



Analysis of land use changes in the middle Taleghan watershed during a thirty-year period

Fatemeh Bahreini¹, Fatemeh Panahi*², Arash Malekian³, Mohammad Tahmoures⁴

1. PhD. Graduate., Department of Combating Desertification, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran.
2. Corresponding author; Associate Prof., Department of Combating Desertification, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran. E-mail: alabd_fpanahi@yahoo.com
3. Associate Prof., Department of Arid and Mountains Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
4. Assistant Prof., of Soil Conservation and Watershed Management Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Zanjan, Iran.

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 05.07.2018
Revised: 22.12.2018
Accepted: 29.12.2018

Keywords:
Gross primary productivity, drought, ecosystem model, correlation, Bordekhun.

Abstract

Background and objectives: Primary Gross Productivity (GPP) is a crucial factor in the carbon cycle of ecosystems. With the increasing occurrence of droughts due to global warming and the unique response of plant cover ages to these changes, it is necessary to identify and quantify the relationship between climate data and ecosystem's primary gross productivity. This research aims to determine the plant cover's response to drought by analyzing the region's primary gross productivity in the Bordekhun region in southwest Iran. This study introduces a new ecosystem model, focusing on two objectives: (1) simulating primary gross productivity through ecosystem modeling and (2) examining the response of primary gross productivity to drought during the growth season, evaluating the effectiveness of this model in an arid region.

Methodology: The research was conducted in three stages, including determining meteorological drought conditions over a 16-year period using the Standardized Precipitation Index (SPI), simulating primary gross productivity (GPP) using the new ecosystem model BGC-MAN (Bio-Geo-Chemistry Management Model), and validating it with MODIS satellite images. The quantification of the ecosystem's response to drought during the vegetation growth season was performed for the period from 2000 to 2015. The relationship between GPP and SPI was analyzed using the Pearson correlation coefficient, and the model was validated using the MODIS GPP product. The evaluation focused on the response of various grass and shrub vegetation forms to drought, with the percentage of coverage for each vegetation form utilized in 29 sampling points.

Results: The statistical analysis revealed a significant correlation coefficient ($p < 0.05$, $R^2 = 0.14$) between the modeled GPP and the GPP estimated from MODIS satellite images on a monthly scale. The temporal analysis of drought conditions over the 16-year period indicated consecutive droughts with varying severity, and the spatial distribution of drought severity showed that 48.79% and 51.21% of the study area were in normal and moderate drought states, respectively. The temporal analysis of changes in primary gross productivity during the growth season demonstrated a decreasing trend in most months except for December, with notable variations. The correlation analysis between primary gross productivity and drought

showed a significant positive correlation in grass forms during the months of January, February, and March, while for shrub forms, a significant positive correlation was observed only in the month of March.

Conclusion: The results indicated that grass showed the highest correlation in the middle of the growing season (December and January) ($R = 0.29$), while shrubs showed the highest correlation at the end of the growing season (February and March) ($R = 0.28$), indicating their different sensitivity to water scarcity during the growth season. The study also revealed that ecosystem modeling could be an alternative approach to estimating GPP with the potential to simulate spatial GPP in arid regions. However, the proposed model's performance in other regions still requires further verification.

Cite this article: Bahreini, F., F. Panahi, A. Malekian, M. Tahmoures, 2023. Analysis of land use changes in the middle Taleghan watershed during a thirty-year period. *Journal of Rangeland*, 17(1): 15-31.



© The Author(s).

DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.1.2.1

Publisher: Iranian Society for Range Management

ارزیابی حساسیت تولید ناخالص اولیه مرتع به خشکسالی با استفاده از مدل سازی اکوسیستمی

فاطمه بحرینی^۱، فاطمه پناهی^{۲*}، آرش ملکیان^۳، محمد طهمورث^۴

۱. دانش آموخته دکتری بیابان‌زدایی، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. رایان‌نامه: alabd_fpanahi@yahoo.com
۳. استاد گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۴. استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل - پژوهشی	سابقه و هدف: تولید ناخالص اولیه (GPP) یکی از فاکتورهای بسیار مهم در چرخه کربن اکوسیستم‌ها است. با افزایش گرمایش جهانی، فراوانی وقوع خشکسالی و پاسخ منحصر به فرد پوشش‌های گیاهی مختلف به این تغییرات، ضروری است که ارتباط بین داده‌های اقلیمی و تولید ناخالص اولیه اکوسیستم، شناسایی و کمی‌سازی شود. هدف این تحقیق تعیین پاسخ پوشش گیاهی به خشکسالی از طریق آنالیز تولید ناخالص اولیه منطقه بردخون واقع در جنوب غرب ایران به خشکسالی است. این مطالعه ضمن معرفی یک مدل اکوسیستمی جدید، با تمرکز بر دو هدف اصلی: (۱) شبیه‌سازی تولید ناخالص اولیه از طریق مدل‌سازی اکوسیستم و (۲) پاسخ تولید ناخالص اولیه به خشکسالی در طول فصل رشد، کارایی این مدل در منطقه خشک بررسی شد.
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۴	مواد و روش‌ها: این تحقیق در سه مرحله، مشخص کردن شرایط خشکسالی هواشناسی در دوره ۱۶ ساله با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، شبیه‌سازی تولید ناخالص اولیه (GPP) با بکارگیری مدل جدید اکوسیستمی (BGC-MAN (Bio-Geo-Chemistry Management Model) و اعتبارسنجی آن با تصاویر ماهواره‌ای مودیس و در نهایت کمی کردن پاسخ تولید اکوسیستم به خشکسالی در طول فصل رشد پوشش گیاهی برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ انجام شد. بعد از مشخص کردن الگوی زمانی (ماه‌های فصل رشد طی ۱۶ سال) و الگوی مکانی تولید ناخالص اولیه و خشکسالی در منطقه، ارتباط بین GPP و SPI از طریق ضریب همبستگی پیرسون با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد آنالیز قرار گرفت. اعتبارسنجی مدل با استفاده از محصول GPP مودیس با فاصله زمانی ۱۶ روزه (MOD13A3) در بازه زمانی مشابه با خشکسالی انجام گردید. کار ارزیابی در این پژوهش با تاکید بر پاسخ انواع فرم پوشش گیاهی علفی و بوته‌ای به خشکسالی تعریف شد و لذا درصد تحت پوشش هر یک از فرم‌های رویشی در ۲۹ نقطه نمونه‌برداری (مجموعاً ۲۹۰ پلات) مورد استفاده قرار گرفت.
تاریخ ویرایش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۱	
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۸	
واژه‌های کلیدی: تولید ناخالص اولیه، خشکسالی، مدل اکوسیستمی، همبستگی، بردخون.	
	نتایج: نتایج تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که ضریب همبستگی بین GPP مدل‌سازی شده با GPP برآورد شده از تصاویر ماهواره مودیس در مقیاس ماهانه معنی‌دار ($R^2=0/14, P<0/05$) است. آنالیز زمانی وضعیت خشکسالی در دوره ۱۶ ساله نشان داد که منطقه مورد مطالعه شاهد خشکسالی‌های پی در پی با درجات متفاوت شدت خشکسالی، در سال‌های متوالی هست و توزیع مکانی شدت خشکسالی نشان داد که به‌ترتیب ۴۸/۷۹ و ۵۱/۲۱ درصد منطقه مورد مطالعه در وضعیت خشکسالی نرمال و متوسط قرار دارد. نتایج آنالیز

تغییرات زمانی تولید ناخالص اولیه در فصل رشد، نشان داد که روند کاهشی در بیشتر ماه‌های فصل رشد به جز دی‌ماه وجود دارد. همچنین نتایج همبستگی بین تولید ناخالص اولیه و خشکسالی نشان داد که در فرم رویشی علفی در ماه‌های بهمن، اسفند و فروردین و برای فرم رویشی بوته‌ای تنها در ماه فروردین همبستگی مثبت معنادار وجود دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که در شرایط خشکسالی، پوشش گیاهی علفی بیشترین همبستگی را در میانه فصل رشد (دی و بهمن) ($R=0/29$) دارد در حالیکه بیشترین همبستگی برای پوشش گیاهی بوته‌ای در ماه‌های انتهای فصل رشد (اسفند و فروردین) ($R=0/28$) به دست آمد که این امر حاکی از حساسیت متفاوت آنها به کمبود آب در مرحله رشد دارد. نتایج اشاره به این دارند که مدل‌سازی اکوسیستمی، می‌تواند یک روش جایگزین در برآورد تولید اکوسیستم باشد و پتانسیل شبیه‌سازی در منطقه خشک را دارد، هر چند کارایی مدل پیشنهادی باید در مناطق دیگر مورد ارزیابی قرار گیرد.

