



سجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال هفتم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۴
Vol.7, No. 4, Winter 2016

۹۹-۱۱۶

مقایسه شاخص‌های آب به منظور تفکیک خودکار رودخانه‌های کم‌عرض و کم‌عمق در تصاویر لندست

الهام طاهریان^۱، میلاد خواستار بروجنی^{۲*}، حسین صمدی^۳

۱. کارشناس مرکز تحقیقات منابع آب دانشگاه شهرکرد

۲. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشگاه فردوسی مشهد و کارشناس

آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری

۳. دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه شهرکرد

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۵/۱۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۷

چکیده

شناخت رفتار و خصوصیات رسوب‌گذاری رودخانه‌های منتهی به مخازن سدهای بزرگ باعث سهولت تصمیم‌گیری‌های راهبردی در مورد احداث سازه‌های مهندسی در طول رودخانه برای مدیریت رسوب ورودی به مخزن سد خواهد شد. فناوری سنجش از دور با داده‌های چندزمانه و چندطیفی تا حد زیادی سهولت کشف تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها را در طول زمان به همراه داشته است. با وجود این، ماهیت خاص رودخانه‌های کم‌عرض و کم‌عمق باعث افزایش پیچیدگی مطالعات بررسی ریخت‌شناسی چنین رودخانه‌هایی، با استفاده از داده‌های موجود شده است. در این مطالعه قابلیت خودکار شش شاخص پرکاربرد آب شامل: شاخص تفاضل بهنجار آب، شاخص تفاضل بهنجار آب اصلاح‌شده، شاخص استخراج خودکار آب با سایه، شاخص استخراج خودکار آب بدون سایه، شاخص آب پیشرفته و شاخص آب ۲۰۱۵ مستخرج از دو سنجنده ETM+ و OLI ماهواره لندست در تفکیک رودخانه‌های کم‌عرض و کم‌عمق بررسی شد. آستانه بهینه هر یک از این شاخص‌ها با استفاده از نمودار ROC تعیین شد. فرایند اعتبارسنجی نیز با استفاده از تصاویر گوگل ارث مربوط به آگوست سال ۲۰۱۳ انجام پذیرفت. صحت نتایج با آمارهای متفاوت شامل خطای ترکیبی، صحت تولیدکننده، صحت کاربر، خطای omission و خطای commission بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد اگرچه صحت شاخص‌های مستخرج از سنجنده ETM+ به نسبت بیش از سنجنده دیگر است، به طور کلی بیشترین صحت تفکیک عارضه مورد نظر مربوط به شاخص تفاضل بهنجار آب اصلاح‌شده و شاخص استخراج خودکار آب با سایه است و شاخص استخراج خودکار آب بدون سایه نیز کمترین صحت را در تفکیک عارضه رودخانه داشته است.

کلیدواژه‌ها: ETM+, OLI، منحنی ROC، ریخت‌شناسی رودخانه.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: چهارمحال و بختیاری، دانشگاه شهرکرد، مرکز تحقیقات منابع آب، صندوق پستی ۱۱۵. تلفن: ۰۹۱۳۲۸۵۲۳۴۷

۱- مقدمه

ریخت‌شناسی دانش شناخت شبکه رودخانه از نظر شکل و فرم کلی، مرز و حریم رودخانه، ابعاد و هندسه، مشخصات هیدرولیکی، راستا و نیمرخ طولی و روند تغییرات آن است. درحقیقت برای داشتن رویکرد علمی و منطقی به مشکلات گوناگون رودخانه‌ها، ارائه راهکار، برنامه‌ریزی مناسب و طراحی پروژه‌های منابع آب و سازه‌های وابسته، ایجاد درکی صحیح از ریخت‌شناسی و رفتار رودخانه پیش‌شرط لازم است. بنابراین، مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه در برنامه‌ریزی، طراحی و نگهداری سازه‌های آبی و به‌طور خاص، سدهای مخزنی نقش مهمی ایفا می‌کنند (Schumm, 2007).

در سال‌های اخیر، اطلاعات قابل استخراج از تصاویر دورسنجی برای تهیه پایگاه اطلاعات مکانی، به‌منظور بررسی تغییرات ریخت‌شناسی و مطالعات مهندسی رودخانه‌ها کاربرد گسترده‌ای داشته‌اند (سیف و نجمی، ۱۳۹۲؛ ارشد و همکاران، ۱۳۸۶). تولیدات چندطیفی لندست با دارا بودن رکورد طولانی‌ترین برداشت از سطوح قاره‌ای، قدرت تفکیک مکانی متوسط و سطح دسترسی عمومی یکی از بهترین گزینه‌ها برای بررسی تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه به‌شمار می‌روند (Baki and Gan, 2012; Jiang et al., 2014; Fisher et al., 2016).

طبقه‌بندی خودکار با تهیه ماسک از پیکسل‌های آب اساس بیشتر روش‌های پردازش تصاویر رقومی برای بررسی آب‌های سطحی است. با این روش، آب از دیگر پدیده‌ها تفکیک می‌شود و پویایی عوارض آبی در دوره‌های زمانی گوناگون، با استفاده از روش کشف تغییرات قابل پایش خواهد بود (Fisher et al., 2016). درواقع برای تفکیک آب‌های سطحی از پدیده‌های دیگر، سه روش اصلی وجود دارد: الف) استفاده از اطلاعات باندهای طیفی (Rundquist et al., 1987)؛ ب) طبقه‌بندی نظارت‌شده و نظارت‌نشده (Otukey and Blaschke, 2010; Lu and Weng, 2007)؛ ج) استفاده از شاخص‌های آب (Jiang et al., 2014).

سهولت اجرا و صحت نتایج حاصل از شاخص‌های آب بیش از دیگر روش‌هاست، بنابراین، از این روش به‌منظور بررسی آب‌های سطحی استفاده گسترده‌ای می‌شود (Jiang et al., 2014). بازتابندگی کم آب‌های زلال و عمیق در محدوده فرورسرخ نزدیک باعث افزایش قابلیت تفکیک این پدیده در این طول موج از دیگر پدیده‌ها می‌شود. شاخص‌های آب با توجه به این قانون عمومی و تلفیق اطلاعات دو یا چند باند طیفی، با استفاده از عملگرهای گوناگون جبری برای افزایش قابلیت تمایز آب از دیگر پدیده‌ها توسعه یافته‌اند (علوی‌پناه، ۱۳۹۰). درواقع با استفاده از موقعیت باندهای جذبی در طیف بازتابی و عوامل به‌وجودآورنده آن‌ها، می‌شود شاخص‌هایی برای تفکیک آب از دیگر پدیده‌ها تعریف کرد.

شاخص تفاضل بهنجار آب^۱ با نام اختصاری NDWI، نخستین بار از سوی مک‌فیترز^۲ (۱۹۹۶) برای تفکیک دریاچه‌ها و تالاب‌ها ارائه شد. حساسیت این شاخص به رطوبت باعث شده است افزون‌بر شناسایی منابع آبی، در مطالعه تنش پوشش گیاهی، مطالعات شاخص سطح برگ^۳ و مدل‌سازی محصولات کشاورزی نیز کاربرد داشته باشد (علوی‌پناه، ۱۳۹۰). یی^۴ و همکاران (۲۰۰۹)، با بررسی صحت نقشه منابع آب تهیه‌شده با استفاده از شاخص NDWI، نشان دادند این شاخص قابلیت خوبی برای تفکیک آب‌های سطحی دارد، اما عمدتاً با دو مشکل اساسی روبه‌روست: الف) استخراج شاخص با استفاده از باندهای گوناگون (مرئی، فرورسرخ نزدیک، یا فرورسرخ میانی) نتایج متفاوتی به‌دست می‌دهد و ب) آستانه‌های این شاخص تا حد زیادی به نسبت آب در هر پیکسل بستگی دارد. سو^۵ (۲۰۰۶) شاخص NDWI را، با جایگزینی باند فرورسرخ میانی به‌جای باند فرورسرخ نزدیک، اصلاح کرد و آن را شاخص تفاضل بهنجار آب اصلاح‌شده^۶ یا به‌اختصار

1. Normalised Difference Water Index
2. McFeeters
3. Leaf Area Index
4. Ji
5. Xu
- 6 Modified Normalised Difference Water Index

مرور مطالعات پیشین در زمینه بررسی ریخت‌شناسی رودخانه با استفاده از فناوری سنجش از دور نشان‌دهنده تمرکز محققان بر رودخانه‌های عریض و عمیق با قابلیت رسوب‌گذاری قابل توجه است. جو^۱ و همکاران (۲۰۰۶)، با استفاده از روش تفسیر چشمی ترکیب‌های رنگی کاذب داده‌های سنجنده‌های MSS و TM ماهواره لندست، تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه زرد را در چین بررسی کردند. این رودخانه رسوب‌گذارترین رودخانه جهان به‌شمار می‌آید و عرض آن به حدی است که در کم‌عرض‌ترین مناطق در منطقه کوهستانی به بیش از ۶۰ متر می‌رسد. کومو^۲ و همکاران (۲۰۰۸) نیز، با استفاده از نقشه‌های رقومی، عکس‌های هوایی و تفسیر چشمی داده‌های پانکروماتیک ماهواره SPOT تغییرات ریخت‌شناسی قسمت وینچان-نون‌خایی^۳ رودخانه مکونگ^۴ را، با عرضی بیش از ۳۰۰ متر، بررسی کردند. باکی و گن^۵ (۲۰۱۲) تغییرات ساحل چپ و راست رودخانه جامونا^۶ در کشور بنگلادش را، با عرضی بیش از ۵۰۰ متر و عمقی حدود ۱۴ متر در خشک‌ترین فصل سال، بررسی کردند. در این مطالعه، مرز رودخانه با تفسیر چشمی باندهای طیفی مرئی و فروسرخ نزدیک سنجنده‌های MSS و TM ماهواره لندست استخراج شده است. زرکار^۷ و همکاران (۲۰۱۲)، با استفاده از شاخص NDWI مستخرج از تصاویر سنجنده‌های LISS-III و LISS-I ماهواره IRS، به بررسی پویایی رودخانه براماپوترا^۸ در هند پرداختند. این رودخانه عریض‌ترین رودخانه جهان محسوب می‌شود و عرض آن در برخی مناطق به ۲۲ کیلومتر می‌رسد (Sharma and Ashagrie, 2012). حسین^۹ و همکاران (۲۰۱۳)

