

پایش روند زمانی و مکانی بیابان‌زایی با استفاده از داده‌های سری زمانی سنجش از دور در جنوب شرق خوزستان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

کد مقاله: ۵۵۰۵۲

سمانه مسعودیان^۱، محمد فرجی^{۲*}، بهزاد متشفع^۳،
ساره هاشم گلوگردی^۴

چکیده

بیابان‌زایی بادی یکی از مهم‌ترین اشکال تخریب سرزمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که پایش مستمر آن برای مدیریت منابع طبیعی و کنترل روند تخریب ضروری است. پژوهش حاضر با هدف پایش روند زمانی و مکانی بیابان‌زایی بادی در جنوب شرق استان خوزستان طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ انجام شد. در این پژوهش، با استفاده از تصاویر سری زمانی ماهواره لندست و شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده (NDVI)، مدل پیکسل دوتایی و درصد پوشش گیاهی (FVC)، شاخص اراضی بیابانی بادی (ADI) محاسبه و منطقه در پنج طبقه بدون بیابان‌زایی، خفیف، متوسط، شدید و بسیار شدید طبقه‌بندی شد. برای تحلیل روند تغییرات نیز از رگرسیون خطی، برآوردگر شیب سن و آزمون من-کندال استفاده شد. نتایج نشان داد که روند زمانی بیابان‌زایی بادی در منطقه یکنواخت نبوده و دوره‌های تشدید و بهبود نسبی را تجربه کرده است؛ به‌طوری‌که تشدید بیابان‌زایی عمدتاً در دوره‌های ۲۰۰۰-۲۰۰۱ و ۲۰۰۹-۲۰۱۸ و کاهش نسبی آن در دوره‌های ۲۰۰۲-۲۰۰۸ و ۲۰۱۹-۲۰۲۳ مشاهده شد. از نظر مکانی، طبقات شدید و بسیار شدید بیشترین گستره را داشتند و به‌ترتیب ۱۷/۴۶ و ۸۳/۳۱ درصد از مساحت منطقه را شامل شدند. در مجموع، حدود ۹۵ درصد منطقه در طبقات متوسط، شدید یا بسیار شدید قرار گرفت. با این حال، تحلیل آماری روند مکانی، روند معناداری را در هیچ‌یک از طبقات نشان نداد. یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های سری زمانی سنجش از دور و شاخص ADI می‌تواند چارچوب مناسبی برای پایش بلندمدت و شناسایی مناطق بحرانی بیابان‌زایی بادی فراهم کند.

واژگان کلیدی: بیابان‌زایی بادی، پایش زمانی-مکانی، سنجش از دور، سری زمانی، درصد پوشش گیاهی (FVC)، شاخص اراضی بیابانی بادی (ADI)، جنوب شرق خوزستان.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیا بهبهان، بهبهان، ایران.

۲- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیا بهبهان، بهبهان، ایران.

Mfaraji31@yahoo.com

۳- استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیا بهبهان، بهبهان، ایران.

۴- کارشناس پژوهشی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، اصفهان، ایران.

۱- مقدمه

بیابان‌زایی یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در مناطق خشک، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب خشک به شمار می‌رود و در نتیجه تعامل عوامل طبیعی و انسانی، به تخریب تدریجی سرزمین منجر می‌شود. بنا بر تعریف کنوانسیون بین‌المللی مقابله با بیابان‌زایی، بیابان‌زایی فرایند تخریب زمین در مناطق خشک، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب خشک است که ناشی از تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، رخ می‌دهد (UNCCD, 1994). خشکسالی‌های مکرر، کاهش بارندگی، افزایش دما، تخریب پوشش گیاهی، فرسایش بادی و آبی، تغییر کاربری اراضی، بهره‌برداری بیش از ظرفیت اکولوژیکی زمین و مدیریت نامناسب منابع آب و خاک از مهم‌ترین عوامل مؤثر در گسترش این پدیده محسوب می‌شوند (Wang et al., 2015).

پیامدهای بیابان‌زایی تنها به تخریب محیط زیست محدود نمی‌شود، بلکه کاهش حاصلخیزی خاک، تخریب اراضی کشاورزی و مراتع، کاهش زیست‌توده، افت منابع آب و تشدید فرسایش را نیز در پی دارد (زهتابیان و همکاران، ۱۳۹۳). از این رو، بیابان‌زایی به‌عنوان پدیده‌ای مؤثر بر امنیت غذایی، پایداری اقتصادی و اجتماعی و توسعه پایدار جوامع شناخته می‌شود (Ci & Yang, 2010). بر همین اساس، شناخت روند تغییرات بیابان‌زایی و شناسایی مناطق حساس به تخریب سرزمین، یکی از ضرورت‌های اساسی در مدیریت پایدار منابع طبیعی به شمار می‌رود.

پایش بیابان‌زایی به دلیل ماهیت تدریجی و گستردگی مکانی آن، نیازمند اطلاعات مکانی و زمانی مستمر است. روش‌های میدانی، اگرچه اطلاعات دقیقی فراهم می‌کنند، اما به دلیل هزینه‌بر و زمان‌بر بودن، برای پایش مداوم مناطق وسیع با محدودیت مواجه هستند. در این میان، فناوری سنجش از دور با فراهم کردن اطلاعات مکانی پیوسته و داده‌های چندزمانه، به یکی از ابزارهای مؤثر برای بررسی تغییرات محیطی و پایش فرایندهای تخریب سرزمین تبدیل شده است (Ma et al., 2011; Kuenzer et al., 2015).

داده‌های ماهواره‌ای امکان بررسی تغییرات پوشش زمین و پوشش گیاهی را در گستره‌های وسیع و دوره‌های زمانی طولانی فراهم می‌کنند. توسعه آرشیوهای آزاد تصاویر ماهواره‌ای نیز امکان استفاده از مجموعه‌های بزرگ داده‌ای و تحلیل سری‌های زمانی را فراهم کرده است (Kuenzer et al., 2015). در مقایسه با مطالعاتی که تنها چند مقطع زمانی را بررسی می‌کنند، استفاده از داده‌های سری زمانی می‌تواند روندهای تدریجی و بلندمدت تغییرات محیطی را بهتر آشکار کند.

در میان شاخص‌های استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای، شاخص‌های پوشش گیاهی اهمیت ویژه‌ای در پایش تخریب سرزمین دارند. پوشش گیاهی یکی از مؤلفه‌های اصلی پایداری اکوسیستم‌ها محسوب می‌شود و کاهش آن می‌تواند زمینه‌ساز افزایش فرسایش خاک و تشدید فرایندهای بیابان‌زایی شود. شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) یکی از پرکاربردترین شاخص‌های سنجش از دور است که به‌طور گسترده برای بررسی وضعیت و تغییرات پوشش گیاهی استفاده می‌شود (Martinez & Amparo Gilabert, 2009; Pan & Li, 2013; Lanfredi et al., 2016; Lamqadem et al., 2018; Guan et al., 2021).

در کنار NDVI، درصد پوشش گیاهی یا کسر پوشش گیاهی (FVC) نیز می‌تواند اطلاعات کمی‌تری از میزان سطح پوشیده‌شده توسط پوشش گیاهی فراهم کند. FVC بیانگر سهم پوشش گیاهی در هر پیکسل است و می‌تواند برای بررسی تغییرات پوشش گیاهی و ارتباط آن با تخریب زمین مورد استفاده قرار گیرد. مدل (Dimidiate Pixel Model) از جمله روش‌های مورد استفاده برای برآورد پوشش گیاهی بر اساس مقادیر NDVI است و در مطالعات مختلف سنجش از دور برای تحلیل تغییرات پوشش گیاهی و فرایندهای بیابان‌زایی به کار رفته است (Wang et al., 2017; Li, 2007; Gutman, 1991).

ایران به دلیل قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، بخش قابل‌توجهی از اراضی آن به شدت در معرض فرایند فرسایش و بیابان‌زایی قرار دارد (میری و همکاران، ۱۳۸۷). از این رو، پایش مستمر روند تغییرات پوشش گیاهی و شدت بیابان‌زایی در مناطق مختلف کشور اهمیت ویژه‌ای دارد (هاشم‌گلوگردی و همکاران، ۱۴۰۰). جنوب شرق استان خوزستان نیز با توجه به شرایط اقلیمی و محیطی و فشارهای واردشده بر منابع طبیعی، از جمله مناطقی است که بررسی روند بلندمدت بیابان‌زایی در آن ضرورت دارد.

۲- پیشینه تحقیق

پژوهش‌های انجام‌شده در داخل و خارج از کشور نشان می‌دهد که سنجش از دور و تحلیل داده‌های سری زمانی ابزار مناسبی برای بررسی تغییرات بیابان‌زایی هستند.

هاشم‌گلوگردی و همکاران (۱۴۰۰) نیز با استفاده از داده‌های سری زمانی سنجش از دور و شاخص‌های TGSi و Albedo، روند زمانی و مکانی بیابان‌زایی را در مرکز استان خوزستان بررسی کردند.

آرامش و همکاران (۱۴۰۱) با بهره‌گیری از شاخص‌های NDVI، TGSi و Albedo، افزایش روند بیابان‌زایی را در شمال استان اصفهان نشان دادند.

در مطالعات خارج از کشور نیز؛

وانگ (Wang et al., 2017) با استفاده از داده‌های سری زمانی MODIS-NDVI، مدل Dimidiate Pixel، تحلیل رگرسیون، شیب سن و آزمون من-کندال، تغییرات زمانی و مکانی بیابان‌زایی بادی را در منطقه Horqin چین بررسی کردند. گوان (Guan et al., 2017) با استفاده از شاخص‌های NDVI و Albedo، روند بیابان‌زایی را در مقیاس وسیع مورد مطالعه قرار دادند.

