

پهنه‌بندی گستره جنگل‌های مانگرو در ایران با استفاده از تصاویر سنتینل ۲

سیدیوسف عرفانی‌فرد^{۱*} و محسن لطفی نصیرآباد^۲

*۱- 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: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۶

چکیده

مانگروها، بوم‌سازگان‌های ساحلی هستند که خدمات متنوع بوم‌شناختی، اقتصادی و اجتماعی ارائه می‌کنند. در مدیریت پایدار مانگروها، دسترسی به نقشه دقیق گستره آن‌ها مبتنی بر روش‌های نوین، ضروری است. پژوهش پیش‌رو با هدف نقشه‌برداری از جنگل‌های مانگرو در سرتاسر نوار ساحلی جنوبی ایران از استان خوزستان تا سیستان و بلوچستان و نیز شناسایی رویشگاه‌های جدید با استفاده از سنجش از دور انجام شد. به این منظور، شاخص ویژه شناسایی مانگروها روی تصاویر سنتینل ۲ به نام MVI (Mangrove vegetation index) در سکوی محاسبه ابری GEE (Google Earth Engine) به‌کار گرفته شد. تصاویر شاخص MVI با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی طبقه‌بندی شدند. نقشه نهایی مانگروها علاوه بر معیارهای متداول صحت‌سنجی، با استفاده از صحت و FI-score نیز ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مجموع مساحت رویشگاه‌های مانگرو در جنوب ایران در اکتبر ۲۰۲۱ بالغ بر ۱۲۴۷۱/۸ هکتار (صحت ۰/۹۸ و FI-score برابر ۰/۹۷) است که در ۴۰ رویشگاه در چهار استان خوزستان (۲۸۶/۷ هکتار)، بوشهر (۲۹۶/۹ هکتار)، هرمزگان (۱۱۲۸۱/۹ هکتار) و سیستان و بلوچستان (۶۰۶/۳ هکتار) پراکنده شدند. همچنین، برخی از رویشگاه‌های جدید مانند مانگروهای بندر ماهشهر استان خوزستان با مساحت حدود ۲۹۰ هکتار نیز در این پژوهش شناسایی شدند.

واژه‌های کلیدی: بندر ماهشهر، جنگل تصادفی، قسم، MVI.

مقدمه

مانگروها در مناطق جزر و مدی برخی از خطوط ساحلی گرمسیری و نیمه‌گرمسیری دنیا گسترده شده‌اند. این بوم‌سازگان‌ها، بسیار متنوع هستند و گاهی از بوته‌های تنک با یک گونه و گاهی نیز از توده‌های متراکم با چندین گونه تشکیل شده‌اند. مانگروها، زیستگاه مجموعه‌ای متنوع از گونه‌های جانوری مانند ماهی‌ها، بی‌مهرگان، خزندگان و پرندگان هستند. همچنین، این بوم‌سازگان‌ها، خدمات مختلفی مانند جلوگیری از فرسایش مناطق ساحلی، پیشگیری از آسیب‌های ناشی از

طوفان‌ها و سونامی‌ها و نیز ارزش‌های تفریحی و گردشگری به انسان‌ها ارائه می‌کنند. یکی از مهم‌ترین نقش‌های آن‌ها در بوم‌شناسی، ترسیب کربن است. به‌نحوی که حجم کربن ذخیره‌شده در آن‌ها، بسیار بیشتر از جنگل‌های خشکی‌زی با شرایط مشابه است (Bunting et al., 2022; Tran et al., 2022).

با وجود اهمیت گسترده مانگروها، عوامل طبیعی (مانند تغییر اقلیم و گرمایش جهانی) و انسانی (مانند توسعه مزارع آبی‌پروری و بهره‌برداری بی‌رویه) باعث شده است که بخش‌هایی از این بوم‌سازگان‌های ارزشمند

مانگرو ایران در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۷ به ترتیب ۹۳۳۷، ۱۱۰۱۷/۵ و ۹۴۰۳ هکتار برآورد شد (Zahed *et al.*, 2010; Danehkar *et al.*, 2012; Makowski & Finkl, 2018). در گزارش اخیر FAO، مساحت این جنگل‌ها در سال ۲۰۲۰ برابر ۱۹۲۳۰ هکتار آمده که نسبت به سال ۲۰۱۵ هیچ تغییری نداشته است (FAO, 2020). همچنین، در گزارش مذکور، مساحت مانگروه‌های ایران در سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ یکسان و مقدار آن ۲۵۷۶۰ هکتار بوده است. در یک گزارش کلی و بدون ذکر جزئیات در وبگاه سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور نیز مساحت جنگل‌های ماندابی (با تعریف جنگل‌های محدوده جزر و مد سواحل جنوب کشور) که احتمالاً منظور همان مانگروها است را ۲۶۴۲۶ هکتار در سال ۲۰۲۰ گزارش کردند. این عدد با نتایج هیچ‌یک از پژوهش‌های پیشین (Danehkar *et al.*, 2012; Makowski & Finkl, 2018) مطابقت ندارد. Safiari (۲۰۱۷) نیز مساحت مانگروها در ایران را ۱۳۲۱۴/۱۶ هکتار برآورد کرد. این عدد به مساحت برآوردی روی تصاویر لندست سال ۲۰۲۰ در پژوهش Erfanifard و همکاران (۲۰۲۲) (۱۳۰۱۹/۱ هکتار) نزدیک است. این برآورد حدود ۵۰ درصد مساحت اعلام‌شده از سوی سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری است. اختلاف در این برآوردها اگرچه ممکن است ناشی از تفاوت در نوع داده مورد استفاده و نیز روش‌های طبقه‌بندی باشد، ضرورت نقشه‌برداری دقیق از رویشگاه‌های مانگرو در جنوب ایران با استفاده از روش‌های نوین را نشان می‌دهد.

بررسی پیشینه پژوهش با موضوع مساحت رویشگاه‌های مانگرو در ایران حاکی از انجام اغلب پژوهش‌ها با استفاده از تصاویر لندست است (Danehkar *et al.*, 2012; FAO, 2020; Mafi-Gholami *et al.*, 2022; Erfanifard *et al.*, 2020) که علت آن می‌تواند به دسترسی به آرشیو بلندمدت این داده‌ها برمی‌گردد. ارزیابی عملکرد تصاویر سنتینل ۲ و لندست ۸ در

در دنیا از بین بروند. براساس گزارش سازمان خواروباری جهانی (FAO) بیشتر از یک میلیون هکتار (معادل ۶/۸ درصد) از سطح مانگروها طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ کاهش یافته و به ۱۴/۸ میلیون هکتار رسیده است (FAO, 2020). همچنین، بررسی پراکنش جنگل‌های مانگرو با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که حدود ۳۵ درصد آن‌ها در فاصله سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ از بین رفتند (Giri *et al.*, 2011). اگر نرخ تخریب کنونی ادامه یابد، همه مانگروه‌های دنیا طی ۱۰۰ سال آینده از بین خواهند رفت (Giri *et al.*, 2011). کاهش گستره جنگل‌های مانگرو، یکی از نخستین نشانه‌های تخریب این بوم‌سازگان است. از این رو، در بسیاری از پژوهش‌ها، اثرات عوامل انسانی و طبیعی بر رویشگاه‌های مانگرو از طریق پایش مداوم گستره آن‌ها ارزیابی شده است (Giri *et al.*, 2011; Bunting *et al.*, 2018). آگاهی از پراکنش مکانی دقیق رویشگاه‌های مانگرو و تغییرات مساحت آن‌ها در مقیاس‌های مختلف جهانی و ملی به منظور مدیریت پایدار این بوم‌سازگان ارزشمند، ضروری به نظر می‌رسد.

