

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره دوازدهم، شماره چهل و پنجم، پاییز ۱۴۰۰

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۱۰ تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲

صص ۷۸-۹۰

ارزیابی میزان آسیب‌پذیری سرزمین با استفاده از مدل ترکیبی IDI در مناطق خشک و نیمه‌خشک منطقه (مطالعه‌ی موردی: خراسان رضوی)

مصطفی دستورانی*، استادیار گروه سنجش‌ازدور و GIS دانشکده‌ی جغرافیا و علوم محیطی-دانشگاه حکیم

سبزواری

چکیده

آسیب‌پذیری سرزمین یکی از چالش‌های مهم جهانی به‌عنوان مورد عینی تخریب اکوسیستم‌های خشک، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب است که در اثر فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌گردد. باین‌حال به منظور ارزیابی میزان آسیب‌پذیری سرزمین، نیازمند شناخت دقیق از درجه‌ی تحمل اکوسیستم‌ها و استفاده از نظام‌های دانش بومی نسبت به شرایط بیرونی لازم است. پژوهش حاضر بر اساس الگوریتم شاخص ترکیبی IDI جهت ارزیابی شدت آسیب‌پذیری خراسان رضوی در یک دوره‌ی ۱۶ ساله (۲۰۱۶-۲۰۰۱) استفاده شد. بدین منظور دو شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) (MOD13Q1) و وضعیت دمایی (TCI) (MOD11A2) بر اساس روش دلفی و با توجه به قابلیت دسترسی به این شاخص‌ها بر اساس داده‌های ماهواره‌ای و در دوره‌ی زمانی موردنظر انتخاب شدند. سپس تصاویر از محصولات سنجنده‌ی مودیس تهیه و نرمال‌سازی و شاخص‌ها در محدوده‌ی صفر و یک بی‌مقیاس شدند و برای ارزیابی اوزان از روش سلسه‌مراتبی در نرم‌افزار EDRI استفاده شد. همچنین برای صحت‌سنجی مدل، از ۲۵۰ نقطه برداشت زمینی و با استفاده از ضریب کاپا وضعیت پوشش گیاهی تعیین گردید. سپس با استفاده از مدل ترکیبی IDI و اجرای مدل، منطقه در پنج کلاس آسیب‌پذیری خیلی کم (۰-۰.۱۵)، آسیب‌پذیری کم (۰.۱۵-۰.۳)، آسیب‌پذیری متوسط (۰.۳-۰.۵)، آسیب‌پذیری زیاد (۰.۵-۰.۷) و آسیب‌پذیری خیلی زیاد (۰.۷-۱) طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین آسیب‌پذیری سرزمین در سال ۲۰۰۱ با بیش از ۵۰ درصد مساحت استان در کلاس متوسط و در سال ۲۰۱۶ بیش‌ترین آسیب‌پذیری در دو کلاس متوسط و زیاد با نسبت مساوی ۴۴ درصد را دربر می‌گیرند. دقت کلی مدل برای مدل ترکیبی IDI ۷۸.۶ درصد و ضریب کاپای ۰.۷ محاسبه گردید.

کلمات کلیدی: مدل ترکیبی IDI، آسیب‌پذیری سرزمین، سنجنده‌ی مودیس، خراسان رضوی.

۱- مقدمه

بیش از ۸۰ درصد از سرزمین ایران در قلمروی شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک تا نیمه‌مرطوب قرار دارد، در نتیجه به سبب مجموعه شرایط اقلیمی و ویژگی‌های طبیعی حاکم بر آن، بخش عمده‌ای از زیست‌بوم‌های این سرزمین در برابر شیوه‌های بهره‌برداری نامناسب بسیار حساس و شکننده بوده و بالقوه و یا در عمل در معرض پدیده‌ی تخریب و آسیب‌پذیری قرار دارد. آسیب‌پذیری پدیده‌ای پیچیده است که نیاز به تخصص محققان در بسیاری از رشته‌های مختلف از قبیل علوم خاک، هواشناسی، هیدرولوژی، علوم کشاورزی و زراعت و نیز جغرافیا، علوم سیاسی، اقتصاد و انسان‌شناسی دارد (Santini, 2010: 397). فناوری سنجش‌از‌دور به دلیل وسعت منطقه‌ی تحت پوشش و اندازه‌گیری عوامل در تمام نقاط همواره یکی از مؤثرترین روش‌ها در مطالعه‌ی هم‌زمان پدیده‌های اقلیمی، اتمسفری و فرآیندهای هیدرولوژیکی، راهگشای محققان بوده است (Hua et al, 2007: 291). آسیب‌پذیری مشتمل بر فرآیندهایی است که هم زاییده‌ی عوامل طبیعی بوده و هم به عملکرد نادرست انسان برمی‌گردد. باید دانست که حساسیت زمین ایستا نیست و به نظارت دائم نیاز دارد (Salavati & Zitti, 2009: 280). با توجه به اینکه ایران تحت تأثیر افزایش دما به‌ویژه شاخص‌های حداقل دمایی و همچنین کاهش در شاخص‌های بارشی مشاهده می‌شود (Shamami-Ghiami et al, 2019: 886). برخی از این تغییرات زیست‌محیطی به سیستم هشدار اولیه نیاز دارند؛ بنابراین استفاده از شاخص‌های ترکیبی موجب تکامل و تقویت ارزیابی‌ها می‌شود. ترکیب انواع گوناگون شاخص‌ها و هماهنگ‌سازی آن‌ها، به فهم کامل‌تری از نحوه‌ی تخریب در مناطق تحت تأثیر یا بدون تأثیر کمک می‌کند (اختصاصی و سپهر، ۱۳۹۰: ۵۸). کاربرد شاخص‌های ترکیبی بر پایه‌ی داده‌های سنجش‌از‌دوری به دلیل عدم قطعیت بالای آن از روش‌های جدید و مؤثر در زمینه‌ی تحقیقات منابع طبیعی و محیط‌زیست به‌ویژه مطالعات مربوط به میزان آسیب‌پذیری سرزمین است (دستورانی، ۱۳۹۵: ۱۲). در خصوص کلاس‌بندی و تعیین نوع و شدت عوامل مؤثر در تخریب سرزمین در مناطق مختلف عقیده‌های متفاوتی وجود دارد. این اختلاف عقیده مربوط به انتخاب نوع معیارها و شاخص‌های متفاوت یا تعداد آن‌هاست. پروژه‌ها و مطالعات بسیار زیادی در دنیا در رابطه با نوع و میزان آسیب‌پذیری و نیز عوامل مؤثر در آن‌ها انجام شده است که از جمله: FAO^۱، UNEP^۲ و IDI^۳ در دنیا و در ایران هم ICD^۴، MICD^۵ و MIDP^۶ را می‌توان نام برد. در زمینه‌ی ارزیابی شدت بیابان‌زایی و حساسیت سرزمین‌ها به این پدیده، مطالعات بسیار زیادی با مدل‌های متنوع انجام شده است.

