



Gonbad Kavous University
Journal of Plant
Ecosystem Conservation
Volume 12, Issu 25
<http://pec.gonbad.ac.ir>

Investigation and Prediction of Vegetation Cover Variations in the Geomorphic Units of the Northern Desert Zone of Isfahan Province

Jafar Ganjali*, Amirhossein Halabian², Amir Karam³, Shila Hajehforoshnia⁴

¹ Assistant Professor, Department of Geography, Payame Noor University, Tehran, Iran

² Associate professor, Department of Geography, Payame Noor University, Tehran, Iran

³ Associate professor, Physical Geography Department, Kharazmi University, Tehran, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Natural Resources Research, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Tehran, Iran

Received: 2023/11/28; Accepted: 2024/11/11

Abstract

The analysis of vegetation cover variations serves as a key index for identifying the heterogeneity of landforms and biodiversity and determining important areas for protecting this fundamental environmental component. This research examines changes in vegetation cover within the landforms of the northern desert zone of Isfahan Province using Landsat 5 and 8 digital data (TM and OLI-TIRS sensors) from 1987 to 2020. During this period, 200 images were acquired over 27 warm months (June 1st to August 31st annually). First, necessary preprocessing was applied to the study area images. After landform classification using the Topographic Position Index (TPI), vegetation cover changes in these landforms were examined. The findings revealed that the highest Enhanced Vegetation Index (EVI) values were associated with prominent landforms, mountains, and highlands, while the lowest values were observed in flat terrains (playas, mud, and clay pans). Changes in EVI at varying elevations indicated a noticeable decrease in EVI values at an altitude of 1400 m (middle pediments). In contrast, EVI values in mountainous regions (elevations exceeding 1400 m) displayed a significant increase. The EVI index on slopes steeper than 65° exhibited a marked decline due to the presence of rocky and steep terrain. Spatial patterns of the EVI index for the year 2030 suggest that the Karkas Mountains, particularly from Mount Karkas to Mount Marshan and the areas between Kashan and Ardistan, will encounter severe environmental conditions.

Keywords: Enhanced Vegetation Index (EVI), Topographic position index (TPI), Physiographic factors, Landform, Landsat images

*Corresponding author: j_ganjali@pnu.ac.ir



دانشگاه گنبد کاووس

نشریه "حفاظت زیست بوم گیاهان"

دوره دوازدهم، شماره بیست و پنجم

<http://pec.gonbad.ac.ir>

علمی-پژوهشی

واکاوی و پیش‌بینی وردش‌های پوشش گیاهی در واحدهای ژئومورفیک پهنه بیابانی شمال استان اصفهان

جعفر گنجعلی^۱، امیرحسین حلبیان^۲، امیر کرم^۳، شیلا حجه‌فروش‌نیا^۴

^۱استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

^۲دانشیار، گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

^۳دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه خوارزمی تهران

^۴استادیار، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۲۱

چکیده

واکاوی وردش‌های پوشش گیاهی، نمایه‌ای برای شناسایی ناهمگونی سیمای سرزمینی، تنوع زیستی و تعیین فضاهای دارای اهمیت به‌منظور حفاظت از این مؤلفه اساسی محیطی است. این پژوهش بر آن است که به تحلیل تغییرات پوشش گیاهی در لندفرم‌های پهنه بیابانی شمال استان اصفهان به کمک داده‌های رقومی لندست ۵ و ۸ (سنجنده‌های TM و OLI-TIRS) در دوره ۲۰۲۰-۱۹۸۷ پردازد. از این‌رو، در این بازه زمانی ۲۰۰ تصویر در ۲۷ ماه گرم سال (مطابق با اول ژوئن تا پایان آگوست، مصادف با اوایل خرداد تا اوایل شهریور) دریافت شد. ابتدا، پیش‌پردازش‌های لازم بر روی تصاویر قلمرو مطالعاتی اعمال و پس از طبقه‌بندی لندفرم‌ها به کمک شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، تغییرات پوشش گیاهی در این لندفرم‌ها بررسی شد. یافته‌ها نشان داد که بیشترین مقادیر EVI متعلق به لندفرم برآمدگی‌ها، کوه‌ها و ارتفاعات و کمترین مقادیر از آن لندفرم دشت‌های هموار (پلایاها، کفه‌های گلی و رسی) است. تغییرات شاخص EVI در ترازهای ارتفاعی نشانگر این است که در ارتفاع ۱۴۰۰ متری (خاستگاه دشت‌سرای میانی) مقادیر EVI کاهش قابل‌ملاحظه‌ای یافته است. این در حالی است که مقادیر EVI در واحد کوهستان (عوارض بیش از ۱۴۰۰ متر) افزایش آشکاری را نشان می‌دهد. شاخص EVI در شیب‌های بیش از ۶۵ درجه به سبب وجود اراضی سنگلاخی و صخره‌ای مرتفع از روند کاهشی شدیدی برخوردار است. وردش‌های مکانی شاخص EVI برای سال ۲۰۳۰ حکایت از این دارد که کوهستان کرکس خصوصاً از کرکس به سوی ارتفاعات مارشان و مناطق بین کاشان-اردستان با شرایط ناگوار و حادی مواجه خواهد شد.

واژگان کلیدی: شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته (EVI)، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، عوامل فیزیوگرافی، لندفرم، تصاویر لندست

مقدمه

آشکارسازی، پایش و پیش‌بینی تغییرات ناشی از عوامل طبیعی و انسانی در چنین اکوسیستمی از اهمیت وافر و برخوردار است (Pettorelli et al., 2005). پایش کمی و کیفی پوشش گیاهی از جمله کاربردهای بزرگ دانش سنجش از دور است. این تکنیک به‌دلیل ارائه اطلاعات به‌روز، پوشش‌های مکرر، اندازه‌گیری در محدوده‌های طیفی مختلف و اندازه‌گیری‌های رقومی پدیده‌های سطح زمین از جمله پوشش گیاهی بسیار مهم است. شاخص‌های گیاهی به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای ابزار ساده و مفیدی برای

اطلاعات جامع پوشش گیاهی و پوشش زمین، یکی از پیش‌شرط‌های لازم برای بررسی منابع زمین، مدیریت و آمایش سرزمینی و همچنین پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و ارزیابی زیست‌محیطی است. پایش تغییرات پوشش گیاهی و آشکارسازی این تغییرات، اولین مرحله در شناخت نیروهای محرک و ارزیابی مکانیسم تغییرات سرزمین است (عباس‌زاده تهرانی و صابری، ۱۳۹۲). به بیان دیگر،

*نویسنده مسئول: j_ganjali@pnu.ac.ir

(al., 1998) با استفاده از داده‌های لندست در سه تاریخ مختلف به این نتیجه رسیدند که در میان روش‌های تعیین شاخص پوشش گیاهی شاخص NDVI یکی از بهترین روش‌ها است. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2003) با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS در شمال شرقی ایالات متحده نشان داد که اندازه‌گیری‌های دقیق از پویایی گیاهان منطقه‌ای برای بهبود مدل‌ها و درک تغییرات سالانه در مبادله کربن اکوسیستم زمین و تعاملات آب و هوا و بیوسفر بسیار مفید است. وائوگن و همکاران (Vaogen et al., 2006) اراضی مرتفع جنگل ماداگاسکار را با استفاده از تصاویر سنجنده‌های MSS، TM لندست و شاخص NDVI و با روش حداکثر احتمال طبقه‌بندی و صحت نقشه‌ها را بین ۰/۹۷-۰/۸۱ به دست آوردند. درویش و فاوور (Darwish & Faour, 2008) درخصوص بررسی علل تخریب مراتع لبنان از شاخص NDVI استفاده کردند و نشان دادند که وسعت مراتع از ۲۹۵۸۱ هکتار به ۲۵۰۰۰ هکتار کاهش یافته است. وربسلت و همکاران (et al., 2010) Verbesselt) ضمن استفاده از سری‌های زمانی تصاویر ماهواره‌ای و روش BFAST در جنوب شرقی استرالیا دریافتند که این روش برای تحلیل روند تغییرات فصلی NDVI مناسب و برای بررسی تغییرات ناگهانی مانند آتش‌سوزی قابل استفاده است. وندرپست و همکاران، (Vanderpost et al., 2011) با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای لندست دریافتند که فعالیت‌های انسانی و عوامل اقلیمی مسبب تخریب مراتع نیمه‌خشک بوتسوانا بوده است. راوت و همکاران (Rawat et al., 2013) با استفاده از روش‌های دورسنجی و شاخص‌های NDBI، NDVI و NDWI به بررسی تغییرات پوشش اراضی در شهر رم‌نگر در ایالت اوتاراکنند هند پرداختند. نتایج نشان داد که در طول دو دهه گذشته، منطقه انسان‌ساخت و نوار شن و ماسه در شهر رم‌نگر به ترتیب در حدود ۰/۸۸٪ و ۰/۳۹٪ افزایش، در مقابل، سایر کاربری‌های پوشش گیاهی، اراضی کشاورزی و آب به ترتیب ۰/۴۱٪، ۰/۶۹٪ و ۰/۲۷۶٪ کاهش یافته است. اردو و همکاران (Ardö et al., 2017) با بهره‌گیری از شاخص EVI حاصل از سنجنده مادیس ترا نشان دادند که تغییر معناداری در مقادیر تولید خالص اولیه (NPP) در منطقه ساحل آفریقا روی نداده است. فنگ و همکاران (Fang et al., 2018) با استفاده از تصاویر MODIS و روش BFAST: به شناسایی پویایی گیاهان در کبک کانادا

تخمین پوشش گیاهی، تولید مثل و تغییرات رشد هستند (Heydari Alamdarloo et al., 2024). در اکوسیستم طبیعی شناخت ویژگی‌های پوشش گیاهی و روابط موجود در بین میزان پوشش گیاهی و لندفرم‌ها همواره در کانون توجه بوم‌شناسان بوده است (Depew, 2004; Magee et al., 2008). پوشش گیاهی یکی از شاخص‌های مهم برای بررسی پدیده‌های مختلفی همچون: خشک‌سالی، بیابان‌زایی تراز مصرف آب، تغییرات لندفرم‌ها و غیره محسوب می‌شود و به‌وسیله آن می‌توان اطلاعات مهم و ضروری برای بررسی و توصیف سیستم‌های مختلف منابع طبیعی را به دست آورد. بررسی و پایش وضعیت پوشش گیاهی با فواصل زمانی و مکانی منظم و یکپارچه از طریق عملیات صحرایی معمولاً دشوار است. از این‌رو، فناوری سنجش از دور به سبب ویژگی‌هایی نظیر امکان دید وسیع و یکپارچه از یک پهنه جغرافیایی، قابلیت تکرارپذیری، دستیابی آسان به داده‌ها، دقت زیاد داده‌ها و صرفه‌جویی در زمان برای واکاوی پوشش گیاهی و تغییرات آن نسبت به سایر روش‌ها برتری آشکاری دارد (Huete, 2002).

