

تحلیل رابطه بین وقوع خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک و تغییر زی توده جنگل‌های مانگرو خلیج گواتر در یک دوره ۳۴ساله

داود مافی غلامی^{۱*} و ابوالفضل جعفری^۲

*- نویسنده مسئول، استادیار، گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

پست الکترونیک: d.mafigholami@nres.sku.ac.ir

۲- استادیار، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۰۲

چکیده

تحلیل تغییر در توان تولیدی جنگل‌های مانگرو و بررسی رابطه آن با وقوع دوره‌های خشک‌سالی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را از میزان آسیب‌پذیری این بوم‌سازگان‌ها نسبت به اثر نامطلوب ناشی از تغییر اقلیم ارائه کند. در پژوهش پیش‌رو، تأثیر وقوع خشک‌سالی‌های بلندمدت بر توان تولیدی جنگل‌های مانگرو خلیج گواتر در استان سیستان و بلوچستان بررسی شد. با آماربرداری و اندازه‌گیری قطر یقه درختان حرا (*Avicennia marina* (Forssk.) Vierh.)، محاسبه زی‌توده روزمینی و زیرزمینی آن‌ها در قطعه‌نمونه‌ها و تجزیه و تحلیل رابطه بین این مشخصه‌ها با تصاویر ماهواره لندست، سری زمانی ۳۴ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹) زی‌توده درختان حرا نقشه‌سازی شد. سپس، رابطه بین تغییرات زی‌توده با وقوع خشک‌سالی هواشناسی (اندازه‌گیری شده با استفاده از SPI) و خشک‌سالی هیدرولوژیک (اندازه‌گیری شده با استفاده از SSFI) تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد که مطابق با روند تغییر شدت وقوع خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک، زی‌توده روزمینی و زیرزمینی نیز روندهای افزایشی و کاهش‌ی در طی دوره ۳۴ساله داشت، به طوری که در دوره ترسالی پیش از سال ۱۹۹۸، روند افزایشی برای زی‌توده مشاهده شد. با وقوع خشک‌سالی‌های بلندمدت پس از سال ۱۹۹۸، روند کاهش‌ی مقادیر زی‌توده تا سال‌های پایانی دوره ادامه یافت. انطباق بین روند تغییرات زی‌توده و تغییرات SPI و SSFI سبب شد تا همبستگی زیادی بین تغییرات زی‌توده با تغییرات شدت وقوع خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک به دست آید (ضریب‌های همبستگی بیشتر از ۰/۸۲). نتایج این پژوهش می‌تواند برای تهیه برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیم و نیز برنامه‌های احیا و توسعه جنگل‌های مانگرو در استان سیستان و بلوچستان استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: آماربرداری، تصویر ماهواره‌ای، تغییرات زمانی و مکانی، تغییر اقلیم.

مقدمه

مساحت جنگل‌های مانگروی جهان با نرخ سالانه بین ۰/۲ تا ۰/۷ درصد در حال کاهش هستند و این روند روبه‌فزونی است (Friess et al., 2019). این تخریب‌ها و آشفته‌گی‌ها تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی مختلفی مانند

جنگل‌های مانگرو با فراهم آوردن طیف متنوعی از کارکردهای بوم‌شناختی و اقتصادی، نقش قابل‌توجهی در پایداری بوم‌سازگان‌های ساحلی ایفا می‌کنند. با این وجود،

کاهش گستره و توان تولیدی مانگروها طی دهه‌های گذشته شده‌اند.

درمورد مانگروهای سواحل شمالی خلیج فارس و دریای عمان مشخص شده که این جوامع گیاهی طی دهه‌های گذشته در معرض کاهش بارندگی و وقوع خشک‌سالی‌های شدید و بلندمدت بوده‌اند (به‌ویژه در دوره وقوع خشک‌سالی‌های بلندمدت پس از سال ۱۹۹۸) که سبب افت ساختار افقی (گستره) مانگروهای این منطقه شده است (Mafi-Gholami *et al.*, 2017, 2019). از سوی دیگر، برخی پژوهش‌ها گزارش کرده‌اند که در فاصله بین سال‌های ۱۹۶۸ تا ۲۰۱۰، میانگین کمینه دمای هوای روزانه سواحل شمالی خلیج فارس و دریای عمان ۳/۱۴ درجه سانتیگراد زیاد شده و میزان افزایش دماهای حداکثری تا پایان قرن ۲۱ حدود ۳/۳ درجه سانتیگراد خواهد بود (Etemadi *et al.*, 2016). این روند افزایش دمای هوا به‌همراه کاهش بارندگی در دهه‌های گذشته موجب افت ساختار و کاهش در مقدار رویش و تولید خالص اولیه جنگل‌های مانگرو این منطقه شده‌اند. چنانچه پژوهش Mafi-Gholami و همکاران (۲۰۲۰) نیز بیانگر کاهش ۴۰ درصدی توان تولیدی جنگل‌های مانگرو استان هرمزگان در مواجهه با خشک‌سالی‌های این منطقه در دهه‌های گذشته است.

پژوهش پیش‌رو با هدف بررسی تغییر توان تولیدی (زی‌توده) جنگل‌های مانگرو واقع در خلیج گواتر استان سیستان و بلوچستان نسبت به وقوع هم‌زمان خشک‌سالی (کاهش بارندگی) و افزایش تبخیرتعلق (افزایش دمای هوا) انجام شد. برای دستیابی به این هدف با تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از آماربرداری میدانی، داده‌های اقلیمی بلندمدت و تصاویر ماهواره‌ای مربوط به دوره ۳۴ ساله ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹ میلادی، تغییرات زی‌توده جنگل‌های مانگرو خلیج گواتر نسبت به تغییرات شدت خشک‌سالی و تبخیرتعلق در سطح منطقه تحلیل شد. پژوهش پیش‌رو بر این فرض استوار است که بررسی رابطه بین تغییر ساختار یا توان رویشی مانگروها با تغییرات متغیرهای اقلیمی در طی

خشک‌سالی، افزایش دما، کاهش بارندگی، افزایش شدت تبخیر و تعرق، بهره‌برداری از چوب مانگروها، تغییر شکل سواحل، فعالیت‌های صیادی، آبی‌پروری و آلودگی‌های ناشی از ورود فاضلاب شهری و صنعتی (نفت) رخ می‌دهند (Binelli *et al.*, 2007; Krauss *et al.*, 2008; Alongi, 2015). هرچند تغییر در ساختار و عملکرد بوم‌سازگان‌های مانگرو می‌تواند به دلیل وقوع هم‌زمان و هم‌افزایی تنش‌ها و آشفتگی‌های گوناگون باشد، اما در پژوهش‌های متعدد، تغییرات ناشی از تغییر اقلیم شامل تغییر در بارندگی، دمای هوا و تبخیرتعلق به‌عنوان مهم‌ترین عوامل تغییر در ساختار و تولید مانگروها شناسایی شده‌اند (Eslami-Andargoli *et al.*, 2009; Osland *et al.*, 2017; Mafi-Gholami *et al.*, 2017). کاهش بارندگی و افزایش تبخیرتعلق (در اثر افزایش دمای هوا) می‌تواند با کاهش آب شیرین در دسترس و افزایش شوری سبب افت ساختار، برهم خوردن فرایندهای تنفس و فتوسنتز و کاهش تولید خالص اولیه مانگروها شوند (Lovelock & Ellison, 2007; Gilman *et al.*, 2008). بنابراین به دلیل رابطه مستقیم تغییر بارندگی و تبخیرتعلق با تغییر در ساختار و تولید مانگروها، تجزیه و تحلیل تغییر در تولید خالص مانگروها و بررسی رابطه آن با تغییرات بلندمدت این دو متغیر می‌تواند نقش مهمی در اثربخشی و موفقیت برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیم و حفاظت و توسعه جنگل‌های مانگرو داشته باشد (Osland *et al.*, 2016; Gabler *et al.*, 2017).

از پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه می‌توان به بررسی افزایش دما و کاهش بارندگی بر گستره مانگروهای شمال‌غرب استرالیا (Duke *et al.*, 2017)، ارزیابی تأثیر خشک‌سالی بر مانگروهای سواحل شرقی استرالیا (Eslami-Andargoli, 2013) و بررسی اثر افزایش دما (تبخیرتعلق) بر مانگروهای شمال‌غرب استرالیا (Normille *et al.*, 2016) اشاره کرد. نتایج این پژوهش‌ها نشان دادند که رابطه مستقیمی بین افت ساختار و تولید مانگروها با متغیرهای اقلیمی وجود دارد، به‌طوری‌که افزایش دما (افزایش تبخیرتعلق)، کاهش بارندگی و وقوع خشک‌سالی سبب

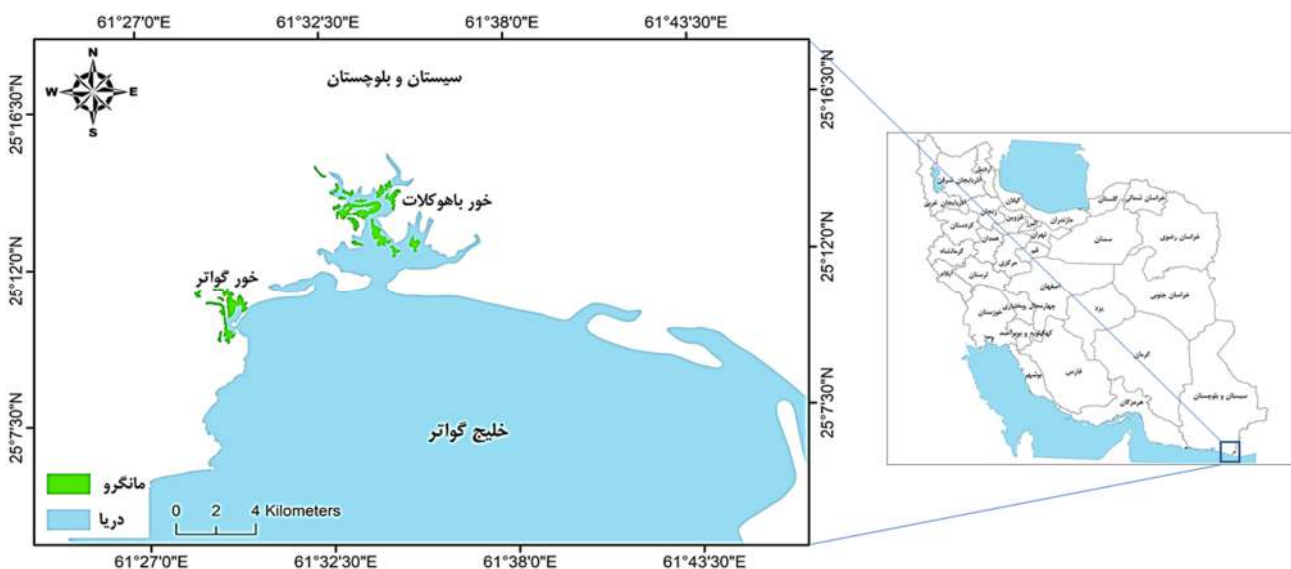
است که سه شاخه آن (خور باهو، مصب رودخانه باهوکللات و خور گواتر) در محدوده مرزهای استان سیستان و بلوچستان قرار دارند. این خلیج بخشی از تالاب بین‌المللی و منطقه حفاظت‌شده است که ارزش های بوم‌شناختی بسیاری دارد. رویشگاه مانگرو مورد مطالعه در خور گواتر (غربی‌ترین خور خلیج گواتر) قرار دارد و به‌طور خالص از حرا (*Avicennia marina* (Forssk.) Vierh.)) تشکیل شده است که همراه با دو گونه گیاهی هالوفیت یا شورپسند شامل *Suaeda vermiculata* و *Halopeplis perfoliata* (Safiari, 2017). جنگل‌های این محدوده طبیعی بوده و عملیات جنگل‌کاری تاکنون در آن‌ها انجام نشده است.

زمان می‌تواند اطلاعات اساسی برای تهیه برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیم و نیز برنامه‌های احیا و توسعه جنگل‌های کشور را فراهم کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

خلیج گواتر با مساحت ۴۱۵/۹۴ کیلومتر مربع در شرقی‌ترین سواحل استان سیستان و بلوچستان و در محدوده جغرافیایی ۱' ۲۵° تا ۱۲' ۲۵° عرض شمالی و ۳۴' ۶۱° تا ۴۷' ۶۱° طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). ۶۹/۴ درصد این خلیج در محدوده مرزهای سیاسی پاکستان و ۳۰/۶ درصد وسعت آن در ایران قرار دارد. خلیج گواتر از طریق شش شاخه با خشکی در ارتباط



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی جنگل‌های مانگرو خلیج گواتر در استان سیستان و بلوچستان

منطقه است، می‌تواند شاخص مناسبی برای بررسی تأثیر تغییرات بارندگی بر بوم‌سازگان‌های طبیعی باشد (Wu et al., 2001; Mafi-Gholami et al., 2017, 2019). همچنین، مشخص شده است که مقدار بارندگی و حجم آب های شیرین سطحی ورودی به سواحل از حوزه‌های آبریز بالادستی، نقش مهمی در زنده‌مانی و توان مانگروها برای

روش پژوهش

تهیه سری زمانی ۳۴ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹) شاخص بارش استاندارد (Standardized Precipitation Index, SPI) پژوهش‌های پیشین نشان دادند که SPI با مقیاس زمانی شش‌ماهه و بیشتر که بیانگر تغییرات بلندمدت بارندگی، آب های جاری سطحی و زیرزمینی و ذخایر و منابع آبی یک

استاندارد (SSFI) استفاده شد. از جمله ویژگی‌های این شاخص می‌توان به سادگی اجرا و کارایی مناسب در بررسی خشک‌سالی‌های هیدرولوژیک اشاره کرد (Modarres, 2009; Fernández *et al.*, 2007). برای ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی خشک‌سالی هیدرولوژیک با استفاده از SSFI از داده‌های دبی ماهانه ۳۴ ساله ایستگاه هیدرومتری پیردان در رودخانه باهوکلان استفاده شد. SSFI از نظر محاسباتی مشابه با SPI است و برای یک دوره مشخص از رابطه ۱ محاسبه می‌شود (McKee *et al.*, 1993).

$$SSFI = \frac{F_i - \bar{F}}{\sigma} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن: F_i مقدار دبی در فاصله زمانی i ، \bar{F} متوسط مقادیر دبی در سری زمانی و σ نشان‌دهنده انحراف معیار مقادیر دبی در سری هستند. برای سری‌های ماهانه، SSFI به صورت رابطه ۲ نشان داده می‌شود:

$$SSFI_{\tau} = \frac{F_{v\tau} - \bar{F}_{\tau}}{\sigma_{\tau}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن: $\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^n F_{v, \tau}$ و $\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{v=1}^n (F_{v, \tau} - \bar{F}_{\tau})^2}$ بیانگر سال، τ فاصله بین سال‌ها، \bar{F}_{τ} و σ_{τ} نشان‌دهنده مقادیر میانگین و انحراف معیار مربوط به ماه و τ و ω برابر با ۱۲ هستند.