ژائو (Zhao et al., 2023) نیز با بهره‌گیری از داده‌های سری زمانی و روش‌های تحلیل روند، تغییرات بیابان‌زایی را در شمال چین بررسی کردند.

با وجود مطالعات انجام‌شده، بررسی هم‌زمان روند زمانی و مکانی بیابان‌زایی با استفاده از سری‌های زمانی بلندمدت داده‌های سنجنش از دور در جنوب شرق خوزستان انجام نشده است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف پایش روند زمانی و مکانی بیابان‌زایی در جنوب شرق خوزستان طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ انجام شد. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های سری زمانی سنجنش از دور، شاخص NDVI و FVC با بهره‌گیری از مدل Dimidiate Pixel برآورد شد. سپس شاخص شدت بیابان‌زایی بادی (ADI) استخراج و روند زمانی و مکانی تغییرات آن با استفاده از روش‌های آماری تحلیل روند بررسی شد.

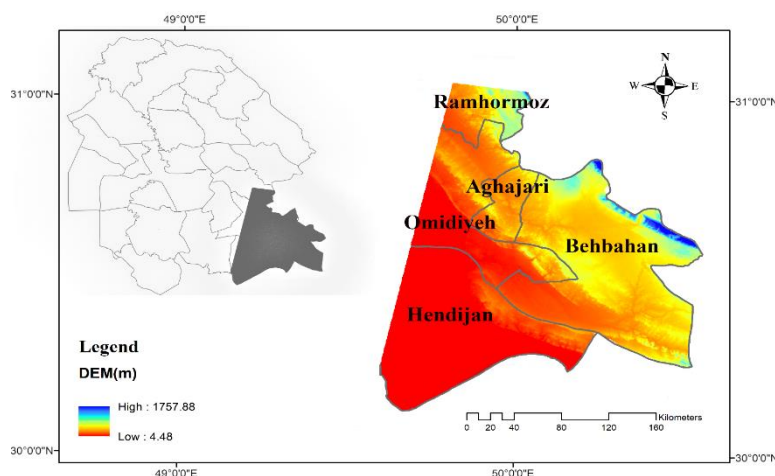
۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بخش جنوب شرقی استان خوزستان، در جنوب ایران، واقع شده است و از نظر جغرافیایی بین ۴۴' ۵۴" تا ۴۸' ۰۷" ۳۳" طول شرقی و ۳۰' ۰۰" تا ۳۱' ۲۶" ۲" عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). این منطقه شهرستان بهبهان، بخش جنوبی شهرستان رامهرمز و شهرستان‌های آغاجاری، امیدیه و هندیجان را دربر می‌گیرد و با مساحتی حدود ۹۹۲۰ کیلومترمربع، تقریباً ۲۲ درصد از مساحت استان خوزستان را شامل می‌شود. مهم‌ترین رودخانه‌های منطقه شامل رودخانه‌های رامهرمز، زهره و مارون هستند که در مجموع حدود ۳۲/۷ درصد از مساحت منطقه را پوشش می‌دهند.

خاک‌های منطقه ترکیبی از خاک‌های رسوبی با بافت درشت، کولوویال، رگوسول و خاک‌های با بافت ریز هستند که به‌طور کلی در برابر فرسایش بادی آسیب‌پذیری قابل توجهی دارند. از نظر زمین‌شناسی نیز منطقه عمدتاً از سه سازند اصلی تشکیل شده است. سازند گچساران مربوط به دوره میوسن، شامل گچ، انیدریت، مارن و سنگ آهک است. سازند آغاجاری متعلق به دوره میوسن-پلیوسن بوده و از ماسه‌سنگ‌های آهکی، گچ، مارن و سیلت‌استون تشکیل شده است. علاوه بر این، رسوبات کواترنری که عمدتاً شامل ماسه و رس هستند، بخش‌هایی از منطقه را پوشش می‌دهند (طیعی، ۱۳۹۷).

وجود اراضی حساس به فرسایش بادی، شرایط خشک و نیمه‌خشک، پوشش گیاهی مقاوم به خشکی و شوری و ویژگی‌های خاص خاک و سازندهای زمین‌شناسی، اهمیت بررسی روند زمانی و مکانی بیابان‌زایی در این منطقه را افزایش می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در جنوب شرقی استان خوزستان، ایران

۲-۳- داده‌های مورد استفاده

به منظور بررسی روند زمانی و مکانی بیابان‌زایی، از داده‌های سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای لندست طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ استفاده شد. پیش از استخراج شاخص‌های مورد نیاز، تصاویر مورد استفاده تحت مراحل پیش‌پردازش قرار گرفتند. با توجه به اهمیت مقایسه تصاویر مربوط به زمان‌های مختلف، تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری بر روی داده‌ها انجام شد. تبدیل مقادیر رقومی به بازتاب سطحی، امکان مقایسه بهتر داده‌ها و محاسبه دقیق‌تر شاخص‌های پوشش گیاهی را فراهم می‌کند (Xulin & Price, 2001). همچنین، برای تصاویر لندست ۷ دارای خطای نواری، عملیات تصحیح SLC انجام شد تا پیکسل‌های معیوب تا حد امکان اصلاح شوند.

۳-۳- برآورد درصد پوشش گیاهی با مدل Dimidiate Pixel

در این پژوهش، به منظور برآورد درصد پوشش گیاهی و محاسبه شاخص پوشش گیاهی کسری (FVC)، از مدل پیکسل دوتایی استفاده شد. در این مدل فرض می‌شود که هر پیکسل از دو مؤلفه اصلی شامل پوشش گیاهی و خاک لخت تشکیل شده است (Ma et al., 2012).

بر این اساس، بازتاب طیفی مشاهده‌شده هر پیکسل (S) از مجموع بازتاب طیفی مؤلفه پوشش گیاهی (S_v) و مؤلفه خاک (S_s) تشکیل می‌شود:

$$S = S_v + S_s \quad (1)$$

در این مدل، f_c بیانگر کسر یا درصد پوشش گیاهی در هر پیکسل است؛ بنابراین، سهم خاک لخت برابر با $(1-f_c)$ خواهد بود. بازتاب طیفی مؤلفه پوشش گیاهی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S_v = f_c \times S_{veg} \quad (2)$$

که در آن، (S_{veg}) بازتاب طیفی پیکسل دارای پوشش گیاهی کامل است.

به طور مشابه، بازتاب طیفی مؤلفه خاک لخت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_s = (1-f_c) \times S_{soil} \quad (3)$$

که در آن، (S_{soil}) بازتاب طیفی پیکسل خاک لخت است. با جایگذاری روابط (۲) و (۳) در رابطه (۱)، مدل نهایی پیکسل دوتایی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$S = f_c \times S_{veg} + (1-f_c) \times S_{soil} \quad (4)$$

استفاده از این مدل همراه با داده‌های ماهواره‌ای، امکان برآورد سهم پوشش گیاهی در هر پیکسل را فراهم می‌کند. مدل پیکسل دوتایی، با تفکیک هر پیکسل به دو مؤلفه پوشش گیاهی و خاک لخت، چارچوبی فیزیکی برای برآورد FVC فراهم می‌سازد (Ma et al., 2012).

۳-۴- تعیین (NDVIsoil) و (NDVIveg)

تعیین مقادیر (NDVIsoil) و (NDVIveg) یکی از مراحل اساسی در اجرای مدل پیکسل دوتایی و محاسبه درصد پوشش گیاهی است. در مطالعات مختلف، روش‌های متفاوتی برای تعیین این مقادیر ارائه شده است که یکی از روش‌های متداول، انتخاب مقادیر حدی شاخص NDVI به عنوان نماینده خاک لخت و پوشش گیاهی کامل است.

در این روش، مقادیر NDVI تمامی پیکسل‌ها به ترتیب صعودی مرتب می‌شوند و مقادیر پایین‌تر و بالاتر به ترتیب به عنوان نماینده شرایط خاک لخت و پوشش گیاهی کامل در نظر گرفته می‌شوند (Johnson et al., 2012; Chavez, 1996).

در پژوهش حاضر، به منظور تعیین مقادیر (NDVIsoil) و (NDVIveg)، نقشه‌های NDVI در نرم‌افزار ArcMap 10.8.2 و با استفاده از ابزارهای Spatial Analyst پردازش شدند. ابتدا تصاویر NDVI با استفاده از ابزار Reclassify و روش شکست طبیعی جنکس (Natural Breaks) به ۲۰۰ طبقه تقسیم شدند. سپس پیکسل‌ها بر اساس مقادیر NDVI مرتب شدند و پایین‌ترین و بالاترین یک درصد از مقادیر برای تمامی سال‌های مورد مطالعه استخراج گردید.

مقادیر پایین‌تر NDVI به عنوان (NDVIsoil) و مقادیر بالاتر به عنوان (NDVIveg) در نظر گرفته شدند. این روش بر مبنای انتخاب درصدی مقادیر حدی و با هدف تعیین شرایط مرجع خاک و پوشش گیاهی برای اجرای مدل پیکسل دوتایی به کار گرفته شد (Chavez, 1996; Johnson et al., 2012).

۳-۵- شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)

شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی یا NDVI که نخستین بار توسط Tucker (1979) معرفی شد، یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها در بررسی پوشش گیاهی با استفاده از داده‌های سنجش از دور است. این شاخص بر اساس اختلاف نرمال شده بازتاب باند مادون قرمز نزدیک و باند قرمز محاسبه می‌شود و برای بررسی تراکم، وضعیت و تغییرات پوشش گیاهی کاربرد گسترده‌ای دارد.

