



کارایی شاخص‌های مانگرو در تهیه نقشه جنگل‌های مانگرو با استفاده از تصاویر لندست ۸ در جنوب ایران

مقاله پژوهشی

سید یوسف عرفانی فرد، محسن لطفی نصیرآباد

دریافت: ۲۹ تیر ۱۴۰۰ / بازنگری: ۱۲ مهر ۱۴۰۰ / پذیرش: ۱۹ مهر ۱۴۰۰

دسترسی اینترنتی: ۲۱ مهر ۱۴۰۰ / دسترسی چاپی: ۱۱ دی ۱۴۰۱

چکیده

همچنین بهبود مدیریت، پایش و ارزیابی جنگل‌های مانگرو ضروری به نظر می‌رسد. نخستین گام در هر برنامه مدیریتی و حفاظتی در جنگل‌های مانگرو شامل تهیه نقشه پراکنش مکانی و همچنین پایش تغییرات مکانی آن‌ها است. بنابراین یافتن روش‌های کارآمد در مساحی و بررسی تغییرات زمانی و مکانی جنگل‌های مانگرو به منظور مدیریت و حفاظت مؤثر از آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. دشواری داده‌برداری میدانی در این بوم‌سازگان باعث شده داده‌های سنجش از دور در نقشه‌برداری از مانگروها به سرعت توسعه پیدا کنند. اگرچه پژوهش‌های پیشین نشان دادند به دلیل سبزیگی و محتوای آب متفاوت برگها، شاخص‌های پوشش گیاهی متداول در طبقه‌بندی مانگروها از کارایی لازم برخوردار نیستند. لذا پژوهشگران با بررسی رفتار طیفی مانگروها، اقدام به ارائه شاخص‌هایی کردند که مختص طبقه‌بندی این جنگل‌ها روی تصاویر ماهواره‌ای هستند. از آنجایی که شاخص‌های مانگرو اخیراً معرفی شده‌اند، کارایی آن‌ها در شرایط یکسان مورد مقایسه قرار نگرفته و صرفاً در مطالعات موردی به صورت تکی و یا در مقایسه با شاخص‌های پوشش گیاهی بررسی شدند. همچنین شاخص‌های مانگرو در نقشه‌برداری جنگل‌های مانگرو در جنوب ایران مورد ارزیابی قرار نگرفتند. بنابراین مطالعه حاضر با هدف مقایسه کارایی هشت شاخص مانگرو در نقشه‌برداری از مانگروهای سه ریشگاه خلیج نایبند (استان بوشهر)، سیریک (استان هرمزگان) و خلیج گواتر (استان سیستان و بلوچستان) روی تصاویر لندست ۸ انجام شد.

پیشینه و هدف جنگل‌های مانگرو به‌عنوان یکی از بوم‌سازگان‌های مهم گیاهی هستند که در مناطق جزر و مدی سواحل اقیانوسی مستقر شده و از گونه‌های همیشه‌سبز تشکیل می‌شوند. با توجه به گزارش‌های سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد، مساحت جنگل‌های مانگرو در دنیا حدود ۱۴/۶ میلیون هکتار است که بیش از ۴۰ درصد از این جنگل‌ها در آسیا قرار دارند. اندونزی با ۲/۳ میلیون هکتار بیشترین سطح تحت پوشش با بیشترین تنوع گونه‌ای از این جنگل‌ها را دارد. همچنین ایران نیز با دارا بودن حدود ۱۰۰۰۰ هکتار جنگل مانگرو در بخش‌های شمالی خلیج فارس و دریای عمان، یکی از کشورهای دارای مانگرو محسوب می‌شود. اگرچه اهمیت بوم‌شناختی و اقتصادی - اجتماعی جنگل‌های مانگرو بر پژوهشگران و مدیران پوشیده نیست، کاهش سالانه کمیت و کیفیت این جنگل‌ها تحت تأثیر عوامل طبیعی (مانند طوفان) و انسانی (بهره‌برداری بی‌رویه) همچنان ادامه دارد. بنابراین، توسعه راهکارهای عملی و مؤثر به منظور حفاظت از زیستگاه‌های موجود و

سید یوسف عرفانی فرد (✉)، محسن لطفی نصیرآباد^۲

۱. دانشیار، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. کارشناس ارشد، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: erfanifard@ut.ac.ir

<https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.685675>

<https://dori.net/dor/20.1001.1.26767082.1401.13.4.4.8>

شاخص می‌تواند در استفاده از تصاویر جزر و مدی برای شناسایی مانگروها باشد. بررسی نتایج دو شاخص MDI و L8MI نیز نشان داد که در خلیج نایبند عملکرد این دو شاخص در شناسایی جنگل‌های مانگرو هنگام استفاده از باند SWIR2 بهتر از باند SWIR1 بود. یکی از دلایل احتمالی بروز این نتیجه می‌تواند به وجود مناطق انسان‌ساخت و پوشش گیاهی غیرمانگرو در خلیج نایبند مربوط باشد. درحالی‌که در خلیج گواتر هر دو شاخص با باند SWIR1 نتایج صحیح‌تری در طبقه‌بندی مانگروها داشتند. بررسی AUC نیز تأیید نمود که شاخص SMRI در شناسایی طبقه مانگرو در مناطق مورد بررسی بهتر از سایر شاخص‌های مانگرو عمل کرد. مقدار AUC طبقه مانگرو در خلیج نایبند ۰/۹۴، در سیریک ۰/۹۲ و در خلیج گواتر ۰/۹۳ بوده است که بیشترین مقدار AUC بین شاخص‌های مورد بررسی بوده است. نتایج طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو در سه منطقه مورد مطالعه با شاخص منتخب SMRI نشان داد مساحت مانگروها در خلیج نایبند ۲۶۰/۱ هکتار، در سیریک حدود ۱۰۴۹/۲ هکتار و در خلیج گواتر حدود ۶۴۹/۵ هکتار برآورد شدند.

نتیجه‌گیری نتایج نشان داد که شاخص‌های مانگرو عملکرد مطلوبی در شناسایی مانگروها در هر سه منطقه مورد مطالعه داشتند و در هیچکدام نتایج بسیار ضعیف دیده نشد. مقدار AUC طبقه مانگرو با استفاده از SMRI در هر سه رویشگاه مورد مطالعه به بیش از ۰/۹ رسید و این شاخص در هر سه منطقه به عنوان شاخص مطلوب شناخته شد. با بررسی نتایج در سه منطقه مطالعاتی می‌توان به این جمع‌بندی رسید که عملکرد شاخص‌های مانگرو در خلیج نایبند اندکی کمتر از دو منطقه دیگر بوده است (مانند NDMI و L8MI-1 با AUC حدود ۰/۹۶). مساحت جنگل‌های مانگرو در خلیج نایبند، سیریک و خلیج گواتر بر اساس تصاویر ماهواره لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۰ برآورد شد. بین این پنج رویشگاه، بیشترین مساحت جنگل‌های مانگرو مربوط به سیریک (۱۰۴۹/۲ هکتار) و کمترین آن مربوط به خور بساتین (۴۳/۳ هکتار) بوده است. به منظور تأیید نهایی دستاوردهای مطالعه حاضر، پیشنهاد می‌شود SMRI در سایر رویشگاه‌های مانگرو در جنوب ایران مورد ارزیابی قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: حرا، خلیج نایبند، خلیج گواتر، سیریک، ماشین‌بردار پشتیبان، منحنی مشخصه نسبی عملکرد

مواد و روش‌ها جنگل‌های مانگرو در ایران در ۲۱ رویشگاه در ۱۰ شهرستان در سه استان بوشهر، هرمزگان و سیستان و بلوچستان پراکنده شدند. به منظور ارزیابی کلی شاخص‌های مانگرو، یک منطقه از هر استان برای این مطالعه انتخاب شد. جنگل‌های مانگرو در خلیج نایبند در دو خور بیدخون و بساتین متمرکز است. مانگروها در سیریک در اطراف تالاب آذینی پراکنده هستند و جنگل‌های مانگرو در خلیج گواتر، در خورهای باهو و گواتر مستقر هستند. تصاویر ماهواره لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۰ به نحوی دریافت شدند که از هر منطقه دو تصویر یکی در شرایط جزر و یکی هم در شرایط مد بودند. پس از پیش‌پردازش‌های لازم، از تصاویر لندست در شرایط جزر برای محاسبه شاخص‌های MI (Mangrove Index)، NDMI (Normalized Difference Mangrove Index)، CMRI (Combined Mangrove Recognition Index)، MDI (Modular Mangrove Discrimination Index)، MMRI (Landsat 8 Mangrove Index Recognition Index) و MVI (Mangrove Vegetation Index) استفاده شد. همچنین دو تصویر لندست جزر و مد در هر منطقه برای محاسبه شاخص SMRI (Submerged Mangrove Recognition Index) به کار رفت. سپس تفکیک سه طبقه خاک، آب و جنگل‌های مانگرو با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان انجام شد. نتایج طبقه‌بندی علاوه بر معیارهای صحت کلی، کاپا، صحت تولیدکننده و صحت کاربر طبقه مانگرو، با استفاده از سطح زیر منحنی (AUC) مشخصه نسبی عملکرد (ROC) نیز ارزیابی شدند.

نتایج و بحث در مجموع ۱۰ شاخص مانگرو در شرایط یکسان مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. شاخص‌های مورد بررسی هشت عدد بودند که دو شاخص MDI و L8MI هر کدام یک بار با استفاده از باند SWIR1 و یک بار با باند SWIR2 محاسبه شدند که در نتیجه مجموعاً ۱۰ شاخص برای طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو در مناطق مطالعاتی به کار رفتند. از میان شاخص‌های مورد مطالعه، شاخص SMRI به عنوان شاخص بهینه انتخاب شد. علاوه بر صحت تولیدکننده (PA) و صحت کاربر (UA) طبقه مانگرو؛ صحت کلی و ضریب کاپا در طبقه‌بندی آب، خاک و مانگرو SMRI نیز بیشتر از سایر شاخص‌ها بود. یکی از دلایل احتمالی کارایی بیشتر این

مکانی دقیق جنگل‌های مانگرو در مدیریت پایدار این بوم‌سازگان ارزشمند ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به شرایط خاص رویشگاهی جنگل‌های مانگرو و دشواری در دسترسی میدانی به آنها از یک سو و همچنین ضرورت بهره‌مندی از داده‌های کارآمد با پیوستگی زمانی در پایش مداوم آنها از سوی دیگر، داده‌های سنجش از دور در دهه‌های اخیر به پرکاربردترین ابزار در نقشه‌برداری، پایش و ارزیابی‌های کمی و کیفی جنگل‌های مانگرو تبدیل شده است. تصاویر سنجش از دور در مقیاس بزرگ به‌عنوان گزینه‌ای کم-هزینه‌تر از داده‌برداری میدانی در مقیاس کوچک به‌طور روزافزون مورد توجه پژوهشگران و مدیران قرار گرفته است. این تصاویر امکان مشاهده تغییرات مکانی مانگروها را در بازه‌های زمانی مختلف فراهم می‌آورد. یکی از مهم‌ترین داده‌های سنجش از دور در مطالعات پوشش گیاهی از جمله جنگل‌های مانگرو، داده‌های تهیه شده توسط ماهواره لندست هستند که از سال ۱۹۷۲ با پرتاب ماهواره لندست ۱ آغاز شد و با پرتاب ماهواره لندست ۸ در سال ۲۰۱۳، این داده‌برداری منظم تاکنون ادامه داشته است. با توجه به آرشپو بلندمدت تصاویر ماهواره لندست، این داده‌ها در نقشه‌برداری و پایش جنگل‌های مانگرو در ایران و دنیا به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (۴، ۶ و ۱۱). اگرچه پژوهشگرانی چون لانگ و گیری (۱۸) و گاندی و جونز (۹) اشاره می‌کنند که در بسیاری از مطالعات، طبقه‌بندی مانگروها روی تصاویر لندست با خطا همراه بوده و بیشترین خطا مربوط به اختصاص توده‌های کوچک مانگرو به طبقه آب است. بنابراین ضروری به نظر می‌رسد که در تهیه نقشه گستره مانگروها روی تصاویر لندست از روش‌های طبقه‌بندی کارآمد استفاده نمود.

استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی به منظور طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو روی تصاویر ماهواره‌ای از جمله لندست متداول است. شاخص‌هایی چون NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) و SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) در نقشه‌برداری از مانگروها در ایران (۶) و دنیا (۱۰) مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه کارایی

جنگل‌های مانگرو یکی از بوم‌سازگان‌های منحصر به فردی هستند که در مناطق جزر و مدی سواحل اقیانوسی مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری دنیا مستقر شدند. این جنگل‌ها با ارائه خدمات ارزشمند بوم‌سازگانی، نقش بسیار مهمی در تنوع زیستی گیاهی و جانوری مناطق ساحلی ایفا می‌کنند. در مورد اهمیت بوم‌شناختی، اقتصادی و اجتماعی جنگل‌های مانگرو در دنیا و ایران در پژوهش‌های پیشین مطالب ارزشمندی ارائه شده است (۴، ۷، ۱۱ و ۲۱). ایران نیز از جمله کشورهایی است که در جنوب آن در سواحل خلیج فارس و دریای عمان میزبان این بوم‌سازگان است. با توجه به پژوهش‌های پیشین، مانگروها در سه استان جنوبی بوشهر (بردخون، خلیج نایبند، بندر دیر)، هرمزگان (بندر خمیر، جزیره قشم، دهانه رودشور، بندر کلاهی، سیریک، جاسک) و سیستان و بلوچستان (چابهار، خلیج گواتر) در مساحتی بالغ بر ۱۰ هزار هکتار گسترده شده‌اند. حرا (*Avicennia marina*) گونه غالب جنگل‌های مانگرو ایران است که تقریباً در اکثر مناطق تشکیل توده‌های خالص را می‌دهند و تنها در سیریک و جاسک است که توده‌های آمیخته حرا و چندل (*Rhizophora mucronata*) را می‌توان مشاهده نمود (۷ و ۲۱). با وجود آگاهی از اهمیت جنگل‌های مانگرو؛ عوامل طبیعی و انسانی این جنگل‌ها را تهدید می‌کنند به‌نحوی که در ۵۰ سال اخیر، حدود ۳۳ درصد این جنگل‌ها از بین رفته‌اند که تبدیل جنگل‌ها به مزارع آبی-پروری، تغییرات سطح آب اقیانوس‌ها، توسعه شهری و صنعتی، بهره‌برداری بی‌رویه، بلایای طبیعی مانند تغییر سطح آبهای آزاد ناشی از گرمایش جهانی و تغییر در الگو و شدت بارندگی از مهم‌ترین عوامل به‌شمار می‌روند (۱۴، ۲۰ و ۲۱). یکی از مهم‌ترین آثار عوامل تهدیدکننده ذکر شده، کاهش گستره جنگل‌های مانگرو شناخته شده است. بنابراین پژوهشگران و مدیران از طریق پایش مداوم گستره جنگل‌های مانگرو نسبت به ارزیابی اثرات عوامل انسانی و طبیعی بر این جنگل‌ها اقدام می‌کنند. از این رو، آگاهی از مرز و پراکنش

ثبت شده در زمان جزر و مد از منطقه مطالعاتی است که این موضوع، کاربرد شاخص مذکور را محدود می‌کند. به‌منظور رفع این محدودیت، گوپتا و همکاران (۱۰) شاخصی با نام CMRI (Combined Mangrove Recognition Index) را پیشنهاد کردند که از تفاضل NDVI و NDWI (Normalised Difference Water Index) به دست می‌آید. از آنجایی که NDVI و NDWI رابطه عکس دارند، تفاضل آنها می‌تواند باعث افزایش اختلاف بین مقادیر CMRI در کاربری‌هایی شده که از نظر بازتاب طیفی شباهت دارند. علاوه بر شاخص‌های ویژه شناسایی جنگل‌های مانگرو روی تصاویر لندست، شاخص‌هایی نیز طراحی شدند که در تصاویر سنتینل قابل استفاده هستند. شاخص MFI (Mangrove Forest Index) که توسط ژیا و همکاران (۱۳) بر اساس باندهای لبه قرمز تصاویر سنتینل ۲ طراحی شده از این دسته هستند. همچنین MPVI (Mangrove Probability Vegetation Index) توسط کومار و همکاران (۱۵) برای تصاویر ابرطیفی هایپریون ساخته شده است.

پیشینه پژوهش نشان داد شاخص‌های مانگرو که به برخی از آنها اشاره شد، از تنوع زیادی برخوردار هستند و هر کدام در برخی مطالعات مورد تأیید قرار گرفتند ولی تاکنون در کمتر پژوهشی کارایی این شاخص‌ها به ویژه شاخص‌هایی که اخیراً معرفی شدند، در شرایط یکسان مورد ارزیابی قرار گرفته است. مسئله پژوهش حاضر این است که کدامیک از شاخص‌های مذکور که تاکنون ابداع شده‌اند، در شرایط یکسان عملکرد صحیح‌تری در شناسایی مانگروها از سایر عوارض و پدیده‌ها روی داده‌های دورسنجی دارند. همچنین آگاهی از نحوه عملکرد این شاخص‌ها در نقشه‌برداری از جنگل‌های مانگرو در جنوب ایران نیز ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین این پژوهش با هدف مقایسه شاخص‌های مانگرو که برای تصاویر لندست طراحی شده‌اند، انجام گرفت. در پژوهش حاضر، کارایی هشت شاخص مانگرو که تاکنون برای تصاویر لندست ارائه شدند در سه جنگل مانگرو از سه استان بوشهر (خلیج نایبند)، هرمزگان (سیریک) و سیستان و بلوچستان (خلیج

شاخص‌های پوشش گیاهی در شناسایی انواع گیاهان مورد تأیید قرار گرفته است، باید اذعان کرد هیچکدام از شاخص‌های متداول پوشش گیاهی برای تفکیک مانگروها از سایر پوشش‌های گیاهی و کاربری‌های اراضی طراحی نشده‌اند. در راستای بهبود عملکرد شاخص‌های پوشش گیاهی مانند NDVI در برخی مطالعات از جمله لیو و همکاران (۱۷) از داده‌های ارتفاعی و در پژوهش‌های دیگر مانند رازالی و همکاران (۲۳) از تبدیل تسلدکپ استفاده شده است، ولی ضرورت ساخت شاخص‌های ویژه برای شناسایی مانگروها همچنان محسوس بود.

با توجه به اهمیت جنگل‌های مانگرو و گستره آنها به عنوان یک معیار مهم ارزیابی کمی و کیفی، پژوهشگران اقدام به طراحی شاخص‌هایی کردند که صرفاً بر ویژگی‌های جنگل‌های مانگرو و محیط زیست آنها تمرکز داشت. یکی از نخستین شاخص‌های ابداعی، MI (Mangrove Index) است که از دو باند مادون قرمز نزدیک (Near infrared: NIR) و طول موج کوتاه (Short wave infrared, SWIR) در تصاویر ماهواره لندست استفاده می‌کند (۲۹). همچنین توجه محققین به این جلب شد که مانگروها در مناطق جزر و مدی مستقر هستند و در بخش‌هایی از طول شبانه‌روز به زیر آب می‌روند. علیرغم عبور ماهواره‌های خورشیدآهنگ در ساعت محلی یکسان از هر نقطه از کره زمین، چون وضعیت ماه بر جزر و مد تأثیر دارد ممکن است تصاویر ثبت شده از یک جنگل مانگرو در حالت‌های متفاوتی از جزر و مد ثبت شود (۳۰). این ویژگی محیط زیست مانگروها منجر به ابداع شاخص‌هایی شد که بر تفاوت بازتاب امواج الکترومغناطیسی از مانگروها در شرایط جزر و مد تمرکز دارد که یکی از آنها SMRI (Submerged Mangrove Recognition Index) است. این شاخص که برای استفاده از تصاویر زمانی لندست طراحی شده، زیر آب رفتن مانگروها را مد نظر قرار داده و بر تغییرات NIR و NDVI تمرکز دارد (۲۶ و ۲۷). اگرچه این شاخص در مطالعه زیا و همکاران (۲۶) مورد تأیید قرار گرفته ولی مهم‌ترین عامل مؤثر بر کارایی آن، دسترسی به تصاویر لندست