فئولی و همکاران (۲۰۰۳) به مطالعه‌ی نظارت بر ریسک بیابان‌زایی با ادغام شاخص‌های اقلیمی و سنجش‌از‌دوری در مناطق ساحلی ترکیه پرداختند. در این مطالعه از شاخص یکپارچه‌ی (DRI)^۷ که ترکیبی از شاخص اقلیمی و پوشش گیاهی (NDVI)^۸ است، استفاده گردید. نتایج نشان داد که شاخص DRI همبستگی خوبی با شاخص خشکی و

- 1- Food and Agriculture Organization
- 2- United nations environment program
- 3- Integrated desertification index
- 4- Iranian Classification of Desertification
- 5- Modified Iranian Classification of Desertification
- 6- Iranian Model of Desertification Potential
- 7- Desertification Risk Inde
- 8- Normalized Difference Vegetation Index

پارامترهای بیوفیزیکی دارد، در نتیجه جهت ارزیابی ریسک بیابان‌زایی مفید است. در پژوهش‌هایی که توسط صلواتی و همکاران (۲۰۰۹) همچنین موتورونی و همکاران (۲۰۰۹) در خصوص مناطق حساس به بیابان‌زایی در ایتالیا انجام گردید، مشخص شد که عوامل ناشی از تخریب، بیش‌تر مربوط به شیوه‌های مدیریت اراضی، تشدید کشاورزی، فشار جمعیت و تخریب محیط زیست است. تغییرات دما به خصوص افزایش دما می‌تواند باعث اختلال در اکوسیستم‌های گیاهی به لحاظ تولید محصول و زمان گلدهی شده و نهایتاً در بازار اثر گذاشته، لذا تصمیم‌گیران و مدیران بهتر است شیوه‌ها و روش‌های سازگاری با این تغییرات را در جهت به حداقل رساندن هر چه بیش‌تر اثرات منفی افزایش دما ارائه نمایند (علوی‌نیا و زارعی، ۱۳۹۹: ۱۳).

سیلاخوری (۱۳۹۳) در تحقیقی شدت خطر بیابان‌زایی را در منطقه‌ی مزینان سبزوار از منظر معیار خاک با استفاده از مدل ESAs مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که شاخص‌های زهکشی و درصد سنگریزه‌ی سطحی با میانگین وزنی ۱/۵۱ و ۱/۵۰ بیش‌ترین تأثیر را در بیابان‌زایی منطقه دارند. پاشایی (۱۳۹۵) با استفاده از مدل‌های IDI و ESA میزان بیابان‌زایی خراسان رضوی را با شاخص‌های پوشش گیاهی، تبخیر و تعرق، رطوبت و بارش بررسی نموده که نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد پوشش گیاهی بیش‌ترین تأثیر را در بین شاخص‌های موردی بررسی در بیابان‌زایی تأثیرگذار است.

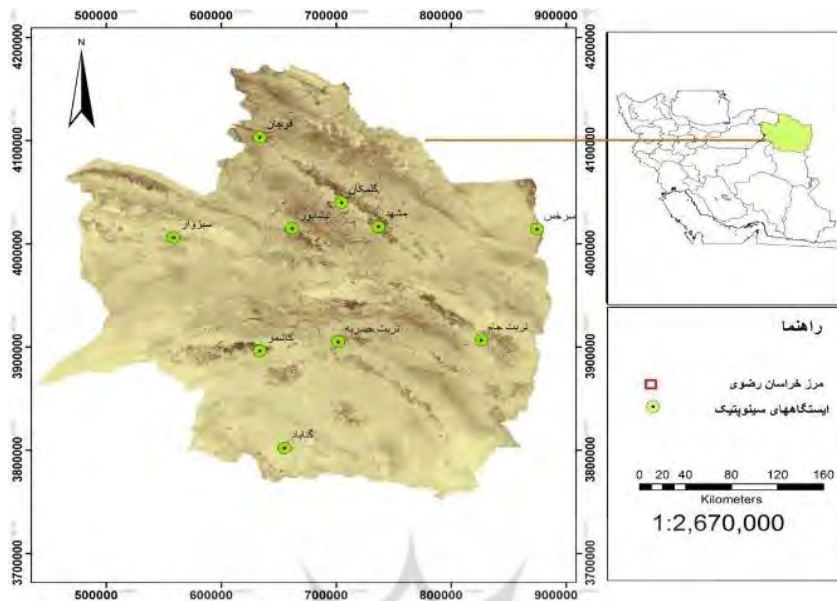
صلواتی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از سیستم یکپارچه (CAS)^۹ تخریب خاک و حساسیت‌پذیری به بیابان‌زایی را در ایتالیا مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بیانگر همبستگی قابل توجهی بین شاخص‌های سطح خاک و تخریب زمین بود. در همین راستا دستورانی (۱۳۹۵) در تحقیقی با استفاده از تکنیک‌های فازی و میانگین وزنی میزان حساسیت‌پذیری سرزمین خراسان رضوی را با استفاده از شاخص VCI، TCI، EVI، SI، SDI و بارش برآورد کرد. نتایج نشان داد به دلیل خشک‌سالی‌های اخیر به خصوص در مرکز و جنوب استان درصد بالایی از منطقه‌ی مورد مطالعه در کلاس طبقه‌بندی با آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد قرار دارد. پارک و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از تصاویر سنجده‌ی مودیس میزان گردوغبار را در منطقه‌ی شرق آسیا با دقت بالای ۸۰ درصد برآورد و آنالیز کردند. بررسی سوابق و مطالعات ارائه‌شده نشان از تنوع و تفاوت شاخص‌های بیابان‌زایی در به‌کارگیری مدل‌های مختلف است. با توجه به اینکه کاربرد شاخص‌های ترکیبی بر پایه‌ی شاخص‌های سنجش‌ازدوری با در نظر گرفتن فاکتورهای مهم و مؤثر از روش‌های مفید و تقریباً جدید در مطالعات منابع طبیعی به‌خصوص ارزیابی وضعیت بیابان‌زایی است.

تحقیق حاضر با استفاده از روش بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و فن‌آوری سنجش‌ازدور و نیز استفاده از شاخص‌های ترکیبی بر اساس دو شاخص VCI و TCI و مدل ترکیبی (IDI) جهت برآورد میزان آسیب‌پذیری سرزمین خراسان رضوی استفاده شد. هدف از انجام این تحقیق، تولید یک نقشه‌ی آسیب‌پذیری سرزمین دقیق در استان خراسان رضوی با استفاده از شاخص‌های ترکیبی بیابان‌زایی است که می‌تواند در مدیریت و برنامه‌ریزی در زمینه‌ی تحقیقات منابع طبیعی و محیط‌زیست، همچنین مطالعات مربوط به بیابان‌زایی مؤثر باشد.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

استان خراسان رضوی با وسعتی حدود ۱۱۶۴۷۷ کیلومترمربع در شمال شرقی ایران بین مدارات ۱۹° ۵۶' دقیقه تا ۱۶° ۶۱' دقیقه طول شرقی و ۵۲° ۳۳' دقیقه تا ۴۲° ۳۷' دقیقه عرض شمالی جغرافیایی قرار گرفته است (شکل ۱). این استان از شمال به کشور ترکمنستان، از شرق به افغانستان، از غرب و شمال غربی به استان‌های خراسان شمالی و سمنان؛ و از جنوب و جنوب غربی به استان خراسان جنوبی محدود است. به‌طورمعمول اقلیم استان، خشک و نیمه‌خشک است. بخش‌های شمالی استان بیش‌تر کوهستانی است و بین آن‌ها دشت‌های حاصلخیزی قرار گرفته است

که به دلیل دارا بودن میزان بارندگی قابل توجه و نیز وجود منابع آب زیرزمینی از شرایط مناسب کشاورزی برخوردارند (سلیمی، ۱۳۹۵: ۳۴).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی استان خراسان رضوی در ایران