رابطه محاسبه NDVI به صورت زیر است:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (5)$$

در این رابطه، (NIR) بازتاب طیفی در باند مادون قرمز نزدیک و (RED) بازتاب طیفی در باند قرمز است. مقادیر NDVI معمولاً در بازه -۱ تا +۱ قرار می‌گیرند و مقادیر بالاتر آن نشان‌دهنده پوشش گیاهی متراکم‌تر و سالم‌تر هستند. با توجه به ارتباط مستقیم تغییرات پوشش گیاهی با فرایندهای تخریب سرزمین و بیابان‌زایی، این شاخص به‌طور گسترده در مطالعات مربوط به پایش بیابان‌زایی مورد استفاده قرار گرفته است (Liu et al., 2018).

۳-۶- محاسبه درصد پوشش گیاهی (FVC)

درصد پوشش گیاهی یا Fractional Vegetation Cover (FVC) یکی از پارامترهای مهم زیست‌فیزیکی است که برای ارزیابی پراکنش و تراکم پوشش گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص بیانگر نسبت سطح پوشیده شده توسط پوشش گیاهی زنده در هر پیکسل است و اطلاعات مناسبی درباره وضعیت و گستره مکانی پوشش گیاهی فراهم می‌کند (Wang et al., 2015).

روش‌های مختلفی برای برآورد درصد پوشش گیاهی ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل‌های مبتنی بر رگرسیون، روش‌های مبتنی بر شاخص‌های پوشش گیاهی و مدل‌های اختلاط طیفی خطی اشاره کرد. در این پژوهش، از مدل پیکسل دوتایی استفاده شد که در آن هر پیکسل از دو مؤلفه پوشش گیاهی و خاک لخت تشکیل شده است. در این روش، مقادیر (NDVIsoil) و (NDVIveg) به‌عنوان مؤلفه‌های مرجع خاک لخت و پوشش گیاهی کامل در نظر گرفته می‌شوند. مقدار FVC از رابطه زیر محاسبه شد:

$$FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (6)$$

در این رابطه:

(NDVI): مقدار شاخص پوشش گیاهی برای هر پیکسل؛

(NDVIsoil): مقدار NDVI مربوط به پیکسل‌های خاک لخت؛

(NDVIveg): مقدار NDVI مربوط به پیکسل‌های دارای پوشش گیاهی کامل است.

مقادیر FVC معمولاً در بازه صفر تا یک قرار می‌گیرند؛ به‌طوری‌که مقادیر نزدیک به صفر بیانگر پوشش گیاهی کم یا نبود پوشش گیاهی و مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده پوشش گیاهی متراکم‌تر هستند.

۳-۷- محاسبه و طبقه‌بندی شاخص اراضی بیابانی بادی (ADI)

برای ارزیابی شدت بیابان‌زایی بادی، شاخص اراضی بیابانی بادی یا Aeolian Desertified Lands Index (ADI) محاسبه شد. این شاخص بر اساس رابطه معکوس با درصد پوشش گیاهی (FVC) محاسبه می‌شود؛ به این معنا که با افزایش پوشش گیاهی، مقدار ADI کاهش یافته و با کاهش پوشش گیاهی، شدت بیابان‌زایی افزایش می‌یابد (Yin, 2010). رابطه محاسبه شاخص ADI به صورت زیر است:

$$ADI = 1 - FVC \quad (7)$$

مقادیر بالاتر ADI نشان‌دهنده کاهش درصد پوشش گیاهی و افزایش شدت شرایط مستعد بیابان‌زایی بادی هستند. این شاخص می‌تواند برای بررسی شدت بیابان‌زایی و تحلیل تغییرات پوشش گیاهی در دوره‌های زمانی مختلف مورد استفاده قرار گیرد (Yin, 2010).

در پژوهش حاضر، شاخص ADI با استفاده از ابزار Band Math در نرم‌افزار ENVI 5.6 محاسبه شد. سپس نقشه‌های حاصل با استفاده از روش شکست طبیعی جنکس (Jenks Natural Breaks) در محیط GIS طبقه‌بندی شدند. روش شکست طبیعی جنکس با هدف کمینه‌کردن واریانس درون طبقه‌ای و بیشینه‌کردن تفاوت بین طبقات، یکی از روش‌های مناسب برای طبقه‌بندی داده‌هایی با پراکندگی نامنظم محسوب می‌شود (Chen et al., 2013). بر این اساس، مقادیر ADI در پنج طبقه شامل:

اراضی بدون بیابانزایی بادی (N)؛
 اراضی با بیابانزایی بادی خفیف (SI)؛
 اراضی با بیابانزایی بادی متوسط (M)؛
 اراضی با بیابانزایی بادی شدید (S)؛
 اراضی با بیابانزایی بادی بسیار شدید (VS)؛

طبقه‌بندی شدند. حدود و دامنه هر یک از طبقات شاخص ADI در جدول (۱) ارائه شده است. نقشه‌های حاصل علاوه بر نمایش وضعیت شدت بیابانزایی در هر سال، امکان بررسی تغییرات زمانی و تحلیل روند گسترش یا کاهش بیابانزایی در منطقه مورد مطالعه را فراهم می‌کنند.

جدول ۱- دامنه، نظام طبقه‌بندی و مقادیر آستانه شاخص ADI

طبقه‌بندی	شرح	دامنه ارزش	اختصار
۱	اراضی بدون بیابانزایی بادی	۰ - ۰.۱۳۷۲۰۷	N
۲	اراضی با بیابانزایی بادی خفیف	۰.۱۳۷۲۰۷ - ۰.۴۲۳۵۰۳	SI
۳	اراضی با بیابانزایی بادی متوسط	۰.۴۲۳۵۰۳ - ۰.۶۵۷۲۲۷	M
۴	اراضی با بیابانزایی بادی شدید	۰.۶۵۷۲۲۷ - ۰.۷۹۸۶۶۵	S
۵	اراضی با بیابانزایی بادی بسیار شدید	۰.۷۹۸۶۶۵ - ۱	VS

۳-۸- تحلیل روند زمانی و مکانی

به‌منظور تحلیل روندهای زمانی و مکانی شاخص بیابانزایی بادی (ADI) و تفکیک تغییرات دارای روند مشخص از نوسانات طبیعی، از روش‌های آماری استفاده شد. در این پژوهش، روند زمانی شاخص با استفاده از رگرسیون خطی ساده بررسی شد؛ در حالی که برای تحلیل روند مکانی، آزمون من-کندال به کار گرفته شد. همچنین، برای تعیین نرخ و شدت تغییرات، از تخمین گر شیب سن استفاده گردید. هر یک از این روش‌ها متناسب با هدف تحلیل و نوع داده‌ها به‌صورت مستقل به کار گرفته شدند.

۳-۸-۱- رگرسیون خطی ساده برای تحلیل روند زمانی

به‌منظور بررسی روند تغییرات زمانی اراضی بیابانی بادی در دوره مورد مطالعه، از روش رگرسیون خطی ساده استفاده شد. این روش با برازش یک خط بر داده‌ها، امکان بررسی جهت و روند تغییرات متغیر وابسته را در طول زمان فراهم می‌کند. معادله رگرسیون خطی به‌صورت زیر است:

$$Y = ax + b \quad (8)$$

که در آن:

(Y): متغیر وابسته است؛

(X): متغیر مستقل است؛

(a): ضریب یا شیب رگرسیون است که جهت و میزان تغییرات را نشان می‌دهد؛

(b): مقدار ثابت یا عرض از مبدأ است.

در این پژوهش، زمان به‌عنوان متغیر مستقل و مقادیر یا مساحت طبقات مختلف بیابانزایی به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. مقدار مثبت ضریب (a) بیانگر روند افزایشی و مقدار منفی آن نشان‌دهنده روند کاهشی متغیر در طول دوره مورد مطالعه است.

همچنین، ضریب تعیین R^2 برای ارزیابی میزان ارتباط میان متغیر وابسته و مستقل استفاده شد. مقدار R^2 بین صفر و یک قرار دارد و مقادیر بالاتر آن نشان‌دهنده برازش بهتر مدل رگرسیون و تبیین بیشتر تغییرات متغیر وابسته توسط متغیر مستقل است.

۳-۸-۲- تخمین گر شیب سن برای تعیین نرخ تغییرات

به‌منظور برآورد نرخ تغییرات در طول دوره زمانی، از روش ناپارامتری تخمین گر شیب سن (Sen's Slope Estimator) استفاده شد. این روش شیب بین تمامی زوج‌های ممکن از داده‌های سری زمانی را محاسبه کرده و سپس میانه شیب‌های به‌دست‌آمده را به‌عنوان برآورد شیب روند در نظر می‌گیرد. در صورت وجود یک روند مشخص در سری زمانی، مقدار حاصل به‌عنوان برآوردی مناسب از شیب واقعی روند در نظر گرفته می‌شود (Hirsch et al., 1982).

رابطه محاسبه شیب سن به‌صورت زیر است:

$$Q_k = \text{median} [(X_j - X_i) / (j - i)] \quad k = 1, \dots, N \quad (9)$$

که در آن:

(X_j) و (X_i) : مقادیر داده‌ها در زمان‌های (j) و (i) هستند؛

(Q_k) : شیب محاسبه‌شده برای هر زوج از مشاهدات است؛

(N) : تعداد کل زوج‌های ممکن در سری زمانی است.

مقدار مثبت شیب سن بیانگر روند افزایشی و مقدار منفی آن نشان‌دهنده روند کاهشی است. هرچه قدر مطلق شیب بزرگ‌تر باشد، نرخ تغییرات نیز بیشتر خواهد بود.

۳-۸-۳- آزمون من-کندال برای تحلیل روند مکانی

در این پژوهش، آزمون ناپارامتری من-کندال برای تحلیل روند تغییرات مکانی شاخص بیابان‌زایی بادی (ADI) استفاده شد. این آزمون نخست توسط Mann (1945) معرفی و سپس توسط Kendall (1975) توسعه یافت. آزمون من-کندال یکی از روش‌های پرکاربرد برای شناسایی روندهای خطی و غیرخطی در داده‌های سری زمانی محسوب می‌شود.

یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این آزمون، عدم نیاز به تبعیت داده‌ها از یک توزیع آماری مشخص است. همچنین، این آزمون در برابر داده‌های پرت و ناهمگن مقاومت مناسبی دارد. برخلاف روش‌های پارامتری که معمولاً نیازمند فرض نرمال بودن و استقلال داده‌ها هستند، آزمون من-کندال نسبت به شکل توزیع داده‌ها حساس نیست و تنها استقلال داده‌ها را فرض می‌کند (Hamed & Rao, 1998; Chen et al., 2007).

آماره (S) در آزمون من-کندال از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sng}(x_j - x_i) \quad (10)$$

که در آن تابع علامت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Sng}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

واریانس آماره (S) با در نظر گرفتن داده‌های دارای مقادیر تکراری از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Var}(s) = [n(1-n)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t(t-1)(2t+5)] \quad (12)$$

که در آن:

(n) : تعداد مشاهدات سری زمانی است؛

(q) : تعداد گروه‌های دارای مقادیر تکراری است؛

(t_p) : تعداد مشاهدات در گروه تکراری (p) است.

در نهایت، آماره استاندارد آزمون من-کندال (Z_{MK}) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (13)$$

مقادیر مثبت (Z_{MK}) نشان‌دهنده روند افزایشی و مقادیر منفی آن بیانگر روند کاهشی هستند. در این پژوهش، سطح معنی‌داری ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. بر این اساس، در صورتی که قدر مطلق آماره آزمون از مقدار بحرانی توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری مورد نظر بیشتر باشد، فرض صفر مبنی بر نبود روند رد می‌شود (Shadmani et al., 2012). بنابراین، با استفاده هم‌زمان از آزمون من-کندال و تخمین‌گر شیب سن، علاوه بر تعیین وجود یا عدم وجود روند، جهت و نرخ تغییرات شاخص ADI نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

۴- یافته‌ها

۴-۱- تحلیل روند زمانی شاخص ADI در طبقات مختلف شدت بیابان‌زایی طی سال‌های ۲۰۰۰ تا

۲۰۲۳

در این پژوهش، روند تغییرات زمانی شاخص اراضی بیابانی بادی (ADI) در تمامی طبقات شدت بیابان‌زایی طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ بررسی شد. معنی‌داری روندها در سطوح اطمینان ۹۰ و ۹۵ درصد ارزیابی گردید. نتایج ارائه‌شده در جدول (۲) و شکل (۲) نشان می‌دهند که طبقات بدون بیابان‌زایی بادی و بیابان‌زایی بادی خفیف دارای روند کاهشی معنی‌دار بوده‌اند؛ به‌طوری‌که روند

کاهش طبقه بدون بیابانزایی در سطح اطمینان ۹۰ درصد و روند کاهشی طبقه بیابانزایی خفیف در سطوح اطمینان ۹۰ و ۹۵ درصد معنی‌دار بوده است.

در مقابل، طبقات بیابانزایی بادی متوسط و بیابانزایی بادی بسیار شدید دارای روند منفی بودند، اما این روندها از نظر آماری معنی‌دار نبودند. شیب روند در این دو طبقه به ترتیب برابر با $-7/02$ و $-14/943$ به دست آمد. همچنین، طبقه بیابانزایی بادی شدید تنها طبقه‌ای بود که روند افزایشی نشان داد و مقدار شیب آن برابر با $25/118$ بود؛ با این حال، این روند نیز از نظر آماری معنی‌دار نبود.

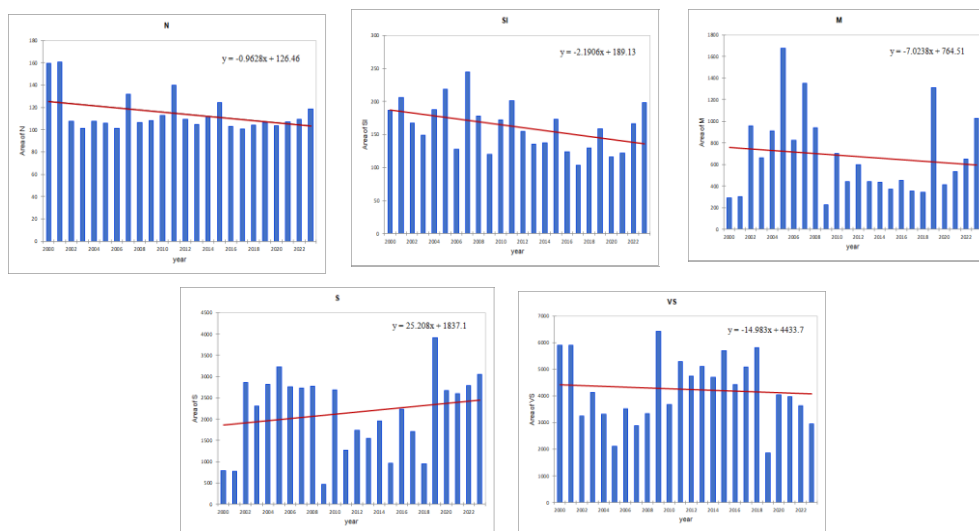
همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، طبقات بیابانزایی شدید (S) و بیابانزایی بسیار شدید (VS) بخش عمده‌ای از سطح منطقه مورد مطالعه را در طول دوره بررسی به خود اختصاص داده‌اند. کاهش مساحت اراضی بدون بیابانزایی و اراضی دارای بیابانزایی خفیف، همراه با افزایش مساحت اراضی دارای بیابانزایی شدید، نشان‌دهنده حرکت بخشی از منطقه به سمت شدت بیشتر بیابانزایی بادی در جنوب شرق خوزستان طی دوره مورد مطالعه است.

بررسی نسبت مساحت اراضی بیابانی، شامل طبقات شدید و بسیار شدید، به مساحت کل منطقه در دوره‌های زمانی مختلف، الگوی نوسانی تغییرات شدت بیابانزایی را نشان می‌دهد. بر این اساس، نسبت اراضی دارای بیابانزایی شدید و بسیار شدید در دوره‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۱ و ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ افزایش یافته است که می‌توان این دوره‌ها را به عنوان مراحل تشدید بیابانزایی در منطقه تفسیر کرد. در مقابل، در دوره‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ و ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ کاهش نسبی در شدت بیابانزایی مشاهده شد که بیانگر دوره‌هایی از کاهش یا عقب‌نشینی نسبی بیابانزایی است.

در مجموع، نتایج تحلیل روند زمانی نشان می‌دهد که بیابانزایی بادی در جنوب شرق خوزستان طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ از یک روند کاملاً یکنواخت افزایشی یا کاهشی پیروی نکرده است، بلکه دارای الگویی نوسانی بوده است. به عبارت دیگر، این فرایند طی دوره مورد مطالعه با تناوب دوره‌های گسترش و تشدید بیابانزایی و دوره‌های کاهش یا عقب‌نشینی نسبی آن همراه بوده است.

جدول ۲- نتایج آزمون رگرسیون خطی برای بررسی روند زمانی شاخص ADI طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

سطح ۱۰٪		سطح ۵٪		شاخص	
alpha	P-Value	شیب سن	alpha	P-value	طبقات بیابانزایی
۰.۰۵	۰.۰۵۴	-۰.۹۶۳	۰.۱	۰.۰۵۴	N
۰.۰۵	۰.۰۳۹	-۲.۱۹۱	۰.۱	۰.۰۳۹	SI
۰.۰۵	۰.۵۴۲	-۷.۰۲۱	۰.۱	۰.۵۴۲	M
۰.۰۵	۰.۳۶۳	۲۵.۱۱۸	۰.۱	۰.۳۶۳	S
۰.۰۵	۰.۶۹۳	-۱۴.۹۴۳	۰.۱	۰.۶۹۳	VS



شکل ۲- روند تغییرات شاخص ADI طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

۴-۲- تحلیل روند مکانی شاخص ADI در طبقات مختلف شدت بیابانزایی طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

۴-۲-۱- توزیع مکانی شاخص ADI در طبقات مختلف

توزیع مکانی طبقات مختلف شاخص اراضی بیابانی بادی (ADI) در جنوب شرق خوزستان طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ در شکل ۳ ارائه شده است. بررسی نقشه‌های مکانی نشان می‌دهد که شدت و گستره بیابان‌زایی بادی در طول دوره مورد مطالعه دارای تغییرات قابل توجهی بوده و الگوی مکانی آن در سال‌های مختلف دستخوش نوسان شده است.

در سال ۲۰۰۰، طبقه بیابان‌زایی بسیار شدید (VS) عمدتاً در بخش‌های جنوبی، جنوب‌غربی و غربی منطقه متمرکز بود و به‌ویژه بخش‌هایی از شهرستان‌های هندیجان، امیدیه و رامهرمز را دربر می‌گرفت. طبقه شدید (S) بیشتر در نواحی شمالی و مرکزی منطقه غالب بود، در حالی که طبقه متوسط (M) عمدتاً در بخش‌های شرقی و مرکزی پراکنده شده بود. طبقه خفیف (SI) نیز در محدوده‌های نسبتاً محدودی در شرق و شمال‌شرق منطقه مشاهده شد. طبقه بدون بیابان‌زایی (N) بیشتر در بخش مرکزی منطقه قرار داشت و از جمله در بخش مرکزی بهبهان، نوار ممتدی از جنوب‌غرب بهبهان تا شرق هندیجان و همچنین نواری از غرب تا مرکز امیدیه مشاهده می‌شد. بخش قابل توجهی از این نواحی در مجاورت رودخانه‌ها و محدوده مخازن آبی قرار داشتند. در فاصله ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۱، شدت بیابان‌زایی در منطقه افزایش یافت. در سال ۲۰۰۱ بخش قابل توجهی از سطح منطقه در طبقه بیابان‌زایی بسیار شدید (VS) قرار گرفت. در این سال، گسترش این طبقه از نواحی جنوبی و غربی به سمت بخش‌های مرکزی منطقه به‌وضوح مشاهده شد که در مقایسه با سال پایه، بیانگر تشدید وضعیت بیابان‌زایی بود. اگرچه افزایش مساحت طبقات بیابان‌زایی خفیف (SI) و بدون بیابان‌زایی (N) نیز مشاهده شد، اما مطابق داده‌های جدول ۳، این تغییرات عمدتاً ناشی از تفاوت در حدود طبقات شاخص ADI حاصل از روش طبقه‌بندی شکست طبیعی جنکس بوده و الزاماً بیانگر بهبود واقعی شرایط محیطی نیست.

