

مقایسه شاخص‌های پوشش گیاهی و مانگرو در تهیه نقشه جنگل‌های مانگرو روی تصاویر ستینل ۲ مبتنی بر سامانه Google Earth Engine

سید یوسف عرفانی فرد^{۱*} و محسن لطفی نصیر آباد^۲

*- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. پست الکترونیک: erfani@ut.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۶

چکیده

تهیه نقشه جنگل‌های مانگرو، نیازمند دسترسی به شاخص‌های کارآمدی است که مانگروها را از پدیده‌های دیگر روی تصاویر سنجش از دور شناسایی کنند. امروزه، مجموعه‌ای متنوع از شاخص‌های پوشش گیاهی و مانگرو در دسترس است که ارزیابی مقایسه‌ای کارایی آن‌ها، ضروری به نظر می‌رسد. پژوهش پیش‌رو با هدف مقایسه کارایی شش شاخص پوشش گیاهی و هفت شاخص مانگرو مختص استفاده روی تصاویر ستینل ۲ در خلیج ناپیند (استان بوشهر)، سیریک (استان هرمزگان) و خلیج گواتر (استان سیستان و بلوچستان) انجام شد تا روشی کارآمد در نقشه‌برداری از مانگروها در سامانه محاسبه ابری Google Earth Engine (GEE) به دست آید. تصاویر شاخص‌ها با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان طبقه‌بندی شدند. نقشه مانگروها علاوه بر معیارهای متداول صحت‌سنجی، با استفاده از سطح زیر منحنی (AUC) مشخصه نسبی عملکرد (ROC) نیز ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که شاخص‌های مانگرو، عملکرد بهتری نسبت به شاخص‌های پوشش گیاهی در نقشه‌برداری جنگل‌های مانگرو داشتند. از بین شاخص‌های پوشش گیاهی، بیشترین AUC (۰/۹۱ تا ۰/۹۲) متعلق به MCARI (Modified Chlorophyll Absorption in) بود، در حالی که بین شاخص‌های مانگرو، بیشینه AUC (۰/۹۳ تا ۰/۹۵) در (Mangrove Forest Index) MFI مشاهده شد. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد MFI روی تصاویر ستینل ۲ در سامانه GEE، کارایی مناسبی برای نقشه‌برداری از جنگل‌های مانگرو در مناطق مورد پژوهش دارد.

واژه‌های کلیدی: حرا، شاخص مانگرو، ماشین بردار پشتیبان، منحنی مشخصه نسبی عملکرد.

مقدمه

گزارش سازمان خواروبار جهانی (FAO) از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ بیشتر از ده هزار کیلومتر مربع (معادل ۶/۶ درصد) از سطح مانگروهای جهان کاسته شد (FAO, 2020). مانگروها از یک سو در بخش‌هایی مستقر می‌شوند که دسترسی به آن‌ها دشوار و در برخی موارد غیرممکن است. از سوی دیگر، در زمان مد دریا، بخشی از آن‌ها به زیر آب می‌رود.

جنگل‌های مانگرو، مجموعه‌ای متنوع از خدمات بوم‌شناختی و اقتصادی اجتماعی را ارائه می‌دهند (Baloloy *et al.*, 2020; Binh *et al.*, 2022). با وجود اهمیت زیاد این بوم‌سازگان‌های با ارزش از جنبه‌های مختلف، گستره آن‌ها در بسیاری از مناطق دنیا روبه‌کاهش است. براساس

محدودتر است. پژوهش‌های پیشین نیز نشان داده‌اند که تصاویر سنتینل ۲ به دلیل برخورداری از تفکیک‌پذیری طیفی و مکانی مطلوب، کارایی بیشتری نسبت به لندست دارند. به‌عنوان مثال، Valderrama-Landeros و همکاران (۲۰۱۸) با مقایسه NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) به‌دست‌آمده از لندست و سنتینل ۲، کارایی بیشتر سنتینل ۲ در شناسایی مانگروها را تأیید کردند. همچنین، Wang و همکاران (۲۰۱۸) با مقایسه تصاویر لندست، سنتینل ۲ و Pléiades نشان دادند که عملکرد سنتینل ۲ در تهیه نقشه مانگروها، بهتر از لندست است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تصاویر سنتینل ۲، کارایی لازم برای نقشه‌برداری از مانگروها را دارند. اگرچه این موضوع باتوجه به دسترسی به روش‌های تحلیل جدید که به‌تازگی توسعه یافته‌اند، به بررسی بیشتری نیاز دارد.

یکی از راهکارهای متداول در استخراج اطلاعات از داده‌های سنجنش از دور درمورد انواع پوشش‌های گیاهی، استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی است که به‌مراتب از تحلیل جداگانه باندهای تصویر کارآمدتر هستند. شاخص‌های پوشش گیاهی پرکاربرد مانند NDVI (Gupta et al., 2018; Diniz et al., 2019)، SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) (Xia et al., 2020) و EVI (Enhanced Vegetation Index) (Wang et al., 2018) در شناسایی مانگروها روی تصاویر ماهواره‌ای به‌کار برده شده‌اند. Muhsoni و همکاران (۲۰۱۸) از شاخص‌های NDVI، NDWI (Normalized Difference Water Index) و SAVI برای تعیین گستره مانگروها روی تصاویر سنتینل ۲ استفاده کردند. همچنین، Baloloy و همکاران (۲۰۲۱) از دو شاخص MCARI (Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index) و MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) برای شناسایی جنگل‌های مانگرو روی داده‌های سنتینل ۲ بهره گرفتند. MCARI با هدف برآورد میزان کلروفیل برگ ذرت روی تصاویر لندست طراحی شد (Daughtry et al., 2000)، اما کارایی آن در شناسایی

به این دلایل داده‌برداری میدانی، راهکار مناسبی برای کسب اطلاعات کمی و کیفی از آن‌ها نیست (Xia et al., 2020; Yang et al., 2022). از این رو، داده‌های سنجنش از دور به‌عنوان ابزاری کارآمد در پژوهش‌های جنگل‌های مانگرو به‌سرعت توسعه یافته‌اند. امروزه، برآورد سطح جنگل‌های مانگرو در مقیاس‌های جهانی و محلی مبتنی بر تصاویری هستند که ماهواره‌هایی مانند لندست در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهند. به‌عنوان مثال، Bunting و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از تصاویر لندست و داده‌های ALOS PALSAR سامانه‌ای طراحی کردند و سطح جنگل‌های مانگروی کل دنیا را در سال ۲۰۱۰ حدود ۱۳۷۶۰۰ کیلومتر مربع برآورد کردند. در گزارش اخیر FAO، مساحت مانگروهای جهان براساس تصاویر ماهواره‌ای در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ به‌ترتیب حدود ۱۴۹۳۰۰ و ۱۴۷۸۰۰ کیلومتر مربع برآورد شده است (FAO, 2020). امروزه با پیشرفت علم سنجنش از دور در زمینه جمع‌آوری داده (تصاویر با تفکیک‌پذیری مکانی، زمانی، طیفی و رادیومتریک بیشتر) و نیز تحلیل آن‌ها (دسترسی به سامانه Google Earth Engine یا GEE)، دسترسی به نقشه‌های جهانی جنگل‌های مانگرو، نسبت به گذشته ساده‌تر شده است (Bunting et al., 2018). اگرچه این نقشه‌ها در مقیاس جهانی مناسب هستند، اما کارایی لازم را در مقیاس منطقه‌ای ندارند، بنابراین به‌منظور مدیریت کارآمد جنگل‌های مانگرو در مقیاس منطقه‌ای، نقشه‌برداری از آن‌ها با استفاده از روش‌های تحلیل قابل‌اطمینان روی داده‌های سنجنش از دور، ضروری است.

از میان داده‌های سنجنش از دور در دسترس، تصاویر ماهواره لندست به‌دلیل آرشپو طولانی‌مدت، کاربرد بیشتری نسبت به داده‌های دیگر در نقشه‌برداری از جنگل‌های مانگرو داشته‌اند و کارایی آن‌ها تأیید شده است (Mafi et al., 2019; Tabatabaie & Amiri, 2017; Gholami et al., 2017). علاوه بر لندست، محصولات ماهواره سنتینل نیز به‌طور رایگان در دسترس است و می‌توان از آن‌ها در برآورد گستره جنگل‌های مانگرو بهره برد. با این حال، آرشپو این داده‌ها (از سال ۲۰۱۵ تاکنون) در مقایسه با لندست

قرار گرفت. شاخص CMRI نیز برای استفاده روی داده‌های لندست طراحی شد. هرچند Chen (۲۰۲۰) نشان داد که کارایی شاخص مذکور روی تصاویر سنتینل ۲ برای شناسایی مانگروها در مقایسه با NDVI بیشتر است. همچنین، کارایی شاخص‌های MDI و WFI روی تصاویر سنتینل ۲ در تعیین گستره مانگروها تأیید شده است (Wang et al., 2018). MFI یکی از معدود شاخص‌های مانگرو است که به‌طور ویژه برای استفاده روی تصاویر سنتینل ۲ ارائه شده است (Jia et al., 2019). علاوه بر این، Baloloy و همکاران (۲۰۲۰) با ابداع شاخص MVI، کاربرد آن را در هر دو تصاویر لندست و سنتینل ۲ تأیید کردند. ارزیابی مقایسه‌ای شاخص‌های مانگرو مربوط به داده‌های سنتینل ۲ به‌منظور آگاهی از کارایی آن‌ها، ضروری به‌نظر می‌رسد.