۳- مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و از طریق مطالعات کتابخانه‌ای، میدانی و پیمایشی جمع‌آوری شده است. در پژوهش حاضر از تصاویر مودیس و با استفاده از دو شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) (MOD13Q1) و شاخص وضعیت دمایی زمین (TCI) (MOD11A2) در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۶ بهره‌گیری شده است. در ابتدا تصاویر ماهواره‌ای مودیس تصحیح هندسی و رادیومتریک شد تا خطای مربوط به تصاویر کاهش یابد. در ادامه، محدوده‌ی مورد مطالعه را از تصاویر جدا کرده و اقدام به طبقه‌بندی اطلاعات ماهواره‌ای گردید. روش مورد استفاده جهت طبقه‌بندی اطلاعات، روش نظارت شده است. در این روش برای رده‌بندی پیکسل‌ها از نمونه‌های آموزشی استفاده شد؛ بدین معنی که با تعریف پیکسل‌های مشخص از تصویر برای هر یک از کلاس‌ها عمل طبقه‌بندی در قالب کلاس‌های در نظر گرفته شده، انجام گردید. در این روش، ارزش بازتابی هر پیکسل ناشناخته و بر اساس واریانس و کوواریانس آن طبقه‌ی واکنش طیفی ویژه تجزیه و تحلیل می‌شود و فرض بر این است که توزیع داده‌های هر طبقه بر اساس توزیع نرمال در اطراف پیکسل میانگین آن طبقه قرار گرفته‌اند. در عمل واریانس و کوواریانس و میانگین طبقه‌ی مختلف هر تصویر ماهواره‌ای برای طبقه‌بندی پدیده‌ها محاسبه می‌شود تا هر یک از پیکسل‌ها به طبقه‌ای تعلق یابد که حضورش در آن طبقه از احتمال بیش‌تری برخوردار است.

جهت ارزیابی میزان آسیب‌پذیری سرزمین بهتر است از مدل‌های ترکیبی استفاده گردد؛ چراکه فرسایش زمین و به‌طور کلی تخریب آنکه می‌تواند در بسیاری از زمینه‌های مختلف، با اقلیم‌های متفاوت و خاک‌های متنوع اتفاق بیفتد و این وضعیت در خیلی از جوامع، چه غنی و فقیر، سرمایه‌داری یا سوسیالیستی مشاهده می‌شود.

در تحقیق حاضر با استفاده از روش‌های جدید از جمله بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و فن‌آوری سنجش از دور و همچنین استفاده از شاخص‌های ترکیبی بر اساس دو شاخص VCI و TCI و مدل ترکیبی (IDI) جهت برآورد میزان آسیب‌پذیری خراسان رضوی استفاده شد. با توجه به اینکه میزان بارش به‌طور مستقیم بر روی هر دو شاخص اثرگذار

است در جدول (۱) موقعیت ایستگاه‌ها در سطح استان و میزان بارش آن‌ها در طی دوره‌ی ۱۶ ساله (۲۰۰۱ تا ۲۰۱۶) ارائه شده است.

جدول ۱: ارائه‌ی میزان بارش متوسط ایستگاه‌های سینوپتیک خراسان رضوی

	کاشمر	گناباد	گلمکان	قوچان	تربت حیدریه	سرخس	سبزوار	نیشابور	مشهد	تربت جام
۲۰۰۱	۱۱۴/۶	۴۹/۸	۱۴۱/۱۹	۲۳۴/۲	۱۱۵/۸	۱۱۹/۷	۱۱۸/۴	۱۷۸	۱۴۳/۶	۹۰/۲
۲۰۰۲	۱۹۴/۱	۸۹/۶	۱۸۴	۳۳۱/۸	۲۳۷/۶	۲۴۲/۹	۱۴۰/۲	۱۹۲/۸	۲۲۹/۹	۱۶۲/۳
۲۰۰۳	۱۷۲/۶	۹۳	۳۱۳/۴	۴۳۶/۹	۲۴۸/۹	۲۵۱/۸	۲۴۰/۴	۲۴۰/۶	۲۶۴/۴	۱۸۳/۳
۲۰۰۴	۲۲۶/۹	۲۲۰/۳	۳۲۳/۳	۴۰۰/۳	۳۱۳	۲۴۴/۸	۲۲۶/۵	۳۱۱/۳	۲۸۶/۸	۱۷۶/۹
۲۰۰۵	۱۶۱/۹	۷۳/۷	۲۱۶/۵	۳۵۷/۶	۲۵۶/۸	۱۷۶/۱	۱۹۱/۸	۲۴۲/۹	۲۳۴/۵	۱۴۷/۵
۲۰۰۶	۱۵۰/۵	۱۴۹/۸	۱۳۱/۴	۲۷۹/۷	۱۸۴	۱۶۹/۹	۱۸۲/۹	۲۰۶/۴	۲۱۰/۹	۱۶۲/۹
۲۰۰۷	۲۰۷/۱	۱۴۷/۴	۲۵۲	۳۳۷/۵	۲۳۲/۹	۲۰۷/۳	۲۴۴/۸	۲۹۲/۶	۲۶۴/۸	۱۸۳/۵
۲۰۰۸	۶۴/۷	۶۵/۷	۱۲۴/۸	۱۲۱/۵	۸۲/۱	۷۶/۴	۵۸	۱۳۰	۱۲۱/۴	۵۶/۳
۲۰۰۹	۲۵۴/۶	۱۴۲/۵	۲۳۳/۶	۳۷۲/۵	۳۲۶/۹	۲۳۳/۳	۱۸۷/۳	۳۳۴/۲	۲۹۲/۸	۲۶۳/۲
۲۰۱۰	۱۳۶/۵	۶۸/۸	۲۰۹/۴	۳۲۴/۱	۱۹۱/۲	۱۶۰/۴	۱۵۹	۲۰۵/۸	۱۶۳/۵	۱۶۲/۶
۲۰۱۱	۱۴۲/۴	۸۰/۲	۲۴۵/۵	۴۱۵/۸	۱۵۱/۶	۱۷۲	۲۹۵/۴	۳۳۵/۲	۲۰۵/۲	۱۱۶/۳
۲۰۱۲	۲۱۷/۸	۱۳۱/۶	۲۵۷/۷	۳۳۳/۲	۳۹۰/۶	۲۳۲/۵	۱۹۹/۲	۲۳۴/۶	۳۱۸/۵	۱۴۶/۶
۲۰۱۳	۱۴۵/۶	۱۱۵/۳	۱۷۱/۱	۲۷۱/۹	۱۸۲/۵	۱۲۴/۵	۹۸/۷	۲۴۲/۴	۱۹۳/۴	۱۴۱/۶
۲۰۱۴	۱۴۸/۵	۸۹/۷	۲۰۱/۲۶	۲۷۱/۲	۱۵۹/۷	۱۶۱/۸	۱۴۳/۴	۱۹۴/۹	۲۰۲/۷	۱۰۸/۱
۲۰۱۵	۲۰۸/۲۳	۱۵۹/۱۲	۲۲۵/۳۲	۳۷۵/۹۶	۲۶۹/۸۳	۲۲۹	۲۱۲	۲۴۸	۲۵۹/۶۷	۱۵۹/۱۲
۲۰۱۶	۱۷۰/۸۴	۱۲۱/۹۷	۲۱۰/۶۵	۳۳۳/۵	۲۵۴/۹	۱۹۰/۴۵	۱۹۵	۲۵۱/۳	۲۴۹/۱	۱۲۱/۹۷

۳-۱- روش تحقیق

در پژوهش حاضر به منظور ارائه‌ی شاخص ترکیبی ارزیابی آسیب‌پذیری بیابان‌زایی بر پایه‌ی داده‌های دورسنجی در استان خراسان رضوی، مطالعات در سه مرحله‌ی مجزا به صورت ذیل انجام شد:

مرحله‌ی اول- تهیه‌ی نقشه‌ی پوشش سطح زمین‌های عنوان نقشه‌ی واحد کاری؛

مرحله‌ی دوم- انتخاب شاخص‌های مؤثر در ارزیابی آسیب‌پذیری سرزمین و تجزیه و تحلیل داده‌ها؛

مرحله‌ی سوم- تهیه‌ی نقشه و ارزیابی درجه‌ی آسیب‌پذیری استان به بیابان‌زایی بر اساس ارائه‌ی مدل ترکیبی IDI.

