



## Investigating the consequences of climate change on the organic carbon content of soils in the forest areas of Middle Zagros

HamidReza Matinfar<sup>1</sup>, Aliakbar Shamsipour<sup>2</sup>, Hadis Sadeghi<sup>3</sup>

1 Professor, Soil Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural resources, University of Lorestan, Lorestan, Iran, Email: [matinfar.h@lu.ac.ir](mailto:matinfar.h@lu.ac.ir)

2 Associate Professor, Physical Geography Department, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: [shamsipr@ut.ac.ir](mailto:shamsipr@ut.ac.ir)

3 Research Expert, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran, Email: [hadis.sadeghi12@yahoo.com](mailto:hadis.sadeghi12@yahoo.com)

---

### Article Info

### ABSTRACT

---

#### Article type:

Research Full Paper

#### Article history:

Received: 2024-8-25

Accepted: 2024-10-26

#### Keywords:

climate change  
Middle Zagros  
carbon sequestration  
land use

Continuous monitoring of soil organic carbon is one of the needs of monitoring environmental processes, including climate change and its effects on the ecosystem. The aim of the current research is to know the relationship between climate change and land use change and its effect on carbon sequestration of the Middle Zagros soils. After field observations, 180 areas with specific tree cover were randomly classified and soil samples were taken from each point up to a depth of 20 cm and transferred to the laboratory and the chemical and chemical properties of the soil were measured. The results show an increase in the areas without vegetation cover, or in other words, the change of forest and pasture land use to areas without cover. These results are consistent with the trend of land use changes in the region. So that the changes of greenness and vegetation in the province are weakened or aggravated by drought conditions. In general, land use changes from forests and pastures to lands without vegetation, temperature index changes resulting from satellite image calculations, which show stress in vegetation due to high temperature and dryness. On the other hand, vegetation indexes also express the reduction of the areas with vegetation, which leads to the reduction of plant biomass and the reduction of organic matter production in changed uses. In general, considering the trend of reducing carbon sequestration from 89 tons per hectare to 50 tons per hectare in a 30-year period, it can be expected that with the existing climate scenario and the current management of natural resources, the surface of vegetation and carbon sequestration values in the future decrease.

---

**Cite this article:** Matinfar, H.R., Shamsipour, A.A., Sadeghi, H. (2025). Investigating the consequences of climate change on the organic carbon content of soils in the forest areas of Middle Zagros. *Journal of the Climate Change research*, 6 (22), 97-114.

---





## بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بر محتوی کربن آلی خاک‌های مناطق جنگلی زاگرس میانی (استان لرستان)

حمیدرضا متین‌فر<sup>۱\*</sup>، علی اکبر شمسی‌پور<sup>۲</sup>، حدیث صادقی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران، رایانامه: [matinfar.h@lu.ac.ir](mailto:matinfar.h@lu.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشیار آب و هواشناسی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: [shamsipr@ut.ac.ir](mailto:shamsipr@ut.ac.ir)

<sup>۳</sup> کارشناس پژوهشی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران، رایانامه: [hadis.sadeghi12@yahoo.com](mailto:hadis.sadeghi12@yahoo.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۶/۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۵</p> <p>واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم زاگرس میانی ترسیب کربن کاربری اراضی</p>	<p>پایش مستمر میزان کربن آلی خاک یکی از نیازهای نظارت بر فرایندهای زیست محیطی منجمله تغییرات اقلیمی و اثرات آن بر اکوسیستم است. هدف تحقیق حاضر شناخت رابطه تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی و تاثیر آن بر ترسیب کربن خاک‌های زاگرس میانی است. پس از بررسی چشمی تصویر رنگی و مشاهدات میدانی، به روش تصادفی طبقه‌بندی شده ۱۸۰ محدوده دارای پوشش درخت مشخص و از هر نقطه تا عمق ۲۰ سانتی‌متری نمونه‌های خاک برداشت و به آزمایشگاه منتقل و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اندازه‌گیری شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش سطوح فاقد پوشش گیاهی یا به عبارتی تغییر کاربری‌های جنگلی و مرتعی به سطوح بدون پوشش است، این نتایج با روند تغییرات کاربری اراضی در منطقه منطبق می‌باشد. بطوری‌که تغییرات سبزی‌نگی و پوشش گیاهی در سطح استان متأثر از شرایط خشکسالی و ترسالی تضعیف یا تشدید می‌شود. بطور کلی تغییر کاربری اراضی از جنگل و مرتع به اراضی فاقد پوشش گیاهی، تغییرات شاخص دمایی منتج از محاسبات تصاویر ماهواره‌ای که نشان‌دهنده تنش در پوشش گیاهی به علت دما و خشکی بالا است و از طرف دیگر شاخص‌های گیاهی هم بیان‌کننده کاهش سطوح دارای پوشش گیاهی هستند که منجر به کاهش زیست توده گیاهی و کاهش تولید ماده آلی در کاربری‌های تغییر یافته می‌گردد. بطور کلی با توجه به روند کاهش ترسیب کربن از ۸۹ تن در هکتار به ۵۰ تن در هکتار در بازه زمانی ۳۰ ساله می‌توان انتظار داشت با سناریوی اقلیمی موجود و مدیریت فعلی منابع طبیعی وضعیت پوشش گیاهی منطقه فقیر و کاهش مقادیر ترسیب کربن ناشی از پوشش گیاهی در آینده قابل پیش‌بینی است.</p>

**استناد:** متین‌فر، حمیدرضا؛ شمسی‌پور، علی اکبر؛ صادقی، حدیث. (۱۴۰۴). بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بر محتوی کربن آلی خاک‌های مناطق جنگلی زاگرس میانی (استان لرستان). نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۶ (۲۲)، ۹۷-۱۱۴.



## مقدمه

کربن آلی خاک شاخص مهمی در ارزیابی حاصلخیزی خاک و مدیریت اراضی است که سایر خصوصیات خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ذخیره کل کربن آلی خاک در مقیاس جهانی (۱۵۵۰ گیگاتن) به ترتیب بیش از ۲ و ۲/۸ برابر کربن جو (۷۶۰ گیگاتن) و کربن ذخیره شده در گیاهان (۵۶۰ گیگاتن) است. از این رو اندک تغییری در کربن آلی خاک می‌تواند مقدار دی اکسید کربن جو را به شدت تحت تأثیر قرار داده و به تبع آن روی اقلیم تأثیرگذار باشد (محمودزاده و همکاران، ۱۳۹۹: ۷۸). اهمیت اصلی مواد آلی خاک در کیفیت، کمیت، پایداری خاک و سلامت محیط زیست می‌باشد. بهبود ماده آلی خاک افزون بر آنکه سبب کاهش نرخ تغلیظ  $CO_2$  اتمسفری و ترسیب آن و در نتیجه اصلاح گرمایش زمین می‌شود، بلکه باعث ارتقا کیفیت و کمیت در زمینه افزایش تولید محصول و امنیت غذایی، حفاظت خاک و اصلاح اراضی تخریب یافته، تصفیه آلاینده‌ها، تسهیل در انتقال و ذخیره آب، املاح، احیای خاک‌ها و اکوسیستم خواهد شد (متین‌فر و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۶).

عوامل بسیاری مانند توپوگرافی، کاربری اراضی، نوع خاک، مدیریت اراضی و پوشش گیاهی تغییرات مکانی کربن آلی را در مقیاس‌های مختلف کنترل می‌کنند (سپه‌وند و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۶۹). همچنین تغییر کاربری اراضی پس از سوخت‌های فسیلی میزان ذخایر کربن آلی خاک‌ها را دستخوش تغییر نموده و مهم‌ترین منبع انتشار کربن از طریق انسان به جو و یکی از دلایل اصلی تشدید اثر گلخانه‌ای و گرم شدن هوای کره زمین طی دهه‌های گذشته بوده است (شیری و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۶). بنابراین نظر به موارد ذکر شده، بررسی تغییرات میزان کربن آلی خاک جهت شناخت چرخه کربن در اکوسیستم‌های خاکی حائز اهمیت است. روش‌های رایجی که برای تعیین خصوصیات خاک همچون ماده آلی خاک در حال حاضر در سطح وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد، عموماً بر هزینه و وقت‌گیر بوده و تحلیل‌های شیمیایی آزمایشگاهی نیز به مراتب مواد شیمیایی خطرناکی را

وارد محیط زیست می‌نماید که ممکن است بر سلامت انسان و دیگر جانداران تأثیر مرگباری بگذارد (Reeves et al., 2001: 767). در این میان بررسی قابلیت داده‌های طیفی ماهواره‌ای در این زمینه می‌تواند مشکلات فوق را رفع کند. همچنین داده‌های سنجش از دور چند طیفی منبع مهمی برای تشخیص تغییرات و تهیه نقشه پوشش سطح زمین می‌باشد (اسمی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲: ۹۶). مطالعات نشان داده‌اند که ذخیره کربن آلی خاک در مناطق مختلف آب و هوایی زمین واکنش متفاوتی به گرمایش جهانی از خود بروز می‌دهند. تغییرات کاربری اراضی و اقلیمی تأثیر قابل توجهی بر کربن آلی خاک دارد. تاکنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه کربن آلی خاک انجام شده است.