MNDWI نامید. این شاخص اصلاح‌شده، به‌نسبت شاخص NDWI، آستانه‌های پایدارتری دارد. شاخص‌های NDWI و MNDWI از نظر محاسباتی ساده‌اند و فقط از اطلاعات دو باند طیفی استفاده می‌کنند. فئیس^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۴) دو نسخه متفاوت از شاخص استخراج خودکار آب ارائه کردند. یکی از این شاخص‌ها با نام AWEI_{no shadow}، مختصر عبارت Automated Water Extraction Index برای تصاویر بدون سایه، و دیگری با نام AWEI_{shadow}، برای تصاویر با سایه مناطق کوهستانی، ساختمان‌ها و ابرها به‌کار می‌رود. این شاخص‌ها به ترتیب از اطلاعات چهار و پنج باند طیفی استفاده می‌کنند. شاخص آب پیشرفته^{۱۱}، با عنوان اختصاری EWI، شاخص دیگری است که در سال ۲۰۱۵ از سوی وانگ^{۱۲} و همکاران ارائه شد. این شاخص از اطلاعات چهار باند طیفی استفاده می‌کند و قابلیت تخمین درصدی از پیکسل را دارد که به‌وسیله آب اشغال شده است. فیشر^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از اطلاعات طیفی پنج باند ماهواره لندست، شاخص آبی با نام WI₂₀₁₅، مختصر Water Index، برای جداسازی آب‌های سطحی از دیگر عوارض موجود در تصاویر ماهواره‌ای ارائه دادند.

در همه شاخص‌های مورد اشاره پیکسل‌های مربوط به آب با استفاده از الگوریتم‌های آستانه‌گذاری از دیگر پیکسل‌ها متمایز می‌شوند. درواقع وجه تمایز و برتری شاخص‌های متفاوت در پایداری آستانه‌ها برای تفکیک پدیده مورد نظر در مناطق و زمان‌های گوناگون است. هرچه این آستانه‌ها پایدارتر باشند، استفاده از شاخص شمول بیشتری می‌یابد و قابلیت کشف تغییرات افزایش پیدا می‌کند. درواقع اهمیت مطالعات کشف تغییرات و افزایش دقت چنین مطالعاتی به پایداری آستانه‌ها در شاخص مورد استفاده وابسته است. استفاده از اطلاعات بازتابندگی سطحی^{۱۴} تصاویر به‌جای ارزش‌های رقومی ممکن است آستانه‌های پایدارتری با قابلیت استفاده در مقیاس‌های وسیع برای شاخص‌های مورد استفاده ارائه دهد (Fisher et al., 2016).

- | | |
|------------------------|-------------------------|
| 1. Feyisa | 2. Enhanced Water Index |
| 3. Wang | 4. Fisher |
| 5. surface reflectance | 6. Chu |
| 7. Kummu | 8. Vientiane-Nong Khai |
| 9. Mekong | 10. Baki and Gan |
| 11. Jamuna | 12. Sarkar |
| 13. Brahmaputra | 14. Hossain |

آب تا حد زیادی از ویژگی بستر رودخانه متأثر می‌شود (Lillesand et al., 2014). با توجه به اینکه شاخص و آستانه بهینه نیز در پی تأثیر پوشش‌های مجاور تغییر خواهند کرد، کسب شناخت کافی از شاخص‌های آب و یافتن شاخصی با پایدارترین آستانه چه‌بسا نخستین و مهم‌ترین مرحله کشف تغییرات ریخت‌شناسی در این رودخانه‌ها باشد. بنابراین، در این پژوهش در نظر داریم تغییرات مورفولوژی رودخانه‌های کم‌عمق و کم‌عرض (عرض کمتر از ۶ متر) را، با استفاده از مهم‌ترین کاربردی‌ترین شاخص‌های آب، به‌منظور شناخت آستانه بهینه و صحیح‌ترین شاخص برای مطالعات کشف تغییرات ریخت‌شناسی چنین رودخانه‌هایی بررسی کنیم. شناخت رفتار طیفی رودخانه ممکن است باعث سهولت استخراج خودکار این پدیده از تصاویر چندزمانه شود و داده‌هایی در مقیاس مورد نیاز برای سهولت تصمیم‌گیری در مهندسی رودخانه فراهم آورد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

رودخانه آرمنند، با متوسط آبدهی سالیانه حدود ۹۵ مترمکعب بر ثانیه، یکی از رودخانه‌های مهم استان چهارمحال و بختیاری به‌شمار می‌آید که در محل روستای معدن، از به‌هم پیوستن دو رودخانه بهشت‌آباد و کره‌بس تشکیل شده است و تا سد کارون ۴ ادامه می‌یابد. حوضه آبریز این رودخانه، با سطحی بالغ بر ۹۰۶۲ کیلومترمربع، بیش از ۵۰٪ استان چهارمحال و بختیاری را شامل می‌شود. در این مطالعه قسمتی از این رودخانه به طول ۳۱ کیلومتر، در حدفاصل روستای معدن تا مخزن سد کارون ۴ بررسی شد. این منطقه بین طول‌های جغرافیایی $50^{\circ}41'54''$ تا $50^{\circ}52'46''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $31^{\circ}38'11''$ تا $31^{\circ}43'2''$ شمالی قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

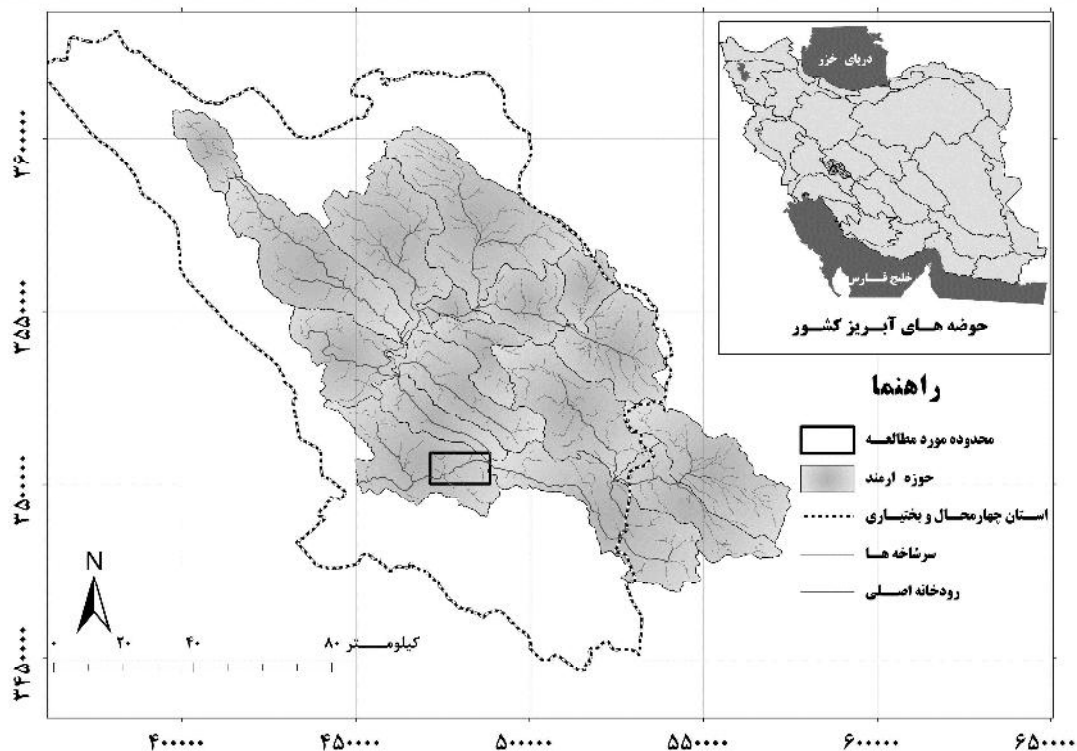
تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه گنگ^۱ در کشور بنگلادش را، با استفاده از تصاویر سنجنده LISS-III ماهواره IRS و سنجنده‌های MSS و TM ماهواره لندست بررسی کردند. عرض این رودخانه در برخی مناطق به ۷ تا ۸ کیلومتر نیز می‌رسد. در این مطالعه نیز تفسیر چشمی تصاویر مبنای استخراج مرز رودخانه بوده است. تاکور^۲ (۲۰۱۴) مخاطرات ناشی از فرسایش رودخانه گنگ را، از فراکا براج^۳ تا راج‌محل^۴، بررسی کرد. روش استخراج مرز رودخانه در این مطالعه استفاده از طبقه‌بندی نظارت‌شده و نظارت‌نشده برای استخراج نقشه کاربری و پوشش اراضی از تصاویر سنجنده LISS-III ماهواره IRS و سنجنده‌های MSS و TM ماهواره لندست بوده است.