جنگل‌های مانگرو در جنوب ایران و در سواحل شمالی خلیج فارس و دریای عمان مستقر هستند. با توجه به پژوهش‌های پیشین (Danehkar et al., 2012; Makowski & Finkl, 2018)، 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* (Forssk.) Vierh.) گونه غالب جنگل‌های مانگرو ایران است که تقریباً در بیشتر مناطق، توده‌های خالص را تشکیل داده است. فقط در سیریک و جاسک می‌توان توده‌های آمیخته حرا و چنندل (*Rhizophora mucronata* Lam.) را مشاهده کرد (Safiari, 2017). براساس گزارش اخیر FAO، مساحت جنگل‌های مانگرو ایران در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ برابر ۱۹۲۳۰ هکتار بود (FAO, 2020). همچنین در گزارش مذکور، مساحت ۲۵۷۶۰ هکتار برای این جنگل‌ها در سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ آمده است. این تفاوت در برآوردها ممکن است ناشی از تفاوت در نوع داده مورد استفاده و روش‌های طبقه‌بندی باشد، بنابراین به‌منظور مدیریت پایدار این بوم‌سازگان‌ها در جنوب ایران ضروری است که راهکارهای کارآمد برای تهیه نقشه و

مانگروها روی تصاویر سنتینل ۲ نیز تأیید شد (Baloloy et al., 2021). Jia و همکاران (۲۰۱۹) مانگروها را با FAI (Floating Algae Index) و نیز NDVI و MNDWI روی تصاویر سنتینل ۲ طبقه‌بندی کردند. FAI با هدف شناسایی گیاهان شناور روی آب از جمله جلبک‌ها روی تصاویر MODIS ارائه شد، درحالی‌که برای شناسایی مانگروها نیز به‌کار رفت (Jia et al., 2019). اگرچه شاخص‌های پوشش گیاهی ذکرشده در پژوهش‌های دیگری روی مانگروها و با استفاده از تصاویر سنتینل ۲ نیز مدنظر قرار گرفتند (Mondal et al., 2019; Binh et al., 2022)، اما مقایسه کارایی این شاخص‌های پرکاربرد در شرایط یکسان، کمتر مورد توجه بوده است.

به‌رغم تأیید کارایی شاخص‌های پوشش گیاهی در نقشه‌برداری از مانگروها، برخی پژوهش‌ها (Winarso et al., 2014; Baloloy et al., 2020) نشان دادند که شرایط محیطی مانگروها و استقرار بخشی از آن‌ها در آب باعث می‌شوند که این شاخص‌ها، کارایی لازم را برای تفکیک مانگروها از بقیه پوشش‌های گیاهی و کاربری‌های اراضی نداشته باشند. براساس نتایج پژوهش Baloloy و همکاران (۲۰۲۰)، بازتاب طیفی مانگروها در سه محدوده طیفی سبز (باند ۳)، NIR (باند ۸) و SWIR (باند ۱۱) در تصاویر سنتینل ۲ به‌طور چشمگیری کمتر از انواع پوشش گیاهی دیگر است. محتوای آب زیاد و نیز کلروفیل برگ‌ها در مانگروها می‌توانند از دلایل جذب بیشتر در محدوده‌های طیفی ذکرشده نسبت به انواع دیگر پوشش گیاهی باشند (Baloloy et al., 2020). از این‌رو، پژوهشگران تصمیم به ارائه شاخص‌های ویژه‌ای گرفتند که فقط برای شناسایی مانگروها طراحی شدند. نخستین شاخص مانگرو توسط Winarso و همکاران (۲۰۱۴) با نام MI (Mangrove Index) برای استفاده روی تصاویر لندست با استفاده از محدوده‌های طیفی NIR و SWIR ارائه شد. اگرچه آن‌ها بر کارایی شاخص مذکور روی تصاویر همه ماهواره‌ها تأکید داشتند. از آنجایی‌که محدوده طیفی مورد استفاده در MI در تصاویر سنتینل ۲ نیز وجود دارد، در پژوهش پیش‌رو مدنظر

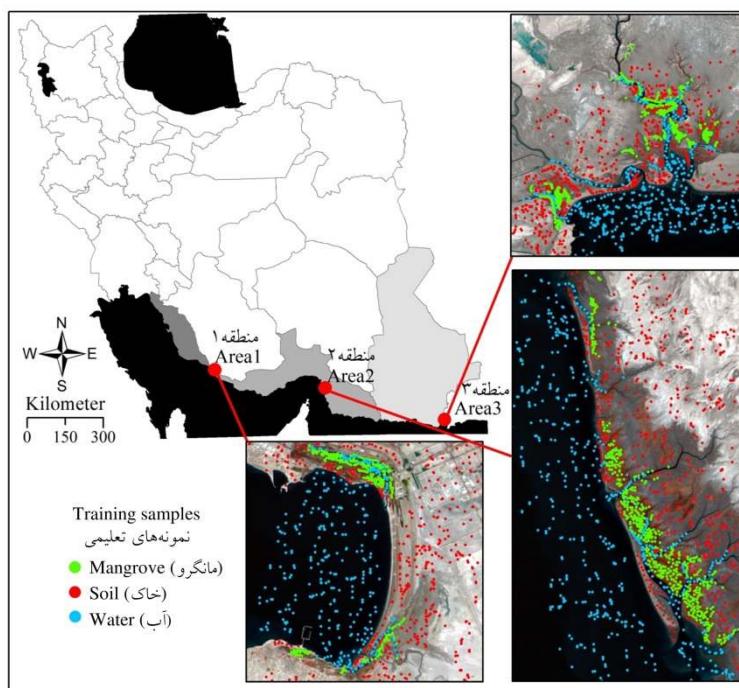
(استان بوشهر)، سیریک (استان هرمزگان) و خلیج گواتر (استان سیستان و بلوچستان) انتخاب شدند (شکل ۱). پارک ملی نایبند، یکی از مناطق حفاظت شده سازمان حفاظت محیط زیست با وسعت حدود ۵۰۰ کیلومتر مربع است. جنگل‌های مانگرو در خلیج نایبند (مختصات جغرافیایی: $10^{\circ} 40' 52''$ طول شرقی و $27^{\circ} 27' 29''$ عرض شمالی) در دو قسمت خور بیدخون در بخش شمالی ($83/3$ هکتار) و خور بساتین در بخش جنوبی ($48/6$ هکتار) پراکنده شده‌اند. مجموع جنگل‌های مانگرو در پارک ملی نایبند $131/9$ هکتار گزارش شده است. در حدود ۲۰ کیلومتری جنوب بندر سیریک در استان هرمزگان، منطقه حفاظت شده حرا رود گز (مختصات جغرافیایی: $26^{\circ} 46' 5''$ طول شرقی و $19^{\circ} 7' 26''$ عرض شمالی) با مساحت حدود ۲۷۰ کیلومتر مربع قرار دارد. مساحت جنگل‌های مانگرو در این منطقه حفاظت شده و تالاب بین‌المللی حدود $658/6$ هکتار است. منطقه حفاظت شده باهوکلان (گاندو) با مساحت حدود ۴۵۶۰ کیلومتر مربع در استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. خلیج گواتر (مختصات جغرافیایی: $31^{\circ} 34' 6''$ طول شرقی و $13^{\circ} 40' 25''$ عرض شمالی) نیز در ۸۵ کیلومتری بندر چابهار و در جنوب این منطقه حفاظت شده قرار دارد. حدود ۳۰ درصد از این خلیج در داخل مرز ایران است و ۷۰ درصد آن در مرز پاکستان قرار دارد. جنگل‌های مانگرو در این منطقه با مساحت کل $560/2$ هکتار، در دو خور باهو (423 هکتار) و گواتر ($137/2$ هکتار) متمرکز هستند. دو منطقه خلیج نایبند و خلیج گواتر به‌طور خالص از حرا پوشیده شده‌اند. هرچند می‌توان پایه‌هایی از چندل را در کنار توده‌های حرا در سیریک مشاهده کرد (Danekar et al., 2012; Makowski & Finkl, 2018).