ایران، یکی از زیستگاه‌های مانگروها است که این جنگل‌ها در سواحل شمالی خلیج فارس و دریای عمان در جنوب کشور پراکنش دارند. پژوهش‌های پیشین نشان دادند که مانگروها در سه استان جنوبی شامل بوشهر (خلیج نایبند و بندر دیر)، هرمزگان (بندر خمیر، جزیره قشم، دهانه رودشور، بندر کلاهی، سیریک و جاسک) و سیستان و بلوچستان (خلیج گوآتر) گسترده شده‌اند (Danehkar *et al.*, 2012; Makowski & Finkl, 2018). تنوع گونه‌ای در مانگروه‌های کشور کم است. حرا (*Avicennia marina* (Forssk.) Vierh.) گونه غالب جنگل‌های مانگرو ایران است که تقریباً در اغلب مناطق، توده‌های خالص را تشکیل داده است. توده‌های آمیخته حرا و چندل (*Rhizophora mucronata* Lam.) فقط در سیریک و جاسک حضور دارند (Safiari, 2017; Yaghoubzadeh *et al.*, 2020). مساحت جنگل‌های

دقت نتایج در پژوهش پیش‌رو، بتوان در آینده نیز از همین راهبرد در به‌روزرسانی نقشه جنگل‌های مانگرو در ایران بهره برد. همچنین، این پژوهش به رویشگاه‌های از پیش شناخته‌شده که در پیشینه پژوهش ذکر شد، محدود نیست. بلکه سرتاسر سواحل خلیج فارس و دریای عمان از استان خوزستان تا استان سیستان و بلوچستان با هدف شناسایی رویشگاه‌های جدید بررسی شدند تا نقشه نهایی، دربرگیرنده همه رویشگاه‌های مانگرو موجود در ایران باشد.

مواد و روش‌ها

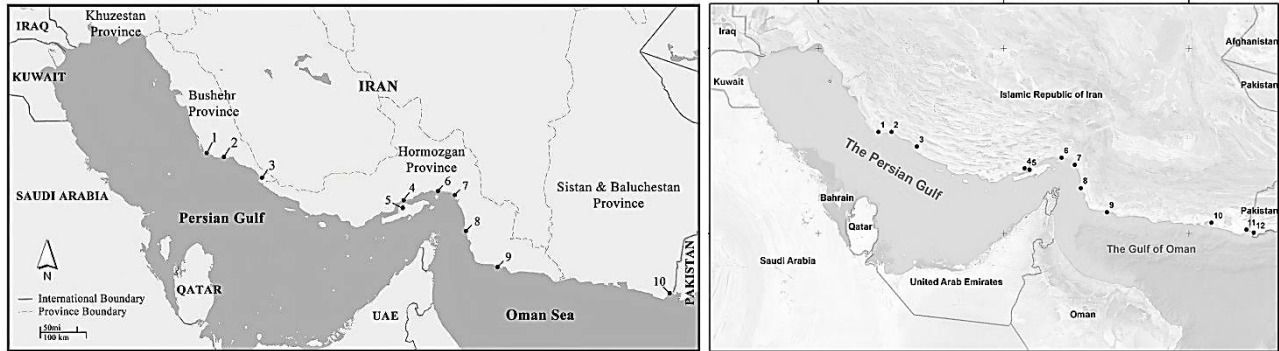
مناطق مورد مطالعه

مانگروهای ایران تا نزدیکی مرز گسترش این جنگل‌ها در نیمکره شمالی (۳۲/۳ درجه) (Bunting *et al.*, 2018) مشاهده می‌شوند. به‌نحوی که محدوده جغرافیایی پراکنش آن‌ها از طول ۵' ۴۹° تا ۳۶' ۶۱° شرقی و عرض جغرافیایی ۱۰' ۲۵° تا ۳۰' ۳۰° شمالی است. اگرچه می‌توان مانگروها را در سرتاسر خط ساحل خلیج فارس و دریای عمان به‌طور پراکنده مشاهده کرد (شکل ۱)، اما بزرگ‌ترین و مترکم‌ترین جوامع مانگروها در شمال جزیره قشم و بندر خمیر حضور دارند (Safiari, 2017). با وجود اینکه عوامل طبیعی و انسانی، این رویشگاه‌ها را تهدید می‌کنند، اما ثبت بسیاری از جنگل‌های مانگرو در جنوب ایران به‌عنوان منطقه حفاظت‌شده، نقش زیادی در حفظ و توسعه آن‌ها داشته است (Bihanta Toosi *et al.*, 2019). رویشگاه‌های مانگرو در پژوهش‌های پیشین (Zahed *et al.*, 2010; Danekar *et al.*, 2012; Makowski & Finkl, 2018) شامل بردخون (۱)، بندر دیر (۲)، خلیج نایبند (۳)، بندر خمیر (۴)، قشم (۵)، دهانه رود شور (۶)، کلاهی (۷)، سیریک (۸)، جاسک (۹) هستند (شکل ۱). Zahed و همکاران (۲۰۱۰) خلیج گواتر را رویشگاه ۱۰ و Makowski و Finkl (۲۰۱۸) خلیج چابهار را رویشگاه ۱۰ و خلیج گواتر را رویشگاه ۱۱ معرفی کردند (شکل ۱). همچنین، Denhkar و همکاران (۲۰۱۲) مساحت کل

نقشه‌برداری مانگروها نشان داد که تصاویر سنتینل ۲ کارایی بیشتری برای برآورد مساحت این جنگل‌ها نسبت به لندست ۸ دارند (Wang *et al.*, 2018). یکی از دلایل این موضوع می‌تواند تفکیک‌پذیری مکانی بیشتر تصاویر سنتینل ۲ نسبت به تصاویر لندست باشد که امکان تعیین دقیق‌تر مرز مانگروها را فراهم می‌کند. همچنین، برآورد مساحت مانگروها اغلب با استفاده از شاخص NDVI انجام شده است. براساس یافته‌های پژوهش‌های پیشین، ساختار متفاوت مانگروها و محتوای بیشتر آب برگ‌ها باعث شده است که شاخص‌های متداول پوشش گیاهی، کارایی لازم را در شناسایی مانگروها روی تصاویر ماهواره‌ای نداشته باشند (Winarso *et al.*, 2014; Jia *et al.*, 2019; Baloloy *et al.*, 2020). از این رو، شاخص‌هایی با هدف شناسایی مانگروها در سال‌های اخیر طراحی شده‌اند. در معرفی این شاخص‌ها به تفاوت رفتار طیفی مانگروها با پوشش‌های اراضی دیگر مانند پوشش گیاهی خشکی‌زی و مناطق انسان‌ساخت در محدوده‌های لبه قرمز و SWIR1 (Yang *et al.*, 2022) توجه شده است. پژوهش‌های پیشین نیز نشان دادند که شاخص‌های مانگرو نسبت به شاخص‌های پوشش گیاهی متداول، کارایی بیشتری در شناسایی مانگروها روی تصاویر سنتینل ۲ داشته‌اند (Jia *et al.*, 2019; Xia *et al.*, 2022)، بنابراین دسترسی به یک نقشه به‌روز از جنگل‌های مانگروی ایران و برآورد دقیق مساحت آن‌ها مبتنی بر شاخص‌های مانگرو روی تصاویر سنتینل ۲ ضروری است.

باتوجه به اهمیت جنگل‌های مانگرو و ضرورت پایش مداوم تغییرات گستره آن‌ها از یک‌سو و نیز دسترسی به یک نقشه به‌روز از آن‌ها مبتنی بر شاخص‌های کارآمد مانگرو روی تصاویر سنتینل ۲ از سوی دیگر، این پژوهش با هدف برآورد گستره مانگروها در سرتاسر سواحل جنوبی ایران انجام شد. باتوجه به گستردگی منطقه مورد مطالعه، از سکوی محاسبه‌های ابری (Google Earth Engine) استفاده شد تا علاوه بر بهبود صحت و

مانگروها را ۱۱۰۱۷/۵ هکتار گزارش کردند (جدول ۱). در پژوهش پیش‌رو، سرتاسر خط ساحلی در استان‌های خوزستان، بوشهر، هرمزگان و سیستان و بلوچستان به‌منظور شناسایی و نقشه‌برداری مانگروها بررسی شدند.



شکل ۱- رویشگاه‌های مانگرو در جنوب ایران (شکل سمت راست از Makowski & Finkl, 2018 و شکل سمت چپ از Zahed *et al.*, 2010). (بردخون (۱)، بندر دیر (۲)، خلیج نایبند (۳)، بندر خمیر (۴)، قشم (۵)، دهانه رود شور (۶)، کلاهی (۷)، سیریک (۸)، جاسک (۹)، در شکل سمت چپ خلیج گواتر (۱۰)، در شکل سمت راست خلیج چابهار (۱۰)، خلیج گواتر (۱۱)) شماره‌ها در متن توضیح داده شدند.