در بیشتر این مطالعات آشکارسازی تغییرات ریخت‌شناسی بررسی شده و به روش‌های پردازش تصویر کمتر توجه شده است. در واقع تحقیق چیانگ^۵ و همکاران (۲۰۱۴) برای یافتن روش بهینه استخراج خودکار آب‌های سطحی با تأکید بر رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، با استفاده از شاخص‌های آب و روش‌های آشکارسازی لبه، مرتبط‌ترین مطالعه محسوب می‌شود. در این مطالعه، آستانه بهینه چهار شاخص AWEI_{shadow}، MNDWI، NDWI و AWEI_{no shadow} مطالعه شد. مطالعات این محققان نشان داد انتخاب آستانه بهینه تا حد زیادی به نوع پدیده آبی مورد بررسی وابسته است؛ عمق، شفافیت، گستردگی و دیگر ویژگی‌های آب امکان دارد شاخص کاربردی و آستانه‌های بهینه را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار دهند. رودخانه‌های مورد بررسی در این مطالعه ساهه^۶، هینایه^۷، بائوخه^۸، لیوئه^۹ و لوانه^{۱۰} در کشور چین بوده‌اند که در کم‌عرض‌ترین مناطق در حدود ۶۰ تا ۹۰ متر، معادل ۲ تا ۳ پیکسل لندست^۷، پهنای دارند.

همان‌طور که مشخص است، بیشتر مطالعات در مورد رودخانه‌های بزرگ با عمق زیاد صورت گرفته و تحقیقات کمتری در زمینه رودخانه‌های کم‌عمق و کم‌عرض انجام شده است. در رودخانه‌های کم‌عمق و کم‌عرض، با پهنای برابر و یا کمتر از یک پیکسل ۳۰ متری لندست، امکان اختلاط داده‌های طیفی عوارض همسایه به شدت افزایش می‌یابد و ویژگی‌های بازتابی

1. Ganga
3. Farakka Barrage
5. Jiang
7. Heihe
9. Liuhe

2. Thakur
4. Rajmahal
6. Sahe
8. Baohe
10. Luanhe



شکل ۱. نمایی از منطقه مورد مطالعه

۲-۲- داده‌ها

همه تصاویر ماهواره لندست که در این مطالعه به کار رفته‌اند، از نوع بازتابندگی سطحی و مربوط به دو سنجنده OLI و ETM+ هستند که از تارنمای سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۱، به صورت چشم‌اندازهایی با سطح پردازشی دانلود شده‌اند. بازتابندگی سطحی کسری از تابش خورشیدی است که از سطح زمین منعکس می‌شود. بازتابندگی سطحی با اصلاح آثار اتمسفری به وسیله سنجنده‌های ماهواره‌ای از سطح زمین دریافت می‌شود. داده‌های بازتابندگی سطحی پایه‌ای‌ترین پارامتر سطحی در محدوده طول موج‌های انعکاسی خورشید (برای نمونه، رنگی و فرسرخ) به شمار می‌روند که ورودی ابتدایی لازم را برای ساخت دیگر پارامترهای

به‌رغم اهمیت و آبدهی قابل توجه، رودخانه ارمند عرض و عمقی محدود (در بسیاری مناطق کمتر از ۴ متر) دارد و مورد انتخابی مناسبی در جهت تأمین اهداف این پژوهش است. منطقه مورد مطالعه در مرکز فریم لندست، با شماره گذر ۱۶۴ و ردیف ۳۸ قرار می‌گیرد. این مزیت باعث می‌شود گپ‌های ناشی از خاموش شدن اصلاح‌کننده خطوط اسکن در تصاویر ماهواره لندست ۷ که بعد از سال ۲۰۰۳ ایجاد شده است، در این بخش تصویر وجود نداشته باشد. به‌رغم عمق محدود تنوع پوشش اراضی با بیشترین احتمال اختلاط با طبقه آب شامل بیرون‌زدگی‌های سنگی، مناطق مسکونی، سایه‌های توپوگرافی، اراضی کشاورزی، به‌ویژه شالیزارها و جنگل‌های بلوط، در همین گستره محدود، امکان بررسی دقیق رخداد خطا در طبقه‌بندی پیکسل‌های آب را فراهم می‌آورد.

1. <http://earthexplorer.usgs.gov>

فروسرخ نزدیک و فروسرخ میانی در سنجنده‌های لندست سری ۷ و ۸ تفاوت‌هایی وجود دارد (Barsi et al., 2014; Markham and Helder, 2012; Teillet et al., 2001). در واقع علت استفاده از اطلاعات دو سنجنده، با فاصله زمانی هشت روز، بررسی میزان تأثیر این اختلاف در شاخص‌های آب است. افزون‌براین، نقشه‌های پوششی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه، تهیه شده به‌وسیله سازمان نقشه‌برداری کشور، برای اطمینان از زمین مرجع‌سازی دقیق و رجیستری متعاقب تصاویر در این مطالعه به‌کار رفته‌اند.

۲-۳- روش مطالعه

روش‌شناسی این مطالعه در چهار مرحله خلاصه می‌شود: ۱. انجام دادن عملیات پیش‌پردازشی روی تصاویر سنجنده‌های ETM+ و OLI؛ ۲. محاسبه شاخص‌های آب؛ ۳. انتخاب داده‌های با قدرت تفکیک مکانی زیاد برای اعتبارسنجی شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره لندست؛ ۴. اعتبارسنجی شاخص‌های مستخرج از تصاویر سنجنده‌های ETM+ و OLI با استفاده از نمودار Receiver Operator Characteristic یا به‌اختصار ROC.

۲-۴- پیش‌پردازش تصاویر

داده‌های بازتابندگی درست‌ترین داده‌ها را در ارتباط با ویژگی‌های سطحی زمین به‌دست می‌دهند. داده‌های بازتابندگی ماهواره لندست با کمک داده‌های بازتابندگی سنجنده MODIS تهیه می‌شوند. این داده‌ها منبعی جدید، کالیبره‌شده و سازگارند که امکان محاسبه مستقیم شاخص‌های آب را فراهم می‌آورند (Feng et al., 2013). افزون‌براین، فیشر و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه خود به قابلیت داده‌های بازتابندگی سطحی، در تفکیک آب از دیگر پوشش‌های اراضی، اشاره داشته‌اند. در مورد میزان دقت هندسی تصاویر لندست که در این مطالعه به‌کار رفته نیز، اگرچه سازمان فضایی امریکا تصحیحات هندسی با دقتی مطلوب‌تر از ۰/۴ پیکسل را

ژئوفیزیکی، مانند انواع شاخص‌ها، آلبیدو، شاخص سطح برگ و مانند آن فراهم می‌آورند. این داده‌ها براساس معماری نرم‌افزار MODIS Adaptive Processing System یا، به‌اختصار، MODAPS به‌وسیله Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive System Processing (LEDAPS)، با تصحیح اتمسفری داده‌های لندست ساخته می‌شوند (Feng et al., 2013).

همه تصاویر مورد استفاده در این مطالعه فاقد ابرند و انطباق زمان برداشت تصاویر با فصل خشک منطقه باعث می‌شود دست‌کم میزان گل‌آلودگی در مقاطع گوناگون رودخانه مورد انتظار باشد. نقشه واقعیت زمینی برای اعتبارسنجی خروجی‌های حاصل با کمک تصاویر گوگل ارث ساخته شد. اگرچه استفاده از تصاویر گوگل ارث به‌منزله واقعیت زمینی مرسوم نیست و معمولاً از داده‌های تجاری برای تهیه نقشه واقعیت زمینی استفاده می‌شود، هزینه زیاد و محدودیت دسترسی به داده‌های ابرمکانی باعث می‌شود در برخی موارد از تصاویر گوگل ارث همچون داده مرجع استفاده شود. فیسیسا و همکاران (۲۰۱۴)، و چیانگ و همکاران (۲۰۱۴) نیز از تصاویر گوگل ارث به‌منزله مرجع صحت‌سنجی در مطالعات خود استفاده کرده‌اند. با توجه به تاریخ تصویربرداری مندرج در نرم‌افزار گوگل ارث، آخرین تصویر اخذشده از منطقه به ۱۸ اوت ۲۰۱۳ مربوط می‌شود. به‌منظور افزایش قابلیت مقایسه، از تصاویر آرشیوی USGS ماهواره لندست مربوط به نزدیک‌ترین زمان به این تاریخ استفاده شد. تصویر سنجنده OLI مربوط به تاریخ ۱۵ اوت ۲۰۱۳ و سنجنده ETM+ مربوط به تاریخ ۲۳ اوت ۲۰۱۳ در این مطالعه تحلیل شده است. استفاده از اطلاعات بازتابندگی سطحی باعث می‌شود امکان مقایسه مستقیم داده‌های سنجنده‌های گوناگون لندست فراهم شود و هنگام استفاده از مدل‌ها، اختلاف جزئی بین توابع پاسخ‌های طیفی این سنجنده‌ها تشدید خواهد شد (Flood, 2014). بین محدوده طیفی باندهایی که برای تهیه شاخص‌های آب به‌کار می‌روند، یعنی باندهای

استفاده شد که دارای محتوای آب بیش از ۵۰٪ بوده‌اند. در واقع کم بودن عرض رودخانه باعث می‌شود پیکسل‌های خالص آب به‌صورت بسیار محدود در نواحی عریض‌تر رودخانه دیده شوند و انتخاب این پیکسل‌ها نمی‌تواند ویژگی‌های طیفی رودخانه را بیان کند. در این پژوهش، با استناد به مطالعه فیشر و همکاران (۲۰۱۶) پیکسل‌های محیط آبی را پیکسل‌هایی با محتوای بیش از ۵۰٪ آب در نظر گرفتیم. شکل ۲ خلاصه‌ای از خصوصیات طیفی، شامل میانگین و انحراف معیار پدیده‌های گوناگون را برای باندهای شماره ۱ تا هفت سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، به‌طور کلی میزان تفکیک‌پذیری پوشش‌های گوناگون برای باندهای ۱ تا ۳ سنجنده OLI محدودتر از دیگر باندهاست، اما انتظار می‌رود سه پوشش شامل دشت سیلابی، رخنمون‌های سنگی و مناطق شهری با احتمال بیشتری از دیگر پدیده‌ها تفکیک شوند. در مورد باند ۴ این سنجنده نیز احتمال اختلاط طیفی پیکسل‌های رودخانه با پیکسل‌های دیگر، به‌جز جنگل با تاج پوشش متوسط، اندکی بهبود یافته است. در بین باندهای متفاوت سنجنده، باند ۵ را می‌شود باند بهینه برای تفکیک پیکسل‌های رودخانه از دیگر پیکسل‌ها برشمرد، اما انحراف معیار زیاد عامل کاهش کارایی این باند به‌شمار می‌آید. در مورد باندهای ۶ و ۷ نیز، سیر نزولی در امکان تفکیک پوشش رودخانه از دیگر پوشش‌ها دیده می‌شود و انحراف معیار نیز افزایش چشمگیری داشته است.

