

Quantitative Assessment of Desertification Expansion Using Spatio-temporal Variations of Net Primary Production in Arid Regions of Northeastern Iran

J. Dashti Amirabad¹, Sh. Nikoo^{2*}, M. Rahimi³, M. Akbari⁴

1. PhD student of combat desertification, Department of Combating Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Combating Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran.
3. Associate Professor, Department of Combating Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran.
4. Assistant Professor, Department of Desert Areas Management, Faculty Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

* Corresponding Author: shimanikoo@semnan.ac.ir

Received date: 11/12/2022

Accepted date: 15/01/2023



[10.22034/JDMAL.2023.1982658.1403](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2023.1982658.1403)

Abstract

Net primary production is a sensitive index to changes in climatic factors and human activities. The present study was conducted with the aim of quantitatively evaluating the relative role of climate change and human activities on the development of desertification in Torbat Heydarieh and Bojnord based on the spatio-temporal variations of net primary production. First, primary net production was estimated by ground measurement. Subsequently, it was simulated using the CASA model in statistical period between 1986 and 2017. Six scenarios were designed to determine the relative role of climate change and human activities in the expansion or inversion of desertification. The results of the research showed that net primary production has declined over the 31-year period and that the trend in its changes is negative. An examination of different desertification scenarios showed that the city of Bojnord is under the scenario of expansion of desertification due to climate change, and Torbat Heydarieh city is under the scenario of desertification expansion due to the interaction between climate change and human activities. Based on this, the trend of changes in actual and potential primary net production in Bojnord and Torbat Heydarieh cities was negative and its intensity was classified in the low to medium decline category. Also, the slope trend of changes in primary net production caused by human activities in Torbat Heydarieh city was positive and in the low to medium increase class, and in Bojnord city, it was negative and in the low decrease class. The study of the development or return of desertification scenarios showed that 61.23% of the total area of the study area was affected by the expansion and development of desertification due to the impacts of climatic factors, and 38.77% of those affected by the interaction of climatic factors and human activities in expansion of desertification.

Keywords: Climate change scenarios; Human activities; Statistical tests; Land degradation





ارزیابی کمی گسترش بیابان‌زایی با بهره‌گیری از تغییرات زمانی-مکانی تولید خالص اولیه در مناطق خشک شمال شرق ایران

جمال دشتی امیرآباد^۱، شیما نیکو^{۲*}، محمد رحیمی^۳، مرتضی اکبری^۴

۱. دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
 ۲. استادیار، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویر شناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
 ۳. دانشیار، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویر شناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
 ۴. استادیار، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- * نویسنده مسئول: shimanikoo@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵

doi: [10.22034/JDMAL.2023.1982658.1403](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2023.1982658.1403)

چکیده

تولید خالص اولیه یک شاخص حساس به تغییرات عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کمی نقش نسبی تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر توسعه بیابان‌زایی در شهرستان‌های تربت حیدریه و بجنورد بر پایه بهره‌گیری از تغییرات زمانی-مکانی تولید خالص اولیه انجام شد. ابتدا تولید خالص اولیه با اندازه‌گیری زمینی برآورد شد. سپس با استفاده از مدل CASA و در طی دوره آماری ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۵ شبیه‌سازی شد. برای تعیین نقش نسبی تغییرات اقلیم و فعالیت‌های انسانی در توسعه یا بازگشت بیابان‌زایی، شش سناریو طراحی شد. نتایج پژوهش نشان داد که تولید خالص اولیه در طول دوره ۳۱ ساله کاهش یافته و روند تغییرات آن منفی است. بررسی سناریوهای مختلف بیابان‌زایی نشان داد که شهرستان بجنورد تحت سناریوی گسترش بیابان‌زایی ناشی از تغییرات اقلیمی و شهرستان تربت حیدریه تحت سناریوی گسترش بیابان‌زایی ناشی از تعامل بین تغییرات اقلیم و فعالیت‌های انسانی است. براین اساس، روند شیب تغییرات تولید خالص اولیه واقعی و پتانسیل در شهرستان‌های بجنورد و تربت حیدریه، منفی و شدت آن در طبقه کاهشی کم تا متوسط طبقه‌بندی گردید. همچنین روند شیب تغییرات تولید خالص اولیه ناشی از فعالیت‌های انسانی در شهرستان تربت حیدریه مثبت و در طبقه افزایش کم تا متوسط و در شهرستان بجنورد، منفی و در طبقه کاهشی کم طبقه‌بندی گردید. بررسی سناریوهای توسعه و یا بازگشت بیابان‌زایی نشان داد که ۶۱/۲۳٪ از مساحت کل مناطق مورد بررسی تحت تأثیر گسترش بیابان‌زایی ناشی از اثر عوامل اقلیمی بوده و ۳۸/۷۷٪ آن نیز متأثر از تعامل عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در توسعه بیابان‌زایی است.

واژگان کلیدی: سناریوهای تغییر اقلیم؛ فعالیت‌های انسانی؛ آزمون‌های آماری؛ تخریب سرزمین



■ مقدمه

زی توده موجب بیابان‌زایی می‌شود، بنابراین می‌توان مقدار تولید بوم‌نظام را به عنوان یک شاخص قابل اندازه‌گیری، برای بررسی فرآیند بیابان‌زایی در نظر گرفت (۱۸، ۳۵). اگرچه چندین مدل برای تخمین تولید خالص اولیه وجود دارد، اما به طور رایج متکی بر متغیرهای اقلیمی هستند. اولین مدلی که به‌طور گستره مورد استفاده قرار گرفت مدل میامی است (۱۶). این مدل از همبستگی حداقل مربعات بین تولید خالص اولیه اندازه‌گیری شده و داده‌های مربوط به دما و بارش استفاده می‌کند. مدل تورنت ویت که براساس داده‌های مورد استفاده در مدل میامی بنا نهاده شده است و مدل اصلاح شده آن، مدل تبخیر و تعرق پتانسیل تورنت ویت است، از دیگر روش‌های تخمین تولید خالص اولیه است (۱۵) که در پژوهش حاضر از آن استفاده شد. بر همین اساس، پژوهشگران مختلف، تولید خالص اولیه^۲ را معیاری برای ارزیابی کمی اثر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی انتخاب نموده‌اند (۸، ۱۲، ۲۸). تولید خالص اولیه، مقدار خالص انرژی تابش خورشیدی است که به انرژی شیمیایی طی فرایند فتوسنتز تبدیل شده است و یک شاخص حساس به تغییر اقلیم و اثرات فعالیت‌های انسانی می‌باشد (۳۸). به همین دلیل تولید خالص اولیه به عنوان یک شاخص برای تفکیک و جداسازی اثر تغییر اقلیم از اثر فعالیت‌های انسانی آن در مقیاس بوم‌نظام پذیرفته شده است (۷، ۸). از اینرو تغییرات آن نیز به عنوان یک شاخص برای ارزیابی بالقوه بیابان‌زایی در نظر گرفته شده است (۲۰). با توجه به اینکه گسترش سریع بیابان‌زایی منجر به از دست رفتن اقتصاد، تخریب محیط زیست، ناپایداری شرایط سیاسی محلی و تحول اجتماعی می‌شود، براین اساس، در بسیاری از مطالعات، پویایی بیابان‌زایی و عوامل پیش‌برنده آن بررسی شده است (۲، ۳۱). پویایی بیابان‌زایی را می‌توان از طریق ترکیبی از مشاهدات ماهواره‌ای و اطلاعات مناسب، پایش و ارزیابی کرد (۴، ۲۴، ۳۴). برای نیل به این هدف، مطالعات زیادی در زمینه آشکارسازی تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی و ارزیابی نقش آنها در بیابان‌زایی انجام شده است که از جمله آنها، می‌توان به

پدیده بیابان‌زایی به‌عنوان تهدید بوم‌شناختی، محیط‌زیستی، اجتماعی-اقتصادی (۱)، در کنار پدیده تغییر اقلیم و کمبود آب شیرین، سه چالش بزرگ جهان در قرن ۲۱م می‌باشد و شامل فرآیندهایی است که به عملکرد نادرست انسان بر می‌گردد و عوامل طبیعی نیز اثرات آن را تشدید می‌نماید (۲۸) طبق تعریف بیابان‌زایی، تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی مهمترین عوامل پیش‌برنده بیابان‌زایی می‌باشد (۲، ۱۳) به نحویکه در قرن گذشته فعالیت‌های انسانی همچون تغییر کاربری اراضی، توسعه کشاورزی، فعالیت‌های صنعتی و توسعه شهری، چرای بیش از حد دام، برداشت بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی نقش به‌سزایی در تخریب سرزمین داشته‌اند (۲۱، ۲۲). این در صورتی است که تا کنون و به درستی نقش و سهم هر یک از این عوامل درک نشده است (۳۰، ۳۸). در گزارشات^۱ IPCC (۲۰۲۰)، تغییر اقلیم به تغییر در مقادیر پارامترهای آب و هوا گفته می‌شود که برای یک دوره طولانی مدت، معمولاً یک دهه یا بیشتر و در یک منطقه مشخص به وقوع پیوندد. به عبارتی تغییر اقلیم، به هرگونه تغییر در طول زمان، که به علت تغییرات طبیعی و یا به عنوان یک نتیجه از فعالیت‌های انسانی باشد، گفته می‌شود (۱۷). مروری بر نتایج پژوهش‌های مختلف به ویژه در دهه‌های اخیر نشان می‌دهد که بیابان‌زایی متأثر از پدیده تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بوده (۱، ۲) و به همین علت است که پژوهشگران زیادی در دنیا به بررسی اثر این موضوعات بر گسترش روند بیابان‌زایی پرداخته‌اند، اما استفاده از یک روش ارزیابی کمی بهینه که نشان دهنده نقش عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در بیابان‌زایی باشد، دشوار می‌باشد (۲، ۶). امروزه استفاده از روش‌های تحلیل مکانی امکان ارزیابی کمی متغیرهای محیطی را به خوبی نشان می‌دهند (۳۳). روش‌های ارزیابی کمی عمدتاً مبتنی بر تحلیل‌های آماری بودند، از جمله مدل‌های رگرسیونی، آنالیز همبستگی و تکنیک‌های تجزیه و تحلیل چند متغیره (۱۸، ۳۰، ۳۹، ۴۰). با توجه به تعریف بیابان‌زایی به خوبی این نکته روشن است که کاهش تولید

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC

² Net Primary Productivity (NPP)

خشک شمال شرق ایران در شهرستان تربت حیدریه واقع در استان خراسان رضوی و شهرستان بجنورد در استان خراسان شمالی از دیگر اهداف اصلی پژوهش حاضر بود.