مطالعه، ابتدا قطر یقه هریک از جست‌های درختان حرا در ۵۰ قطعه نمونه با ابعاد ۴۵ × ۴۵ متر مربع (متناسب با اندازه تصویر ماهواره لندست) در سال ۲۰۱۹ اندازه‌گیری شد (شکل ۲) (Mafi-Gholami *et al.*, 2020). این تعداد قطعه نمونه، نتیجه ترسیم یک شبکه آماربرداری بود که با ابعاد ۲۵۰ × ۲۵۰ متر مربع به روش تصادفی - منظم در تمام سطح منطقه مورد مطالعه پراکنش داده شد. سپس، مقادیر زی توده روزمینی (Above Ground Biomass, AGB) و زیرزمینی (Below Ground Biomass, BGB) مانگروها با

مقابله با شوری زیاد آب دارند (Ellison, 2000). تغییر در مقدار سالانه بارندگی و حجم آب شیرین ورودی به محیط مانگروها باعث ایجاد تغییر در ساختار و توان تولیدی مانگروها می‌شود (Mafi-Gholami *et al.*, 2017, 2019, 2020)، بنابراین در این پژوهش برای بررسی رابطه بین تغییرات زی توده مانگروها با وقوع خشک‌سالی، SPI سالانه مربوط به ماه سپتامبر (شهریور) استفاده شد. بدین منظور از سری ۳۴ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹ میلادی) داده‌های بارندگی ماهانه چهار ایستگاه سینوپتیک باهوکلان، نوپندان، تیس و چابهار استفاده شد و سری زمانی ۳۴ ساله SPI برای هریک از ایستگاه‌ها تهیه شد. در نهایت، پس از پهنه‌بندی SPI در سطح منطقه با استفاده از دستور IDW در نرم‌افزار ArcGIS، سری زمانی ۳۴ ساله SPI در سطح جنگل‌های مانگرو خلیج گواتر استخراج شد.

تهیه سری زمانی ۳۴ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹) شاخص دبی استاندارد (Standardized Streamflow Index, SSFI) در این پژوهش، بررسی روند وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیک برای رودخانه‌های اصلی منتهی به سواحل دربرگیرنده مانگروها انجام شد. بدین منظور از شاخص دبی

مطابق با روش Modarres (۲۰۰۷) و Fernández و همکاران (۲۰۰۹) برای طبقه‌بندی SSFI و تعیین آستانه‌های وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیک از طبقه‌بندی McKee و همکاران (۱۹۹۳) استفاده شد. براین اساس، در مرز وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیک، $SSFI = 0$ است. پس از انجام محاسبات، سری زمانی ۳۴ ساله SSFI یک‌ساله تهیه شد.

تهیه سری زمانی ۳۴ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹) زی توده برای برآورد زی توده در طول دوره ۳۴ ساله مورد

$$BGB = 1.28 \times D^{1.17}$$

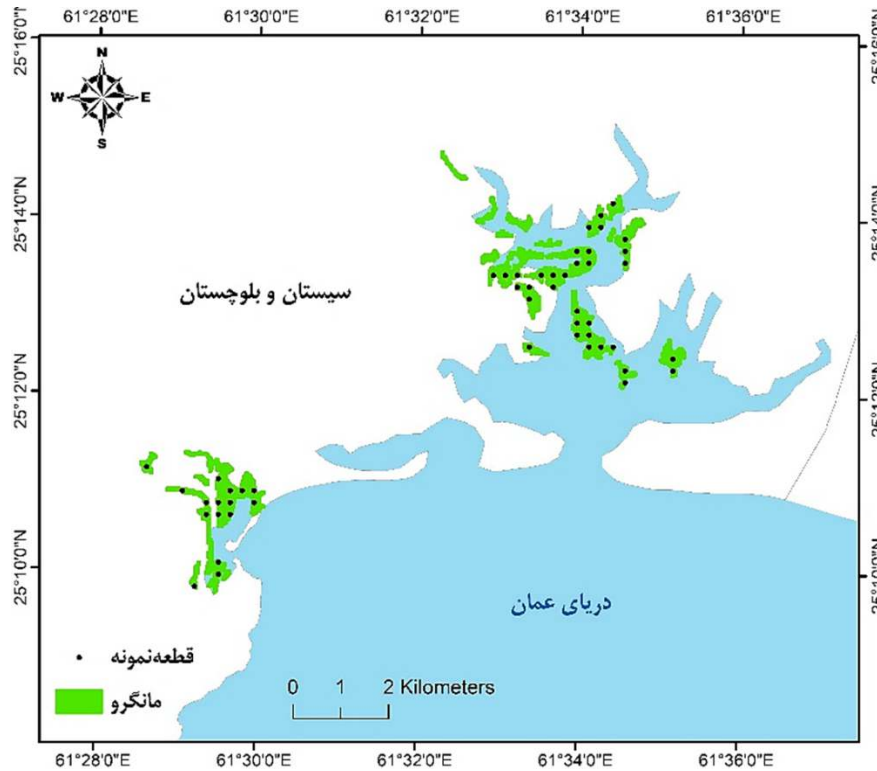
رابطه (۴)

استفاده از رابطه‌های ۳ و ۴ محاسبه شد (Schile *et al.*, 2017; Mafi-Gholami *et al.*, 2020):

که در آن‌ها: D قطر یقه است.

$$AGB = 0.308 \times D^{2.11}$$

رابطه (۳)



شکل ۲- پراکنش قطعه‌نمونه‌ها در سطح جنگل‌های مانگرو خلیج گواتر

آماربرداری زمینی و نیز برای جلوگیری از تغییرات فنولوژیکی ناشی از تغییر فصول) با ردیف: ۱۵۶ و گذر: ۴۳ استفاده شد. پس از اعمال تصحیحات هندسی و رادیومتریک روی تصاویر و تهیه نقشه NDVI رویشگاه برای سال ۲۰۱۹، میانگین NDVI مربوط به یک پنجره 3×3 پیکسلی متناظر با هر قطعه‌نمونه زمینی محاسبه شد و برای توسعه رابطه بین زی‌توده و NDVI استفاده شد. در این پژوهش از بین قطعه‌نمونه‌های برداشت‌شده در رویشگاه، ۳۵ قطعه‌نمونه (۷۰ درصد) برای مدل‌سازی رابطه بین زی‌توده و NDVI به‌کار برده شد (Powell *et al.*, 2010; Mafi-Gholami *et al.*, 2019, 2020).