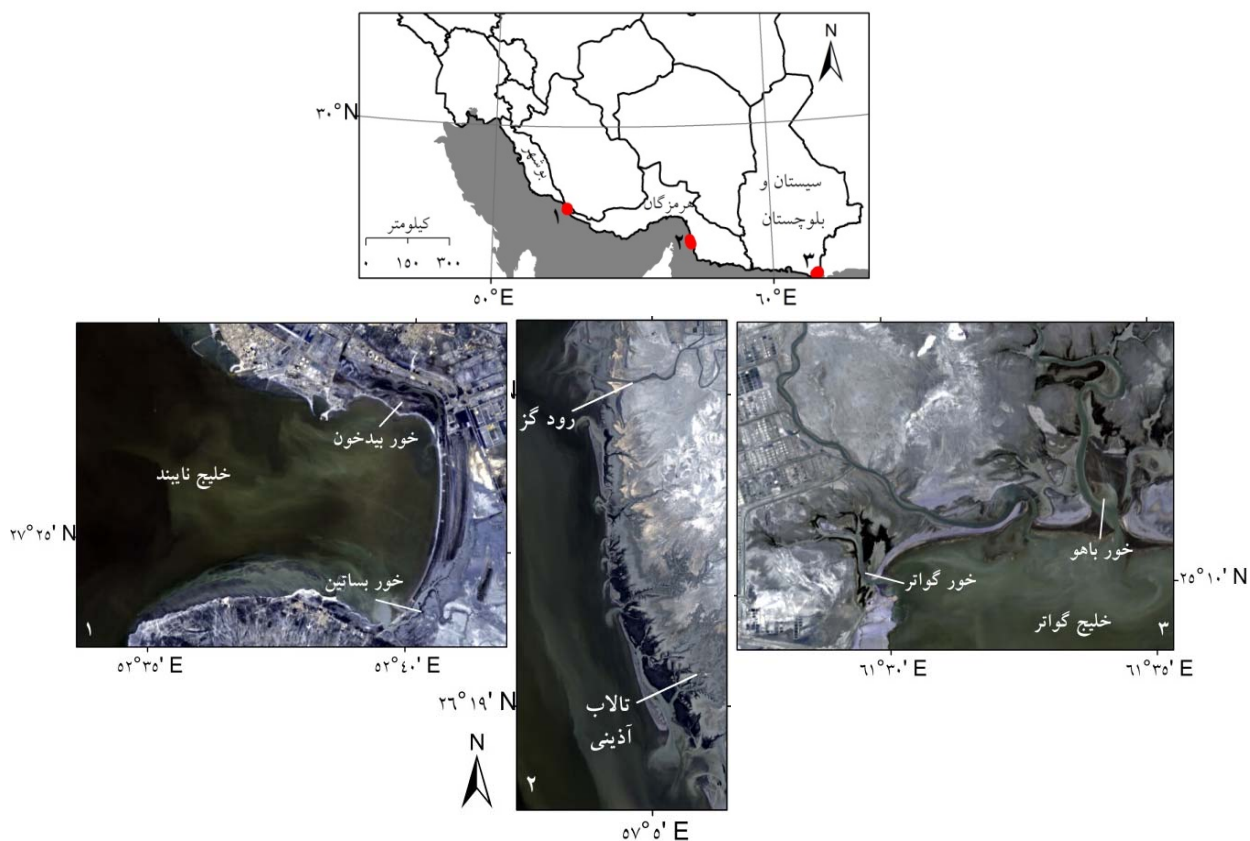
گوآتر) مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین مساحت مانگروها در سه منطقه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. دسترسی رایگان و آرشیو بلندمدت داده‌های لندست مهم‌ترین دلایلی بودند که باعث شد شاخص‌های مختص این داده‌ها مورد بررسی قرار گیرند. دستاوردهای پژوهش حاضر می‌تواند به پژوهشگران در انتخاب شاخص مناسب از میان شاخص‌های مانگرو که تاکنون ساخته شدند، برای طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو روی تصاویر لندست کمک نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر سه منطقه خلیج نایبند (مختصات "۱۰' ۴۰" ۵۲° طول شرقی و "۲۹' ۲۷" ۲۷° عرض شمالی) در استان بوشهر، سیریک (مختصات "۴۶' ۵' ۵۷° طول شرقی و "۷' ۱۹' ۲۶° عرض شمالی) در استان هرمزگان و خلیج گوآتر (مختصات "۳۱' ۳۴" ۶۱° طول شرقی و "۴۰' ۱۳' ۲۵° عرض شمالی) در استان سیستان و بلوچستان انتخاب شدند تا از هر استان یک منطقه ارزیابی شود. پارک ملی نایبند با وسعت حدود ۵۰۰ کیلومترمربع یکی از مناطق حفاظت‌شده تحت نظارت سازمان حفاظت محیط زیست است. جنگل‌های مانگرو در خلیج نایبند در دو بخش خور بیدخون در بخش شمالی و خور بساتین در بخش جنوبی پراکنده شده‌اند. این جنگل‌ها به‌طور خالص از گونه حرا (*A. marina*) تشکیل شده‌اند. این

منطقه دارای اقلیم خشک بوده، متوسط دمای سالیانه ۲۵/۹ سانتی‌گراد و متوسط بارندگی ۱۳۵ میلی‌متر است. مساحت جنگل‌های مانگرو در خور بیدخون ۸۳/۳ هکتار و در خور بساتین ۴۸/۶ هکتار و مجموع جنگل‌های مانگرو در پارک ملی نایبند ۱۳۱/۹ هکتار گزارش شده است (۷). در حدود ۲۰ کیلومتری جنوب بندر سیریک در استان هرمزگان، منطقه حفاظت‌شده حرا رود گز با مساحت حدود ۲۷۰ کیلومترمربع قرار دارد که بر اساس برآورد انجام شده، مساحت جنگل‌های مانگرو در این منطقه حفاظت‌شده و تالاب بین‌المللی حدود ۶۵۸/۶ هکتار است. این جنگل‌ها عموماً از گونه حرا تشکیل شده‌اند و در برخی نقاط می‌توان پایه‌هایی از چنند را نیز مشاهده نمود. اقلیم منطقه خشک و متوسط دمای سالیانه ۳۲/۸ سانتی‌گراد و متوسط بارندگی ۱۸۰/۸ میلی‌متر است (بولتن ماهانه هواشناسی هرمزگان). منطقه حفاظت‌شده باهوکلان (گان‌دو) با مساحت حدود ۴۵۶۰ کیلومترمربع در استان سیستان و بلوچستان واقع شده و خلیج گوآتر که در ۸۵ کیلومتری بندر چابهار واقع شده در جنوب این منطقه حفاظت‌شده قرار دارد. حدود ۳۰ درصد از این خلیج در داخل مرز ایران قرار دارد و ۷۰ درصد آن در مرز پاکستان است. جنگل‌های مانگرو در این منطقه با مساحت کل ۵۶۰/۲ هکتار، در دو خور باهو و خور گوآتر متمرکز هستند که مساحت آنها به ترتیب ۴۲۳ هکتار و ۱۳۷/۲ هکتار هستند (۷). اقلیم منطقه خشک و متوسط دمای سالیانه ۲۶/۵ سانتی‌گراد و متوسط بارندگی ۱۱۴ میلی‌متر است.



شکل ۱. موقعیت مناطق مورد مطالعه (۱: خلیج نایبند، ۲: سیریک، ۳: خلیج گواتر) در سه استان بوشهر، هرمزگان و سیستان و بلوچستان در جنوب ایران (ترکیب رنگی کاذب از باندهای ۵، ۴ و ۳ تصاویر لندست ۸ هر منطقه تهیه شدند)

Fig. 1. The study areas (1. Nayband Gulf, 2. Sirik, 3. Govatr Gulf) in Bushehr, Hormozgan, Sistan-and-Baluchestan provinces, southern Iran (The colour composites were combinations of bands 5, 4, and 3 of Landsat imagery)

حاضر، از تصاویر لندست ۸ مجهز به حسگرهای OLI و TIRS-2 در مناطق مطالعاتی استفاده شده است. با توجه به تارنمای USGS، ماهواره لندست ۸ هر ۱۶ روز یک بار از هر نقطه از زمین عبور می‌کند و تصاویری با ۱۱ باند ثبت می‌کند که اندازه پیکسل آنها در باندهای مرئی، NIR و SWIR برابر ۳۰ متر و در باندهای حرارتی ۱۵ متر است.

تصاویر ماهواره لندست همکاری مشترک سازمان ملی هوافضا (NASA) و سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) در قالب پروژه لندست از سال ۱۹۷۲ تاکنون، امکان بلندمدت‌ترین تصویربرداری ماهواره‌ای از زمین را فراهم کرده است. در قالب پروژه مذکور تا به امروز ۸ ماهواره لندست به فضا پرتاب شده که در مطالعه

جدول ۱. ویژگی‌های تصاویر لندست مورد استفاده در هر منطقه مورد مطالعه

Table 1. The characteristics of Landsat images used in this study

Row	Path	تاریخ تصویر در شرایط مد	تاریخ تصویر در شرایط جزر	نام منطقه
۴۱	۱۶۰	۲۰۲۰/۰۳/۱۳	۲۰۲۰/۰۷/۰۳	خلیج نایبند (بوشهر)
۴۲	۱۵۹	۲۰۲۰/۱۰/۱۸	۲۰۲۰/۰۳/۰۸	سیریک (هرمزگان)
۴۳	۱۵۶	۲۰۲۰/۰۵/۰۶	۲۰۲۰/۰۳/۰۳	خلیج گواتر (سیستان و بلوچستان)

جنگل‌های مانگرو روی داده‌های لندست با استفاده از شاخص-های مانگرو، مشخص شد که تاکنون هشت شاخص برای نقشه‌برداری جنگل‌های مانگرو روی تصاویر لندست ارائه شده که همه آنها برای مقایسه در پژوهش حاضر انتخاب شدند (جدول ۲). از میان هشت شاخص، شاخص SMRI شاخصی است که بر اساس تفاوت بازتاب جنگل‌های مانگرو در شرایط جزر و مد عمل می‌کند و دو حرف L (تصویر در شرایط جزر) و H (تصویر در شرایط مد) در روابط جدول ۲ برای دو شاخص مذکور نیز به همین دلیل است. در مورد شاخص NDMI نیز باید به این نکته اشاره کرد که در صورت ضرب این شاخص در شاخص SAVI می‌توان شناسایی مانگرو را بهبود بخشید (۱). در این مطالعه نیز از حاصل ضرب NDMI در SAVI استفاده شد. لازم به توضیح است که با توجه به توصیه پژوهشگران پیشنهاد دهنده دو شاخص MDI و L8MI (۱، ۲۸)، می‌توان شاخص‌ها را هم با باند SWIR1 و هم با باند SWIR2 محاسبه نمود. در مطالعه حاضر نیز دو شاخص MDI-1 و L8MI-1 با SWIR1 و دو شاخص MDI-2 و L8MI-2 با باند SWIR2 محاسبه شدند. با توجه به محدودیت‌ها؛ برای جزئیات بیشتر در مورد هر شاخص، به منبع هر شاخص ارجاع داده می‌شود.

در مورد شاخص L8MI باید اشاره کرد که علی و نیر (۱) از حد آستانه (T) برای تخصیص هر پیکسل به دو طبقه «مانگرو» و «غیر مانگرو» استفاده کردند. ایشان برای تعیین آستانه از هیستوگرام تبدیل طیفی پیشرفته شیب مینا (ASST) برای مانگرو و سایر طبقات استفاده کردند که این روش در مطالعه حاضر نیز مورد استفاده قرار گرفت. حدود آستانه به کار رفته در این پژوهش برای دو طبقه «مانگرو» و «آب و خاک» در جدول ۳ آورده شده است. ASST-1 و ASST-2 نشان‌دهنده تفاوت در کاربرد دو باند SWIR1 و SWIR2 برای محاسبه دو شاخص L8MI-1 و L8MI-2 هستند.

در این پژوهش تصاویر لندست مربوط به سال ۲۰۲۰ از تارنمای USGS دریافت شدند. پس از بررسی‌های دقیق، تصاویر در هر منطقه طوری انتخاب شدند که در شرایط جزر و مد در هر منطقه ثبت شده باشند (جدول ۱). در شاخص‌های مانگرو که هم نیاز به تصاویر جزر و هم مد بوده از هر دو تصویر در هر منطقه استفاده شد و در شاخص‌هایی که فقط به یک تصویر نیاز بود، تصویر در شرایط جزر به کار رفت. همه تصاویر با استفاده از الگوریتم فلش (FLAASH) تصحیح اتمسفری شدند.