کشور ایران با قرارگیری در کمربند بیابانی نیمکره شمالی در قلمرو مناطق خشک جهان قرار دارد. از طرف دیگر استان اصفهان با قرارگیری در بخش مرکزی فلات ایران، یکی از استان‌های خشک ایران محسوب می‌شود. پهنه شمالی استان اصفهان به سبب خشکی و میزان تبخیر و تعرق بسیار زیاد و بارش کم، با فقر پوشش گیاهی در گستره‌های مختلف مواجه است که این موضوع نیاز به پژوهش حاضر را ایجاب می‌کند. از آن جایی که ماهیت، قلمرو و پراکندگی مکانی- زمانی پوشش گیاهی در هر منطقه‌ای باید مورد بررسی و تحلیل دقیق قرار گیرد؛ بنابراین استفاده از داده‌های رقومی ماهواره‌ای نظیر لندست برای برآورد منطقه‌ای پوشش گیاهی و مقایسه این مولفه ارزشمند محیطی در لندفرم‌های گوناگون پهنه مورد مطالعه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

در این زمینه، بعضی از محققان به‌منظور بررسی پوشش گیاهی از داده‌های ماهواره‌ای استفاده کرده‌اند. از جمله: یورکز و همکاران (Yorks et al., 1992) با واکاوی تفاوت‌های پوشش گیاهی بین سال‌های ۱۹۳۳-۱۹۱۹ در بوته‌زارهای جنوب غربی پایه‌والی ایالت یوتای آمریکا به این نتیجه رسیدند که مهمترین عامل بهبود شرایط این مراتع تعدیل چرای دام بوده است. لیون و همکاران (Lyon et

پرداختند. نتایج نشان داد که ۲۵/۷٪ از این منطقه تغییرات روند NDVI را با یک یا چند وقفه در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ تجربه کرده است. چن و همکاران (Chen et al., 2020) به ارزیابی اثرات توپوگرافی بر روی شاخص‌های پوشش گیاهی پرداختند. یافته‌ها نشان داد که اثرات توپوگرافی را می‌توان برای NDVI نادیده گرفت، درحالی‌که آنها به شدت بر EVI، SAVI و NIRv تأثیر می‌گذارند. پوری (Puri, 2023) حین بررسی کاربری زمین، الگوی زمانی- مکانی EVI را در هفت ایالت در شمال شرقی هند بررسی کرد. نتایج نشان داد که تغییر خاصی در پوشش زمین مشاهده نمی‌شود، اما روند EVI چندان رضایت‌بخش نیست.

در ایران، محمدباری و همکاران (۱۳۹۳) برای نمایش تغییرات فضایی زمانی پوشش گیاهی شهرستان بهبهان از داده‌های لندست سنجنده‌های ETM+ و OLI در دو سال ۱۳۷۸ و ۱۳۹۲ استفاده و مقدار شاخص NDVI برای دو سال محاسبه کردند. نتایج نشان داد تغییرات کمی و کیفی پوشش گیاهی در طی ۱۴ سال برای منطقه مورد مطالعه گسترده بوده است؛ به‌طوری‌که اراضی با پوشش عالی، بسیار خوب و ضعیف افزایش مساحت و اراضی با پوشش خوب کاهش مساحت داشته است. فرج‌زاده و کاوسی (۱۳۹۳) با استفاده از ترکیب‌های NDVI سنجنده مادیس دریافتند که در سرشاخه‌های دجله و فرات و حاشیه این دو رودخانه در سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۰۱ تغییرات پوشش گیاهی به سبب کاهش نزولات جوی در حوضه‌های این رودخانه‌ها و آب‌دهی آنها قابل توجه بوده است. یافته‌های ناطقی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از داده‌های سنجنده‌های ETM+ و OLI ماهواره لندست به ارزیابی شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI، SAVI، RVI و WVI در جزیره قشم پرداختند. نتایج نشان داد شاخص SAVI با بیشترین ضریب کاپا ۰/۹۳ درصد در سال ۱۳۹۳ و ۰/۸۳ درصد در سال ۱۳۸۰ بهترین عملکرد و شاخص WVI با کمترین ضریب کاپا ۰/۸۱ درصد در سال ۱۳۸۰ و ۰/۴۳ درصد در سال ۱۳۹۳ ضعیف‌ترین نتایج را در بین شاخص‌ها داشته است. یافته‌های پردل و همکاران (۱۳۹۶) نشان از ارتباط قوی شاخص‌های گیاهی حاصل از لندست ۸ با تاج پوشش سبز و تولید گیاهی دارد. نیک‌پور و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از داده‌های Terra-MODIS در دوره ۲۰۱۶-۲۰۰۰ نشان دادند که کانون بیشترین روند شیب

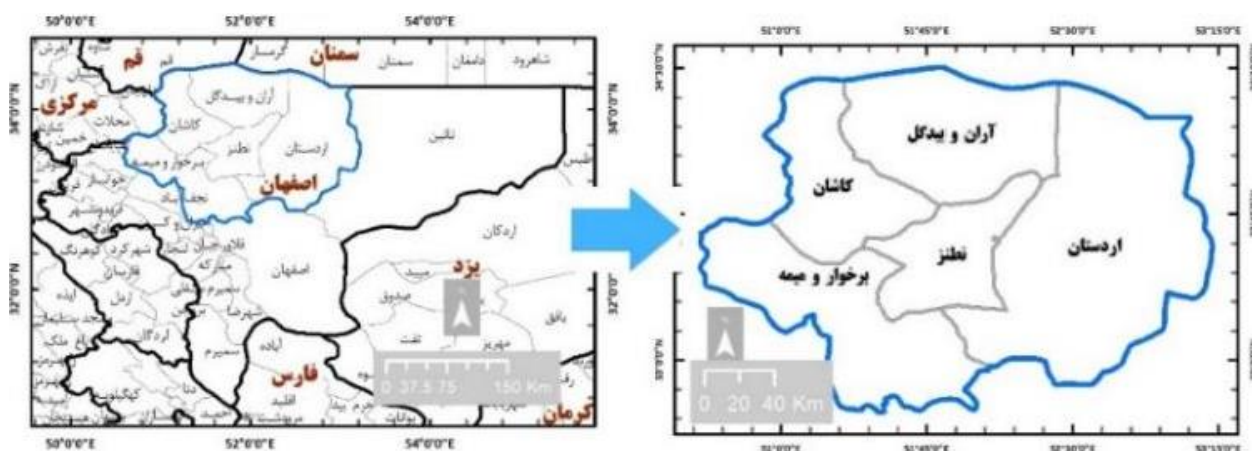
تغییرات منفی در شاخص NDVI در نیمه غربی ایلام و کانون بیشترین روند شیب تغییرات مثبت در این شاخص در مرکز و شرق این استان است. صابرفر و همکاران (۱۳۹۷) به تحلیل تغییرات شاخص‌های پوشش گیاهی در سنجنده‌های لندست در ارس‌زارهای شرق پارک ملی گلستان و منطقه حفاظت شده قرخود پرداختند. نتایج نشان از برتری NDVI نسبت به دو شاخص SAVI و EVI بر اساس ضریب کاپای به‌دست‌آمده و در عین حال کاهش قابل توجه ارس‌زارهای منطقه و تبدیل آن اراضی مرتعی و بایر داشت. فیروزی و همکاران (۱۳۹۷) ضمن تحلیل حساسیت دو شاخص پوشش گیاهی NDVI و EVI حاصل از تصاویر سنجنده مادیس به خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها در دشت سیستان دریافتند که NDVI شاخص بسیار مناسب‌تری برای پویایی پوشش گیاهی در این دشت است. میراحسنی و همکاران (۱۳۹۸) ضمن ارزیابی روند تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از شاخص NDVI سنجنده MODIS در حوضه آبخیز گاوخونی به این نتیجه رسیدند که در سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۳ مناطق شمال، جنوب و غرب حوضه که دارای پوشش گیاهی و توان زیاد تنوع گونه‌ای بوده‌اند و نیز مناطق با کاربری کشت آبی با روند کاهشی روبرو شده و زمین‌های شور و لخت در حوضه افزایش و زمین‌های کشاورزی به طور چشمگیری کاهش یافته است. بهرنگ‌منش و همکاران (۱۳۹۸) با کمی‌سازی روند تغییرات پوشش گیاهی در استان فارس به این نتیجه رسیدند که بیشتر تغییرات پوشش گیاهی در آینده مخالف با تغییراتی است که در گذشته اتفاق افتاده است و روند تغییرات به گونه‌ای است که رشد گیاه در مناطق کوهستانی به‌طور مداوم با نرخ بالاتر از مناطق دشت بهبود می‌یابد. قنبری مطلق و امرایی (۱۳۹۹) با مدل‌سازی رابطه تغییرات پوشش گیاهی بر اساس شاخص گیاهی بارزسازی شده (EVI) سنجنده MODIS و پاسخ آن به دمای سطح زمین و بارش در استان مازندران دریافتند که در بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۰۰ متوسط شاخص سبزیگی استان روند افزایشی در طول داشته، در حالی که عرصه‌های جنگلی استان روند کاهشی داشته‌اند. عارفیان و همکاران (۱۳۹۹) با بررسی ارتباط بین NDVI و SPI در لرستان به این نتیجه رسیدند که تصاویر ماهواره MODIS می‌تواند برای پایش خشکسالی در مناطق کوهستانی مورد استفاده قرار گیرد و یافته‌های حاصل از آن برای اقدامات مدیریتی به کار گرفته شود.

دیگر، پژوهش حاضر، پژوهشی میان‌رشته‌ای و ترکیبی است که با یک رویکرد ژئوبوتانیک به دنبال بررسی الگوهای افقی و قائم انتشار، پراکندگی و تغییرات پوشش گیاهی در عرصه واحدهای ژئومورفیک پهنه مطالعاتی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شمال استان اصفهان قرار گرفته است (شکل ۱). این منطقه از نظر تقسیمات زمین‌شناسی و زمین‌ساختی در زون مرکزی ایران و زیر زون سه‌پند-بزمان یا ارومیه-دختر قرار گرفته است (درویش‌زاده و محمدی، ۱۳۸۶). بر اساس مدل آشکارساز تغییرات اقلیمی (IRIMO Climate) محدوده مطالعاتی دارای اقلیم خشک و فراخشک است و دارای متوسط بارش بین ۱۲۹ تا ۱۸۸ میلیمتر و متوسط بلندمدت سالانه دما بین ۱۴/۴ تا ۲۰/۵ درجه سانتیگراد بر اساس داده‌های بلندمدت ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه است (اداره تحقیقات هواشناسی کاربردی اصفهان، ۱۳۹۹).