مقادیر زی‌توده روزمینی و زیرزمینی با یکدیگر جمع شدند و مقدار زی‌توده کل در هر یک از قطعه‌نمونه‌ها به‌دست آمد. برای مدل‌سازی رابطه بین زی‌توده در قطعه‌نمونه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌سازی تغییرات زی‌توده مانگروها در طول دوره ۳۴ساله از شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال‌شده (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) استفاده شد. NDVI یکی از بهترین و مناسب‌ترین شاخص‌ها برای پایش تغییرات ساختار و توان تولیدی مانگروها در طول زمان است (Mafi-Gholami *et al.*, 2017, 2019, 2020). بدین‌منظور از سری زمانی ۳۴ساله ماهواره لندست مربوط به ماه فوریه (هم‌زمان با تاریخ

نتایج

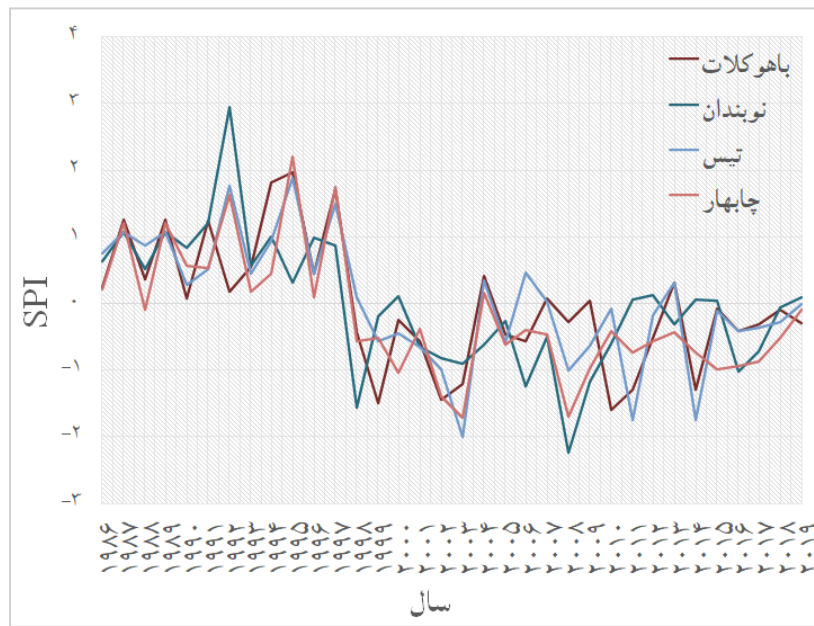
نتایج محاسبه SPI یک‌ساله در ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب بیانگر تغییرات زمانی پراکنش بارندگی در محدوده کمتر و بیشتر از حد نرمال بود. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، پس از یک دوره وقوع ترسالی‌های متوسط تا شدید تا اواخر دهه ۱۹۹۰، کاهش قابل توجه SPI و وقوع خشک‌سالی‌های شدید تا بسیار شدید در دوره زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۹ مشهود است. مطابق با این الگوی پراکنش زمانی خشک‌سالی و ترسالی، سری زمانی ۳۴ ساله SPI را می‌توان به دو دوره زمانی تفکیک کرد. در دوره زمانی ۱۲ ساله ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۷، طیفی از SPI مثبت با ترسالی‌های متوسط تا بسیار شدید برای بیشتر سال‌های دوره آماری مشاهده می‌شود، اما در دوره زمانی ۲۲ ساله از ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۹، SPI منفی بیانگر کاهش قابل توجه بارندگی سالانه و تداوم وقوع خشک‌سالی‌های بلندمدت و شدید در این دوره زمانی (با SPI از صفر تا کمتر از ۲-) در خلیج گواتراست.

محاسبه سری زمانی SSFI یک‌ساله با استفاده از سری زمانی ۳۴ ساله مربوط به دبی متوسط ماهانه در ایستگاه هیدرومتری پیردان نشان داد که همانند الگوی تغییرات SPI، پیش از سال ۱۹۹۸ دوره‌های پیوسته‌ای (سه تا هفت سال) از ترسالی متوسط تا شدید اتفاق افتاده بود (SSFI مثبت)، اما در دوره زمانی پس از سال ۱۹۹۸ دوره‌های طولانی از خشک‌سالی هیدرولوژیک ملایم تا بسیار شدید (SSFI منفی) همراه با ترسالی‌های کوتاه‌مدت در برخی از سال‌های دوره در ایستگاه مشاهده می‌شود (شکل ۴).

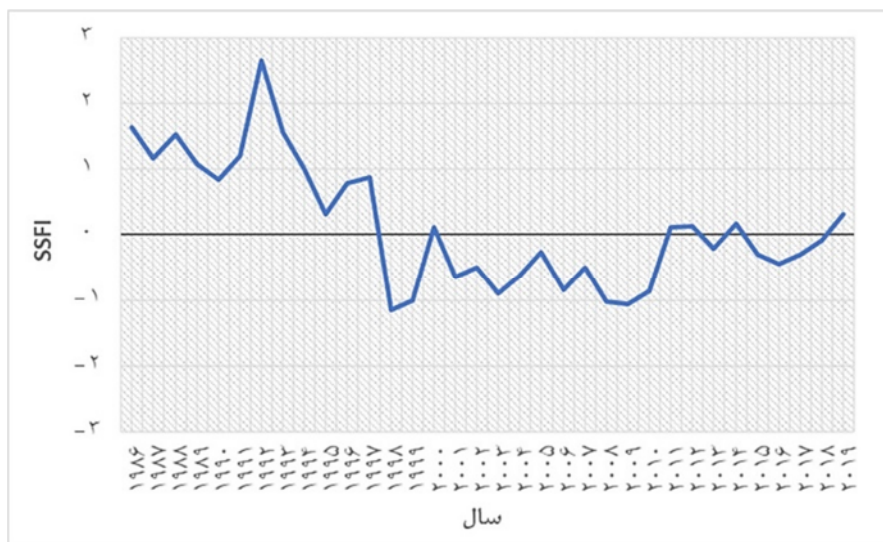
روش رگرسیون حداقل مربعات (Least Squares Regression, LSR) بین NDVI و زی‌توده مانگروها، مدل‌های مختلف شامل خطی (Linear)، لگاریتمی (Logarithmic)، معکوس (Inverse)، درجه دوم (Quadratic)، درجه سوم (Cubic)، توانی (Power) و نمایی (Exponential) توسعه داده شد. سپس، بهترین مدل بر مبنای بیشترین مقدار ضریب تعیین تعدیل‌شده (R^2_{adj}) و کمترین مقدار انحراف استاندارد (SE) انتخاب شد. برای اعتبارسنجی مدل‌ها از ۳۰ درصد باقی‌مانده قطعه‌نمونه‌ها (۱۵ قطعه‌نمونه) به‌عنوان مجموعه داده‌های اعتبارسنجی استفاده شد (Powell *et al.*, 2010; Mafi-Gholami *et al.*, 2019, 2020). اعتبارسنجی مدل‌ها با استفاده از R^2 و p مربوط به نمودار پراکنش زی‌توده اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده انجام شد (Mafi-Gholami *et al.*, 2019, 2020). همچنین، رابطه رگرسیونی توسعه‌یافته بین تغییرات مقادیر زی‌توده مانگروها در قطعه‌نمونه‌ها و NDVI در سال ۲۰۱۹ روی سری زمانی ۳۳ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸) نقشه‌های NDVI رویشگاه اجرا شد. بدین ترتیب نقشه تغییرات زی‌توده مانگروها برای دوره ۳۴ ساله (و سری زمانی ۳۴ ساله متوسط زی‌توده رویشگاه) تهیه شد. در نهایت، تفاوت بین میانگین زی‌توده مانگروها در دو دوره زمانی پیش و پس از نقاط احتمال تغییر در روند وقوع خشک‌سالی‌ها با آزمون t بررسی شد.