شاخص‌های مانگرو

پژوهش‌های پیشین روی منحنی طیفی جنگل‌های مانگرو با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای نشان داده است که این جنگل‌ها در باندهای سبز (باند ۳)، قرمز (باند ۴)، NIR (باند ۵) و SWIR1 (باند ۶) بازتاب متفاوتی از سایر پدیده‌ها از جمله پوشش‌های گیاهی خشکی‌زی دارند (۴ و ۱۳). به همین جهت باندهای مذکور و همچنین شاخص‌هایی چون NDVI $NDVI = \frac{5 - 4}{5 + 4}$ (باند ۵ - باند ۴) در لندست [۸] و NDWI $NDWI = \frac{3 - 5}{3 + 5}$ (باند ۳ - باند ۵) در لندست [۸] در ساخت شاخص‌های مانگرو مورد توجه قرار گرفته است (جدول ۲). با توجه به محتوای بیشتر آب برگ‌ها در مانگروها نسبت به اکثر پوشش‌های گیاهی خشکی‌زی مستقر هستند، مانگروها در باندهای ذکر شده (باندهای ۳، ۴، ۵ و ۶) داده‌های لندست از بازتاب کمتری نسبت به سایر پوشش‌های گیاهی برخوردار هستند. نکته جالب توجه دیگر این است که کاهش بازتاب طیفی گیاهان خشکی‌زی در اثر تفاوت ساختار کلروفیل یا تنش‌های محیطی از نمودار بازتاب طیفی مانگروها پایین‌تر نمی‌آید و همواره بازتاب مانگرو از انواع گیاهان خشکی‌زی در شرایط مختلف کمتر است (۴، ۵ و ۱۳). پس از بررسی پیشینه پژوهش با موضوع شناسایی

جدول ۲. شاخص‌های مانگرو مورد استفاده در پژوهش حاضر

Table 2. Mangrove indices used in this study

منبع	رابطه	شاخص
(۲۹)	$(NIR - SWIR/NIR \times SWIR) \times 10000$	MI (Mangrove Index)
(۲۴)	$SWIR2 - Green/SWIR2 + Green$	NDMI (Normalized Difference Mangrove Index)
(۱۰)	$NDVI - NDWI$	CMRI (Combined Mangrove Recognition Index)
(۲۶)	$(NDVI_L - NDVI_H) \times \frac{NIR_L - NIR_H}{NIR_H}$	SMRI (Submerged Mangrove Recognition Index)
(۲۸)	$(NIR - SWIR1)/SWIR1$	MDI (Mangrove Discrimination Index)
(۸)	$(MNDWI - NDVI)/(MNDWI + NDVI)$	MMRI (Modular Mangrove Recognition Index)
(۱)	$[ASST > T]$ and $[SAVI > T]$	L8MI (Landsat 8 Mangrove Index)
(۴)	$NIR - Green/SWIR1 + Green$	MVI (Mangrove Vegetation Index)

شاخص‌ها امکان مقایسه کارایی شاخص‌ها در شرایط یکسان را فراهم می‌آورد. بنابراین از میان انواع الگوریتم‌های طبقه‌بندی پرکاربرد مانند ML، ANN، RF و SVM که در مطالعات گذشته در زمینه مانگروها به کار رفتند (۴، ۶، ۱۹ و ۲۲)؛ الگوریتم یادگیری ماشین SVM برای طبقه‌بندی شاخص‌های مانگرو مورد استفاده قرار گرفت (۲۲ و ۲۶). از میان چهار کرنل (Linear، Polynomial، Radial Basis Function، Sigmoid، RBF) موجود در الگوریتم SVM، از کرنل RBF استفاده شد که کارایی بیشتری از خود نشان داده است (۶). پارامتر جریمه (Penalty) نیز روی عدد ۱۰۰ تنظیم شد اریبی و جریمه ناشی از خطا در طبقه‌بندی نادرست کاهش داده شود (۱۲). علاوه بر این، روی تصویر هر منطقه تعداد حدود ۲۴۰۰۰ پیکسل به عنوان نمونه تعلیمی با توزیع مناسب در تمام محدوده هر تصویر و طبقه مورد نظر (طبقه جنگل مانگرو ۶۰۰۰ پیکسل، طبقه خاک ۹۰۰۰ پیکسل، طبقه آب ۹۰۰۰ پیکسل) انتخاب شد به نحوی که بتوان طبقات جنگل مانگرو، خاک و آب از یکدیگر تفکیک شوند. از نمونه‌های تعلیمی هر منطقه در طبقه‌بندی و ارزیابی شاخص‌های مانگرو آن منطقه به‌طور یکسان استفاده شد. همچنین از ۷۰ درصد نمونه‌ها برای

جدول ۳. حدود آستانه مورد استفاده در پژوهش حاضر برای

شاخص L8MI

Table 3. The thresholds used for L8MI index in this study

ASST-2	ASST-1	SAVI	منطقه مطالعاتی
-۰/۵۰۰	-۰/۵۶۰	۰/۲۵۵	خلیج نابیند
-۰/۵۵۰	-۰/۵۸۰	۰/۱۶۳	سیریک
-۰/۹۰۲	-۰/۹۴۳	۰/۱۷۵	خلیج گواتر

الگوریتم طبقه‌بندی

در پژوهش‌های پیشین روی تهیه نقشه جنگل‌های مانگرو در داده‌های لندست، از انواع الگوریتم‌های طبقه‌بندی پارامتری و ناپارامتری استفاده شده است، هرچند الگوریتم‌های ناپارامتری به دلیل عدم نیاز به پیروی از توزیع نرمال داده‌ها بیشتر کاربرد داشته است. لازم به ذکر است که انتخاب الگوریتم مناسب بر اساس مطالعات قبلی کار دشواری است چون هر الگوریتم، پیشینه پژوهشی لازم برای تأیید کارایی در طبقه‌بندی مانگروها روی داده‌های سنجش از دور را دارد و می‌توان جمع‌بندی نمود که این الگوریتم‌ها از کارایی لازم برای شناسایی مانگروها را دارند (۲۲). از سوی دیگر، هدف اصلی پژوهش حاضر مقایسه کارایی شاخص‌های مانگرو بود و در نتیجه، استفاده از یک الگوریتم طبقه‌بندی یکسان برای همه

از شاخص‌های مانگرو در شناسایی مانگروها در مناطق مورد مطالعه استفاده شد. این معیار در یک فضای دوبعدی رسم شده که محور طولی آن «ویژگی-۱» (رابطه ۵) و محور عرضی آن «حساسیت» (رابطه ۶) است.

$$\text{ویژگی} = \frac{TN}{TN+FP} \quad [5]$$

$$\text{حساسیت} = \frac{TP}{TP+FN} \quad [6]$$

در دو رابطه ۵ و ۶، TP پیکسل‌های که به درستی به طبقه مورد نظر تخصیص یافتند، TN پیکسل‌هایی که به درستی به طبقه مورد نظر تخصیص نیافتند، FP پیکسل‌هایی که به نادرستی به طبقه مورد نظر تخصیص یافتند و FN پیکسل‌هایی که به نادرستی به طبقه مورد نظر اختصاص نیافتند. هرچه میزان انحراف از خط مبنا برای یک طبقه خاص در منحنی ROC بیشتر باشد، صحت طبقه‌بندی طبقه مذکور بیشتر است. علاوه بر این، از سطح زیر منحنی (AUC) نیز برای مقایسه نتایج استفاده می‌شود. مقدار AUC معمولاً بین ۰/۵ (خط یک‌به‌یک نمودار یا خط مبنا) تا یک متغیر است و هر قدر که AUC یک طبقه به یک نزدیک‌تر باشد، طبقه مورد نظر با صحت بیشتری طبقه‌بندی شده است (۲). در پژوهش حاضر از نرم افزارهای ENVI، ArcGIS، و Excel استفاده شد.

نتایج

در مجموع ۱۰ شاخص مانگرو در جنگل‌های مانگرو سه استان جنوبی کشور در شرایط یکسان مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. شاخص‌های مورد بررسی هشت عدد بودند که دو شاخص MDI و L8MI با استفاده از دو باند SWRI1 و SWIR2 محاسبه شدند که در نتیجه مجموعاً ۱۰ شاخص برای طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو در خلیج نایبند، سیریک و خلیج گواتر به کار رفتند. جدول ۴ نتایج ارزیابی صحت نتایج ۱۰ شاخص مانگرو را نشان می‌دهد که در شرایط یکسان، اغلب شاخص‌ها عملکرد مطلوبی داشتند. از میان شاخص‌های مورد مطالعه، شاخص SMRI به‌عنوان شاخص بهینه انتخاب شد. علاوه بر صحت تولیدکننده (مانگر PA) و صحت کاربر

طبقه‌بندی و از ۳۰ درصد باقیمانده برای ارزیابی صحت نتایج استفاده شد (۴ و ۲۲).

ارزیابی صحت

کارایی شاخص‌های مانگرو با محاسبه صحت کلی، صحت تولیدکننده، صحت کاربر و ضریب کاپا بررسی و مقایسه می‌شود. رابطه ۱ نشان‌دهنده صحت کلی می‌باشد. در این رابطه OA صحت کلی، N تعداد کل پیکسل‌های طبقه‌بندی‌شده و $\sum_{k=1}^N a_{kk}$ مجموع پیکسل‌های قطر اصلی ماتریس خطا (تعداد کل پیکسل‌های درست طبقه‌بندی‌شده) است.

$$OA = \frac{\sum_{k=1}^N a_{kk}}{\sum_{k=1}^N a_{ik}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^N a_{kk} \quad [1]$$

صحت تولیدکننده (PA) از رابطه ۲ به دست می‌آید. در رابطه مذکور a_{tt} تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی‌شده (بر روی قطر اصلی) و $\sum_{i=1}^N a_{ki}$ جمع تعداد پیکسل‌هایی که به‌عنوان نمونه آموزشی آن طبقه مورد استفاده قرار گرفته است (جمع ستون).

$$PA = \frac{a_{tt}}{\sum_{i=1}^N a_{ki}} \quad [2]$$

صحت کاربر (UA) نیز از رابطه ۳ به دست می‌آید و a_n معرف تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی (بر روی قطر اصلی) و $\sum_{i=1}^N a_{ki}$ تعداد کل پیکسل‌های طبقه مورد نظر است. سپس ضریب کاپا (K) که توافق شانسی را از صحت کلی نقشه‌های تولید شده به روش رقومی و خودکار حذف می‌کند نیز برای ارزیابی دقیق‌تر صحت نقشه‌های حاصل مورد استفاده قرار گرفت (رابطه ۴). در این رابطه $Pr(a)$ توافق مشاهده نسبی میان ارزیابی‌ها، $Pr(e)$ احتمال فرضی توافق شانسی است (۵، ۱۲ و ۲۶).

$$UA = \frac{an}{\sum_{i=1}^N a_{ki}} \quad [3]$$

$$K = \frac{Pr(a) - Pr(e)}{1 - Pr(e)} \quad [4]$$

علاوه بر معیارهای صحت سنجی اشاره شده، از منحنی مشخصه نسبی عملکرد (ROC) برای ارزیابی کارایی هر کدام

به‌نحوی که شاخص MMRI که در نایبند دارای صحت تولیدکننده و کاربر ۷۳/۴ و ۶۷/۲ درصد بود، این نتایج در سیریک به ۹۵/۲ و ۹۶ درصد رسید. بررسی دقیق نتایج دو شاخص MDI و L8MI که از دو باند SWIR1 و SWIR2 در آنها استفاده شد نیز نشان داد که در خلیج نایبند عملکرد این دو شاخص در شناسایی جنگل‌های مانگرو هنگام استفاده از باند SWIR2 بهتر از باند SWIR1 بود. درحالی که در خلیج گواتر هر دو شاخص با باند SWIR1 نتایج صحیح‌تری در طبقه‌بندی مانگروها داشتند.

