   | ۰/۷۴           |
| NDWI  | ۱۶۱/۲۹   | ۱۳۹/۱۰  | ۰/۷۴           |
| NDVI  | ۱۹۵/۳۱   | ۱۶۸/۳۰  | ۰/۶۸           |
| WRI   | ۱۶۳/۱۰   | ۱۴۰/۴۴  | ۰/۴۸           |

#### اولویت‌بندی شاخص‌های گیاهی منتخب

همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، بر اساس سه آماره RMSE، MAE و مقادیر ضریب همبستگی R<sup>2</sup> صحت‌سنجی شاخص‌ها انجام گرفت و شاخص‌های منتخب بر اساس این صحت‌سنجی انتخاب شد. بر اساس جدول ۵ شاخص‌ها با استفاده از این آماره‌ها اولویت‌بندی شدند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده شاخص‌های SWI و AWEI با توجه به حداکثر مقدار ضریب تبیین و کم بودن میزان خطا نسبت به سایر شاخص‌های ماهواره‌ای مناسب تشخیص داده شدند.

#### بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی مطالعه حاضر تعیین بهترین شاخص جهت استخراج مساحت گستره آبی تالاب زریبار و مقایسه عملکرد شاخص‌ها در تعیین مساحت دریاچه برای تصاویر ماهواره Landsat با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر است. تصاویر ماهواره Landsat با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر دریافت و پیش‌پردازش روی تصاویر اعمال شد. در گام بعدی، برای تعیین مقادیر مساحت تالاب با استفاده از یک روش به عنوان روش مرجع مقایسات در این مطالعات از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده حداکثر احتمال استفاده شده است. با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده مساحت تالاب برای هریک از تصاویر گرفته‌شده در دوره زمانی ۱۱ ساله (۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶) تعیین شد. روش طبقه‌بندی با توجه به سوابق مطالعات به عنوان روش مرجع مقایسه شاخص‌ها در نظر گرفته شده است. شاخص‌های NDVI، NDWI، MNDWI، SWI و AWEI با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در منطقه ارزیابی شدند. مساحت استخراج‌شده از شاخص‌ها با مقادیر به‌دست‌آمده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده بیشترین احتمال، به عنوان روش مرجع مقایسه شده و صحت‌سنجی شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده سه

شاخص SWI، AWEI و MNDWI با بیشترین مقدار همبستگی به ترتیب معادل ۰/۷۶، ۰/۷۴ و ۰/۷۴ و کمترین مقادیر خطای RMSE به ترتیب برای هر شاخص معادل ۱۰۸/۸۰، ۱۱۱/۳۰ و ۱۱۳/۸۰ هکتار و مقادیر خطای MAE معادل ۸۴/۶۳، ۹۴/۲۸ و ۸۷/۳۰ هکتار مناسب‌ترین شاخص‌ها در استخراج مساحت پهنه آبی تالاب زریبار شناخته شده است. دو شاخص NDVI و NDWI با مقادیر همبستگی معادل ۰/۶۸ و ۰/۷۴ و میزان خطای RMSE معادل ۱۹۵/۳۱ و ۱۶۱/۲۹ هکتار و میزان خطای MAE به ترتیب معادل ۱۶۸/۳۰ و ۱۴۰/۴۴ هکتار بعد از سه شاخص یادشده قرار گرفته‌اند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، به جز شاخص WRI تمامی شاخص‌ها عملکرد تقریباً مناسبی در تعیین مساحت پهنه آبی تالاب زریبار داشتند. در تالاب زریبار با توجه به پوشش گیاهی موجود روی تالاب، تشخیص پهنه آبی موجود زیر پوشش گیاهی با روش‌های اپتیکی امکان‌پذیر نیست، ولی میزان پوشش آبی قابل تشخیص با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در فصول مختلف با توجه به وابستگی مقادیر پهنه آبی تالاب به بارش‌های فصلی و ورودی آب زیرزمینی به تالاب متغیر است. بنابراین، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و وجود آرشیو غنی می‌توان تغییرات مساحت تالاب را پایش کرد. پایش این تغییرات با استفاده از شاخص‌ها با توجه به سهولت و سرعت بیشتر و عدم نیاز به نمونه‌های آموزشی نسبت روش‌های طبقه‌بندی می‌تواند مورد استفاده گسترده قرار گیرد. شایان یادآوری است که مقادیر به‌دست‌آمده از شاخص‌ها معمولاً کمتر از میزان به‌دست‌آمده از روش طبقه‌بندی است. این مورد نشان می‌دهد دقت شاخص‌ها در نقاط دارای عمق کم آب کمتر از میزان دقت روش‌های طبقه‌بندی است، زیرا در روش طبقه‌بندی، تالاب زریبار