تحلیل رابطه بین تغییرات زی‌توده و تغییرات SPI و SSFI در طول دوره ۳۴ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹)

در این مرحله، ضریب‌های همبستگی پیرسون برای بررسی رابطه بین تغییرات زی‌توده مانگروهای رویشگاه با تغییرات SPI و SSFI در طی دوره زمانی ۳۴ ساله استفاده شد.



شکل ۳- تغییرات SPI (شدت وقوع خشک‌سالی) در ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب



شکل ۴- تغییرات SSFI (شدت وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیک) در ایستگاه هیدرولوژیک پیردان

۶۰/۱ و ۱۵/۵ تن در هکتار به‌دست آمد.

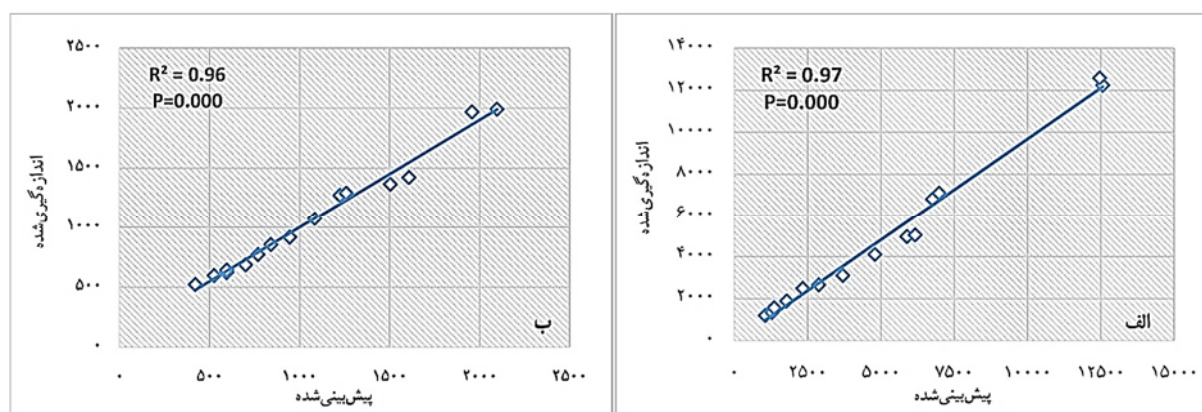
نتایج مدل‌سازی رابطه بین زی‌توده روزمینی و زیرزمینی درختان حرا با NDVI با استفاده از ۷۰ درصد داده‌های مشاهداتی نشان داد که رابطه خطی همه مدل‌ها معنی‌دار است ($p < 0.001$) و مقادیر ضریب تعیین تعدیل‌شده ($Adj-R^2$) آن‌ها بیشتر از ۰/۹۸ به‌دست آمد (جدول ۱). نتایج

نتایج مدل‌سازی رابطه بین زی‌توده در قطعه‌نمونه‌ها و NDVI عملیات آماربرداری نشان داد که متوسط، کمینه و بیشینه قطر یقه در جنگل‌های مانگرو خلیج گواتر در سال ۲۰۱۹ به‌ترتیب برابر با ۸/۲۱، ۵ و ۶۲/۶ سانتی‌متر هستند. براساس مقادیر اندازه‌گیری‌شده، متوسط زی‌توده روزمینی و زیرزمینی مانگروها در خلیج گواتر در سال ۲۰۱۹ به‌ترتیب

اعتبارسنجی مدل‌های توسعه‌یافته نشان داد که همه مدل‌ها با داشتن ضریب تعیین (R^2) بیشتر از ۰/۹۶ عملکرد بسیار خوبی در پیش‌بینی زی‌توده مانگروها با استفاده از NDVI داشتند (شکل ۵- الف و ب).

جدول ۱- مدل‌سازی رگرسیون حداقل مربعات (LSR) برای پیش‌بینی مقادیر زی‌توده درختان حرا در خلیج گواتر از مقادیر NDVI

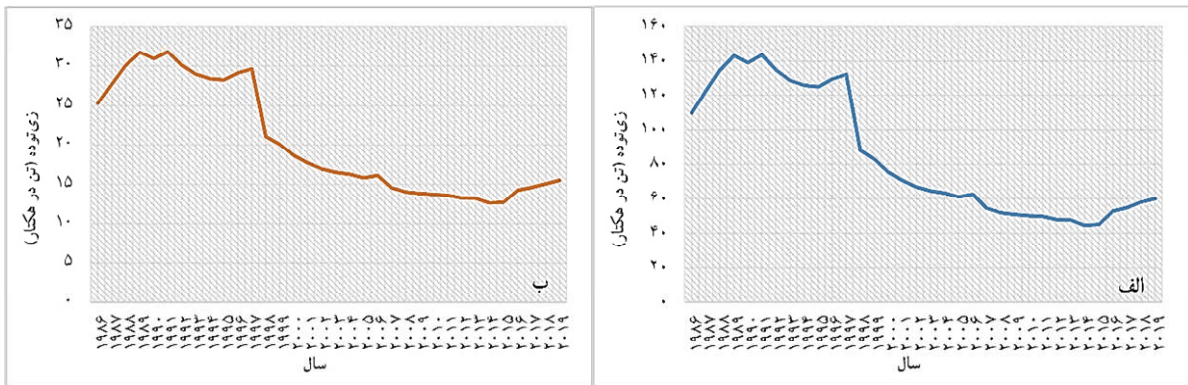
p-value	Adj-r ²	SE	b	a	
<۰/۰۰۱	۰/۹۸	۱۵۸۱/۵	-۶۹۷۲/۹۱	۲۷۳۷۱/۹۷	زی‌توده روزمینی
<۰/۰۰۱	۰/۹۸	۵۱/۱	-۴۱۷/۱۱	۳۴۹۱/۴۵	زی‌توده زیرزمینی