استناد: بحرینی، ف.، ف. پناهی، آ. ملکیان، م. طهمورث، ۱۴۰۲. ارزیابی حساسیت تولید ناخالص اولیه مرتع به خشکسالی با استفاده از مدل‌سازی اکوسیستمی. مرتع، ۱۷(۱): ۳۱-۱۵.



DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.1.2.1

© نویسندگان

ناشر: انجمن علمی مرتعداری ایران

مقدمه

تولید ناخالص اولیه (GPP) به عنوان معیاری برای مقدار جذب کربن توسط پوشش گیاهی از طریق فتوسنتز (۲۹، ۱۸)، نقطه شروع چرخه بیوژئوشیمیایی کربن و یکی از فاکتورهای اصلی در کنترل مبادلات جریان کربن بین زمین و اتمسفر محسوب می شود (۳۲)، بنابراین برآورد تولید ناخالص اولیه اکوسیستم های گیاهی و درک پتانسیل حساسیت آن به تغییر اقلیم اهمیت بالایی دارد و به طور چشمگیری بر اکوسیستم های طبیعی در بسیاری از مناطق جهان تأثیر گذاشته است (۴۲). علاوه بر این، افزایش دما و وقوع خشکسالی می تواند سبب تقلیل تولید بیوماس شود (۳ و ۷). پاسخ اکوسیستم ها به تنش خشکی نیز از لحاظ مکانی بسیار ناهمگن است. همچنین منجر به تغییر ترکیب گونه، ساختار و عملکرد پوشش گیاهی در اکوسیستم های طبیعی زمین می شود. از طرفی این تغییرات می تواند بر روی محصولات ضروری و خدمات به دست آمده از این اکوسیستم ها تأثیر بگذارد (۳۴). درک واکنش اکوسیستم ها به تغییر شرایط آب و هوایی و بازخورد آنها به سیستم اقلیم جهانی در حال حاضر یکی از مهم ترین اهداف تحقیق در مطالعات مدل سازی اکوسیستم است (۳۶). روش های متعددی تا کنون جهت بررسی اثر خشکسالی بر منابع اکوسیستم خاکی توسعه یافته است که در سال های اخیر، مطالعات در مقیاس جهانی و منطقه ای بر استفاده از مدل های اکوسیستمی متمرکز شده اند. اگرچه ممکن است یک مدل یکسان، برآورد کاملاً ناهمسان از تولید اکوسیستم از لحاظ کمی، توزیع مکانی و روند بویژه در مقیاس منطقه ای داشته باشد (۱۸). از مزایای مدل های اکوسیستمی می توان به، ۱- بررسی مقدار و توزیع ذخیره کربن، ۲- پیش بینی رفتار اکوسیستم های متفاوت در رابطه با تغییر غلظت CO₂ در هوا، ۳- بررسی کنترل تنش آبی و خشکی بر تعادل کربن، ۴- پیش بینی پارامترهای مهم و مفید برای مدیریت اکوسیستم ها، اشاره کرد (۱۰). تا کنون گزارش های متعددی از بررسی اثر خشکسالی بر عملکرد اکوسیستم از قبیل تولید ناخالص اولیه (GPP)، تولید خالص اولیه (NPP) و ذخیره کربن ارائه شده است (۱، ۶، ۸، ۱۲، ۱۵، ۱۳، ۲۴، ۴۳، ۳۹، ۴۴). در بررسی اثر خشکسالی بر روی یک سایت مطالعاتی در آفریقا به این نتیجه رسیدند

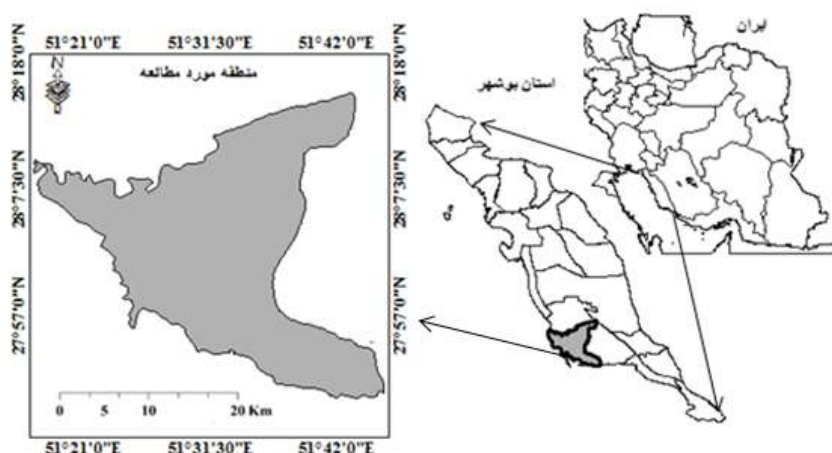
که خشکسالی بر روی گراسلندهای نیمه خشک در جنوب غربی سایت (با شرایط گرم تر و مرطوب تر) در مقایسه با بخش مرکزی و شمالی سایت (با شرایط سردتر و خشک تر) تأثیر مشخصی نداشته است. هرچند عملکرد گیاهان در بخش جنوب غربی نمی تواند بی ربط به ویژگی های خاک و دیگر شرایط باشد اما عدم تأثیر خشکسالی، به دلیل پاسخ به بارندگی بالا در طول فصل رشد بوده است (۸). شبیه سازی تولید ناخالص اولیه با استفاده از پنج وضعیت مدل دینامیک پوشش گیاهی در چین برای دوره ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۰ انجام شد. در این مطالعه کل مقدار GPP با متوسط ۷/۹۷ (پگاگرم کربن در سال) بیشتر از مقدار برآورد شده در مطالعات قبلی برآورد گردید که بالاترین مقدار برآورد شده، در شرایط گرم و مرطوب چین بود. شبیه سازی افزایش GPP را برای این دوره نشان داد بطوریکه همبستگی معنی داری میان دما و بارندگی و مقدار GPP مشاهده شد (۱۸). نتایج بررسی روند جهانی تولید ناخالص اولیه (GPP) به عنوان یکی از ترکیبات مهم چرخه کربن، نشان داد که مقدار برآورد شده GPP با استفاده از تصاویر مودیس و مدل اکوسیستمی (MTE) از لحاظ مکانی منطبق با هم بودند اما روند زمانی متفاوت بود. به طوری که تغییرات GPP در مقیاس منطقه ای و محلی از لحاظ زمانی بسیار متفاوت است. محققین به این نتیجه رسیدند که تولید اکوسیستم با افزایش شدت خشکسالی در برخی مناطق می تواند به طور معناداری افزایش یا کاهش یابد (۴۰). اگرچه مطالعات متعددی، بر ارزیابی ارتباط بین خشکسالی و تولید اکوسیستم پرداخته اند اما عمدتاً این مطالعات در سطح منطقه ای و جهانی بوده است و کمتر در منطقه خشک انجام شده است. هدف این تحقیق تعیین پاسخ پوشش گیاهی به خشکسالی از طریق آنالیز تولید ناخالص اولیه و خشکسالی در طول فصل رشد در منطقه خشک واقع در جنوب غرب ایران است. این مطالعه ضمن معرفی یک مدل اکوسیستمی جدید، با تمرکز بر دو هدف اصلی: (۱) شبیه سازی تولید ناخالص اولیه از طریق مدل سازی اکوسیستم و (۲) پاسخ تولید ناخالص اولیه به خشکسالی در طول فصل رشد، به بررسی کارایی این مدل در مناطق خشک خواهد پرداخت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه به وسعت ۹۳۱/۱۱ کیلومتر مربع، در محدوده جغرافیایی "۵۱° ۳۲' ۵۹" تا "۵۱° ۲۸' ۴۷" طول شرقی و "۲۸° ۱۲' ۲۱" تا "۲۷° ۵۹' ۵۵" عرض شمالی واقع در استان بوشهر است. در طول دوره آماری ۱۶ (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵) ساله متوسط بارندگی حوضه ۲۴۲/۳۷ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه ۲۵/۸ درجه سانتی‌گراد، که بیشتر بارندگی در طول فصل رشد (از آبان تا فروردین) رخ می‌دهد.