پس از شناسایی شاخص‌های مؤثر در آسیب‌پذیری استان خراسان رضوی به بیابان‌زایی بر اساس روش دلفی و با توجه به قابلیت دسترسی به این شاخص‌ها، دو شاخص پوشش گیاهی (VCI) و شرایط دمایی سطح زمین (TCI) در دوره‌ی زمانی موردنظر، انتخاب شدند. سپس مراحل محاسبه و آماده‌سازی شاخص‌ها انجام گرفت. نهایتاً با استفاده از ضریب کاپا صحت کلی مدل برآورد گردید. مراحل تهیه و محاسبه‌ی هر کدام از شاخص‌های انتخاب‌شده به‌طور کامل و مجزا در ذیل شرح داده شده است.

۳-۱-۱- آماده‌سازی داده‌ها و محاسبه‌ی شاخص

شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای شاخص NDVI و در سطح محاسبات پیکسلی از طریق رابطه‌ی (۱) محاسبه شد (گالنتز، ۱۹۹۷: ۱۵۴).

برای محاسبه‌ی شاخص VCI، ابتدا لایه‌ی اول تصاویر در نرم‌افزار ENVI، برای هر یک از سال‌های مطالعاتی جداسازی شد. داده‌های پیکسلی شاخص NDVI در این لایه به صورت ۱۶ بیت است و محدوده‌ی تغییر داده‌ها در این تصاویر بین ۳۰۰۰- تا ۱۰۰۰۰ قرار می‌گیرد. اطلاعات محصول در عدد ۰۰۰۰۰۱ باید ضرب گردند تا داده‌های این

شاخص بین محدوده‌ی یک تا منفی یک قرار گیرند. برای محاسبه‌ی این شاخص از محصولات ماهواره‌ای سنجنده‌ی مودیس که بر روی ماهواره Terra با نام MOD13A3 است، استفاده گردید. داده‌های این محصول شامل داده‌های شاخص‌های گیاهی همچون NDVI و EVI است. این محصول دارای تفکیک زمانی ماهانه و تفکیک مکانی یک کیلومتر در یک کیلومتر است. این شاخص در ۳ کلاس با پوشش گیاهی کم (۰.۳۵-۰)، پوشش گیاهی متوسط (۰.۳۵-۰.۵) و پوشش گیاهی زیاد (۰.۵-۱) طبقه‌بندی شد.

$$VCI_i = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

رابطه‌ی ۱

VCI_i = مقدار شاخص وضعیت پوشش گیاهی در سال i در دوره‌ی مطالعاتی موردنظر

$NDVI_i$ = مقدار $NDVI$ مربوط به هر پیکسل در سال i در دوره‌ی مطالعاتی موردنظر

$NDVI_{min}$ = مقدار حداقل $NDVI$ هر پیکسل در دوره‌ی مطالعاتی موردنظر

$NDVI_{max}$ = مقدار حداکثر $NDVI$ هر پیکسل در دوره‌ی مطالعاتی موردنظر.

۳-۱-۲- شاخص وضعیت دمایی (TCI)

در راستای ارزیابی بیابان‌زایی در اراضی، استفاده از باندهای حرارتی جهت بررسی هرچه صحیح‌تر و دقیق‌تر این پدیده توصیه می‌شود. در این شاخص فرض می‌شود مناطقی که دارای خطر بیابان‌زایی بالاتری هستند باعث کاهش رطوبت خاک خواهند شد و موجب به وجود آمدن تنش حرارتی در سطح زمین که نتیجه آن بالا رفتن افزایش دمای هواست الگوریتم محاسبه شاخص TCI در سطح محاسبات پیکسلی است و از طریق رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود (کوگان، ۱۹۹۵: ۳۶۹۱).

$$TCI_i = \frac{LST_{max} - LST_i}{LST_{max} - LST_{min}}$$

رابطه‌ی (۲)

TCI_i = مقدار شاخص وضعیت دمایی در سال i در دوره‌ی مطالعاتی موردنظر

LST_{max} = مقدار حداکثر دمای سطح زمین مربوط به هر پیکسل در دوره‌ی مطالعاتی موردنظر

LST_i = مقدار دمای سطح زمین مربوط به هر پیکسل در سال i در دوره‌ی مطالعاتی موردنظر

LST_{min} = مقدار حداقل دمای سطح زمین مربوط به هر پیکسل در دوره‌ی مطالعاتی موردنظر.

الگوریتم محاسبه‌ی شاخص TCI نیز همانند شاخص VCI در سطح محاسبات پیکسلی است، به‌منظور محاسبه‌ی این شاخص از محصولات سنجنده‌ی مودیس که بر روی سکو Terra قرار گرفته با نام MOD11A2 استفاده شد. این محصول دارای داده‌های دمای سطح زمین برحسب کلون در دو مقطع زمانی روزانه و شبانه است. در این مطالعه، از داده‌های ثبت‌شده در روز استفاده گردید. داده‌های این محصول دارای تفکیک زمانی ۸ روزه و تفکیک مکانی ۱ کیلومتر می‌باشند.

در شاخص TCI برعکس شاخص NDVI، مقادیر حداکثر دمای سطح زمین در سال‌های خشک و سال‌هایی که شرایط محیطی نامناسب است و بالعکس، مقادیر حداقل دمای سطح زمین در سال‌های نرمال مشاهده می‌شود (کوگان، ۱۹۹۵: ۳۶۹۲). محدوده‌ی تغییرات این شاخص نیز بین ۰ و ۱ است که در شرایط خشک‌سالی میزان این شاخص به صفر نزدیک است و در شرایط ترسالی نیز به عدد یک نزدیک است (کوگان، ۱۹۹۵: ۳۶۹۲).

۳-۱-۳- ارائه‌ی مدل ترکیبی IDI

در نهایت مرحله نهایی شاخص‌های بیابان‌زایی شامل ارائه‌ی یک شاخص یکپارچه‌ی ارزیابی بیابان‌زایی IDI است که با رابطه‌ی (۳) محاسبه گردید.

$$IDI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{e^{P_{\Delta ID_i} * \Delta ID_i}}{e} * \frac{e^{P_{ID_i} * ID_i}}{e} \right]$$

رابطه‌ی ۳

N = تعداد شاخص‌های در نظر گرفته‌شده

$i =$ بیانگر تنها یک شاخص است
 $IDI =$ شاخص تخریب برای نام شاخص برای دوره‌ی زمانی دوم
 $\Delta IDI =$ تغییرات شاخص نام در مقیاس زمانی موردنظر
 $P = \Delta IDI$ و $IDi P$ به ترتیب وزن محاسبه‌شده برای شاخص سال بالایی و تغییرات شاخص نام در دوره‌ی مطالعاتی موردنظر.
 درنهایت پس از اجرای مدل IDI نتایج حاصل در محدوده‌ی مقادیر بین صفر و یک طبق آنچه در جدول (۲) توصیف شده است، به پنج کلاس آسیب‌پذیری بیابان‌زایی طبقه‌بندی می‌شود.