Yu et al. (2022) تأثیر تخریب پوشش گیاهی را بر کربن آلی خاک در شمال شرق چین مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که محتوای کربن آلی خاک در تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی متفاوت است و تخریب پوشش گیاهی موجب کاهش محتوای کربن آلی خاک می‌شود. Yin et al. (2019) با بررسی‌های میدانی و مطالعات آزمایشگاهی اثرات تغییر کاربری اراضی و اقلیم را بر سهم جانوران در تجزیه لاش‌برگ بررسی کردند. نتایج آن‌ها حاکی از این بود که تغییر در الگوی بارش و دما به طور قابل توجهی سبب کاهش تجزیه لاش‌برگ از طریق گونه‌های میکروبی و جانوری در انواع مختلف کاربری اراضی می‌شود. بازگیر و مظاهری (۱۳۹۸) با بررسی‌های میدانی و مطالعات آزمایشگاهی تأثیر اقلیم و کاربری‌های مختلف اراضی را بر زیست‌توده و فعالیت‌های میکروبی خاک مورد پژوهش قرار دادند. براساس نتایج این پژوهش، با تغییر کاربری از جنگل به اراضی زراعی در اقلیم‌های خشک، کربن آلی زیست‌توده و فعالیت میکروبی خاک کاهش می‌یابد. بازگیر و همکاران (۱۳۹۹) تأثیر اقلیم‌های مختلف شامل ایوان (مرطوب)، ایلام (نیمه مرطوب) و سیروان (نیمه خشک) بر ویژگی‌های زیستی خاک درختان بلوط شاخه‌زاد و دانه‌زاد ارزیابی کردند. براساس نتایج این پژوهش مشخص شد که خاک‌های

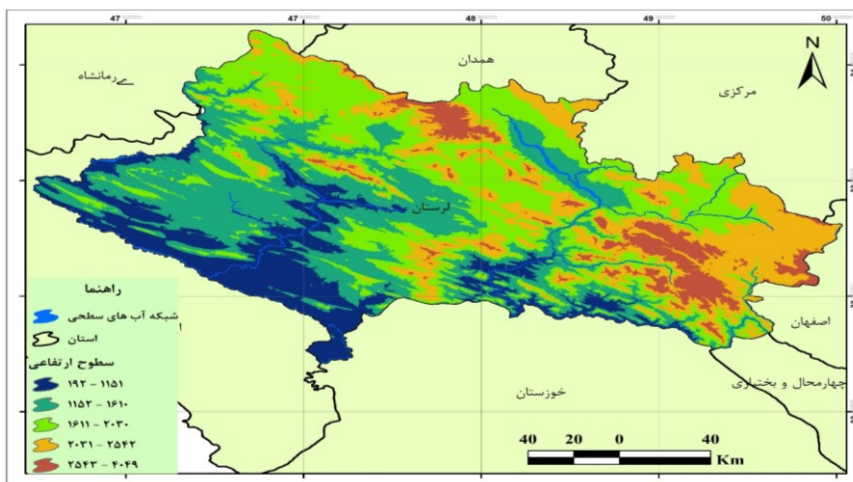
شده است.

جنگلی ایلام بیشترین و سیروان کمترین میزان کربن آلی را دارد.

### داده و روش

**معرفی منطقه مطالعاتی:** استان لرستان سرزمینی مرتفع و عمدتاً کوهستانی و ناهموار است که رشته کوه‌های زاگرس (زاگرس میانی) قسمت بیشتر آن را در بر گرفته است. میانگین این ارتفاعات حدود ۲۲۰۰ متر از سطح دریاست. پست‌ترین نقطه استان با ارتفاع ۲۳۹ متر در جنوب استان و بلندترین قله آن اشترانگوه با ارتفاع ۴۰۸۰ متر از سطح دریا در میان رشته کوه زاگرس قرار گرفته است. به طور کلی ناهمواری‌های استان به سه بخش کوهستانی، کوهپایه‌ای و دشت تقسیم می‌شود (شکل ۱).

جنگل‌های زاگرس به لحاظ وسعت، مسائل زیست محیطی و منابع آب و خاک از اهمیت زیادی برخوردارند که در استان‌های آذربایجان شرقی و غربی، کردستان، کرمانشاه، همدان، لرستان، ایلام، خوزستان، کهگیلویه و بویراحمد و فارس گسترش دارد (رستمی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۸۶ و نگهدار صابر و همکاران، ۱۳۹۹: ۲). با توجه به اثرپذیری بالای جنگل‌های بلوط منطقه زاگرس از پدیده تغییر اقلیم، این پژوهش با تکیه بر هدف‌های مذکور برای شناخت آثار و پیامدهای تغییر اقلیم بر اکوسیستم جنگل‌های بلوط استان لرستان در حوزه ذخیره و ترسیب کربن انجام



شکل ۱: توپوگرافی استان لرستان

شیمیایی خاک از جمله بافت خاک به روش هیدرومتری، وزن مخصوص ظاهری خاک به روش کلوخه و پارافین، پایداری خاکدانه به روش الکترو، pH خاک در عصاره ۱ به ۱ توسط دستگاه pH متر، هدایت الکتریکی خاک یا EC خاک در عصاره ۱ به ۱ توسط دستگاه هدایت سنج الکتریکی، کربن آلی خاک به روش والکلی و بلک<sup>۱</sup> (۱۹۳۴)، کربن آلی ذره‌ای، فسفر به روش اولسن، پتاسیم به روش استات آمونیوم، ازت به روش کج‌لدال و آهک به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شدند.

### داده‌ها

**نمونه برداری خاک و آماده‌سازی نمونه‌ها:** پس از بررسی چشمی تصویر رنگی و مشاهدات میدانی، به روش تصادفی طبقه بندی شده ۱۸۰ محدوده دارای پوشش درختی مشخص، مختصات آن‌ها به دستگاه GPS منتقل گردید. سپس با مراجعه به عرصه، مشخصات سطحی یادداشت و از هر نقطه تا عمق ۲۰ سانتی‌متری به مقدار دو کیلوگرم خاک برداشت و به آزمایشگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان منتقل شد. در نمونه‌های برداشت شده پس از خشک‌شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، برخی ویژگی‌های فیزیکی و

<sup>1</sup> Walkly and Black

برتری‌های متنوعی از جمله پوشش وسیع و تکراری، کاهش حجم عملیات میدانی، کاهش هزینه و همچنین به هنگام بودن اطلاعات است (مهدوی و شمسی، ۱۳۹۱: ۷۹). پایه سنجش از دور این است که اشیاء در طول موج‌های مختلف مقادیر متفاوتی از تابش را جذب و منتشر می‌کنند یا عبور می‌دهند.

از شاخص‌های پوشش گیاهی نیز برای برآورد تغییرات مکانی خصوصیات خاک استفاده شد. این شاخص‌ها از تصاویر ماهواره لندست ۵ و ۸ استخراج شدند. تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ از سایت سازمان نقشه‌برداری جغرافیایی ایالات متحده آمریکا (<https://earthexplorer.usgs.gov>) دریافت شد (جدول ۱). قبل از استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لازم است تصحیحاتی نیز بر روی آن‌ها انجام شود. یکی از این موارد تصحیحات رادیومتری می‌باشد. تصحیحات رادیومتری باعث حذف تابش‌های اتمسفری، اثرات توپوگرافی و اثرات آلبدو می‌شود. برای انجام تصحیح رادیومتری از نرم افزار ENVI نسخه 5.3 و روش Log Residual استفاده شد.

**شاخص‌های طیفی:** با استفاده از موقعیت باندهای جذبی و انعکاسی در طیف بازتابی و عوامل به وجود آورنده آن‌ها، می‌توان شاخص‌هایی تعریف کرد که به کمک آن شاخص‌ها، اطلاعات مربوط به گیاهان آشکار می‌شود. این شاخص‌ها امکان مطالعه گسترده پوشش گیاهی را فراهم می‌کنند (جدول ۲)

**اندازه‌گیری کربن‌آلی ذره‌ای:** ۲۵ گرم خاک از الک شماره ۲ عبور داده شد، خاک وزن شده را به ارلن انتقال داده و با ۱۰۰ میلی‌لیتر سدیم هگزا متافسفات ۵ درصد آمیخته شد، سپس خاک آمیخته شده به مدت یک ساعت به وسیله شیکر تکان داده و بر روی الک ۰/۰۵۳ میلی‌لیتری ریخته و چندین بار با آب مقطر شستشو داده شد. خاک باقی مانده به یک ظرف آلومینیومی انتقال یافت و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد و سپس آنالیز کربن بر روی این خاک‌ها صورت گرفت. این خاک‌ها فقط حاوی کربن‌آلی ذره‌ای هستند. در انتها سهم بخش کربن آلی ذره‌ای از کل کربن مشخص شد. کربن‌آلی ذره‌ای با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد.

$$\left[ \frac{1000 \text{ وزن خشک } (0.88)}{(1.724 A N C 100)} \right] \left[ 1 - \left( \frac{S}{B} \right) \right] OM = \%$$

که در این رابطه OM درصد ماده‌آلی خاک، S آمونیوم فرسولفات مصرفی برای نمونه (ML)، B شاهد، A بی کرومات پتاسیم (ML)، N نرمالیت‌ه بی کرومات پتاسیم، C وزن یک اکی والان کربن، ۱/۷۲۴ ضریب تبدیل کربن‌آلی به ماده آلی و ۰/۸۸ ضریب تبدیل درجه اکسیداسیون در ماده‌آلی می‌باشد.