(مانگرو UA) طبقه مانگرو؛ صحت کلی و ضریب کاپا در طبقه‌بندی آب، خاک و مانگرو نیز بیشتر از سایر شاخص‌ها بود. البته باید در نظر داشت که شاخص‌های دیگری چون NDMI و L8MI-2 نیز در برخی معیارهای صحت سنجی بالاتر بودند ولی برای انتخاب شاخص بهینه بر عملکرد شاخص در شناسایی جنگل‌های مانگرو بر اساس صحت تولیدکننده، صحت کاربر و منحنی ROC طبقه مانگرو تمرکز شد. همچنین مقایسه نتایج نشان داد که عملکرد اغلب شاخص‌ها تحت تأثیر منطقه مورد مطالعه قرار داشت

جدول ۴. نتایج بررسی صحت شاخص‌های مانگرو در طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو مناطق مورد مطالعه (واحد مانگرو PA، مانگرو UA و OA درصد و مقدار K و مانگرو AUC بین صفر و یک است)

Table 4. Accuracy assessment of mangrove indices in classification of mangrove forests in the study areas (The PA_{mangrove}, UA_{mangrove}, and OA were in percent and K and AUC_{mangrove} were between zero and one)

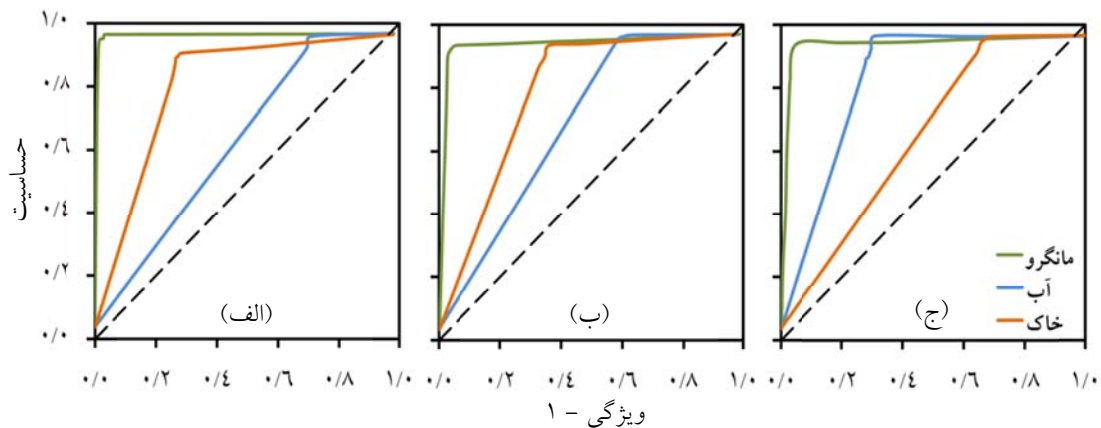
MVI	L8MI-2	L8MI-1	MMRI	MDI-2	MDI-1	SMRI	CMRI	NDMI	MI	معیار	منطقه
۷۸/۹	۷۰/۴	۶۲/۹	۷۳/۴	۸۶/۷	۷۴/۷	۹۸/۶	۴۸/۶	۷۰/۹	۹۵/۹	PA _{مانگرو}	نایبند
۱۰۰/۰	۹۹/۳	۹۹/۲	۶۷/۲	۸۵/۱	۸۰/۳	۹۹/۱	۱۰۰/۰	۹۹/۳	۶۹/۹	UA _{مانگرو}	
۹۵/۱	۹۵/۹	۹۴/۸	۶۷/۷	۴۵/۹	۴۱/۹	۹۵/۴	۸۹/۲	۹۵/۹	۵۸/۸	OA	
۰/۹	۰/۸	۰/۷	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۰/۹	۰/۸	۰/۸	۰/۴	K	
۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۷	۰/۹	۰/۷	۰/۶	۰/۸	AUC _{مانگرو}	
۹۴/۷	۹۳/۴	۸۵/۴	۹۵/۲	۹۴/۶	۹۵/۰	۹۹/۰	۹۵/۰	۹۳/۷	۹۳/۸	PA _{مانگرو}	سیریک
۹۹/۹	۹۹/۱	۹۸/۹	۹۶/۰	۹۰/۸	۹۰/۹	۹۸/۸	۹۹/۵	۹۹/۱	۹۴/۳	UA _{مانگرو}	
۹۶/۷	۹۷/۶	۹۵/۲	۵۰/۳	۴۲/۴	۸۱/۲	۹۶/۹	۹۵/۵	۹۷/۸	۹۵/۳	OA	
۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۳	۰/۲	۰/۷	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹	K	
۰/۷	۰/۷	۰/۸	۰/۸	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۰/۸	۰/۷	۰/۸	AUC _{مانگرو}	
۹۴/۹	۹۵/۶	۹۵/۶	۸۹/۵	۷۹/۵	۹۰/۷	۹۴/۹	۹۴/۳	۹۵/۹	۸۰/۷	PA _{مانگرو}	گواتر
۹۶/۶	۹۴/۹	۹۶/۸	۷۰/۰	۹۳/۳	۸۷/۲	۹۸/۶	۹۶/۳	۱۰۰/۰	۹۷/۱	UA _{مانگرو}	
۸۹/۵	۹۶/۷	۹۷/۲	۷۳/۹	۵۷/۶	۶۶/۲	۹۴/۲	۹۰/۳	۹۸/۴	۷۶/۵	OA	
۰/۸	۰/۹	۰/۹	۰/۶	۰/۴	۰/۵	۰/۹	۰/۸	۰/۹	۰/۶	K	
۰/۸	۰/۷	۰/۸	۰/۸	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۰/۸	۰/۸	۰/۷	AUC _{مانگرو}	

بیشتری از دو طبقه آب و خاک تفکیک شده است و این موضوع کارایی شاخص SMRI در نقشه‌برداری جنگل‌های مانگرو را نشان می‌دهد. همچنین مقدار AUC منحنی ROC طبقه مانگرو در خلیج نایبند ۰/۹۴، در سیریک ۰/۹۲ و در خلیج گواتر ۰/۹۳ بوده است که بیشترین مقدار AUC بین

بررسی منحنی ROC و AUC نیز تأیید نمود که شاخص SMRI در شناسایی طبقه مانگرو در مناطق مورد بررسی بهتر از سایر شاخص‌های مانگرو عمل کرد. منحنی ROC نتایج شاخص SMRI در شکل ۲ ارائه شده است. چنانچه مشخص است، طبقه مانگرو در هر سه منطقه مطالعاتی با صحت

گواتر به ترتیب ۰/۷۹، ۰/۷۶ و ۰/۶۵ بوده و همچنین AUC منحنی ROC طبقه آب در سه منطقه مذکور به ترتیب ۰/۶۱، ۰/۶۶ و ۰/۶۵ به دست آمده است.

شاخص‌های مورد بررسی بوده است (جدول ۴). بر خلاف خلیج نایبند و سیریک، در خلیج گواتر صحت طبقه‌بندی در طبقه آب بیشتر از خاک بوده است (شکل ۲). مقدار AUC منحنی ROC طبقه خاک در خلیج نایبند، سیریک و خلیج

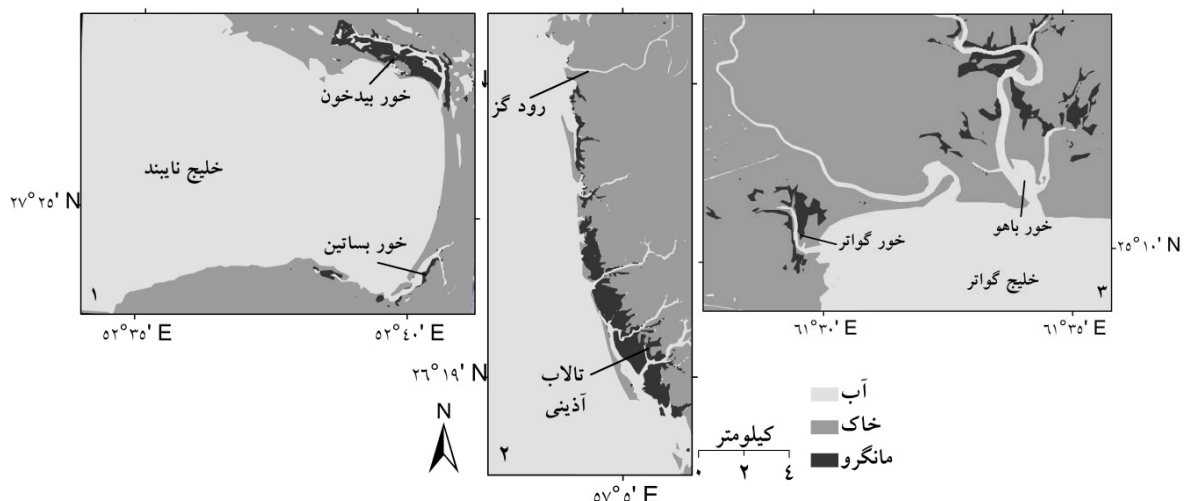


شکل ۲. منحنی ROC طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو با استفاده از شاخص SMRI روی تصاویر لندست ۸ در خلیج نایبند (الف)، سیریک (ب) و خلیج گواتر (ج)

Fig. 2. ROC curve of classification of mangrove forests using SMRI index on Landsat 8 imagery in Nayband Gulf (a), Sirik (b), Govatr Gulf (c)

به منظور تفسیر بصری طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو با شاخص SMRI، نتایج در گوگل ارث مورد بررسی قرار گرفتند که در شکل ۴ نشان داده شده است. یک پنجره از هر منطقه به‌عنوان نمونه ارائه شد که نشان می‌دهد مرز جنگل‌ها با توجه به تفکیک‌پذیری مکانی تصاویر لندست قابل قبول است. بررسی سایر قسمت‌ها نیز این موضوع را تأیید نمود که شاخص SMRI از کارایی لازم برای شناسایی و تفکیک مانگروها از دو طبقه دیگر مورد بررسی را دارا بوده است.