برآورد دقیق مساحت جنگل‌های مانگرو مبتنی بر شاخص‌های جدید روی تصاویر سنتینل ۲ ارزیابی شوند. چنانچه اشاره شد، شاخص‌های مانگرو مانند MFI و MVI که برای استفاده بر روی تصاویر سنتینل ۲ طراحی شده‌اند، از تنوع برخوردار هستند و کارایی هرکدام در برخی پژوهش‌ها (به‌عنوان مثال، MFI در پژوهش Jia و همکاران، ۲۰۱۹ و MVI در پژوهش Baloloy و همکاران، ۲۰۲۰) تأیید شده است. اگرچه کارایی این شاخص‌ها در کمتر پژوهشی در شرایط یکسان ارزیابی شده است (مانند مقایسه عملکرد CMRI و NDVI توسط Chen (۲۰۲۰))، بنابراین سؤال پژوهش پیش‌رو این است که کدام‌یک از شاخص‌های مانگرو ویژه تصاویر سنتینل ۲ در شرایط یکسان، عملکرد صحیح‌تری در شناسایی مانگروها در جنوب ایران دارند؟ این پژوهش با هدف مقایسه شاخص‌های پرکاربرد پوشش گیاهی و مانگرو طراحی شده برای تصاویر سنتینل ۲ انجام شد. چنانچه کارایی هفت شاخص مانگرو و شش شاخص پوشش گیاهی که تاکنون روی تصاویر سنتینل ۲ به‌کار رفته‌اند، در خلیج نایبند (استان بوشهر)، سیریک (استان هرمزگان) و خلیج گواتر (استان سیستان و بلوچستان) بررسی شدند. همچنین، مساحت مانگروها در سه منطقه مورد پژوهش برآورد شد و با نتایج پژوهش‌های پیشین مقایسه شدند. کاربرد کمتر تصاویر سنتینل ۲ و نحوه عملکرد شاخص‌های مانگرو روی این داده‌ها، ازجمله دلایلی هستند که ضرورت پژوهش پیش‌رو را مشخص می‌کنند.

مواد و روش‌ها

مناطق مورد پژوهش

باتوجه به گستردگی پراکنش مانگروها در ایران از استان‌های بوشهر تا سیستان و بلوچستان، در پژوهش پیش‌رو رویشگاه‌های مانگرو در سه منطقه خلیج نایبند



شکل ۱- رویشگاه‌های مانگرو در خلیج نایبند، استان بوشهر (منطقه ۱)، سیریک، استان هرمزگان (منطقه ۲) و خلیج گواتر، استان سیستان و بلوچستان (منطقه ۳) و نمونه‌های تعلیمی مورد استفاده در هر منطقه ترکیب رنگی کاذب از باندهای ۳، ۴ و ۸ در تصاویر سنتینل ۲ به دست آمده است.

Figure 1. Mangrove sites in Nayband, Bushehr Province (Area1), Sirik, Hormozgan Province (Area2) and Govatr, Sistan & Baluchestan Province (Area3) and the training samples used in each area
The color composites were obtained from bands 3, 4 and 8 of Sentinel-2 images.

پس از بررسی دقیق آرشیو داده‌های سنتینل ۲ در سال ۲۰۲۱، تصاویر جزر با حداقل ابر از مناطق مورد مطالعه انتخاب شدند. از آنجایی که در این پژوهش، سه منطقه جداگانه بررسی شده است، بنابراین از سه تصویر جداگانه نیز استفاده شد که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آمده است. با توجه به باندهای مورد نیاز در محاسبه شاخص‌های مورد نظر در پژوهش پیش‌رو، باندهای ۳ تا ۸a، ۱۱ و ۱۲ با تفکیک‌پذیری مکانی ۱۰ و ۲۰ متر در نظر گرفته شدند و باندهای دیگر حذف شدند. به منظور افزایش دقت نقشه‌برداری، باندهای با تفکیک‌پذیری مکانی ۲۰ متر (باندهای ۵، ۶، ۷، ۸a، ۱۱، ۱۲) با استفاده از بازنمونه‌گیری به روش میانگین‌گیری به ۱۰ متر تبدیل شدند (Bunting *et al.*, 2022).

تصاویر سنتینل ۲
تصاویر تحت عنوان سنتینل ۲ توسط دو ماهواره سنتینل A2 (تاریخ پرتاب ۲۳ ژوئن ۲۰۱۵) و سنتینل B2 (تاریخ پرتاب ۷ مارس ۲۰۱۷) ثبت می‌شوند. این ماهواره‌ها با ۱۳ باند، تصاویری چندطیفی ثبت می‌کنند و تفکیک‌پذیری مکانی آن‌ها بین ۱۰ تا ۶۰ متر است. تصاویر مورد استفاده از نظر هندسی و رادیومتریک تصحیح شده‌اند و در سامانه GEE در دسترس هستند. در پژوهش‌های پیشین (Jia *et al.*, 2019; Baloloy *et al.*, 2020) تأکید شده است که به وضعیت مانگروها در زمان ثبت تصویر توجه شود و تأثیر مد بر غرقابی شدن بخشی از مانگروها روی تصاویر سنجش از دور حتماً مدنظر قرار گیرد. در غیر این صورت، برآورد مساحت مانگروها، خطا خواهد داشت. در پژوهش پیش‌رو

جدول ۱- تصاویر سنتینل ۲ مورد استفاده در هر منطقه مورد پژوهش

Table 1. Sentinel-2 images used in each study site

منطقه Study area	تصویر (Image)	تاریخ تصویر (Date)	شناسه تصویر (Tile ID)
منطقه ۱ (خلیج نایبند، استان بوشهر) Area1 (Nayband, Bushehr Province)	Sentinel-2A	۲۳ اکتبر ۲۰۲۱ (23 Oct. 2021)	T39RXL
منطقه ۲ (سیریک، استان هرمزگان) Area2 (Sirik, Hormozgan Province)	Sentinel-2B	۱۵ اکتبر ۲۰۲۱ (15 Oct. 2021)	T40REQ
منطقه ۳ (خلیج گواتر، استان سیستان و بلوچستان) Area3 (Govatr, Sistan & Baluchestan Province)	Sentinel-2A	۲۹ اکتبر ۲۰۲۱ (29 Oct. 2021)	T41RLH

جدول ۲- شاخص‌های پوشش گیاهی و مانگرو ارزیابی شده در پژوهش پیش‌رو

Table 2. Vegetation- and Mangrove indices investigated within the present study

شماره No.	شاخص Index	رابطه Equation	منبع Reference
1	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(NIR-Red)/(NIR+Red)$	
2	SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)	$((NIR-Red)(1+L))/(NIR+Red+L)$	Gupta <i>et al.</i> (2018)
3	NDWI (Normalized Difference Water Index)	$(Green-NIR)/(Green+NIR)$	
4	MCARI (Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index)	$[(R700-R670)-0.2(R700-R550) \times (R700/R670)]$	Daughtry <i>et al.</i> (2000)
5	MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index)	$(Green-MIR)/(Green+MIR)$	Diniz <i>et al.</i> (2019)
6	FAI (Floating Algae Index)	$\{p860-[p1240+(p660-p1240) \times (1240-860)/(1240-660)]\}$	Jia <i>et al.</i> (2019)
7	MI (Mangrove Index)	$(NIR-SWIR/NIR \times SWIR) \times 10000$	Winarso <i>et al.</i> (2014)
8	CMRI (Combined Mangrove Recognition Index)	NDVI - NDWI	Gupta <i>et al.</i> (2018)
9	MDI (Mangrove Discrimination Index)	$(NIR-SWIR1)/SWIR1$	Wang <i>et al.</i> (2018)
10	WFI (Wetland Forest Index)	$(NIR-Red)/SWIR2$	
11	MMRI (Modular Mangrove Recognition Index)	$(MNDWI - NDVI)/(MNDWI + NDVI)$	Diniz <i>et al.</i> (2019)
12	MFI (Mangrove Forest Index)	$[(\rho\lambda1-\rho B\lambda1)+(\rho\lambda2-\rho B\lambda2)+(\rho\lambda3-\rho B\lambda3)+(\rho\lambda4-\rho B\lambda4)]/4$	Jia <i>et al.</i> (2019)
13	MVI (Mangrove Vegetation Index)	$NIR-Green/SWIR1-Green$	Baloloy <i>et al.</i> (2020)

شاخص‌های پرکاربرد پوشش گیاهی به‌منظور تهیه نقشه مانگروها روی داده‌های سنجنش از دور انتخاب شدند (رابطه‌های ۱ تا ۶، جدول ۲). بررسی پیشینه پژوهش با

شاخص‌های پوشش گیاهی و مانگرو

باتوجه به پژوهش‌های پیشین (Jia *et al.*, 2019; Mondal *et al.*, 2019; Baloloy *et al.*, 2021).

الگوریتم SVM استفاده شد. در این الگوریتم، انتخاب کرنل ضروری است. با توجه به پژوهش‌هایی مانند Xia و همکاران (۲۰۲۲)، از کرنل RBF استفاده شد. علاوه بر کرنل، پارامتر جریمه (Penalty) نیز باید تعیین شود که بر عملکرد SVM تأثیرگذار است. در پژوهش پیش‌رو، پارامتر جریمه ۱۰۰ به‌کار برده شد که توسط Heumann (۲۰۱۱) نیز استفاده شده بود.

به‌منظور کاربرد الگوریتم SVM، در هر منطقه حدود ۳۶۰۰ پیکسل به‌عنوان نمونه تعلیمی با توزیع مناسب در تمام محدوده مناطق مورد نظر (طبقه جنگل مانگرو ۱۱۷۰ پیکسل، طبقه خاک ۱۴۳۰ پیکسل، طبقه آب ۱۰۰۰ پیکسل) روی تصاویر GoogleEarth به‌طور تصادفی انتخاب شدند (شکل ۱). لازم به توضیح است که تصاویر ۱۳ شاخص مورد بررسی در هر منطقه مورد مطالعه با یک مجموعه نمونه تعلیمی ثابت طبقه‌بندی شدند. از ۷۰ درصد نمونه‌ها برای آموزش الگوریتم و از ۳۰ درصد باقی‌مانده برای ارزیابی صحت نتایج استفاده شد (Baloloy et al., 2020).