**داده‌های سنجش از دور:** تصاویر ماهواره‌ای به عنوان یکی از منابع اطلاعاتی مکانی نسبت به سایر منابع متداول (مانند نقشه‌ها) و عکس‌های هوایی دارای

جدول ۱- تصاویر ماهواره ای استفاده شده برای منطقه مطالعاتی

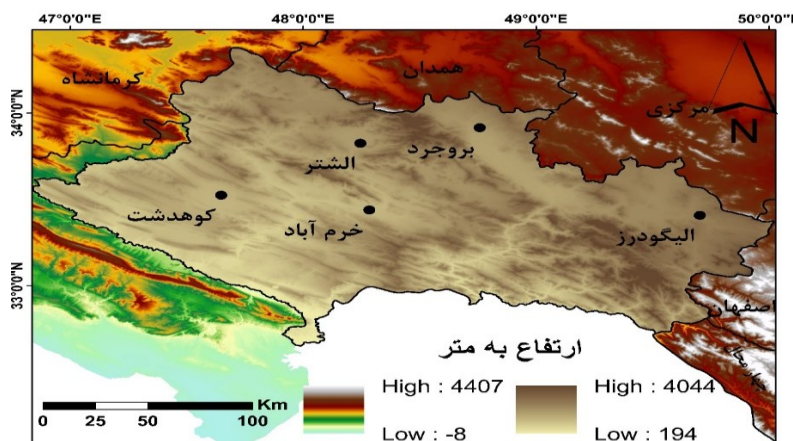
Satellite	Sensor	Acquisition Data	Start Time	Stop Time
Landsat-5	TM	1990/10/17	06:40:35	06:41:02
Landsat-5	TM	2000/10/12	06:59:32	06:59:59
Landsat-5	TM	2009/11/06	07:11:19	07:11:46
Landsat-8	OLI	2013/10/16	07:22:51	07:23:23
Landsat-8	OLI	2020/10/19	07:21:20	07:21:51

جدول ۲: شاخص‌های طیفی استفاده شده برای منطقه مطالعاتی

Vegetation Index	Acronym	Formula	Author and Year
Ratio Vegetation Index	RVI	$\frac{\rho_{NIR}}{\rho_R}$	Pearson and Miller (1972)
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$\frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$	Rouse et al. (1974)
Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI	$\frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R + L} (1 + L)$	Huete (1988)
Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	OSAVI	$\frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R + 0.16}$	Rondeaux et al. (1996)
Triangular Vegetation Index	TVI	$0.5(120(\rho_{NIR} - \rho_G) - 200(\rho_R - \rho_G))$	Broge and Leblance (2000)
Vegetation Condition Index	VCI	$VCI = 100 \times \frac{NDVI_i + NDVI_{min}}{NDVI_{max} + NDVI_{min}}$	Baniya et al (2019)
Temperature Condition Index	TCI	$TCI = 100 \times \frac{BT_{max} + BT_i}{BT_{max} + BT_{min}}$	نیک پی و مومنی (۱۳۹۸)

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده نشان داده شده است. همچنین در جدول ۳ مشخصات ایستگاه‌های منتخب نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارش از مدل SDSM استفاده شد.

داده‌های هواشناسی: در این پژوهش برای بررسی و پایش بارش و دما در استان لرستان از داده‌های ۵ ایستگاه همدید الشتر، الیگودرز، بروجرد، خرم‌آباد و کوهدشت که از طول دوره‌ی آماری و توزیع منطقه‌ای مناسبی برخوردار بودند، استفاده شد. در شکل (۲)



شکل ۲: موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در پژوهش

Likelihood، به صورت نظارت شده انجام شد. به منظور برآورد کربن آلی خاک پارامترهای محیطی و توپوگرافی که نماینده فاکتورهای خاکسازي و خصوصیات خاک هستند مورد استفاده قرار گرفت. پس از تجزیه آماری، با کمک آزمون مؤلفه‌های اصلی،

برای تهیه نقشه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سال‌های (۲۰۱۳، ۲۰۲۰) و لندست ۵ سال‌های (۲۰۰۹، ۲۰۰۰، ۱۹۹۰) استفاده شد. طبقه بندی تصاویر در نرم افزار Arc/GIS@ با استفاده از Image Classification، روش Maximum

ویژگی‌های مهم خاک که بیشترین تأثیر را در برآورد کربن آلی خاک دارند مشخص گردید. باندهای سنجنده‌های مورد استفاده در سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۰۹، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۰ و شاخص‌های گیاهی مستخرج از این سنجنده‌ها (جدول ۲)، همچنین لایه‌های مدل رقومی ارتفاع، شیب و جهت شیب برای مدل‌سازی آماده سازی شده و به محیط نرم‌افزار Unscramble وارد گردید. برای مدل‌سازی کربن آلی خاک از روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) استفاده شد تا بهترین مدل و رابطه در برآورد کربن آلی خاک به دست آید. برای ایجاد ارتباط بین متغیرهای وابسته و متغیرهای مستقل، PLS

متغیرهای تبیینی جدیدی ایجاد می‌کند. برخلاف مدل‌یابی معادلات ساختاری مبتنی بر کواریانس، حداقل مربعات جزئی (PLS)، به جای بازتولید ماتریس کواریانس تجربی، بر بیشترین واریانس تبیین شده متغیرهای وابسته با استفاده از متغیرهای مستقل تمرکز دارد. یکی از مهم‌ترین دلایل استفاده از تکنیک حداقل مربعات جزئی این است که این تکنیک به فرض نرمال بودن داده‌ها، به جامعه و حجم نمونه متکی نیست. همچنین این تکنیک امکان بررسی هم‌زمان روابط متغیرهای پنهان و متغیرهای قابل مشاهده را فراهم می‌آورد.

جدول ۳: مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب

ایستگاه	نوع	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول دوره آماری
الشت	همدید	۳۳° ۸۲'	۴۸° ۲۴'	۱۵۶۷	۲۰۱۷-۱۹۹۷
الیگودرز	همدید	۳۳° ۴۰'	۴۹° ۷۰'	۲۰۲۲	۲۰۱۷-۱۹۹۷
بروجرد	همدید	۳۳° ۹۱'	۴۸° ۷۵'	۱۶۲۹	۲۰۱۷-۱۹۹۷
خرم آباد	همدید	۳۳° ۴۳'	۴۸° ۲۸'	۱۱۴۸	۲۰۱۷-۱۹۹۷
کوهدشت	همدید	۳۳° ۵۲'	۴۷° ۶۴'	۱۱۹۸	۲۰۱۷-۱۹۹۷

### نتایج و بحث

**اقلیم:** مقایسه بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دما نشان داد که علی‌رغم اختلاف در مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در برخی از ماه‌ها، الگوی تغییرات دما و بارش به‌خوبی شبیه‌سازی شده است. در همین راستا براساس آزمون ویلکاکسون مشخص شد که در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه مقدار P-Value

بالاتر از سطح اطمینان ۰/۰۵ قرار دارد و بدین ترتیب می‌توان گفت که هیچ اختلاف معنی‌داری میان میانگین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دما و بارش وجود ندارد و می‌توان کارایی قابل قبول مدل SDSM در ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای دما و بارش در سطح منطقه مورد مطالعه مورد تأیید قرار داد (جدول ۴).

جدول ۴: نتایج آزمون ویلکاکسون و دقت داده‌های دما و بارش برآورد شده بوسیله مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۴-۲۰۰۶)

متغیر	الشت	الیگودرز	بروجرد	خرم آباد	کوهدشت
دما	Z	-۰/۳	-۰/۴	-۰/۳	-۰/۳
	P-V-value	۰/۷	۰/۶	۰/۷	۰/۲
بارش	Z	-۰/۴	-۰/۵	-۱	-۰/۷
	P-V-value	۰/۶	۰/۶	۰/۱	۰/۴

و اکاوی نتایج آزمون من‌کنندال، حاکی از روند افزایشی میانگین سالانه، کمینه و بیشینه دما در تمام

ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه (۱۹۹۷-۲۰۱۷) است. متوسط دمای بیشینه در دوره آینده

پیش‌بینی‌کننده‌های بزرگ‌مقیاس CanECM2 تحت سناریوهای RCP 2.6, RCP 4.5 و RCP 8.5 نشان داد که میزان بارش در ایستگاه‌های الشتر، بروجرد و کوهدشت به طور متوسط به ترتیب ۱۶، ۰/۳ و ۴ میلی‌متر کاهش و ایستگاه‌های الیگودرز و خرم‌آباد به ترتیب به میزان ۲/۸ و ۱۰/۵ میلی‌متر افزایش نسبت به دوره پایه دارد. همچنین براساس نتایج تمام سناریوهای انتشار مورد بررسی به نظر می‌رسد که در دوره آینده دور (۲۰۴۲-۲۰۶۲) میزان بارش در تمام ایستگاه‌های ناحیه مورد مطالعه نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد.

**کاربری اراضی:** تصاویر سنجنده OLI و TM در دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ بررسی و انتخاب و پس از اصلاحات اتمسفری و رادیو متریک طبقه بندی شدند. کلاس‌های کاربری اراضی شامل جنگل، مرتع، زراعت و خاک لخت و بیرون‌زدگی‌های سنگی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد بیشترین مساحت مربوط به کاربری اراضی جنگلی و کمترین آن اراضی لخت و بیرون‌زدگی‌های سنگی است. در دوره مورد بررسی مساحت اراضی مرتعی از ۱۹۰۰ هکتار به ۱۱۵۱ هکتار کاهش یافته است. مساحت اراضی زراعی و خاک لخت و بیرون‌زدگی سنگی افزایشی بوده است (جدول ۵). نتایج نشان می‌دهد در دوره مورد بررسی مساحت اراضی زراعی (دیم) روند رو به افزایشی دارد که ناشی از تغییر کاربری مراتع توسط کاربران به زراعت دیم است.

نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۱) و دور (۲۰۴۲-۲۰۶۲) در سطح منطقه مورد مطالعه براساس هر سه سناریوی انتشار بین ۰/۹ تا ۱/۳ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه بیشترین میزان افزایش در مقدار دمای بیشینه براساس سناریوی RCP 8.5 مشاهده شد. براساس نتایج هر سه سناریوی انتشار، مشخص شد که در سطح منطقه مورد مطالعه مقدار دمای بیشینه در دوره آینده دور (۲۰۴۲-۲۰۶۲) به طور متوسط ۰/۱ درجه سلسیوس نسبت به دوره آینده نزدیک افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که متوسط دمای کمینه در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه در طول دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۱) به میزان ۰/۱۷ تا ۰/۴۳ درجه سلسیوس و در دوره آینده دور (۲۰۴۲-۲۰۶۲) به میزان ۰/۳ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. در مجموع نتایج نشان داد که متوسط دما در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۱) در ایستگاه‌های الشتر، الیگودرز، بروجرد، خرم‌آباد و کوهدشت به ترتیب به میزان ۰/۶۴، ۰/۶۵، ۰/۷۴، ۰/۸۶ و ۰/۸۰ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از هر سه سناریوی انتشار نشان داد که در دوره آینده دور (۲۰۴۱-۲۰۶۲) متوسط دما در ایستگاه‌های الشتر، الیگودرز، بروجرد، خرم‌آباد و کوهدشت به ترتیب به میزان ۰/۷، ۰/۶، ۰/۸، ۰/۹ و ۰/۸ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. واکاوی نتایج شبیه‌سازی داده‌های بارش برای دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۱) با استفاده از

جدول ۵: مساحت انواع کاربری اراضی منطقه چنار بگالی (بر حسب؟)

تغییرات مساحت (هکتار) کاربری اراضی در دوره ۳۰ ساله					
نوع کاربری	۱۹۹۰	۲۰۰۰	۲۰۰۹	۲۰۱۳	۲۰۲۰
جنگل	۱۳۰۶۵/۹	۱۳۸۵۷/۵	۱۳۵۴۸/۴	۱۴۶۲۰/۳	۱۳۲۴۰
مرتع	۱۹۰۰/۵۳	۷۶۹/۵	۱۱۰۹/۳۴	۵۲۹/۶۵	۱۱۵۱/۱۹
زراعی	۱۶۲/۶۳	۳۴۲/۶۲	۵۷۹/۱۵	۲۴۵/۳۴	۲۳۳/۴۶
خاک لخت و بیرون‌زدگی سنگی	۶۶۸/۶۱	۸۲۷/۱	۵۴۲/۷۹	۴۰۲/۳۹	۱۱۷۳/۰۶

اراضی مرتعی به ترتیب ۱۲، ۹ درصد کاهش یافته اند و مساحت اراضی زراعی و فاقد پوشش گیاهی به تر

در منطقه مطالعاتی دیگر نتایج نشان می‌دهد در یک دوره زمانی ۳۰ ساله مساحت اراضی جنگلی و

شاخص‌های گیاهی: پس از آنکه معادلات روی تصاویر اجرا شد، براساس جدول ۷ رتبه‌بندی خشکسالی شاخص‌های VCI و TCI روی تصاویر در محیط GIS انجام گرفت و نقشه‌های نهایی به دست آمد.

تیب ۴۳ و ۷۵ درصد افزایش یافته است (جدول ۶). بطور کلی نتایج مناطق مطالعاتی نشان دهنده روند کاهشی مساحت کاربری های جنگلی و مرتعی و روند افزایشی کاربری های بایر و زراعت ذیم می‌باشد.

جدول ۶: سطح کاربری اراضی منطقه مطالعاتی داد آباد(واحد)

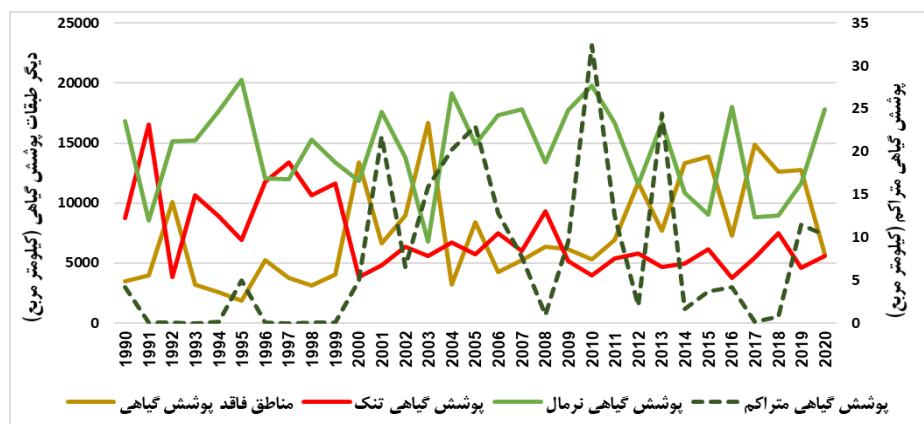
تغییرات مساحت (هکتار) کاربری اراضی در دوره ۳۰ ساله					
نوع کاربری	۱۹۹۰	۲۰۰۰	۲۰۰۹	۲۰۱۳	۲۰۲۰
جنگل	۸۲۴/۵۸	۸۴۰/۲۴	۷۴۰/۸۸	۸۳۳/۷۶	۷۲۱/۱۷
مرتع	۱۶۶/۸۶	۱۸۹	۱۳۱/۷۶	۲۰۲/۷۷	۱۵۱/۶۵
زراعی	۱۸۲/۲۸	۲۱۸/۲۵	۳۴۰/۰۲	۸۶/۷۶	۱۴۱/۶۶
خاک لخت و بیرون زدگی سنگی	۳۷۴/۰۴	۲۹۸/۳۵	۳۳۵/۸۸	۴۲۵/۷۹	۵۳۲/۳۶

جدول ۷: طبقه بندی شاخص‌های VCI و TCI (Vallejo-Villalta et al., 2019)

<۱۰	خشکسالی بسیار شدید
۱۰ - ۱۹/۹	خشکسالی شدید
۲۰ - ۲۹/۹	خشکسالی متوسط
۳۰ - ۳۹/۹	خشکسالی خفیف
≥۴۰	فاقد خشکسالی

گیاهی منطقه مورد مطالعه دستخوش تغییرات زیادی شده است. با توجه به جدول ۸ در سال‌های ۲۰۱۱، ۲۰۱۳، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۰ پهنه پوشش گیاهی نرمال قابل توجه بوده و ۵۷ تا ۶۲ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه را تحت پوشش قرار داده است.

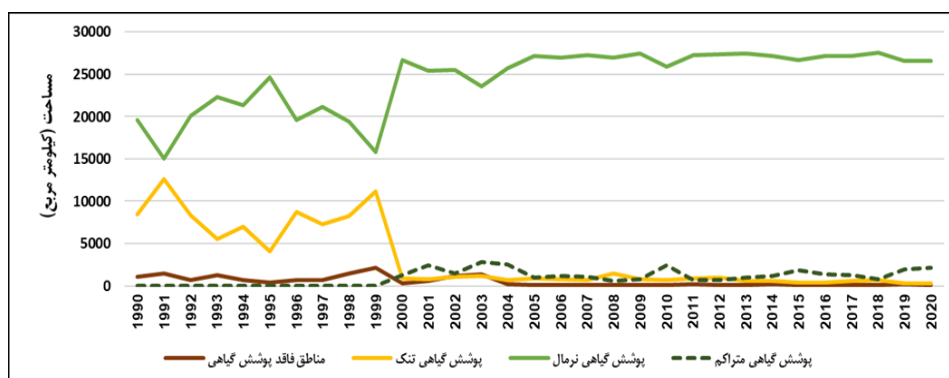
بررسی تغییرات تراکم پوشش گیاهی با استفاده از شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI): با توجه به شکل ۳ در بین سال‌های مورد مطالعه بیشترین مساحت مربوط به پهنه پوشش گیاهی متراکم مربوط به سال ۲۰۱۰ بوده است (۳۲/۴ کیلومتر مربع). در دیگر سال‌های مورد مطالعه پوشش



شکل ۳: تغییرات پوشش گیاهی استان لرستان براساس شاخص اختلاف نرمال شده‌ی پوشش گیاهی (NDVI)

مورد مطالعه دارا بودند. همچنین نتایج مقایسه تغییرات پوشش گیاهی سال ۲۰۲۰ نسبت به سال ۱۹۹۰ براساس شاخص SAVI نشان داد که در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال ۱۹۹۰ اراضی فاقد پوشش گیاهی و پوشش تنک به ترتیب به طور متوسط ۲/۳ و ۲۶ درصد کاهش و اراضی با پوشش نرمال و متراکم به ترتیب به طور متوسط ۲۱ و ۵ درصد افزایش داشته است.

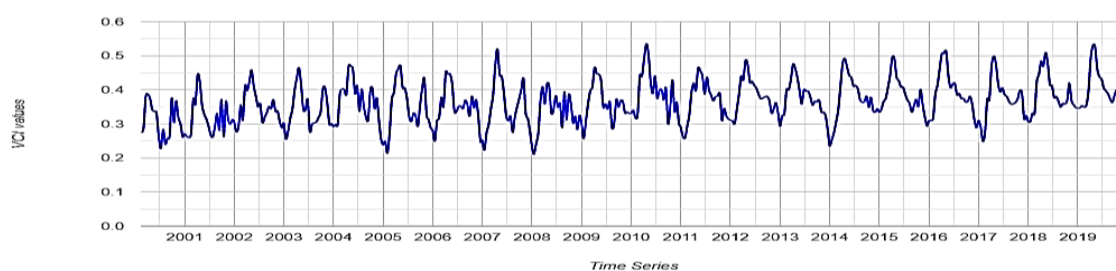
**بررسی تغییرات تراکم پوشش گیاهی با استفاده شاخص SAVI:** با توجه به شکل ۴، پوشش گیاهی طبقه متراکم و غنی در طول سال‌های مورد مطالعه دستخوش تغییرات زیادی شده است. سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۴، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ با پوشش ۵ تا ۶ درصد از مساحت گستره منطقه مورد مطالعه، بیشترین مساحت طبقه پوشش گیاهی متراکم را در بین سال‌های



شکل ۴: مساحت طبقات پوشش گیاهی براساس شاخص SAVI در دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۰ (مساحت به کیلومتر مربع)

متوسط در سال ۲۰۰۰ و پس از آن ۲۰۰۱ رخ داده است. همچنین نتایج نشان داد که در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۲، ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ تمام خشکسالی‌ها از نوع خفیف بوده است که اغلب در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس که معمولاً فصل معمول بارش در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک است رخ داده است.