- supervised classification and KT transformation. *Aquatic Procedia*. 2015 Jan 1;4:739-46.
- [7]. Zhou Y, Dong J, Xiao X, Xiao T, Yang Z, Zhao G, Zou Z, Qin Y. Open surface water mapping algorithms: A comparison of water-related spectral indices and sensors. *Water*. 2017 Apr;9(4):256.
- [8]. Ashtekar AS, Mohammed-Aslam MA, Moosvi AR. Utility of Normalized Difference Water Index and GIS for Mapping Surface Water Dynamics in Sub-Upper Krishna Basin. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2019 Aug 1;47(8):1431-42.
- [9]. Gomshadzaee M. Determination of water bodies using satellite images and applying spectral indicators. 2nd national conference of water crisis in iran and middle east. 2015 [persian].
- [10]. Khosravian m. Monitoring Parishan Lake's Water body Changes using Remote sensing indicators, *journal of Hydrogeomorphology*. 2016 (13): 99-120 [Persian].
- [11]. Atlas of Water Resources, Iran Water Resources Management Company. 2011 [persian].
- [12]. Tucker CJ. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, 2014.
- [13]. McFeeters SK. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*. 1996 May 1;17(7):1425-32.
- [14]. Bhagat VS, Sonawane KR. Use of Landsat ETM+ data for delineation of water bodies in hilly zones. *Journal of Hydroinformatics*. 2011 Oct;13(4):661-71.
- [15]. Li W, Du Z, Ling F, Zhou D, Wang H, Gui Y, Sun B, Zhang X. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI. *Remote Sensing*. 2013 Nov;5(11):5530-49.
- [16]. Du Y, Teillet PM, Cihlar J. Radiometric normalization of multi-temporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection. *Remote sensing of Environment*. 2002 Sep 1;82(1):123-34.
- [17]. Chander G, Markham BL, Helder DL. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*. 2009 May 15;113(5):893-903.
- [18]. Nath RK, Deb SK. Water-body area extraction from high resolution satellite images- an introduction, review, and comparison. *International Journal of Image Processing (IJIP)*. 2010 Jan;3(6):265-384.
- نقاط دارای عمق کم آب نیز به عنوان نمونه آموزشی در اختیار نرم‌افزار قرار گرفته است، ولی در محاسبه شاخص‌ها با تغییر میزان حد آستانه شاخص تا حدودی می‌توان میزان دقت شاخص‌ها برای تشخیص نقاط کم‌عمق را بهبود بخشید. با وجود تعیین حدود آستانه‌ها برای هر شاخص در هر تصویر همچنان شاخص‌ها در تشخیص نقاط با عمق کمتر نسبت به روش طبقه‌بندی ضعیف‌تر عمل می‌کنند. همان‌طور که از نتایج تحقیق حاضر برمی‌آید، شاخص‌های مقایسه‌شده به طور کلی عملکرد مناسبی در تعیین سطح پهنه آبی تالاب زریبار دارند که از این بین، شاخص‌های AWEi و MNDWI عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. مطالعه حاضر و مجموعه مطالعات انجام‌شده پیشین نشان می‌دهند استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای به عنوان روشی با سرعت، دقت و کیفیت مناسب محاسبات، می‌تواند به عنوان روشی بهینه و کارآمد برای تعیین میزان تغییرات سطح پهنه‌های آبی طی دوره‌های مختلف از گذشته تا حال استفاده شود که تعیین میزان و روند این تغییرات، کمک زیادی به مدیریت بهینه منابع آبی می‌کند.

#### منابع

- [1]. Du Z, Li W, Zhou D, Tian L, Ling F, Wang H, Gui Y, Sun B. Analysis of Landsat-8 OLI imagery for land surface water mapping. *Remote sensing letters*. 2014 Jul 3;5(7):672-81.
- [2]. Du Y, Zhang Y, Ling F, Wang Q, Li W, Li X. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing*. 2016 Apr;8(4):354.
- [3]. Xu H. Evaluation of two absolute radiometric normalization algorithms for pre-processing of Landsat imagery. *Journal of China University of Geosciences*. 2006 Jun 1;17(2):146-57.
- [4]. Feyisa GL, Meilby H, Fensholt R, Proud SR. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2014 Jan 1;140:23-35.
- [5]. Haibo Y, Zongmin W, Hongling Z, Yu G. Water body extraction methods study based on RS and GIS. *Procedia Environmental Sciences*. 2011 Jan 1;10:2619-24.
- [6]. Gautam VK, Gaurav PK, Murugan P, Annadurai M. Assessment of surface water Dynamics in Bangalore using WRI, NDWI, MNDWI,