جدول ۲: تعریف و توصیف کلاس‌های آسیب‌پذیری بیابان‌زایی IDI

توصیف	محدوده‌ی مقادیر	کلاس ریسک
مناطق کمی فاکتورهایی بحرانی بیابان‌زایی کم است یا وجود ندارد و دارای یک تعادل خوب بین اجزای زیست‌محیطی و اقتصادی-اجتماعی برقرار است.	۰-۰.۱۵	خیلی کم (مناطق کمی تحت تأثیر قرار ندارند)
مناطق مورد تهدید بیابان‌زایی اگر شیوه‌های نادرست مدیریتی و یا مناطق تخریب یافته ناشی از رهاسازی اراضی در مجاور این مناطق قرار داشته باشد.	۰.۱۵-۰.۳	کم (مناطق دارای پتانسیل)
مناطق هستند که هر تغییر کمی در تعادل فعالیت‌های انسانی و محیطی منجر به بیابان‌زایی می‌شود.	۰.۳-۰.۵	متوسط (مناطق شکننده)
سرزمین‌های تخریب یافته که توسط تعادل مخاطره‌آمیز فعالیت‌های انسانی و محیطی ایجاد می‌شوند.	۰.۵-۰.۷	زیاد (مناطق بحرانی)
مناطق که به دلیل شیوه‌های نادرست مدیریتی در گذشته یا به دلیل بیابان‌زایی آشکار تحت تأثیر قرار گرفته‌اند.	۰.۷-۱	بسیار زیاد (تخریب یافته)

منبع: (سانتینی و همکاران، ۲۰۰۹)

۳-۲- صحت‌سنجی مدل

تعیین ضریب کاپا برای ارزیابی میزان دقت نتایج به‌دست‌آمده جهت تصمیم‌گیری، بسیار مهم هستند. معمولی‌ترین پارامترهای برآورد دقت شامل دقت کلی، دقت تولیدکننده، دقت کاربر و ضریب کاپا هستند (LU and et al, 2004):
 2365). به دلیل ایرادات وارد شده بر دقت کلی، غالباً در کارهای اجرایی که مقایسه‌ی دقت طبقه‌بندی مورد توجه است، از شاخص کاپا استفاده می‌شود؛ زیرا شاخص کاپا پیکسل‌های نادرست طبقه‌بندی‌شده را مدنظر قرار می‌دهد. دقت کلی کاربر و تولیدکننده توسط ماتریس تهیه‌شده برای مدل ترکیبی IDI برآورد گردید. شاخص کاپا از رابطه‌ی (۴) محاسبه شد (بنیاد و حاجی قادری، ۱۳۸۶: ۶۳۳).

$$Kappa = \frac{p_0 - p_c}{1 - p_c} \times 100$$

رابطه‌ی ۴

P0 = درست‌ی مشاهده‌شده

Pc = توافق مورد انتظار

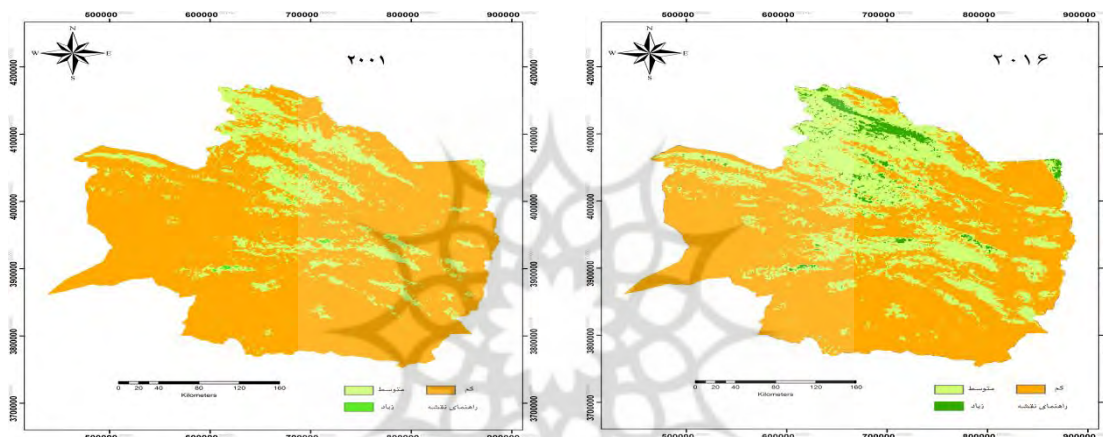
۴- بحث و نتایج

جهت ارزیابی روش پیشنهادی موردنظر در تحقیق حاضر که به منظور تحلیل حساسیت‌پذیری بیابان‌زایی انجام شده است، ابتدا با توجه به کلیه‌ی اطلاعات و مراحل که در قسمت مواد و روش‌ها ارائه گردید، انجام گرفت و نحوه‌ی ارزش‌گذاری که در روش تحقیق ذکر شد، مدل ترکیبی اجرا شد.

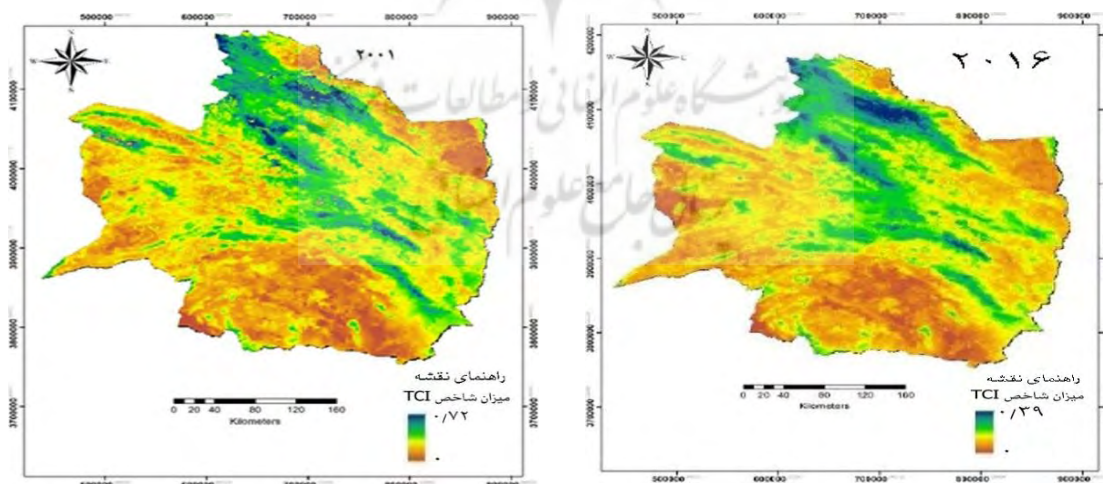
میزان تغییرات پوشش گیاهی (VCI) و دمای سطحی زمین (TCI) به ترتیب در شکل‌های (۲) و (۳) نمایش داده شده‌اند. همچنین توصیف کلاس‌های آسیب‌پذیری سرزمین بر اساس مدل ترکیبی IDI در جدول (۲) و نقشه‌های آسیب‌پذیری در شکل (۴) برای سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۶ ارائه شده است.

نتایج حاصل از مقایسه‌ی تصاویر حاوی اطلاعات نقشه‌ی VCI استان در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۶ نشان داد که در سال ۲۰۰۱ عمده‌ی پوشش استان در کلاس با پوشش کم یا بایر و کلاس مرتع قرار دارد و در سال ۲۰۱۶ بیش‌ترین کلاس بوته‌زار و کم‌پوشش یا بایر در سطح استان وجود دارد. تغییرات این اراضی نشان داد که در دوره‌ی زمانی مورد مطالعه، تغییرات همواره روند افزایشی داشته است و تغییرات شدید کاربری در اکوسیستم‌های مرتع، بوته‌زار و اراضی کشاورزی سبب ظهور چشم‌اندازهای بیابانی استان گردیده است.