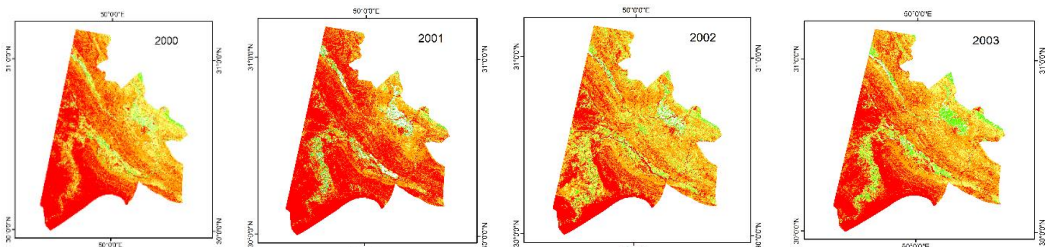
در دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸، کاهش نسبی شدت بیابان‌زایی مشاهده شد. بخشی از اراضی که در سال‌های قبل در طبقات بسیار شدید (VS) و شدید (S) قرار داشتند، به طبقات با شدت پایین‌تر منتقل شدند که می‌تواند نشان‌دهنده بهبود نسبی شرایط اکولوژیکی منطقه باشد. در این میان، گسترش طبقه بیابان‌زایی خفیف (SI) در سال ۲۰۰۵ چشمگیرتر بود.

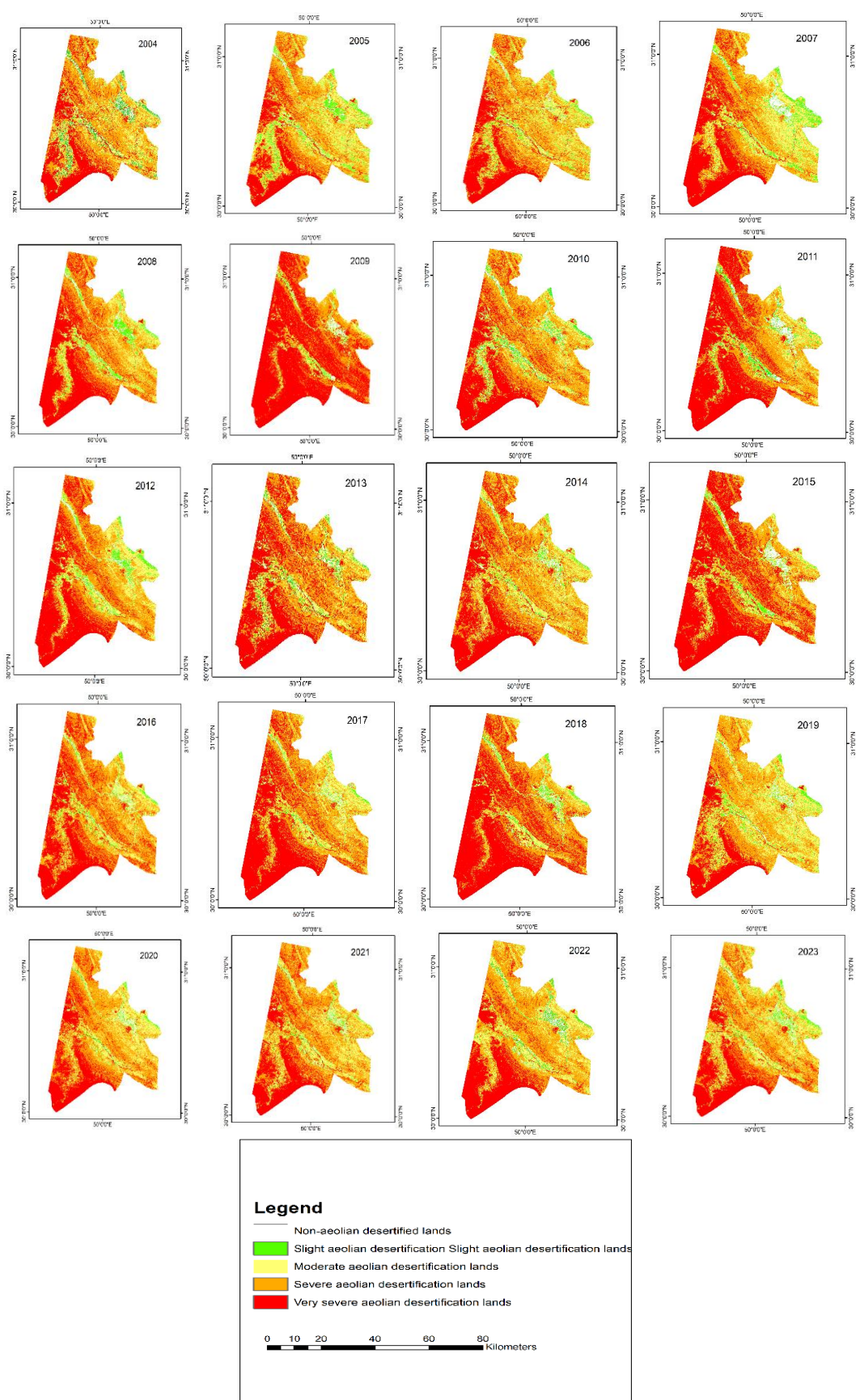
در دوره ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸، وضعیت بیابان‌زایی با نوسانات قابل توجهی همراه بود و دوره‌هایی از تشدید بیابان‌زایی و بهبود نسبی به‌صورت متناوب مشاهده شد. در سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۵ شدت بیابان‌زایی افزایش یافت؛ به‌گونه‌ای که بخش‌هایی از مناطق شمال‌غربی، مرکزی و جنوب‌شرقی منطقه در طبقه بیابان‌زایی بسیار شدید (VS) قرار گرفتند، در حالی که این نواحی در شرایط معمول بیشتر در طبقات متوسط (M) و خفیف (SI) قرار داشتند. در مقابل، در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶ بهبود نسبی شرایط در برخی مناطق مشاهده شد.

در سال‌های ۲۰۱۲، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸، بخش‌های جنوبی و غربی منطقه با تشدید بیابان‌زایی مواجه شدند و بخش عمده این نواحی در طبقه بیابان‌زایی بسیار شدید (VS) قرار گرفت. با وجود نوسانات مشاهده‌شده در این دوره، در مجموع روند بیابان‌زایی طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ افزایشی بود.

در دوره ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳، کاهش نسبی روند بیابان‌زایی مشاهده شد. در این دوره، وسعت طبقه بیابان‌زایی بادی بسیار شدید (VS) کاهش یافت، در حالی که مساحت طبقه بیابان‌زایی شدید (S) افزایش پیدا کرد. این تغییرات نشان‌دهنده کاهش نسبی شدت بیابان‌زایی در بخشی از منطقه در سال‌های پایانی دوره مورد مطالعه است.

در مجموع، بررسی روند بلندمدت شاخص ADI در جنوب شرق خوزستان طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ نشان‌دهنده وجود یک الگوی چندمرحله‌ای و نوسانی در شدت بیابان‌زایی بادی است. اگرچه در برخی دوره‌ها بهبود نسبی شرایط اراضی مشاهده شد، کاهش مساحت طبقات بدون بیابان‌زایی و بیابان‌زایی خفیف، به‌ویژه در سال‌های اخیر، بیانگر آسیب‌پذیری بالای منطقه در برابر تنش‌های اقلیمی است. این وضعیت همچنین ضرورت توجه بیشتر به اقدامات مدیریتی و کنترل عوامل مؤثر بر بیابان‌زایی در جنوب شرق خوزستان را نشان می‌دهد.