بیشتر سطح منطقه مورد مطالعه را گونه‌های مرتعی علفی و بوته‌ای تشکیل می‌دهد که گونه‌های بوته‌ای غالب *Artemisia sieberi*, *Astragalus fasticolipholius*, *Zygophyllum eurypterum*, *Amygdalus lycioides*, *Stipa capensis*, *Hordeum bulbosum*, *Alhagi camelorum*, *Stipagrostis pennata*, *Bromus tectorum*, در منطقه مورد مطالعه می‌توان به *Poa annua*, *Aeloropus litoralis*, *Cenchrus ciliaris*, *Chenopodium album*, *Anthemis arvensis*, اشاره کرد. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران و استان بوشهر

روش تحقیق

این تحقیق شامل سه بخش، مشخص کردن شرایط خشکسالی هواشناسی در دوره ۱۶ ساله با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) (۱۹)، شبیه‌سازی تولید ناخالص اولیه (GPP) با بکارگیری مدل جدید اکوسیستمی -BGC-MAN (۲۸) و اعتبار سنجی آن با تصاویر ماهواره‌ای مودیس و در نهایت کمی کردن پاسخ تولید اکوسیستم به خشکسالی در طول فصل رشد پوشش گیاهی در بیش از یک دهه دوره آماری است. برای به دست آوردن خشکسالی، شاخص‌های زیادی وجود دارند ولی بهترین و ساده‌ترین شاخص، شاخص SPI بوده که با داشتن سطح نزولات جوی در سال می‌توان درصد خشکسالی را محاسبه کرد.

لازم به ذکر است که کار ارزیابی در این پژوهش با تاکید بر پاسخ انواع فرم پوشش گیاهی علفی، بوته‌ای و درختی به خشکسالی تعریف شده است و لذا درصد تحت پوشش هر یک از فرم‌های رویشی در هر یک از نقاط نمونه‌برداری (۲۹ نقطه) مورد استفاده قرار گرفت. هر یک از این نقاط یک مربع فرضی (۲۵۰×۲۵۰ متر) منظور گردید. در داخل هر یک از این مربعات نمونه‌برداری با استفاده از پلات و به روش اندازه‌گیری دو قطر اصلی (۵ پلات ۵×۵ به فاصله ۵۰ متر از یکدیگر در هر قطر) انجام گردید. مختصات مرکز هر پلات با استفاده از دستگاه GPS برداشت گردید. اطلاعات هر پلات شامل: درصد تاج پوشش گیاهی برای تمام گونه‌های موجود در پلات، درصد سنگ و سنگ‌ریزه، خاک لخت برای ۲۹۰ پلات

در زمان رشد پوشش گیاهی (بهمن تا ن۱) میزان پوشش تاجی هر یک از فرم‌های رویشی علفی و بوته‌ای در ۲۹ نقطه نمونه‌برداری منطقه مورد مطالعه نشان را می‌دهد.

جدول ۱: درصد تحت پوشش فرم‌های رویشی علفی و بوته‌ای در نقاط نمونه‌برداری منطقه مورد مطالعه

نقاط نمونه‌برداری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
گیاهان علفی (درصد)	۷۵	۸۵	۷۰	۶۵	۶۰	۱۵	۱۵	۴۰	۳۰	۲۵	۲۵	۴۰	۱۰	۵۰	۲۰
گیاهان بوته‌ای (درصد)	۲۵	۱۰	۳۰	۳۵	۴۰	۸۵	۸۵	۶۰	۸۰	۷۵	۷۵	۶۰	۹۰	۵۰	۸۰
ادامه نقاط	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	
گیاهان علفی (درصد)	۲۰	۲۰	۳۰	۲۵	۴۰	۴۵	۳۰	۵۰	۴۰	۱۰	۱۰	۳۰	۲۰	۱۰	
گیاهان بوته‌ای (درصد)	۸۰	۸۰	۷۰	۷۵	۶۰	۵۵	۸۰	۵۰	۶۰	۹۰	۹۰	۷۰	۸۰	۹۰	

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

در این مطالعه، وضعیت خشکسالی با استفاده از داده‌های بارندگی ۱۶ ساله از ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده و اطراف منطقه مورد مطالعه، با استفاده از بسته SPI در نرم افزار R، در دوره زمانی شش ماهه مشخص گردید. برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم، تحلیل روند انجام شد، که از یک مدل خطی، به دلیل محاسبات ساده و کارآمد استفاده گردید. قبل از تحلیل روند، نرمال بودن پارامتر اقلیمی و شاخص اکولوژیکی با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در SPSS محاسبه شد. همچنین روش‌های درون‌یابی مکانی متعددی از قبیل IDW، تیسن پلی‌گون و روش کریجینگ وجود دارد، که عمدتاً ارزیابی و تعیین دقت روش‌های درون‌یابی با استفاده از معیار ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) انجام می‌شود. در این مطالعه روش مناسب درون‌یابی بر اساس کمترین RMSE انتخاب شد.

مدل BGC-MAN جهت شبیه سازی تولید ناخالص اولیه

در این تحقیق اندازه‌گیری عرصه‌ای در تمام سطح منطقه و در طول دوره آماری ۱۶ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵)، قابل دسترسی نیست بنابراین برآورد تولید ناخالص اولیه با مدلسازی اکوسیستمی انجام شد. مدل اکوسیستمی BGC-MAN، توسط پروفیسور Pietsch از موسسه بین‌المللی یاسا (Pietsch International Institute for Applied Systems Biome-Analysis (IIASA)) در سال ۲۰۱۴ بر اساس مدل BGC 4.2 (۲۱،۲۶) با تمرکز بر مدیریت اکوسیستم (۱۱،۲۰،۳۷،۲۵)، هیدرولوژی خاک (۲۷) و دینامیک اکوسیستم توسعه یافت. این مدل یک مدل بیوژئوشیمیایی،

قادر بر شبیه‌سازی سیکل انرژی، آب، کربن و نیتروژن اکوسیستم در مقیاس محلی، منطقه‌ای و جهانی است. مدل با استفاده از اطلاعات اولیه اکوسیستم مورد نظر، اطلاعات اقلیمی، اطلاعات اکوفیزیولوژیکی و اطلاعات مربوط به مداخلات مدیریتی قادر به برآورد روزانه بیش از ۵۰۰ پارامتر هواشناسی، هیدرولوژی، اکوفیزیولوژیکی، فنولوژی و اطلاعات مربوط به سیکل کربن و نیتروژن در اکوسیستم خاکی است. در حال حاضر نسخه رایگان مدل BGC-MAN قابل دسترس نیست و با مراجعه به سایت موسسه بین‌المللی IIASA و ارسال ایمیل به پروفیسور Pietsch (pietsch@iiasa.ac.at) در اختیار محققان قرار خواهد گرفت.

داده‌های ورودی مدل

مشخصات سایت: اطلاعات کلی مربوط به سایت (شامل طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع، شیب و جهت، عمق و بافت خاک، نوع گیاهان) است. که اطلاعات جغرافیایی از نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه مورد نظر بر گرفته از سایت USGS تهیه شد. عمق و بافت خاک و نوع گیاهان از مطالعات میدانی (۲۹ نقطه نمونه‌برداری در فصل رشد سال ۲۰۱۴ بر اساس روش تصادفی-سیستماتیک) و استفاده مطالعات مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی، اداره منابع طبیعی آبخیزداری استان بوشهر تهیه گردید. اطلاعات مربوط به ۲۹ نقطه نمونه‌برداری در جدول ۲ ارائه شده است.