شکل ۱ - منطقه مورد مطالعه

به کمک اپراتور میانگین، تلفیق گردید و برای هر سال یک تصویر شاخص برگزیده شد. مجموع کل تصاویر لندست مورد بررسی، شامل ۲۰۰ تصویر در ۲۷ ماه، مربوط به ۹ سال انتخابی در دوره زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۰ در ۴ سین است که اطلاعات آن در جدول (۱) نمایش داده شده است. در عین حال، سازمان اکتشافات فضایی ژاپن، مجموعه داده مدل عددی سطحی (DSM) را ارائه نمود که دارای توان تفکیک فضایی تقریباً ۳۰ متری است. این مجموعه داده AW3D30 در تحقیقات علمی و آموزش و طراحی

حجازی‌زاده و سنبلی (۱۴۰۱) ضمن بررسی تغییرات شاخص پوشش گیاهی در شهرستان ملارد دریافتند که در ماه‌های می، ژوئن، ژوئیه و اوت روند کاهشی در درصد مساحت مقادیر NDVI به میزان ۰/۰۳- تا ۰/۹- در ماه وجود داشته است. زارع خورمیزی و غفاریان مالمیری (۱۴۰۲) تغییرات پوشش گیاهی را در مراتع جنوب استان یزد بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که بیشترین و کمترین میزان درصد پوشش گیاهی به ترتیب مربوط به سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۱ و با میانگین ۱۴/۶ و ۹/۲ درصد بوده است. با توجه به پیشینه فوق و این موضوع که تحلیل الگوهای پراکندگی پوشش گیاهی در فضاها مورفولوژیک بر پایه مؤلفه‌های قائم چندان دنبال نشده است، این پژوهش تغییرات پوشش گیاهی و الگوهای مکانی-زمانی آن را در قلمرو شمال استان اصفهان بررسی می‌کند و در ادامه، تغییرات این نمایه مهم محیطی را در لندفرم‌های مختلف منطقه در ترازهای مختلف ارتفاعی مورد واکاوی قرار می‌دهد. نوآوری این پژوهش را می‌توان در ساختار ترکیبی، تلفیقی و میان‌رشته‌ای بودن آن جست‌وجو کرد. به عبارت

داده‌ها و روش پژوهش

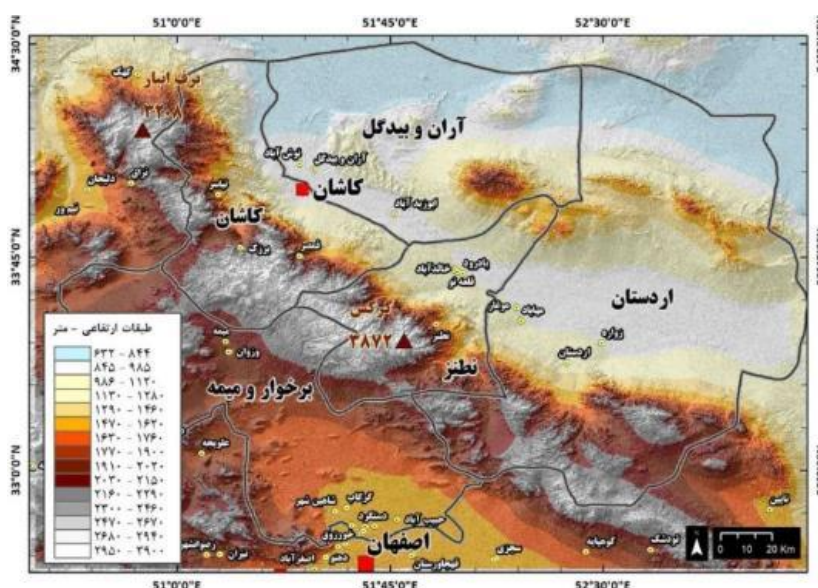
داده‌های دورسنجی مورد استفاده در این پژوهش از تارنمای <https://glovis.usgs.gov> گرفته شده است. این تصاویر در ۴ بازدید متعلق به ماه‌های گرم سال از اول ژوئن تا آخر آگوست (معادل اوایل خرداد تا اوایل شهریور) است. تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ در هر چهار بازدید مربوط به دوره زمانی ۱۱ خرداد تا ۹ شهریور با دوره‌های زمانی ۱۶ روزه دریافت شد (جدول ۱). تمامی تصاویری که از نظر پوشش ابر و شرایط جوی در وضعیت مناسب قرار داشت، با یکدیگر

که به لحاظ کیفی و شرایط جوی نظیر غبار آلودگی و ابرناکی شدید، نامناسب بودند از کار کنار گذاشته شد. در مرحله بعد، تصحیحات اتمسفری و هندسی بررسی و در صورت نیاز اعمال گردید و سپس ارزش رقومی یا DN تصاویر به معادل تشعشعی یا Radiance تبدیل شده و در ادامه ۴ سین تصویر پوشش دهنده منطقه مورد بررسی، با یکدیگر موزائیک و سپس ترکیب باند شد. بر اساس لایه نهایی به دست آمده، شاخص مورد نظر برآورد و نقشه‌های مربوطه بر این اساس ترسیم گردید.

سرویس‌های جدید اطلاعات مکانی می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار بگیرد (Takaku et al., 2014). این مجموعه داده، مدل عددی سطحی (DSM) با توان تفکیک افقی تقریباً ۳۰ متر (در اصل ۱ ثانیه قوسی) است که به وسیله ابزار سنجش از دوری پانکروماتیک برای تصویرسازی استریو به دست آمده است. PRISM یک سنسور نوری است که بر روی ماهواره پیشرفته مشاهده زمین (ALOS) قرار گرفته است. آخرین ورژن ۳/۱ است. مدیریت و آماده‌سازی پایگاه داده بر اساس زبان پایتون انجام شد. داده‌های خام با فرمت tif به ASCII تبدیل و پردازش شد. سپس تصاویری

جدول ۱ - تاریخ تصاویر ماهواره لندست مورد استفاده

شماره تصویر	سال میلادی	سنجنده	ماهواره
	۱۹۸۷		
	۱۹۹۱		
۱۶۳۰۳۶	۱۹۹۵	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5
۱۶۳۰۳۷	۱۹۹۹		
۱۶۴۰۳۶	۲۰۰۲		
۱۶۴۰۳۷	۲۰۰۸		
	۲۰۱۳	OLI-TIRS	Landsat 8
	۲۰۱۶		
	۲۰۲۰		



شکل ۲ - نقشه طبقات ارتفاعی منطقه مطالعاتی

رقومی ارتفاعی با گام‌های ارتفاعی ۱۰۰ متری با بهره‌گیری از الگوی پردازش رستری سلول به سلول انجام گرفت. لایه

الگوی تغییرات و پراکندگی فضایی نمایه پوشش گیاهی در باندهای متفاوت ارتفاعی (شکل ۲) حاصل از مدل

شیب هورن، نقشه شیب تهیه شد (شکل ۴). رابطه (۱) و (۲) شیب را در جهت ستونی و سطری با روش هورن محاسبه می‌کند (Horn, 1981).

شیب از مدل رقومی ارتفاعی به کمک الگوریتم برآورد شیب هورن حاصل شد و در ادامه، در گام‌های ۱ درجه‌ای تغییرات نمایه پوشش گیاهی تحلیل شد. بر اساس پنجره متحرکی با ابعاد 3×3 پیکسل (شکل ۳)، و با استفاده از الگوریتم

Z_5	Z_2	Z_6
Z_1	Z_0	Z_3
Z_8	Z_4	Z_7

شکل ۳- پنجره متحرک 3×3 پیکسلی برای برآورد شیب در ساختار رستری (مدل رقومی ارتفاعی)

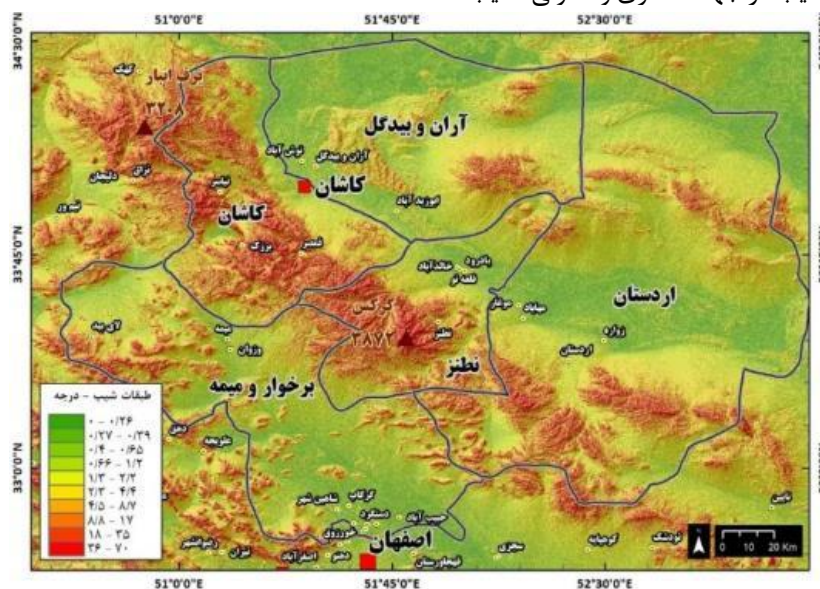
کلی با استفاده از رابطه (۳) بدست آمد.

$$\text{رابطه ۳} \quad \text{Slope} = \tan \alpha = \sqrt{\text{Slope}_{\text{row}}^2 + \text{Slope}_{\text{column}}^2}$$

$$\text{رابطه ۱} \quad \text{Slope}_{we} = \frac{(Z_7 + 2Z_3 + Z_6) - (Z_8 + 2Z_1 + Z_5)}{8 \times d}$$

$$\text{رابطه ۲} \quad \text{Slope}_{sn} = \frac{(Z_6 + 2Z_2 + Z_5) - (Z_7 + 2Z_4 + Z_8)}{8 \times d}$$

بعد از محاسبه شیب در جهت سطری و ستونی، شیب



شکل ۴- نقشه شیب منطقه مطالعاتی

بین ارتفاع در نقطه مرکزی با متوسط یاخته‌های مجاور است که با تبیین یک شعاع مجاورت می‌توان درجه جنرالیزاسیون را بر روی آن اعمال نمود (Wilson & Gallant, 2001; Weiss, 2001). روابط شماره ۴ و ۵ روش برآورد TPI را نشان می‌دهد. شاخص TPI بر اساس روش تحلیل پنجره متحرک حاصل شد.

$$\text{رابطه ۴} \quad \bar{Z} = \frac{1}{n_R} \sum_{i \in R} Z_i$$

$$\text{رابطه ۵} \quad \text{TPI} = Z_0 - \bar{Z}$$

در این پژوهش شاخص TPI برآورد و بین ۰ تا ۱۰۰ نرمال‌سازی شد؛ بدین صورت که ۱۰۰ قله و برجستگی‌ها و ۰ چاله‌ها و فرورفتگی‌ها را نشان می‌دهد. با بهره‌گیری از شاخص توپوگرافیک TPI به‌دست‌آمده از مدل رقومی

شاخص موقعیت توپوگرافی TPI

این شاخص ابتدا توسط گوئیسن و همکاران (Guisan et al., 1999) مطرح گردید و سپس توسط ویس (Weiss, 2001) و جنیس (Jenness, 2006) گسترش داده شد. این شاخص موقعیت توپوگرافیک ارتفاع هر سلول با میانگین هشت سلول همسایه را در مدل رقومی ارتفاعی مقایسه و از این روش TPI را برآورد می‌کند. مقادیر مثبت TPI نشانگر نواحی برآمده‌ای است که از ارتفاع میانگین اطرافش مرتفع‌تر و مقادیر منفی نشانگر چاله‌ها، دره‌ها، فرورفتگی‌ها یا شیاری است که از متوسط ارتفاع مجاورش پست‌تر است. مقادیر نزدیک به صفر نواحی مسطح را نمایندگی می‌کند (Reu et al., 2013). شاخص TPI در واقع تفاضل

ارتفاعی، واحدهای لندفرمی منطقه: طبقه دشت‌های هموار، دشت‌سر انتهایی، دشت‌سر میانی، دشت‌سر بالایی و طبقه برآمدگی و کوهها و ارتفاعات بر مبنای آستانه‌های نظارت شده و کنترل زمینی، شناسایی و طبقه‌بندی شد.