Figure 1. Mangrove sites in southern Iran (Right from Makowski & Finkl, 2018 and Left from Zahed *et al.*, 2010). (Bordekhood (1), Dayyer Harbor (2), Nayband Bay (3), Khamir Harbor (4), Qeshm (5), Shoor River (6), Kolahi (7), Sirik (8), Jask (9), In Left, Govatr Bay (10), In Right, Chabahar Bay (10), Govatr Bay (11)) Numbers are explained within the text.

جدول ۱- رویشگاه‌های مانگروی ایران، مساحت هریک از آن‌ها (Danekhar *et al.*, 2012) و شماره هرکدام روی شکل ۱

Table 1. Mangrove sites of Iran, their area (Danekhar *et al.*, 2012) and related numbers on Figure 1

استان	نام رویشگاه	مساحت (هکتار)	استان	نام رویشگاه	مساحت (هکتار)
Province	Site name	Area (ha)	Province	Site name	Area (ha)
	بردخون (۱)	18		دهانه رود شور (۶)	663.5
	Bordekhood (1)			Shoor River (6)	
بوشهر	بندر دیر (۲)	2.2		کلاهی (۷)	667
Bushehr	Dayyer Harbor (2)		هرمزگان	Kolahi (7)	
	خلیج نایبند (۳)	131.9	Hormozgan	سیریک (۸)	658.6
	Nayband Bay (3)			Sirik (8)	
هرمزگان	بندر خمیر (۴)	2163.3		جاسک (۹)	610.2
Hormozgan	Khamir Harbor (4)			Jask (9)	
	قشم (۵)	5542.7	سیستان و بلوچستان*	خلیج گواتر (۱۰ یا ۱۱)*	560.1
	Qeshm (5)		Sistan and Baluchestan	Govatr Bay (10 or 11)*	

* خلیج گواتر (۱۰) در شکل ۱ سمت چپ و (۱۱) در شکل ۱ سمت راست

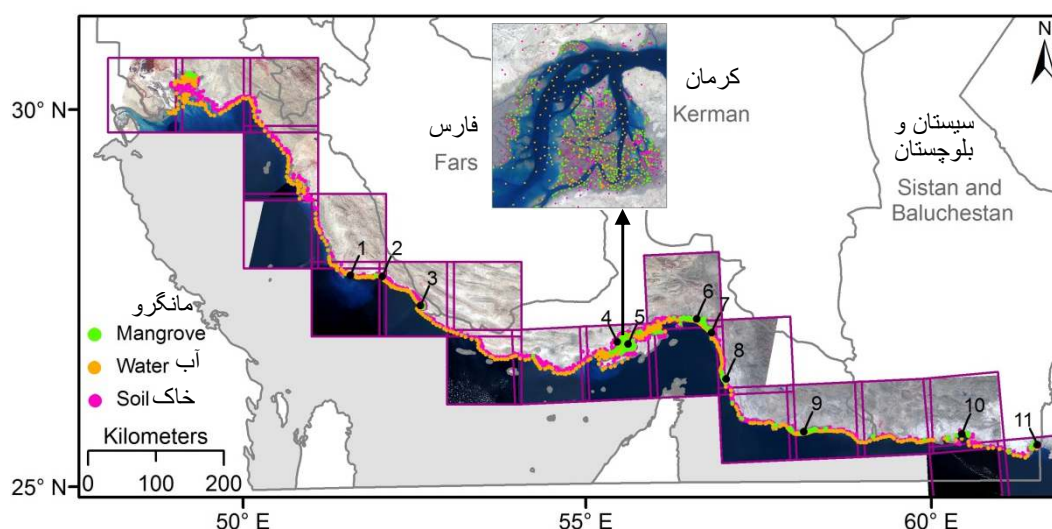
* Govatr Bay (10) in Fig. 1 Left and (11) in Fig. 1 Right

روش پژوهش

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ استفاده شده است. دو ماهواره سنتینل A2 و B2 به ترتیب در ژوئن ۲۰۱۵ و مارس ۲۰۱۷ پرتاب شدند و تصاویر چندطیفی با ۱۳ باند و تفکیک‌پذیری مکانی بین ۱۰ تا ۶۰ متر ثبت می‌کنند. با توجه به شاخص مورد استفاده در پژوهش پیش‌رو، باندهای ۳، ۸ و ۱۱ از تصاویر سنتینل ۲ مورد نیاز هستند. از آنجایی که باندهای ۳ و ۸ دارای تفکیک‌پذیری مکانی ۱۰ متر هستند، تفکیک‌پذیری باند ۱۱ نیز به روش میانگین‌گیری به ۱۰ متر تبدیل شد. با بررسی بایگانی سال ۲۰۲۱ تصاویر سنتینل ۲، تصاویر ماه اکتبر علاوه بر ابرناکی حداقل، در زمان جزر ثبت شده بودند که این موضوع در نقشه‌برداری از مانگروها اهمیت زیادی دارد (Baloloy et al., 2020;).

۲۷ تصویر مورد پژوهش در جنوب ایران انتخاب و در تهیه نقشه مانگروها استفاده شدند (شکل ۲ و جدول ۲). این تصاویر از نظر هندسی و رادیومتریک تصحیح شده بودند و در سامانه GEE در دسترس بودند. گفتنی است که در سه رویشگاه ماهشهر، نایبند و گابریک برای پوشش کامل منطقه تحت پوشش یک قاب، بیشتر از یک تصویر به‌کار برده شد و تصاویر برش‌خورده سنتینل ۲ موزاییک شدند. موزاییک نهایی ۲۷ تصویر سنتینل ۲ در ۲۱ قاب و نیز پراکنش مکانی ۶۴۹۰ نقطه تصادفی آموزشی و آزمایشی در سه طبقه جنگل‌های مانگرو، آب و خاک در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. برای نمایش بهتر، توزیع مکانی نقطه‌های تصادفی مذکور در یک پنجره در رویشگاه قشم نیز به‌عنوان نمونه ارائه شد (شکل ۲).



شکل ۲- موزاییک ۲۷ تصویر سنتینل ۲ ماه اکتبر ۲۰۲۱ در نوار ساحلی جنوب ایران و پراکنش مکانی ۶۴۹۰ نقطه تصادفی آموزشی و آزمایشی

رویشگاه‌های مانگرو بر مبنای پژوهش‌های پیشین از شماره ۱ تا ۱۱ مشخص شدند.

Figure 2. The mosaic of 27 Sentinel-2 images of October 2021 in the coastal strip of southern Iran and the spatial distribution of 6490 random training/test sample points
The mangrove sites were indicated by number 1 to 11 based on previous studies.

جدول ۲- مشخصات ۲۷ تصویر سنتینل ۲ مورد استفاده در این پژوهش

Table 2. Characteristics of 27 Sentinel-2 images used in this study

تصویر	تاریخ	شناسه	تصویر	تاریخ	شناسه
Image	Date	Tile ID	Image	Date	Tile ID
Sentinel-2B	2021.10.29	T41RLH	Sentinel-2B	2021.10.18	T39RXL
Sentinel-2B	2021.10.29	T40RHP	Sentinel-2B	2021.10.14	T39RVN
Sentinel-2B	2021.10.29	T40RGP	Sentinel-2A	2021.10.16	T39RVN
Sentinel-2B	2021.10.12	T40RGP	Sentinel-2A	2021.10.30	T40REP
Sentinel-2B	2021.10.12	T40RFP	Sentinel-2A	2021.10.16	T39RXL
Sentinel-2B	2021.10.12	T40REP	Sentinel-2A	2021.10.30	T40RDQ
Sentinel-2A	2021.10.30	T40REQ	Sentinel-2A	2021.10.23	T40RBQ
Sentinel-2A	2021.10.30	T40RDR	Sentinel-2A	2021.10.24	T39RUP
Sentinel-2A	2021.10.30	T40RCQ	Sentinel-2A	2021.10.06	T39RYL
Sentinel-2B	2021.10.31	T39RWL	Sentinel-2B	2021.10.24	T40RHN
Sentinel-2B	2021.10.18	T39RYK	Sentinel-2B	2021.10.18	T39RVM
Sentinel-2B	2021.10.14	T39RTP	Sentinel-2B	2021.10.18	T39RUP
Sentinel-2B	2021.10.24	T39RVP	Sentinel-2A	2021.10.30	T39RVM
Sentinel-2B	2021.10.21	T39RWM			