۲-۶- محاسبه شاخص‌های آب

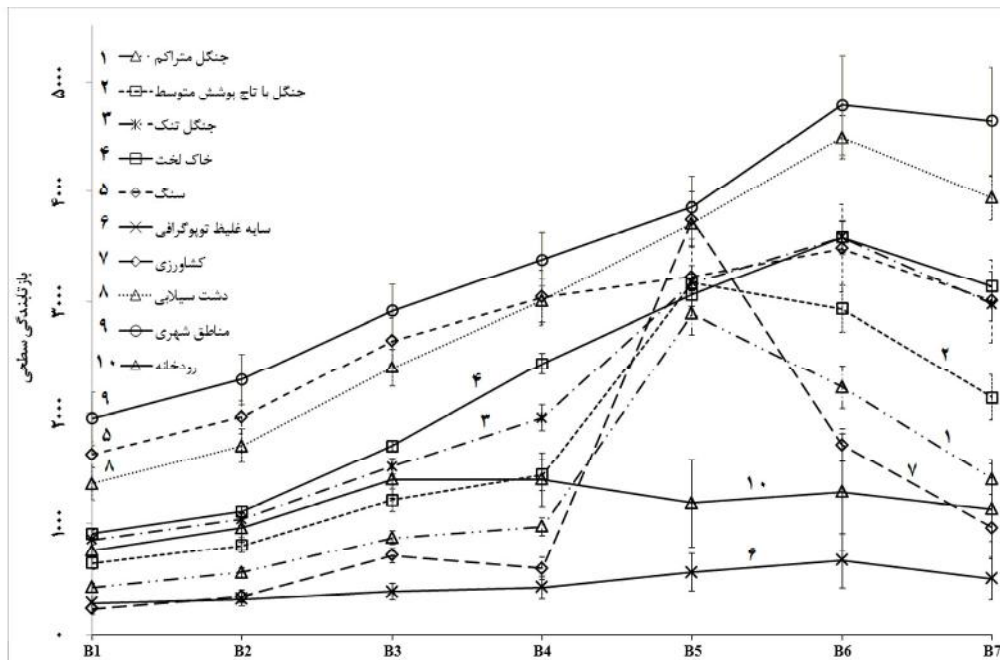
همه شاخص‌های آب در این مطالعه با استفاده از اطلاعات بازتابندگی سطحی (p) و اطلاعات طیفی معادل باندهای ۱ (b_1) تا ۷ (b_7) لندست ۷ محاسبه شد که معادلات آن در جدول ۱ مشاهده می‌شود. مقدار شاخص NDWI محدوده‌ای از ۱ تا -۱ می‌پذیرد و

برای آرشیو موجود تضمین کرده (NSAS, 2006) و این دقت برای بیشتر مطالعات کافی است، توجه به هدف مطالعه، یعنی بررسی رودخانه‌هایی با عرضی حدود ۳۰ متر، ضرورت اطمینان از دقت زمین‌مرجع‌سازی تصاویر را روشن می‌کند. منظور از تصحیح هندسی تصاویر کاهش خطاهای هندسی تصاویر ماهواره‌ای است. برای کاهش خطاهای موجود و همچنین، تبدیل مختصات از سیستم تصویربرداری به سیستم زمینی، در این مطالعه از معادله‌های چندجمله‌ای استفاده شد. از بین روش‌های درونیایی، فقط دو روش نزدیک‌ترین همسایه و پیچیدگی مکعبی برای بررسی صحت اطلاعات طیفی در مقیاس خرد پیکسل تصاویر بررسی شد. استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایه به تغییر مکان پیکسل‌ها منجر می‌شود و استفاده از آن برای چنین مطالعاتی که مقیاسی کوچک‌تر از هر پیکسل لندست در نظر گرفته می‌شود، صحیح نیست (Pardo-Pascual et al., 2012). در این مطالعه از روش بازنمونه‌برداری پیچیدگی مکعبی برای حفظ قابلیت‌های طیفی پیکسل‌ها استفاده شد. مزیت این روش درونیایی ایجاد خروجی نرم بدون حذف جزئیات فرکانس‌های بالاست (همراه، ۱۳۹۱). با توجه به اندازه پیکسل تصاویر ماهواره لندست، نقشه‌های پوششی کشور، تهیه‌شده در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، مبنای بررسی دقت هندسی تصاویر و جمع‌آوری نقاط کنترل زمینی به‌کاررفته در این مطالعه به‌شمار می‌روند.

۲-۵- نمایش پروفیل طیفی

برای تشریح اختلاف طیفی بین رودخانه و دیگر پوشش‌ها شامل جنگل‌های بلوط با تراکم متفاوت، خاک لخت، بیرون‌زدگی سنگی، سایه‌های توپوگرافی، مناطق شهری، اراضی کشاورزی و دشت‌های سیلابی از اطلاعات طیفی ۵۵۰ نمونه در محدوده مورد مطالعه استفاده شد. در انتخاب نمونه‌های گوناگون برای هر دسته سعی شد خالص‌ترین نمونه‌ها به‌کار روند، اما در انتخاب نمونه‌های پوشش رودخانه، از پیکسل‌هایی

مقایسه شاخص‌های آب به‌منظور تفکیک خودکار رودخانه‌های کم‌عرض و کم‌عمق در تصاویر لندست



شکل ۲. میانگین و انحراف معیار بازتابندگی سطحی پوشش‌های گوناگون اراضی برای باندهای ۱ تا ۷ سنجنده OLI

سطحی امکان استخراج آستانه‌های پایدار را در مقیاس جهانی فراهم می‌کند. همه شاخص‌ها در محیط نرم‌افزار ENVI4.8 از تصاویر استخراج شدند.

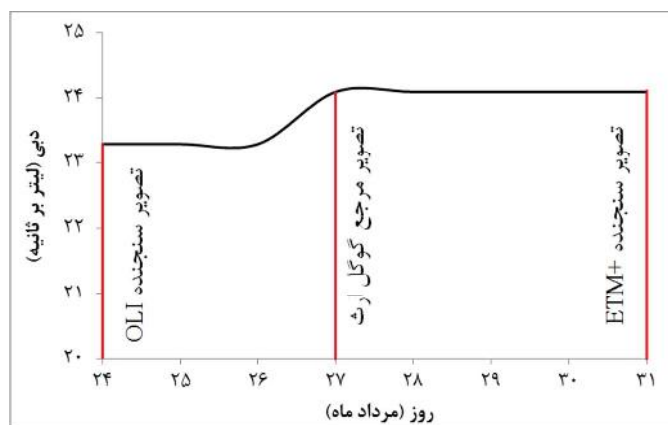
۲-۷- اعتبارسنجی داده‌ها

برای بررسی و اعتبارسنجی میزان دقت شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش از آخرین تصاویر به‌روزشده مربوط به منطقه مورد مطالعه در گوگل ارث، در اوت ۲۰۱۳ استفاده شد. با توجه به اینکه نقشه واقعی زمینی از این تصاویر استخراج شده است، انتخاب تصاویر ماهواره لندست باید در نزدیک‌ترین تاریخ به این زمان صورت گیرد. بررسی داده‌های دبی رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری رودخانه ارمند نشان می‌دهد در فاصله زمانی بین برداشت تصاویر مرجع گوگل ارث و تصاویر ماهواره لندست، دبی رودخانه تغییر چشمگیری نداشته است و فرض بر این است که شرایط رودخانه از لحاظ عمق، سرعت و وضعیت بستر نیز در پایدارترین حالت ممکن باشد. شکل ۳ روند تغییرات دبی رودخانه را در فاصله زمانی دریافت تصاویر گوگل ارث و لندست نشان می‌دهد.

متناسب با افزایش میزان این شاخص، محتوای آب افزایش می‌یابد (McFeeters, 1996). شاخص MNDWI نیز با جایگزینی باند فرورسرخ میانی به جای باند فرورسرخ نزدیک در فرمول محاسبه شاخص NDWI تعریف می‌شود (جدول ۱) و قابلیت بیشتری برای تفکیک آب در برخی مناطق شهری دارد (Xu, 2006). شاخص‌های استخراج خودکار آب شامل $AWEI_{no\ shadow}$ و $AWEI_{shadow}$ نیز از اطلاعات طیفی ۴ و ۵ باند طیفی استفاده می‌کنند (جدول ۱) و برای حداکثرسازی قابلیت تفکیک آب از دیگر پدیده‌ها توسعه یافته‌اند (Feyisa et al., 2014). شاخص EWI استخراج آب در سطح خرد پیکسل است، به این صورت که رابطه‌ای خطی بین میزان آب موجود در هر پیکسل و میزان این شاخص دیده می‌شود (Wang et al., 2015). شاخص WI_{2015} نیز با استفاده از اطلاعات بازتابندگی سطحی تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سنجنده‌های TM و ETM+ از سوی فیشر و همکاران (۲۰۱۶) پیشنهاد داده شد. اگرچه ضرایب ثابت این شاخص به‌صورت تجربی برای مناطقی از قاره استرالیا به‌دست آمده‌اند (جدول ۱)، طبق ادعای محققان، استفاده از اطلاعات بازتابندگی