شاخص EVI^۱

این نمایه در واقع همان شاخص VI بهینه شده است. در این شاخص اثرات پخش اتمسفر حذف یا تعدیل می‌شود که می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود. استفاده از باند آبی در این شاخص باعث می‌شود که اثر خاک پس زمینه تعدیل شود و آثار عوامل جوی (مثل پخش آئروسول‌ها) در آن کاسته شود. در این نمایه NIR باند مادون قرمز نزدیک (باند ۴ در لندست ۵ و باند ۵ در لندست ۸)، RED باند قرمز (باند ۳ در لندست ۵ و باند ۴ در لندست ۸) و Blue باند آبی (باند ۱ در لندست ۵ و باند ۲ در لندست ۸) است. رابطه ۶

$$EVI = 2.5 \times \frac{(NIR - Red)}{(NIR + 6 \times Red - 7.5 \times blue + 1)}$$

شاخص پوشش گیاهی EVI در ارتباط با سنجه‌های توپوگرافیکی ارتفاع و شیب و در واحدهای لندفرمی واکاوی و الگوی تغییرات، روند و توزیع جغرافیایی نمایه EVI در قلمرو مطالعاتی بررسی شد. در ادامه، بر مبنای روش بازآرایی شبکه‌ای ۲ میانجیابی دوسویه ۳، نمایه پوشش گیاهی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و مولفه‌های توپوگرافیکی برگرفته از مدل رقومی ارتفاعی با یکدیگر به لحاظ هندسه رستری تطبیق شد.

مدل رگرسیون خطی

برای پیش‌بینی تغییرات شاخص EVI به همراه جهت و شدت تغییرات از مدل رگرسیون خطی مکانی در یک ساختار نظیر به نظیر سلولی به منظور بررسی وضعیت پوشش گیاهی در سال ۲۰۳۰ استفاده شد. مدل رگرسیون خطی ساده یک روش ریاضی برای بیان رابطه آماری ساده بین دو متغیر همبسته X و Y است. خط رگرسیون خطی است که با بهترین برازش از میان مجموعه نقاط پراکندگی نگار می‌گذرد. معادله برازش خط به صورت زیر است:

$$\hat{y}_i = a + bx_i \quad \text{رابطه ۷}$$

$\hat{Y}$ مختصات خط به ازای Xهای مختلف است. قسمت $a + bx_i$ مولفه قطعی در این مدل است. در این معادله a عرض از مبدا است که نشانگر نقطه آغاز ارتباط دو متغیر و در پراکندگی نگار محل قطع شدن محور Y به وسیله خط برازش است. b شیب خط حاصل از معادله و تانژانت زاویه خط وایازی و محور افقی (X) است. این مقدار گویای میزان تغییر در متغیر Y به ازای یک واحد تغییر در متغیر X است. شیب مثبت ($b > 0$) نشانگر رابطه مستقیم دو متغیر (X و Y) است. شیب منفی ($b < 0$) بیانگر رابطه معکوس دو متغیر است. $b = 0$ نیز نشان می‌دهد Y به تغییرات X پاسخ نمی‌دهد. برای برآورد پارامترهای a و b می‌توان از روش‌های کمترین مربعات خطا، کمترین قدرمطلق انحراف‌ها و روش‌های ناپارامتری بهره گرفت. روش کمترین مربعات خطا، خطی را بر داده‌ها برازش می‌دهد که مجموع مربع خطاها را به حداقل ممکن می‌رساند. یکی از روش‌های برآورد شیب خط عبارت است از:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{رابطه ۸}$$

با داشتن شیب خط، می‌توان عرض از مبدا را نیز از طریق رابطه (۹) به دست آورد:

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad \text{رابطه ۹}$$

نتایج

شناسایی واحدهای فرمی اصلی در منطقه مورد بررسی براساس نتایج شاخص TPI و بر مبنای طبقه‌بندی نظارت‌شده با آستانه‌های کنترل زمینی صورت گرفته است. برای کنترل نتایج و آستانه‌های تقسیم‌بندی اراضی به واحدهای فرم‌شناسی از منابع داده مدل رقومی ارتفاعی مانند مدل سایه-روشن، نقشه شیب و نقشه‌های توپوگرافی رقومی بهره گرفته شده است. بررسی و تحلیل لندفرم‌ها بیانگر پنج نوع لندفرم شامل برآمدگی‌ها، کوهها و ارتفاعات، دشت‌سر بالایی، دشت‌سر میانی، دشت‌سر انتهایی، دشت‌های هموار (پلایا، کفه‌های رسی و گلی) در پهنه مورد مطالعه است. پلایاها و کفه‌های رسی قلمرو مورد پژوهش در دو طرف کوهستان اصلی به‌خصوص در مرکز، شمال و

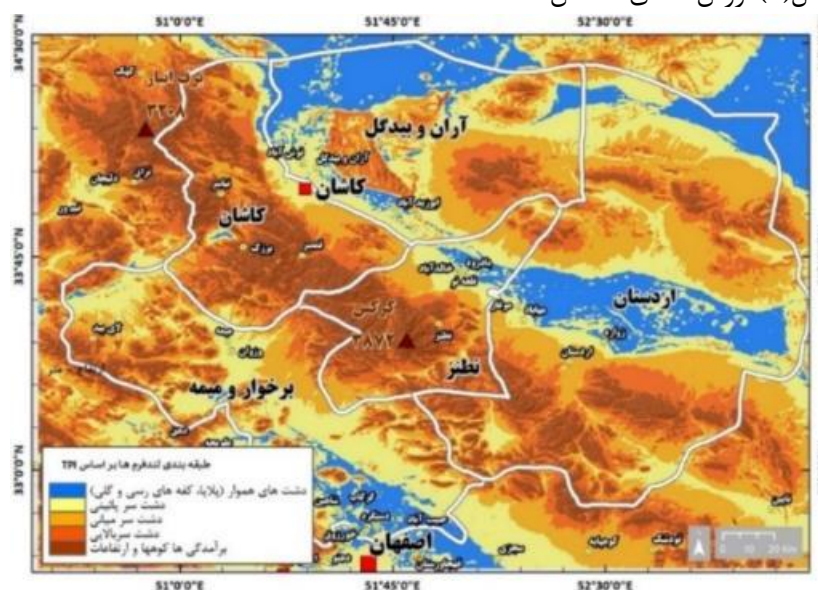
³Bilinear Interpolation

¹Enhanced Vegetation Index

²Resampling

در طبقات لندفرمی از دشت‌های هموار (پلایا، کفه‌های گلی و رسی) به طرف برآمدگی‌ها، کوه‌ها و ارتفاعات افزایش نشان می‌دهد.

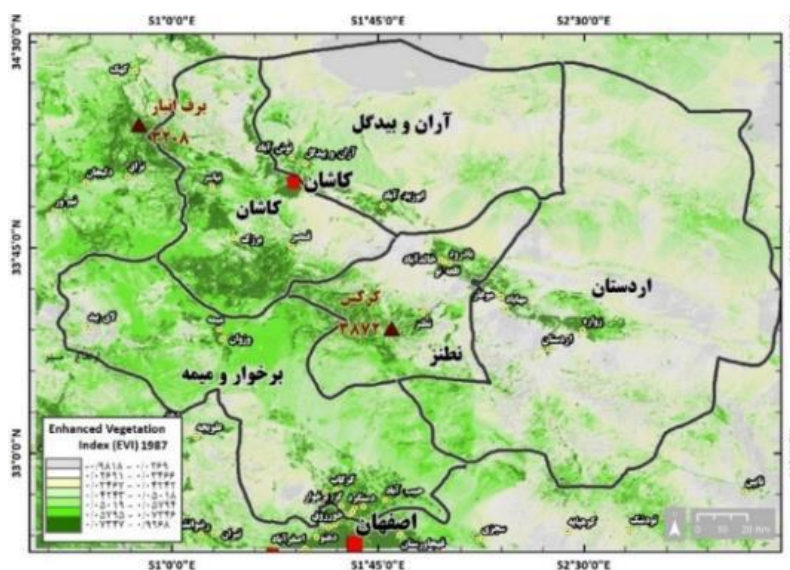
شمال‌شرق تراکم بیشتری داشته، در عین حال در منطقه حبیب‌آباد برخوار نیز نمودی آشکار دارد. بخش مرکزی را کوه‌های کرکس با روندی شمال‌غربی- جنوب‌شرقی در بر گرفته است. بر اساس شکل (۵) ارزش عددی شاخص TPI



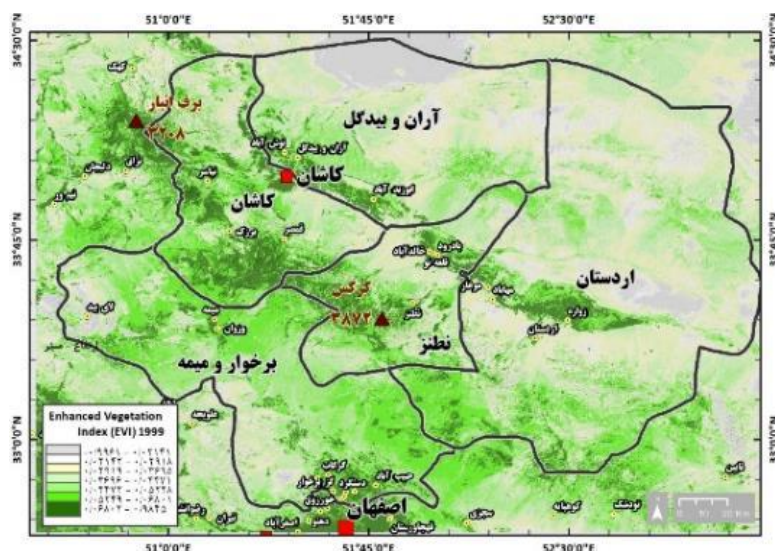
شکل ۵- طبقه‌بندی لندفرم‌ها بر مبنای TPI

محور کاشان- اردستان مشاهده می‌شود که متأثر از اراضی کشاورزی، زراعت و باغات این نواحی تحت تاثیر فعالیتهای آن‌تروپوژنیک (با دخالت انسان) است. حداقل این شاخص در مرکز، شمال، شمال‌شرق و شرق منطقه مورد مطالعه قابل مشاهده است که منطبق با چاله‌ها، پلایاها، دشت‌های هموار و کفه‌های گلی و رسی است (اشکال ۶ تا ۹).