شاخص مورد استفاده

شاخص مانگرو (MVI) (Mangrove vegetation index) از کارایی لازم برای تهیه نقشه مانگروها هم روی تصاویر لندست و هم تصاویر سنتینل ۲ برخوردار است. رابطه ۱ مربوط به MVI روی تصاویر سنتینل ۲ است که در آن، باندهای ۳، ۸ و ۱۱ استفاده می‌شوند.

$$\text{MVI} = \frac{\text{NIR}-\text{Green}}{\text{SWIR1}-\text{Green}} = \frac{\text{Band8}-\text{Band3}}{\text{Band11}-\text{Band3}} \quad (1) \text{ رابطه}$$

در رابطه ۱، باندهای مذکور با تفکیک‌پذیری مکانی ۱۰ متر استفاده شدند. خروجی MVI با الگوریتم جنگل تصادفی (RF: Random Forest) طبقه‌بندی شد و پیکسل‌های مانگرو از دو طبقه دیگر (آب و خاک) تفکیک شدند. RF یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد در طبقه‌بندی شاخص‌های پوشش گیاهی و مانگرو است (Wang *et al.*, 2018; Bihamta Toosi *et al.*, 2019; Tran *et al.*,

پژوهش‌های پیشین (Winarso *et al.*, 2014; Baloloy *et al.*, 2020) نشان دادند که شاخص‌های پوشش گیاهی از کارایی لازم برای شناسایی مانگروها برخوردار نیستند. از این رو با توجه به بررسی رفتار طیفی مانگروها، شاخص‌هایی ارائه شدند که بر شناسایی مانگروها روی تصاویر ماهواره‌ای مختلف متمرکز هستند. Baloloy و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که بازتاب طیفی مانگروها در سه محدوده طیفی سبز (باند ۳)، NIR (باند ۸) و SWIR (باند ۱۱) تصاویر سنتینل ۲ به‌طور چشمگیری کمتر از انواع دیگر پوشش گیاهی است. به‌نظر می‌رسد که ویژگی‌های خاص مانگروها از جمله محتوای آب زیاد و نیز سبزینه برگ‌ها سبب جذب بیشتر در محدوده‌های طیفی اشاره‌شده می‌شود. با توجه به نتایج پژوهش‌های پیشین (Baloloy *et al.*, 2020; Erfanifard & Lotfi Nasirabad, 2022

score (رابطه ۸) و Recall (رابطه ۹) طبقه مانگرو به‌کار گرفته شدند (Elmahdy & Ali, 2022).

$$Ac = \frac{TP+TN}{TP+FN+TN+FP} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$Pr = \frac{TP}{TP+FP} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$F1 - score = \frac{2 \times Pr \times Recall}{Pr + Recall} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad \text{رابطه (۹)}$$

در این رابطه‌ها، TP پیکسل‌هایی که به‌درستی به طبقه مورد نظر تخصیص یافتند، TN پیکسل‌هایی که به‌درستی به طبقه مورد نظر اختصاص نیافتند، FP پیکسل‌هایی که به‌نادرستی به طبقه مورد نظر تخصیص یافتند و FN پیکسل‌هایی که به‌نادرستی به طبقه مورد نظر اختصاص نیافتند. در پژوهش پیش‌رو علاوه‌بر استفاده از سامانه GEE برای همه محاسبه‌ها، نرم‌افزارهای ArcGIS 10.8 و Excel 2013 نیز برای رسم نقشه‌ها و نمودارها به‌کار برده شد.

نتایج

جدول ۳، نتایج ارزیابی صحت نقشه نهایی رویشگاه‌های مانگرو در سرتاسر نوار ساحلی جنوب ایران را نشان می‌دهد. به‌طورکلی می‌توان گفت که هر سه طبقه مورد نظر یعنی جنگل‌های مانگرو، آب و خاک با صحت زیادی نقشه‌برداری شدند ($F1\text{-score} > 0.96$). همچنین، برای طبقه جنگل‌های مانگرو، TP، TN، FP و FN به‌ترتیب ۶۲۱، ۸۳۷، ۱۳ و ۱۹ نقطه بودند. با توجه به ماتریس خطای به‌دست آمده از ۱۴۹۰ نقطه آزمایشی تصادفی، مقدار OA و K نقشه نهایی رویشگاه‌های مانگرو با استفاده از MVI روی تصاویر سنتینل ۲ به‌ترتیب ۹۷ درصد و ۰/۹۶ به‌دست آمد.

(2022). به‌منظور آموزش الگوریتم RF، ۵۰۰۰ نقطه آموزشی (۲۳۰۲ نقطه مانگرو، ۱۵۷۷ نقطه خاک و ۱۱۲۱ نقطه آب) با توزیع تصادفی در سرتاسر منطقه مورد پژوهش به‌کار گرفته شد (شکل ۲).

ارزیابی صحت

به‌منظور صحت‌سنجی نقشه مانگرو تهیه‌شده در چهار استان خوزستان، بوشهر، هرمزگان و سیستان و بلوچستان از ۱۴۹۰ نقطه آزمایشی تصادفی (۶۳۱ نقطه مانگرو، ۴۵۹ نقطه خاک و ۴۰۰ نقطه آب) استفاده شد. پس از تهیه ماتریس خطا، معیارهای صحت تولیدکننده (PA) (رابطه ۲)، صحت کاربر (UA) (رابطه ۳) طبقه مانگرو، صحت کلی (OA) (رابطه ۴) و ضریب کاپا (K) (رابطه ۵) به‌دست آمد (Congalton & Green, 2019).

$$PA = \frac{n_{jj}}{n_{+j}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$UA = \frac{n_{ii}}{n_{i+}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$OA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_{ii} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه‌ها، n نشان‌دهنده تعداد کل پیکسل‌های طبقه‌بندی‌شده، $\sum n_{ii}$ مجموع پیکسل‌های درست طبقه‌بندی‌شده، n_{jj} تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی‌شده و n_{+j} پیکسل‌های آزمایشی طبقه مانگرو (جمع ستون)، n_{ii} پیکسل‌های درست طبقه‌بندی‌شده و n_{i+} پیکسل‌های آزمایشی طبقه مانگرو (جمع سطر)، P_o توافق مشاهده نسبی میان ارزیابی‌ها و P_c بیانگر احتمال فرضی توافق شانسی هستند. همچنین، برای ارزیابی صحت نقشه مانگروها، سه معیار صحت (Ac) (رابطه ۶)، دقت (Pr) (رابطه ۷) و F1-

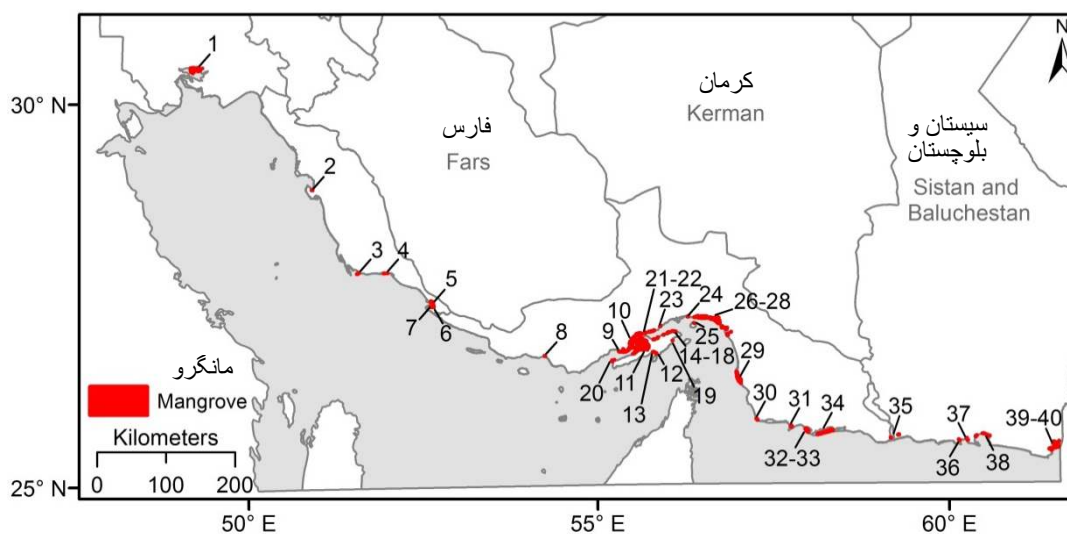
جدول ۳- ارزیابی صحت نقشه نهایی رویشگاه‌های مانگرو در جنوب ایران روی تصاویر سنتینل ۲