جدول ۱. شاخص‌های آب مورد استفاده در این مطالعه

ردیف	شاخص	مرجع	معادله
۱	NDWI	McFeeters, 1996	$(\rho_{b2}-\rho_{b4})/(\rho_{b2}+\rho_{b4})$
۲	MNDWI	Xu, 2006	$(\rho_{b2}-\rho_{b5})/(\rho_{b2}+\rho_{b5})$
۳	AWEI _{no shadow}	Feyisa et al., 2014	$4 \times (\rho_{b2}-\rho_{b5}) - (0.25 \times \rho_{b4} + 2.75 \times \rho_{b5})$
۴	AWEI _{shadow}	Feyisa et al., 2014	$\rho_{b1} + 2.5 \times \rho_{b2} - 1.5 \times (\rho_{b4} + \rho_{b5}) - 0.25 \times \rho_{b7}$
۵	EWI	Wang et al., 2015	$(\rho_{b3} - \rho_{b5} + 0.1) / [(\rho_{b3} + \rho_{b5}) \times (((\rho_{b3}-\rho_{b4})/(\rho_{b3}+\rho_{b4})) + 0.5)]$
۶	WI ₂₀₁₅	Fisher et al., 2016	$1.7204 + 171\rho_{b2} + 3\rho_{b3} - 70\rho_{b4} - 45\rho_{b5} - 71\rho_{b7}$

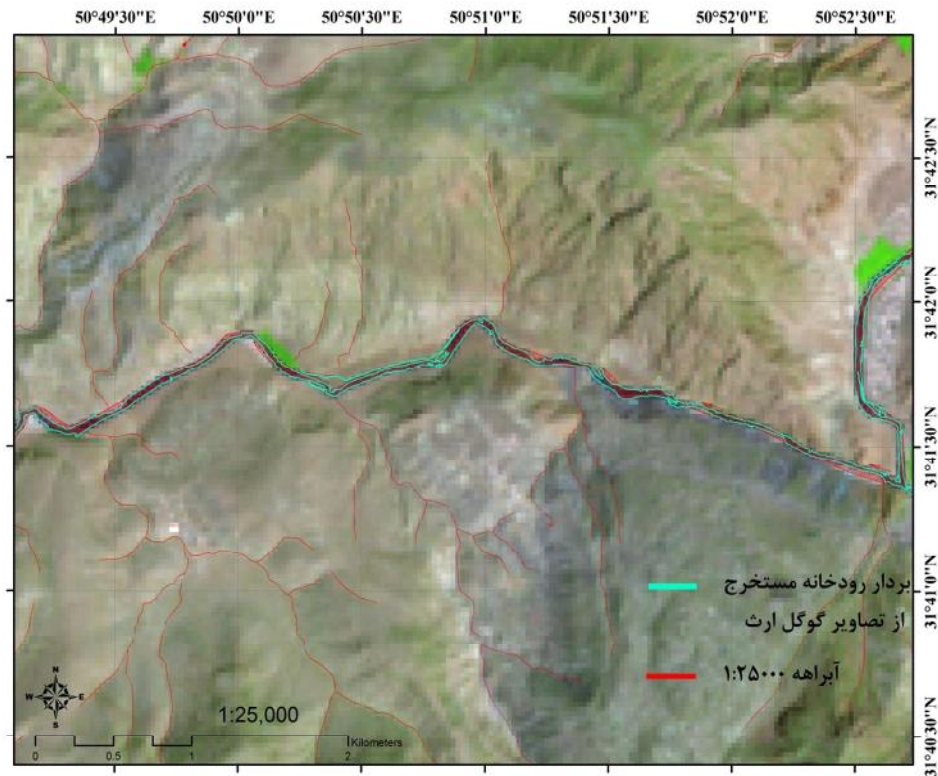


شکل ۳. روند تغییرات دبی در فاصله‌ی زمان برداشت تصاویر گوگل ارث و لندست در ایستگاه هیدرومتری ارمند (زمان برداشت تصویر هریک از تصاویر مورد استفاده در این شکل با خط قرمز نشان داده شده است)

۱:۲۵۰۰۰ و تصاویر گوگل ارث مربوط به تغییرات کناره رودخانه در فاصله‌ی زمانی شانزده‌ساله، بین زمان تهیه نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ و برداشت تصاویر گوگل ارث مربوط می‌شود.

پس از اطمینان از دقت هندسی تصاویر، مرز رودخانه به صورت دستی و با فرمت برداری از تصاویر گوگل ارث استخراج شد. از آنجا که عارضه‌ی آبی دیگری در حدود مورد مطالعه وجود نداشت، پس از استخراج مرز رودخانه، کل منطقه مورد مطالعه با استفاده از عملگر اختلاف متقارن در محیط نرم‌افزار ArcMap 9.3 به لایه‌ی پلی‌گونی با دو کلاس آب و غیرآب تقسیم شد. این لایه‌ی پلی‌گونی برای تهیه نقشه واقعی زمینی به فرمت رستر، با اندازه‌ی پیکسل ۳۰ متری تبدیل شد. نقشه‌ی رستری، با دو کلاس رودخانه و غیررودخانه، واقعیت زمینی این مطالعه را تشکیل می‌دهد.

با توجه به اینکه اطمینان از بیشترین تطابق هندسی تصاویر مینا و تصاویر گوگل ارث شرط لازم برای بررسی صحت نقشه‌های خروجی است، نقشه‌های پوششی منطقه در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ مبنای بررسی صحت زمین‌مرجع‌سازی تصاویر گوگل ارث قرار گرفت. نتایج بررسی انطباق نقشه‌ها و تصاویر گوگل ارث، پس از زمین‌مرجع‌سازی دقیق نشان داد بین مکان قرارگیری عوارض ثابت مانند خط‌القعرها، ساختمان‌های منفرد و تقاطع جاده‌ها در نقشه‌های مرجع زمینی و تصاویر گوگل ارث اختلافی وجود ندارد. میزان RMSE برای زمین‌مرجع‌سازی این تصاویر معادل ۲ متر گزارش شد که برای این مطالعه کافی است. شکل ۴ نمایی از انطباق آبراهه‌های مستخرج از نقشه‌های پوششی ۱:۲۵۰۰۰ و رودخانه‌ی مستخرج از تصاویر گوگل ارث را نشان می‌دهد. اختلاف بین مرز رودخانه در نقشه‌های



شکل ۴. انطباق رودخانه برداری مستخرج از تصاویر گوگل ارث با نقشه آبراهه ۱:۲۵۰۰۰ و تصویر رنگی کاذب (SWIR-NIR-RED) ماهواره لندست

دیگر، محاسبه نسبت سطح زیر هر منحنی برای هر آستانه به کل سطح زیر منحنی نشان‌دهنده خلاصه آماری از صحت هر شاخص است، به این صورت که شاخص کامل سطحی معادل ۱ و شاخص تصادفی سطحی معادل ۰/۵ خواهد داشت (Fawcett, 2006). آستانه بهینه کمترین میزان خطای ترکیبی^۳ با فرمول $TPR + FPR - 100$ را خواهد داشت. افزون‌بر خطای ترکیبی، صحت کلی که معادل پیکسل‌های به‌درستی طبقه‌بندی شده و نشده، به‌صورت درصدی از کل پیکسل‌های مورد بررسی است، و صحت کاربر که معادل پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده آب، به‌صورت درصدی از پیکسل‌های آب طبقه‌بندی شده است نیز، به‌منزله آماره‌های صحت‌سنجی آستانه بهینه محاسبه خواهند شد.

1. True Positive Rate
2. False Positive Rate
3. combined error

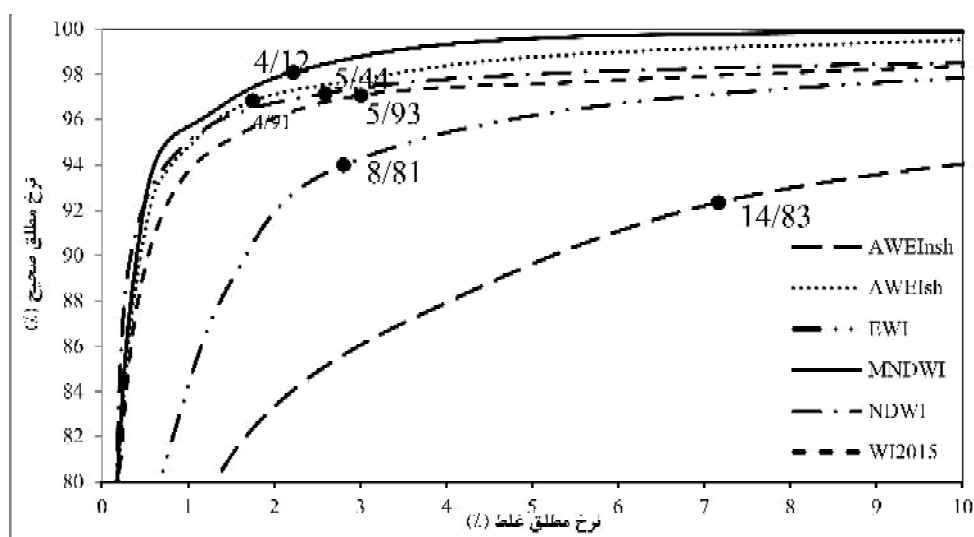
۲-۸- مقایسه شاخص‌های متفاوت با استفاده از نمودار ROC

استفاده از منحنی ROC یکی از روش‌های مناسب برای ارزیابی نتایج روش الگوریتم آستانه‌گیری و ارزیابی قابلیت آستانه‌های گوناگون در تفکیک پدیده مورد نظر است. درواقع این منحنی رابطه بین سلول‌هایی را نشان می‌دهد که به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند و نیز سلول‌هایی که به‌اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند. اگر نرخ سلول‌هایی که به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند (TPR)، روی محور عرضی و نرخ سلول‌هایی که به‌درستی طبقه‌بندی نشده‌اند (FPR) روی محور طولی قرار گیرد، آستانه بهینه نقطه‌ای است که بیش از دیگر نقاط به سمت چپ و بالای نمودار منحرف شده باشد. درواقع در این نقطه بیشترین میزان نرخ طبقه‌بندی صحیح و کمترین نرخ طبقه‌بندی نادرست دیده می‌شود. از سوی