شکل ۳- نقشه‌های توزیع مکانی شاخص ADI در جنوب شرق خوزستان طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

جدول ۳- مقادیر آستانه مورد استفاده در آزمون من-کندال برای هر یک از طبقات شدت بیابان‌زایی

طبقات بیابان‌زایی

سال	طبقات بیابان‌زایی	N	SI	S	M	VS
۲۰۰۰	۰.۱۳۶	۰.۴۳۳	۰.۸۱۸	۰.۶۷۹	۰.۹۳۵	
۲۰۰۱	۰.۱۲۵	۰.۴۰۰	۰.۸۲۲	۰.۶۵۶	۰.۹۴۱	
۲۰۰۲	۰.۱۳۸	۰.۴۲۱	۰.۸۸۳	۰.۶۴۴	۰.۹۲۱	
۲۰۰۳	۰.۱۴۰	۰.۴۳۱	۰.۷۹۶	۰.۶۶۲	۰.۹۲۵	
۲۰۰۴	۰.۱۴۲	۰.۴۲۹	۰.۷۸۹	۰.۶۵۲	۰.۹۲۳	
۲۰۰۵	۰.۱۳۸	۰.۴۱۲	۰.۷۵۳	۰.۶۱۹	۰.۹۰۸	
۲۰۰۶	۰.۱۴۶	۰.۴۴۱	۰.۷۹۶	۰.۶۶۴	۰.۹۲۷	
۲۰۰۷	۰.۱۴۰	۰.۴۱۴	۰.۷۶۵	۰.۶۲۵	۰.۹۱۴	
۲۰۰۸	۰.۱۳۴	۰.۴۱۲	۰.۷۶۵	۰.۶۳۲	۰.۹۱۰	
۲۰۰۹	۰.۱۱۹	۰.۳۹۲	۰.۸۲۲	۰.۶۵۴	۰.۹۴۱	
۲۰۱۰	۰.۱۳۶	۰.۴۱۷	۰.۷۸۳	۰.۶۴۴	۰.۹۱۹	
۲۰۱۱	۰.۱۳۰	۰.۴۱۲	۰.۸۱۶	۰.۶۶۰	۰.۹۳۷	
۲۰۱۲	۰.۱۴۲	۰.۴۳۵	۰.۸۱۰	۰.۶۶۹	۰.۹۳۳	
۲۰۱۳	۰.۱۳۸	۰.۴۳۱	۰.۸۱۶	۰.۶۷۳	۰.۹۳۵	
۲۰۱۴	۰.۱۴۲	۰.۴۳۹	۰.۸۲۰	۰.۶۷۹	۰.۹۳۷	
۲۰۱۵	۰.۱۲۸	۰.۴۱۰	۰.۸۲۰	۰.۶۶۲	۰.۹۳۹	
۲۰۱۶	۰.۱۳۴	۰.۴۲۳	۰.۷۹۶	۰.۶۶۲	۰.۹۲۳	
۲۰۱۷	۰.۱۳۶	۰.۴۳۳	۰.۸۱۸	۰.۶۷۹	۰.۹۳۵	
۲۰۱۸	۰.۱۳۴	۰.۴۲۵	۰.۸۲۴	۰.۶۷۵	۰.۹۳۹	
۲۰۱۹	۰.۱۴۲	۰.۴۲۵	۰.۷۵۹	۰.۶۳۴	۰.۹۰۸	
۲۰۲۰	۰.۱۳۶	۰.۴۲۹	۰.۸۰۶	۰.۶۶۹	۰.۹۲۹	
۲۰۲۱	۰.۱۴۲	۰.۴۳۷	۰.۸۰۴	۰.۶۶۹	۰.۹۲۹	
۲۰۲۲	۰.۱۴۰	۰.۴۲۹	۰.۷۹۸	۰.۶۶۰	۰.۹۲۷	
۲۰۲۳	۰.۱۴۰	۰.۴۲۱	۰.۷۷۷	۰.۶۴۰	۰.۹۱۷	

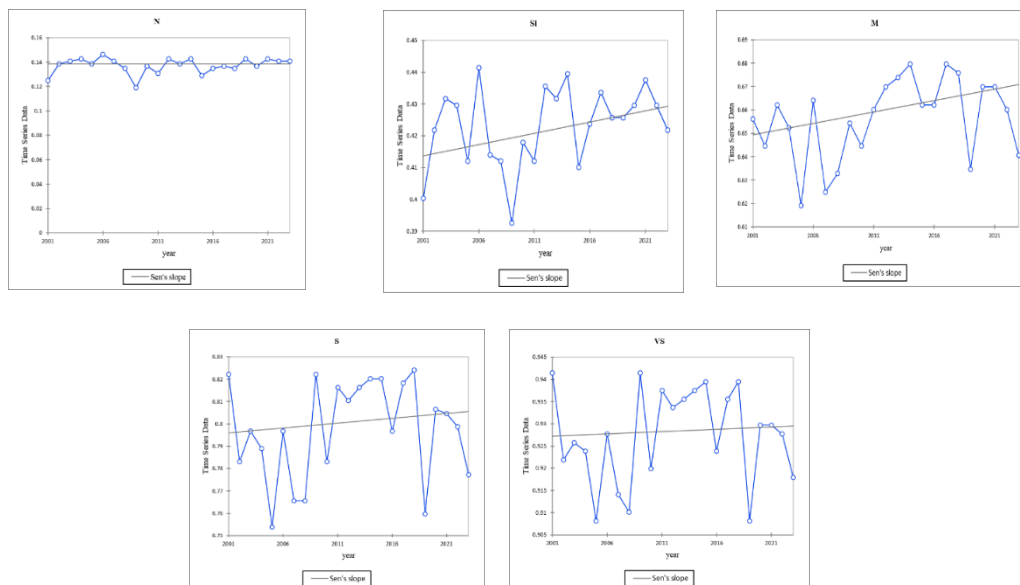
۴-۲-۲- تحلیل روند مکانی شاخص ADI

براساس نتایج تحلیل روند مکانی شاخص ADI ارائه شده در جدول ۴ و شکل ۴، هیچ یک از طبقات شدت بیابان‌زایی طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ دارای روند آماری معناداری نبوده‌اند. مقادیر شیب سن (Sen's Slope) برای طبقات بدون بیابان‌زایی بادی (N)، بیابان‌زایی خفیف (SI)، شدید (S) و بسیار شدید (VS) برابر با صفر بوده و مقادیر P-values نیز در سطوح معناداری ۰/۰۵ و ۱/۰ بالاتر قرار گرفته‌اند؛ بنابراین، روند معناداری برای این طبقات مشاهده نشده است. طبقه متوسط (M) نیز دارای روند افزایشی غیرمعنادار بوده و مقدار شیب سن آن برابر با ۰/۰۰۱ به دست آمده است؛ باین‌حال، مقدار P-values در هر دو سطح ۰/۰۵ و ۱/۰ بالاتر از حد معناداری بوده و این روند از نظر آماری معنادار نیست.

توزیع مکانی میانگین روند بیابان‌زایی طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ که در شکل ۵ و جدول ۵ ارائه شده است، نشان می‌دهد که پراکنش روند در طبقات مختلف شدت بیابان‌زایی الگوی فضایی متفاوتی دارد. مساحت طبقه بدون بیابان‌زایی بادی (N) حدود ۵/۰ درصد از منطقه را دربر می‌گیرد و عمدتاً در بخش‌های مرکزی، شرقی و شمال شرقی شهرستان بهبهان، همچنین نواری از شمال غرب امیدیه تا جنوب آغاچاری و به صورت پراکنده در محدوده‌ای از جنوب غرب بهبهان تا جنوب شرق امیدیه مشاهده می‌شود. طبقات بیابان‌زایی خفیف (SI) و متوسط (M) در مجموع ۲۱/۴۱ درصد از منطقه را شامل می‌شوند و عمدتاً در بخش‌های مرکزی و شمال شرقی بهبهان، شرق بهبهان، نواری از شمال شرق امیدیه تا جنوب غرب آغاچاری و به صورت پراکنده از جنوب غرب بهبهان تا جنوب شرق امیدیه پراکنده شده‌اند. همچنین، بخش‌هایی از این طبقات در نواحی شمالی منطقه مشاهده می‌شود.

جدول ۴- نتایج آزمون من-کندال برای طبقات مختلف شدت بیابان‌زایی

سطح ۵٪					Level 5%					شاخص
Kendls tau	S	P-value	alpha	Sens slope	Kendls tau	S	P-value	alpha	Sens slope	طبقات بیابان‌زایی
۰/۰۹۲	۲۴/۰۰۰	۰/۵۴۶	۰/۱	۰/۰۰۰	۰/۰۹۲	۲۴/۰۰۰	۰/۵۴۶	۰/۰۵	۰/۰۰۰	N
۰/۱۲۸	۳۵/۰۰۰	۰/۳۸۴	۰/۱	۰/۰۰۰	۰/۱۲۸	۳۵/۰۰۰	۰/۳۸۴	۰/۰۵	۰/۰۰۰	SI
۰/۱۷۰	۴۶/۰۰۰	۰/۲۵۲	۰/۱	۰/۰۰۱	۰/۱۷۰	۴۶/۰۰۰	۰/۲۵۲	۰/۰۵	۰/۰۰۱	M
۰/۰۴۰	۱۱/۰۰۰	۰/۷۸۵	۰/۱	۰/۰۰۰	۰/۰۴۰	۱۱/۰۰۰	۰/۷۸۵	۰/۰۵	۰/۰۰۰	S
۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۱	۰/۰۰۰	۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۵	۰/۰۰۰	VS



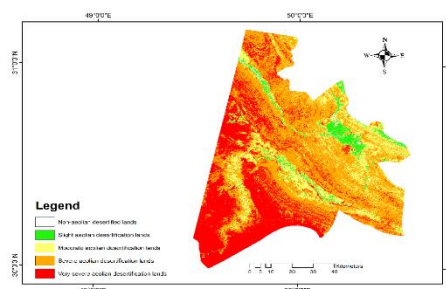
شکل ۴- نتایج تحلیل روند مکانی شاخص ADI: N, SI, M, S, VS

طبقه بیابانزایی بادی شدید (S) با اختصاص ۱۷/۴۶ درصد از مساحت منطقه، گسترده‌ترین طبقه از نظر پراکنش مکانی است و بخش‌های وسیعی از شهرستان‌های آغاچاری و بهبهان، محدوده‌ای از شمال تا جنوب هندیجان و بخش قابل توجهی از رامهرمز را دربر می‌گیرد.