نتایج طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو در سه منطقه مورد مطالعه با شاخص منتخب SMRI در شکل ۳ نشان داده شده است. مساحت مانگروها در خلیج نایبند در مجموع ۲۶۰/۱ هکتار به دست آمد که حدود ۲۱۶/۸ هکتار آن مربوط به خور بیدخون و ۴۳/۳ هکتار آن مربوط به خور بساتین بوده است. همچنین در سیریک حدود ۱۰۴۹/۲ هکتار جنگل مانگرو شناسایی شد که با توجه به شکل ۳ بیشترین مساحت در نزدیکی تالاب آذینی مشاهده شد. در نهایت، مانگروهای خلیج گواتر حدود ۶۴۹/۵ هکتار برآورد شدند که ۴۷۰/۴ هکتار آن در خور باهو و ۱۷۹/۱ هکتار آن در خور گواتر قرار داشت.



شکل ۳. نقشه جنگل‌های مانگرو با استفاده از شاخص SMRI روی تصاویر لندست ۸ در مناطق مورد مطالعه (۱: خلیج نایبند، ۲:

سیریک، ۳: خلیج گواتر)

Fig. 3. Maps of mangrove forests using SMRI index on Landsat 8 imagery in the study areas (1. Nayband Gulf, 2. Sirik, 3. Govatr Gulf)



شکل ۴. نمونه‌ای از تفسیر بصری طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو با استفاده از شاخص SMRI روی تصاویر لندست ۸ در مناطق مورد

مطالعه (۱. خلیج نایبند، ۲. سیریک، ۳. خلیج گواتر) در گوگل ارث

Fig. 4. A sample of visual interpretation of classification of mangrove forests using SMRI index on Landsat 8 imagery in the study areas (1. Nayband Gulf, 2. Sirik, 3. Govatr Gulf) in Google Earth

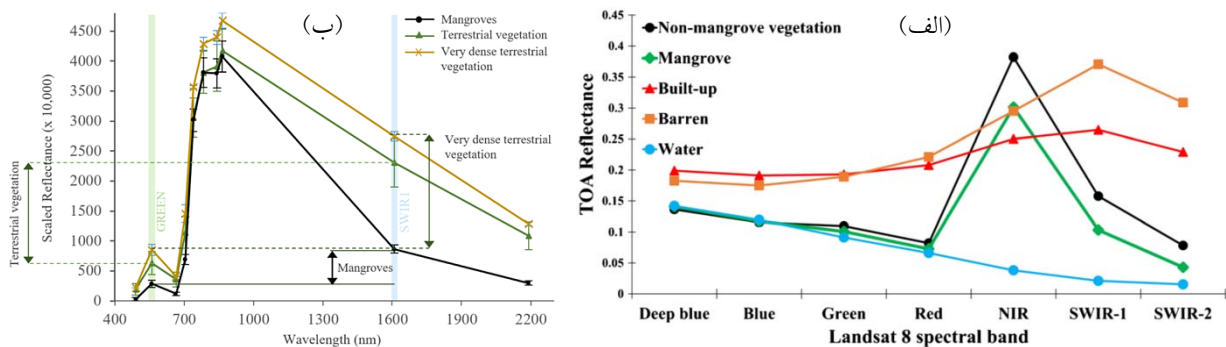
بحث و نتیجه‌گیری

به طور کلی، نتایج نشان داد که شاخص‌های مانگرو عملکرد مطلوبی در شناسایی مانگروها در هر سه منطقه مورد مطالعه داشتند و در هیچکدام نتایج بسیار ضعیف دیده نشد.

اگرچه مقدار AUC در هر سه رویشگاه مورد مطالعه در شاخص SMRI بیشتر از ۰/۹ به دست آمد و این شاخص در هر سه منطقه به عنوان شاخص مطلوب شناخته شد، ولی برخی شاخص‌های مانگرو نیز کارایی مناسبی نداشتند (جدول

گیاهی غیرمانگرو در خلیج نایبند مربوط باشد. شکل ۵ الف نشان می‌دهد تفاوت رفتار طیفی پوشش گیاهی غیرمانگرو و مانگرو در باند SWIR1 اندکی بیشتر از SWIR2 است ولی تفاوت آنها با مناطق انسان‌ساخت در باند SWIR2 بیشتر از SWIR1 است (۱). به نظر می‌رسد ترکیب باندهای Green و SWIR2 در شاخص NDMI و ترکیب باندهای Blue و SWIR1 در شاخص L8MI-1 در خلیج نایبند که دارای مناطق انسان‌ساخت (عسلویه) و پوشش گیاهی غیرمانگرو بوده مناسب نیست. اگرچه تأیید این موضوع نیازمند مطالعه بیشتر است ولی می‌تواند به عنوان یکی از دلایل احتمالی بروز چنین نتیجه‌ای در نظر گرفته شود. در مطالعه علی و نیر (۱) L8MI و NDMI در شناسایی مانگروهای کراچی پاکستان عملکرد تقریباً مشابهی داشتند و صحت تولیدکننده و کاربر طبقه مانگرو در هر دو شاخص بسیار نزدیک بودند که نتایج مطالعه حاضر نیز در همین راستا بود (جدول ۴).

(۴). با بررسی نتایج در سه منطقه مطالعاتی می‌توان به این جمع‌بندی رسید که عملکرد شاخص‌های مانگرو در خلیج نایبند اندکی کمتر از دو منطقه دیگر بوده است. به عنوان مثال، مقدار AUC در دو شاخص NDMI و L8MI-1 در خلیج نایبند حدود ۰/۶ به دست آمد که نشان‌دهنده کارایی متوسط این شاخص‌ها در منطقه مذکور بوده است. یکی از دلایل این نتایج می‌تواند به این مربوط باشد که از بین شاخص‌های مورد مطالعه، تنها این دو شاخص بودند که در هر منطقه مطالعاتی فقط امکان تفکیک دو طبقه «مانگرو» و «غیرمانگرو» را فراهم کردند و طبقات آب و خاک شناسایی نشد زیرا مقدار هر دو شاخص در هر جای تصویر غیر از مانگرو صفر بود. بنابراین اگر هدف در پژوهش‌های آتی تفکیک کاربری‌های دیگری چون مناطق مرطوب، آب و خاک باشد، استفاده از این دو شاخص توصیه نمی‌شود. همچنین یکی دیگر از دلایل احتمالی بروز این نتیجه می‌تواند به وجود مناطق انسان‌ساخت و پوشش



شکل ۵. رفتار طیفی کاربری‌های اراضی مختلف در باندهای تصاویر لندست ۸ (الف) (۱) و تفاوت رفتار طیفی پوشش گیاهی غیرمانگرو و مانگرو (ب) (۴)

Fig. 5. Spectral signatures of different land use / land cover on Landsat 8 imagery (1) and difference of spectral signatures of mangrove and non-mangrove vegetation (4)

که در صورت طبقه‌بندی کل تصویر، L8MI با OA و K بیشتر نتایج بهتری نسبت به MDI داشته است. همچنین در هر دو منطقه شاخص محاسبه شده با باند SWIR1 با مقدار AUC بیشتر، نتایج بهتری در شناسایی مانگروها نشان داده است. مطالعه علی و نیر (۱) نشان داد بین L8MI-1 و L8MI-2 در شناسایی مانگروها تفاوت چندانی وجود ندارد که این نتایج در

علاوه بر این، دو شاخص (L8MI، MDI) در میان هشت شاخص مورد مطالعه در پژوهش حاضر وجود داشت که به پیشنهاد سازندگان آنها (۱ و ۲۸) امکان استفاده دو باند SWIR1 و SWIR2 در آنها وجود دارد. در پژوهش حاضر نیز هر کدام از این شاخص‌ها به طور جداگانه در دو حالت مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج در سیریک و خلیج گواتر نشان داد

نیز مطابقت دارد. ایشان نیز به این نکته اشاره کردند که امکان دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای مناسب شاخص SMRI همیشه وجود نداشته باشد و به همین دلیل شاخص‌های ویژه مانگرو جایگزین را ارائه کردند.

در مطالعه حاضر، علاوه بر معیارهای متداول صحت-سنجی (PA، UA، OA، K) برای مقایسه نتایج ۱۰ شاخص مورد مطالعه، از AUC در ROC نیز استفاده شد. چنانچه در جدول ۴ ملاحظه شد، با توجه به معیارهای متداول صحت سنجی شاخص‌های مانگرو در رویشگاه‌های مختلف عملکرد متفاوتی داشتند به نحوی که انتخاب شاخص بهینه بر اساس این معیارها ممکن نبود. از آنجایی که هر کدام از شاخص‌ها دارای ساختار متفاوتی هستند، معیارهای صحت سنجی برای عملکرد آنها در هر سه منطقه مطالعاتی گاهی یکسان نبود. در خلیج گواتر به عنوان مثال، مقدار PA در دو شاخص MI و MMRI به ترتیب ۸۰/۷ و ۸۹/۵ درصد بوده ولی مقدار UA آنها به ترتیب ۹۷/۱ و ۷۰/۰ درصد بود که نشان می‌دهد شاخص MI در مقایسه با شاخص MMRI دارای PA کمتر و UA بیشتر بوده است. این تفاوت‌ها انتخاب شاخص بهینه برای طبقه‌بندی مانگروها در هر منطقه را با دشواری مواجه کرد. درحالی‌که مقایسه ROC و AUC طبقه مانگرو نشان داد شاخص SMRI نتایج صحیح‌تری نسبت به شاخص‌های دیگر در هر سه رویشگاه داشته است. علت عملکرد بهتر ROC این است که این معیار، برآیندی از خطای اضافه و خطای حذف بوده و در ارزیابی صحت هر طبقه، هر دو خطا را به‌طور همزمان لحاظ می‌کند (۲). لذا از صحت بیشتر شاخص بهینه SMRI در هر سه رویشگاه بر اساس این معیار صحت سنجی می‌توان اطمینان داشت. همچنین توصیه می‌شود در مطالعات آتی، به‌منظور مقایسه عملکرد روش‌های مختلف طبقه‌بندی اعم از شاخص‌ها و الگوریتم‌های طبقه‌بندی از ROC نیز در کنار سایر معیارهای متداول صحت سنجی استفاده شود.