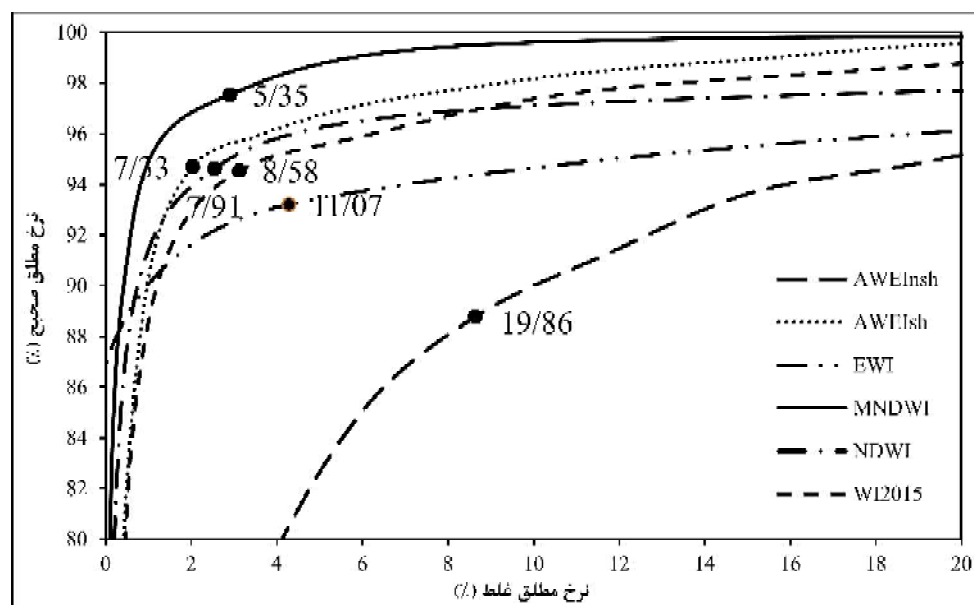
۳- نتایج و بحث

نتایج این مطالعه تفاوت کارایی و آستانه شاخص‌ها را در تفکیک پیکسل‌های مربوط به رودخانه نشان می‌دهد. در واقع تفاوت در منحنی‌های ROC این اختلاف‌ها را نمایان می‌کند. شکل‌های ۵ و ۶، به ترتیب، منحنی‌های ROC شاخص‌های گوناگون سنجنده‌های

ETM+ و OLI را نشان می‌دهند. شایان ذکر است نقاط مشخص شده روی این نمودارها آستانه بهینه و اعداد پیوسته شده به هر نقطه بیانگر خطای ترکیبی این آستانه‌اند. همچنین، برای افزایش قابلیت و سهولت مقایسه و صحت‌سنجی شاخص‌ها، خلاصه‌ای از آماره‌های مورد نیاز نیز در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۵. صحت طبقه‌بندی پیکسل‌های مربوط به رودخانه برای آستانه‌های گوناگون، با استفاده از نمودار ROC داده‌های سنجنده ETM+



شکل ۶. صحت طبقه‌بندی پیکسل‌های مربوط به رودخانه برای آستانه‌های گوناگون، با استفاده از نمودار ROC داده‌های سنجنده OLI

مقایسه شاخص‌های آب به منظور تفکیک خودکار رودخانه‌های کم‌عرض و کم‌عمق در تصاویر لندست

جدول ۲. نتایج آماری صحت‌سنجی طبقه‌بندی آب با استفاده از شاخص‌های گوناگون دو سنجنده ETM+ و OLI. به‌غیر از داده‌های آستانه بهینه، دیگر اعداد به درصد گزارش شده‌اند

سنجنده	پارامتر	تعداد پیکسل‌ها	AWEI _{no shadow}	AWEI _{shadow}	EWI	MNDWI	NDWI	WI ₂₀₁₅
ETM+	سطح زیر نمودار ROC	۱۶۴۱۰۵	۹۳/۸۷	۹۸/۴۸	۹۷/۶۸	۹۷/۸۳	۹۷/۴۹	۹۷/۲۴
	آستانه بهینه شاخص	۱۶۴۱۰۵	-۱۲۰۲۴/۳۸	-۳۶۰۹/۵	-۰/۴۵	-۰/۳۱	-۰/۲۵	-۲۱۰۵۰/۱/۴۶
	خطای ترکیبی	۱۶۴۱۰۵	۱۴/۸۳	۴/۹۱	۸/۸۱	۴/۱۲	۵/۴۴	۵/۹۳
	صحت تولیدکننده طبقه آب	۱۶۴۱۰۵	۹/۰۴	۲۹/۹۳	۲۰/۵۵	۲۵/۴۱	۲۲/۴۳	۱۹/۹۴
	صحت کاربر طبقه آب	۱۶۴۱۰۵	۹۲/۳۴	۹۶/۸۴	۹۴	۹۸/۱	۹۷/۱۶	۹۷/۰۸
	خطای omission	۱۲۶۶	۷/۶۶	۳/۱۶	۶	۱/۹	۲/۸۴	۲/۹۲
	خطای commission	۱۶۲۸۳۹	۷/۲۲	۱/۷۶	۲/۸۳	۲/۲۴	۲/۶۱	۳/۰۳
OLI	سطح زیر نمودار ROC	۱۶۵۲۸۸	۹۰/۳۶	۹۸/۲۳	۹۶/۵۷	۹۷/۲۶	۹۷/۶۶	۹۴/۶۲
	آستانه بهینه شاخص	۱۶۵۲۸۸	-۱۱۲۲۹/۵	-۳۴۷۴/۱۳	-۰/۴۹	-۰/۳۲	-۰/۲۷	-۱۹۱۶۰۰/۴۱
	خطای ترکیبی	۱۶۵۲۸۸	۱۹/۸۶	۷/۳۳	۱۱/۰۷	۵/۳۵	۷/۹۱	۸/۵۸
	صحت تولیدکننده طبقه آب	۱۶۵۲۸۸	۷/۳۵	۲۶/۴۳	۱۴/۳۹	۲۰/۱۶	۲۲/۳۲	۱۸/۹۲
	صحت کاربر طبقه آب	۱۶۵۲۸۸	۸۸/۷۸	۹۴/۷۱	۹۳/۲۱	۹۷/۵۵	۹۴/۶۳	۹۴/۵۵
	خطای omission	۱۲۶۶	۱۱/۲۲	۵/۲۹	۶/۷۹	۲/۴۵	۵/۳۷	۵/۴۵
	خطای commission	۱۶۴۰۲۲	۸/۶۴	۲/۰۳	۴/۲۸	۲/۹	۲/۵۴	۳/۱۳

باید در محدوده طیفی باندهای فرورسرخ این ماهواره جستجو کرد. محدوده طیفی فرورسرخ نزدیک معادل باند ۴ برای سنجنده ETM+ از ۰/۷۷ تا ۰/۹ میکرون، و محدوده طیفی فرورسرخ میانی برای همین سنجنده از ۱/۵۵ تا ۱/۷۵ میکرون معادل باند ۵، و از ۲/۰۹ تا ۲/۳۵ میکرون معادل باند ۷ است، درحالی‌که محدوده طیفی همین باندها برای سنجنده OLI، به ترتیب، به ۰/۸۵ تا ۰/۸۸ میکرون معادل باند ۵، ۱/۵۷ تا ۱/۶۵ میکرون معادل باند ۶ و ۲/۱۱ تا ۲/۲۹ میکرون برای باند ۷ تغییر یافته است (Roy et al., 2014). در واقع محدوده‌های طیفی سنجنده OLI در تمامی باندهای مورد اشاره بیشتر محدود شده است، درحالی‌که محدوده اصلی تفکیک آب‌های زلال از ۰/۸ میکرون آغاز می‌شود (Richards and Jia, 2006) بنابراین، قابلیت باند ۴ سنجنده ETM+ در تفکیک این پدیده بیش از باند ۵ سنجنده OLI است.

تحلیل نتایج کارایی شاخص‌ها با بررسی نمودارها و ارقام صحت مندرج در جدول ۲ نشان می‌دهد کارایی

اگر در نخستین مرحله شاخص‌های دو سنجنده ETM+ و OLI مقایسه شود، با توجه به اطلاعات جدول ۲ و شکل‌های ۵ و ۶، در کل شباهت بسیاری بین نتایج کاربرد شاخص‌های هر دو سنجنده مورد بررسی دیده می‌شود. اما همه شاخص‌های مستخرج از تصاویر ETM+ به نسبت صحت بیشتری نشان می‌دهند. فیشر و همکاران (۲۰۱۶) نیز در مطالعه خود، به نزدیکی بسیار شاخص‌های مستخرج از دو سنجنده ETM+ و OLI در تفکیک آب‌های سطحی اشاره داشته‌اند. این محققان نیز، در تفکیک پیکسل‌های آب به وسیله شاخص‌های مستخرج از تصاویر لندست ۷، صحت بیشتری گزارش کرده‌اند. این افزایش صحت به محدوده طیفی باندهای لندست بازمی‌گردد و با توجه به نتایج فیشر و همکاران (۲۰۱۶)، انتظار می‌رود به صورت قانونی عمومی برای تمامی مناطق مصداق داشته باشد. با توجه به تغییر نکردن اندازه پیکسل در سنجنده‌های ETM+ و TM، دلیل قابلیت نسبی بیشتر تصاویر ماهواره لندست ۷ در تفکیک آب از دیگر پدیده‌ها را

صحت‌سنجی قابلیت عملکرد خودکار شاخص‌های گوناگون در طبقه‌بندی تصویر کاهش می‌یابد. در هر دو سنجنده بیشترین و کمترین میزان خطای commission، به‌ترتیب، برای شاخص‌های $AWEI_{no\ shadow}$ و $AWEI_{shadow}$ گزارش شده است.