**پایش زمانی شاخص VCI:** نتایج نشان داد که در طول دوره آماری مورد مطالعه خشکسالی‌ها از نوع متوسط تا خفیف بوده است. با توجه به شکل ۵ در بیشتر سال‌های مورد مطالعه خشکسالی‌ها از نوع خفیف بوده است که در این میان سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۹، ۲۰۱۲، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ بیشترین فراوانی خشکسالی را داشته اند. بیشترین خشکسالی از نوع

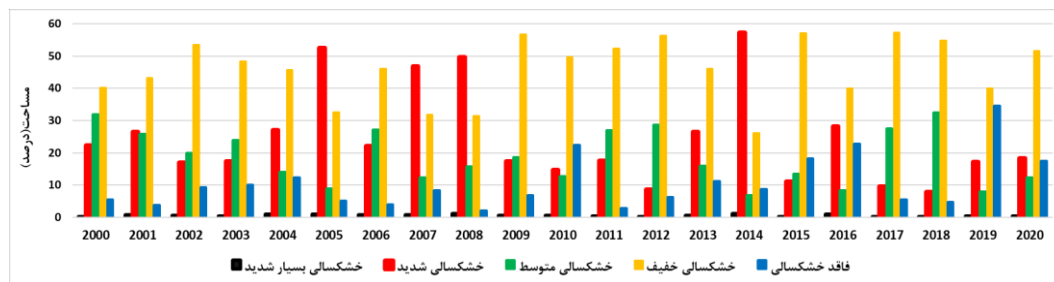


شکل ۵: نوسانات سری زمانی شاخص VCI در استان لرستان در دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۲۰

ترسالی می‌باشد. با توجه به شکل ۶ بیشترین گستره خشکسالی شدید متعلق به سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۱، ۲۰۰۵، ۲۰۰۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ بوده است که به ترتیب

**پایش مکانی شاخص VCI:** براساس نتایج سال‌های ۲۰۱۹ و پس از آن ۲۰۱۰، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ با مقادیر بالای VCI گویای شرایط مساعد گیاهی و به عبارتی

منطقه را فرا گرفته بوده است. مساحت از ۵۷/۳ و ۴۹/۷، ۴۶/۸، ۵۲/۵، ۲۶/۵، ۲۲/۳



شکل ۶: مساحت طبقات خشکسالی با استفاده از شاخص VCI در دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۰۰ (برحسب درصد)

تا ۲۰۰۴، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ از سطوح قابل توجه با پوشش گیاهی متراکم مشخص شده‌اند. در همین راستا براساس نتایج متین فر و همکاران (۱۴۰۳) مشخص شد که در استان لرستان در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ ترسالی رخ داده که به مراتب اثر مثبت بر میزان پوشش گیاهی داشته است. بطور کلی شاخص NDVI نشان‌دهنده افزایش سطوح پوشش گیاهی یا به عبارتی تغییر کاربری‌های جنگلی و مرتعی به سطوح لخت می باشد، این نتایج با روند تغییرات کاربری اراضی در منطقه منطبق می باشد.

**تغییرات خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک‌های منطقه:** خلاصه نتایج تجزیه خاک‌ها در جدول ۸ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد مقدار کربن آلی خاک‌ها حداقل ۰/۴۷ درصد و حداکثر آن ۸/۳۸ درصد می باشد. میزان کربن آلی ذره ای بین ۰/۲ تا ۶/۹۴ درصد متغیر است. دامنه تغییرات بالای کربن آلی و کربن ذره‌ای نشان دهنده تنوع نگهداشت و ذخیره کربن آلی در خاک‌های منطقه است. خاک‌های لخت و بیرون زدگی‌های سنگی کمترین ذخیره کربن آلی و خاک‌های کاربری‌های جنگلی بالاترین ذخیره کربنی را دارا هستند. بالا بودن کربن آلی ذره‌ای نشان‌دهنده افزایش مداوم بقایای گیاهی به خاک است و تداوم آن منجر به تشکیل ماده آلی و هوموس در خاک می شود. دامنه تغییرات وزن مخصوص ظاهری خاک‌ها بین ۱ تا ۱/۶ گرم بر سانتیمتر مکعب متغیر است که این ویژگی هم

**تغییرات شاخص‌های گیاهی و حرارتی در منطقه مورد مطالعه:** اثرات تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه در میزان سبزی‌گی پوشش گیاهی، مطابق نتایج بدست آمده از متوسط سالانه شاخص‌های گیاهی محاسبه شده گویای روند زمانی مشخص و معناداری نیست. بطوری که تغییرات میزان سبزی‌گی وابسته به نوسان‌های سالانه بارش و دما در سال‌های مختلف تقویت و تضعیف شده است. برای نمونه سال‌های ۱۹۹۲ (۰/۳۵)، ۲۰۰۰ (۰/۴۶)، ۲۰۰۳ (۰/۵۷،۵)، ۲۰۱۵ (۰/۴۸) و ۲۰۱۷ (۰/۵۱) با ضرایب بالایی از سطوح فاقد پوشش گیاهی مشخص شده‌اند. در مقابل سال‌های ۲۰۲۰ (۰/۶۱)، ۲۰۱۴ (۰/۸۶)، ۲۰۱۰ (۰/۶۸)، ۲۰۰۴ (۰/۶۵) و ۱۹۹۵ (۰/۷۰) با ضرایب بالایی از سطوح پوشش گیاهی نرمال مشخص شده‌اند. هرچند یک افزایش محسوسی در سطوح فاقد پوشش گیاهی در سال‌های بعد از ۲۰۱۲ مشاهده می شود، اما روند معناداری را نشان نمی دهد. در ضمن بطور کلی حتی در مرطوب‌ترین سال‌ها هم کمتر از یک درصد مساحت استان لرستان با پوشش گیاهی متراکم شناخته می شود.

با نگاهی به نتایج شاخص SAVI تفاوت‌های اساسی با NDVI نشان می دهد. بطوری که بطور مشخص سال‌های بعد از ۲۰۰۰ با مقادیر سبزی‌گی بالاتر ارائه شده‌اند. همچنین سطوح فاقد پوشش گیاهی بطور کلی با کاهش فاحشی نسبت به نقشه‌های NDVI مشخص شده‌اند، نهایتاً اینکه سال‌های ۲۰۰۰

تغییرپذیری کم، متوسط و زیاد هستند (et al., 1994) بنابراین مقادیر کربن آلی خاک، کربن آلی ذره‌ای، آهک، مقدار ازت، فسفر و میزان ترسیب کربن در خاک دارای تغییر پذیری مکانی بالا و سایر خصوصیات دارای تغییر پذیری متوسط تا کم می‌باشند.

نشاندنده تغییرات کربن آلی و مواد آلی خاک‌ها و تأثیر بر وزن مخصوص ظاهری خاک می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد، خاک‌های منطقه خاک‌هایی با مقادیر کم آهک تا شدیداً آهکی می‌باشند که به شدت وابستگی آنها را به مواد مادری نشان می‌دهد. مقادیر خصوصیات خاک با ضریب تغییرات ۰-۱۵٪، ۰-۳۵٪، ۱۰-۳۵٪ به ترتیب دارای

جدول ۸: آنالیز آماری ویژگی خاک منطقه مطالعاتی

ویژگی خاک	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	کشدگی	ضریب تغییرات
OC	%	۰/۴۷	۸/۳۸	۳/۱۱	۱/۷۳	۲/۹۹	۱/۰۹	۱/۰۴	۰/۵۶
OM	%	۰/۸۱	۱۴/۴۵	۵/۳۶	۲/۹۸	۸/۸۸	۱/۰۹	۱/۰۴	۰/۵۶
POM-	%	۰/۲۰	۶/۹۴	۲/۱۴	۱/۸۱	۳/۲۹	۱/۰۱	۰/۱۲	۰/۸۵
Caco3	%	۱/۷۵	۵۵/۰۰	۲۵/۲۹	۱۳/۲۴	۱۷۵/۴۰	۰/۲۴	-۰/۳۵	۰/۵۲
N	%	۰/۰۶	۰/۸۰	۰/۳۲	۰/۱۶	۰/۰۳	۰/۸۴	۰/۳۸	۰/۵۱
P	ppm	۱/۵	۱۰/۱۵	۳/۵۰	۱/۶۲	۲/۶۲	۱/۷۴	۴/۲۶	۰/۴۶
K	ppm	۹/۷۸	۳۸/۳۶	۲۰/۷۵	۵/۵۲	۳۰/۴۸	۱/۰۷	۱/۶۳	۰/۲۷
PH	_	۶/۲۱	۸/۳۹	۷/۶۹	۰/۴۸	۰/۲۳	-۱/۱۳	42/0	۰/۰۶
EC	ds/	۰/۲۲	۰/۷۴	۰/۴۲	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۶۹	-۰/۳۴	۰/۳۴
MWD	mm	۰/۱۳	۰/۶۱	۰/۳۲	۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۳۰	-۰/۴۲	۰/۳۹
BD	g/c	۱/۰۵	۱/۶	۱/۳۷	۰/۱۸	۰/۰۳	-۰/۵۷	-۰/۹۶	۰/۱۳
CS	T/ha	۱۰/۲۰	۲۲۹/۴۴	۸۰/۳۴	۴۵/۳۰	۲۰۵۲/۲۳	۱/۳۸	۲/۹۹	۰/۵۶

متغیرهای مستقلی را که برای مدل‌سازی کربن آلی خاک آماده شده‌اند را نشان می‌دهد.