هدف دیگر پژوهش حاضر به‌روزرسانی اطلاعات در مورد مساحت جنگل‌های مانگرو در پنج رویشگاه خور بیدخون و خور بساتین (خلیج نایبند)، سیریک، خور باهو و

راستای دستاوردهای مطالعه حاضر بوده که بین AUC منحنی ROC طبقه مانگرو در دو شاخص در سه منطقه تفاوت اندکی مشاهده شد (جدول ۴). بالولوی و همکاران (۴) نیز با بررسی دقیق رفتار طیفی پوشش‌های گیاهی مانگرو غیرمانگرو (شکل ۵ ب) نشان دادند محتوای رطوبت برگ مانگروها باعث کاهش بازتاب آنها در محدوده طیفی حدود ۰/۸ تا ۲/۲ میکرومتر در مقایسه با سایر پوشش‌های گیاهی شده است. این محدوده طیفی توسط حسگر OLI در لندست ۸ در باندهای ۵ (NIR)، ۶ (SWIR1) و ۷ (SWIR2) ثبت می‌شود. همچنین بیشترین تفاوت در محدوده طیفی ۱/۶ میکرومتر است که در باند ۶ (SWIR) قرار دارد (شکل ۵ ب). بنابراین می‌توان یکی از دلایل عملکرد بهتر دو شاخص MDI-1 و L8MI-1 را استفاده از باند SWIR1 در دو شاخص مذکور دانست. همانطور که اشاره شد، شاخص SMRI در پژوهش حاضر به عنوان شاخص مناسب در سه رویشگاه مورد بررسی معرفی شد. ویژگی بارز شاخص SMRI در مقایسه با هفت شاخص دیگر مورد مطالعه این است که در شاخص مذکور از دو تصویر جزر و مد استفاده شده است. این احتمال وجود دارد که ساختار متفاوت این شاخص در تفکیک مؤثرتر مانگروها از سایر طبقات (آب، خاک) و همچنین پوشش گیاهی غیرمانگرو و مناطق انسان‌ساخت در خلیج نایبند نقش داشته است. این نتایج با دستاوردهای مطالعات قبلی مطابقت دارد. به عنوان مثال، زیا و همکاران (۲۷) با مقایسه مجموعه‌ای از شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI، RVI، EVI، SAVI) و شاخص SMRI به این نتیجه رسیدند که شاخص SMRI روی تصاویر لندست ۸ برای نقشه‌برداری از مانگروها از سایر شاخص‌ها مناسب‌تر است. همچنین لی و همکاران (۱۶) نیز کارایی شاخص SMRI را در طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو روی تصاویر لندست ۸ تأیید کردند. علاوه بر این، نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر (جدول ۴) پیشنهاد می‌کند که در صورت عدم دسترسی به داده مناسب (تصاویر ماهواره‌ای جزر و مدی) از یک منطقه می‌توان از دو شاخص CMRI و MVI نیز استفاده نمود. این پیشنهاد با توصیه‌های گوپتا و همکاران (۱۰) و بالولوی و همکاران (۴)

خور گواتر (خلیج گواتر) بر اساس تصاویر لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۰ بوده است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد بین این پنج رویشگاه، بیشترین مساحت جنگل‌های مانگرو مربوط به سیریک (۱۰۴۹/۲ هکتار). کمترین آن مربوط به خور بساتین (۴۳/۳ هکتار) بوده است. امیری و همکاران (۳) مساحت جنگل‌های مانگرو در خلیج نایبند (مجموع مانگروهای دو خور بیدخون و بساتین) را بر اساس تصاویر IRS سال ۲۰۰۸ حدود ۱۷۱ هکتار گزارش کردند. همچنین در تحقیق مذکور گزارش شده مساحت جنگل‌های مانگرو در این منطقه در سال ۱۹۹۷ حدود ۳۷۷ هکتار بوده است. این موضوع نشان می‌دهد مانگروها در خلیج نایبند یک روند کاهشی داشتند و اخیراً این روند افزایشی شده است. همچنین دانه‌کار و همکاران (۷) مساحت مانگروها در خور بیدخون را ۸۳/۳ هکتار و در خور بساتین ۴۸/۶ هکتار و در مجموع ۱۳۱/۹ هکتار برآورد کردند. درحالی‌که بر اساس تحلیل تصاویر لندست مربوط به سال ۲۰۲۰ در خور بیدخون مساحت به ۲۱۶/۸ هکتار و در خور بساتین ۴۳/۳ هکتار و در مجموع ۲۶۰/۱ هکتار بوده است. این مقایسه نیز روند افزایشی مساحت مانگروها را در خلیج نایبند از حدود سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ تأیید می‌نماید. با توجه به کاهش مساحت مشاهده شده در خور بساتین، ضروری به نظر می‌رسد که در مطالعات بعدی بررسی بیشتر در این منطقه صورت گرفته و در صورت تأیید کاهش مشاهده شده، اقدامات لازم صورت گیرد. نتایج مطالعه تقی زاده و همکاران (۲۵) در رویشگاه سیریک نشان داد مساحت جنگل‌های مانگرو بر اساس تصاویر IRS سال ۲۰۰۴ در این منطقه حدود ۶۳۹/۶ هکتار بوده است. همچنین دانه‌کار و همکاران (۷) نیز مساحت آنها را ۶۵۸/۶ هکتار برآورد کردند. در آخرین پژوهش نیز مافی غلامی و همکاران (۱۹) مساحت این جنگل‌ها را در سال‌های ۱۹۸۶، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶ به ترتیب ۴۸۲/۳، ۴۰۰/۱ و ۹۱۹/۶ هکتار برآورد کردند. پژوهش حاضر نیز مساحت را ۱۰۴۹/۲ هکتار نشان داد. بنابراین بر اساس همه مطالعات ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که روند کاهش مساحت مانگروهای سیریک که تا حدود سال ۲۰۰۰

مشاهده شده تغییر کرده و تا به امروز افزایشی بوده است. مطالعات دانه‌کار و همکاران (۷) در خلیج گواتر نشان داد که مساحت مانگروها در خور باهو ۴۲۳ هکتار و در خور گواتر ۱۳۷/۲ هکتار و در مجموع ۵۶۰/۲ هکتار بوده است. در مطالعه حاضر نیز این جنگل‌ها در خورهای باهو و گواتر به ترتیب ۴۷۰/۴ و ۱۷۹/۱ هکتار و در مجموع حدود ۶۴۹/۵ هکتار برآورد شدند. در این رویشگاه نیز می‌توان روند افزایشی مساحت مانگروها در سال‌های اخیر را مشاهده نمود. البته باید اذعان کرد که ممکن است تفاوت مشاهده شده در مساحت‌ها به نوع داده مورد استفاده (مانند لندست، IRS) و همچنین روش کار (مانند شاخص‌های NDVI، RVI، SMRI) مربوط باشد که این موضوع بر روندهای مشاهده شده تأثیر دارد. لذا پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده تغییرات مساحت مانگروها در هر رویشگاه تحت شرایط یکسان در بازه زمانی بلندمدت و با یک روش کار ثابت مورد ارزیابی قرار گیرد تا بتوان از نحوه روند دقیق تغییرات اطلاع پیدا کرد.

به‌طورکلی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که شاخص SMRI روی تصاویر ماهواره لندست ۸ در میان شاخص‌های مانگرو که تاکنون ارائه شدند از کارایی بیشتری در طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو در خلیج نایبند، سیریک و خلیج گواتر را داشته است. اگرچه این اشکال به شاخص مذکور وارد است که برای استفاده از آن دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای در شرایط جزر و مد ضروری است. نتایج نشان داد در صورت عدم دسترسی به داده مناسب می‌توان از دو شاخص CMRI و MVI استفاده نمود. همچنین استفاده از ROC به همراه سایر معیارهای متداول صحت سنجی امکان مقایسه مؤثرتر عملکرد شاخص‌های مانگرو در مطالعه حاضر را فراهم نمود. علاوه بر این، مساحت جنگل‌های مانگرو در خلیج نایبند (۲۶۰/۱ هکتار)، سیریک (۱۰۴۹/۲ هکتار) و خلیج گواتر (۶۴۹/۵ هکتار) بر اساس تصاویر ماهواره لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۰ برآورد شد و نتایج نشان داد رویشگاه سیریک در بین این سه رویشگاه دارای بیشترین مساحت تحت پوشش جنگل مانگرو بوده است.

تقدیر و تشکر

کشور در سال ۱۳۹۹ با کد ۹۸۰۲۵۵۶۸ است که با حمایت آن صندوق اجرا شده است. همچنین از سردبیر محترم و داوران گرامی برای بهبود نسخه اولیه مقاله قدردانی می‌شود.

این مقاله بخشی از دستاوردهای طرح تحقیقاتی با عنوان ارزیابی کمی جنگلهای مانگرو ایران با استفاده از فنون سنجش از دور مصوب صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران

References

1. Ali A, Nayyar ZA. 2020. Extraction of mangrove forest through Landsat 8 Mangrove Index (L8MI). *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 1132. doi:<https://doi.org/10.1007/s12517-020-06138-4>.
2. Alatorre LC, Sánchez-Andrés R, Cirujano S, Beguería S, Sánchez-Carrillo S. 2011. Identification of mangrove areas by remote sensing: the ROC curve technique applied to the northwestern Mexico coastal zone using Landsat imagery. *Remote Sensing*, 3(8): 1568-1583. doi:<http://doi.org/10.3390/rs3081568>.
3. Amiri N, Sajadi J, Sadough Vanini H. 2011. Application of vegetation indices derived from IRS data for detecting the *Avicennia* forest area near the south Pars Oil Apparatus. *Environmental Sciences*, 8(1): 69-84. (In Persian).
4. Baloloy AB, Blanco AC, Raymund Rhommel RRC, Nadaoka K. 2020. Development and application of a new mangrove vegetation index (MVI) for rapid and accurate mangrove mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166: 95-117. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.001>.
5. Behera MD, Barnwal S, Paramanik S, Das P, Bhattacharya BK, Jagadish B, Roy PS, Ghosh SM, Behera SK. 2021. Species-level classification and mapping of a mangrove forest using random forest-Utilisation of AVIRIS-NG and Sentinel data. *Remote Sensing*, 13(11): 2027. <https://doi.org/10.3390/rs13112027>.
6. Bihanta Toosi N, Soffianian A, Fakheran S, Pourmanafi S, Ginzler C, Waser L. 2019. Comparing different classification algorithms for monitoring mangrove cover changes in southern Iran. *Global Ecology and Conservation*, 19: e00662. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00662>.
7. Danekar A, Mahmoudi B, Sabaei M, Ghadirian T, Asadolahi Z, Sharifi N, Petrosian H. 2012. Iran national plan for sustainable mangrove management. *National Forests, Range and Watershed Management Organization*, 624 pp.
8. Diniz C, Cortinhas L, Nerino G, Rodrigues J, Sadeck L, Adami M, Souza-Filho PWM. 2019. Brazilian mangrove status: Three decades of satellite data analysis. *Remote Sensing*, 11: 808. <https://doi.org/10.3390/rs11070808>.
9. Ghandi S, Jones TG. 2019. Identifying mangrove deforestation hotspots in South Asia, Southeast Asia and Asia-Pacific. *Remote Sensing*, 11: 728. <https://doi.org/10.3390/rs11060728>.
10. Gupta K, Mukhopadhyay A, Giri S, Chanda A, Datta Majumdar S, Samanta S, Mitra D, Samal RN, Pattnaik AK, Hazra S. 2018. An index for discrimination of mangroves from non-mangroves using LANDSAT 8 OLI imagery. *MethodsX*, 5: 1129-1139. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.09.011>.
11. Hauser LT, An Binh N, Viet Hoa P, Hong Quan N, Timmermans J. 2020. Gap-free monitoring of annual mangrove forest dynamics in Ca Mau Province, Vietnamese Mekong Delta, using the Landsat-7-8 archives and post-classification temporal optimization. *Remote Sensing*, 12: 3729. <https://doi.org/10.3390/rs12223729>.
12. Heumann BW. 2011. An object-based classification of mangroves using a hybrid decision tree - support vector machine approach. *Remote Sensing*, 3: 2440-2460. <https://doi.org/10.3390/rs3112440>.
13. Jia M, Wang Z, Wang C, Mao D, Zhang Y. 2019. A new vegetation index to detect periodically submerged mangrove forest using single-tide Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 11: 2043. <https://doi.org/10.3390/rs11172043>.
14. Jiang Y, Zhang L, Yan M, Qi J, Fu T, Fan S, Chen B. 2021. High-resolution mangrove forests classification with machine learning using Worldview and UAV hyperspectral data. *Remote Sensing*, 13: 1529. <https://doi.org/10.3390/rs13081529>.
15. Kumar T, Mandal A, Dutta D, Nagaraja R, Dadhwal V. 2019. Discrimination and classification of mangrove forests using EO-1 Hyperion data: a case study of Indian Sundarbans. *Geocarto International*, 34(4): 415-442. <http://doi.org/10.1080/10106049.2017.1408699>.
16. Li W, El-Askary H, Qurban M, Li J, ManiKandan K, Piechota T. 2019. Using multi-indices approach to quantify mangrove changes over the Western Arabian Gulf along Saudi Arabia coast. *Ecological Indicators*, 102: 734-745. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.047>.
17. Liu K, Li X, Shi X, Wang S. 2008. Monitoring mangrove forest changes using remote sensing and GIS data with decision-tree learning. *Wetlands*, 28: 336. <https://doi.org/10.1672/06-91.1>.