■ مواد و روش

معرفی منطقه مورد بررسی

موقعیت جغرافیایی و وجود ارتفاعاتی نظیر بینالود، کوه‌های هزار مسجد، کپه داغ، ارتفاعات سالوک و نواحی کویری باعث شده است که استان‌های خراسان رضوی و شمالی از تنوع اقلیمی زیادی برخوردار باشد. پژوهش حاضر در شهرستان‌های تربت حیدریه و بجنورد در استان‌های خراسان رضوی و شمالی در مناطق شمال شرقی ایران صورت گرفته است.

شهرستان تربت حیدریه با مساحت $36/72 \text{ km}^2$ در محدوده جغرافیایی $38^\circ 58'$ و $34^\circ 57'$ تا $60^\circ 04'$ و $35^\circ 55'$ واقع شده است. مقدار بارندگی سالانه شهرستان تربت حیدریه 252 mm و میانگین دمای سالیانه $14/3^\circ \text{C}$ و اقلیم آن براساس روش دومارتن و آمبرژه خشک می‌باشد. شهرستان بجنورد با مساحتی در حدود $57/99 \text{ km}^2$ در محدوده جغرافیایی $58^\circ 56'$ و $37^\circ 14'$ تا $57^\circ 42'$ و $37^\circ 54'$ قرار دارد. میزان بارندگی سالانه آن 249 mm و میانگین دمای سالیانه آن نیز $13/5^\circ \text{C}$ است و اقلیم آن براساس روش دومارتن خشک و با روش آمبرژه نیمه خشک می‌باشد. عمده فعالیت‌های انسانی در منطقه مورد مطالعه چرای بیش از حد، عدم رعایت تناسب تعداد دام و ظرفیت تولید مرتع، عدم رعایت زمان ورود و خروج دام از مرتع و تغییر کاربری از مرتع به اراضی کشاورزی می‌باشد. در شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

روش انجام پژوهش

در پژوهش حاضر، تولید خالص اولیه واقعی (ANPP^۵) با روش اندازه‌گیری زمینی برآورد شد و سپس با استفاده از مدل CASA شبیه‌سازی شد. در مرحله بعد، تولید خالص

مطالعه ارزیابی کمی نقش منحصر بفرد تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در بیابان‌زایی شمال غرب چین با استفاده از تولید ناخالص اولیه به عنوان یک شاخص اشاره کرد. نتایج آن بررسی نشان داد که $8/55\%$ سطح مورد مطالعه تحت تأثیر بیابان‌زایی قرار دارد در حالیکه $3/70\%$ از آن زیر تأثیر فعالیت‌های انسانی و $7/21\%$ در اثر تغییر اقلیم به‌وجود آمده است (۳۴). علاوه بر آن، بررسی‌های دیگری نیز در دشت اردوس چین^۱ (۳۲)، در چین‌گهای^۲ تبت در شمال شرقی چین (۱۴)، در منطقه جنگلی سین کیانگ^۳ در مناطق خشک و نیمه خشک چین (۳۷) و حوزه آبخیز شیانگه^۴ چین (۳۸)، با استفاده از تولید خالص اولیه به ارزیابی توسعه بیابان‌زایی پرداخته شده است که تأثیر تغییرات اقلیم و فعالیت‌های انسانی را در روند بیابان‌زایی نشان می‌دهند. در ایران نیز مطالعات انجام شده در استان اصفهان با مطالعه تغییرات زمانی و مکانی تولید خالص اولیه و ارتباط آن با متغیرهای اقلیمی در زیست‌بوم‌های مرتع، تاغ‌زار و بیابان و جنگل و کشاورزی (۲۳)، و مراتع نیمه‌استپی استان اصفهان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (۱۰)، بررسی شده و نتایج آن نشان از معنی‌دار بودن این متغیرها دارد.

بررسی پویایی و روند حرکتی پوشش گیاهی با اندازه‌گیری تولید خالص اولیه بهترین روش آشکارسازی تخریب سرزمین بوده و منعکس‌کننده مراحل و روند تخریب سرزمین و بیابان‌زایی می‌باشد (۱۱، ۲۵). بنابراین تولید خالص اولیه برای ارزیابی تخریب سرزمین یا ترمیم و بازگشت بیابان‌زایی انتخاب شد (۳، ۲۹). منظور از بازگشت بیابان‌زایی، ایجاد شرایطی است که طی آن به علت افزایش تولید خالص اولیه روند بیابان‌زایی متوقف شده و با افزایش زیتوده، بیابان‌زایی معکوس شده است (۲۵، ۳۰). لذا، با توجه به آنچه که در جملات فوق اشاره شد، هدف اصلی از پژوهش حاضر، اندازه‌گیری تولید خالص اولیه با استفاده از مدل CASA و ارزیابی کمی توسعه یا بازگشت بیابان‌زایی بود و همچنین تعیین نقش نسبی هریک از عوامل اصلی بیابان‌زایی یعنی تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در کاهش مکانی-زمانی تولید ناخالص اولیه اراضی مرتعی در مناطق

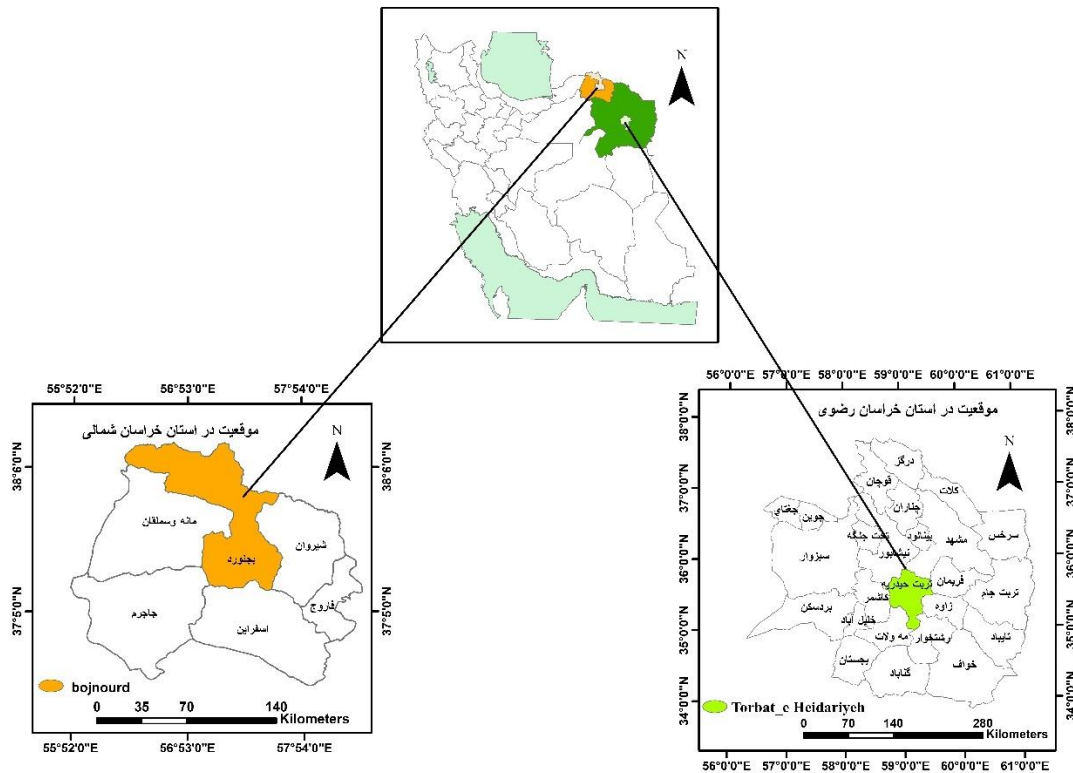
⁴ Shiyanghe Basin

⁵ Actual Net Primary Productivity

¹ Ordos

² Qinghai

³ Xinjiang



شکل ۱. موقعیت محدوده‌های مورد مطالعه در شمال شرق ایران در استان‌های خراسان شمالی و رضوی