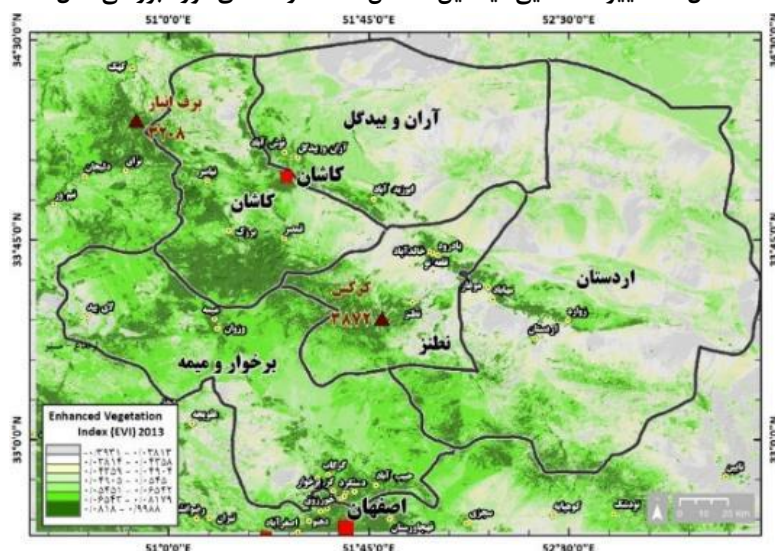
در ادامه، شاخص پوشش گیاهی (EVI) برای متوسط ماه‌های گرم سال در سال‌های آماری ۱۹۸۷، ۱۹۹۹، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۰ برآورد و اشکال (۶) تا (۹) ترسیم گردید. واکاوی مقادیر شاخص EVI نشان می‌دهد حداکثر این شاخص در لندفرم کوهستان با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و به موازات آن باند دیگری در پایین دست شهرها و روستاهای



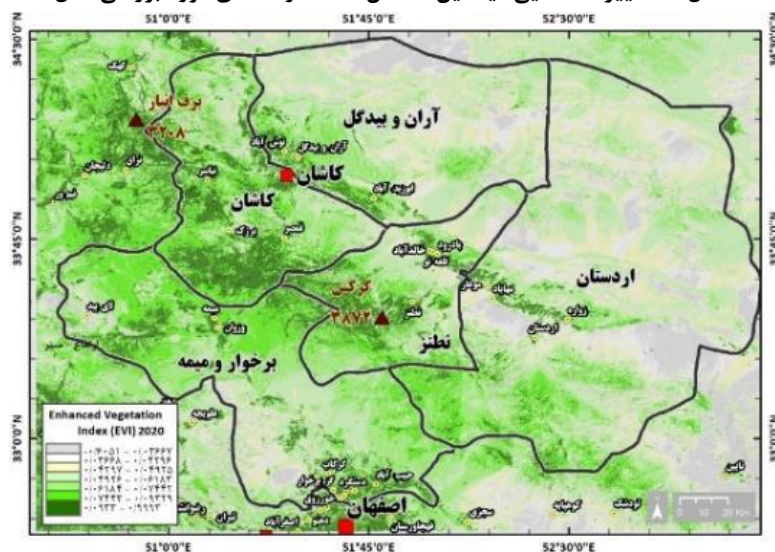
شکل ۶- تغییرات فضایی میانگین شاخص EVI در ماه‌های مورد بررسی سال ۱۹۸۷



شکل ۷- تغییرات فضایی میانگین شاخص EVI در ماه‌های مورد بررسی سال ۱۹۹۹



شکل ۸- تغییرات فضایی میانگین شاخص EVI در ماه‌های مورد بررسی سال ۲۰۱۳



شکل ۹- تغییرات فضایی میانگین شاخص EVI در ماه‌های مورد بررسی سال ۲۰۲۰

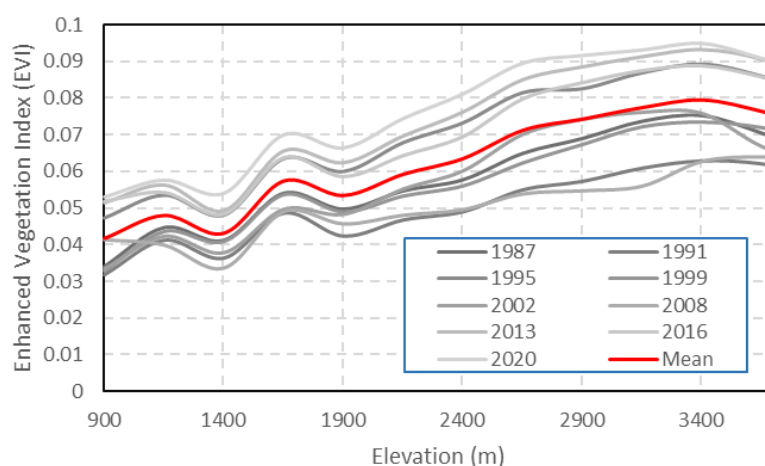
واکاوی تغییرات شاخص EVI در طبقات ارتفاعی

متوسط این شاخص در طبقات ارتفاعی بین ۳۹۰۰-۶۵۰ متری با گام‌های ۲۵۰ متری در سال‌های آماری ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۰ محاسبه که در جدول (۲) و شکل (۱۰) قابل مشاهده است. بررسی این جدول و نمودار نشان می‌دهد که متوسط این شاخص از ارتفاع ۶۵۰ تا ۳۹۰۰ متری روند افزایشی داشته و با افزایش ارتفاع تراکم پوشش گیاهی افزایش یافته است. بر اساس میانگین این شاخص ضمن تاثیر از ارتفاع یک اختلاف نه چندان نامحسوسی در طبقه ۳۶۵۰ تا ۳۹۰۰ مشاهده می‌گردد که دلیل آن کمبود پوشش خاک، وجود

اراضی پرشیب، سنگلاخی و سنگی و کاهش دما در این طبقه ارتفاعی است. نکته قابل توجه در تغییرات شاخص EVI در طبقات ارتفاعی آن است که در ارتفاع حدوداً ۱۴۰۰ متری کاهش مقادیر EVI مشاهده می‌شود. ارتفاع ۱۴۰۰ متر بیشتر شامل دشت‌سرهای میانی است. در ارتفاعات پائین‌تر به دلیل تراکم اراضی کشاورزی و زراعی و باغات، افزایش محسوس EVI وجود دارد، در ارتفاع بالاتر از ۱۴۰۰ متر به دلیل ورود به عرصه واحد کوهستان افزایش EVI بارز می‌شود؛ در نتیجه در محدوده ارتفاعی ۱۴۰۰ متری فرود منحنی EVI قابل رویت است (شکل ۱۰).

جدول ۲- متوسط شاخص EVI در طبقات مختلف ارتفاعی در سال‌های مورد مطالعه

طبقات ارتفاعی		سال‌های مورد بررسی									
حد پایین	حد بالا	۱۹۸۷	۱۹۹۱	۱۹۹۵	۱۹۹۹	۲۰۰۲	۲۰۰۸	۲۰۱۳	۲۰۱۶	۲۰۲۰	میانگین
۶۵۰	۹۰۰	۰/۰۳۴۱	۰/۰۳۱۷	۰/۰۴۷۲	۰/۰۳۲۸	۰/۰۳۳۴	۰/۰۴۱۲	۰/۰۵۱۵	۰/۰۵۲۰	۰/۰۵۳۰	۰/۰۴۱۹
۹۰۰	۱۱۵۰	۰/۰۴۴۷	۰/۰۴۱۱	۰/۰۵۳۵	۰/۰۴۳۷	۰/۰۴۲۳	۰/۰۳۹۸	۰/۰۵۶۳	۰/۰۵۴۳	۰/۰۵۷۶	۰/۰۴۸۱
۱۱۵۰	۱۴۰۰	۰/۰۴۱۳	۰/۰۳۶۳	۰/۰۴۸۰	۰/۰۴۱۰	۰/۰۳۷۸	۰/۰۳۳۵	۰/۰۴۹۳	۰/۰۴۸۴	۰/۰۵۴۰	۰/۰۴۳۳
۱۴۰۰	۱۶۵۰	۰/۰۵۴۱	۰/۰۴۸۵	۰/۰۶۳۵	۰/۰۵۳۷	۰/۰۴۹۷	۰/۰۴۸۹	۰/۰۶۵۶	۰/۰۶۳۸	۰/۰۶۹۹	۰/۰۵۷۵
۱۶۵۰	۱۹۰۰	۰/۰۴۹۷	۰/۰۴۲۲	۰/۰۶۰۰	۰/۰۴۹۱	۰/۰۴۸۳	۰/۰۴۵۶	۰/۰۶۲۴	۰/۰۵۸۶	۰/۰۶۶۴	۰/۰۵۳۶
۱۹۰۰	۲۱۵۰	۰/۰۵۴۷	۰/۰۴۶۷	۰/۰۶۷۹	۰/۰۵۳۴	۰/۰۵۵۲	۰/۰۴۷۹	۰/۰۶۹۷	۰/۰۶۴۳	۰/۰۷۴۴	۰/۰۵۹۴
۲۱۵۰	۲۴۰۰	۰/۰۵۷۷	۰/۰۴۸۹	۰/۰۷۳۳	۰/۰۵۶۲	۰/۰۶۰۲	۰/۰۴۹۵	۰/۰۷۶۲	۰/۰۶۹۵	۰/۰۸۱۱	۰/۰۶۳۶
۲۴۰۰	۲۶۵۰	۰/۰۶۴۹	۰/۰۵۴۹	۰/۰۸۱۶	۰/۰۶۲۴	۰/۰۷۰۱	۰/۰۵۳۷	۰/۰۸۵۱	۰/۰۷۹۷	۰/۰۸۹۴	۰/۰۷۱۳
۲۶۵۰	۲۹۰۰	۰/۰۶۹۰	۰/۰۵۷۲	۰/۰۸۲۷	۰/۰۶۷۵	۰/۰۷۴۲	۰/۰۵۴۶	۰/۰۸۸۶	۰/۰۸۴۲	۰/۰۹۱۵	۰/۰۷۴۴
۲۹۰۰	۳۱۵۰	۰/۰۷۳۷	۰/۰۶۰۸	۰/۰۸۷۱	۰/۰۷۲۳	۰/۰۷۶۲	۰/۰۵۵۹	۰/۰۹۱۳	۰/۰۸۷۴	۰/۰۹۳۰	۰/۰۷۷۵
۳۱۵۰	۳۴۰۰	۰/۰۷۵۲	۰/۰۶۲۸	۰/۰۸۹۴	۰/۰۷۳۶	۰/۰۷۵۹	۰/۰۶۲۶	۰/۰۹۳۳	۰/۰۸۸۷	۰/۰۹۴۸	۰/۰۷۹۶
۳۴۰۰	۳۶۵۰	۰/۰۷۰۴	۰/۰۶۲۰	۰/۰۸۶۱	۰/۰۷۲۱	۰/۰۶۶۸	۰/۰۶۳۸	۰/۰۹۰۶	۰/۰۸۵۷	۰/۰۹۰۷	۰/۰۷۶۵
۳۶۵۰	۳۸۹۰	۰/۰۶۴۳	۰/۰۵۸۵	۰/۰۸۱۰	۰/۰۶۸۶	۰/۰۶۱۹	۰/۰۶۲۶	۰/۰۸۴۰	۰/۰۸۱۴	۰/۰۸۶۰	۰/۰۷۲۰