اطلاعات اقلیمی: داده‌های هواشناسی روزانه (دمای حداقل و حداکثر روزانه، بارندگی روزانه) بر اساس نزدیکترین ایستگاه اقلیم شناسی به منطقه مورد مطالعه

(ایستگاه معرف) در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ جمع‌آوری شد. برای اجرای مدل نیاز به اطلاعات دیگر هواشناسی از قبیل میانگین روزانه کمبود فشار بخار هوا (VPD)، طول موج تابش خورشیدی (Srad) و طول روز (Day length) است. این اطلاعات با استفاده از خروجی نرم‌افزار MT-CLIM4.3 که داده‌های ورودی آن، دمای حداقل و حداکثر روزانه، بارندگی روزانه است به‌دست آمد (۳۸).

داده‌های اکوفیزیولوژیکی: شرح تمامی اطلاعات اکوفیزیولوژیکی مورد نیاز برای اجرای مدل توسط پروفیسور Pietsch و همکاران ارائه شده است (۲۶). بیشتر پارامترها با مقدار پیش فرض مدل، برای اجرای مدل BGC-MAN استفاده شد، اما برخی پارامترها با توجه به نوع و ساختار پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه تعدیل شد. جدول ۳ شرح فاکتورهایی که برای منطقه مورد نظر تعدیل شده است نشان می‌دهد. در این تحقیق درصد کربن برگ گیاه و خاک با روش والکی بلک، درصد ازت برگ گیاه و خاک با روش کجلدال و بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری در آزمایشگاه دانشکده منابع طبیعی کرج اندازه‌گیری شد. ضریب آلبدو با استفاده از محصول آلبدو مودیس (MCD43A3) برای ۲۹ نقطه نمونه‌برداری اخذ گردید. لازم به ذکر است که تنها فاکتور مربوط به ازت و کربن برگ گیاه در جدول (۳)، اندازه‌گیری شده است.

فرآیند شبیه‌سازی

فرآیند شبیه‌سازی با در نظر گرفتن مقدار کربن موجود در برگ به مقدار ۰/۵ (گرم بر مترمربع) (بر اساس متوسط داده‌های آزمایشگاهی گونه‌های گیاهی منطقه مورد مطالعه، مقدار کربن موجود در برگ ۰/۵ گرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است.) و داده‌های خروجی حاصل از نرم‌افزار MT-CLIM اجرا می‌شود. فرآیند مدل‌سازی تا زمانی ادامه می‌یابد که مقدار محتوای کربن موجود در گیاه، به یک مقدار ثابت در میان استخرهای کربن و نیتروژن اکوسیستم، حاصل از خروجی نرم‌افزار برسد. این وضعیت ثبات در ارزش عددی کمتر از ۰/۵ (گرم بر مترمربع) میان دو تکرار توالی داده‌های اقلیمی (در این مطالعه دو تکرار توالی: از ۱۹۸۳ تا ۲۰۰۰ و ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ بود) نشان داده می‌شود. بعد از رسیدن به این وضعیت، فرآیند نهایی شبیه‌سازی برای ۲۹ نقطه نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه در دوره آماری

مورد نظر با گام زمانی ماهانه اجرا می‌شود. با توجه به هدف مد نظر داده خروجی از نرم‌افزار مورد آنالیز قرار گرفت. در این تحقیق، میانگین ارزش عددی تولید ناخالص اولیه (GPP) در تمامی نقاط نمونه‌برداری در نرم‌افزار ArcGIS10.3 و روش پهنه‌بندی IDW مورد آنالیز قرار گرفت. ضریب همبستگی میان GPP مدل‌سازی شده و مقدار برآورد شده حاصل از تصاویر ماهواره‌ای مودیس برای ارزیابی صحت برآورد GPP حاصل از مدل مورد استفاده شد (۹، ۱۶، ۲۳، ۳۴ و ۳۳). همچنین ارتباط بین GPP و خشکسالی از طریق ضریب همبستگی پیرسون میان GPP و SPI با استفاده از نرم‌افزار SPSS.22 مورد آنالیز قرار گرفت. برای اجرای این همبستگی به لحاظ مکانی جهت انجام مقایسه، باید داده‌های GPP و SPI در رزولوشن یکسان باشند. در واقع خروجی نرم‌افزار با رزولوشن ۱ متر مربع و MODIS-GPP با رزولوشن (۱ در ۱ کیلومتر مربع) هستند. گرید داده‌های MODIS و GPP با استفاده از روش resampling a raster در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.3 رزولوشن مکانی ۱ درجه برای انطباق با داده‌های اقلیمی ریسمل (یکسان‌سازی رزولوشن پیکسل لایه مختلف) شد. به‌دلیل پیچیدگی مدل‌های اکوسیستمی، داده‌های ورودی این مدل‌ها به سختی به طور مستقیم به‌دست می‌آیند لذا نیاز است که صحت کارائی مدل مورد آزمون قرار گیرد. به همین دلیل باید اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های مرجع انجام گردد. داده‌های مرجع یا بر اساس تصاویر ماهواره‌ای و یا داده‌های مشاهده‌ای و یا داده‌ها و آمار برگرفته از مطالعات قبلی است. در این مطالعه به‌دلیل عدم وجود داده‌های میدانی و مطالعات قبلی، داده‌های مرجع بر اساس تصاویر ماهواره‌ای مودیس برگرفته از سایت USGS (تصاویر مودیس با فاصله زمانی ۱۶ روزه (MOD13A3)) منطبق با دوره مطالعه خشکسالی (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵) مورد استفاده قرار گرفت. آنالیز ما متمرکز بر فصل رشد بوده، و تنها تصاویر فصل رشد از تصاویر ماهواره‌ای مودیس گرفته و برای آنالیز تغییرات سالانه مورد استفاده قرار گرفت. ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) میان فاکتور مدل‌سازی شده و مقدار برآورد شده حاصل از تصاویر ماهواره‌ای برای ارزیابی صحت مقدار مدل‌سازی شده مورد استفاده قرار

گرفت. که هر چه میزان RMSE کمتر باشد، عملکرد مدل بهتر است.

جدول ۲: اطلاعات پایه ورودی مدل BGC-MAN برای ۲۹ نقطه نمونه برداری

نقاط	مختصات جغرافیایی	ارتفاع (m)	ضریب آبیبدو	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	عمق خاک (m)	نیترژن خاک
۱	۵۱° ۴۷' - ۲۸° ۰۴'	۱۹	۰/۴۲	۸۰	۱۲	۸	۰/۴	۰/۰۸
۲	۵۱° ۵۳' - ۲۸° ۰۳'	۶۰	۰/۴۶	۷۰	۱۰	۲۰	۰/۱	۰/۰۷
۳	۵۱° ۵۵' - ۲۸° ۰۷'	۱۰۹	۰/۴۳	۷۵	۱۳	۱۲	۰/۱۵	۰/۰۵
۴	۵۱° ۴۹' - ۲۸° ۱۱'	۲۶	۰/۴۵	۸۲	۱۲	۶	۰/۳	۰/۰۹
۵	۵۱° ۵۳' - ۲۸° ۱۵'	۲۰	۰/۴۴	۸۰	۱۲	۸	۰/۳	۰/۰۶
۶	۵۱° ۵۷' - ۲۸° ۱۰'	۱۶۷	۰/۳۸	۴۸	۳۸	۱۴	۰/۱۵	۰/۰۳
۷	۵۱° ۵۵' - ۲۸° ۱۷'	۴۵	۰/۴۳	۹۰	۵	۵	۰/۲	۰/۰۷
۸	۵۱° ۵۳' - ۲۸° ۱۳'	۵۵	۰/۴۵۹	۹۳	۳	۴	۰/۲۵	۰/۰۳
۹	۵۱° ۵۰' - ۲۸° ۰۳'	۳۷	۰/۴۵۲	۸۸	۶	۶	۰/۳	۰/۰۵
۱۰	۵۱° ۴۷' - ۲۸° ۰۳'	۱۱	۰/۴۴	۶۸	۲۰	۱۲	۰/۷	۰/۰۵
۱۱	۵۱° ۵۳' - ۲۸° ۰۵'	۷۸	۰/۴۸	۸۸	۸	۴	۰/۱۵	۰/۰۲
۱۲	۵۱° ۵۱' - ۲۸° ۰۷'	۴۲	۰/۴۷	۹۴	۲	۴	۰/۲۵	۰/۰۳
۱۳	۵۱° ۵۳' - ۲۸° ۰۹'	۵۸	۰/۴۹	۸۳	۱۲	۵	۰/۳	۰/۰۷
۱۴	۵۱° ۵۵' - ۲۸° ۱۱'	۷۹	۰/۴۶	۸۰	۱۲	۸	۰/۱	۰/۰۴
۱۵	۵۱° ۳۳' - ۲۸° ۱۰'	۷	۰/۲۴	۹۴	۵	۱	۰/۰۵	۰/۰۵
۱۶	۵۱° ۴۲' - ۲۸° ۰۸'	۶	۰/۵۲	۷۴	۱۸	۸	۰/۲	۰/۰۶
۱۷	۵۱° ۴۸' - ۲۸° ۱۵'	۱۴	۰/۴۵۷	۵۸	۲۰	۲۲	۰/۵	۰/۰۳