برآورد و مدل‌سازی کربن آلی خاک: در این بخش نتایج مدل‌سازی کربن ارائه شده است. جدول ۹

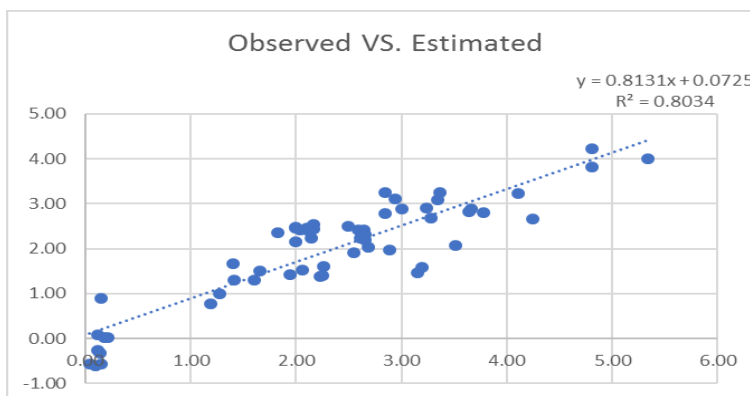
جدول ۹: داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی کربن آلی خاک

متغیرها	b2	b3	b4	b5	b6	b7	NDVI	SAVI	OSAVI	DEM	Slope	Aspect
B=NDVI,SAVI,OSAVI, جهت شیب=ASPECT, SLOP=معدل زقومی ارتفاع,DEM=باند های سنجنده B=												

کربن آلی خاک توسط مدل برازش شده انتخاب گردیده‌اند. متغیرهای فوق از بین ۱۲ متغیر معرفی شده محیطی دارای تأثیر معنی‌داری در برآورد کربن آلی خاک می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد مقادیر کربن آلی برآوردی مدل فوق با مقادیر اندازه‌گیری شده (آزمایشگاهی) دارای ضریب تبیین ۰/۸ و ضریب همبستگی ۸۹ درصد می‌باشد (شکل ۷).

پس از مدل‌سازی مناسب ترین مدل انتخاب گردید.  

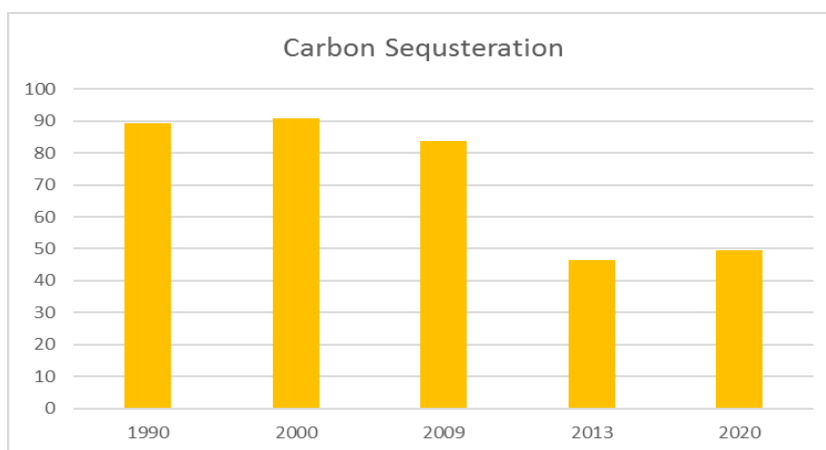
$$Y = (b2 * (-0.027)) + (b3 * 0.019) + (b4 * 0.015) + (b5 * (-0.009)) + (b6 * 0.006) + (b7 * 0.001) + (osavi * 0.082) + (slope * 0.244) + 3.927(2)$$
 همانگونه که رابطه (۲) نشان می‌دهد باندهای آبی، سبز، قرمز، مادون قرمز نزدیک، مادون ۲-رمز میانی، شاخص گیاهی تعدیل کننده اثر خاک بهبود یافته و شیب خاک متغیرهای مستقلی هستند که برای برآورد



شکل ۷: همبستگی کربن آلی اندازه گیری شده و برآورد شده سال ۲۰۲۰

منتهی به سال ۲۰۲۰ می‌باشد که منجر به کاهش تولید مواد آلی و کربن آلی ذخیره شده در خاک خواهد شد (شکل‌های ۸ و ۹). میزان ترسیب کربن در واحد زمان به خصوصیات رشد گونه‌های گیاهی و شیوه‌های مدیریت، تغییر کاربری اراضی، نوع عملیات احیایی، شرایط فیزیکی و بیولوژیکی خاک و ذخیره قبلی کربن در خاک بستگی دارد. Post et al (2000) بیان می‌دارند، نوع کاربری اراضی عامل مهم و مؤثری در ذخیره‌سازی ماده آلی در خاک است و نه تنها مقدار ماده آلی خاک را کنترل می‌کند، بلکه بر ترکیب و کیفیت مواد آلی خاک نیز تأثیر می‌گذارد.

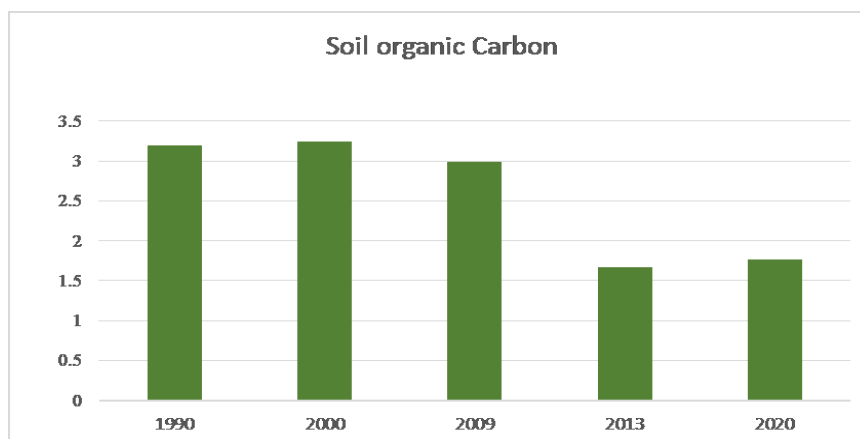
مقادیر کربن آلی و کربن تثبیت شده در محیط خاک در سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ بطور متوسط نشان‌دهنده کاهش آنها است (جدول ۱۰) همچنین به تبعیت از کاهش کربن آلی خاک میزان تثبیت کربن نیز در خاک‌ها روند کاهشی را نشان می‌دهد. همانگونه که جدول‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهند تغییرات کاربری اراضی از مرتع و جنگل به زراعی و فاقد پوشش گیاهی در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ اتفاق افتاده است، از مساحت کاربری‌های جنگلی و مرتعی کاسته شده و به مساحت اراضی فاقد پوشش گیاهی افزوده شده است. این تغییرات موید کاهش سطوح پوشش گیاهی و به تبعیت از آن کاهش میزان بیومس تولیدی در دوره



شکل ۸: روند تغییرات کربن آلی تثبیت شده در خاکهای منطقه مطالعاتی

جدول ۱۰: خلاصه اماریمقادیر برآورد کربن آلی و کربن تثبیت شده خاک سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰

1990	2000	2009	2013	2020		
1.5	1.664179	1.261779	0.054781	0.039	MIN	OC%
4.61	4.391223	4.67967	4.097757	4.485	Max	
3.190833	3.242548	2.989351	1.662781	1.76715	Average	
0.571843	0.558528	0.780674	0.997521	0.864252	STED	
89.34333	90.79135	83.70184	46.55787	49.4802	Carbon Sequestration(Ton/Ha)	



شکل ۹: روند تغییرات کربن آلی خاک‌های منطقه مطالعاتی

### نتیجه گیری

درجه‌سلسیوسی متوسط دما در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ در استان لرستان اشاره نمودند.

واکاوی نتایج شبیه‌سازی داده‌های بارش برای دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۱) با استفاده از پیش‌بینی‌کننده‌های بزرگ‌مقیاس CanECM2 تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 نشان داد که میزان بارش در ایستگاه‌های الشتر، بروجرد و کوه‌دشت به طور متوسط به ترتیب ۱۶، ۳ و ۴ میلی‌متر کاهش و ایستگاه‌های الیگودرز و خرم‌آباد به ترتیب به میزان ۲/۸ و ۱۰/۵ میلی‌متر افزایش نسبت به دوره پایه دارد. در همین زمینه پروانه و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهش خود گزارش نمودند که در همه ایستگاه‌های سینوپتیک استان لرستان وضعیت ترسالی در دوره آینده ۲۰۱۱-۲۰۳۰ نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. همچنین براساس نتایج تمام سناریوهای انتشار مورد بررسی به نظر می‌رسد که در دوره آینده دور (۲۰۴۲-۲۰۶۲) که میزان بارش در سطح ناحیه مورد مطالعه در دوره آینده دور نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. در همین زمینه نادری و

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، متوسط دمای بیشینه در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۱) و دور (۲۰۴۲-۲۰۶۲) در سطح منطقه مورد مطالعه براساس هر سه سناریوی انتشار بین ۰/۹ تا ۱/۳ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. نتایج پژوهش‌های مشابه انجام شده در مناطق مختلف کشور نیز گویای افزایش دما می‌باشد. در این زمینه می‌توان به پژوهش‌های عباس‌نیا و همکاران (۱۳۹۵)، چوبه و همکاران (۱۳۹۶)، هوشیار و همکاران (۱۳۹۷) مصباح‌زاده و همکاران (۱۳۹۷)، و جهانگیر و همکاران (۱۳۹۷) در ایستگاه‌های واقع در بخش مرکزی ایران اشاره کرد. همچنین عباس‌نیا و همکاران (۱۳۹۶) افزایش دمای بیشینه را بین ۰/۲ تا ۲/۲ در سطح کل ایران نشان دادند. همچنین بررسی مطالعات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی متغیر دما در استان لرستان نشان‌دهنده افزایش دما در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۱) و آینده دور (۲۰۴۲-۲۰۶۲) بود. در همین زمینه نادری و همکاران (۱۳۹۶) به افزایش ۱/۷

همکاران (۱۳۹۶) کاهش ۴۷ درصدی بارش در دوره آینده ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره پایه را در حوزه رود سیمره گزارش کردند. دارابی (۱۳۹۷) اقلیم استان لرستان را تحت سناریوی انتشار RCP4.5 و مدل CanESM2 برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ بررسی نمودند و به این نتیجه رسید که در دوره آینده ۲۰۲۱-۲۰۵۰ مقدار بارندگی کاهش و دما افزایش می‌یابد.