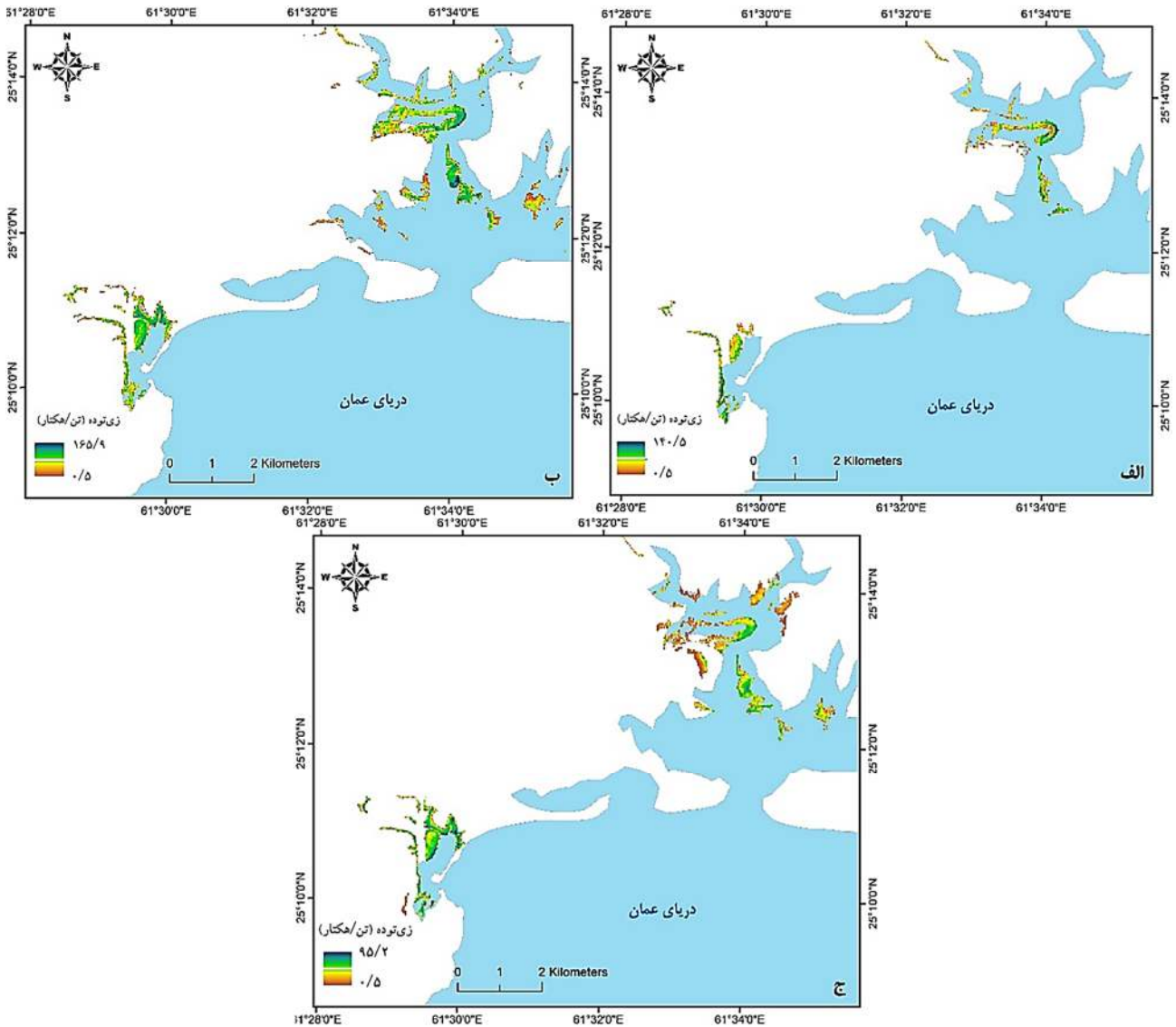
شکل ۵- مقایسه بین ۳۰ درصد (اعتبارسنجی) مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده زی‌توده روزمینی (الف) و زی‌توده زیرزمینی (ب) (مستخرج از مقادیر NDVI تصویر ماهواره‌ای)

تهیه سری زمانی ۳۴ ساله زی‌توده روزمینی و زیرزمینی جنگل‌های مانگرو خلیج گواتر با اجرای مدل‌های رگرسیونی توسعه‌یافته روی سری زمانی ۳۳ ساله نقشه‌های NDVI مانگروها نشان داد که مطابق با الگوی تغییرات شدت وقوع خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک، زی‌توده مانگروها نیز در سال‌های ابتدایی دوره و تا پیش از سال ۱۹۹۸ (دوره ترسالی) اغلب روند افزایشی داشتند، اما در دوره وقوع خشک‌سالی‌های بلندمدت پس از سال ۱۹۹۸، روند نزولی در تغییرات زی‌توده مشاهده شد (شکل ۶- الف و ب). همچنین، مقدار متوسط سالانه زی‌توده درختان حرا در خلیج گواتر در دوره زمانی پیش از سال ۱۹۹۸ برابر با ۱۶۰/۱ تن در هکتار به‌دست آمد. این مقدار در دوره زمانی پس از سال ۱۹۹۸ به ۷۴/۸ تن در هکتار کاهش یافت. نتایج آزمون t نشان داد که تفاوت معنی‌دار بین

مقادیر متوسط سالانه زی‌توده در دو دوره زمانی پیش و پس از سال ۱۹۹۸ وجود دارد ($p < 0.01$). لازم به ذکر است که در سال‌های پایانی دوره ۳۴ ساله با افزایش بارندگی و کاهش شدت خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک بر مقدار زی‌توده درختان افزوده شد. علاوه بر روند تغییرات مقدار متوسط سالانه زی‌توده در طول دوره ۳۴ ساله و در دو دوره پیش و پس از سال ۱۹۹۸، بیشینه زی‌توده نیز در سه مقطع زمانی ابتدای دوره (۱۹۸۶)، میانه دوره (۱۹۹۸) و پایان دوره (۲۰۱۹) به‌میزان قابل‌توجهی تغییر کرد. بیشینه زی‌توده درختان حرا در خلیج گواتر از ۱۴۰/۵ تن در هکتار در سال ۱۹۸۶ به ۱۶۵/۹ تن در هکتار در سال ۱۹۹۸ (پیش از شروع خشک‌سالی‌ها) رسید. سپس تا سال ۲۰۱۹ (دوره وقوع خشک‌سالی‌های بلندمدت) به ۹۵/۲ تن در هکتار کاهش یافت (شکل ۷- الف، ب و ج).



شکل ۶- تغییرات زمانی زی توده درختان حرا در خلیج گواتر در طی دوره ۳۴ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹) (الف: زی توده روزمینی و ب: زی توده زیرمینی)



شکل ۷- تغییرات مکانی زی توده درختان حرا در خلیج گواتر در سالهای الف: ۱۹۸۶، ب: ۱۹۹۸ و ج: ۲۰۱۹

نشان داد که همبستگی زیادی (ضریب رگرسیون $\geq 0/82$) بین این دو متغیر در سطح منطقه مورد مطالعه وجود دارد (جدول ۲).

بررسی رابطه بین تغییرات زی‌توده با تغییرات SPI (خشک‌سالی هواشناسی) و SSFI (خشک‌سالی هیدرولوژیک) در طول دوره ۳۴ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹)

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون برای رابطه بین تغییرات زی‌توده درختان حرا در خلیج گواتر با تغییرات SPI و SSFI در طول دوره ۳۴ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹)

مقدار SSFI	مقدار SPI	زی‌توده	
-	-	۱	زی‌توده
-	۱	$0/88^*$	مقدار SPI
۱	$0/71^*$	$0/82^*$	مقدار SSFI

* معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد

بحث

بررسی رابطه بین پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم به‌ویژه وقوع خشک‌سالی‌ها و تغییر در پوشش‌های گیاهی بوم سازگان‌های تالابی می‌تواند نقش مهمی در کارایی و موفقیت برنامه‌های حفاظتی و نیز تهیه برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیم داشته باشد (Mafi-Gholami et al., 2020). در پژوهش پیش‌رو، تأثیر وقوع خشک‌سالی‌های بلندمدت بر توان تولیدی جنگل‌های مانگرو خلیج گواتر بررسی شد. نتایج نشان داد که مطابق با روند تغییرات شدت وقوع خشک‌سالی هواشناسی (SPI) و خشک‌سالی هیدرولوژیک (SSFI)، زی‌توده روزمینی و زیرزمینی نیز در طول دوره ۳۴ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹) روندهای افزایشی و کاهش‌ی داشتند. به‌طوری‌که در دوره ترسالی پیش از سال ۱۹۹۸ (دوره مثبت بودن SPI و SSFI)، روند افزایشی برای مقادیر زی‌توده مشاهده شد. با وقوع خشک‌سالی‌های بلندمدت پس از سال ۱۹۹۸ (منفی بودن SPI و SSFI) روند کاهش‌ی زی‌توده تا سال‌های پایانی دوره ادامه داشت. انطباق بین روند تغییر مقادیر زی‌توده و تغییرات SPI و SSFI سبب شد تا همبستگی زیادی بین تغییرات زی‌توده مانگروها با تغییرات شدت وقوع خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک به‌دست آید (ضریب‌های همبستگی بیشتر از $0/82$). نتایج