ارزیابی صحت

به‌منظور صحت‌سنجی شاخص‌های پوشش گیاهی و مانگرو از معیارهای متداول شامل صحت کلی، صحت تولیدکننده، صحت کاربر طبقه مانگرو و ضریب کاپا (K) استفاده شد (جدول ۳). K که برای ارزیابی دقیق‌تر صحت نقشه‌های حاصل به‌کار گرفته شد، توافق شانسی را از صحت کلی نقشه‌های تولیدشده به‌روشنی راقومی و خودکار حذف می‌کند (Congalton & Green, 2019). علاوه بر معیارهای صحت‌سنجی اشاره‌شده، منحنی مشخصه نسبی عملکرد (ROC) برای ارزیابی کارایی هرکدام از شاخص‌های مانگرو در شناسایی مانگروها در مناطق مورد پژوهش نیز استفاده شد. این معیار در یک فضای دوبعدی رسم می‌شود که محور طولی آن «ویژگی-۱» (رابطه ۵) و محور عرضی آن «حساسیت» (رابطه ۶) است (جدول ۳). در دو رابطه ۵ و ۶، هرچه مقدار انحراف از خط مبنا برای یک طبقه خاص در

موضوع شناسایی جنگل‌های مانگرو روی داده‌های سنتینل ۲ با استفاده از شاخص‌های مانگرو نشان داد که تاکنون شش شاخص برای نقشه‌برداری جنگل‌های مانگرو روی تصاویر سنتینل ۲ ارائه و تأیید شده‌اند (رابطه‌های ۸ تا ۱۳ در جدول ۲). Xia و همکاران (۲۰۲۲) نیز بر ارزیابی کارایی MI روی تصاویر سنتینل ۲ تأکید داشتند که این شاخص نیز در پژوهش پیش‌رو در نظر گرفته شد (رابطه ۷، جدول ۲).

الگوریتم طبقه‌بندی

از آنجایی که پژوهش پیش‌رو در سامانه GEE انجام شد، تصاویر ۱۳ شاخص مورد بررسی در همان سامانه به سه طبقه آب، خاک و مانگرو طبقه‌بندی شدند. در سامانه GEE بیشتر از ۱۵ روش طبقه‌بندی در دسترس است. در پژوهش‌های پیشین از روش‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای طبقه‌بندی مانگروها روی تصاویر سنتینل ۲ استفاده شده است (Xia et al., 2022). پژوهشگران زیادی از جمله Heumann (۲۰۱۱) و Xia و همکاران (۲۰۲۲) اشاره کردند که الگوریتم SVM به‌عنوان یک روش یادگیری ماشین سریع و کارآمد، برای طبقه‌بندی مانگروها مناسب است. انتخاب یک الگوریتم یادگیری ماشین مناسب براساس پیشینه پژوهش دشوار است. زیرا هر الگوریتم را می‌توان به استناد مقاله‌های پیشین تأیید کرد، اما به‌طورکلی و با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده می‌توان گفت که الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای شناسایی طبقه مانگرو از دو طبقه هدف دیگر در پژوهش پیش‌رو (خاک، آب)، کارایی لازم را دارند (Mondal et al., 2019; Baloloy et al., 2021). بررسی نحوه عملکرد الگوریتم طبقه‌بندی جزء اهداف پژوهش پیش‌رو نبود. براساس هدف اصلی این پژوهش، خروجی همه شاخص‌های مورد نظر در شرایط مشابه (با یک الگوریتم طبقه‌بندی و نمونه‌های تعلیمی یکسان) مقایسه شدند تا تفاوت مشاهده‌شده در نتایج طبقه‌بندی فقط مربوط به کارایی شاخص‌ها باشد، بنابراین در پژوهش پیش‌رو از

طبقه‌بندی غیرقابل قبول، ۰/۶ تا ۰/۷ قابل قبول، ۰/۷ تا ۰/۸ تا متوسط، ۰/۸ تا ۰/۹ خوب و بیشتر از ۰/۹ نشان‌دهنده طبقه‌بندی عالی هستند (Polo & Miot, 2020). در پژوهش پیش‌رو علاوه بر سامانه GEE برای همه محاسبه‌ها، نرم‌افزارهای ArcGIS 10.8 و Excel 2013 نیز برای رسم نقشه‌ها و نمودارها استفاده شدند.

منحنی ROC بیشتر باشد، صحت طبقه‌بندی طبقه مذکور بیشتر است. علاوه بر این، سطح زیر منحنی (AUC) نیز برای مقایسه نتایج به کار برده شد. مقدار AUC به طور معمول بین ۰/۵ (خط یک‌به‌یک نمودار یا خط مبنا) تا یک متغیر است. هر قدر که AUC یک طبقه به یک نزدیک‌تر باشد، طبقه مورد نظر با صحت بیشتری طبقه‌بندی شده است (Alatorre et al., 2011). مقدار AUC بین ۰/۵ و ۰/۶ بیانگر

جدول ۳- معیارهای صحت‌سنجی مورد استفاده در پژوهش پیش‌رو

Table 3. Accuracy assessment criteria used in the present study

شماره No.	معیار Criteria	رابطه Equation	منبع Reference
1	صحت کلی Overall accuracy (OA)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_{ii}$	
2	صحت تولیدکننده Producer's accuracy (PA)	$\frac{n_{jj}}{n_{+j}}$	Congalton & Green (2019)
3	صحت کاربر User's accuracy (UA)	$\frac{n_{ii}}{n_{i+}}$	
4	ضریب کاپا Kappa coefficient (K)	$\frac{P_o - P_c}{1 - P_c}$	
5	ویژگی Specificity (SP)	$\frac{TN}{TN + FP}$	Alatorre et al. (2011)
6	حساسیت Sensitivity (SE)	$\frac{TP}{TP + FN}$	

n = تعداد کل پیکسل‌های طبقه‌بندی شده (Number of all classified pixels)

$\sum n_{ii}$ = مجموع پیکسل‌های قطر اصلی ماتریس خطا (تعداد کل پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده) (Sum of diagonal pixels of the error matrix)

n_{ij} = تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده (بر روی قطر اصلی) (Number of correctly classified pixels)

n_{+j} = جمع تعداد پیکسل‌هایی که به‌عنوان نمونه آموزشی آن طبقه استفاده شده‌اند (جمع ستون) (Sum of training pixels of target class)

n_{i+} = تعداد کل پیکسل‌های طبقه مورد نظر (Total number of pixels of the target class)

P_o = توافق مشاهده نسبی میان ارزیابی‌ها (Relative agreement between comparisons)

P_c = احتمال فرضی توافق شانسی (Probability of chance agreement)

TN = پیکسل‌هایی که به‌درستی به طبقه مورد نظر تخصیص نیافتند (Pixels correctly not assigned to the target class)

FP = پیکسل‌هایی که به‌نادرستی به طبقه مورد نظر تخصیص یافتند (Pixels uncorrectly assigned to the target class)

TP = پیکسل‌هایی که به‌درستی به طبقه مورد نظر تخصیص یافتند (Pixels correctly assigned to the target class)

FN = پیکسل‌هایی که به‌نادرستی به طبقه مورد نظر اختصاص نیافتند (Pixels uncorrectly not assigned to the target class)

نتایج

نتایج ارزیابی صحت ۱۳ شاخص مورد استفاده در جدول ۴ نشان می‌دهند که به‌طور کلی، عملکرد اغلب شاخص‌ها خوب بود ($AUC > 0.8$). از میان شاخص‌های پوشش گیاهی، شاخص‌های MCARI و MNDWI به‌ترتیب بیشترین و کمترین صحت را در سه منطقه داشتند. همچنین، بیشترین و کمترین صحت در بین شاخص‌های مانگرو به‌ترتیب متعلق به MFI و MI بودند. از میان ۱۳ شاخص ارزیابی‌شده، MFI بهترین عملکرد را

در هر سه منطقه داشت. مقایسه کارایی شاخص‌ها براساس PA، UA و AUC مانگرو انجام شد. زیرا هدف این پژوهش، شناسایی مانگروها بود. به‌عنوان مثال، MVI در منطقه ۲ (سیریک، استان هرمزگان)، بیشترین OA (۹۷/۶ درصد) و K (۰/۹۶) را به‌خود اختصاص داد که بیانگر قابلیت این شاخص در تفکیک سه طبقه هدف است. هرچند کارایی آن (PA ۹۳/۶ و UA ۹۹/۷ درصد) در شناسایی مانگروها در مقایسه با MFI (PA ۹۶/۲ و UA ۱۰۰ درصد) کمتر بود (جدول ۴).