شکل ۱۰- تغییرات شاخص EVI در طبقات مختلف ارتفاعی

واکاوی تغییرات شاخص EVI در طبقات شیب

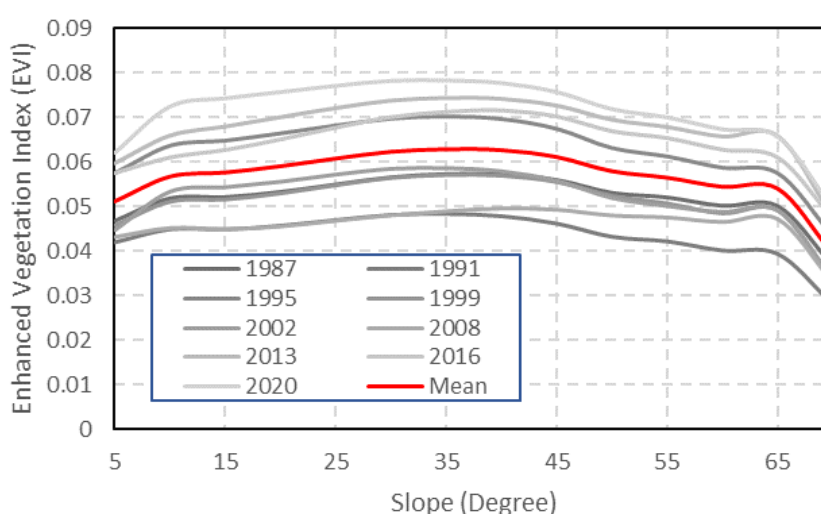
بر اساس جدول (۳) و شکل (۱۱) که متوسط شاخص EVI در طبقات شیب را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد؛

در مناطقی که شیب از صفر تا ۳۵ درجه است؛ مقادیر EVI روندی افزایشی داشته و با افزایش ارتفاع بر تراکم پوشش گیاهی افزوده شده است. در شیب بالای ۳۵ درجه تراکم

پوشش گیاهی کاسته شده و از روند کاهشی ملایم برخوردار است. این در حالی است که در شیب‌های بالاتر از ۶۵ درجه روند کاهشی EVI آهنگ شدیدتری را نشان می‌دهد. به

جدول ۳- متوسط شاخص EVI در طبقات مختلف شیب

سال‌های مورد بررسی		طبقات شیب (درجه)									
حد بالا	حد پایین	۱۹۸۷	۱۹۹۱	۱۹۹۵	۱۹۹۹	۲۰۰۲	۲۰۰۸	۲۰۱۳	۲۰۱۶	۲۰۲۰	میانگین
۵	۰	۰/۰۴۶۹	۰/۰۴۱۸	۰/۰۵۷۴	۰/۰۴۵۸	۰/۰۴۴۸	۰/۰۴۳۱	۰/۰۵۹۷	۰/۰۵۷۵	۰/۰۶۲۰	۰/۰۵۱۰
۱۰	۵	۰/۰۵۲۰	۰/۰۴۴۸	۰/۰۶۳۶	۰/۰۵۱۰	۰/۰۵۳۴	۰/۰۴۵۱	۰/۰۶۵۹	۰/۰۶۱۱	۰/۰۷۲۴	۰/۰۵۶۶
۱۵	۱۰	۰/۰۵۲۲	۰/۰۴۴۷	۰/۰۶۴۸	۰/۰۵۱۵	۰/۰۵۴۴	۰/۰۴۴۹	۰/۰۶۸۰	۰/۰۶۲۸	۰/۰۷۴۲	۰/۰۵۷۵
۲۰	۱۵	۰/۰۵۳۴	۰/۰۴۵۶	۰/۰۶۶۴	۰/۰۵۲۹	۰/۰۵۵۶	۰/۰۴۵۵	۰/۰۷۰۱	۰/۰۶۵۱	۰/۰۷۵۶	۰/۰۵۸۹
۲۵	۲۰	۰/۰۵۵۱	۰/۰۴۶۸	۰/۰۶۸۲	۰/۰۵۴۷	۰/۰۵۷۲	۰/۰۴۶۸	۰/۰۷۲۲	۰/۰۶۷۸	۰/۰۷۷۱	۰/۰۶۰۶
۳۰	۲۵	۰/۰۵۶۷	۰/۰۴۸۰	۰/۰۶۹۷	۰/۰۵۶۴	۰/۰۵۸۵	۰/۰۴۸۰	۰/۰۷۳۹	۰/۰۷۰۱	۰/۰۷۸۲	۰/۰۶۲۲
۳۵	۳۰	۰/۰۵۷۴	۰/۰۴۸۲	۰/۰۷۰۲	۰/۰۵۷۰	۰/۰۵۸۶	۰/۰۴۸۹	۰/۰۷۴۵	۰/۰۷۱۳	۰/۰۷۸۲	۰/۰۶۲۷
۴۰	۳۵	۰/۰۵۷۴	۰/۰۴۷۷	۰/۰۶۹۶	۰/۰۵۶۹	۰/۰۵۷۹	۰/۰۴۹۵	۰/۰۷۴۳	۰/۰۷۱۶	۰/۰۷۷۷	۰/۰۶۲۵
۴۵	۴۰	۰/۰۵۶۱	۰/۰۴۶۱	۰/۰۶۷۴	۰/۰۵۵۵	۰/۰۵۵۸	۰/۰۴۹۳	۰/۰۷۲۷	۰/۰۷۰۳	۰/۰۷۵۶	۰/۰۶۱۰
۵۰	۴۵	۰/۰۵۳۲	۰/۰۴۳۱	۰/۰۶۳۱	۰/۰۵۲۴	۰/۰۵۲۰	۰/۰۴۸۰	۰/۰۶۹۵	۰/۰۶۷۰	۰/۰۷۱۸	۰/۰۵۷۸
۵۵	۵۰	۰/۰۵۲۲	۰/۰۴۲۱	۰/۰۶۱۲	۰/۰۵۰۷	۰/۰۵۰۲	۰/۰۴۷۵	۰/۰۶۷۹	۰/۰۶۵۴	۰/۰۷۰۰	۰/۰۵۶۳
۶۰	۵۵	۰/۰۵۰۳	۰/۰۴۰۰	۰/۰۵۸۶	۰/۰۴۸۴	۰/۰۴۸۸	۰/۰۴۶۵	۰/۰۶۵۸	۰/۰۶۲۸	۰/۰۶۷۳	۰/۰۵۴۳
۶۵	۶۰	۰/۰۵۰۲	۰/۰۳۹۲	۰/۰۵۷۴	۰/۰۴۹۱	۰/۰۴۹۲	۰/۰۴۷۲	۰/۰۶۵۹	۰/۰۶۱۱	۰/۰۶۵۶	۰/۰۵۳۹
۶۹/۷۳	۶۵	۰/۰۳۷۶	۰/۰۲۸۵	۰/۰۴۴۰	۰/۰۳۴۵	۰/۰۳۴۹	۰/۰۳۳۸	۰/۰۴۸۶	۰/۰۴۸۱	۰/۰۵۰۵	۰/۰۴۰۱



شکل ۱۱- الگوی تغییرات شاخص EVI در طبقات شیب

است. به نظر می‌رسد افزایش شاخص پوشش گیاهی در لندفرم کفه‌ها، دشت‌های هموار و پلایا در مقایسه با دشت‌سر بالایی، به سبب تجمع آب‌های زیرزمینی و استخراج و بهره‌برداری از آن به منظور کشاورزی و زراعت در این واحد لندفرمی است. به بیان دیگر، نقش فعالیت‌های انسانی در بروز تغییرات در این خصوص اجتناب‌ناپذیر بوده است.

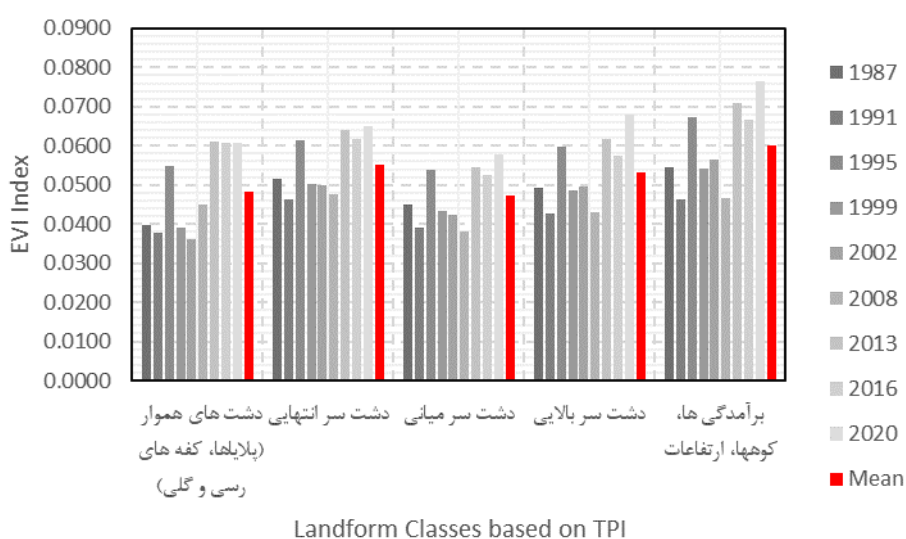
واکاوی تغییرات شاخص EVI در طبقات مختلف

لندفرمی بر پایه TPI

ارزیابی جدول (۴) و شکل (۱۲) شاخص EVI در طبقات مختلف لندفرمی نشان می‌دهد که کمینه پوشش گیاهی بهبود یافته در طبقه لندفرمی دشت‌سر میانی قرار گرفته است. این در حالی است که بیشینه تراکم پوشش گیاهی در طبقه لندفرمی برآمدگی‌ها، کوه‌ها و ارتفاعات واقع شده

جدول ۴- متوسط شاخص EVI در طبقات مختلف لندفرمی در سال های مورد مطالعه

طبقات لندفرمی بر اساس TPI	سال های مورد بررسی									
طبقات لندفرمی	۱۹۸۷	۱۹۹۱	۱۹۹۵	۱۹۹۹	۲۰۰۲	۲۰۰۸	۲۰۱۳	۲۰۱۶	۲۰۲۰	میانگین
دشت های هموار (پلایاها، کفه های رسی و گلی)	۰/۰۳۹۸	۰/۰۳۷۸	۰/۰۵۴۸	۰/۰۳۹۲	۰/۰۳۶۱	۰/۰۴۴۹	۰/۰۶۱۰	۰/۰۶۰۸	۰/۰۶۰۸	۰/۰۴۸۴
دشت سر انتهایی	۰/۰۵۱۴	۰/۰۴۶۳	۰/۰۶۱۴	۰/۰۵۰۲	۰/۰۴۹۸	۰/۰۴۷۵	۰/۰۶۴۱	۰/۰۶۱۶	۰/۰۶۵۱	۰/۰۵۵۳
دشت سر میانی	۰/۰۴۵۰	۰/۰۳۹۱	۰/۰۵۳۸	۰/۰۴۳۲	۰/۰۴۲۳	۰/۰۳۸۲	۰/۰۵۴۵	۰/۰۵۲۴	۰/۰۵۷۹	۰/۰۴۷۴
دشت سر بالایی	۰/۰۴۹۳	۰/۰۴۲۷	۰/۰۵۹۸	۰/۰۴۸۶	۰/۰۴۹۶	۰/۰۴۳۰	۰/۰۶۱۸	۰/۰۵۷۵	۰/۰۶۷۹	۰/۰۵۳۳
برآمدگی ها، کوه ها، ارتفاعات	۰/۰۵۴۶	۰/۰۴۶۴	۰/۰۶۷۴	۰/۰۵۴۲	۰/۰۵۶۶	۰/۰۴۶۷	۰/۰۷۱۱	۰/۰۶۶۶	۰/۰۷۶۵	۰/۰۶۰۰