18. Long JB, Giri C. 2011. Mapping the Philippines' mangroves forests using Landsat Imagery. *Sensors*, 11: 2972-2981. <https://doi.org/10.3390/s110302972>.
19. Mafi-Gholami D, Baharlouii M, Mahmoudi B. 2017. Mapping area changes of mangroves using RS and GIS (Case study: mangroves of Hormozgan province). *Environmental Sciences*, 15(2): 75-91. (In Persian).
20. Mafi-Gholami D, Zenner E, Jaafari A, Bui D. 2020. Spatially explicit predictions of changes in the extent of mangroves of Iran at the end of the 21st century. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 237: 106644. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106644>.
21. Makowski C, Finkl C. 2018. Threats to mangrove forests. Springer USA, 724 pp.
22. Maurya K, Mahajan S, Chaube N. 2021. Remote sensing techniques: mapping and monitoring of mangrove ecosystem-a review. *Complex & Intelligent Systems*. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00457-z>.
23. Razali SM, Nuruddin AA, Lion M. 2019. Mangrove vegetation health assessment based on remote sensing indices for Tanjung Piai, Malay Peninsular. *Journal of Landscape Ecology*, 12: 26-40. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2019-0008>.
24. Shi T, Liu J, Hu Z, Liu H, Wang J, Wu G. 2016. New spectral metrics for mangrove forest identification. *Remote Sensing Letters*, 7(9): 885–894. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1195935>.
25. Taghizadeh A, Danehkar A, Kamrani E, Mahmoudi, B. 2010. Mangrove forest communities in Hormozgan province. *Journal of Forest*, 1: 25-34. (In Persian).
26. Xia Q, Qin C, Li H, Huang C, Su F. 2018. Mapping mangrove forests based on multi-tidal high-resolution satellite imagery. *Remote Sensing*, 10: 1343. <https://doi.org/10.3390/rs10091343>.
27. Xia Q, Qin C, Li H, Huang C, Su F, Jia M. 2020. Evaluation of submerged mangrove recognition index using multi-tidal remote sensing data. *Ecological Indicators*, 113: 106196. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106196>.
28. Wang D, Wan B, Qiu P, Zuo Z, Wang R, Wu X. 2018. Evaluating the performance of Sentinel-2, Landsat 8 and Pléiades-1 in mapping mangrove extent and species. *Remote Sensing*, 10: 1468. <https://doi.org/10.3390/rs10091468>.
29. Winarso G, Purwanto AD, Yuwono DM. 2014. New mangrove index as degradation/health indicator using Remote Sensing data: Segara Anakan and Alas Purwo case study. In *Proceedings of the 12th Biennial Conference of Pan Ocean Remote Sensing Conference*. November 2014, Bali, Indonesia, 309-316.
30. Zhang X, Treitz PM, Chen D, Quan C, Shi L, Li X. 2017. Mapping mangrove forests using multi-tidal remotely-sensed data and a decision-tree-based procedure. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 62: 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.06.010>.



Efficiency of mangrove indices in mapping some mangrove forests using Landsat 8 imagery in southern Iran

Seyed Yousef Erfanifard, Mohsen Lotfi Nasirabad

Received: 20 July 2021 / Received in revised form 4 October 2021 / Accepted: 11 October 2021
Available online 13 October 2021 / Available print 1 January 2023

Abstract

Background and Objective Mangrove forests are one of the important plant ecosystems established across the intertidal zones and consist of evergreen species. According to Food and Agriculture Organization (FAO) reports, the area of world mangrove forests is almost 14.6 million ha and more than 40% of them are located in Asia. Indonesia has the largest mangrove forests with 2.3 million ha with the highest richness. Moreover, Iran with approximately 10,000 ha of mangrove forests in northern parts of the Persian Gulf and Oman Sea is one of the countries with mangrove ecosystems. The ecological and socio-economic importance of mangrove forests is evident to researchers and managers, however, an annual quantitative and qualitative decrease in these forests happens due to natural (e.g., storm) and anthropogenic (e.g., overexploitation) factors. Therefore, it seems essential to develop a practical approach in order to protect the present sites and improve the management, monitoring, and assessment of mangrove forests.

S.Y. Erfanifard (✉)¹, **M. Lotfi Nasirabad**²

1. Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. MSc, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

e-mail: erfanifard@ut.ac.ir

<https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.685675>

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1401.13.4.4.8>

The first step in every management and conservation plan in mangrove forests is mapping their spatial distribution and monitoring the spatial changes. It is important to find efficient methods for mensuration and assessment of temporal and spatial changes of mangrove forests for their efficient management and conservation. Field measurement difficulties in these ecosystems result in the rapid development of remote sensing data in mangrove mapping. However, previous studies have shown that common vegetation indices are not efficient in mangrove classification because of the high greenness and moisture content of leaves. Assessing the spectral signature of mangrove forests, researchers have designed specific indices for mangrove classification on satellite imagery. Since the mangrove indices have been recently developed, their efficiency in similar conditions has not been investigated, while they have been compared to some vegetation indices or individually investigated in case studies. Additionally, the mangrove indices have not been applied in mapping mangrove forests of southern Iran. Therefore, the aim of this study was a comparison of eight mangrove indices in mapping mangrove forests of Nayband Gulf (Bushehr province), Sirik (Hormozgan province), and Govatr Gulf (Sistan-Baluchestan province) on Landsat 8 imagery.

Materials and Methods Previous studies have shown that mangrove forests in Iran are distributed in 21 sites in 10 cities in Bushehr, Hormozgand, and Sistan-Baluchestan provinces. In order to assess the mangrove indices, a region was selected in each province. Mangroves in Nayband Gulf are concentrated in Bidkhun and Basatin Creeks. In Sirik, mangroves are located in the Azini wetland, and in Govatr Gulf, they are established in Baho and Govatr Creeks. Low- and high-tide Landsat imagery of each study area related to 2020 was downloaded. After pre-processing, the images were used to compute MI (Mangrove Index), NDMI (Normalized Difference Mangrove Index), CMRI (Combined Mangrove Recognition Index), MDI (Mangrove Discrimination Index), MMRI (Modular Mangrove Recognition Index), L8MI (Landsat 8 Mangrove Index), and MVI (Mangrove Vegetation Index). Moreover, low- and high-tide images were implemented in making SMRI (Submerged Mangrove Recognition Index). The classification of soil, water, and mangrove was performed by a support vector machine (SVM) algorithm. In addition to common accuracy criteria (i.e., overall accuracy, Kappa coefficient, mangrove producer's and user's accuracies), the results were evaluated by area under the curve (AUC) of receiver operating characteristic (ROC).

Results and Discussion The efficiency of 10 mangrove indices was evaluated in similar conditions. The number of selected indices was eight; however, two of them (i.e., L8MI, MDI) were calculated two times, once with SWIR1 and once with SWIR2, and in total, 10 mangrove indices were used in three regions to classify mangrove forests. Between the indices, SMRI was selected as the most efficient mangrove index. One of the likely reasons for the efficiency of the index can be the application of low- and high-tide imagery to detect mangroves. In addition to PA_{mangrove} and UA_{mangrove} , the overall accuracy and kappa

coefficient of soil, water, and mangrove of SMRI were more than other indices. The results of MDI and L8MI showed that they were more efficient with SWIR2 in Nayband Gulf. One of the reasons that likely caused the result can be urban areas and non-mangrove vegetation cover in Nayband Gulf. However, both indices were more accurate in mangrove discrimination when calculated with SWIR1 in Govatr Gulf. Investigation of AUC values proved that SMRI was the most efficient index between all studied indices in mangrove mapping within three study areas. The AUC of mangroves in Nayband Gulf, Sirik, and Govatr Gulf were 0.94, 0.92, and 0.93, respectively. The area of mangrove forests was estimated in Nayband Gulf (260.1 ha), Sirik (1049.2 ha), and Govatr Gulf (649.5 ha) using SMRI.

Conclusion In general, the results showed that all mangrove indices were reliable in mangrove discrimination in three study areas and no weak results were achieved. The AUC values of mangroves using SMRI were more than 0.9 in three regions and the index was known as the most reliable index in all regions. The outcome in the study areas revealed that the efficiency of mangrove indices was less in Nayband Gulf compared to two other regions (The AUC of 0.6 for NDMI and L8MI-1). The area of mangrove forests in Nayband Gulf, Sirik, and Govatr Gulf was estimated on Landsat 8 imagery of 2020. The results indicated that between the study sites Sirik (1049.2 ha) and Basatin Creek (43.3 ha) had the highest and the lowest area covered by mangroves. It is suggested to use SMRI in other mangrove forests in southern Iran to approve the achievements of the present study.

Keywords: *Avicennia marina*, Nayband Gulf, Govatr Gulf, Sirik, Support vector machine, Receiver operating characteristic curve