جدول ۴- صحت‌سنجی شاخص‌های پوشش گیاهی و مانگرو در طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو روی تصاویر سنتینل ۲ در مناطق مورد پژوهش

Table 4. Accuracy assessment of vegetation- and mangrove indices in mangrove classification on Sentinel-2 imagery within study areas

معیار Criteria	NDVI	SAVI	NDWI	MCARI	MNDWI	FAI	MI	CMRI	MDI	WFI	MMRI	MFI	MVI	
منطقه ۱ (Area1)	PAmangrove	96.8	97.7	93.8	96.4	94.8	98.6	77.8	96	90.6	97.3	96.9	99.2	96.4
	UAmangrove	83.5	97.8	97.7	96.3	63.3	95.7	73.2	93.1	78.2	89.3	80.4	98.4	95.6
	OA	90.1	93.2	93.2	88.4	74.5	93.8	87	92.6	69.4	92.2	76.7	94.4	93.9
	K	0.85	0.89	0.89	0.82	0.57	0.9	0.79	0.88	0.53	0.87	0.64	0.91	0.9
	AUCmangrove	0.92	0.92	0.91	0.92	0.65	0.88	0.83	0.92	0.9	0.92	0.91	0.95	0.92
منطقه ۲ (Area2)	PAmangrove	87.7	92.7	90.9	86.8	59.6	93.9	44.3	71.2	82.7	74.6	85.8	96.2	93.6
	UAmangrove	99	99	99.3	99.3	85.9	100	93.7	87.9	98.6	98.5	69.6	100	99.7
	OA	92.5	95.1	57.5	73.4	83	72.3	24.1	71.8	82.5	69.5	63.6	84	97.6
	K	0.88	0.92	0.4	0.61	0.74	0.59	0.16	0.58	0.74	0.55	0.46	0.76	0.96
	AUCmangrove	0.88	0.89	0.86	0.91	0.85	0.91	0.58	0.85	0.91	0.8	0.89	0.93	0.9
منطقه ۳ (Area3)	PAmangrove	93.3	92.7	91.8	93.3	47.9	87.9	85.7	92.2	83.7	94.1	91	97.5	91
	UAmangrove	97.1	93.8	96.1	96.5	84.6	73.7	84	97.6	71.4	96	92.3	98.1	97.6
	OA	92.2	91.7	92	87.1	74.3	75.8	69.6	92.2	58.9	92.5	85.9	91.4	91.6
	K	0.88	0.87	0.88	0.81	0.61	0.64	0.54	0.88	0.38	0.89	0.79	0.88	0.87
	AUCmangrove	0.89	0.88	0.76	0.91	0.74	0.89	0.88	0.76	0.89	0.91	0.89	0.94	0.86

واحد اندازه‌گیری PA مانگرو، UA مانگرو و OA درصد است. همچنین، K و AUC مانگرو بین صفر و یک تغییر می‌کنند.

PAmangrove, UAmangrove and OA are in percent. Also, K and AUCmangrove are between zero and one.

نداد. از سوی دیگر، پس از MFI در هر منطقه، یک شاخص متفاوت بیشترین صحت را در شناسایی مانگروها داشت. در منطقه ۱ شاخص پوشش گیاهی SAVI (PA ۹۷/۷ درصد)، UA (۹۷/۸ درصد و AUC ۰/۹۲)، در منطقه ۲ شاخص پوشش گیاهی FAI (PA ۹۳/۹ درصد، UA ۱۰۰ درصد و AUC ۰/۹۱) و در منطقه ۳ شاخص مانگرو WFI (PA ۹۴/۱ درصد، UA ۹۶ درصد و AUC ۰/۹۱) مطلوب

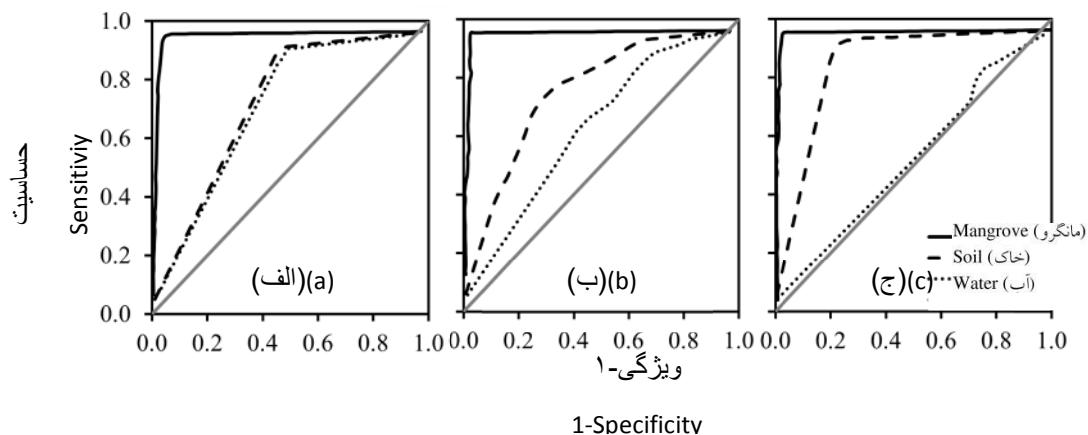
مقایسه نتایج شاخص‌های پوشش گیاهی و مانگرو نشان داد که به‌طور کلی، ویژگی‌های منطقه مورد پژوهش، تأثیر زیادی بر نحوه عملکرد شاخص‌های ارزیابی‌شده داشتند. به‌عنوان مثال، شاخص مانگرو CMRI در منطقه ۱ (خلیج نایبند، استان بوشهر با AUC ۰/۹۲) عملکرد عالی داشت، در حالی که همین شاخص در منطقه ۳ (خلیج گواتر، استان سیستان و بلوچستان با AUC ۰/۷۶) نتایج مطلوبی نشان

بودند (جدول ۴).

۰/۷۴) به مراتب بیشتر از CMRI (۷۱/۸ و ۰/۵۸) بود. این موضوع نشان داد که مقدار زیاد OA و K نمی‌تواند دلیلی بر شناسایی درست طبقه مانگرو باشد (جدول ۴).

نتایج به دست آمده از سطح زیر منحنی ROC طبقه مانگرو (AUC مانگرو) نیز نشان داد که MFI در شناسایی طبقه مانگرو در مناطق مورد بررسی، بهتر از شاخص‌های دیگر مانگرو عمل می‌کند. منحنی ROC نتایج MFI در سه منطقه مورد مطالعه حاکی از آن است که طبقه مانگرو در هر سه منطقه با صحت بیشتری از دو طبقه آب و خاک تفکیک شده است (شکل ۲). این موضوع، تمرکز شاخص مانگرو MFI را در نقشه برداری جنگل‌های مانگرو تأیید می‌کند. همچنین، مقدار AUC مانگرو مربوط به این شاخص در منطقه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۰/۹۵، ۰/۹۳ و ۰/۹۴ به دست آمد. این اعداد، بیشترین مقدار AUC بین شاخص‌های مورد بررسی بودند (جدول ۴). MFI در هر سه منطقه، آب را با صحت بیشتری نسبت به خاک تفکیک کرده است (شکل ۲). مقدار AUC آب در منطقه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۷۳ و ۰/۸۲ به دست آمد، در حالی که مقدار AUC خاک در سه منطقه مذکور به ترتیب ۰/۶۳، ۰/۶۰ و ۰/۵۱ بودند (شکل ۲).

علاوه بر دو نتیجه قبلی، مقایسه صحت نتایج شاخص‌های مورد بررسی نشان داد که در برخی موارد بین PA، UA و AUC مانگرو، همخوانی وجود نداشت. به عنوان مثال در منطقه ۱ با وجود اینکه مقدار AUC برای هر دو شاخص NDWI و MMRI برابر ۰/۹۱ به دست آمد، اما PA و UA آن‌ها متفاوت و متناقض بودند. در NDWI مقدار PA کمتر و مقدار UA بیشتر از MMRI به دست آمد. دو شاخص SAVI و MMRI در منطقه ۲ نیز دارای مقدار AUC مشابه (۰/۸۹) بودند، اما مقدار PA و UA شاخص SAVI بیشتر از MMRI به دست آمد و تناقض قبلی مشاهده نشد. همچنین، دو شاخص NDVI و MDI در منطقه ۳، مقدار AUC مشابهی (۰/۸۹) داشتند، اما مقدار PA و UA شاخص NDVI بیشتر از MDI بودند، بنابراین استفاده از PA و UA به تنهایی کارایی لازم را برای مقایسه نتایج ندارند و ضروری است که منحنی ROC نیز به کار برده شود. همین عدم همخوانی در ارتباط بین صحت طبقه مانگرو و OA و K مشاهده شد. به عنوان مثال، دو شاخص MNDWI و CMRI در منطقه ۲، AUC مشابهی (۰/۸۵) داشتند، اما OA و K در شاخص MNDWI (به ترتیب ۸۳ و