طبقه بیابانزایی بادی بسیار شدید (VS) نیز حدود ۸۳/۳۱ درصد از منطقه را شامل می‌شود و عمدتاً در شهرستان هندیجان و بخش‌های غربی امیدیه متمرکز است؛ همچنین لکه‌هایی از این طبقه به‌صورت پراکنده در شهرستان رامهرمز مشاهده می‌شود. بر اساس مجموع مساحت طبقات مختلف، حدود ۹۵ درصد از منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر بیابانزایی قرار دارد و در طبقات متوسط (M)، شدید (S) یا بسیار شدید (VS) طبقه‌بندی شده است. در مجموع، غلبه طبقات شدید و بسیار شدید نشان‌دهنده گسترده‌گی و شدت قابل توجه بیابانزایی بادی در جنوب شرق خوزستان است.

جدول ۵- مساحت و درصد طبقات روند شاخص ADI در جنوب شرق خوزستان طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

طبقه‌بندی	مساحت (km ²)	درصد
N	۴۲.۱۵۵۱	۰.۵۷۳۴۰۴
SI	۳۰.۹۶۷۷۴	۴.۲۱۳۰۰۶
M	۱۲۶۵.۰۷۷۸	۱۷.۲۰۷۸۹
S	۳۳۹۴.۵۴۸	۴۶.۱۷۳۴۵۲
VS	۲۳۴۰.۲۳۶۷	۳۱.۸۳۲۴۵۸



شکل ۵- الگوی میانگین مکانی شاخص ADI طی دوره ۲۴ ساله مطالعه

۴- بحث

نتایج بررسی روند مکانی بیابانزایی بادی در جنوب شرق خوزستان طی دوره ۲۴ ساله ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳، بیانگر روندی افزایشی و گسترش مکانی بیابانزایی در منطقه مورد مطالعه است. بر اساس نتایج، حدود ۹۵ درصد از مساحت منطقه در درجات مختلف تحت

تأثیر بیابان‌زایی قرار دارد. مطابق با کنوانسیون سازمان ملل متحد برای مبارزه با بیابان‌زایی (UNCCD)، بیابان‌زایی یکی از چالش‌های مهم در مناطق خشک، نیمه‌خشک و خشک نیمه‌مرطوب جهان محسوب می‌شود (UNCCD, 1994).

در ایران، به دلیل غلبه اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، حدود ۲۰ میلیون هکتار از اراضی در زمره مناطق بحرانی بیابان‌زایی قرار دارند (Azimzadeh et al, 2008). در استان خوزستان نیز حدود ۳۰ درصد از اراضی با درجات شدید تا بسیار شدید تخریب مواجه‌اند. بررسی عوامل مؤثر نشان داده است که شوری خاک، فرسایش بادی و کاهش پوشش گیاهی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تخریب اراضی استان هستند و این پدیده عمدتاً در نواحی دشتی تمرکز دارد (Masoudi & Jokar, 2018).

روند زمانی بیابان‌زایی بادی در مطالعه حاضر نشان داد که در دوره‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۹ و ۲۰۱۸-۲۰۲۰، شدت بیابان‌زایی افزایش یافته است؛ در مقابل، طی دوره‌های ۲۰۰۲-۲۰۰۸ و ۲۰۱۹-۲۰۲۳، بهبود نسبی پوشش گیاهی و کاهش شدت بیابان‌زایی مشاهده شد. این یافته‌ها با نتایج مرادی (مرادی، ۱۳۹۹) همخوانی زمانی دارد. وی با بررسی خشکسالی در شهرستان بهبهان طی یک دوره ۲۸ ساله (۱۹۹۰-۲۰۱۸)، سه دوره خشکسالی را در سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۹، ۲۰۱۳-۲۰۱۴ و ۲۰۱۸-۲۰۱۹ شناسایی کرده است. اگرچه نوع داده‌ها و روش‌های تحلیلی مورد استفاده در دو مطالعه متفاوت است، همپوشانی زمانی قابل توجهی میان دوره‌های شناسایی شده در مطالعه مرادی و روندهای بیابان‌زایی مشاهده شده در پژوهش حاضر وجود دارد که می‌تواند بیانگر ارتباط میان شرایط خشکسالی و تشدید بیابان‌زایی در منطقه باشد.

عساکره و همکاران (۱۳۹۴)، با بررسی پتانسیل فرسایش بادی در استان خوزستان، نشان دادند که مناطقی با پتانسیل بالای جابه‌جایی ذرات خاک، از نظر مکانی با بخش‌هایی از مناطق دارای بیابان‌زایی بادی بسیار شدید در مطالعه حاضر همپوشانی دارند. این همخوانی مکانی میان مناطق مستعد جابه‌جایی ذرات خاک و طبقات بسیار شدید بیابان‌زایی، می‌تواند مؤید کارایی شاخص‌های به‌کاررفته در پژوهش حاضر برای شناسایی مناطق بحرانی باشد.

بر اساس UNCCD (1994)، بیابان‌زایی حاصل تأثیر متقابل عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی است. در استان خوزستان نیز سلطانی و همکاران (۱۳۹۳)، با بررسی عوامل مؤثر بر بیابان‌زایی، عوامل اقلیمی را در میان متغیرهای بررسی شده به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر شناسایی کردند و ویژگی‌های خاک را در رتبه دوم اهمیت قرار دادند. از این‌رو، تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی، به‌ویژه افزایش دما، کاهش بارش و تداوم دوره‌های خشکسالی، می‌تواند از طریق کاهش پوشش گیاهی و کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی، شرایط را برای تشدید بیابان‌زایی فراهم کند.

در همین راستا، قصابی و همکاران (۱۴۰۲)، با بررسی روند شاخص‌های حدی دما در استان خوزستان طی دوره ۱۹۹۶-۲۰۲۰، تغییرات قابل توجهی در شاخص‌های دمایی و روند افزایش رخداد‌های دمایی حدی را گزارش کرده‌اند. این یافته می‌تواند در تبیین بخشی از تغییرات مشاهده شده در وضعیت پوشش گیاهی و روند بیابان‌زایی منطقه مورد مطالعه مورد توجه قرار گیرد.

در مطالعه حاضر، از شاخص NDVI به‌عنوان معیاری برای ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی و بررسی تغییرات مرتبط با بیابان‌زایی استفاده شد. پوشش گیاهی منطقه تحت تأثیر عواملی همچون کاهش بارش، افزایش دما و فعالیت‌های انسانی، از جمله تغییر کاربری اراضی و کشاورزی ناپایدار، قرار دارد. کاهش پوشش گیاهی می‌تواند با افزایش آسیب‌پذیری سطح خاک در برابر فرسایش بادی، زمینه را برای تشدید بیابان‌زایی فراهم کند. همچنین، دوره‌های بهبود وضعیت پوشش گیاهی مشاهده شده در مطالعه حاضر با افزایش بارش و کاهش شدت خشکسالی همزمان بوده است. بر این اساس، شاخص‌های پوشش گیاهی می‌توانند ابزار مناسبی برای پایش روند تغییرات بیابان‌زایی و شناسایی دوره‌های تشدید یا بهبود آن باشند.

یکی از ویژگی‌های مهم این پژوهش، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ETM+ در یک دوره زمانی ۲۴ ساله برای پایش و تحلیل بیابان‌زایی بادی در جنوب شرق خوزستان است. برخلاف بسیاری از مطالعات که وضعیت بیابان‌زایی را در یک مقطع زمانی یا با مقایسه چند زمان مشخص ارزیابی می‌کنند، در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از داده‌های سری زمانی، روندهای زمانی و مکانی گسترش و تغییر شدت بیابان‌زایی مورد بررسی قرار گرفت. این رویکرد امکان شناسایی دوره‌های تشدید و کاهش نسبی بیابان‌زایی و همچنین بررسی الگوی تغییرات آن را در یک دوره بلندمدت فراهم کرده است.

اگرچه استفاده از داده‌های ETM+ با محدودیت‌هایی از جمله خطاهای ناشی از SLC-off همراه است، نتایج حاصل از مطالعه از قابلیت اطمینان مناسبی برخوردار است؛ زیرا مراحل پیش‌پردازش لازم بر روی تصاویر اعمال شده و تفکیک مکانی داده‌ها نیز برای اهداف مطالعه مناسب بوده است. در مجموع، رویکرد به‌کاررفته در این پژوهش می‌تواند مبنایی برای طراحی سامانه‌های پایش بلندمدت بیابان‌زایی و انجام تحلیل‌های تصمیم‌محور در مدیریت و کنترل مناطق مستعد بیابان‌زایی فراهم کند.

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف پایش و تحلیل روند زمانی و مکانی بیابان‌زایی بادی در جنوب شرق استان خوزستان طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳، با استفاده از داده‌های سری زمانی سنجش از دور انجام شد. در این راستا، با بهره‌گیری از شاخص NDVI، مدل پیکسل

دوتایی و برآورد درصد پوشش گیاهی (FVC)، شاخص اراضی بیابانی بادی (ADI) استخراج و وضعیت بیابانزایی در پنج طبقه شامل بدون بیابانزایی، خفیف، متوسط، شدید و بسیار شدید طبقه‌بندی شد. همچنین، به منظور بررسی روند تغییرات، از رگرسیون خطی، شیب سن و آزمون من-کندال استفاده شد.

نتایج نشان داد که بیابانزایی بادی در منطقه مورد مطالعه طی دوره ۲۴ ساله از الگوی نوسانی همراه با دوره‌های تشدید و بهبود نسبی برخوردار بوده است. در مقیاس زمانی، دوره‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۹ و ۲۰۱۸-۲۰۲۰ عمدتاً با تشدید بیابانزایی همراه بودند، در حالی که طی دوره‌های ۲۰۰۲-۲۰۰۸ و ۲۰۱۹-۲۰۲۳ کاهش نسبی شدت بیابانزایی و بهبود وضعیت پوشش گیاهی مشاهده شد. بنابراین، روند تغییرات بیابانزایی در منطقه خطی و یکنواخت نبوده و تحت تأثیر تغییرات زمانی شرایط محیطی قرار داشته است. از نظر مکانی، طبقات شدید و بسیار شدید بیشترین گستره را به خود اختصاص دادند. طبقه شدید ۱۷/۴۶ درصد و طبقه بسیار شدید ۸۳/۳۱ درصد از مساحت منطقه را شامل شدند. این پراکنش نشان می‌دهد که بخش عمده منطقه مورد مطالعه در معرض درجات بالای بیابانزایی بادی قرار دارد و به‌ویژه شهرستان‌های هندیجان، امیدیه، آغاجاری، بهبهان و رامهرمز از نظر شدت و گستره بیابانزایی دارای وضعیت قابل‌توجهی هستند.