ادامه جدول ۲

۱۸	۵۱° ۵۱' - ۲۷° ۹۸'	۲۱	۰/۴۸۷	۷۳	۱۵	۱۲	۰/۴	۰/۰۳
۱۹	۵۱° ۶۱' - ۲۷° ۹۳'	۳۰۸	۰/۳۱۷	۴۸	۳۶	۱۶	۰/۴	۰/۰۵
۲۰	۵۱° ۵۸' - ۲۸° ۱۴'	۲۱۷	۰/۳۶۶	۸۷	۹	۴	۰/۱	۰/۰۳
۲۱	۵۱° ۵۹' - ۲۸° ۱۶'	۱۴۱	۰/۳۸۵	۸۲	۹	۹	۰/۱	۰/۰۴
۲۲	۵۱° ۵۸' - ۲۸° ۱۸'	۲۵	۰/۴۹۱	۶۵	۲۴	۱۱	۰/۱۵	۰/۰۵
۲۳	۵۱° ۶۲' - ۲۸° ۲۲'	۷۹	۰/۴۳۹	۵۸	۲۶	۱۶	۰/۲	۰/۰۸
۲۴	۵۱° ۵۷' - ۲۸° ۲۰'	۱۶	۰/۴۲۷	۶۲	۲۸	۱۰	۰/۳	۰/۰۲
۲۵	۵۱° ۴۷' - ۲۸° ۱۱'	۹	۰/۴۹	۹۲	۲	۶	۰/۴	۰/۰۲
۲۶	۵۱° ۷۳' - ۲۷° ۸۹'	۸۷	۰/۴۳۷	۳۸	۳۷	۲۵	۰/۱	۰/۰۱
۲۷	۵۱° ۷۱' - ۲۷° ۸۵'	۴۱	۰/۴۷۷	۸۶	۱۰	۴	۰/۱	۰/۰۲
۲۸	۵۱° ۶۱' - ۲۷° ۸۹'	۴۳	۰/۴۲۱	۸۹	۸	۳	۰/۱	۰/۰۲
۲۹	۵۱° ۵۴' - ۲۷° ۹۱'	۵	۰/۴۱۸	۸۵	۷	۸	۰/۱	۰/۰۲

جدول ۳: فاکتورهای تعدیل شده برای منطقه مورد نظر

نحوه گردآوری داده	پارامتر اکوفیزیولوژیکی
اندازه گیری میدانی و آزمایشگاهی و مطالعات اسنادی (۴۱)	New fine root C:new leaf C
اندازه گیری میدانی و آزمایشگاهی و مطالعات اسنادی (۴۱)	New stem C:new leaf C
مطالعات اسنادی (۴۱)	New live wood C:new total
مطالعات اسنادی (۴۱)	New root C:new stem C
اندازه گیری میدانی و آزمایشگاهی و مطالعات اسنادی (۴۱)	C:N of leaves
مطالعات اسنادی (۴۱)	C:N of fine roots
اندازه گیری میدانی و آزمایشگاهی و مطالعات اسنادی (۴۱)	Canopy average specific leaf area
مطالعات اسنادی (۴۱)	C:N of live wood
مطالعات اسنادی (۴۱)	C:N of dead wood

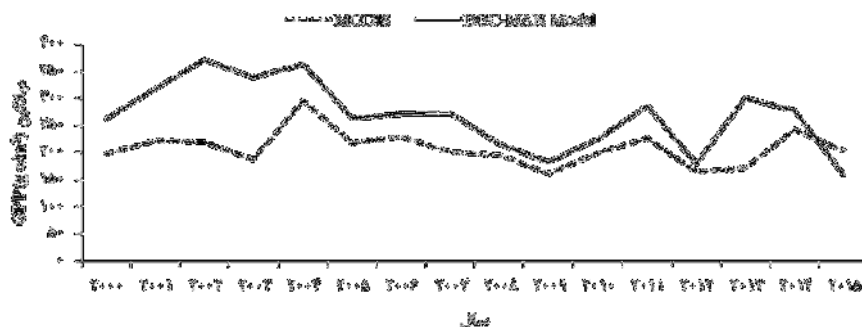
C: کربن برگ گیاه، N: ازت برگ گیاه، C:N: نسبت کربن به ازت برگ گیاه، New leaf: برگ سال جدید، New stem: ساقه سال جدید، New fine root: ریشه اولیه کمتر از ۲ میلیمتر قطر، Live wood: بخش چوبی گیاه که قادر به رشد هست، Dead wood: بخش چوبی گیاه که قادر به ادامه رشد نیست.

نتایج

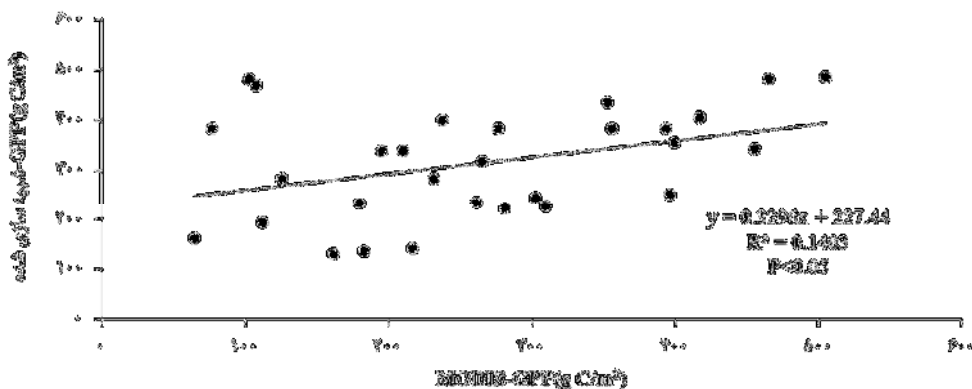
آنالیز صحت برآورد تولید ناخالص اولیه (GPP)

مقایسه نتایج مقدار GPP مدل‌سازی شده و GPP برگرفته از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲ می‌توان دید که مقدار مقدار GPP مدل‌سازی شده بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ نزدیک به مقدار GPP برگرفته از تصاویر ماهواره‌ای مودیس است. شکل ۳ نشان می‌دهد که ارتباط معنی‌داری ($P < 0.05$)، $R^2 = 0.14$ بین GPP مدل‌سازی شده ($RMSE = 0.41$) و

GPP برگرفته مودیس ($RMSE = 0.34$) در ۲۹ نقطه نمونه‌برداری وجود دارد. هر چند مقدار GPP مدل‌سازی شده در طول دوره ۱۶ ساله ۶۰ (گرم کربن بر مترمربع در سال) بزرگتر از GPP برگرفته مودیس به‌دست آمد اما بطور کلی نتایج نشان می‌دهد که مدل BGC-MAN برآورد قابل قبولی از مقدار GPP داشته است. همچنین نتایج آزمون همگنی داده‌ها نشان داد که تمام مجموعه داده‌ها در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد همگن هستند.