به‌عنوان یک مکان مطالعاتی انتخاب شد. سپس در درون هر یک از آن مکان‌ها، موقعیت‌هایی که صعب العبور بودند و دور از دسترس دام‌های اهلی بود تعیین و ۵ نقطه نمونه‌برداری یا کوادرات در جهت شیب غالب منطقه برای اندازه‌گیری پوشش گیاهی انتخاب شد. اندازه هر کوادرات $40\text{m} \times 40\text{m}$ انتخاب شد. با توجه به اینکه فرم رویشی پوشش گیاهی مراتع مورد مطالعه، عمدتاً ترکیبی از گراس‌ها و بوته‌ای‌ها بود، بنابراین هر کوادرات به ۴ کوادرات $20 \times 20\text{m}$ تبدیل شده و به نام‌های Q1، Q2، Q3 و Q4 نامگذاری شد. این کوادرات‌ها برای اندازه‌گیری بوته‌های چند ساله در نظر گرفته شد. در داخل هر کوادرات $20\text{m} \times 20\text{m}$ ، ۴ کوادرات $5\text{m} \times 5\text{m}$ نیز برای اندازه‌گیری تولید و یا همان زیتوده باریک‌برگان (گراس‌ها) انتخاب شد (شکل ۲) (۳۸). برای اندازه‌گیری تولید خالص اولیه بوته‌ها، ابتدا اندازه‌گیری‌های غیر مخرب زیست توده بدون قطع و توزین در اواخر ماه اردیبهشت و اوایل خرداد انجام شد. برای این منظور ابعاد گیاه را که شامل قطر یقه،

اولیه پتانسیل^۱ و تولید ناشی از فعالیت‌های انسانی^۲ محاسبه و با بهره‌گیری از داده‌های به‌دست آمده و سناریوهای طراحی شده، ارزیابی کمی نقش نسبی اثرات آب و هوا و فعالیت‌های انسانی در بیابان‌زایی انجام شد. بر این اساس، ابتدا داده‌های مورد نیاز CASA به منظور برآورد تولید خالص اولیه که شامل داده‌های هواشناسی، تصاویر ماهواره‌ای، نمونه‌برداری‌های میدانی می‌باشد، جمع‌آوری شد و سپس به کمک نرم افزارهای سنجش از دور اطلاعات لازم استخراج و در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)^۳ مورد تجزیه و تحلیل و پردازش قرار گرفتند. در پایان مقدار کمی تأثیر عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر توسعه بیابان‌زایی برآورد شد.

انتخاب مکان نمونه‌برداری‌های زمینی برای اندازه‌گیری NPP تولید خالص اولیه، آن مقدار انرژی خورشیدی است که از راه فتوسنتز تبدیل به زیتوده می‌شود (۳۵). برای اندازه‌گیری میدانی ابتدا در هر شهرستان یک حوزه آبخیز

³ Geographic Information System

¹ PNPP

² HNPP

و ارتفاع ۱۴cm و به فاصله ۱۰cm با اوگر نمونه‌برداری شد و در مجموع تعداد ۴۰ نمونه خاک برداشت شد. بنابراین برای اندازه‌گیری وزن ریشه‌ها در آزمایشگاه، نمونه‌های خاک با آب دیونیزه پاک شدند. نمونه‌ها در 70°C به صورت ثابت خشک و سپس توزین شدند (۳۸).

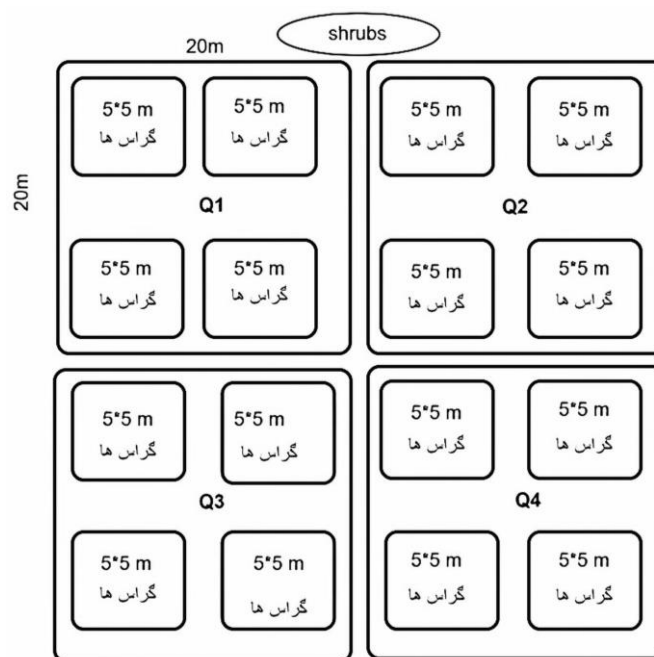
جمع‌آوری داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی مورد نیاز در مدل CASA شامل دما، بارندگی ماهانه و سالانه و خالص تابش خورشیدی^۱ و تبخیر و تعرق پتانسیل و تبخیر و تعرق واقعی است (۳۵). برای این منظور از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی، کلیماتولوژی و تبخیر سنجی استان‌های خراسان رضوی و شمالی در دوره آماری ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۶ شمسی استفاده شد. برای بررسی کیفیت داده‌ها از آزمون مشاهدات استثنائی گروبز- بک (G-B)^۲ استفاده شد.

تولید خالص اولیه واقعی^۳

پویایی پوشش گیاهی در بیابان‌زایی بسیار مهم است و می‌تواند فعل و انفعالات پیچیده بین تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی را منعکس کند (۱۱).

کمینه و بیشینه قطر تاج پوشش و ارتفاع از یقه تا تاج پوشش بود، اندازه‌گیری و در فرم‌های مخصوص ثبت شد. سپس ابعاد دیگر بوته‌هایی که قطع نشده بود اندازه‌گیری شد و با محاسبه رابطه همبستگی بین تولید خالص بوته‌های قطع و توزین شده و بوته‌های اندازه‌گیری شده، مقدار تولید خالص اولیه در درون هر کوادرات محاسبه شد. با توجه به ابعاد بوته‌ها، در هر مکان ۵ بوته به عنوان نمونه انتخاب و پس از اندازه‌گیری ابعاد آن، اقدام به قطع اندام هوایی که مربوط به رشد اندام‌های هوایی در سال جاری بودند، کرده و ضمن ثبت موقعیت جغرافیایی و نام سایت، قسمت‌های قطع شده در پاکت قرار داده شد. در مجموع ۱۰ مکان مطالعاتی و ۲۵ کوادرات $20\text{m} \times 20\text{m}$ برای اندازه‌گیری‌های غیرمخرب انتخاب شدند. نمونه‌های جمع‌آوری شده در 70°C و به مدت ۲۴ ساعت خشک و سپس توزین شدند. برای اندازه‌گیری مقدار تولید خالص اولیه باریک‌برگان، ابتدا در درون هر کوادرات $5 \times 5\text{m}$ یک پلات $1 \times 2\text{m}$ تفکیک و باریک‌برگان از ارتفاع ۲cm بالای خاک سطحی قطع شده و در درون پاکت قرار داده شد که پس از خشک شدن در آون توزین گردید (۱۸). برای تعیین و اندازه‌گیری زیتوده اندام زیرزمینی باریک‌برگان، ۸ هسته خاک به قطر ۸cm



شکل ۲. طرحی از روش نمونه‌برداری میدانی در سایت‌های مورد مطالعه

³ Actual NPP

¹ Net Solar Radiation

² Grubbs-Beck

بیشینه کارایی استفاده از نور است که بوسیله وضعیت هواشناسی روزانه تخمین زده می‌شود. ϵ_{max} بهره‌وری بیشینه استفاده از نور بیوم خاص، تحت شرایط ایده‌آل است و بیشینه ϵ انواع گیاهان در شرایط ایده‌آل برابر با 0.389 grC است. r نسبتی از تابش خورشیدی که توسط گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (۳۵).

$$W\epsilon(x, t) = 0.5 + 0.5 \times r \text{ و } r = \frac{E1(x, t)}{E2(x, t)} \quad (۴)$$

که $E1(x, t)$ تبخیر و تعرق تخمینی و $E2(x, t)$ تبخیر تعرق پتانسیل می‌باشد که از رابطه‌های (۵) و (۶) برآورد شد:

$$E1(x, t) = (P(x, t) \times R(x, t) \times [P(x, t)^2 + R(x, t)^2 + P(x, t) \times R(x, t)]) / ([P(x, t) + R(x, t) \times [P(x, t)^2 + R(x, t)^2]]) \quad (۵)$$

در این رابطه $P(x, t)$ بارندگی ماهانه (mm month^{-1}) و $R(x, t)$ که نشان دهنده تابش خالص خورشیدی است (MJ m^{-2}).