تغییرات میزان سبزیگی وابسته به نوسان‌های سالانه بارش و دما در سال‌های مختلف تقویت و تضعیف شده است. سال‌های ۱۹۹۲ (۳۵٪)، ۲۰۰۰ (۴۶٪)، ۲۰۰۳ (۵۷٫۵٪)، ۲۰۱۵ (۴۸٪) و ۲۰۱۷ (۵۱٪) با ضرایب بالایی از سطوح فاقد پوشش گیاهی مشخص شده‌اند. در مقابل سال‌های ۲۰۲۰ (۶۱٪)، ۲۰۱۴ (۸۶٪)، ۲۰۱۰ (۶۸٪)، ۲۰۰۴ (۶۵٪) و ۱۹۹۵ (۷۰٪) با ضرایب بالایی از سطوح پوشش گیاهی نرمال مشخص شده‌اند. هرچند یک افزایش محسوسی در سطوح فاقد پوشش گیاهی در سال‌های بعد از ۲۰۱۲ مشاهده می‌شود، بطور کلی حتی در مرطوب‌ترین سال‌ها هم کمتر از یک درصد مساحت استان لرستان با پوشش گیاهی متراکم شناخته می‌شود. بطور کلی شاخص NDVI نشان‌دهنده افزایش سطوح فاقد پوشش گیاهی یا به عبارتی تغییر کاربری‌های جنگلی و مرتعی به سطوح لخت می‌باشد، این نتایج با روند تغییرات کاربری اراضی در منطقه منطبق می‌باشد. در همین راستا شیرواند و همکاران (۱۳۹۹) نیز در پژوهش خود به این نتیجه دست یافتند که میزان شاخص NDVI در استان لرستان کاهش یافته است که نشان‌دهنده فراگیر بودن روند کاهش پوشش جنگلی در این استان است.

تغییر کاربری اراضی از جنگل و مرتع به اراضی بایر و فاقد پوشش گیاهی، تغییرات شاخص دمایی منتج از محاسبات تصاویر ماهواره‌ای که نشان‌دهنده استرس در پوشش گیاهی به علت درجه حرارت و خشکی بالا است. افزایش دوره‌های خشکی با تداوم بالا به ویژه در مقیاس‌های زمانی نه ماهه و دوازده ماهه بیشترین تأثیر را بر کاهش سبزیگی جنگل‌های استان لرستان داشته است (میری و همکاران، ۱۴۰۰: ۱).

همچنین براساس پژوهش عطارد و همکاران (۱۳۹۴) عطارد و همکاران (۱۴۰۰) مشخص شده است که یکی از مهم‌ترین دلایل خشکیدگی بوم‌سازگان جنگلی استان لرستان، تغییر عوامل اقلیمی (افزایش دما و کاهش بارش) می‌باشد. از طرف دیگر شاخص‌های گیاهی NDVI, VCI, SAVI هم بیان‌کننده کاهش سطوح دارای پوشش گیاهی می‌باشند که منجر به کاهش زیست توده گیاهی و کاهش تولید ماده آلی در کاربری‌های تغییر یافته می‌گردد. در نتیجه رشد پوشش گیاهی ورود ماده آلی به خاک به واسطه تجزیه ریشه و لاشبرگ افزایش می‌یابد. Shangguana et al (2018) اثر تغییر کاربری بر ذخیره کربن خاک طی دوره ۱۹۷۳ تا ۲۰۱۲ در حوضه خشک و نیمه خشک رودخانه شیانگ چین را بررسی نمودند، نتایج آنها نشان داد اولاً تغییر کاربری اراضی در منطقه خشک و نیمه خشک مورد مطالعه و تأثیر بر مقدار کربن آلی خاک تحت تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که تغییر کاربری زمین تأثیر قابل توجهی بر مقدار کربن داشته بطوریکه ذخایر کربن خاک در سال‌های ۱۹۷۳ تا ۲۰۱۲ به میزان ۳/۸۹ ترا گرم کاهش داده است. این نتایج با آنچه در تحقیق حاضر به آن دست یافته‌ایم مطابقت دارد. بطور کلی با توجه به روند کاهش ترسیب کربن از ۸۹ تن در هکتار به ۵۰ تن در هکتار در بازه زمانی ۳۰ ساله می‌توان انتظار داشت. براساس نتایج به دست آمده ارتباط قابل توجه و معنی‌داری میان ماده آلی خاک و انعکاس‌های محدوده‌های طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی وجود دارد. همچنین نتایج حاکی از آن بود که مقادیر کربن آلی برآوردی مدل به دست آمده در این پژوهش با مقادیر اندازه-گیری شده (آزمایشگاهی) دارای ضریب تبیین ۰/۸ و ضریب همبستگی ۸۹ درصد بود که بیانگر دقت قابل توجه مدل به دست آمده می‌باشد. این نتیجه با نتایج پژوهش‌های متین‌فر و همکاران (۱۳۹۷) و Das et al (2023) مطابقت دارد که نشان دادند مدل PLSR برای برآورد کربن آلی خاک کارایی و دقت قابل توجهی دارد. براساس نتایج به دست آمده می‌توان

پیش‌بینی است.

گفت که شرایط آب و هوایی در ترکیب گونه‌های گیاهی و زیست توده و میزان کربن آلی خاک می‌تواند تاثیر گذار باشد. با سناریوی اقلیمی موجود و مدیریت فعلی منابع طبیعی وضعیت پوشش گیاهی منطقه فقیر و کاهش مقادیر ترسیب کربن ناشی از کاهش پوشش گیاهی در آینده قابل

### تشکر و قدر دانی

این پژوهش با کمک مالی صندوق حمایت از پژوهشگران (INSF) انجام گرفته است، نویسندگان کمال قدر دانی را از این صندوق اعلام می‌نمایند.

### منابع

۱. اسمی‌زاده، سعیده، لندی، احمد، متین‌فر، حمیدرضا. (۱۴۰۲). استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های طیفی در برآورد مقدار کربن آلی خاک در جنگل‌های زاگرس میانی در خوزستان، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۵ (۱)، ۹۵-۱۰۶. <https://doi.org/10.22034/jest.2020.35742.4259>
۲. بازگیر، مسعود و مظاهری، معصومه. (۱۳۹۸). تأثیر اقلیم و کاربری‌های مختلف اراضی بر زیست‌توده و فعالیت‌های میکروبی خاک، مجله جنگل ایران، ۱۱ (۲)، ۱۷۹-۱۹۴. [https://www.ijf-isaforestry.ir/article\\_93405.html](https://www.ijf-isaforestry.ir/article_93405.html)
۳. بازگیر، مسعود، منتی، طاهره، رستمی‌نیا، محمود، مهدوی، علی. (۱۳۹۹). زیست توده و فعالیت میکروبی خاک‌های جنگلی بلوط در سه منطقه از استان ایلام، زیست شناسی خاک، ۸ (۲)، ۱۵۵-۱۶۴. <https://doi.org/20.1001.1.23452536.1399.8.2.5.2>
۴. پروانه، بهرو، شیراوند، هنگامه و درگاهیان، فاطمه. (۱۳۹۴). پیش‌بینی وضعیت خشکسالی استان لرستان طی دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ با استفاده از ریزمقیاس نمایی ۴ مدل گردش عمومی جو، فصلنامه جغرافیایی سرزمین، ۱۲ (۴۵)، ۱-۱۴. [https://journals.srbiau.ac.ir/article\\_9618.html](https://journals.srbiau.ac.ir/article_9618.html)
۵. جهانگیر، محمد حسین، ساداتی نژاد، سید جواد و حقیقی، پارسا. (۱۳۹۷). پیش‌بینی پارامترهای دمایی تحت مدل CanEMS2 (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک لار)، ترویج و توسعه آبخیزداری، ۶ (۲۲)، ۴۵-۵۲. [https://www.wmji.ir/article\\_254778.html](https://www.wmji.ir/article_254778.html)
۶. چوبه، سپیده، فرخ‌زاده، بهنوش و گودرزی، مسعود. (۱۳۹۶). پهنه‌بندی اثرات تغییر اقلیم روی الگوی دمایی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل HadCM3 (مطالعه موردی: استان اردبیل)، ترویج و توسعه آبخیزداری، ۵ (۱۶)، ۱۷-۲۳. [https://www.wmji.ir/article\\_696842.html](https://www.wmji.ir/article_696842.html)
۷. دارابی، حمید. (۱۳۹۷). اثر تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر شرایط بحرانی هیدرولوژیک دز حوزه آبخیز ماربره، استان لرستان. رساله دکتری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
۸. رستمی، علی، کرمی، مونا، حیدری، مهدی. (۱۳۹۸). ترسیب کربن و رابطه آن با برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در خاک توده طبیعی بلوط و جنگل‌کاری‌های شهرستان ایلام، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۰، ۱۸۵-۱۹۹.
۹. سپه‌وند، هانیه، فیضیان، محمد، میرزایی تالارپشتی، رضا، مولر، تورستن. (۱۳۹۹). مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری کربن آلی در کاربری‌های مختلف خاک‌های آهکی استان لرستان، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۴ (۱)، ۱۶۹-۱۷۷. <https://www.magiran.com/p2130928>
۱۰. شیرینی، نیما، حسینی، شعله و غفار زاده، حمیدرضا. (۱۳۹۳). بررسی پدیده تغییر اقلیم و تأثیرات آن بر کاربری اراضی طبیعی حوضه آبریز گرگان رود، محیط زیست طبیعی، ۶۷ (۱)، ۲۵-۳۹. Doi: [10.22059/JNE.2014.50997](https://doi.org/10.22059/JNE.2014.50997)
۱۱. شیراوند، هنگامه، خالدی، شهریار، بهزادی، سعید، شگری سنجابی، حجت اله. (۱۳۹۹). پایش و ارزیابی تغییرات پوشش و زوال جنگلهای بلوط در استان لرستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل BFAST، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۵۷، ۲۶۵-۲۸۰. <https://doi.org/10.29252/jgs.20.57.265>
۱۲. عطارد، پدram، بیرانوند، سمیرا، عسگری، محمد، فنایی، نفیسه، هاشم‌زاده، مهدیه. (۱۴۰۰). اثرگذاری نوسانات بارندگی بر زوال جنگلهای ناحیه رویشی زاگرس در استان‌های ایلام و لرستان، مجله جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران، ۲، ۱۴۱-۱۵۴. <https://doi.org/10.22034/ijf.2021.136938>