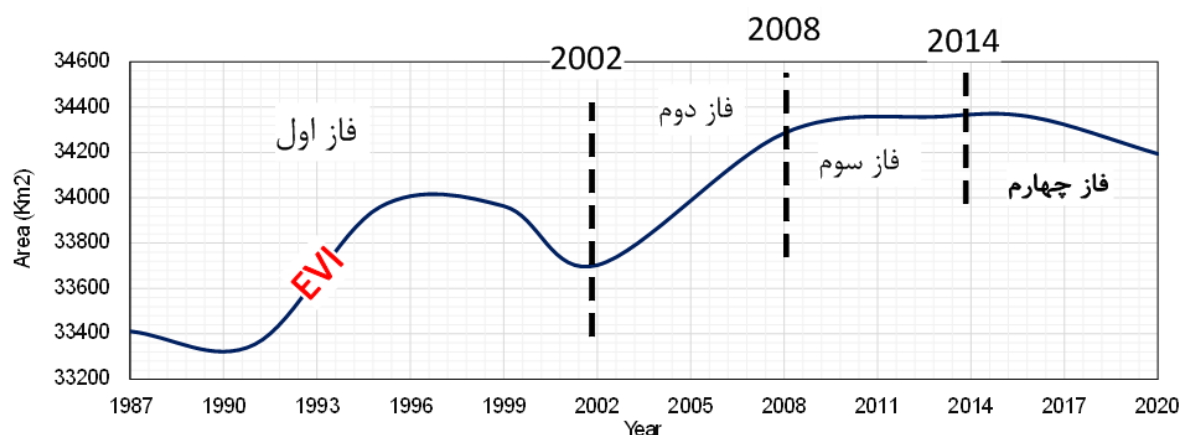


شکل ۱۲- تغییرات شاخص EVI در طبقات مختلف لندفرمی

۲۰۰۲ که به یکباره با افت روبه رو می شود. از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ فاز دوم با شیب افزایشی تندی آغاز می گردد. در فاز سوم از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ شرایط ثبات نسبی بدون روند و الگوی تغییرات خاصی حاکم می شود و در نهایت فاز چهارم از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ به طور نسبی روند کاهش می یابد.

واکاوی تغییرات سطوح شاخص EVI پوشش گیاهی

تغییرات سطوح شاخص EVI در فازهای گوناگون آشکارسازی و ترسیم شد. الگوی تغییرات زمانی سطوح شاخص $EVI \geq 0$ در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، فاز اول از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۲ شرایط نسبتاً افزایشی حاکم می شود تا سال

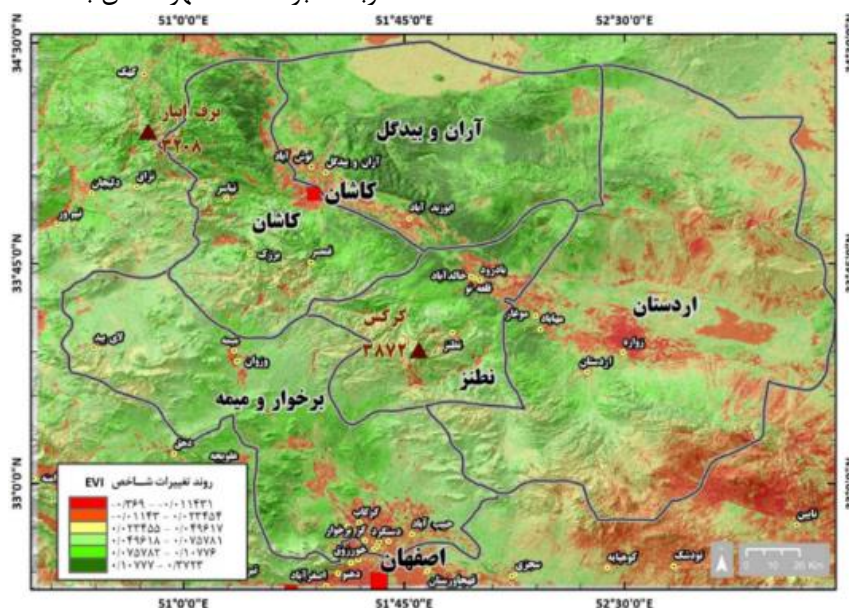


شکل ۱۳- الگوی تغییرات زمانی سطوح شاخص EVI در فازهای چهارگانه ($EVI \geq 0$)

است. ارتفاعات برفانبار، کرکس تغییرات مشخص نشان نمی‌دهد؛ به سمت ارتفاعات مارشنان تخریب سبزیگی تشدید می‌گردد. در اراضی جنوبی دریاچه نمک، افزایش قابل توجه درجه سبزیگی مشخص است که دلایل آن همان‌طور که مورد بحث قرار گرفت، می‌تواند تحت تأثیرات دوره‌های اقلیمی کوتاه‌مدت و همچنین طرح بیابان‌زدایی و کمربند سبز محافظ شهر کاشان باشد.

بررسی روند تغییرات مکانی شاخص EVI

نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات فضایی شاخص EVI در شکل (۱۴) نشان داده شده است. بر اساس الگوی تغییرات شاخص EVI محور کاشان- اردستان در باند کم ارتفاع کاهش بارز درجه سبزیگی را نشان می‌دهد. در اراضی پیرامون اردستان تخریب گسترده سبزیگی مشخص



شکل ۱۴- روند تغییرات فضایی شاخص EVI در دوره زمانی ۱۹۸۷-۲۰۲۰

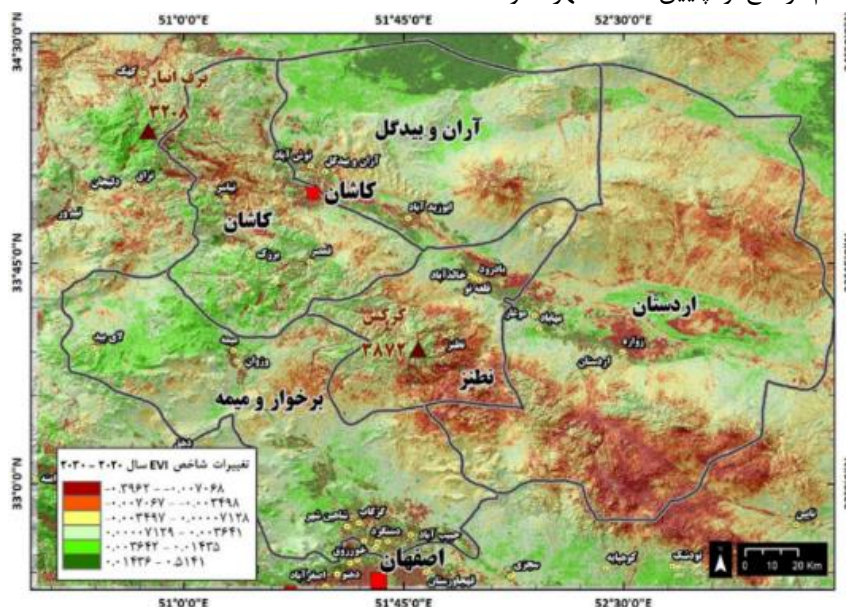
یاخته‌های متناظر به ازای هر یاخته ایجاد و بر اساس آن پیش‌بینی صورت گرفته است. سپس، بر اساس پیش‌بینی صورت گرفته، نقشه تغییرات نیز محاسبه و ترسیم گردید. نقشه تغییرات مکانی آینده در حقیقت اختلاف بین نقشه پیش‌بینی و نقشه موجود است که با روش سلول به سلول

تغییرات مکانی آینده شاخص پوشش گیاهی بین

سال ۲۰۲۰ و ۲۰۳۰

شاخص پوشش گیاهی در این پژوهش بر مبنای مدل همبستگی رگرسیونی برای سال ۲۰۳۰ پیش‌بینی و نقشه مربوطه ترسیم گردید. در این ارتباط، مدل رگرسیون برای

متناظر تهیه و ترسیم شده است. شکل (۱۵) تغییرات مکانی شاخص EVI را نشان می‌دهد. طبق این شاخص محیطی نیز ارتفاعات کرکس خصوصا از کرکس به سمت ارتفاعات مارشان در شرایط بحرانی قرار دارد و در آینده، یعنی دهه پیش رو با تغییرات مخرب روبه‌رو می‌شود. محور کاشان- اردستان خصوصا باند کم ارتفاع و پایین‌دست شهرها و



ناشی از فعالیت‌های انسان‌ساز از شرایط مطلوبی برخوردار است. این در حالی است که کمینه این شاخص منطبق بر چاله‌ها، پلایاها، دشت‌های هموار و کفه‌های گلی و رسی است که مرکز، شمال، شمال‌شرق و شرق منطقه مورد مطالعه را در بر گرفته‌اند. نکته دیگر در این خصوص روند فزاینده این شاخص به پیروی از سنجه توپوگرافی در کمرندهای ارتفاعی است. بدین ترتیب، در ارتفاع حدوداً ۱۴۰۰ متری (دشت‌سرهای میانی) مقادیر EVI کاهش آشکاری دارد. این در حالی است که در لندفرم کوهستان مقادیر EVI از روندی افزایشی برخوردار است. در عین حال، در شیب‌های بیشتر از ۶۵ درجه به دلیل استقرار اراضی صخره‌ای، سنگلاخی و به تبع آن نبود شرایط برای رشد پوشش گیاهی روند کاهشی EVI تشدید شده است. نوسانات سالانه شاخص EVI نیز در بازه زمانی مورد بررسی نسبتاً افزایشی گزارش می‌شود. طبق این شاخص محیطی در سال ۲۰۳۰ ارتفاعات کرکس خصوصاً از کرکس به سمت ارتفاعات مارشنان در شرایط بحرانی قرار خواهد گرفت و در آینده، یعنی دهه پیش رو با تغییرات مخرب مواجه می‌شود.

واکاوی لندفرم‌ها با شاخص توپوگرافیک TPI حاصل از مدل رقومی ارتفاعی نشان‌دهنده پنج نوع لندفرم مشتمل بر برآمدگی‌ها، کوه‌ها و ارتفاعات، دشت‌سر بالایی، دشت‌سر میانی، دشت‌سر انتهایی، دشت‌های هموار (پلایا، کفه‌های رسی و گلی) در قلمرو مورد مطالعه است. نتایج حاصل از به‌کارگیری شاخص توپوگرافی TPI نیز غالباً نشان از ارتباط نزدیک و تنگاتنگ تراکم پوشش گیاهی با مؤلفه توپوگرافیکی ارتفاع در قلمرو مطالعاتی است. بررسی مقادیر شاخص EVI نشان داد که بیشینه این شاخص منطبق بر لندفرم کوهستان است. به بیان دیگر، بیشینه این شاخص در لندفرم کوهستان با روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی محدوده مطالعاتی (قلل برف‌انبار، کرکس و مارشان) مشاهده می‌شود. در این لندفرم شرایط مطلوب اقلیمی و بارش مناسب، زمینه را برای پوشش گیاهی متراکم‌تر نسبت به سایر لندفرم‌ها فراهم کرده است. علاوه بر این، پوشش گیاهی در پائین دست شهرها و روستاهای محور کاشان - اردستان نیز به دلیل وجود اراضی کشاورزی، زراعت و باغات

MODIS (مطالعه موردی: مراتع جنوب استان یزد)، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۶۹، صص ۲۱۵-۱۹۳.