$E2(x, t)$ تبخیر تعرق پتانسیل است که از رابطه (۷) محاسبه شد.

$$E2(x, t) = \frac{E1(x, t) + E0(x, t)}{2} \quad (۶)$$

$E0$ تبخیر و تعرق پتانسیل است که از رابطه تورنت وایت به دست می‌آید. در این رابطه T درجه حرارت ماهانه بر حسب درجه سلسیوس است و I شاخص کل گرمایی در یک سال است، زمانی که درجه حرارت هوا بین صفر و $26/5$ درجه سانتیگراد باشد و $\alpha(x)$ با استفاده از شاخص کل گرمایی محاسبه می‌شود (رابطه‌های ۷، ۸، ۹) (۳۶).

$$APAR(x, t) = SOL(Rn)(x, t) \times FPAR \times r \quad (۷)$$

$$E0(x, t) = 16 \times [10 \times T(x, t) / I(x)]^{\alpha(x)} \cdot a(x)$$

$$a(x) = 0.675I(X)^3 - 77.1I(X)^2 + 17920(X)^1 + 492390 \times 10^{-6} \quad (۸)$$

در پژوهش حاضر، در آغاز با استفاده از تصاویر ماهواره مودیس^۱ با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر شاخص پوشش گیاهی $NDVI^2$ از پایگاه $USGS^3$ تهیه شد (۲۵). سپس به کمک داده‌های هواشناسی، نقشه دما و بارش در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی و به روش میانبایی کریجینگ معمولی تهیه شد (۳۲). در پایان با مدل $CASA$ تولید خالص اولیه واقعی برآورد شد. این مدل تولید واقعی را برحسب $\text{gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ برآورد می‌کند که اساس آن تئوری توازن منابع است (۹). در این مدل، تولید خالص اولیه محصول جذب تابش فعال فتوسنتزی است ($APAR^4$). اصول بنیادی مدل $CASA$ در رابطه (۱) تشریح شده است:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (۱)$$

در اینجا x موقعیت مکانی (مختصات جغرافیایی) و t زمان است. $APAR$ نشان دهنده کل تابش خورشیدی جذب شده وابسته به تاج پوشش در یک دوره زمانی بر حسب MJm^{-2} است که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود، و $\epsilon(x, t)$ نشان دهنده بهره‌وری استفاده از نور طبیعی است که به ترتیب با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود (۳۵).

$$APAR(x, t) = SOL(Rn)(x, t) \times FPAR \times r \quad (۲)$$

$FPAR$ جزئی از تابش فعال فتوسنتزی در مکان x و زمان t که بسته به نوع گیاهان و تاج پوشش آنها تعیین می‌شود و به کمک شاخص پوشش گیاهی $NDVI$ محاسبه شد و $Rn(x, t)$ که نشان دهنده تابش خالص خورشیدی بر حسب $\text{MJm}^{-2} \text{ month}^{-1}$ است.

$$\epsilon(x, t) = T\epsilon1(x, t) \times T\epsilon2(x, t) \times W\epsilon(x, t) \times \epsilon_{max} \quad (۳)$$

در مدل $CASA$ ، ضریب تنش رطوبتی است، که نشان دهنده کاهش در بهره‌وری استفاده از نور است و ناشی از فاکتور رطوبت می‌باشد (رابطه ۴) (۳۹). ϵ_{max}

³ <https://lpdaac.usgs.gov/resources/data-action>

⁴ Absorbed Photosynthetically Active Radiation (APAR)

¹ MOD13Q1.061 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 250m

² Normalized Difference Vegetation Index

در پژوهش حاضر، تولید خالص اولیه پتانسیل با استفاده از مدل تبخیر و تعرق پتانسیل تورنت‌ویت، طبق رابطه (۱۳) شبیه‌سازی شد:

$$NPP_{potential} = 3000[1 - e^{-0.0009695(v-20)}] \quad (13)$$

تولید خالص اولیه سالانه بر حسب $(g\ Cm^2\ yr^{-1})$ ، v متوسط تبخیر و تعرق واقعی سالانه (mm) که از رابطه (۱۴) محاسبه شد:

$$v = \frac{1.05r}{\sqrt{1+(1+1.05r/L)^2}} \quad (14)$$

$$L = 3000 + 25t + 0.05 t^3$$

L متوسط تبخیر و تعرق واقعی سالانه (mm)، r بارش کل سالانه (mm) و t متوسط درجه حرارت سالانه ($^{\circ}C$) می‌باشد (۳۸).

تجزیه و تحلیل پویایی و توسعه بیابان‌زایی با استفاده از تغییرات مکانی-زمانی NPP

برای بررسی روند تغییرات تولید خالص اولیه از نرم افزار XLSTAT و آزمون‌های آماری من کندال و شیب سن استفاده شد و برای تعیین شدت روند تغییرات، از رابطه ۱۵ استفاده شد (۳۸). بر اساس این روش، اگر شیب تغییرات (مثبت یا منفی) بین ۵- تا ۰ باشد، روند تغییرات در طبقه افزایش یا کاهش کم، اگر بین ۵- تا ۱۰ باشد در طبقه متوسط و اگر تغییرات بین ۱۰- تا ۲۴ باشد در طبقه شدید طبقه‌بندی می‌شود. در پژوهش حاضر، سه نوع تولید خالص اولیه محاسبه شد:

$$I(x) = \sum_{t=1}^{12} [T(x,t)/5]^{1.514} \quad (9)$$

$T\epsilon 1$ تنش فعالیت گیاه در دمای کم و $T\epsilon 2$ نشان دهنده تنش فعالیت گیاه در درجه حرارت زیاد می‌باشد و هر یک از آنها ضریب تنش دمایی در بهره‌وری استفاده از نور است و از رابطه‌های (۱۰ و ۱۱) برآورد می‌شوند (۳۷).

$$T\epsilon 1(x,t) = 0.8 + 0.02T_{opt}(x,t) - 0.0005 \times [T_{opt}(x,t)]^2 \quad (10)$$

T_{opt} دمای ماهانه بهینه است که در این مطالعه از میانگین درجه حرارت ماه‌های اردیبهشت و خرداد برآورد شده است.

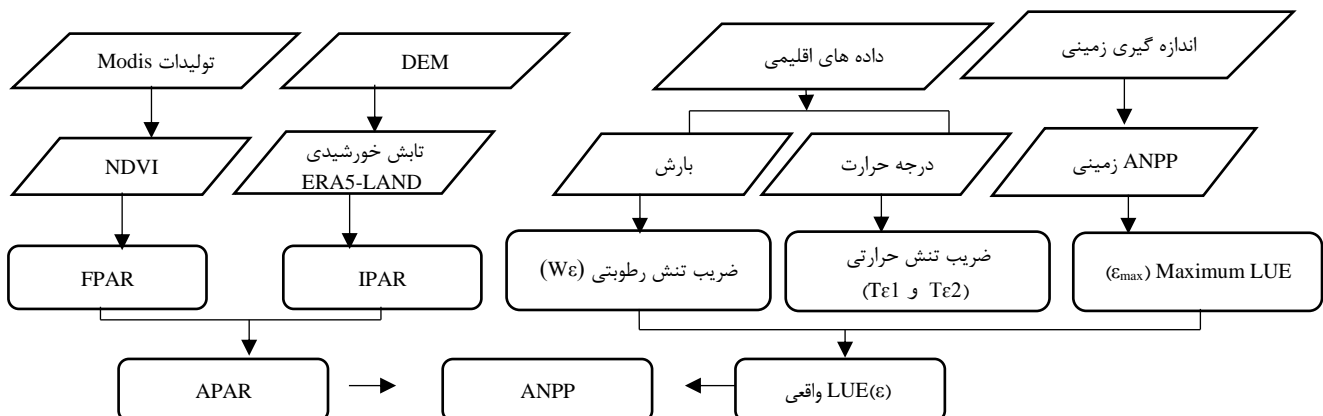
$$T\epsilon 2(x,t) = \frac{1/1814}{\{1+exp[0.2(T_{opt}(x,t)-10-T(x,t))]\}} \times \frac{1}{\{1+exp[0.3(-T_{opt}(x,t)-10+T(x,t))]\}} \quad (11)$$

پس از محاسبه APAR و ضرایب تنش درجه حرارت و رطوبت می‌توان با استفاده از رابطه زیر مقدار ϵ_{max} واقعی را محاسبه کرد. در این رابطه از تولید خالص اولیه حاصل از داده‌های زمینی استفاده شد.

$$\epsilon_{max} = \frac{NPP}{APAR \times W\epsilon(x,t) \times T\epsilon 1(x,t) \times T\epsilon 2(x,t)} \quad (12)$$

شکل ۳ دیگرام مدل CASA برای برآورد NPP را نشان می‌دهد.

تخمین تولید خالص اولیه پتانسیل



شکل ۳. نمودار جریان‌ی مدل CASA برای برآورد NPP (۲۷)

سن برای بررسی جهت شیب روند تغییرات تولید خالص اولیة از آزمون شیب تخمین‌گر سن استفاده شد. من‌کندال آزمون غیرپارامتری شناخته شده است که به‌صورت گسترده برای آشکارسازی روند در پژوهش‌های هیدرولوژیک و اقلیمی استفاده می‌شود (۲۱ و ۲۳) و شیب تخمین‌گر سن بصورت گسترده در واکاوی روند داده‌های آب و هواشناسی استفاده می‌شود (۲۲، ۵).

اعتبار سنجی مدل CASA

برای اعتبار سنجی مدل، تولید خالص اولیة برآورد شده از نمونه‌برداری‌های زمینی، با مقادیر شبیه‌سازی شده از مدل CASA مقایسه شده و همبستگی آنها بررسی شد.

طراحی سناریوی برای ارزیابی کمی بیابان‌زایی

برای آشکارسازی نقش نسبی تأثیر عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در بیابان‌زایی، در بیابان‌زایی، از شش سناریو بهره گرفته شد (جدول ۱). براساس مقادیر شیب تولید خالص اولیة، سه سناریو برای گسترش بیابان‌زایی و سه سناریو برای بازگشت بیابان‌زایی تعریف شده است (۳۱).