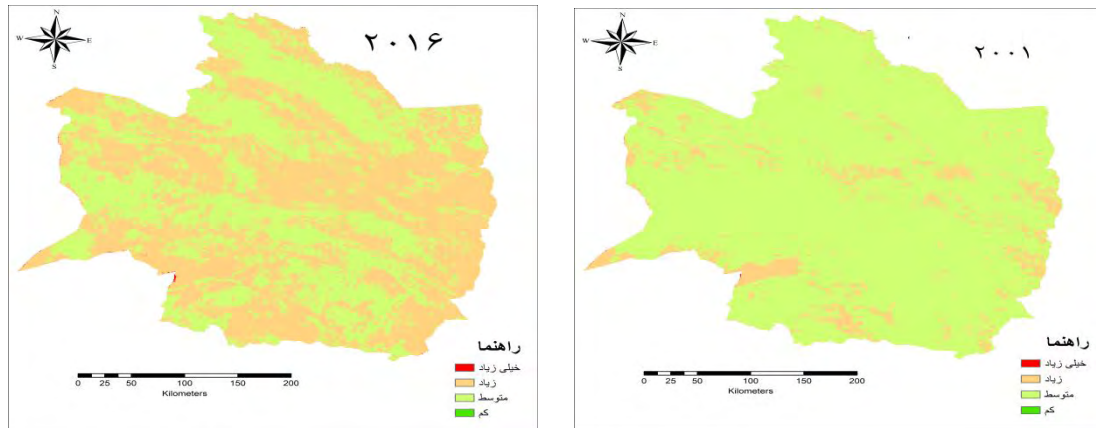
همچنین نتایج حاصل از مقایسه‌ی تصاویر حاوی اطلاعات نقشه‌ی TCI در سال ۲۰۰۱ نشان می‌دهد که بیش‌ترین شاخص TCI در مناطق شمالی استان که البته همین وضعیت در سال ۲۰۱۶ در همین مناطق بیش‌تر است، اما در مقایسه‌ی میزان TCI در سال ۲۰۰۱ بسیار بیش‌تر از سال ۲۰۱۶ است.



شکل ۲: تغییرات مقدار شاخص VCI در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۶



شکل ۳: تغییرات مقدار شاخص TCI در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۶



شکل ۴: تغییرات نقشه آسیب پذیری با استفاده از مدل IDI در سال های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۶

میزان مساحت مربوط به هر کدام از کلاس ها برای میزان پوشش گیاهی و آسیب پذیری به ترتیب در جداول (۳) و (۴) محاسبه و ارائه شده اند.

جدول ۳: مساحت کلاس های VCI در سال های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۶ (کیلومتر مربع)

سال	کلاس (۰-۰/۳۵)	کلاس (۰/۳۵-۰/۵)	کلاس (۰/۵-۱)
۲۰۰۱	۹۸۳۸۱.۲۵	۱۷۷۶۵.۳۵	۳۴۵.۲۷
۲۰۱۶	۷۱۵۵۳.۵	۳۹۹۴۶.۳	۴۹۹۲.۰۷

جدول ۴: مساحت کلاس های ارزیابی آسیب پذیری استان خراسان رضوی بر پایه ی مدل IDI (کیلومتر مربع)

کلاس های IDI	۲۰۰۱	۲۰۱۶
آسیب پذیری کم	۲۱.۴۷	۵۴.۸
آسیب پذیری متوسط	۱۳۰۶۶.۶۷	۵۹۳۶۷.۷۹
آسیب پذیری زیاد	۱۰۳۴۰۰.۱۹	۵۷۰۵۸.۱۸
آسیب پذیری خیلی زیاد	۳.۵۴	۱۱.۲

دقت کلی مدل، دقت تولیدکننده و ضریب کاپای در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵: نتیجه ی ماتریس ضرایب و دقت مدل IDI

مدل IDI	کم	متوسط	شدید	جمع	صحت کاربر	Error of Commission
	کم	۲۶	۶	۳	۳۵	۷۴.۳
متوسط	۹	۱۲۴	۱۶	۱۵۰	۸۲.۷	۱۷.۳
شدید	۷	۱۴	۴۴	۶۵	۶۷.۷	۳۲.۳
جمع	۴۲	۱۴۴	۶۳	۲۵۰		
صحت تولیدکننده	۶۱.۹	۸۶.۱	۶۹.۸		دقت کلی: ۷۸.۶٪ ضریب کاپا: ۰.۷	
Error of Omission	۳۸.۱	۱۳.۹	۳۰.۲			

یافته‌های پژوهش حاضر حاکی از آن است که نتایج حاصل شده از مقایسه‌ی تصاویر حاوی اطلاعات شاخص VCI در سال‌های بررسی شده که در شکل (۲) و جدول (۳) نمایش و ارائه شده‌اند، نشان می‌دهد در سال ۲۰۰۱ و ۲۰۱۶ به ترتیب ۸۴ و ۶۱ درصد از مساحت استان در کلاس با پوشش گیاهی کم در طی فصل رشد قرار دارد، در کلاس متوسط به ترتیب با توجه به سال‌های فوق ۱۵ و ۳۴ درصد است و در کلاس زیاد به ترتیب ۰/۳ و ۳ درصد از مساحت استان را در برمی‌گیرد که این وضعیت نیز با توجه به متوسط بارش سالانه که در جدول (۱) ارائه شده و دمای سطح زمین در سال‌های موردبررسی تأثیر مستقیم را داشته است.

نتایج حاصل از مقایسه‌ی تصاویر حاوی اطلاعات دمای سطح زمین که در شکل (۳) نمایش داده شده، نشان می‌دهد که به‌طور کلی در سال ۲۰۰۱ نسبت به سال ۲۰۱۶ دمای بالاتری در سطح زمین ثبت شده است که این افزایش دما در سال ۲۰۰۱ نتایج حاصل از شاخص‌های پوشش گیاهی، بارش و خشک‌سالی را که در مطالعات سلیمی (۱۳۹۵) و دستورانی (۱۳۹۵) بررسی شده، تأیید می‌کند؛ به‌طوری‌که بارش در سال ۲۰۰۱ نسبت به سال ۲۰۱۶ کم‌تر بوده است و به‌تبع آن خشک‌سالی شدیدتری وجود داشته است.

درنهایت، آنالیز حساسیت‌پذیری با مدل ترکیبی IDI که میزان آسیب‌پذیری سرزمین را در طول یک دوره‌ی زمانی مانیتورینگ و نظارت می‌کند، نشان می‌دهد که روند آسیب‌پذیری و خطر بیابان‌زایی در دوره‌های مختلف، متفاوت است. با توجه به نتایج حاصل از مدل ترکیبی IDI که بیش‌ترین آسیب‌پذیری در سال ۲۰۰۱ مربوط به کلاس آسیب‌پذیری متوسط است که تقریباً ۵۰ درصد از مساحت استان را به خود اختصاص می‌دهد. این روند در سال ۲۰۱۶ تغییراتی را داشته که کلاس متوسط و زیاد به‌طور مساوی هر کدام ۲۲ درصد از مساحت استان را دربر می‌گیرند. بر اساس نتایج تغییرات در کلاس کم در سال ۲۰۰۱ نسبت به سال ۲۰۱۶ تقریباً دو برابر افزایش داشته که نشان از تغییرات شدید در نقاط مختلف استان است؛ بنابراین با توجه به اینکه این مدل تغییرات یک دوره‌ی زمانی را موردبررسی قرار می‌دهد، یکی از دلایل تغییرات مثبت و مناسب، میانگین بالای بارش می‌باشد که باعث غنی شدن پوشش گیاهی نسبت به قبل شده و باعث کم شدن میزان فرسایش و آسیب کم به منطقه گردیده است. البته جنگل‌های دست کاشت در برخی از مناطق استان خصوصاً در ورودی شهرها و گاهی به‌عنوان نوار سبز اطراف شهرها انجام شده که در این روند مثبت تأثیرگذار بوده است.