با وجود گستردگی طبقات شدید و بسیار شدید، تحلیل آماری روند مکانی نشان داد که هیچ‌یک از طبقات شدت بیابانزایی دارای روند آماری معنادار نبودند. طبقه متوسط روند افزایشی غیرمعناداری با شیب سن ۰۰۱/۰ داشت، در حالی که مقادیر شیب سن برای طبقات بدون بیابانزایی، خفیف، شدید و بسیار شدید برابر صفر به دست آمد. این نتیجه نشان می‌دهد که اگرچه الگوی مکانی بیابانزایی در منطقه گسترده است، تغییرات مکانی آن طی کل دوره مورد بررسی از نظر آماری روند مشخص و معناداری نشان نمی‌دهد. در مجموع، یافته‌های پژوهش بیانگر گستردگی و شدت بالای بیابانزایی بادی در جنوب‌شرق خوزستان و در عین حال نوسانی بودن روند زمانی آن است. همپوشانی زمانی برخی دوره‌های تشدید بیابانزایی با دوره‌های خشکسالی گزارش شده در مطالعات پیشین و همچنین همپوشانی مکانی مناطق دارای بیابانزایی بسیار شدید با نواحی مستعد فرسایش بادی، بر نقش عوامل اقلیمی و شرایط محیطی در تغییرات بیابانزایی منطقه تأکید دارد.

بر این اساس، استفاده از داده‌های سری زمانی سنجش از دور، FVC و شاخص ADI همراه با روش‌های تحلیل روند می‌تواند چارچوب مناسبی برای پایش بلندمدت بیابانزایی و شناسایی مناطق بحرانی فراهم کند. نتایج این پژوهش می‌تواند در اولویت‌بندی مناطق مستعد تخریب، برنامه‌ریزی اقدامات کنترل فرسایش بادی و مدیریت پایدار منابع طبیعی در جنوب‌شرق خوزستان مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- آرامش، م.، ولی، ع. و رنجبر، الف. (۱۴۰۱). ارزیابی تغییرات پوشش سطح زمین و تخریب اراضی با استفاده از تکنیک سنجش از دور در شمال استان اصفهان (مطالعه موردی: کاشان، آران و بیدگل). نشریه علمی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۹(۲)، ۳۱۲-۳۰۷.
- سلطانی، م. ج.، رجبی، م. ر.، شادمانی، ع. ر. و فرحبخش، ک. (۱۳۹۳). ارزیابی سه طرح انجام شده بیابان زدایی در منطقه خوزستان با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی AHP. سومین همایش بین المللی سامانه های سطوح آبگیر باران.
- طیبی، ه. (۱۳۹۷). تشکیل، طبقه‌بندی و تغییرات مکانی خاک‌ها در یک توالی پستی و بلندی در منطقه بهبهان، استان خوزستان. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، شیراز: دانشگاه شیراز.
- عساکره، ح.، خوش‌رفتار، ر. و موسوی، س. ک. (۱۳۹۴). بررسی احتمالاتی توان فرسایشی باد در خوزستان. کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، سال سوم، ش ۲، ۱-۲۳.
- قصابی، ز.، لوعلیزاده، م. و صالح‌زاده، ز. (۱۴۰۲). تحلیل روند شاخص های حدی دما در استان خوزستان (دوره ۱۳۹۹-۱۳۷۵). نشریه هواشناسی و علوم جو، دوره ۵۱، ش ۱، ۳۵-۵۵.
- مرادی، الف. (۱۳۹۹). ارزیابی کاربرد شاخص های هواشناسی و هیدرولوژیکی خشکسالی در حوضه آبریز و بررسی ارتباط بین آن ها. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، اهواز: دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی.
- هاشم گلگردی، س.، ولی، ع. و شریفی، م. (۱۴۰۰). بررسی روند بیابانزایی در مرکز استان خوزستان با استفاده از داده‌های سری‌های زمانی سنجش از دور. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۲(۱۱)، ۲۸۴۳-۲۸۵۷.
- Azimzadeh, H. R., Ekhtesasi, M. R., Refahi, H., et al. (2008). Wind Erosion Measurement on Fallow Lands of Yazd-Ardakan Plain, Iran. Desert, 2(2), 167-174.
- Chavez, P. (1996). Image-based atmospheric corrections-Revisited and improved photogram. Eng. Remote Sensing, 62, 1025-1036.
- Chen, H., Guo, S., Xu, C.Y. & Singh, V. P. (2007). Historical temporal trends of hydro-climatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin. Journal Hydrology, 344, 171-184.

- Chen, J., Yang, Sh., Li, H., Zhang, B., et al. (2013). Research On Geocal Environment Unit Division Based On The Method of Natural Breaks (Jenks). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 40,47-50 .
- Ci, L. & Yang, X. (2010). Desertification and Its Control in China. Higher Education Press. Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Guan, X., Shen, H., Wang, Y., et al. (2021). Fusing MODIS and AVHRR products to generate a global 1-km continuous NDVI time series covering four decades. Earth system science data. Data Discuss. [preprint] .
- Guan, Y., He, B., Li, X., et al. (2017). Desertification assessment and trend analysis using MODIS data. Paper presented at international Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).
- Gutman,G.G ., (1991). Vegetation indices from avhrr. An update and future prospects. Remote Sens. Environ. 35,121-136.
- Hamed, kh. & Rao, AR. (1998). A modified Mann-Kandall trend test for autocorrelated data. J Hydrol, 204, 182- 196.
- Hirsch, R. M., Slack, J. R. & Smith, R. A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. Water Resour. Res, 18, 107-121 .
- Johnson, B., Tateishi, R. & Kobayashi, T. (2012). Remote Sensing of fractional green vegetation cover using spatially-interpolated endmembers. Remote Sens, 4, 2619-2634.
- Kendall, M. G. (1975). Rank Correlation Methods. (4th ed.). London: Griffin.
- Kuenzer, C., Dech, S. & Wagner, W. (2015). Remote Sensing and Digital Image Processing. Switzerland: Springer.
- Lamqadem, A. A., Hafid, S. & Pradhan, B. (2018). Quantitative Assessment of Desertification in an Arid Oasis Using Remote Sensing Data and Spectral Index Techniques. Remote Sensing, 10(12), 1862.
- Lanfredi, M., Coppola, R., Simoniello, T., et al. (2016). Early Identification of Land Degradation Hotspots in Complex Bio-Geographic Regions. Remote Sensing, 7(6), 8154-8179.
- Li, M. M. (2007). The Method of Vegetation Fraction Estimation by Remote Sening Chinse Academy of Sciences: Institute of Remote Sensing Applications, Beijing (In Chinese).
- Liu, Q., Liu, G. & Huang, C. (2018). Monitoring desertification processes in Mongolian Plateau using MODIS tasseled cap transformation and TGSI time series. Journal of Arid Land, 10(1), 12– 26.
- Ma, N., Hu, Y. F., Zhuang, D. F., et al. (2012). Vegetation coverage distribution and its changes in Plan Blue Banner based on remote sensing data and dimidiate pixel model. Scientia Geographica Sinica, 32, 251–256.
- Ma, Z., Xie, Y., Jiao, J., et al. (2011). The construction and application of an Aledo-NDVI based desertification monitoring model. Procedia Environmental Sciences, 10, 2029– 2035 .
- Mann, H.B. (1945). Non-parametric tests against trend. Econometrica, 13, 245–259.
- Martinez, B. & Gilabert, M. A. (2009). Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform. Remote Sensing of Environment, 113(9), 1823– 1842 .
- Masoudi, M. & Jokar, P. (2018). A new approach for land degradation and desertification assessment in southwestern Iran using geospatial techniques. Natural Hazards and Earth System Sciences, 18(4), 1133–1145.
- Pan, J. & Li, T. (2013). Extracting desertification from Landsat TM imagery based on spectral mixture analysis and Albedo-Vegetation feature space. Natural Hazards, 68(2), 915-927.

- Shadmani, M., Marofi, S. & Roknian, M. (2012). Trend analysis in reference evapotranspiration using Mann–Kendall and Spearman's rho tests in arid regions of Iran. *Water Resour. Manag*, 26, 211–224.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
- UNCCD. (1994). Status of Ratification and Entry into Force. United Nations Convention to Combat Desertification Paris.
- Wang, Y. F., Zhang, J., Guo, E., et al. (2015). Fuzzy Comprehensive Evaluation-Based Disaster Risk Assessment of Desertification in Horqin Sand Land, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(2), 1703- 1725.
- Wang, Y. F., Zhang, J., Tong, S., et al. (2017). Monitoring the trends of Aeolian desertified lands based on time-series remote sensing data in the Horqin Sandy Land, China. *Catena*, 157, 286- 298.
- Xulin, G., & Price, P. K. (2001) Modeling biophysical for graalands using Landsat TM data in eastern Kansas. The Second International Conference.
- Yin, S. (2010). Dynamic Study of Desertification in Hunshandake Sandy Land of Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural university. China: Hohhot.
- Zhao, X. W., Yu, M. L., Pan, Sh., et al. (2023). Spatio-temporal distribution and trends monitoring of land desertification based on time-series remote sensing data in northern China. *Environmental Earth Sciences*, 82, 263.