نتایج

تولید خالص اولیة اراضی مرتع با استفاده از مدل CASA و با بکارگیری داده‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای در طی دوره آماری ۱۳۶۴-۱۳۹۵ شبیه‌سازی شد. همبستگی بین تولید خالص اولیة مشاهداتی حاصل شده از اندازه‌گیری زمینی با تولید خالص اولیة شبیه‌سازی شده با مدل CASA نمایش داده‌شده است (شکل ۴)، نتایج نشان داد که دقت برآورد مدل با ضریب تبیین ۰/۶۲ رضایت‌بخش است. با این حال داده‌های حاصل از مدل، کمی بیشتر از داده‌های مشاهداتی می‌باشد که ممکن است به‌دلیل تفاوت در مقیاس داده‌های مشاهداتی و تخمینی باشد. میانگین تولید خالص اولیة مرتع در شهرستان تربت حیدریه $10.8/52 \text{ gCm}^2\text{Yr}^{-1}$ و شهرستان بجنورد $14.4/68 \text{ gCm}^2\text{Yr}^{-1}$ در سال برآورد شد. کمینه و بیشینه تولید خالص اولیة در شهرستان تربت حیدریه به ترتیب $171/3$ و $201/4$ و در شهرستان بجنورد $96/9$ و $224/9 \text{ gCm}^2\text{Yr}^{-1}$ می‌باشد (شکل ۵).

الف) تولید خالص اولیة واقعی بود که با تلفیق مدل CASA و برداشت‌های میدانی محاسبه شد؛ ب) تولید خالص اولیة پتانسیل می‌باشد که با استفاده از مدل تبخیر و تعرق پتانسیل تورنت‌ویت (رابطه‌های ۱۳ و ۱۴) و ج) که تولید خالص اولیة ناشی از فعالیت‌های انسانی نام دارد، که با تفریق تولید خالص اولیة پتانسیل از واقعی به‌دست آمد. اثر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر روی تولید خالص اولیة می‌تواند با اتکا بر شیب تولید خالص اولیة پتانسیل و تولید خالص اولیة ناشی از فعالیت‌های انسان محاسبه کرد. شیب مثبت تولید خالص اولیة پتانسیل نشان‌دهنده سودمندی تغییر متغیرهای اقلیمی بر روی رشد پوشش گیاهی و معکوس کردن روند بیابان‌زایی است. شیب منفی تولید خالص اولیة پتانسیل، نشان دهنده این است که تغییرات اقلیم موجب توسعه بیابان‌زایی شده است. اگر شیب تولید خالص اولیة ناشی از فعالیت انسان منفی باشد، فعالیت‌های انسانی در رشد پوشش گیاهی و بازگشت بیابان‌زایی سودمند می‌باشد. اگر شیب تولید خالص اولیة ناشی از فعالیت انسان مثبت باشد، بیانگر این است که فعالیت‌های انسانی منجر به گسترش بیابان‌زایی شده است. شیب تولید خالص اولیة واقعی اگر مثبت باشد یعنی بازگشت بیابان‌زایی رخ داده است و اگر منفی باشد یعنی اینکه بیابان‌زایی گسترش یافته است (۳۸). پس از محاسبه تولید خالص اولیة، شیب تغییرات محاسبه شد که در پژوهش حاضر از رابطه (۱۵) شیب با رگرسیون حداقل مربعات معمولی استفاده شد (۳۷).

$$SLOPE = \frac{10 \times \sum_{i=33}^{33} i \times NPP_i - (\sum_{i=1}^{33} i) (\sum_{i=33}^{33} NPP_i)}{10 \times \sum_{i=33}^{33} i^2 - \sum_{i=33}^{33} i^2} \quad (15)$$

که i تعداد سال‌های آماری و NPP مقدار تولید خالص اولیة است. مقدار تغییرات تولید خالص اولیة نیز از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$NPP_{variation} = 9 \times slope \quad (16)$$

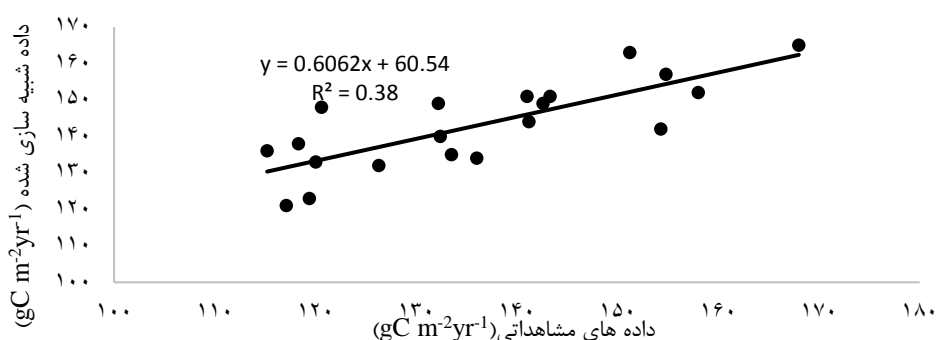
آزمون‌های آماری

در پژوهش حاضر، از آزمون من‌کندال برای بررسی روند تغییرات تولید خالص اولیة و از آزمون شیب تخمین‌گر

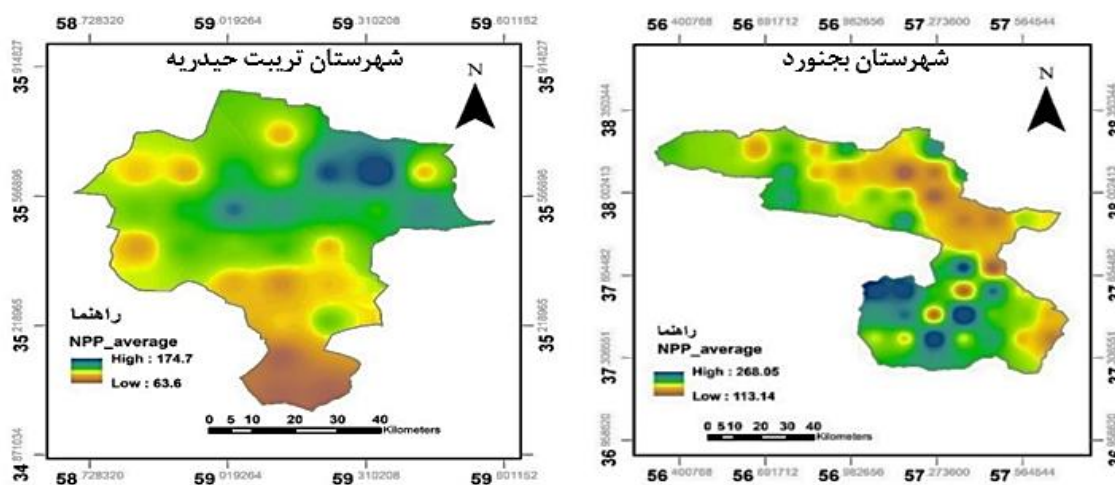
جدول ۱. سناریوهای ارزیابی نقش اقلیم و فعالیت انسانی در بیابان‌زایی (۳۷)

تعریف	SH	SP	SA	
بازگشت بیابان‌زایی ناشی از فعالیت‌های انسانی	<	<	>	سناریو ۱
بازگشت بیابان‌زایی ناشی از تغییرات اقلیمی	>	>	>	سناریو ۲
بازگشت بیابان‌زایی ناشی از تعامل تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی	<	>	>	سناریو ۳
گسترش بیابان‌زایی ناشی از فعالیت‌های انسانی	>	>	<	سناریو ۱
گسترش بیابان‌زایی ناشی از تغییرات اقلیمی	<	<	<	سناریو ۲
گسترش بیابان‌زایی ناشی از تعامل تغییرات آب و هوا و فعالیت‌های انسانی	>	<	<	سناریو ۳

SA: مقدار شیب تولید خالص اولیه واقعی، SP: مقدار شیب تولید خالص اولیه پتانسیل، SH: مقدار شیب تولید خالص اولیه ناشی از فعالیت انسان منظور از بازگشت بیابان‌زایی، ایجاد شرایطی است که طی آن به علت افزایش تولید خالص اولیه روند بیابان‌زایی متوقف شده و با افزایش زیتوده، بیابان‌زایی معکوس شده است. در صورتیکه عکس آن رخ داده باشد به معنی گسترش بیابان‌زایی می‌باشد.



شکل ۴. اعتبار سنجی مدل CASA از طریق همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای زمینی و داده‌های برآورد شده



شکل ۵. نقشه میانگین تولید خالص اولیه در سایت‌های مورد مطالعه براساس مدل CASA

شیب تولید خالص اولیه واقعی یا همان SA در شهرستان‌های تربت حیدریه و بجنورد منفی بود، که نشان‌دهنده تأثیر آب و هوا و تغییرات اقلیمی بر توسعه بیابان‌زایی است. به نحویکه در مکان‌های مورد بررسی تغییرات شیب پتانسیل (SP) منفی بود و بیانگر این است که تغییرات اقلیم موجب توسعه و گسترش بیابان‌زایی شده است. شیب تغییرات SH در شهرستان تربت حیدریه مثبت و در شهرستان بجنورد منفی بود، بنابراین تأثیر فعالیت‌های

توسعه بیابان‌زایی و تأثیر عوامل اقلیمی و انسانی اگر رابطه کمی بین تغییرات تولید خالص اولیه، تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی باشد، می‌توان نقش نسبی تغییرات اقلیم و فعالیت‌های انسانی در پیشرفت بیابان‌زایی را به صورت کمی ارزیابی کرد (۷). نقشه توزیع فضایی تغییرات شیب تولید خالص اولیه واقعی، تولید پتانسیل ناشی از مدل تورنت وایت و تغییرات تولید ناشی از فعالیت‌های انسانی ارائه شده است (شکل ۵). بر این اساس،

جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان داد که در شهرستان بجنورد تحت تأثیر سناریوی عوامل اقلیمی و در شهرستان تربت حیدریه تحت تأثیر تعامل بین عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، بیابان‌زایی گسترش پیدا کرده است. در جدول ۳ مکان‌های مورد بررسی تحت سناریوهای ذکر شده طبقه‌بندی و تفکیک شده است. بنابراین، ۶۱/۲۳٪ از مساحت کل مناطق مورد بررسی تحت تأثیر گسترش و توسعه بیابان‌زایی ناشی از تأثیر عوامل اقلیمی بوده و ۳۸/۷۷٪ آن نیز تحت تأثیر توسعه بیابان‌زایی ناشی از تعامل عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی می‌باشد. بنابراین در مناطق مورد بررسی، عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی موجب توسعه بیابان‌زایی شده است.

■ بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تولید خالص اولیه به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی بیابان‌زایی و تولید خالص اولیه بالقوه و HNPP برای ارزیابی نقش نسبی تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی مورد ارزیابی قرار گرفت. در منطقه مورد بررسی، عمده فعالیت‌های انسانی که موجب تخریب پوشش گیاهی و به دنبال آن باعث کاهش تولید مرتع گردیده است، شامل چرای خارج از فصل، عدم رعایت تناسب تعداد دام با ظرفیت مرتع، عدم رعایت زمان ورود و خروج دام از مرتع و مسائل حقوقی مرتع مثل عدم تنسيق کامل عرصه‌های مرتعی، ممیزی مرتع و تهیه طرح‌های مرتعداری است. برخی از مطالعات بیانگر این مطلب هستند که فعالیت‌های انسانی عامل غالب و نیروی محرک در توسعه بیابان‌زایی می‌باشد (۳۸). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی دو عامل مهم در گسترش بیابان‌زایی در محدوده مورد مطالعه هستند. اما نقش عوامل اقلیمی بیشتر از فعالیت‌های انسانی در این مناطق است. همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در ۶۱/۲۳٪ از سطح مناطق مورد مطالعه، گسترش بیابان‌زایی، ناشی از تغییرات اقلیمی بوده و در ۳۸/۷۷٪ مناطق مورد مطالعه نیز از تعامل عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، بیابان‌زایی گسترش پیدا کرده است که با نتایج پژوهشگران دیگر مشابَهت دارد (۳۷).

انسانی در شهرستان تربت حیدریه مخرب و منجر به گسترش بیابان‌زایی شده و در شهرستان بجنورد سودمند بوده و باعث رشد پوشش گیاهی و مانع از توسعه بیابان‌زایی شده است. پژوهش حاضر نشان داد که تغییرات تولید خالص اولیه در اثر عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی و یا از تعامل بین این دو شاخص در طی دوره آماری رخ داده است.

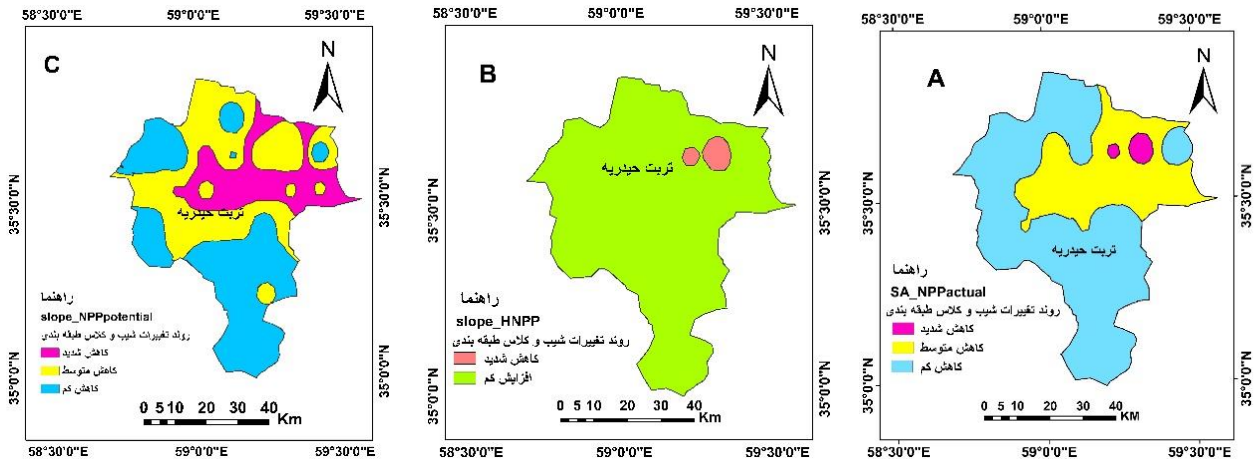
روند تغییرات تولید خالص اولیه

بر اساس نتایج آزمون من‌کندل، تغییرات تولید خالص اولیه واقعی در سایت‌های مورد مطالعه دارای روند بوده و براساس مقدار (P-value=۰/۰۰۰۱) آن، در سطح احتمال ۹۵٪ معنی‌دار بود (جدول ۲). نقشه طبقه‌بندی شدت و روند شیب تغییرات تولید خالص اولیه ارائه شد (شکل ۶ الف و ب). اساس، روند شیب تغییرات تولید خالص اولیه واقعی و پتانسیل در شهرستان‌های بجنورد و تربت حیدریه، منفی و شدت آن در طبقه کاهشی کم تا متوسط طبقه‌بندی گردید. همچنین روند شیب تغییرات تولید خالص اولیه ناشی از فعالیت‌های انسانی در شهرستان تربت حیدریه مثبت و در طبقه افزایش کم تا متوسط و در شهرستان بجنورد، منفی و در طبقه کاهشی کم تا متوسط گردید. بر این اساس، در شهرستان بجنورد، شدت شیب تغییرات S_A و S_H در طبقه کاهشی کم و همچنین شدت شیب تغییرات S_P در دو طبقه کاهشی کم به مقدار ۹۹/۷٪ و کاهشی شدید با ۰/۳٪ قرار گرفته است. در شهرستان تربت حیدریه، شدت شیب تغییرات S_A در سه طبقه کاهشی کم به مقدار ۶۶/۶٪، کاهشی متوسط با ۳۱/۶٪ و کاهشی شدید به مقدار ۱/۸٪ طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد که شدت شیب تغییرات S_P در شهرستان تربت حیدریه در سه طبقه کاهشی کم به مقدار ۶۶/۶٪، کاهشی متوسط با ۳۹٪ و کاهشی شدید به مقدار ۱۹/۹٪ قرار گرفته است. شدت شیب تغییرات S_H نیز در دو طبقه افزایشی کم با ۹۷/۶٪ و افزایشی متوسط با ۲/۴٪ طبقه‌بندی شده است.

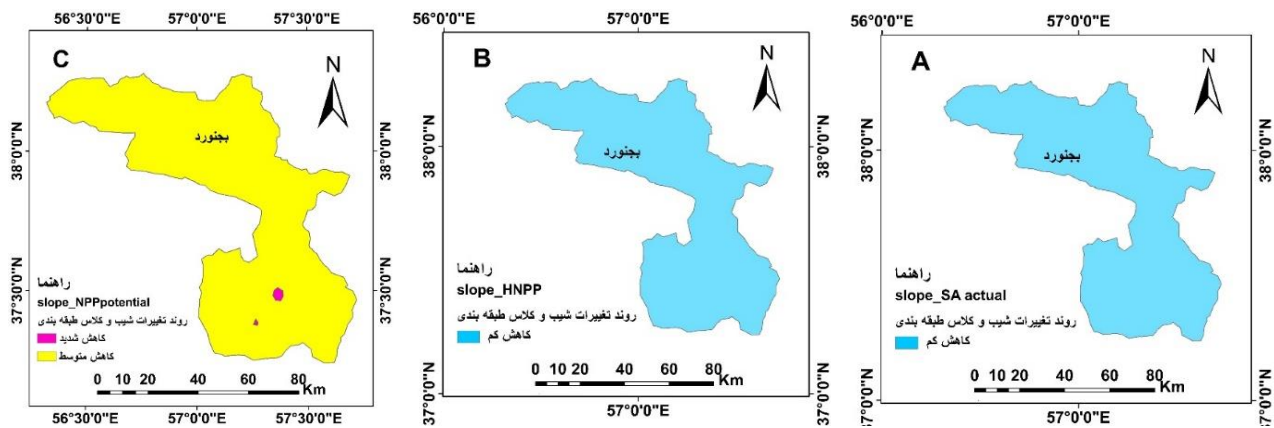
برای نمایش مناسب‌تر در شکل ۷ نقشه تغییرات شیب تولید خالص اولیه به تفکیک مکان‌های مورد بررسی ارائه شد. مساحت و درصد گسترش بیابان‌زایی ناشی از عوامل اقلیمی، فعالیت‌های انسانی و یا ترکیبی از این دو عامل در

جدول ۲. مقادیر آزمون من‌کندال و تخمینگر شیب سن محاسبه شده (۰/۰۵) برای متغیر تولید خالص اولیه در دوره آماری ۱۹۸۶-۲۰۱۷ (gCm⁻². yr)

شهرستان	متغیرها	داده‌های مشاهداتی	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	Kendall's tau p-value	شیب تخمین‌گر سن
تربت حیدریه	NPPactual	۳۲	۶۸/۱	۱۹۷/۱	۱۰۸/۵	۳۱/۹	۰/۰۰۰۱	-۲/۱۷
تربت حیدریه	NPPpo	۳۲	۲۶۰/۲	۴۳۲	۳۴۷/۱	۴۰/۹	۰/۰۰۰۲۱	-۱/۰۲
تربت حیدریه	HNPP	۳۲	۱۲۵/۹	۳۰۹/۱	۲۳۸/۶	۴۳	۰/۰۰۲۷	۱/۰۱
بجنورد	NPPactual	۳۲	۷۹/۹	۲۱۹/۴	۱۴۴/۸	۲۹/۲	۰/۰۱۸	-۰/۷۴۴
بجنورد	NPPpo	۳۲	۲۸۸/۳	۴۵۸/۴	۳۷۳/۸	۴۲/۵	<۰/۰۰۰۱	-۱/۱۷۰
بجنورد	HNPP	۳۲	۱۰۴/۳	۳۲۹/۷	۲۲۹/۱	۵۷/۹	۰/۰۹۶	-۱/۰۲۰