نتایج حاصل از خواص حرارتی و طیفی، به‌ویژه، TCI و VCI هم مناطق با آسیب‌های مختلف در سطح استان را تأیید می‌کنند که با نتایج مطالعه‌ی سپهر و پرویان (۱۳۹۲) تحت عنوان تهیه‌ی نقشه‌ی آسیب‌پذیری بیابان‌زایی و اولویت‌بندی راهبردهای مقابله در اکوسیستم‌های استان خراسان رضوی بر پایه‌ی الگوریتم نارته‌ای پرامسه، همخوانی دارد.

درمجموع با توجه به توضیحات ارائه‌شده، وسعت زیادی از استان در محدوده‌ی آسیب‌پذیری زیاد قرار دارد، ازجمله دلایل آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- وسعت اقلیم خشک و نیمه‌خشک استان و موقعیت جغرافیایی آن؛
- زمان و مدت بادهای موسمی با سرعت بالا و پی‌درپی در استان ازجمله در شهرستان‌های سرخس، سبزوار، خواف و نیز متأثر بودن از بادهای ۱۲۰ روزه‌ی سیستان؛
- تخریب منابع گیاهی استان که به علت چرای مفرط و مازاد بر ظرفیت و خارج از فصل مراتع، تخریب منابع آب استان که به دلیل افت سفره‌های آب زیرزمینی، کاهش کیفیت منابع آب و افزایش املاح آلوده‌کننده، افزایش آلودگی‌های صنعتی و میکروبی و زه‌دار شدن اراضی در اثر آبیاری غیرصحیح رخ می‌دهد؛
- تخریب منابع خاک استان که به دلایل تغییر کاربری زمین، کاهش حاصلخیزی خاک، کاهش عمق خاک در اثر فرسایش آبی و بادی و عدم رعایت اصول علمی شخم در مزارع اتفاق می‌افتد.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که دقت کلی مدل برای مدل ترکیبی IDI ۷۸/۶ درصد و ضریب کاپای ۰.۷ است. ضریب کاپای ۰.۷ می‌تواند به دلایلی از جمله خطای ابزار اندازه‌گیری، خطای اتمسفری و نیز برداشت درصد زیادی از نقاط در مناطقی که جنگل‌های دست‌کاشت وجود داشته یا از مناطقی که زراعی بوده است، اتفاق افتاده باشد. تخریب و تغییر کاربری‌ها نیز می‌تواند باعث همسویی دو شاخص با پدیده‌ی آسیب‌پذیری باشد. فرآیند آسیب‌پذیری یک فرآیند اکولوژیکی و تحت تأثیر عوامل متعدد اکولوژیکی است و این عوامل به صورت یک متغیر طیفی عمل می‌کنند؛ بنابراین همان‌گونه که انتظار می‌رفت رفتارهای اکولوژیکی بیابان‌زایی بهتر می‌توانند در غالب مدل‌های ترکیبی بررسی و ارزیابی شوند؛ بنابراین مدل‌های ترکیبی با شناسایی رفتار پدیده‌ها و عوامل بیابان‌زایی در سیستم‌ها به خصوص اکوسیستم‌ها فرآیند میزان آسیب‌پذیری را بهتر نشان می‌دهد.

در مطالعه‌ای که توسط سانتینی و همکاران در سال ۲۰۰۹، در ارتباط با ریسک بیابان‌زایی در ساردینای ایتالیا با استفاده از شاخص‌های ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفته بود. شش فاکتور مهم و پیش‌برنده در بیابان‌زایی (چرای بیش از حد دام، پوشش گیاهی، حاصلخیزی خاک، فرسایش آبی، فرسایش بادی، شور شدن آب) در دو دوره‌ی زمانی متفاوت (دو دوره‌ی زمانی گذشته و حال) بررسی شده و در نهایت بر اساس الگوریتم شاخص یکپارچه‌ی (IDI) درجه‌ی ریسک بیابان‌زایی منطقه‌ی مورد مطالعه تعیین گردید که نتایج این مطالعه نشان داد که چرای بیش از حد و فرسایش خاک از مهم‌ترین عوامل موثر در روند بیابان‌زایی در منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشد. در پژوهش حاضر نیز که از مدل IDI برای تعیین درجه‌ی آسیب‌پذیری سرزمین در استان خراسان رضوی بر اساس داده‌های سنجش از دوری و میدانی پوشش گیاهی (VCI) و دمای سطحی زمین (TCI) استفاده گردید، نشان داد که مهم‌ترین و موثرترین شاخص در این مطالعه، شاخص پوشش گیاهی در نظر گرفته شد، لذا در دو تحقیق نتایج نشان می‌دهد که شاخص پوشش گیاهی در فرآیند بیابان‌زایی و آسیب‌پذیری سرزمین نقش مهمی را ایفا می‌کند.

همچنین در تحقیق که توسط پاشایی در سال ۱۳۹۵ در ارتباط با داده‌های دورسنجی برای ارزیابی میزان بیابان‌زایی در خراسان رضوی انجام گرفته است، از شاخص‌های پوشش گیاهی، بارش و شوری خاک جهت ارزیابی استفاده شده که نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که داده‌های دورسنجی بسیار دقیق و قابل اتکا هستند و از مهم‌ترین شاخص‌های تأثیرگذار در این فرآیند، پوشش گیاهی بوده که با نتایج حاصل از تحقیق حاضر همسو بوده و با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد.

در پژوهش حاضر که از الگوریتم IDI برای تعیین درجه‌ی آسیب‌پذیری استان خراسان رضوی به بیابان‌زایی بر اساس داده‌های سنجش‌از‌دور و زمینی از دو شاخص پوشش گیاهی (VCI) و دمای سطح زمین (TCI) استفاده شد. مهم‌ترین و مؤثرترین شاخص در این مطالعه، شاخص VCI بوده است، لذا طبق دستاوردهای تحقیق، تصاویر ماهواره‌ای نقش مهمی در تشخیص ویژگی‌های مناطق و پدیده‌ی بیابان‌زایی دارد. البته تفسیر بصری بر اساس عناصر و ویژگی‌های کلیدی برای تشخیص آسیب‌ها در مناطق خشک بسیار مفید است.

۵- نتیجه‌گیری

آسیب‌پذیری سرزمین عارضه‌ای است که اکثر بیوم‌های مختلف جهان به‌خصوص مناطق خشک و نیمه‌خشک را تهدید می‌کند، لذا برای اینکه بتوانیم تا حدی از خسارات ناشی از این پدیده را به‌ویژه در کشور ایران که بیش از ۷۵ درصد مساحت آن را مناطق خشک و نیمه‌خشک دربرگرفته است، کاهش دهیم، انجام مطالعات و تحقیقات بیش‌تر در این زمینه بسیار حائز اهمیت است. در تحقیق حاضر به دلیل نقص‌ها و یا کوتاه بودن دوره‌های آماری، داده‌های زمینی از فناوری سنجش‌از‌دور به منظور ارزیابی و پایش هر چه دقیق‌تر این پدیده استفاده شد.