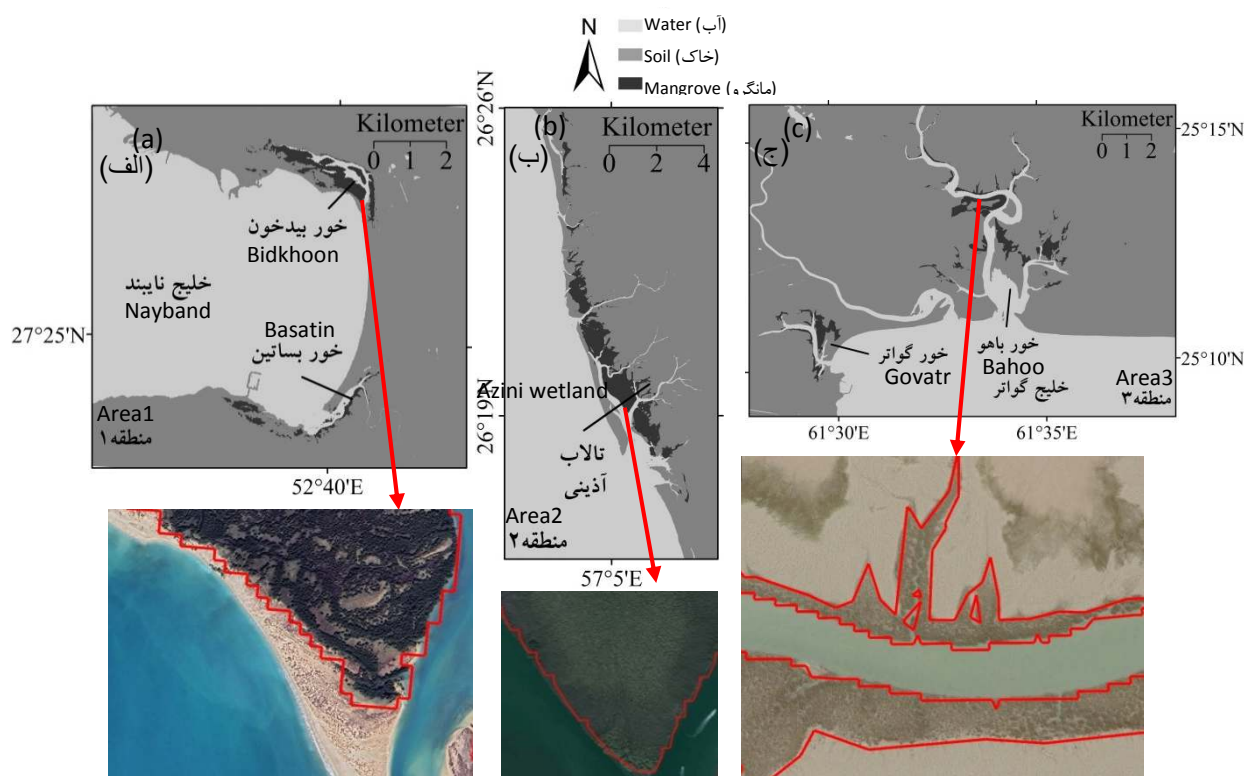


شکل ۲- منحنی ROC طبقه بندی جنگل‌های مانگرو با استفاده از MFI روی تصاویر سنتینل ۲ در منطقه ۱ (الف) خلیج نایبند در استان بوشهر، منطقه ۲ (ب) (سیریک در استان هرمزگان) و منطقه ۳ (ج) خلیج گواتر در استان سیستان و بلوچستان
خط ممتد خاکستری، خط مبنای AUC است.

Figure 2. ROC curve of mangrove classification using MFI on Sentinel-2 imagery in Area1 (a) (Nayband, Bushehr Province), Area2 (Sirik, Hormozgan Province) (b) and Area3 (Govatr, Sistan & Baluchestan Province) (c)
The grey line is the AUC base line.

همچنین، در سیریک حدود ۱۰۸۶/۳ هکتار جنگل مانگرو شناسایی شد که بیشترین مساحت در نزدیکی تالاب آذینی مشاهده شد. در نهایت، مساحت مانگروهای خلیج گواتر حدود ۶۸۰/۲ هکتار به دست آمد که ۴۸۷/۷ هکتار آن در خور باهو و ۱۹۲/۴ هکتار آن در خور گواتر قرار داشت.

در شکل ۳، نتایج طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو در سه منطقه مورد پژوهش با شاخص منتخب MFI نشان داده شده است. مساحت مانگروها در خلیج نایبند در مجموع ۲۶۳/۷ هکتار به دست آمد که حدود ۲۱۹/۲ هکتار آن مربوط به خور بیدخون و ۴۴/۵ هکتار آن مربوط به خور بساتین است.



شکل ۳- نقشه جنگل‌های مانگرو با استفاده از MFI روی تصاویر سنتینل ۲ در منطقه ۱ (الف) (خلیج نایبند در استان بوشهر)، منطقه ۲

(ب) (سیریک در استان هرمزگان) و منطقه ۳ (ج) (خلیج گواتر در استان سیستان و بلوچستان)

تصاویر رنگی مربوط به GoogleEarth برای تفسیر بصری نتایج ارائه شده است.

Figure 3. Mangrove maps using MFI on Sentinel-2 imagery in in Area1 (a) (Nayband, Bushehr Province), Area2 (Sirik, Hormozgan Province) (b) and Area3 (Govatr, Sistan & Baluchestan Province) (c). Colourful images are obtained from GoogleEarth for visual interpretation.

دیگر نیز این موضوع را تأیید کرد که MFI، کارایی لازم را برای شناسایی و تفکیک مانگروها از دو طبقه دیگر مورد بررسی دارد.

به منظور تفسیر بصری طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو با MFI، نتایج در GoogleEarth بررسی و یک پنجره از هر منطقه به عنوان نمونه در شکل ۳ ارائه شد. براساس این شکل، مرزهای جنگل‌های مانگرو با توجه به تفکیک پذیری مکانی تصاویر سنتینل ۲ قابل قبول هستند. بررسی قسمت‌های

بحث

در جنوب ایران، این شاخص نیز مدنظر قرار گیرد. نتایج پژوهش پیش‌رو با دستاوردهای Jia و همکاران (۲۰۱۹) مبنی بر کارایی بیشتر MFI نسبت به NDVI، NDWI و FAI در نقشه‌برداری مانگروها روی تصاویر سنتینل ۲ همخوانی دارد. البته تعداد شاخص‌های مورد مقایسه پژوهش مذکور محدود بود و هیچ‌یک از شاخص‌های مانگرو با MFI مقایسه نشدند، درحالی‌که در پژوهش پیش‌رو، شش شاخص مانگروی دیگر نیز ارزیابی شدند و MFI از همه آن‌ها در هر سه منطقه مورد مطالعه مناسب‌تر بود. با این وجود، ضروری است که عملکرد MFI در رویشگاه‌های دیگر نیز بررسی قرار شود تا بتوان با اطمینان بیشتری نتیجه‌گیری کرد.

با وجود رفتار متفاوت مانگروها در محدوده‌های طیفی سبز، NIR و SWIR به ویژه SWIR1 روی تصاویر سنتینل ۲، نتایج نشان داد که فقط وارد کردن باندهایی از تصویر سنتینل ۲ که این محدوده‌های طیفی را ثبت می‌کنند، تضمین‌کننده صحت زیاد در نقشه‌برداری مانگروها نیست. به‌عنوان مثال، MVI هر سه محدوده طیفی مذکور را دارد، اما نتایج نشان داد که این شاخص، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به برخی شاخص‌ها مانند MFI و MCARI در برخی مناطق داشته است. حال آنکه MFI متمرکز بر باندهای ۵، ۶، ۷ و ۸a است که محدوده لبه قرمز پوشش گیاهی را ثبت می‌کنند. این شاخص از باندهای ۴ و ۱۲ نیز استفاده می‌کند که محدوده طیفی قرمز و SWIR2 را ثبت می‌کنند. در همین راستا، شناسایی مانگروهای چین روی داده‌های ابرطیفی نشان داد که بازتاب مانگروها در محدوده طیفی لبه قرمز، اختلاف زیادی با پدیده‌هایی مانند آب، پوشش گیاهی خشکی‌زی و مناطق انسان‌ساخت دارند (Yang et al., 2022). این موضوع، کارایی بیشتر شاخص MFI در پژوهش پیش‌رو که مبتنی بر محدوده طیفی لبه قرمز است را تأیید می‌کند.

شاخص MI ضعیف‌ترین نتایج را در هر سه منطقه مورد بررسی بین شاخص‌های مانگرو نشان داد. به‌نحوی که AUC مانگرو آن در منطقه ۲ برابر ۰/۵۸ به‌دست آمد که کمترین مقدار بین همه شاخص‌ها در همه مناطق بود. در شاخص

به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص‌های پوشش گیاهی و مانگرو در شرایط یکسان طبقه‌بندی و صحت‌سنجی، عملکرد متفاوتی در سه منطقه مورد مطالعه در جنوب ایران داشتند، بنابراین پیش از کاربرد انواع شاخص‌ها باید نسبت به کارایی آن‌ها در هر منطقه اطمینان حاصل کرد (Jia et al., 2019; Chen, 2020). با توجه به صحت‌سنجی نقشه‌های حاصل از شاخص‌های مختلف، ویژگی‌های محیطی رویشگاه مورد پژوهش به‌احتمال زیاد از عوامل تأثیرگذار بر عملکرد شاخص‌های ارزیابی‌شده هستند. بررسی این موضوع از اهداف پژوهش پیش‌رو نبود. پیشنهاد می‌شود که علت‌های تفاوت در کارایی شاخص‌ها در پژوهش‌های آینده بررسی شوند.