شکل ۶ الف. نقشه طبقه‌بندی شدت و روند تغییرات شیب تولید خالص اولیه واقعی (A)، تولید ناشی از فعالیت‌های انسانی (B) و پتانسیل (C)

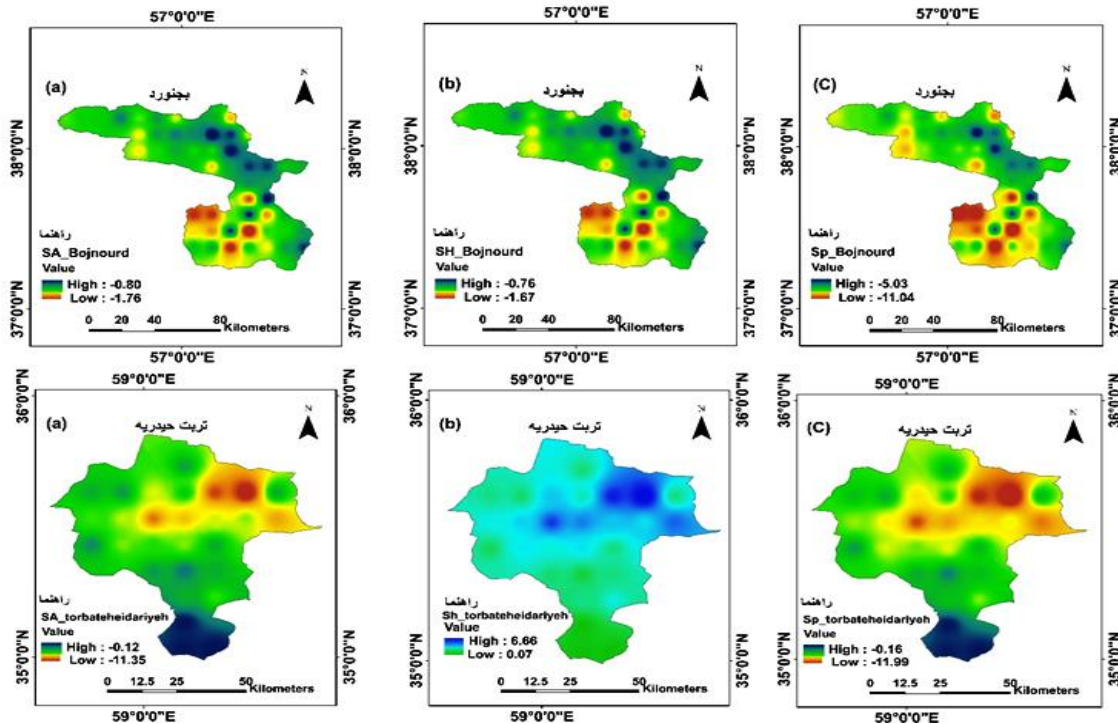


شکل ۶ ب. نقشه طبقه‌بندی شدت و روند تغییرات شیب تولید خالص اولیه واقعی (A)، تولید ناشی از فعالیت‌های انسانی (B) و پتانسیل (C)

جدول ۳. مساحت و درصد گسترش بیابان‌زایی ناشی از عوامل اقلیمی، فعالیت‌های انسانی و یا ترکیبی از این دو عامل

توسعه بیابان‌زایی	مقدار	منطقه مورد مطالعه	
		تربت حیدریه	بجنورد
CE	مساحت (km ²)	-	۵۷۹۹/۶۲
	%	-	۶۱/۲۳
HE	مساحت (km ²)	-	-
	%	-	-
BE	مساحت (km ²)	۳۶۷۱/۸	-
	%	۳۸/۷۷	-

CE: گسترش بیابان‌زایی تحت غلبه عوامل اقلیمی، HE: گسترش بیابان‌زایی تحت غلبه فعالیت‌های انسانی، BE: گسترش بیابان‌زایی تحت تأثیر ترکیبی از دو عامل اقلیم و فعالیت‌های انسانی



شکل ۷. نقشه تغییر شیب تولید خالص اولیه در مکان‌های مورد بررسی: تغییرات شیب تولید خالص اولیه واقعی (a)، تغییرات شیب تولید خالص اولیه پتانسیل (b) و تغییرات شیب تولید خالص اولیه ناشی از فعالیت‌های انسان (c)

منفی و عمدتاً در طبقه کاهش کم قرار گرفته است. شیب تغییرات تولید خالص اولیه پتانسیل در تمام سایت‌های مورد مطالعه منفی و در طبقه کاهش متوسط تا کم و شیب تغییرات تولید خالص اولیه ناشی از فعالیت‌های انسانی منفی و در طبقه کاهش کم تا متوسط بود، نتایج این پژوهش با نتایج مطالعات انجام شده در استان اصفهان مشابهت دارد (۱۶). در این پژوهش، برای آشکارسازی نقش نسبی تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی از ۶ سناریو بهره گرفته شد. طبق سناریوهای تعریف شده، مشخص شد که گسترش بیابان‌زایی، در شهرستان‌های بجنورد بیشتر در اثر عوامل اقلیمی و در تربت حیدریه در اثر تعامل بین اقلیم و فعالیت‌های انسانی رخ داده است. نتایج دیگر بررسی‌های انجام شده در اصفهان و چین برای آشکارسازی اثر تغییرات اقلیم و فعالیت‌های انسانی نیز که از سناریوی مذکور بهره گرفتند با نتایج پژوهش جاری هم‌خوانی دارد (۲۹، ۳۸). با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، مناطق مورد بررسی زیر تأثیر سناریوهای بازگشت بیابان‌زایی قرار ندارد و می‌توان گفت که اثر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی منجر به گسترش و توسعه بیابان‌زایی شده است. بررسی متغیرهای هواشناسی بارش و دما نیز نشان داد که مقدار بارندگی در سال‌های مورد مطالعه

بررسی روند تغییرات تولید خالص اولیه با آزمون آماری من کندال و شیب تخمین‌گر سن نشان داد که تغییرات تولید خالص اولیه واقعی در همه مناطق مورد بررسی دارای روند معنی‌داری بوده و این روند براساس آزمون شیب سن، در شهرستان‌های تربت حیدریه و بجنورد روند کاهشی و منفی داشته است. همچنین تغییرات تولید خالص اولیه پتانسیل در همه سایت‌های مورد مطالعه نیز دارای روند معنی‌دار بوده و شیب تغییرات آن منفی می‌باشد. تغییرات HNPP در شهرستان‌های تربت حیدریه و بجنورد دارای تغییر بوده بطوریکه شیب تغییرات آن در شهرستان تربت حیدریه مثبت و معنی‌دار و در شهرستان بجنورد منفی ولی معنی‌دار نمی‌باشد که با نتایج پژوهش‌های انجام شده در اصفهان (۲۶) مشابهت داشت. تغییرات تولید خالص اولیه در مناطق مورد بررسی، علیرغم اینکه زیر تأثیر مستقیم کاربری اراضی مثل مرتع و کشاورزی می‌باشد، اما در کنار عوامل یاد شده می‌توان به نوسان‌های اقلیمی رخ داده نیز اشاره کرد. بررسی انجام شده در اصفهان (۲۶) نیز از این روش برای تعیین تغییرات مکانی تولید خالص اولیه در مناطق خشک استفاده کرده‌اند. همچنین نتایج پژوهش جاری نشان داد که در شهرستان‌های بجنورد و تربت حیدریه، شیب تغییرات تولید خالص اولیه

را بر بیابان‌زایی تعیین کرد و عوامل مؤثر بر بیابان‌زایی ناشی از دو عامل مذکور را تفکیک کرد (۳۸). لذا، پیشنهاد می‌شود در بررسی‌های آینده، برای مقایسه بهتر و درک مناسب از شدت تغییرات NPP، نقشه شدت بیابان‌زایی مناطق مورد مطالعه طی سال‌های تحقیق تهیه شود. علاوه بر آن با توجه به گزارش هفتم IPCC بهتر است نتایج این پژوهش با سناریوهای گزارش هفتم نیز مقایسه شود.