Table 2. Accuracy assessment of final map of mangrove sites in southern Iran on Sentinel-2 imagery

معیار Criteria	مانگرو Mangrove	آب Water	خاک Soil
PA	0.98	0.97	0.97
UA	0.97	0.99	0.96
Ac	0.98	0.98	0.98
Pr	0.98	0.99	0.96
F1-score	0.97	0.96	0.96

سیریک (شماره ۸ در شکل ۲) تا خلیج گواتر (شماره ۱۱ در شکل ۲) لکه‌های کوچک از مانگروها نیز تشخیص داده شدند. همچنین، یک توده کوچک با مساحت حدود ۱۴/۵ هکتار در نزدیکی زرآباد در مرز استان‌های سیستان و بلوچستان و هرمزگان دیده شد که بخشی از رویشگاه گالک است (شماره ۳۵ در شکل ۳). در نزدیکی خلیج چابهار در ساحل یزم نیز تک‌درختان و توده‌های مانگرو وجود دارند. مساحت این توده‌ها حدود ۲۷/۵ هکتار است. هرچند بخش‌هایی که پوشیده از تک‌درختان بود با MVI قابل تشخیص نبودند.

باتوجه به نقشه نهایی به‌دست‌آمده روی تصاویر سنتینل ۲، مساحت کل جنگل‌های مانگرو در جنوب ایران در اکتبر سال ۲۰۲۱ حدود ۱۲۴۷۱/۸ هکتار برآورد شد. شکل ۳ نشان‌دهنده پراکنش مکانی این رویشگاه‌ها است. بررسی دقیق سرتاسر خط ساحلی نشان داد که علاوه بر ۱۱ رویشگاه شناسایی شده در پژوهش‌های پیشین، یک رویشگاه نیز در نزدیک بندر ماهشهر با مساحت حدود ۲۸۶/۷ هکتار قرار دارد (شماره ۱ در شکل ۳). همچنین، در بخش‌های شمالی جزیره قشم در نزدیکی درگهان نیز توده‌هایی از مانگروها با مساحت حدود ۳۰/۳ هکتار شناسایی شدند (شماره ۱۷ در شکل ۳). البته در فاصله بین



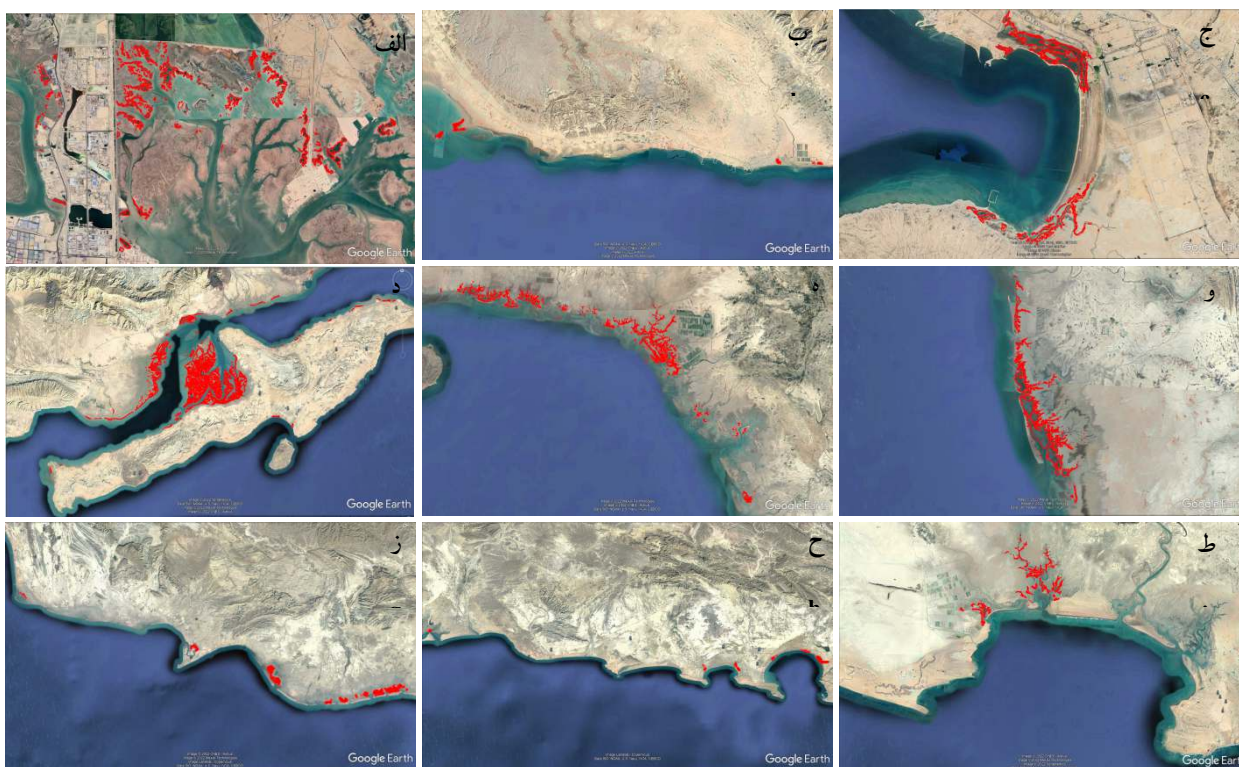
شکل ۳- نقشه نهایی ۴۰ رویشگاه مانگرو در جنوب ایران با استفاده از MVI روی تصاویر سنتینل ۲ اکتبر ۲۰۲۱

Figure 3. The final map of 40 mangrove sites in southern Iran using MVI on Sentinel-2 imagery of October 2021

بندرعباس (هرمزگان) (۷/۸ هکتار) (۲۴)، هرمز (هرمزگان) (۹/۸ هکتار) (۲۵)، کولغان (هرمزگان) (۷۹۳/۸ هکتار) (۲۶)، تیاب (هرمزگان) (۶۶۸/۳ هکتار) (۲۷)، کلاهی (هرمزگان) (۹۶/۱ هکتار) (۲۸)، سیریک (هرمزگان) (۷۸۰/۲ هکتار) (۲۹)، کوه مبارک (هرمزگان) (۴/۷ هکتار) (۳۰)، شهر جاسک (هرمزگان) (۷۲/۴ هکتار) (۳۱)، شهرنو (هرمزگان) (۱۸۴ هکتار) (۳۲)، خلاصی (هرمزگان) (۲۰۲/۱ هکتار) (۳۳)، گابریک (هرمزگان) (۵۱۰/۸ هکتار) (۳۴)، گالک (سیستان و بلوچستان) (۲۲/۶ هکتار) (۳۵)، خور راشدی (سیستان و بلوچستان) (۱۲/۵ هکتار) (۳۶)، خلیج یزم (سیستان و بلوچستان) (۱۵ هکتار) (۳۷)، خلیج چابهار (سیستان و بلوچستان) (۹۴/۸ هکتار) (۳۸)، خور باهو (سیستان و بلوچستان) (۳۴۲/۷ هکتار) (۳۹) و خور گواتر (سیستان و بلوچستان) (۱۱۸/۷ هکتار) (۴۰) (شکل ۳).