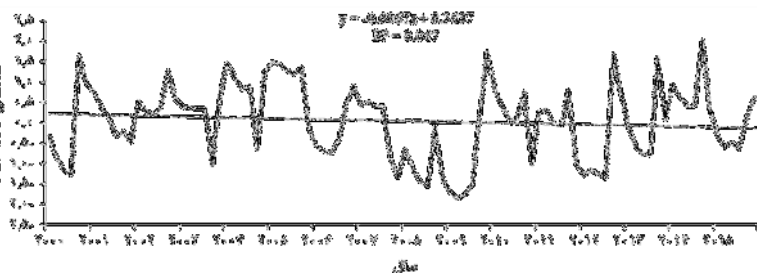
شکل ۲: مقایسه مقدار GPP مدل‌سازی شده با مدل BGC-MAN و GPP برگرفته از تصاویر MODIS



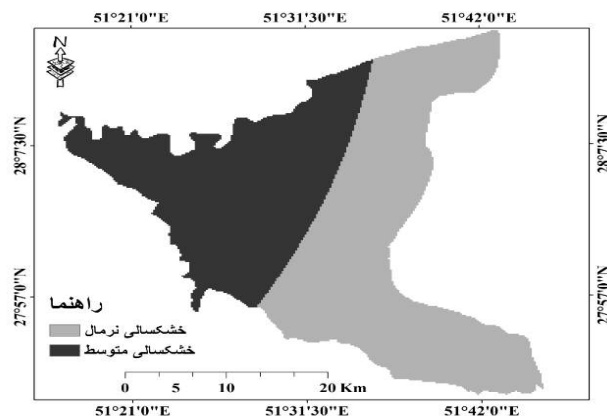
شکل ۳: رابطه میان GPP مدل سازی شده و GPP برگرفته از تصاویر MODIS در ۲۹ نقطه نمونه برداری

در وضعیت خشکسالی نرمال و متوسط قرار دارد (شکل ۵). روش درونیایی برای کل دوره ۱۶ ساله با روش IDW- Power 2 بر اساس میزان خطای RMSE کمتر (۰/۰۹) برای پهنه بندی شاخص خشکسالی انجام شد.

الگوی زمانی و مکانی خشکسالی در طول فصل رشد آنالیز زمانی وضعیت خشکسالی در دوره ۱۶ ساله نشان داد که در منطقه مورد مطالعه شاهد خشکسالی های پی در پی با درجات متفاوت شدت، در سالهای متوالی هستیم (شکل ۴). بررسی توزیع مکانی شدت خشکسالی نشان داد که به ترتیب ۴۸/۷۹ و ۵۱/۲۱ درصد منطقه مورد مطالعه



شکل ۴: متوسط شاخص خشکسالی بر اساس مقیاس زمانی شش ماهه برای دوره ۱۶ ساله در منطقه مورد مطالعه



شکل ۵: توزیع مکانی شدت خشکسالی در طول فصل رشد بر اساس SPI ۶ ماهه در دوره ۱۶ ساله

الگوی مکانی و زمانی تولید ناخالص اولیه (GPP) در طول فصل رشد

میانگین کل ماهانه GPP در منطقه مورد مطالعه ۲۸۴/۸۱ (گرم کربن بر مترمربع) برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ برآورد شد. آنالیز تغییرات زمانی تولید ناخالص اولیه در فصل رشد، اشاره به این دارد که حداکثر و حداقل میانگین تولید ناخالص اولیه پوشش گیاهی، به ترتیب ۷۴/۸۸ (گرم کربن بر مترمربع) در دی ماه و ۲/۹۶ (گرم کربن بر مترمربع) در ماه فروردین اتفاق افتاده است. همچنین نتایج نشان داد که روند کاهشی در بیشتر ماه‌های فصل رشد بجز دی ماه مشاهده می‌شود (جدول ۴).

بر طبق آنالیز تحقیق حاضر، هر چند یک روند کاهشی در میزان تولید ناخالص اولیه برای پوشش گیاهی در طول کل دوره مشاهده شد، متوسط ماهانه GPP برای گیاهان علفی، ۱۱۴/۲ (گرم کربن بر مترمربع) در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ است که این نوع پوشش در ماه بهمن به حداکثر میزان تولید خود می‌رسد و در مقابل متوسط ماهانه GPP

برای گیاهان بوته‌ای، ۱۵۲/۳۵ (گرم کربن بر مترمربع) بوده که در ماه اسفند به حداکثر میزان تولید خود می‌رسد (جدول ۳).

پاسخ تولید ناخالص اولیه اکوسیستم به خشکسالی در طول فصل رشد

نتایج نشان می‌دهد که همبستگی مثبتی بین تولید ناخالص اولیه و خشکسالی در بین گیاهان بوته‌ای و علفی در ماه‌های مختلف فصل رشد وجود دارد (جدول ۵). به‌طوریکه فرم رویشی علفی، در ماه‌های بهمن، اسفند و فروردین همبستگی مثبت معنادار با خشکسالی نشان داد و بالاترین مقدار همبستگی ($R=0/29$, $P<0/05$) در ماه بهمن برای این نوع فرم رویشی به‌دست آمد. در مقابل، برای فرم رویشی بوته‌ای همبستگی مثبت معنادار بین خشکسالی و تولید ناخالص اولیه تنها در ماه فروردین ($R=0/28$) و تولید ناخالص اولیه تنها در ماه فروردین ($P<0/05$) به‌دست آمد. این پاسخ تقریباً متفاوت انواع فرم رویشی گیاهان به خشکسالی می‌تواند به‌دلیل حساسیت متفاوت آنها به کمبود آب در مرحله رشد باشد.

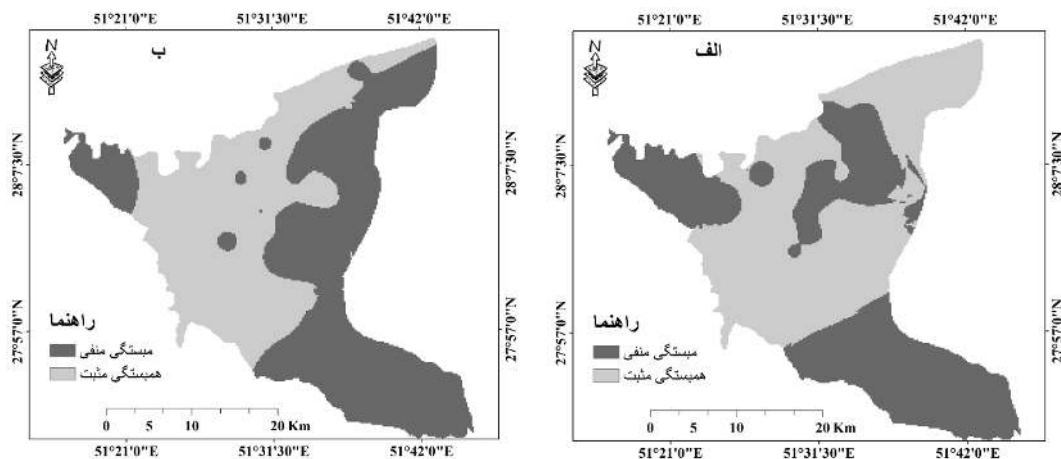
جدول ۴: تغییرات زمانی میانگین تولید ناخالص اولیه در ماه‌های فصل رشد از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶

پارامتر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین
میانگین تولید ناخالص اولیه (GPP)	۵۰/۰۸	۶۶/۷۶	۷۴/۸۸	۷۲/۴۷	۶۰/۷۴	۲/۹۶
R^2	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۲۴	۰/۰۰۱	۰/۲۸	۰/۴۲
روند تولید ناخالص اولیه (GPP)	-۲/۳۷	-۲/۵۶	۰/۲۹	-۰/۱۱	-۱/۷۹	-۰/۰۷

جدول ۵: همبستگی میان خشکسالی و میانگین تولید ناخالص اولیه در ماه‌های فصل رشد از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵

نوع پوشش گیاهان	پارامتر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین
گیاهان علفی	میانگین تولید ناخالص اولیه (GPP)	۴/۸۳	۱۹/۶۰	۳۰/۰۳	۳۲/۱۲	۲۶/۲۵	۱/۳۷
	(R)ضریب همبستگی	۰/۲۲	۰/۲۶	۰/۲۶	*۰/۲۹	*۰/۲۸	**۰/۲۸
گیاهان بوته‌ای	میانگین تولید ناخالص اولیه (GPP)	۲۹/۱۰	۱۳/۹۹	۳۴/۸۷	۳۳/۱۶	۴۰/۶۹	۰/۵۴
	(R)ضریب همبستگی	۰/۲۵	۰/۱۲	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۸	*۰/۲۸

*معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ **معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪

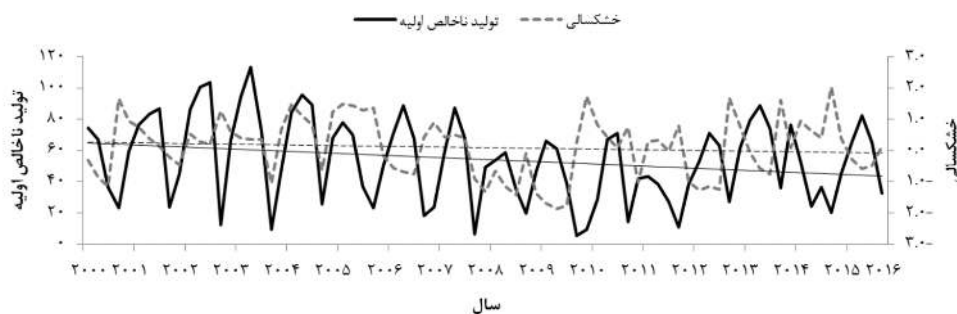


شکل ۶: نقشه توزیع مکانی همبستگی میان خشکسالی و تولید ناخالص اولیه برای پوشش گیاهی (الف) علفی، (ب) بوته‌ای

به نسبت مناسبی بین شاخص GPP و SPI متناسب با دوره ترسالی و خشکسالی در منطقه مورد مطالعه وجود دارد. شکل ۷ نشان می‌دهد که تولید ناخالص اولیه اکوسیستم در طول فصل رشد در دوره ۱۶ ساله روند کاهشی در امتداد با افزایش شدت خشکسالی با ضریب همبستگی ($n=80$) و $P=0.20$ ، $R=0.254$ نشان داده است. این اشاره به وابستگی تولید اکوسیستم به متغیر بارندگی در طی فصل رشد دارد هر چند که روند شدت خشکسالی و تولید ناخالص اولیه اکوسیستم معنی‌دار ($P > 0.05$) نیست.

شکل (۶) نقشه توزیع مکانی همبستگی میان GPP و SPI برای پوشش گیاهی مختلف در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ را نشان می‌دهد. برای پوشش گیاهی علفی همبستگی مثبت با خشکسالی برای ۵۴/۳۸ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه به دست آمد. در حالیکه ۴۱/۶۴ درصد از پوشش بوته‌ای منطقه مورد مطالعه همبستگی مثبت با خشکسالی نشان داد.

در طول دوره ۱۶ ساله، SPI شش ماهه برای ارزیابی اثر خشکسالی بر میانگین سالانه تولید ناخالص اولیه در نظر گرفته شد. همانگونه که در شکل ۷ مشخص است، همخوانی



شکل ۷: ارتباط بین خشکسالی (SPI شش ماهه) و تولید ناخالص اولیه (GPP) در طول فصل رشد از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵. روند خطی برای تولید خالص اولیه $(SPI = -0.0067x + 64.23; R^2 = 0.053; P = 0.21)$ و روند خطی برای خشکسالی $(GPP = -0.2434x + 0.3637; R^2 = 0.047; MAD = 0.5; P = 0.06)$.

بحث و نتیجه‌گیری

درک الگوهای پهنه‌بندی و کمی‌سازی تولیدات اکوسیستم‌ها بخصوص در نواحی مستعد خشکسالی، که پیوسته آسیب‌پذیر به تغییرات اقلیم هستند، اهمیت ویژه‌ای دارد (۱۳). بر اساس مدل‌سازی جهانی، تولیدات اکوسیستم‌های خشکی عمدتاً توسط تابش خورشیدی، دما و دسترسی به منابع آب کنترل می‌شود. و مناطق خشک بیشتر در معرض کمبود دسترسی به منابع آب است (۲۲). هرچند تعدادی مطالعه با تمرکز بر مناطق خشک (۴۴) و انجام گردیده است اما این مطالعات بر اساس رویکرد سنجش از دور بوده و کمتر از مدل‌سازی اکوسیستمی استفاده گردیده است. کارائی اصلی مدل‌سازی اکوسیستمی امکان فراهم آوردن اطلاعات تحت طیف گسترده‌ای از شرایط به ویژه کمبود منابع آب است (۳۰).

در این مطالعه، تولید ناخالص اولیه اکوسیستم بر اساس رویکرد جدید مدل اکوسیستمی BGC-MAN مدل‌سازی، و پاسخ انواع پوشش گیاهی به خشکسالی بر اساس SPI، با تمرکز بر فصل رشد (در منطقه مورد مطالعه: آبان - فروردین) در منطقه خشک مورد آنالیز قرار گرفت. هر چند نتایج به دست آمده نشان داد که GPP در کل دوره مطالعه، کاهش یافته است اما پاسخ انواع فرم رویشی گیاهان به خشکسالی، به دلیل حساسیت آنها به کمبود آب در طول فصل رشد، متفاوت بود. در مقایسه همبستگی بین خشکسالی و تولید ناخالص اولیه (GPP) میان فرم های مختلف گیاهی منطقه مورد مطالعه مشاهده می شود که بالاترین همبستگی خشکسالی و تولید پوشش گیاهی علفی در میانه فصل رشد (دی و بهمن) اتفاق افتاده است در حالی در شرایط مشابه پوشش گیاهی بوته‌ای در ماه‌های انتهایی فصل رشد (اسفند و فروردین) بیشترین همبستگی با خشکسالی را نشان داد که این رفتار می‌تواند منطبق با شرایط اقلیمی در ابتدا و انتهای فصل رشد باشد و اشاره به نقش عمده بارندگی در فعالیت پوشش گیاهی در ماه‌های فصل رشد دارد. نتایج مشابه توسط کیایس و همکاران (۲۰۰۵) و بینفنگ و همکاران (۲۰۱۶) اشاره شده است که اشاره به پاسخ متفاوت انواع فرم پوشش گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد.

ارتباط میان GPP و خشکسالی پاسخ پوشش گیاهی به بارندگی را انعکاس می‌دهد. در این تحقیق، هر چند عملکرد اکوسیستم (GPP) طی دوره (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵) همزمان با افزایش شدت خشکسالی کاهش یافته است و همبستگی آن با خشکسالی طی دوره ۱۶ ساله معنی‌دار نبوده، اما واکنش معنی‌داری در مقیاس زمانی ماهانه نشان داد و عملکرد اکوسیستم (GPP) در مقیاس زمانی ماهانه به تغییرپذیری شرایط خشک و مرطوب بر اساس SPI، حساس است و متغیر میان سالانه (بارندگی) می‌تواند منجر به کاهش عملکرد اکوسیستم به علت اثر تاخیری بارندگی ماه قبل شود. این می‌تواند به این اشاره داشته باشد که اثر خشکسالی بر تولید اکوسیستم در مقیاس ماهانه و سالانه می‌تواند متفاوت باشد (۶). همچنین می‌توان اشاره داشت که هر چند آب فاکتور محدودکننده برای رشد پوشش گیاهی در مناطق خشک و نیمه خشک است اما دما فاکتور اقلیمی مهم‌تری در تنظیم عملکرد اکوسیستم در فصل رشد است. افزایش رشد پوشش گیاه در پاسخ به افزایش دما در ابتدای فصل رشد مرتبط با وجود گرمایی است که منجر به فنولوژی زود هنگام گیاهان و تولید پوشش گیاهی در فصل رشد می‌شود (۳۳).