نتایج مطالعه‌ی اخیر نشان داد که با توجه به امکان محاسبه‌ی برخی شاخص‌های مؤثر در آسیب‌پذیری در منطقه‌ی مورد مطالعه (شاخص پوشش گیاهی و دمای سطحی زمین) توسط حسگرها و سنجنده‌ی ماهواره‌ها، امکان ارزیابی و محاسبه‌ی آسیب‌پذیری با دقت مکانی بالاتر نسبت به شاخص‌هایی که به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شوند، در این

مناطق وجود دارد. استفاده از این فناوری به دلیل رایگان بودن، دسترسی آسان و دقت بالا موجب کاهش هزینه‌ها می‌شود. همچنین بصری بودن نتایج این فناوری موجب درک بهتر و آسان‌تر شدن بررسی تغییرات زمانی و مکانی پدیده‌ی آسیب‌پذیری مناطق مختلف می‌گردد. لذا با در نظر گرفتن نتایج تحقیق حاضر و پژوهش‌های دیگران در این زمینه بهتر است از این روش در قالب مناطق کشور ایران استفاده شود. همچنین از داده‌های ماهواره‌ای در سایر مدل‌ها نیز استفاده گردد؛ چراکه استفاده مستمر از داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند زمینه‌ساز ایجاد داده‌های مبنایی در سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی برای برنامه‌ریزی و مدیریت مناسب در بخش بیابان در کشور گردد.

همچنین علاوه بر موارد فوق می‌توان نتیجه گرفت که مدل ترکیبی IDI علاوه بر تعیین وسعت و درجه‌ی آسیب‌پذیری بیابان‌زایی، قابلیت بررسی تغییرات مکانی-زمانی در یک دوره‌ی زمانی از گذشته تا حال را به‌طور هم‌زمان داراست.

۶- منابع

- ۱- اختصاصی، محمدرضا، سپهر، عادل (۱۳۹۰). روش‌ها و مدل‌های ارزیابی و تهیه‌ی نقشه‌ی بیابان‌زایی، چاپ اول انتشارات دانشگاه یزد.
- ۲- بنیاد، امیر اسلام، حاجی قادری، طه (۱۳۸۶). تهیه‌ی نقشه‌ی جنگل‌های طبیعی استان زنجان با استفاده از داده‌های سنجنده‌ی ETM+ ماهواره‌ی لندست ۷، مجله‌ی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، دوره‌ی ۱۱، شماره‌ی ۴۲، صص ۶۳۸-۶۲۷.
- ۳- پاشایی، مؤده (۱۳۹۵). ارائه‌ی یک شاخص برای ارزیابی میزان آسیب‌پذیری بیابان‌زایی بر پایه‌ی داده‌های دورسنجی، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد.
- ۴- دستورانی، مصطفی (۱۳۹۵). آنالیز حساسیت‌پذیری خراسان رضوی با رویکرد فازی، پایان‌نامه‌ی دکتری تخصصی.
- ۵- سیلاخوری، اسماعیل (۱۳۹۳). پهنه‌بندی شدت خطر بیابان‌زایی منطقه‌ی مزیان سبزوار از منظر معیار خاک با استفاده از مدل ESAs، مجله‌ی مدیریت بحران، شماره‌ی ششم، صص ۴۴-۳۰.
- ۶- سپهر، عادل، پرویان، ناصر (۱۳۹۰). تهیه‌ی نقشه‌ی آسیب‌پذیری بیابان‌زایی و اولویت‌بندی راهبردهای مقابله در اکوسیستم‌های استان خراسان رضوی بر پایه‌ی الگوریتم نارتبه‌ای پرامسه، مجله‌ی پژوهش‌های دانش زمین، سال دوم، شماره‌ی ۸، صص ۷۱-۵۸.
- ۷- سلیمی‌فرد، مؤده (۱۳۹۳). بررسی خشک‌سالی استان خراسان رضوی بر اساس شاخص ترکیبی SDI و داده‌های سنجنش‌ازدور، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، استاد راهنما: حسین ثنائی‌نژاد، علیرضا فریدحسینی و عادل سپهر، دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۸- علوی‌نیا، حسن، زارعی، مهدی (۱۳۹۹). واکاوی روند تغییرات فرین‌های دما تحت تأثیر سناریوهای آینده به منظور ارزیابی نوسانات اقلیمی (مطالعه‌ی موردی: ایستگاه‌های همدیدی سنندج و سقز)، دوره‌ی ۱۱ شماره‌ی ۴۱، صص ۱۶-۱.
- 9- Kogan, F. N. (2000). A typical pattern of vegetation conditions in southern Africa during ElNino years detected from AVHRR data using three-channel numerical index. *International Journal of Remote Sensing*, 19(3), 3689-3695.
- 10- FAO. (1965). *Erosion by Water* FAO Agriculture Development. Report No. 81, FAO, Rome.
- 11- FAO. (1984). *Provisional methodology for assessment and mapping of desertification*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and United Nation Environment Program. Italy Rome, 84.
- 12- Feoli, E., Giacomich, P., Mignozzi, K., Ozturk, M., Scimone, M. (2003). Monitoring desertification risk with an index integrating climatic and remotely-sensed data an example from the coastal area of Turkey. *Management of Environmental Quality: An International Journal*. 14(1). 10-21.
- 13- Hua, N, P., Kobayashi, F., Iwasaka, Y., Shi, G, Y., Naganuma, T. (2007). Detailed identification of desert-originated bacteria carried by Asian dust storms to Japan, *Aerobiologia*. 23(4), 8-291.

- 14- Han, L., Zhang, Z., Zhang, Q., Wan, X. (2014). Desertification assessments in the Hexi corridor of northern China's Gansu Province by remote sensing. *Journal of Nat Hazards* 75(5). 2715–2731.
- 15- Motroni, A., Canu, S., Bianco, G., Loj, G. (2009). Monitoring Sensitive Areas to Desertification in Sardinia: the Contribute of The Regional Agro meteorological Service. *Journal of Springer Science*. 10(4).117-135.
- 16- Park, S., Kim, J., Lee, S., Kim, J. S., Chang, L.S., Ou, S. (2014). Combined dust detection algorithm by using MODIS infrared channels over East Asia. *Remote Sensing of Environment*. 141(16). 24-39.
- 17- Salvati, L., De Angelis, A., Bajocco, S., Ferrara, A., Barone, P. (2015). Desertification Risk, Long-Term Land- Use Changes and Environmental Resilience: A Case Study in Basilicata, Italy. *Scottish Geographical Journal*. 129(2). 85–99.
- 18- Salvati, L., Zitti, M., Ceccarelli, T., Perini, L. (2009). Developing a Synthetic Index of Land Vulnerability to Drought and Desertification. *Journal of Geographical Research*. 47(3). 280–291.
- 19- Santini, M., Caccamo, G., Laurenti, A., Noce, S. & Valentini, R. (2010). A multi-component GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index. *Applied Geography*, 30 (3), 394-415.
- 20- UNCOD. (1978). United Nations Conference on Desertification. 29 Aug-9 Sept, (1977). Round-up, plan of action and resolution. UNCOD- UNEP, New York, EUA. 43.
- 21- Unganai, L. S., Kogan, F. N. (1998). Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*. 63 (3). 219-232.
- 22- Lu, D., Mausel, P., Brondi, Z. E. Moran, E. (2004). Change detection techniques. *INT. J. Remote Sensing*. 25(12). 2365-2407.
- 23- Ghiami-Shamami, F., Sabziparvar, A. Shinoda, S. (2019) Long-term comparison of the climate extremes variability in different climate types located in coastal and inland regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 136(4). 875–897.