پژوهش‌هایی که در رویشگاه‌های مانگرو خمیر، تیاب و جاسک در استان هرمزگان انجام شده‌اند، روندهای کاهش‌ی و افزایش‌ی را برای تغییرات گستره، توان تولیدی و سطح سلامت این رویشگاه‌ها نیز در دوره‌های ترسالی (پیش از سال ۱۹۹۸) و خشک‌سالی (پس از سال ۱۹۹۸) گزارش کرده‌اند (Mafi-Gholami et al., 2017, 2019, 2020). مجموع نتایج پژوهش پیش‌رو و پژوهش‌های پیشین در خصوص مانگروهای ایران بیانگر تأثیر مخرب ناشی از کاهش بارندگی و وقوع خشک‌سالی‌های بلندمدت سال‌های اخیر بر ساختار و توان تولیدی مانگروهای کشور در طول سواحل خلیج فارس و دریای عمان هستند. در پژوهشی مشابه که در استرالیا انجام شد، سال ۱۹۹۰ به‌عنوان مهم‌ترین نقطه تغییر در سری زمانی ۳۲ بارندگی (۱۹۷۲ تا ۲۰۰۴) در خلیج مورتون شناسایی شد (Eslami-Andargoli et al., 2009). نتایج پژوهش مذکور حاکی از آن بود که کاهش بارندگی و وقوع خشک‌سالی در دوره زمانی پس از سال ۱۹۹۰ سبب کاهش گستره مانگروهای استرالیا شده است. یافته‌های مشابهی برای رویشگاه‌های دیگر در دنیا گزارش شده است (Feild, 1995; Ellison, 2000; Armitage et al., 2015; Gabler et al., 2017) که نشان‌دهنده نقش منفی کاهش بارندگی و وقوع خشک‌سالی بر افت ساختار و توان

رسوب‌گذاری ساحلی و نیز عوامل کلی‌تری مانند بالا آمدن سطح آب دریا و محدوده جزرومدی از عوامل مؤثر بر ساختار و توان تولیدی مانگروها در مناطق گوناگون هستند. پژوهش‌های آینده می‌توانند تأثیر این عوامل را بر تغییرات گستره یا توان تولیدی مانگروهای ایران (و به‌طور ویژه بر جنگل‌های مانگرو خلیج گواتر) بررسی کنند.

در پژوهش پیش‌رو، برای اولین بار در کشور، رابطه بین تغییر توان تولیدی مانگروها با تغییرات وقوع خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک بررسی شد. نتایج نیز به‌خوبی تأثیر نامطلوب ناشی از کاهش مقدار آب شیرین ورودی به محیط ساحلی را بر توان تولیدی مانگروهای استان سیستان و بلوچستان نشان دادند. روش تحلیلی معرفی‌شده در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای بررسی اثرات وقوع خشک‌سالی بر رویشگاه‌های طبیعی کشور توسط پژوهشگران به‌کار برده شود.

سیاسگذاری

این مقاله بخشی از نتایج طرح پژوهشی به شماره ۹۸۰۲۱۵۸۴ است که با حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور اجرا شده است. نویسندگان بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌کنند.

منابع مورد استفاده

- Alongi, D.M., 2015. The impact of climate change on mangrove forests. *Current Climate Change Reports*, 1(1): 30-39.
- Armitage, A.R., Highfield, W.E., Brody, S.D. and Louchouart, P., 2015. The contribution of mangrove expansion to salt marsh loss on the Texas Gulf Coast. *PLoS One*, 10(5): e0125404.
- Binelli, A., Sarkar, S.K., Chatterjee, M., Riva, C., Parolini, M., Deb Bhattacharya, B., ... and Satpathy, K.K., 2007. Concentration of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sediment cores of Sundarban mangrove wetland, northeastern part of Bay of Bengal (India). *Marine Pollution Bulletin*, 54(8): 1220-1229.
- Duke, N. C., Kovacs, J. M., Griffiths, A. D., Preece, L., Hill, D. J., Van Oosterzee, P., ... and Burrows, D., 2017. Large-scale dieback of mangroves in

تولید مانگروها هستند. کاهش بارندگی و وقوع خشک‌سالی اغلب موجب افزایش شوری بسیار زیاد اراضی روبه‌خشکی در بالادست مانگروها می‌شود و درنهایت، پراکندگی، کم‌دوامی و کاهش پوشش و پس‌روی بخش‌هایی و یا تمام رویشگاه را در پی دارد (Feild, 1995; Ellison, 2000). همچنین، هرگونه تغییر در بارندگی و جریان‌ات آبی سطحی و وقوع خشک‌سالی می‌تواند از طریق تغییر مستقیم در مقدار مواد غذایی و رسوبات ورودی به بستر جنگل‌های مانگرو، تأثیر قابل‌توجه بر رویش، ساختار و نحوه توزیع مکانی مانگروها داشته باشد (Snedaker, 1995; Ellison, 2000)، درحالی‌که باتوجه‌به پیش‌بینی‌های موجود، کاهش بارندگی و وقوع خشک‌سالی‌های پی‌درپی در منطقه خاورمیانه ادامه خواهد داشت (Solomon *et al.*, 2007).

علاوه‌بر وقوع خشک‌سالی‌های شدید تا بسیار شدید در سال‌های اخیر، افزایش حدود ۱/۴ درجه سانتیگراد برای دمای هوای سطح کره زمین (Szulejko *et al.*, 2017) و افزایش حدود ۳/۲ درجه سانتیگراد در سواحل جنوب ایران (Etemadi *et al.*, 2016) تا پایان قرن ۲۱ می‌تواند با افزایش تبخیر و تعرق در سطح نواحی ساحلی و حوزه‌های آبریز بالادستی مانگروها سبب تشدید اثرات نامطلوب ناشی از وقوع خشک‌سالی بر مانگروهای سواحل جنوب ایران شود.

باتوجه‌به همبستگی و انطباق زیاد بین تغییرات زی‌توده جنگل‌های مانگرو خلیج گواتر با وقوع خشک‌سالی پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده ضمن مدل‌سازی رابطه بین تغییرات زی‌توده با تغییرات شدت خشک‌سالی، مقادیر زی‌توده آینده در مواجهه با خشک‌سالی پیش‌بینی شود تا اطلاعات دقیق‌تری از عکس‌العمل مانگروها نسبت به اثرات تغییر اقلیم به‌دست آید.