۱۳. عطارد، پدram، صادقی، محمد معین، طاهری سرتشنیزی، فریدون، ساروتی، سعید، عباسیان، پریسا، مسیح پور، مهرنوش، کردرستمی، فرشته، دریکوندی، آرش. (۱۳۹۴). اثرگذاری عوامل اقلیمی و تبخیر و تعرق بر زوال جنگل‌های زاگرس مرکزی در استان لرستان، تحقیقات حمایت و حفاظت جنگل‌ها و مراتع ایران، ۱۳، ۲، ۹۷-۱۱۲.  
<https://doi.org/10.22092/ijfrpr.2016.106018>
۱۴. عباس‌نیا، محسن، طاوسی، تقی و خسروی، محمود. (۱۳۹۶). ارزیابی جامع تغییرات فصلی آینده دمای حداکثر ایران طی دوره گرم براساس مدل‌های گردش عمومی جو، آمایش جغرافیایی فضا، ۷ (۲۵)، ۱۲۱-۱۳۴.  
[https://gps.gu.ac.ir/article\\_54244.html](https://gps.gu.ac.ir/article_54244.html)
۱۵. عباس‌نیا، محسن، طاوسی، تقی، خسروی، محمود و تروس، حسین. (۱۳۹۵). تحلیل دامنه عدم قطعیت تغییرات آینده دمای حداکثر روزانه بر روی ایران با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، اطلاعات جغرافیایی، ۲۵ (۹۷)، ۳۰-۴۳.  
<https://doi.org/10.22131/sepehr.2016.20134>
۱۶. متین‌فر، حمیدرضا، محمودزاده، حمید و فاریابی، آذر. (۱۳۹۷). برآورد مقدار ماده آلی خاک، با استفاده از داده‌های طیفی و مدل‌های آماری رگرسیون حداقل مربعات جزئی و رگرسیون مؤلفه اصلی، سنجش از دور و GIS ایران، ۱۰ (۲)، ۱۵-۳۲.  
[https://gisj.sbu.ac.ir/article\\_96497.html](https://gisj.sbu.ac.ir/article_96497.html)
۱۷. متین‌فر، حمیدرضا، شمسی پور، علی اکبر و صادقی، حدیث. (۱۴۰۲). پایش خشکسالی اکولوژیک زاگرس میانی، سنجش از دور و GIS ایران، ۱۵ (۳)، ۱۲۵-۱۴۲. doi: 10.48308/gisj.2023.102804
۱۸. مصباح‌زاده، طیه، میراکبری، مریم، محسنی ساروی، محسن، خسروی، حسن و مرتضایی فریزه‌ندی، قاسم. (۱۳۹۷). ارزیابی کارایی مدل سری CMIP5 در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی بارندگی، دما و سرعت باد (مطالعه موردی: استان یزد)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۰ (۳)، ۵۹۳-۶۰۹. Doi: 10.22059/JPHGR.2018.248177.1007156
۱۹. محمودزاده، حمید، متین‌فر، حمیدرضا و تقی‌زاده مهرجردی، روح‌الله. (۱۳۹۹). رقومی سازی کربن آلی خاک با شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره در استان کردستان، مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۰ (۴): ۷۷-۹۸. DOI: 10.22069/ejsms.2021.18090.1958
۲۰. مهدوی، علی و فلاح شمسی، رشید. (۱۳۹۱). تهیه نقشه تغییرات سطح جنگل با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر LISS-III ماهواره IRS (مطالعه موردی: شهرستان ایلام)، مجله پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۱۹ (۱): ۷۷-۹۲. Doi: 20.1001.1.23222077.1391.19.1.5.6
۲۱. میری، مرتضی، زند، مهران، رضیعی، طیب، نوروزی، علی اکبر. (۱۴۰۰). بررسی اثرات خشکسالی هواشناسی بر خشکیدگی جنگل‌های بلوط غرب ایران، مورد مطالعه (جنگل‌های استان لرستان)، پژوهش‌های اقلیم شناسی، ۴۶، ۱-۱۶.
۲۲. نادری، سهراب، گودرزی، مسعود و قدمی دهنو، محمد. (۱۳۹۶). اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی در حوزه سیمره، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۱ (۳۹)، ۷۰-۷۶. Doi: 20.1001.1.20089554.1396.11.39.2.0.76-70
۲۳. نگهدار صابر، محمدرضا، دیداری، شهره، پاکبرو، عباسی، علیرضا. (۱۳۹۹). ارزیابی خشکیدگی جنگل‌های بلوط با استفاده از تصویر اسپات ۶ (مطالعه موردی: منطقه کهمره در استان فارس)، سنجش از دور و GIS ایران، ۴، ۱-۱۸. <https://doi.org/10.52547/gisj.12.4.1>
۲۴. نیک پی، حسین و مؤمنی، مهدی. (۱۳۹۸). تأثیر پهنه‌بندی اقلیمی و ارتفاعی بر همبستگی شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور با داده بارشی و معرفی شاخص‌های محلی، سنجش از دور و GIS ایران، ۱۱ (۲)، ۴۷-۶۲. Doi: 10.52547/GISJ.11.2.47
۲۵. همایی، مهدی، نوری میلاد و بنایان محمد. (۱۳۹۶). بررسی تغییرات تبخیر و تعرق مرجع طی سده‌ی بیست‌ویکم در برخی مناطق نیمه‌خشک ایران، تحقیقات آب‌و خاک ایران، ۴۸ (۲)، ۲۵۲-۲۴۱. doi: 10.22059/IJSWR.2017.62578
۲۶. هوشیار، محمود، سبحانی، بهروز و حسینی، اسعد. (۱۳۹۷). چشم‌انداز تغییرات دماهای حداکثر ارومیه با استفاده از ریزگردانی آماری خروجی مدل CanESM2، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۲ (۶۳)، ۳۰۵-۳۲۵.
27. Baniya, B., Tang, Q., Xu, X., Haile, G & Chhipi-Shrestha, G. (2019). Spatial and Temporal Variation of Drought Based on Satellite Derived Vegetation Condition Index in Nepal from 1982–2015. *Sensors* 19(2), 430. <https://doi.org/10.3390/s19020430>.
28. Das, B., Chakraborty, D., Kumar Singh, V., Das, D., Narayan Sahoo, R., Aggarwal, P., Dayesh Murgaokar, D., Prasad Mondal, B. (2023). Partial least square regression based

- machine learning models for soil organic carbon prediction using visible–near infrared spectroscopy. *Geoderma Regional*, 33, e00628. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00628>
29. Post, W.M., & Kwon, K.C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 6(3), 317-328. DOI:10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x
30. Reeves, J.B., McCarty, G.W., & Reeves, V.B. (2001). Mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for the Quantitative analysis of agricultural soils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49 (2), 766–772. DOI:10.1021/jf0011283
31. Shangguana, Z., Deng, L., Wang, G., & Liu, G. (2016). Effects of age and land-use changes on soil carbon and nitrogen sequestrations following cropland abandonment on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 90, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.086>
32. Vallejo-Villalta, I., Rodríguez-Navas, E., Márquez-Pérez, J. (2019), Mapping Forest Fire Risk at a Local Scale—A Case Study in Andalusia (Spain). *Environments*, 6 (3), 1-22. <https://doi.org/10.3390/environments6030030>
33. Walkly, A., & Black, I.A. (1934). An Examination of Digestion Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration. *Soil Science Society of American Journal*, 37, 29-38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
34. Iding, LP., Bouma, J., & Goss, DW. (1994). Impact of spatial variability on interpretive modeling. In: Bryant, R.B., Arnold, R.W. (Eds.), Quantitative modeling of soil forming processes. *SSSA Special Publication, Madison*, 39, 61-75.
35. Yin, R., Eisenhauer, N., Auge, H., Purahong, W., Schmidt, A., & Schädler, M. (2019). Additive effects of experimental climate change and land use on faunal contribution to litter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 131, 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.01.009>
36. Yu, P., Li, Y., Liu, S., Ding, Z., Zhang, A., Tang, X. (2022). The quantity and stability of soil organic carbon following vegetation degradation in a salt-affected region of Northeastern China. *CATENA*, 211, 105984. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105984>.