شکل ۷ نتایج حاصل از طبقه‌بندی هر شاخص را، با توجه به آستانه بهینه، در مقایسه با نقشه واقعیته زمینی و ترکیب رنگی کاذب منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این شکل، نقشه واقعیته زمینی منطقه به‌صورت دودویی و در دو طبقه آب و غیرآب ساخته شده است. تصویر بالا سمت راست این نقشه را نشان می‌دهد. دیگر اشکال نقشه‌های حاصل از طبقه‌بندی شاخص‌ها برای تفکیک آب را نشان می‌دهند. در نقشه‌های طبقه‌بندی شاخص‌ها، مناطق مشخص شده با رنگ سفید مناطقی‌اند که پس از طبقه‌بندی در کلاس آب قرار گرفته‌اند و رنگ خاکستری طبقه غیرآب را نشان می‌دهد. گپ‌های سنجنده $ETM+$ با فرایند ماسک‌گیری از محاسبات خارج شده‌اند و محدوده اثر این گپ‌ها به رنگ سیاه دیده می‌شود. نتایج این شکل نیز، در توافق با نتایج حاصل از تحلیل جدول ۲ و منحنی‌های ROC، قابلیت بیشتر دو شاخص $MNDWI$ و $AWEI_{shadow}$ را به‌نسبت دیگر شاخص‌ها برای تفکیک رودخانه‌های کم‌عرض و کم‌عمق نشان می‌دهد.

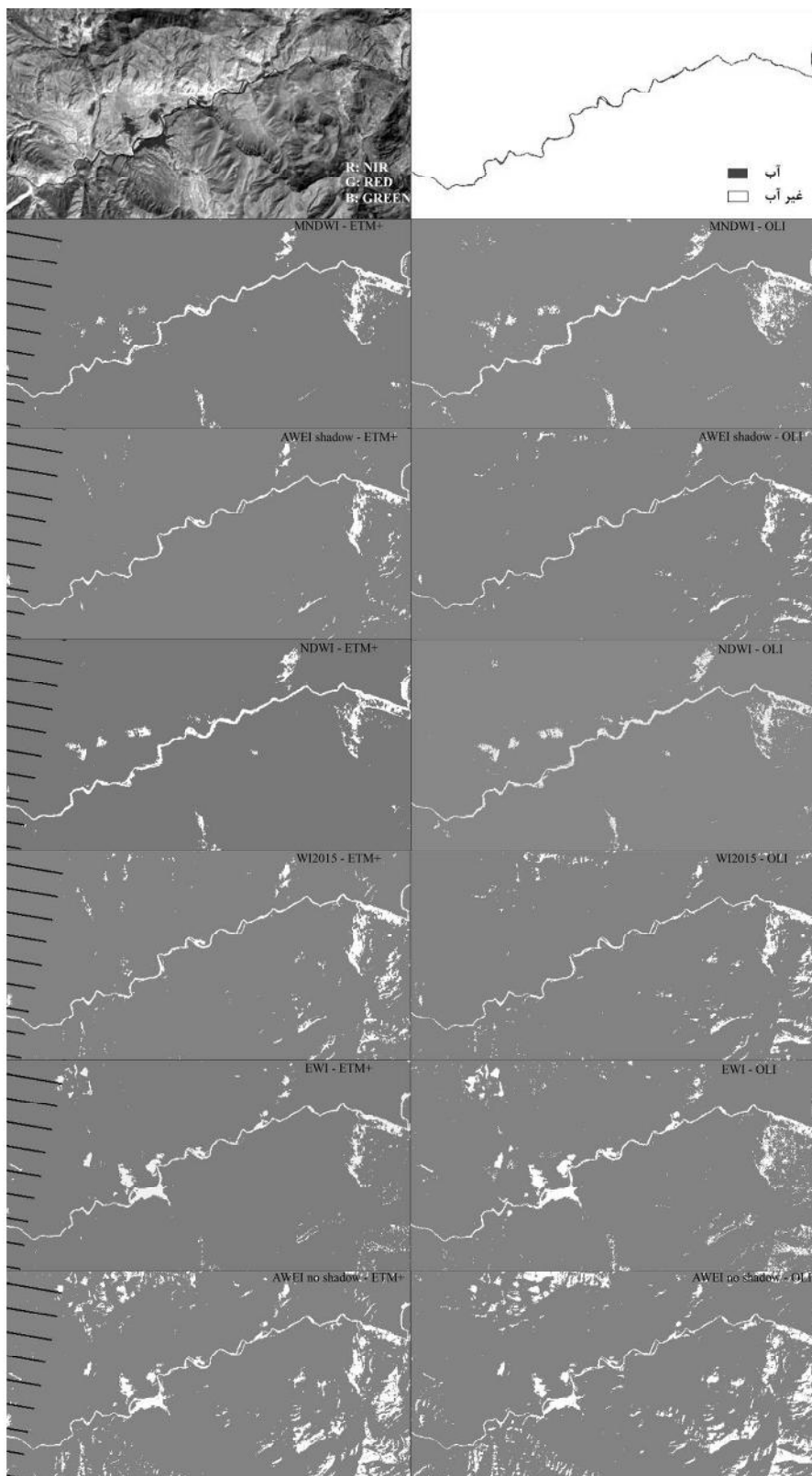
مطالعه فیشور و همکاران (۲۰۱۶) نیز به قابلیت نسبی بیشتر شاخص $AWEI_{shadow}$ در تفکیک آب از دیگر پدیده‌ها اشاره دارد. در نتیجه، این شاخص ممکن است به‌صورت عمومی و در مقیاس‌های متفاوت، برای تفکیک آب‌های سطحی از دیگر پدیده‌ها کاربرد داشته باشد. اشاره به این مسئله که کارایی شاخص‌ها تا حد بسیاری به ویژگی‌های پدیده‌های موجود در منطقه مورد مطالعه وابسته است، اینجا ضروری به‌نظر می‌رسد. از سوی دیگر، شاخص $MNDWI$ نیز در این مطالعه، برای تفکیک رودخانه صحت قابل قبولی دارد. یکی از عمده مزایای این شاخص محاسبات ساده و استفاده از اطلاعات دو باند طیفی سبز و فروسرخ میانی

دو شاخص $MNDWI$ و $AWEI_{shadow}$ در هر دو سنجنده بیش از دیگر شاخص‌های آب بوده است. در واقع نمودار این دو شاخص بیش از شاخص‌های مورد بررسی دیگر به سمت چپ و بالا منحرف شده است. مبنای مقایسه منحنی‌های ROC انحراف به سمت بالا و چپ نمودار است، اما بررسی سطح زیر نمودار، به‌منزله فاکتور دیگر صحت‌سنجی، نشان می‌دهد به‌رغم کسب کمترین مقدار خطای ترکیبی از سوی شاخص $MNDWI$ ، سطح زیر نمودار ROC برای شاخص $AWEI_{shadow}$ بیشتر است. در واقع همین مزیت باعث توازن امتیازهای اکتسابی به‌وسیله این دو شاخص می‌شود. با وجود کسب این امتیازات، نتایج نشان می‌دهند هیچ یک از شاخص‌های مستخرج در هر دو سنجنده صحت تولیدکننده قابل قبولی برای طبقه آب فراهم نکرده‌اند و بیشترین مقدار این صحت به حدود ۳۰٪ برای شاخص $AWEI_{shadow}$ سنجنده $ETM+$ رسیده است. کاهش مقدار این صحت به تعداد زیاد پیکسل‌هایی مربوط می‌شود که به‌اشتباه وارد طبقه آب شده‌اند.

برعکس مقادیر مربوط به صحت تولیدکننده، صحت کاربر، به‌استثنای شاخص $AWEI_{no\ shadow}$ در سنجنده OLI، مقادیر بیش از ۹۰٪ را به خود اختصاص داده است. در این بین، بیشترین میزان صحت کاربر به شاخص $MNDWI$ اختصاص یافته است.

میزان خطای omission، با توجه به همه پیکسل‌های مربوط به رودخانه در نقشه واقعیته زمینی، در بیشتر شاخص‌ها به‌جز شاخص $AWEI_{no\ shadow}$ حد قابل قبولی دارد، اما همچنان کمترین میزان این خطا در شاخص $MNDWI$ دیده می‌شود. میزان خطای commission، با توجه به تعداد کل پیکسل‌های مربوط به طبقه غیرآب در نقشه واقعیته زمینی، در همه شاخص‌ها قابل توجه است. در واقع ورود پیکسل‌ها از دیگر طبقات به طبقه آب عامل اصلی افزایش میزان این خطاست. در پی تداخل پیکسل‌های طبقات دیگر با طبقه آب، افزون‌بر افزایش خطای commission، میزان صحت تولیدکننده نیز به‌منزله فاکتوری مهم در

مقایسه شاخص‌های آب به‌منظور تفکیک خودکار رودخانه‌های کم‌عرض و کم‌عمق در تصاویر لندست



شکل ۷. نتایج حاصل از طبقه‌بندی شاخص‌های گوناگون آب سنجنده‌های ETM+ و OLI به‌همراه نقشه واقعی زمینی، شامل دو طبقه

به‌تنهایی و به‌صورت خودکار نمی‌توانند امکان بررسی رودخانه‌های کم‌عرض و کم‌عمق را فراهم کنند. بر این اساس، استخراج مرز رودخانه صرفاً با استفاده از تعریف آستانه‌های مشخص برای شاخص‌های آب میسر نیست. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده ویژگی‌های طیفی آب و دیگر پوشش‌های اراضی بررسی شود تا بشود درجه تفکیک‌پذیری پیکسل‌های خالص و مخلوط آب را از پدیده‌های دیگر مشخص کرد. افزون‌براین، بررسی ویژگی‌های فیزیکی دیگر آب همچون مقدار مواد معلق، شفافیت، عمق و جنس بستر نیز در شناسایی رفتار طیفی رودخانه مؤثر خواهد بود. از دیگر سو، بررسی خرد پیکسلی رودخانه و استفاده از پردازش‌های مکانی نیز چه‌بسا در افزایش دقت مرز رودخانه‌های کم‌عرض و کم‌عمق مؤثر باشد.