علاوه‌بر تأثیر تغییر بارندگی و حجم آب شیرین ورودی به محیط ساحلی بر ساختار و توان تولیدی مانگروها، تفاوت در مشخصه‌های رویشگاهی دیگر مانند ویژگی‌های ژئومورفولوژیک محلی، ویژگی‌های هیدرولوژیک آب‌های سطحی و زیرزمینی، وضعیت خشکی‌های بالادست، میزان

- Vulnerability of mangroves and tidal wetlands of the Great Barrier Reef to climate change: 237-269. In: Johnson, J.E. and Marshall, P.A. (Eds.). *Climate Change and the Great Barrier Reef: A Vulnerability Assessment*. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Townsville, Australia, 818p.
- Mafi-Gholami, D., Mahmoudi, B. and Zenner, E.K., 2017. An analysis of the relationship between drought events and mangrove changes along the northern coasts of the Persian Gulf and Oman Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 199: 141-151.
 - Mafi-Gholami, D., Zenner, E.K. and Jaafari, A., 2020. Mangrove regional feedback to sea level rise and drought intensity at the end of the 21st century. *Ecological Indicators*, 110: 105972.
 - Mafi-Gholami, D., Zenner, E.K., Jaafari, A. and Ward, R.D., 2019. Modeling multi-decadal mangrove leaf area index in response to drought along the semi-arid southern coasts of Iran. *Science of the Total Environment*, 656: 1326-1336.
 - McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Anaheim, California, 17-22 Jan. 1993: 179-184.
 - Modarres, R., 2007. Streamflow drought time series forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21(3): 223-233.
 - Normille, N., 2016. Survey confirms worst-ever coral bleaching at Great Barrier Reef. *Science*. Available at: <https://www.sciencemag.org/news/2016/04/survey-confirms-worst-ever-coral-bleaching-great-barrier-reef>.
 - Osland, M.J., Feher, L.C., Griffith, K.T., Cavanaugh, K.C., Enwright, N.M., Day, R.H., ... and Rogers, K., 2017. Climatic controls on the global distribution, abundance, and species richness of mangrove forests. *Ecological Monographs*, 87(2): 341-359.
 - Powell, S.L., Cohen, W.B., Healey, S.P., Kennedy, R.E., Moisen, G.G., Pierce, K.B. and Ohmann, J.L., 2010. Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches. *Remote Sensing of Environment*, 114(5): 1053-1068.
 - Safiari, Sh., 2017. Mangrove forests of Iran. *Nature of Iran*, 2(2): 49-57 (In Persian).
 - Schile, L.M., Kauffman, J.B., Crooks, S., Fourqurean, J.W., Glavan, J. and Megonigal, J.P., 2017. Limits on carbon sequestration in arid blue carbon ecosystems. *Ecological Applications*, 27(3): 859-872.
 - Australia's Gulf of Carpentaria: a severe ecosystem response, coincidental with an unusually extreme weather event. *Marine and Freshwater Research*, 68(10): 1816-1829.
 - Duke, N.C., Meynecke, J.O., Dittmann, S., Ellison, A.M., Anger, K., Berger, U., ... and Dahdouh-Guebas, F., 2007. A world without mangroves?. *Science*, 317(5834): 41-42.
 - Ellison, A.M., 2000. Mangrove restoration: do we know enough?. *Restoration Ecology*, 8(3): 219-229.
 - Eslami-Andargoli, L., Dale, P. and Sipe, N., 2013. Does spatial scale affect the pattern of mangrove change under different rainfall regimes? An example in southeast Queensland, Australia. *Austral Ecology*, 38(2): 208-218.
 - Eslami-Andargoli, L., Dale, P.E.R., Sipe, N. and Chaseling, J., 2009. Mangrove expansion and rainfall patterns in Moreton Bay, southeast Queensland, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 85(2): 292-298.
 - Etemadi, H., Samadi, S.Z., Sharifikia, M. and Smoak, J.M., 2016. Assessment of climate change downscaling and non-stationarity on the spatial pattern of a mangrove ecosystem in an arid coastal region of southern Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 126(1-2): 35-49.
 - Fernández, C., Vega, J.A., Fonturbel, T. and Jiménez, E., 2009. Streamflow drought time series forecasting: a case study in a small watershed in North West Spain. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(8): 1063.
 - Field, C.D., 1995. Impact of expected climate change on mangroves. *Hydrobiologia*, 295: 75-81.
 - Friess, D.A., Rogers, K., Lovelock, C.E., Krauss, K.W., Hamilton, S.E., Lee, S.Y., ... and Shi, S., 2019. The state of the world's mangrove forests: past, present, and future. *Annual Review of Environment and Resources*, 44: 89-115.
 - Gabler, C.A., Osland, M.J., Grace, J.B., Stagg, C.L., Day, R.H., Hartley, S.B., ... and McLeod, J.L., 2017. Macroclimatic change expected to transform coastal wetland ecosystems this century. *Nature Climate Change*, 7(2): 142-147.
 - Gilman, E.L., Ellison, J., Duke, N.C. and Field, C., 2008. Threats to mangroves from climate change and adaptation options. *Aquatic Botany*, 89(2): 237-250.
 - Krauss, K.W., Lovelock, C.E., McKee, K.L., López-Hoffman, L., Ewe, S.M.L. and Sousa, W.P., 2008. Environmental drivers in mangrove establishment and early development: a review. *Aquatic Botany*, 89(2): 105-127.
 - Lovelock, C.E. and Ellison, J., 2007. Chapter 9:

2017. Global warming projections to 2100 using simple CO₂ greenhouse gas modeling and comments on CO₂ climate sensitivity factor. *Atmospheric Pollution Research*, 8(1): 136-140.
- Wu, H., Hayes, M.J., Weiss, A. and Hu, Q., 2001. An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the statistical Z-Score. *International Journal of Climatology*, 21(6): 745-758.
 - Snedaker, S.C., 1995. Mangroves and climate change in the Florida and Caribbean region: scenarios and hypotheses. *Hydrobiologia*, 295(1-3): 43-49.
 - Solomon, S., Qin, D. and Manning, M., 2007. Climate change 2007: the physical science basis. Working Group I Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, 92p.
 - Szulejko, J.E., Kumar, P., Deep, A. and Kim, K.H., 874.

Analysis of relationship between the meteorological and hydrological droughts and biomass change of mangrove forests in the Gwatr Port over a 34-year period

D. Mafi-Gholami ^{1*} and A. Jaafari ²

1* - Corresponding author, Assistant Prof., Department of Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: d.mafigholami@nres.sku.ac.ir

2- Assistant Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 21.03.2020

Accepted: 20.06.2020

Abstract

The analysis of changes in mangrove forests production capacity and its relation to the drought periods can provide valuable information on the vulnerability of these ecosystems to the adverse effects of climate change. This study investigates the effect of long-term drought occurrences on the production capacity of the mangrove forests in the Gwatr Port in the Sistan and Baluchestan province. To do this, by recording the diameter at breast height and calculating the above and below ground biomass in the sample plots and analyzing the relationship between these characteristics with the Landsat satellite images, 34-year time series (1986-2019) mangrove biomass were mapped and the relationship between biomass variations and changes in meteorological drought (measured using SPI) and hydrological drought (measured using SSFI) was analyzed. The results showed that the above and below ground biomasses follows the trends of change in the severity of meteorological and hydrological droughts during the 34-year period such that in the wet season before 1998, mangrove biodiversity increased, and then with long-term droughts after 1998, the decline in biomass continued until the end of the period. The coincidence between biomass changes and SPI and SSFI variations resulted in a high correlation between mangrove biomass variations with changes in the severity of meteorological and hydrological droughts (correlation coefficients greater than 0.82). The results of this study can be used for developing climate change adaptation programs and for the restoration and development of mangrove forests in the Sistan and Baluchestan province.

Keywords: Climate change, inventory, satellite image, temporal and spatial changes.