با توجه به نتایج پژوهش پیش‌رو در تهیه نقشه مانگروها روی تصاویر سنتینل ۲، شاخص‌های مانگرو، میانگین صحت بیشتری نسبت به شاخص‌های پوشش گیاهی داشتند. از میان شاخص‌های پوشش گیاهی، بیشترین صحت در نقشه‌های حاصل از MCARI در هر سه منطقه مورد پژوهش مشاهده شد، درحالی‌که از میان شاخص‌های مانگرو، نقشه‌های MFI بیشترین صحت را در شناسایی مانگروها داشتند. براساس نتایج Baloloy و همکاران (۲۰۲۱) نیز MCARI به‌تنهایی برای تهیه نقشه گستره مانگروها روی تصاویر سنتینل ۲ مناسب نیست، بنابراین باید شاخص‌های مانگرو مانند MVI استفاده شوند. در راستای پژوهش‌های پیشین (Jia et al., 2019; Xia et al., 2020)، نتایج این پژوهش نیز نشان داد که کاربرد شاخص‌های مانگرو برای تعیین گستره مانگروها بر روی تصاویر سنتینل ۲ مناسب‌تر از شاخص‌های پوشش گیاهی است.

کاربرد MFI در هر سه منطقه به‌عنوان شاخص مطلوب شناخته شد. تفسیر بصری نتایج در کنار معیارهای صحت‌سنجی نیز این موضوع را تأیید کرد. پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده در خصوص تهیه نقشه مانگروها با استفاده از تصاویر سنتینل ۲ در رویشگاه‌های دیگر مانگرو

استفاده شدند نیز نتایج متناقضی داشتند. چنانچه پیش‌تر اشاره شد، مواردی هستند که با وجود تشابه در AUC مانگرو، دو معیار PA و UA مانگرو، متفاوت و متناقض داشتند. علاوه بر تناقض مشاهده‌شده در شاخص‌های NDWI و MMRI در منطقه ۱ که در بخش نتایج تشریح شد، در منطقه ۳ نیز دو شاخص MDI و MMRI با وجود AUC مانگرو تقریباً مشابه، PA و UA مانگرو کاملاً متفاوتی داشتند. اگر قرار بود که یکی از شاخص‌ها براساس دو معیار اخیر انتخاب شود، به‌طور قطع MMRI ارجحیت داشت. در صورتی‌که صحت این دو شاخص در تشخیص مانگروها روی تصاویر سنتینل ۲ تفاوت چندانی نداشتند، بنابراین ضروری به‌نظر می‌رسد که علاوه بر معیارهای متداول صحت‌سنجی، معیارهایی مانند منحنی ROC نیز باید استفاده شوند. این موضوع در پژوهش‌های پیشین (Alatorre et al., 2011; Bunting et al., 2022) نیز تأکید شده است.

در پژوهش پیش‌رو، اطلاعات مربوط به مساحت جنگل‌های مانگرو در خلیج ناپیند، سیریک و خلیج گواتر براساس تصاویر سنتینل ۲ مربوط به سال ۲۰۲۱ به‌روزرسانی شد. مساحت مانگروهای خور بیدخون و خور بساتین منطقه ۱ در پژوهش‌های پیشین برآورد شدند. Danehkar و همکاران (۲۰۱۲) مساحت مانگروها در مناطق مذکور را به‌ترتیب ۸۳/۳ و ۴۸/۶ هکتار و در مجموع، ۱۳۱/۹ هکتار در سال ۲۰۱۲ برآورد کردند. همچنین، Amiri و همکاران (۲۰۱۱) مساحت جنگل‌های مانگرو در خلیج ناپیند (مجموع مانگروهای دو خور بیدخون و بساتین) را براساس تصاویر IRS در سال ۱۹۹۷ حدود ۳۷۷ هکتار و در سال ۲۰۰۸ حدود ۱۷۱ هکتار گزارش کردند. این موضوع نشان می‌دهد که سطح مانگروها در خلیج ناپیند از سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۲ روند کاهشی داشتند، درحالی‌که طبق نتایج پژوهش پیش‌رو، مجموع مساحت جنگل‌های دو خور مذکور حدود ۲۶۳/۷ هکتار به‌دست آمد که روند افزایش سطح آن‌ها را طی سال‌های اخیر نشان می‌دهد. در صورت تأیید روندهای مذکور در پژوهش‌های آینده باید اقدام‌های لازم نسبت به احیای منطقه مذکور صورت گیرد.

مذکور، یک ضریب تصحیح وجود دارد که متناسب با تفکیک‌پذیری رادیومتریک ۱۲ بیتی داده لندست ۸ توسط سازنده شاخص تعیین شده است. اگرچه تصاویر سنتینل ۲ نیز تفکیک‌پذیری رادیومتریک ۱۲ بیت دارند، اما شاید ضریب تصحیح مذکور برای این داده‌ها مناسب نیست. این موضوع باید در پژوهش‌های آینده، بیشتر بررسی شود.

پژوهش پیش‌رو به‌دنبال تعیین گستره و تهیه نقشه مانگروها در سه منطقه مطالعاتی روی داده‌های سنتینل ۲ بود که این هدف با MFI محقق شد. ممکن است که در پژوهش‌های آینده علاوه بر تهیه نقشه مانگروها، طبقه‌بندی و تعیین بقیه کاربری‌های اراضی نیز مورد نظر پژوهشگران باشد. در چنین شرایطی با توجه به دستاوردهای پژوهش پیش‌رو می‌توان استفاده از MVI را توصیه کرد. زیرا این شاخص به‌طور کلی OA و K بیشتری نسبت به شاخص‌های دیگر در هر سه منطقه مورد مطالعه داشت. در MVI از محدوده‌های طیفی استفاده شد که در آن‌ها بین کاربری‌های مختلف در مناطقی ساحلی تفاوت وجود دارد، بنابراین تفکیک طبقه‌های مانگروها، آب و خاک در مناطق مطالعاتی با صحت بیشتری صورت گرفت. به‌طور کلی در شناسایی مانگروها، MFI و در طبقه‌بندی کاربری‌های اصلی از جمله مانگروها، MVI بیشترین کارایی را داشتند. در همین راستا، Baloloy و همکاران (۲۰۲۰) نیز اشاره کردند که تفاوت زیاد دامنه تغییرات MVI روی تصاویر سنتینل ۲ بین کاربری‌های مختلف از جمله مانگروها، پوشش گیاهی جنگلی و زراعی و خاک بدون پوشش سبب می‌شود که این طبقه‌ها به‌خوبی از یکدیگر تفکیک شوند.

در پژوهش پیش‌رو، معیارهای متداول صحت‌سنجی (PA مانگرو، UA مانگرو، OA و K) برای مقایسه نتایج ۱۳ شاخص مورد پژوهش به‌کار برده شدند. با این حال، هیچ‌کدام از آن‌ها به‌تنهایی برای انتخاب شاخص بهینه در شناسایی مانگروها قابل استفاده نبودند. دو معیار OA و K برای طبقه‌بندی مناسب هستند، اما آن‌ها نشان نمی‌دهند کدام شاخص، مانگروها را به‌درستی شناسایی کرده است. دو معیار PA مانگرو و UA مانگرو که برای طبقه‌بندی مانگرو

طبقه‌بندی جنگل‌های مانگرو مناطق مورد مطالعه در جنوب ایران است. در صورت تمایل به طبقه‌بندی کاربری‌های دیگر علاوه بر مانگروها می‌توان از MVI استفاده کرد. همچنین، کاربرد معیارهای متنوع مانند منحنی ROC به همراه بقیه معیارهای متداول صحت‌سنجی، امکان مقایسه مؤثرتر عملکرد شاخص‌های مانگرو در پژوهش پیش‌رو را فراهم کرد. در نهایت، مساحت جنگل‌های مانگرو در خلیج ناپیند، سیریک و خلیج گواتر براساس تصاویر سنتینل ۲ مربوط به سال ۲۰۲۱ به ترتیب ۲۶۳/۷، ۱۰۸۶/۳ و ۶۸۰/۲ هکتار برآورد شد، بنابراین منطقه ۲ (سیریک در استان هرمزگان) در بین سه منطقه مورد ارزیابی در پژوهش پیش‌رو، بیشترین مساحت مانگروها را داشته است.

سیاسگزاری

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

منابع مورد استفاده

- Alatorre, L.C., Sánchez-Andrés, R., Cirujano, S., Beguería, S. and 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.
- Amiri, S.N., Sajadi, J. and Sadough Vanini, S.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 with English summary).
- Baloloy, A.B., Blanco, A.C., Sharma, S. and Nadaoka, K., 2021. Development of a rapid mangrove zonation mapping workflow using Sentinel 2-derived indices and biophysical dataset. *Frontiers in Remote Sensing*, 2: 730238.

در منطقه ۲ (سیریک، استان هرمزگان)، حدود ۱۰۸۶/۳ هکتار مانگرو شناسایی شد که وسیع‌ترین لکه‌ها در تالاب آذینی مشاهده شدند. نتایج پژوهشی در مورد ارزیابی این جنگل‌ها روی تصاویر IRS نشان داد که مساحت جنگل‌های مانگرو این منطقه در سال ۲۰۰۴ حدود ۶۳۹/۶ هکتار بود (Taghizadeh *et al.*, 2009). Danehkar و همکاران (۲۰۱۲) نیز مساحت آن‌ها را ۶۵۸/۶ هکتار برآورد کردند. در پژوهشی دیگر، مساحت این جنگل‌ها در سال‌های ۱۹۸۶، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶ به ترتیب ۴۸۲/۳، ۴۰۰/۱ و ۹۱۹/۶ هکتار برآورد شد (Mafi Gholami *et al.*, 2017). مجموع این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که از سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱، مساحت مانگروهای سیریک، روند افزایشی داشته است.