۵- منابع

ارشد، ص.، مرید، س.، میرابوالقاسمی، ه.، ۱۳۸۶، **بررسی روند تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها با استفاده از سنجش از دور: مطالعه موردی رودخانه کارون از گتوند تا فارسیات (۸۲-۱۳۶۹)**، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، شماره ۱۴، صص. ۱۹۴-۱۸۰.

سیف، ع.، نجمی، ن.، ۱۳۹۲، **بارزسازی تغییرات پیچان رودهای کارون با استفاده از تصاویر چندزمانه IRS و Landsat**، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۲۸، صص. ۲۱۱-۲۲۶.

علوی‌پناه، س.ک.، ۱۳۹۰، **اصول سنجش از دور نوین و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی**، انتشارات دانشگاه تهران.

همراه، م.، ۱۳۹۱، **مبانی فتوگرامتری (نقشه‌برداری هوایی)**، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

برای محاسبات است. به‌رغم این نتایج، فیشر و همکاران (۲۰۱۶) برای شاخص MNDWI در تفکیک پیکسل‌های خالص و مخلوط آب‌های سطحی از دیگر پدیده‌ها به قابلیت نسبی کمتری اشاره داشته‌اند. علت این تفاوت را می‌شود در ماهیت پدیده مورد مطالعه در این تحقیق جستجو کرد. در رودخانه‌های کم‌عرض و کم‌عمق، امتزاج ویژگی‌های طیفی پدیده‌های مجاور با پدیده هدف به احتمال بسیار روی خواهد داد. جنس رسوبات بستر و گیاهان کفزی نیز، به‌علت کم‌عمق بودن رودخانه، طیف انعکاسی را به‌شدت تغییر خواهند داد و جذب طیف فروسرخ به‌وسیله آب به‌صورت کامل صورت نخواهد پذیرفت. درواقع اثر وجه تمایز پدیده آب، یعنی جذب کامل طیف فروسرخ، در این مورد کم می‌شود و امکان ورود پدیده‌هایی با رفتار طیفی مشابه بستر رودخانه به طبقه آب افزایش می‌یابد. یکی از مهم‌ترین پدیده‌هایی که در فرایند طبقه‌بندی خودکار اختلال اساسی ایجاد می‌کند، سایه‌های غلیظ توپوگرافی است. مطابق شکل ۲، ویژگی‌های انعکاسی سایه در محدوده فروسرخ نزدیک بسیار مشابه رودخانه است. اما فرایندهای پس از طبقه‌بندی، مانند استفاده از مدل رقومی ارتفاع و مدل‌سازی زاویه تابش خورشید، چه‌بسا در شناسایی و رفع اثر این عامل مفید باشد (Robertson, 1989).

۴- نتیجه‌گیری

به‌صورت کلی، قابلیت دو شاخص MNDWI و $AWEI_{shadow}$ در مقایسه با دیگر شاخص‌ها برای تفکیک رودخانه‌های کم‌عرض و کم‌عمق بیشتر است و آستانه پایدار این شاخص‌ها ممکن است در فرایند کشف تغییرات عملکرد مؤثر داشته باشد. در کل می‌شود گفت به‌جز شاخص $AWEI_{no\ shadow}$ که طبق تعریف نیز در شرایط عمومی، با وجود سایه‌های حاصل از پدیده‌های گوناگون در چنین مناطقی با توپوگرافی خاص کارایی اثربخش ندارد، بیشتر شاخص‌های مورد مطالعه در این تحقیق قابلیت تفکیک پدیده مورد نظر را دارند، اما

- Baki, A.B.M. & Gan, T.Y., 2012, **Riverbank Migration and Island Dynamics of the Braided Jamuna River of the Ganges–Brahmaputra Basin Using Multi-Temporal Landsat Images**, Quaternary International, (263), PP. 148-161.
- Barsi, J.A., Lee, K., Kvaran, G., Markham, B.L. & Pedelty, J.A., 2014, **The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager**, Remote Sensing, (6), PP. 10232-10251.
- Chu, Z.X., Sun, X.G., Zhai, S.K. & Xu, K.H., 2006, **Changing Pattern of Accretion/Erosion of the Modern Yellow River (Huanghe) Subaerial Delta, China: Based on Remote Sensing Images**, Marine Geology, (227), PP. 13-30.
- Fawcett, T., 2006, **An Introduction to ROC Analysis**, Pattern recognition letters, (27), PP. 861-874.
- Feng, M., Sexton, J.O., Huang, C., Masek, J.G., Vermote, E.F., Gao, F., Narasimhan, R., Channan, S., Wolfe, R.E. & Townshend, J.R., 2013, **Global Surface Reflectance Products from Landsat: Assessment Using Coincident MODIS Observations**, Remote Sensing of Environment, (134), PP. 276-293.
- Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R. & Proud, S.R., 2014, **Automated Water Extraction Index: A New Technique for Surface Water Mapping Using Landsat Imagery**, Remote Sensing of Environment, (140), PP. 23-35.
- Fisher, A., Flood, N. & Danaher, T., 2016, **Comparing Landsat Water Index Methods for Automated Water Classification in Eastern Australia**, Remote Sensing of Environment, (175), PP. 167-182.
- Flood, N., 2014, **Continuity of Reflectance Data between Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI, for Both Top-of-Atmosphere and Surface Reflectance: A Study in the Australian Landscape**, Remote Sensing, (6), PP. 7952-7970.
- Hossain, M.A., Gan, T.Y. & Baki, A.B.M., 2013, **Assessing Morphological Changes of the Ganges River Using Satellite Images**, Quaternary International, (304), PP. 142-155.
- Ji, L., Zhang, L. & Wylie, B., 2009, **Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, (75), PP. 1307-1317.
- Jiang, H., Feng, M., Zhu, Y., Lu, N., Huang, J. & Xiao, T., 2014, **An Automated Method for Extracting Rivers and Lakes from Landsat Imagery**, Remote Sensing, (6), PP. 5067-5089.
- Kummu, M., Lu, X.X., Rasphone, A., Sarkkula, J. & Koponen, J., 2008, **Riverbank Changes along the Mekong River: Remote Sensing Detection in the Vientiane–Nong Khai Area**, Quaternary International, (186), PP. 100-112.
- Lillesand, T., Kiefer, R.W. & Chipman, J., 2014, **Remote Sensing and Image Interpretation**, John Wiley & Sons.
- Lu, D. & Weng, Q., 2007, **A Survey of Image Classification Methods and Techniques for Improving Classification Performance**, International Journal of Remote Sensing, (28), PP. 823-870.
- Markham, B.L. & Helder, D.L., 2012, **Forty-year Calibrated Record of Earth-Reflected Radiance from Landsat: A Review**, Remote Sensing of Environment, (122), PP. 30-40.
- McFeeters, S.K., 1996, **The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features**, International Journal of Remote Sensing, (17), PP. 1425-1432.
- NASA, **Landsat 7 Science Data Users Handbook**, (on-line), available on: http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf, 2006.
- Otukei, J.R. & Blaschke, T., 2010, **Land Cover Change Assessment Using Decision Trees**,

- Support Vector Machines and Maximum Likelihood Classification Algorithms**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, (12), PP. 27-31.
- Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L.A. & Palomar-Vázquez, J., 2012, **Automatic Extraction of Shorelines from Landsat TM and ETM+ Multi-Temporal Images with Subpixel Precision**, Remote Sensing of Environment, (123), PP. 1-11.
- Richards, J.A. & Jia, X., 2006, **Remote Sensing Digital Image Analysis**, Springer.
- Robertson, P.K., 1989, **Spatial Transformations for Rapid Scan-Line Surface Shadowing**, Computer Graphics and Applications, IEEE, (9), PP. 30-38.
- Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., Helder, D., Irons, J.R., Johnson, D.M., Kennedy, R. & Scambos, T.A., 2014, **Landsat-8: Science and Product Vision for Terrestrial Global Change Research**, Remote Sensing of Environment, (145), PP. 154-172.
- Rundquist, D.C., Lawson, M.P., Queen, L.P. & Cerveny, R.S., 1987, **The Relationship between Summer- Season Rainfall Events and Lake- Surface Area**, JAWRA Journal of the American Water Resources Association, (2), PP. 493-508.
- Sarkar, A., Garg, R.D. & Sharma, N., 2012, **RS-GIS Based Assessment of River Dynamics of Brahmaputra River in India**, Journal of Water Resource and Protection, (4), PP. 63-72.
- Schumm, S.A., 2007, **River Variability and Complexity**, Cambridge University Press.
- Sharma, N. and Ashagrie, A., 2012. Simulation study for channelization of the brahmaputra river in Assam. **Water and Energy International**, 69: pp.30-36.
- Teillet, P.M., Barker, J.L., Markham, B.L., Irish, R.R., Fedosejevs, G. & Storey, J.C., 2001, **Radiometric Cross-Calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM Sensors Based on Tandem Data Sets**, Remote Sensing of Environment, (78), PP. 39-54.
- Thakur, P.K., 2014, **River Bank Erosion Hazard Study of River Ganga, Upstream of Farakka Barrage Using Remote Sensing and GIS. In Our National River Ganga**, Springer International Publishing.
- Wang, S., Baig, M.H.A., Zhang, L., Jiang, H., Ji, Y., Zhao, H. & Tian, J., 2015, **A Simple Enhanced Water Index (EWI) for Percent Surface Water Estimation Using Landsat Data**, Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of, (8), PP. 90-97.
- Xu, H., 2006, **Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery**, International Journal of Remote Sensing, (27), PP. 3025-3033.