■ سپاسگزاری

نتایج پژوهش حاضر، بخشی از رساله دکتری در دانشکده کویرشناسی دانشگاه سمنان است. لذا، نویسندگان، از تمامی بزرگوارانی که در جامعه آماری متخصص و یا به‌نحوی از انحاء در فراهم نمودن داده‌های پایه، تحلیل درست و منطبق با واقعیت‌های زمینی، همکاری نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

روند کاهش داشته و روند تغییرات دما نیز با افزایش بوده یا روند مثبتی نداشته است و بدون تغییرات خاص بوده. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کاهش بارندگی از مهمترین تأثیر آب و هوا بر تغییرات پوشش گیاهی بوده و فعالیت‌های انسانی در ۳۸/۷۷٪ مناطق بررسی شده در تعامل با تغییرات اقلیمی موجب گسترش بیابان‌زایی شده است. بررسی انجام شده در برخی مناطق مختلف ایران نشان داد که تولید خالص اولیه در اثر تغییرات در متغیرهای اقلیمی مثل بارش و دما، روند کاهش داشته و این تغییرات در مراتع چشم‌گیرتر است. همچنین بررسی‌های آنها نشان داد که نتایج مدل CASA با برآوردهای زمینی دارای همبستگی بوده که با نتایج این پژوهش مشابهت دارد (۲۶، ۱۰). پژوهش جاری همانند نتایج دیگر پژوهشگران نشان داد که با استفاده از مدل تبخیر و تعرق پتانسیل تورنت‌ویت و تخمین پتانسیل تولید خالص اولیه و به کمک مدل CASA و سناریوهای گسترش و یا بازگشت بیابان‌زایی می‌توان اثر فعالیت‌های انسانی و اقلیمی

■ References

- 1) Akbari, M., Ownegh, M., Asgari, H., Sadoddin, A., & Khosravi, H. (2016). Soil Erosion Risk Assessment Using the CORINE Model (Case Study: Semi-Arid Region in Golestan Province). *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 5 (12), 63-78. (in Farsi)
- 2) Akbari, M., Shalamzari, M. J., Memarian, H., & Gholami, A. (2020). Monitoring desertification processes using ecological indicators and providing management programs in arid regions of Iran. *Ecological Indicators*, 111. 106011
- 3) CAI, H., Yang, X., & Xu, X. (2015). Human-induced grassland degradation/restoration in the central Tibetan Plateau: The effects of ecological protection and restoration projects. *Ecological Engineering*, 83, 112-119.
- 4) Chen, B., Zhang, X., Tao, J., Wu, J., Wang, J., Shi, P., Zhang, Y., & Yu, C. (2014). The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189-190, 11-18.
- 5) Chervenkov, H., & Slavov, K. (2017). Theil-sen estimator for the parameters of the generalized extreme value distributions: Demonstration for meteorological applications. *Comptes Rendus de L'Academie Bulgare Des Sciences*, 70 (12), 1701-1708.
- 6) Davari, S., Rashki, A., Akbari, M., & Talebanfard, A. (2017). Assessing intensity and risk of desertification and management programs (Case study: Ghasemabad plain of Bajestan, Khorasan Razavi Province). *Journal of Desert Management*, 5 (1) 91-106. (in Farsi)
- 7) Donmez, C., Berberoglu, S., & Curran, P.J. (2011). Modelling the current and future spatial distribution of NPP in a Mediterranean watershed. *Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13 (3), 336-345.
- 8) Evans, J., & Geerken, R. (2004). Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Arid Environments*, 57 (4), 535-554.

- 9) Field, C.B., Randerson, J.T., & Malmström, C.M. (1995). Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51 (1), 74–88.
- 10) Hadian, F., Jafari, R., Bashri, H., & Tarkesh, M. (2019). Performance Comparison of MODIS and Landsat Data in Estimating of NPP in Arid Regions of Isfahan Province. *Desert Management*, 6 (12), 89–106. (in Farsi)
- 11) Hanafi, A., & Jauffret, S. (2008). Are long-term vegetation dynamics useful in monitoring and assessing desertification processes in the arid steppe, southern Tunisia. *Arid Environments*, 72 (4), 557–572.
- 12) Herrmann, S.M., Anyamba, A., & Tucker, C. J. (2005). Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, 15 (4), 394–404.
- 13) Jafari, H., Akbari, M., Kashki, M., & Badiee Nameghi, S.H. (2019). An efficiency comparison of the IMDPA and ESAs models on desertification risk management in arid regions of southern Khorasan Razavi, Iran. *Arid Biome*, 9 (1), 39-54. (in Farsi)
- 14) Li, Q., Zhang, C., Shen, Y., Jia, W., & Li, J. (2016). Quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification processes on the Qinghai-Tibet Plateau based on net primary productivity. *Catena*, 147, 789–796.
- 15) Lieth, H., & Box, E. (1972). Evapotranspiration and primary productivity: CW Thornthwaite memorial model. *Publications in Climatology*, 25 (2), 37–46.
- 16) Lieth, H., & Whittaker, R.H. (1975). *Primary Productivity of the Biosphere. Ecological Studies*. Berlin: Springer.
- 17) Memarian, H., & Akbari, M. (2021). Prediction of combined effect of climate and land use changes on soil erosion in Iran using GloSEM data. *Ecohydrology*, 8(2), 513-534. (in Farsi)
- 18) Millington, J.D.A., Perry, G.L.W., & Romero-Calcerrada, R. (2007). Regression techniques for examining land use/cover change: A case study of a mediterranean landscape. *Ecosystems*, 10 (4), 562–578.
- 19) Mohammadi Moghaddam, S., Ghorbani, A., Arzani, H., Azizi Mobaser, J., & Mostafazadeh, R. (2022). Modelling Above ground net primary production of Sabalan rangelands using vegetation index and non-linear regression. *Rangeland*, 16 (1), 33–51. (in Farsi)
- 20) Mouat, D. , Lancaster, J. , Wade, T. , Wickham, J. , Fox, C. , Kepner, W. , & Ball, T. (1997). Desertification evaluated using an integrated environmental assessment model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 48 (2), 139–156.
- 21) Nabati, J., Nezami, A., Neamatollahi, E., Akbari, M. (2020). GIS-based agro-ecological zoning for crop suitability using fuzzy inference system in semi-arid regions. *Ecological Indicator*, 117, 106646.
- 22) Nabati, J., Nezami, A., Neamatollahi, E., Akbari, M. (2020). An integrated approach land suitability for agroecological zoning based on fuzzy inference system and GIS. *Environment, Development and Sustainability*, 25, 2316-2338.
- 23) Nasrollahi, M., Zolfaghari, A.A., & Yazdani, M. R. (2021). Investigation of Pan evaporation paradox and climatic parameters affecting it in half-west and center of Iran. *Water and Soil Resources Conservation*, 11(1), 61–76. (in Farsi)
- 24) Potter, C.S., Randerson, J.T., Field, C.B., Matson, P.A., Vitousek, P.M., Mooney, H.A., & Klooster, S. A. (1993). Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(4), 811–841.

- 25) Rasmussen, K., Fog, B., & Madsen, J.E. (2001). Desertification in reverse? Observations from northern Burkina Faso. *Global Environmental Change*, 11 (4), 271–282.
- 26) Resources data-action. (2022). <https://Ladsweb.Modaps.Eosdis.Nasa.Gov/Data/Search>. Html. Retrieved from <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/data/search>. Html.
- 27) Saki, M., Soltani koupaei, S., Tarkesh esfahani, M., & Jafari, R. (2018). Spatial and Temporal Changes of Net Primary Production (NPP) and Their Relationship with Climatic Factors from 2000 to 2014 in Isfahan Province. *Applied Ecology*, 7 (1), 27–40. (in Farsi)
- 28) UNCED. (1992). *AGENDA21: Conservation and management of resources for*. Retrieved June 14, 1992, from <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>
- 29) Wessels, K.J., Prince, S.D., Malherbe, J., Small, J., Frost, P.E., & VanZyl, D. (2007). Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa. *Arid Environments*, 68 (2), 271–297.
- 30) Wrbka, T., Erb, K.H., Schulz, N.B., Peterseil, J., Hahn, C., & Haberl, H. (2004). Linking pattern and process in cultural landscapes. An empirical study based on spatially explicit indicators. *Land Use Policy*, 21 (3), 289–306.
- 31) Xianglin, L. (2009). *Mechanisms of degradation in grazed rangelands*. China: Rangeland Degradation and Recovery in China's Pastoral Lands.
- 32) Xu, D.Y., Kang, X.W., Zhuang, D.F., & Pan, J.J. (2010). Multi-scale quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification - A case study of the Ordos Plateau, China. *Arid Environments*, 74 (4), 498–507.
- 33) Yazdanpanahi, A., Akbari, M., & Behrangmanesh, M. (2018). Spatio-temporal variable of groundwater parameters using Geo-statistical methods in Mashhad plain. *Extension and Development of Watershed Management*. 6 (20), 25-34. (in Farsi)
- 34) Yang, H., Mu, S., & Li, J. (2014). Effects of ecological restoration projects on land use and land cover change and its influences on territorial NPP in Xinjiang, China. *Catena*, 115, 85–95.
- 35) Yang, X., Zhang, K., Jia, B., & Ci, L. (2005). Desertification assessment in China: An overview. *Arid Environments*, 63 (2), 517–531.
- 36) Yu, D., Shi, P., Shao, H., Zhu, W., & Pan, Y. (2009). Modelling net primary productivity of terrestrial ecosystems in East Asia based on an improved CASA ecosystem model. *Remote Sensing*, 30 (18), 4851–4866.
- 37) Yu, D.Y., Shi, P.J., Han, G.Y., Zhu, W.Q., Du, S.Q., & Xun, B. (2011). Forest ecosystem restoration due to a national conservation plan in China. *Ecological Engineering*, 37 (9), 1387–1397.
- 38) Zhang, C., Wang, X., Li, J., & Hua, T. (2011). Roles of climate changes and human interventions in land degradation: A case study by net primary productivity analysis in China's Shiyanghe Basin. *Environmental Earth Sciences*, 64 (8), 2183–2193.
- 39) Zhou, W., Gang, C., Zhou, F., Li, J., Dong, X., & Zhao, C. (2015). Quantitative assessment of the individual contribution of climate and human factors to desertification in northwest China using net primary productivity as an indicator. *Ecological Indicators*, 48, 560–569.
- 40) Zhu, W., Pan, Y., He, H., Yu, D., & Hu, H. (2006). Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China. *Chinese Science Bulletin*, 51 (4), 457–463.