شکل ۴، پراکنش ۴۰ رویشگاه مانگرو شناسایی شده در پژوهش پیش‌رو را روی تصاویر Google Earth نشان می‌دهد که در نه منطقه تجمیع شدند. علاوه بر صحت‌سنجی با معیارهای مربوطه (جدول ۳)، نقشه رویشگاه‌ها از طریق تصاویر با تفکیک‌پذیری مکانی زیاد در دسترس در Google Earth نیز تفسیر بصری شدند تا از صحت آن‌ها اطمینان حاصل شود.

باتوجه به نقشه نهایی پژوهش پیش‌رو و پژوهش‌های پیشین، تعداد ۴۰ رویشگاه در نوار ساحلی جنوب ایران شناسایی شدند. نام و مساحت این رویشگاه‌ها به تفکیک عبارت‌اند از: بندر ماهشهر (استان خوزستان) (۲۸۶/۷ هکتار) (شماره ۱)، بوشهر (بوشهر) (۵/۲ هکتار) (۲)، بردخون (بوشهر) (۳۴/۴ هکتار) (۳)، دیر (بوشهر) (۸/۱ هکتار) (۴)، بیدخون (بوشهر) (۱۷۸/۳ هکتار) (۵)، بساتین (بوشهر) (۵۱/۴ هکتار) (۶)، خور هاله (بوشهر) (۱۹/۵ هکتار) (۷)، خور چارک (هرمزگان) (۸ هکتار) (۸)، سایه‌خوش (هرمزگان) (۶۹/۲ هکتار) (۹)، خمیر (هرمزگان) (۱۵۱۰/۹ هکتار) (۱۰)، خور خوران (هرمزگان) (۵۷۵۷/۶ هکتار) (۱۱)، اکوپارک قشم (هرمزگان) (۴/۸ هکتار) (۱۲)، سینگو قشم (هرمزگان) (۲۱/۳ هکتار) (۱۳)، نیروگاه سیکل ترکیبی قشم (هرمزگان) (۵/۲ هکتار) (۱۴)، پی‌دشت قشم (هرمزگان) (۱۸/۷ هکتار) (۱۵)، کوویی قشم (هرمزگان) (۹/۹ هکتار) (۱۶)، درگهان قشم (هرمزگان) (۳۰/۳ هکتار) (۱۷)، شمال قشم (هرمزگان) (۴۳/۵ هکتار) (۱۸)، زیست‌فناوری قشم (هرمزگان) (۰/۹ هکتار) (۱۹)، باسعیدو قشم (هرمزگان) (۲۳/۵ هکتار) (۲۰)، مردو (هرمزگان) (۳۶۵/۶ هکتار) (۲۱)، پهل (هرمزگان) (۷۵/۲ هکتار) (۲۲)، بستانو (هرمزگان) (۷/۳ هکتار) (۲۳)،



شکل ۴- موقعیت مکانی رویشگاه‌های مانگرو در بندر ماهشهر (الف)، بندر دیر (ب)، خلیج نایبند (ج)، جزیره قشم (د)، کلاهی (ه)،

سیریک (و)، بندر جاسک (ز)، خلیج چابهار (ح) و خلیج گواتر (ط) روی تصاویر Google Earth

Figure 4. Spatial location of mangrove sites in Mahshahr Harbor (a), Dayyer Harbor (b), Nayband Bay (c), Qeshm Island (d), Kolahi (e), Sirik (f), Jask Harbor (g), Chabahar Bay (h) and Govatr Bay (i) in Iran on Google Earth imagery

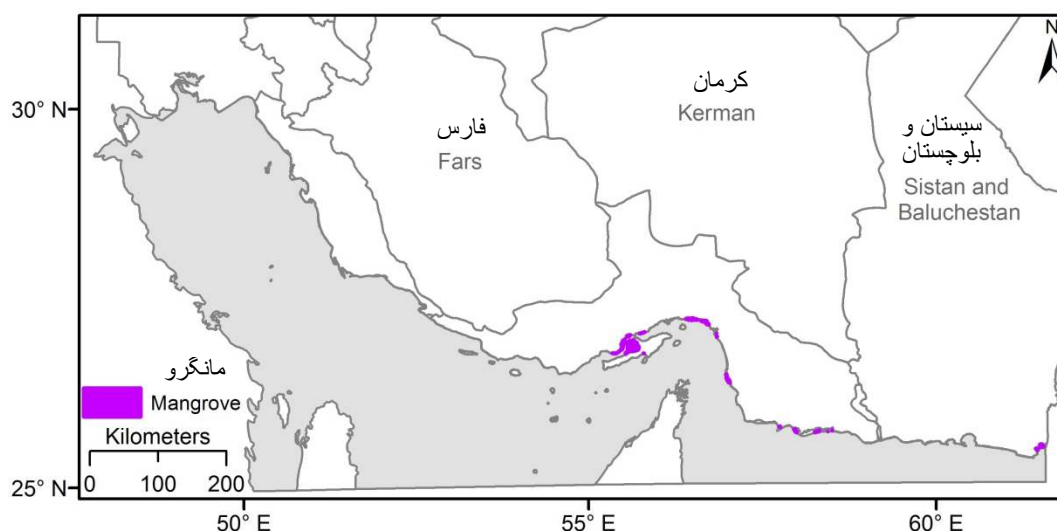
بحث

جنگل‌های مانگرو در ایران روی تصاویر سنتینل ۲ نشان داد که MFI، طبقه مانگرو را با بیشترین AUC در سه رویشگاه نایبند (استان بوشهر)، سیریک (استان هرمزگان) و گواتر (استان سیستان و بلوچستان) شناسایی می‌کند (Erfanifard & Lotfi Nasirabad, 2022). براساس نتایج دیگر پژوهش مذکور در تفکیک مانگروها از آب و خاک در همان سه رویشگاه، MVI بیشترین کارایی را در مقایسه با شاخص‌های دیگر پوشش گیاهی و مانگرو روی تصاویر سنتینل ۲ داشت. در پژوهش پیش‌رو نیز ابتدا از MFI استفاده شد، اما پیکسل‌های با نوفه زیاد روی تصویر MFI در سرتاسر نوار ساحلی جنوب ایران باعث شد که MVI جایگزین شاخص مذکور شود. این احتمال وجود دارد که MFI در مقیاس بزرگ، کارایی کمتری نسبت به MVI داشته باشد. این فرضیه می‌تواند در پژوهش‌های آینده بررسی

پژوهش پیش‌رو با هدف به‌روزرسانی نقشه مانگروهای جنوب ایران مبتنی بر شاخص MVI به‌عنوان یک شاخص ویژه شناسایی مانگروها روی تصاویر سنتینل ۲ در سامانه GEE انجام شد. تاکنون روش‌های متعددی برای شناسایی مانگروها ارائه شده است (Winarso *et al.*, 2014; Jia *et al.*, 2019; Baloloy *et al.*, 2020). با این حال، صحت‌سنجی نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که MVI را می‌توان به‌عنوان یک شاخص کارآمد در نقشه‌برداری از مانگروها در مقیاس ملی استفاده کرد. این نتایج در راستای دستاوردهای Baloloy و همکاران (۲۰۲۰) است که با کاربرد MVI در تهیه نقشه مانگروها در آمریکای جنوبی، آفریقا، استرالیا و آسیا، کارایی آن را تأیید کردند. مقایسه شاخص‌های پوشش گیاهی و مانگرو در تهیه نقشه

سنجش از دور در سرتاسر دنیا توسط Bunting و همکاران (۲۰۲۲) طراحی شده است که به شکل برخط در دسترس است (<https://www.globalmangrovetwatch.org>). شکل ۵، نقشه مانگروها در جنوب ایران را براساس GMW نسخه ۳ نشان می‌دهد که مساحت مانگروهای ایران در سال ۲۰۲۰ را حدود ۱۱۱۷۷ هکتار برآورد کرده است. اگرچه بررسی نقشه GMW و مقایسه آن با نقشه پژوهش پیش‌رو (شکل ۳) نشان می‌دهد که برخی از رویشگاه‌های مانگروهای مانند خلیج نایبند و خلیج چابهار در نقشه GMW شناسایی نشدند که با توجه به مقیاس جهانی نقشه GMW، این موضوع دور از ذهن نیست. همچنین، عدم شناسایی این رویشگاه‌ها روی نقشه GMW، تفاوت ۱۲۹۴/۸ هکتاری بین دو برآورد گستره مانگروها در سامانه مذکور و پژوهش پیش‌رو را توجیه می‌کند.