نتایج پژوهش پیش‌رو در منطقه ۳ نشان داد که از مجموع حدود ۶۸۰/۲ هکتار مانگرو شناسایی‌شده در خلیج گواتر، ۴۸۷/۷ هکتار آن در خور باهو و ۱۹۲/۴ هکتار آن در خور گواتر قرار داشتند. در سال ۲۰۱۲ مساحت مانگروها در خور باهو ۴۲۳ هکتار، در خور گواتر ۱۳۷/۲ هکتار و در مجموع، ۵۶۰/۲ هکتار برآورد شد (Danehkar *et al.*, 2012). مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که مساحت این رویشگاه در فاصله سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱ زیاد شده است. هرچند این افزایش در خور باهو (۱۵/۳ درصد) کمتر از خور گواتر (۴۰/۲ درصد) بوده است. براساس مقایسه‌های انجام‌شده، مساحت مانگروها در هر سه منطقه مورد مطالعه افزایش یافته است. با این حال، برآورد مساحت‌ها هم در این پژوهش و هم در پژوهش‌های پیشین ممکن است با خطا همراه باشد. همچنین، نوع داده و روش طبقه‌بندی نیز بین این پژوهش‌ها متفاوت بوده‌اند، بنابراین تأیید نهایی روندهای مشاهده‌شده منوط به یک پژوهش جامع و طولانی‌مدت در شرایط یکسان با استفاده از داده و روش تحلیل مشابه است. در این صورت باید حفاظت و توسعه این رویشگاه‌ها را همچون گذشته ادامه داد.

به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاربرد MFI روی تصاویر سنتینل ۲ در میان شاخص‌های پوشش گیاهی و مانگرو که تاکنون ارائه شده‌اند، یک راهکار کارآمد در

- Jia, M., Wang, Z., Wang, C., Mao, D. and Zhang, Y., 2019. A new vegetation index to detect periodically submerged mangrove forest using single-tide Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 11(7): 2043.
- Mafi Gholami, D., Baharlouii, M. and 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 with English summary).
- Makowski, C. and Finkl, C.W., 2018. *Threats to Mangrove Forests: Hazards, Vulnerability, and Management*. Springer, Cham, Switzerland, 724p.
- Mondal, P., Liu, X., Fatoyinbo, T.E. and Lagomasino, D., 2019. Evaluating combinations of Sentinel-2 data and machine-learning algorithms for mangrove mapping in West Africa. *Remote Sensing*, 11(24): 2928.
- Muhsoni, F.F., Sambah, A.B., Mahmudi, M. and Wiadnya, D.G.R., 2018. Comparison of different vegetation indices for assessing mangrove density using sentinel-2 imagery. *International Journal of Geomate*, 14(45): 42-51.
- Polo, T.C.F. and Miot, HA., 2020. Use of ROC curves in clinical and experimental studies. *Jornal Vascular Brasileiro*, 19: e20200186.
- Safiari, Sh., 2017. Mangrove forests in Iran. *Journal of Iran Nature*, 2(2): 49-57 (In Persian with English summary).
- Tabatabaie, T. and Amiri, F., 2019. Multi-temporal assessment of mangrove forests change in the coastal areas of Bushehr region based on Landsat satellite imagery. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 8(3): 45-62 (In Persian with English summary).
- Taghizadeh, A., Danehkar, A., Kamrani, E. and Mahmoudi, B., 2009. Investigation on the structure and dispersion of mangrove forest community in Sirik site in Hormozgan province. *Iranian Journal of Forest*, 1(1): 25-34 (In Persian with English summary).
- Valderrama-Landeros, L., Flores-de-Santiago, F., Kovacs, J.M. and Flores-Verdugo, F., 2018. An assessment of commonly employed satellite-based remote sensors for mapping mangrove species in Mexico using an NDVI-based classification Scheme. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190: 23.
- Wang, D., Wan, B., Qiu, P., Su, Y., Guo, Q., Wang, R., ... and Wu, X., 2018. Evaluating the performance of Sentinel-2, Landsat 8 and Pléiades-1 in mapping mangrove extent and species. *Remote Sensing*, 10(9): 1468.
- Winarso, G., Purwanto, A.D. and Yuwono, D.M., 2014. New mangrove index as degradation/health indicator using Remote Sensing data : Segara
- Baloloy, A.B., Blanco, A.C., Sta. Ana, R.R.C. and 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.
- Binh, N.A., Hauser, L.T., Hoa, P.V., Thao, G.T.P., An, N.N., Nhut, H.S., ... and Verrelst, J., 2022. Quantifying mangrove leaf area index from Sentinel-2 imagery using hybrid models and active learning. *International Journal of Remote Sensing*, 43(15-16): 5636-5657.
- Bunting, P., Rosenqvist, A., Hilarides, L., Lucas, R.M. and Thomas, N., 2022. Global Mangrove Watch: Updated 2010 mangrove forest extent (v2.5). *Remote Sensing*, 14(4): 1034.
- Bunting, P., Rosenqvist, A., Lucas, R.M., Rebelo, L.M., Hilarides, L., Thomas, N., ... and Finlayson, C.M., 2018. The Global Mangrove Watch—A new 2010 global baseline of mangrove extent. *Remote Sensing*, 10(10): 1669.
- Chen, N., 2020. Mapping mangrove in Dongzhaigang, China using Sentinel-2 imagery. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(1): 014508.
- Congalton, R.G. and Green, K., 2019. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*, Third Edition. CRC Press, Boca Raton, Florida, 346p.
- Danehkar, A., Mahmoudi, B., Sabaei, M., Ghadirian, T., Asadolahi, Z., Sharifi, N. and Petrosian, H., 2012. *Sustainable mangrove management*. Final Report of Iran's national Research Project, Published by Forests, Range and Watershed Management Organization, Tehran, 624p (In Persian).
- Daughtry, C.S.T., Walthall, C.L., Kim, M.S., de Colstoun, E.B. and McMurtrey, J.E., 2000. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74(2): 229-239.
- Diniz, C., Cortinhas, L., Nerino, G., Rodrigues, J., Sadeck, L., Adami, M. and Souza-Filho, P.W.M., 2019. Brazilian mangrove status: Three decades of satellite data analysis. *Remote Sensing*, 11(7): 808.
- FAO, 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*. Rome, 186p.
- Gupta, K., Mukhopadhyay, A., Giri, S., Chanda, A., Datta Majumdar, S., Samanta, S., ... and Hazra, S., 2018. An index for discrimination of mangroves from non-mangroves using LANDSAT 8 OLI imagery. *MethodsX*, 5: 1129-1139.
- Heumann, B.W., 2011. An object-based classification of mangroves using a hybrid decision tree—support vector machine approach. *Remote Sensing*, 3(11): 2440-2460.

- Xia, Q., Qin, C.Z., Li, H., Huang, C., Su, F.Z. and Jia, M.M., 2020. Evaluation of submerged mangrove recognition index using multi-tidal remote sensing data. *Ecological Indicators*, 113: 106196.
- Yang, G., Huang, K., Sun, W., Meng, X., Mao, D. and Ge, Y., 2022. Enhanced mangrove vegetation index based on hyperspectral images for mapping mangrove. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 189: 236-254.
- Xia, Q., He, T.T., Qin, C.Z., Xing, X.M. and Xiao, W., 2022. An improved submerged mangrove recognition index-based method for mapping mangrove forests by removing the disturbance of tidal dynamics and *S. alterniflora*. *Remote Sensing*, 14(13): 3112.
- Anakan and Alas Purwo case study. Proceedings of the 12th Biennial Conference of Pan Ocean Remote Sensing Conference. Bali, Indonesia, 4-7 Nov. 2014: 309-316.

Comparison of vegetation and mangrove indices in mangrove mapping on Sentinel-2 imagery based on Google Earth Engine

Y. Erfanifard ^{1*} and M. Lotfi Nasirabad ²

1* - Corresponding author, Associate Prof., Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: erfanifard@ut.ac.ir

2- M.Sc., Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 16.05.2022

Accepted: 22.10.2022

Abstract

Effective mangrove mapping needs reliable indices that can characterize mangroves from other land cover types on remote sensing data. Currently, a variety of vegetation- and mangrove indices are available, while a comparative assessment of their efficiency seems essential. The aim of this study was to evaluate six vegetation indices and seven mangrove indices developed for Sentinel-2 imagery to obtain a robust approach in mangrove mapping within Google Earth Engine (GEE) cloud computing platform. The rasterized indices were classified by support vector machine. The final maps were evaluated by area under curve (AUC) of receiver operating characteristic (ROC) in addition to common accuracy assessment criteria. Results showed that mangrove indices were more reliable than vegetation indices. Amongst the vegetation indices, Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI) (AUC_{mangrove} from 0.91 to 0.92) achieved the highest AUC values, while MFI (Mangrove Forest Index) returned the highest values amongst the mangrove indices (AUC_{mangrove} from 0.93 to 0.95). All in all, results revealed that MFI on Sentinel-2 imagery in GEE was efficient in mangrove mapping within the study sites.

Keywords: *Avicennia marina*, Google Earth, mangrove index, receiver operating characteristic, support vector machine.