صابر فر، ر.، فلاحتکار، س.، کیا، ح. ۱۳۹۷. تحلیل تغییرات شاخص‌های پوشش گیاهی در سنجنده‌های ماهواره لندست (مطالعه موردی: ارس‌زارهای شرق پارک ملی گلستان و منطقه حفاظت شده قرخود)، اکوسیستم‌های طبیعی ایران، شماره ۳۱، صص ۷۱-۹۱.

عارفیان، ع.، کیانی صدر، م.، اسلامیان، س.، خوش فطرت، ع. ۱۳۹۹. پایش اثرات خشکسالی بر پوشش گیاهی در مناطق کوهستانی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS (مطالعه موردی: استان لرستان)، مطالعات علوم محیط زیست، شماره ۴، صص ۳۱۸۹-۳۱۸۳.

عباس‌زاده تهرانی، ن.، صابری، ن. ۱۳۹۲. ارزیابی الگوی تغییرات فصلی پوشش اراضی با تحلیل داده‌های سنجش از دوری، سومین کنفرانس برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران.

فرج‌زاده، م.، کاوسی، م. ۱۳۹۳. ارزیابی و تحلیل روند تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و تحلیل بردار تغییر (CVA) مطالعه موردی: کانون طوفان‌های گرد و غبار غرب ایران، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۴، صص ۸۲-۶۹.

فیروزی، ف.، طاووسی، ت. ۱۳۹۷. بررسی حساسیت دو شاخص پوشش گیاهی NDVI و EVI به خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها در مناطق خشک و نیمه خشک مطالعه موردی دشت سیستان ایران، اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، شماره ۱۱۰، صص ۱۶۳-۱۷۹.

قنبری مطلق، م.، امرایی، ب. ۱۳۹۹. آشکارسازی ارتباط زمانی-مکانی تغییرات پوشش گیاهی در استان مازندران با عناصر اقلیمی، جغرافیا و پایداری محیط، شماره ۵۵، صص ۵۵-۳۷. گنجعلی، ج.، حلبیان، ا.ج.، کرم، ا.، حجه‌فروش‌نیا، ش. ۱۴۰۲. واکاوی ارتباط بین تغییرات پوشش گیاهی و لندفرمهای بیابانی در شمال استان اصفهان، خشک‌بوم، شماره ۱، صص ۶۵-۸۲.

محمدیاری، ف.، پورخباز، ح.، توکلی، م.، اقدر، ح. ۱۳۹۳. تهیه نقشه پوشش گیاهی و پایش تغییرات آن با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: شهرستان بهبهان). اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، شماره ۹۲، صص ۳۴-۲۳.

میراحسنی، م.، سلمان ماهینی، ع.، صفیانیان، ع.، محمدی، ج.، مدرس، ر.، جعفری، ر.، پورمنافی، س. ۱۳۹۸. ارزیابی روند تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر سری زمانی و

محور کاشان-اردستان به ویژه باند کم ارتفاع و پایین دست شهرها و روستاها نیز به سبب فعالیت‌های انسان‌ساز با شرایط نامطلوبی روبه‌رو خواهد شد. این موضوع با پژوهش گنجعلی و همکاران (۱۴۰۲) و آرامش و همکاران (۱۴۰۱) هماهنگی و سازگاری نشان می‌دهد. نواحی مربوط به ارتفاعات شمال دق سرخ خصوصاً دشت‌سرهای جنوبی و شمالی نیز با شرایط نیمه بحرانی مواجه خواهند شد. ارتفاعات برف‌انبار و همچنین ارتفاعات قمصر و برزوک و میمه شرایط مساعدتری خواهند داشت. بدین ترتیب، با توجه به گسترش پدیده بیابان‌زایی و تخریب پوشش گیاهی در شمال استان اصفهان، واکاوی نقش جنبه‌ها و مولفه‌های مختلف توپوگرافیک بر پوشش گیاهی و بررسی تغییرات، کمی‌سازی و مدل‌سازی پوشش گیاهی به عنوان یک مولفه مهم محیطی می‌تواند در ارزیابی توان محیطی و اکولوژیکی و مدیریت این پهنه بیابانی مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

اداره تحقیقات هواشناسی کاربردی. ۱۳۹۹. آشکارسازی تغییرات اقلیمی استان اصفهان.

آرامش، م.، ولی، ع.ع.، رنجبر، ا. 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)، تحقیقات مرتع و بیابان ایران، شماره ۲، صص ۳۱۲-۲۹۷.

بهرنگ‌منش، م.، خسروی، ح.، آذرینوند، ح.، سناتور، آ. ۱۳۹۸. کمی‌سازی روند تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از سنجش از دور (منطقه مورد مطالعه: استان فارس)، حفاظت زیست‌بوم گیاهان، شماره ۱۵، صص ۳۱۸-۲۹۵.

پردل، ف.، ابراهیمی، ع.، عزیزی، ز. ۱۳۹۶. ارزیابی شاخص‌های گیاهی برآورد پوشش و تولید گیاهی مراتع مناطق خشک در دوره‌های رویشی مختلف، خشک‌بوم، شماره ۲، صص ۷۰-۵۷.

حجازی‌زاده، ز.، سنبل، ز. ۱۴۰۱. بررسی تغییرات شاخص پوشش گیاهی و کاربری اراضی در راستای توسعه پایدار (مطالعه موردی: شهرستان ملارد)، مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای، شماره ۸، صص ۱۸۸-۱۶۹. درویش‌زاده، ع.، محمدی، م. ۱۳۸۹. زمین‌شناسی ایران، دانشگاه پیام نور، زارع خورمیزی، ه.، غفاریان مالمیری، ح. ر. ۱۴۰۲. تهیه نقشه درصد پوشش گیاهی مراتع و پایش تغییرات آن در دوره‌های خشکسالی و ترسالی با استفاده از NDVI سنجنده

- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., Ferreira, L. G. 2002. Remote sensing for natural resources management and environmental monitoring: manual of remote sensing 3 ed. University of Arizona.
- Lyon, J.G., Yuan, D., Lunetta, R.S., Elvidge, C.D. 1998. A change detection experiment using vegetation indices. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 64: 143-150.
- Magee T.K., Ringold, P.L., Bollman M.A. 2008. Alien species importance in native vegetation along wadeable streams, John Day River Basin, Oregon, USA. *Plant Ecology*, 195(2): 287-307.
- Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.M., Tucker, C.J., Stenseth, N.C. 2005. Using the satellite -derived ndvi to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution*. 20(9): 503-510.
- Puri. P. 2023. Enhanced vegetation index and land use analysis for seven sister states of India (2000–2022). *Sustainable Development Goals in Northeast India*, 2023: 167-183.
- Rawat, J.S., Biswas, V., Kumar, M. 2013. Changes in land use/cover using geospatial techniques: a case study of ramnagar town area, district nainital, uttarakhand, india, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 16 (1): 111-117.
- Reu, J.D., Bourgeois, J., Bats, M., Zwertvaegher, A., Gelorini, V., Smedt, P.D., Chu, W., Antrop, M., Maeyer, P.D., Finke, P., Meirvenne, M.V., Verniers, J., Crombé, P. 2013. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology*, 186: 39–49.
- Takaku, J., Tadono, T., Tsutsui, K. 2014. Generation of high-resolution global DSM from ALOS PRISM, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-4, 243-248, ISPRS.
- Vanderpost, C., Ringrose, S., Matheson, W., Arntzen, J. 2011. Satellite based long-term assessment of rangeland condition in semi-arid areas: An example from botswana. *Journal of Arid Environments*. 75(4): 383-389
- Vaogen, T.G. 2006. Remote sensing of complex land use change trajectories: case study from the hilghlands of madagascar, *آزمون من- کندال در حوضه آبخیز گاوخونی، محیط‌شناسی، شماره ۱، صص ۹۹-۱۱۴*.
- ناطق، س.، نوحه‌گر، ا.، احسانی، ا.، بذرافشان، ا. ۱۳۹۶. بررسی تغییرات پوشش گیاهی بر اساس شاخص‌های گیاهی با استفاده از سنجش از دور، تحقیقات مرتع و بیابان ایران، شماره ۴، صص ۷۷۸-۷۹۰.
- نیک‌پور، ن.، نگارش، ح.، فتوحی، ص.، حسینی، ز.، بهرامی، ش. ۱۳۹۷. پایش روند تغییرات شاخص پوشش گیاهی (NDVI) یکی از مهمترین شاخص‌های تخریب سرزمین (در استان ایلام). تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، شماره ۴، صص ۲۱-۴۸.
- Ardö, J., Tagesson, T., Jamali, S., Khatir, A. 2017. MODIS EVI-based net primary production in the Sahel 2000–2014, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 65:35–45.
- Chen, R., Yin, G., Liu, G., Li, J., Verger, A. 2020. Evaluation and normalization of topographic effects on vegetation indices, *Remote Sensing*, 12, 2290: 1-9.
- Darwish, T., Faour, G. 2008. Rangeland degradation in two watersheds of Lebanon. *Lebanese Science Journal*. 9: 71-80.
- Depew, J.J. 2004. Habitat selection and movement patterns of cattle and white-tailed deer in a temperate savanna, M.Sc. thesis, Texas A & M University, 71 pages.
- Fang, X., Zhu, Q., Ren, L., Chen, H., Wang, K., Peng, C. 2018. Large-scale detection of vegetation dynamics and their potential drivers using MODIS images and BFAST: A case study in Quebec, Canada. *Remote Sensing of Environment*, 206: 391-402.
- Guisan, A., Weiss, S.B., Weiss, A.D. 1999. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology* 143: 107–122.
- Heydari Alamdarloo, E., Abolhasani, A., Behrang Manesh, M., Khosravi, H. 2024. Application of remote sensing techniques for evaluating land surface vegetation, *Remote Sensing of Soil and Land Surface Processes*, 2024: 199-216. doi.org/10.1016/B978-0-443-15341-9.00006-X
- Horn, B. K. 1981. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, 69(1): 14-47.
- Jenness, J. 2006. Topographic Position Index (tpi_jen.avx) Extension for ArcView 3.x, v. 1.3a. Jenness Enterprises.

- agriculture. *Ecosystems and Environment*, 115(1-4): 219-228.
- Verbesselt. J., Hyndman. R., Newnham. R., Culvenor. D. 2010. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 106–115.
- Weiss, A. 2001. Topographic position and landforms analysis. ESRI user Conference, San Diego, C.A.
- Wilson, J.P., Gallant, J.C. 2000. *Terrain analysis: principles and applications*. New York, John Wiley.
- Yorks, T. P., West, N. E., Capels, K. M. 1992. Vegetation differences in desert shrublands of western utah's pine valley between 1933 and 1989. *Journal of Range Management*, 45: 569-578.
- Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Hodges, J.C.F., Gao, F., Reed, B.C., Huete, A. 2003. Monitoring vegetation phenology using modis. *Remote Sensing of Environment*. 84(3): 471-475.