شود. در پژوهش پیش‌رو برای تفکیک طبقه مانگرو روی تصویر MVI از الگوریتم RF استفاده شد. در راستای این پژوهش، کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین روی تصاویر شاخص‌های مانگرو به منظور طبقه‌بندی آن‌ها در پژوهش‌های پیشین نیز تأیید شده است (Bihanta Toosi et al., 2019; Xia et al., 2020). برای این منظور از تعیین حد آستانه استفاده کردند. هرچند طبقه‌بندی با حد آستانه تا حدودی وابسته به نظر کاربر است، اما با توجه به کاربرد آن در پژوهش‌های پیشین (Jia et al., 2019; Baloloy et al., 2020)، می‌توان در پژوهش‌های آینده به تأثیر این موضوع بر کارایی MVI در شناسایی مانگروها روی تصاویر سنتینل ۲ پرداخت. سامانه‌ای با عنوان GMW (Global Mangrove Watch) برای پایش مداوم مانگروها مبتنی بر انواع داده‌های



شکل ۵- پراکنش مانگروهای ایران روی نقشه GMW نسخه ۳ در سال ۲۰۲۰

(<https://www.globalmangrovetwatch.org>)

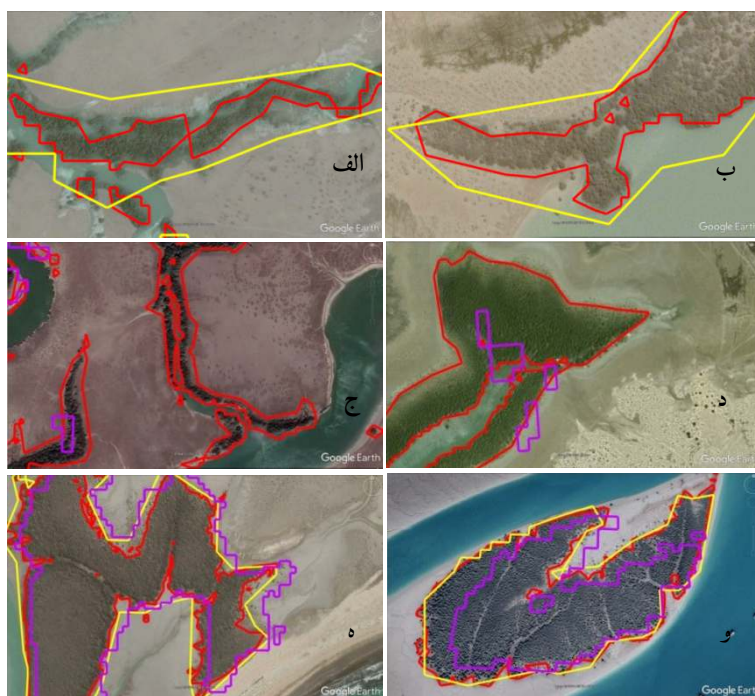
Figure 5. The map of Iran's mangroves on the GMW v3.0 map in 2020

مقایسه و تفسیر بصری شدند (شکل ۶). تفکیک‌پذیری مکانی کمتر تصاویر لندست ۸ (۳۰ متر) در مقایسه با سنتینل ۲ (۱۰ متر) باعث شد که مرز لکه‌های مانگروها، کلی‌تر و دقت کمتری داشته باشد (شکل ۶ الف و ب). این موضوع مساحت بیشتر مانگروهای جنوب ایران روی

به‌منظور ارزیابی نقشه نهایی تهیه‌شده در پژوهش پیش‌رو علاوه بر کاربرد معیارهای صحت‌سنجی، نقشه مانگروها روی تصاویر سنتینل ۲ در پژوهش پیش‌رو، نقشه حاصل از تصاویر لندست ۸ (Erfanifard et al., 2022) و نقشه جهانی مانگروها در سامانه GMW روی تصاویر Google Earth

همکاران (۲۰۱۸) نیز اشاره کردند شناسایی مانگروها روی تصاویر سنتینل ۲ به دلیل تفکیک پذیری مکانی و طیفی (باند های SWIR و NIR) بیشتر، دقت بیشتری نسبت به لندست ۸ دارد. در پژوهش پیش رو نیز مقدار FI-score طبقه مانگرو روی نقشه حاصل از تصاویر سنتینل ۲ (۰/۹۷) بیشتر از لندست ۸ (۰/۸۹) به دست آمد. اگرچه برای پژوهش های بلندمدت روی مانگروها، داده های لندست با آرشیو طولانی (از دهه ۱۹۷۰ تاکنون) نسبت به سنتینل ۲ با آرشیو کوتاه مدت (از سال ۲۰۱۵ تاکنون) ارجحیت دارند.

تصاویر لندست ۸ (۱۳۰۱۹/۱ هکتار) نسبت به سنتینل ۲ (۱۲۴۷۱/۸ هکتار) را تا حدودی توجیه می کند. زیرا لکه ها، بزرگ تر از آنچه هستند، ثبت شدند. همچنین، تفکیک پذیری مکانی کمتر تصاویر لندست ۸ در مقایسه با سنتینل ۲ ممکن است سبب عدم شناسایی لکه های کوچک مانگرو شود. چنانچه یک رویشگاه کوچک در نزدیکی بندر دیر با مساحت ۸/۱ هکتار روی سنتینل ۲ ثبت شد (شماره ۴ در شکل ۳)، اما روی نقشه حاصل از تصاویر لندست ۸ نبود (Erfanifard *et al.*, 2022). در همین راستا، Wang و



شکل ۶- مقایسه نقشه مانگروها روی تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ در این پژوهش (الف، ب)، نقشه GMW و سنتینل ۲ پژوهش پیش رو

(ج، د) و تفاوت مرز لکه ها در هر سه داده (ه، و) روی تصاویر Google Earth

خط های قرمز: نقشه حاصل از تصاویر سنتینل ۲ در این پژوهش، خط های زرد: نقشه حاصل از تصاویر لندست ۸، خط های سرخابی: نقشه GMW

Figure 6. Comparison of mangrove maps on Landsat-8 imagery and Sentinel-2 imagery in this study (a, b), the GMW map and Sentinel-2 imagery in this study (c, d) and the difference of patch boundaries on all data (e, f) on Google Earth imagery

Red lines: the map obtained from Sentinel-2 imagery in this study, Yellow lines: the map obtained from Landsat-8 imagery, Purple lines: the GMW map

۳ و ۵)، بلکه در برخی رویشگاه ها، لکه های مانگرو به طور کامل شناسایی نشدند که دو نمونه از این خطاها در شکل ۶ ج و د ارائه شده است. نکته دیگر این است که در جدول

مقایسه نقشه GMW نسخه ۳ و نقشه حاصل از MVI روی سنتینل ۲ در پژوهش پیش رو نشان داد که نه تنها برخی رویشگاه ها روی نقشه GMW وجود ندارند (مقایسه شکل

مساحت رویشگاه‌های مانگرو در جنوب ایران در اکتبر ۲۰۲۱ حدود ۱۲۴۷۰ هکتار است که در ۴۰ رویشگاه پراکنده شدند. مساحت مانگروها در چهار استان خوزستان (۲۸۶/۷ هکتار)، بوشهر (۲۹۶/۹ هکتار)، هرمزگان (۱۱۲۸۱/۹ هکتار) و سیستان و بلوچستان (۶۰۶/۳ هکتار) نیز برآورد شد. همچنین، با توجه به بررسی صحت‌سنجی نتایج می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد MVI روی تصاویر سنتینل ۲ در سامانه GEE راهکاری مناسب در تهیه نقشه به‌روز از جنگل‌های مانگرو در جنوب ایران است. مقایسه نقشه جنگل‌های مانگرو تهیه‌شده در پژوهش پیش‌رو و نقشه‌های پیشین نشان داد که نوار ساحلی جنوب ایران دارای مناطق مستعدی است که امکان استقرار رویشگاه‌های طبیعی و دست‌کاشت مانگرو در آن‌ها وجود دارد، بنابراین پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آینده فقط به رویشگاه‌های از پیش شناخته‌شده محدود نباشند. بلکه با پایش دقیق سراسری مانگروها، رویشگاه‌های جدید شناسایی و ثبت شوند تا نقشه‌های به‌روز از وضعیت مانگروهای جنوب ایران در دسترس مدیران و پژوهشگران قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

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 شد. علاوه بر این از آقای دکتر افشین دانه‌کار، استاد محترم دانشگاه تهران برای راهنمایی‌های ارزشمند در شناسایی و نام‌گذاری رویشگاه‌های مانگرو سپاسگزاریم. بدون دانش و دستاوردهای پژوهشی ایشان، امکان ارائه نقشه جامع رویشگاه‌های مانگرو در پژوهش پیش‌رو میسر نبود. همچنین از سردبیر محترم نشریه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران و داوران گرامی برای بهبود نسخه اولیه مقاله نیز قدردانی می‌شود.

A1 پژوهش Bunting و همکاران (۲۰۲۲) مساحت مانگروها در ایران ۱۱۱۷۷ هکتار در سال ۲۰۲۰ گزارش شد، در حالی که مجموع مساحت لکه‌ها روی نقشه برخط سال ۲۰۲۰ (شکل ۵) ۱۰۳۳۰/۹ هکتار است. در پژوهش‌های آینده می‌توان صحت نقشه GMW را بیشتر بررسی کرد. زیرا یکی از هدف‌های پروژه مذکور، ارائه یک داده مرجع در پایش تغییرات مانگروها در مقیاس ملی و جهانی است (Bunting et al., 2022). مقایسه چشمی مرزهای شناسایی‌شده روی تصاویر سنتینل ۲، لندست ۸ و نقشه GMW نیز نشان داد که شناسایی مانگروها با MVI روی تصاویر سنتینل ۲، دقت بیشتری دارد و با واقعیت منطبق‌تر است (شکل ۶-و ۵).

یکی از اهداف پژوهش پیش‌رو، پایش سراسری خط ساحلی جنوب ایران در ادامه پژوهش‌های پیشین (Danekar et al., 2012) برای ارزیابی مانگروهای موجود و شناسایی رویشگاه‌های جدید بود. یکی از این رویشگاه‌ها که با MVI روی سنتینل ۲ شناسایی شد، رویشگاهی با مساحت حدود ۲۸۶/۷ هکتار در نزدیکی بندر ماهشهر است. همچنین، رویشگاهی در بندر جاسک و حدفاصل بین منطقه حفاظت‌شده گابریک و خلیج گواتر و سواحل شمال جزیره قشم شناسایی شدند که در گذشته (شکل ۱ و جدول ۱) نبودند. در ارزیابی بلندمدت مانگروها توسط Erfanifard و همکاران (۲۰۲۲) نشان داده شد که برخی رویشگاه‌ها مانند جنگل‌های مانگرو در خلیج چابهار تا پیش از سال ۲۰۱۰ وجود نداشتند و پس از آن مستقر شدند. این رویشگاه‌ها در سال ۲۰۲۱ در مجموع، مساحتی بیشتر از ۱۲۰ هکتار داشتند. بنابراین عدم اشاره به برخی رویشگاه‌ها در پژوهش‌های پیشین می‌تواند هم به دلیل تفاوت در تفکیک‌پذیری مکانی تصاویر ماهواره‌ای و شاخص مورد استفاده باشد و هم ممکن است ناشی از استقرار این رویشگاه‌ها به‌طور طبیعی و یا دست‌کاشت در سال‌های اخیر باشد. پژوهش‌های آینده می‌توانند به طبقه‌بندی ۴۰ رویشگاه شناسایی‌شده از این نظر بپردازند.

به‌طور کلی، نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که مجموع

- منابع مورد استفاده**
- 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: 2043.
 - Mafi-Gholami, D., Zenner, E.K., Jaafari, A. and Bui, D.T., 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.
 - Makowski, C. and Finkl, C.W., 2018. *Threats to Mangrove Forests: Hazards, Vulnerability, and Management*. Springer, Cham, Switzerland, 724p.
 - Safiari, Sh., 2017. Mangrove forests in Iran. *Journal of Iran Nature*, 2(2): 49-57 (In Persian with English summary).
 - Tran, T.V., Reef, R. and Zhu, X., 2022. A review of spectral indices for mangrove remote sensing. *Remote Sensing*, 14: 4868.
 - 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: 1468.
 - Winarso, G., Purwanto, A.D. and Yuwono, DM., 2014. New mangrove index as degradation/healthindicator using remote sensing data : Segaraanakan 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.
 - 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: 3112.
 - 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.
 - Yaghoubzadeh, M., Salman Mahiny, A., Mikaeili Tabrizi, A. and Danehkar, A., 2020. Mangrove forests and threats facing them (Emphasizing the effects of climate change and the response of mangroves to these changes). *Iranian Journal of Marine Science and Technology*, 23(92): 46-62 (In Persian with English summary).
 - 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.
 - Zahed, M.A., Rouhani, F., Mohajeri, S., Bateni, F. and Mohajeri, L., 2010. An overview of Iranian mangrove ecosystems, northern part of the Persian Gulf and Oman Sea. *Acta Ecologica Sinica*, 30: 240-244.
 - Baloloy, A.B., Blanco, A.C., Ana, R.R.C.S. 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.
 - Bihamta Toosi, N., Soffianian, A.R., Fakheran, S., Pourmanafi, S., Ginzler, C. and Waser, L., 2019. Comparing different classification algorithms for monitoring mangrove cover changes in southern Iran. *Global Ecology and Conservation*, 19: e00662.
 - Bunting, P., Rosenqvist, A., Hilarides, L., Lucas, R.M., Thomas, N., Tadono, T., Worthington, T.A., Spalding, M., Murray, N.J. and Rebelo, L.M., 2022. Global mangrove extent change 1996–2020: Global mangrove watch version 3.0. *Remote Sensing*, 14: 3657.
 - 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: 1669.
 - Congalton, R.G. and Green, K., 2019. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*, 3rd 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. Iran national plan, National Forests, Range and Watershed Management Organization, Tehran, Iran, 624p (In Persian with English summary).
 - Elmahdy, S.I. and Ali, T.A., 2022. Monitoring changes and soil characterization in mangrove forests of the United Arab Emirates using the canonical correlation forest model by multitemporal of Landsat data. *Frontiers in Remote Sensing*, 3: 782869.
 - Erfanifard, Y. and Lotfi Nasirabad, M., 2022. Comparison of vegetation and mangrove indices in mangrove mapping on Sentinel-2 imagery based on Google Earth Engine. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 3(3): 224-240 (In Persian with English summary).
 - Erfanifard, Y., Lotfi Nasirabad, M. and Stereńczak, K., 2022. Assessment of Iran's mangrove forest dynamics (1990–2020) using Landsat time series. *Remote Sensing*, 14: 4912.
 - FAO, 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*. Rome, Italy, 186p.
 - Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L.L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., Masek, J. and Duke, N., 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20: 154-159.

Mapping mangrove forest extent in Iran using Sentinel-2 imagery

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- MSc., Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 07.12.2022

Accepted: 22.02.2023

Abstract

Mangrove forests are coastal ecosystems that provide various benefits for ecology, economy and society. To manage these forests sustainably, accurate mapping of their distribution using modern techniques is crucial. This study aimed to map the mangrove forests along the southern coast of Iran from Khuzestan province to Sistan and Baluchestan province and identify new sites using remote sensing. The Mangrove vegetation index (MVI) was applied to Sentinel-2 images on the Google Earth Engine (GEE) cloud computing platform. The MVI images were classified by the random forest algorithm. The final maps were evaluated by accuracy, F1-score and other common indices. The results indicated that the total area of mangrove forests in southern Iran was about 12471.8 ha (accuracy 0.98, F1-score 0.97) in October 2021 in 40 sites across four provinces: Khuzestan (286.7 ha), Bushehr (296.9 ha), Hormozgan (11281.9 ha) and Sistan and Baluchestan (606.3 ha). Moreover, some new sites, such as the mangroves of Mahshahr Harbor with an area of around 290 ha in Khuzestan province, were discovered in this study.

Keywords: Mahshahr Harbor, MVI, Qeshm, random forest.