نتایج این تحقیق با نتایج مطالعات در مقیاس جهانی با ارائه همبستگی مثبت تولیدات اکوسیستم و خشکسالی در مناطق خشک انطباق دارد (۴۴). به‌طور کلی انتظار می‌رود که با وقوع خشکسالی تولیدات اکوسیستم کاهش یابد اما واکنش اکوسیستم‌های مختلف در پاسخ به خشکسالی به شرایط اقلیمی آن اکوسیستم و پاسخ خاص پوشش گیاهی آن منطقه به شرایط خشکسالی دارد، بطوری که برخی خشکسالی‌ها نه تنها باعث کاهش تولید اکوسیستم نشده بلکه منجر به افزایش تولیدات اکوسیستم هم می‌شود (۱۴، ۲۴ و ۳۱). قابل ذکر است که در برخی از مناطق خشک دارای خشکسالی فصلی، ارتباط مثبتی بین تولید اکوسیستم و خشکسالی مشاهده می‌شود بخصوص اگر وقوع این خشکسالی منطبق با دوره فصل رشد پوشش گیاهی منطقه رخ دهد کاهش تولید اکوسیستم را به همراه خواهد داشت (۲ و ۱۷). بسیاری از مطالعات بر روی پوشش گیاهی تمرکز بر ارزیابی تغییرات سالانه داشتند. یافته‌های این تحقیق نه تنها اهمیت بررسی واکنش پوشش گیاهی به

برآورد کرده باشد و می‌تواند تاحدی سبب عدم قطعیت نتایج شود. بنابراین لزوم بررسی اثرات خشکسالی به همراه دیگر فاکتورها و سایر شاخص‌های خشکسالی در این قبیل مطالعات در آینده پیشنهاد می‌گردد. استفاده از رویکرد مدل‌های اکوسیستمی ابزار مفیدی برای پیش‌بینی اولیه از توسعه پوشش گیاهی بدون نیاز به استفاده از حجم زیاد از داده‌های ماهواره‌ای و محاسبات پیچیده است، اما آنالیزهای بیشتر با کمک مدل‌های اکوسیستمی نیاز است. به این صورت که، این مدل باید بطور دقیق، با در نظر گرفتن عوامل محدودکننده اقلیمی رشد گیاه در مناطق مختلف، جهت کاهش عدم قطعیت نتایج آن اجرا شود.

تغییرات ماهانه را نشان می‌دهد بلکه بر لزوم بررسی اثر این تغییرات درون سالانه بر رشد پوشش گیاهی در مقیاس منطقه‌ای تاکید دارد. بطور کلی می‌توان اشاره به این امر داشت که SPI، تنها یک شاخص بر اساس بارندگی است که تقاضای آب گیاه و هدررفت آب اکوسیستم در آن در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این، ذکر این نکته ضروری است که اثر خشکسالی بر روی تولید اکوسیستم با تغییر در دیگر فاکتورهای اقلیمی مانند افزایش غلظت CO₂، درجه حرارت هوا و تغییرات کاربری اراضی می‌تواند افزایش یابد که در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. بنابراین ممکن است نتایج این تحقیق اثرات خشکسالی بر روی عملکرد اکوسیستم را کم (همبستگی ضعیف بین SPI و GPP)

References

1. Asner, G.P & A. Alencar, 2010. Drought impacts on the Amazon forest: the remote sensing perspective. *New Phytol*, 187(3):569–578.
2. Binfeng, S., Z. Hong & W. Xiaoke, 2016. Effects of Drought on Net Primary Productivity: Roles of Temperature, Drought Intensity, and Duration. *Chinese Geographical Science*, 26 (2): 270–282.
3. Beierkuhnlein, C., D. Thiel & A. Jentsch, 2011. Ecotypes of European grass species respond differently to warming and extreme drought. *J. Ecology*, 99(3):703–713.
4. Cherwin, K & A. Knapp, 2012. Unexpected patterns of sensitivity to drought in three semiarid grasslands. *Oecologia*, 169(3):845–852.
5. Ciais, P., M. Reichstein., N. Viovy., A. Granier., J. Ogee., V. Allard., M. Aubinet., N. Buchmann., C. Bernhofer., A. Carrara, F. Chevallier., N. D. Noblet., A.D. Friend., P. Friedlingstein., T. Grünwald., B. Heinesch., P. Keronen., A. Knohl., G. Krinner., D. Loustau., G. Manca., G. Matteucci., F. Miglietta., J.M. Ourcival., D. Papale., K. Pilegaard., S. Rambal., G. Seufert., J.F. Soussana., M.J. Sanz., E.D. Schulze., T. Vesala & R. Valentini, 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437:529–533.
6. Chen, M., R. Rafique., G.R. Asrar., B. Bond-Lamberty., P. Ciais., F. Zhao., C.P.O. Reyer., S. Ostberg., J. Chang., A. Ito., J. Yang., N. Zeng., E. Kalnay., T. West., G. Leng., L. Francois., G. Munhoven., A. Henrot., H. Tian., S. Pan., K. Nishina., N. Viovy., C. Morfopoulos., R. Betts., S. Schaphoff., S. Jörg & T. Hickler, 2012. Regional contribution to variability and trends of global gross primary productivity. *Environmental Research Letters*, 12:105005.
7. Ciais, P., M. Reichstein., N. Viovy., A. Granier., J. Ogee & V. Allard, 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437:529–533.
8. Chiwara, P., B. O. Ogutu., J. Dash., E. J. Milton., J. Ardö., M. Saunders & G. Nicolini, 2018. Estimating terrestrial gross primary productivity in water limited ecosystems across Africa using the Southampton Carbon Flux (SCARF) model. *Science of the Total Environment*, 630: 1472–1483.
9. Cohen, W. B., T. K. Maersperger., D. P. Turner., W. D. Ritts., D. Pflugmacher & R. E. Kennedy, 2006. MODIS land cover and LAI collection 4 product quality across nine sites in the western hemisphere. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7):1843–1857.
10. Chiesi, M., F. Maselli., M. Moriondo., L. Fibb., M. Bindi & S. W. Running, 2007. Application of BIOME-BGC to simulate Mediterranean forest processes. *Ecological modelling*, 206 (1-2) : 179–190.
11. Gautam, S., S.A. Pietsch & H. Hasenauer, 2010. Modelling Thinning Response in Coppice versus High Oak Forests in Austria. *Austrain Journal forest science*, 127(3-4): 179-201.
12. Gao, Q. Z., Y. Li & Y. F. Wan, 2009. Dynamics of alpine grassland NPP and its response to climate change in Northern Tibet. *Climate Change*, 97(4): 515–528.
13. Giorgi, F, 2006. Climate change hot-spots, *Geophysical research letters*, 33(8): L08707.

14. Hao, W., L. Guohua., L.I. Zongshan., Y.E. Xin., W. Meng & G. Li, 2016. Impacts of Climate Change on Net Primary Productivity in Arid and Semiarid Regions of China. *Chinese Geographical Science*, 26 (1): 35–47.
15. Huiqing, Z., L. Qijing., F. Zongwei., W. Xiaoke & M. Zeqing, 2008. Modeling the interannual variation and response to climate change scenarios in gross and net primary productivity of *Pinus elliottii* forest in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 28(11):5314-5321.
16. Kennedy, M & A. O'Hagan, 2001. Bayesian calibration of computer models. *Journal of the Royal Statistical Society*, 63: 425–463.
17. Lei, T., J. Wu., X. Li., G. Geng., C. Shao., H. Zhou., Q. Wang & L. Liu, 2015. A new framework for evaluating the impacts of drought on net primary productivity of grassland. *Science of the Total Environment*, 536: 161–172.
18. Li, X., Z. Zhu & H. Zeng, 2016. Estimation of gross primary production in China (1982–2010) with multiple ecosystem models. *Ecological Modelling*, 324: 33–44.
19. Mckee, T. B., N. J. Doesken & J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Pp. 179–184. *Proceedings of the Eight Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Boston, MA, January 17–22, Anaheim, California.
20. Merganičova, K., S. A. Pietsch & H. Hasenauer, 2005. Modeling the impacts of different harvesting regimes on the growth of Norway spruce stands. *Forest Ecology and Management*, 207:37–57.
21. Mäkelä, A & H. T. Valentine, 2001. The ratio of NPP to GPP: evidence of change over the course of stand development. *Tree Physiology*, 21(14):1015–1030.
22. Nemani, R. R., C. D. Keeling., H. Hashimoto., W. M. Jolly., S. C. Piper., C. J. Tucker., R.B. Myneni & S. W. Running, 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300(5625):1560–1563.
23. Nunes, E. L., M. H. Costa., A. C. M. Malhado., L. C. P. Dias., S. A. Vieira., L. B. Pinto & R. J. Ladle, 2012. Monitoring carbon assimilation in South America's tropical forests: Model specification and application to the Amazonian droughts of 2005 and 2010. *Remote Sensing of Environment*, 117:449–463.
24. Pei, F., X. Li., X. Liu & C. Lao, 2013, Assessing the impacts of droughts on net primary productivity in China. *Journal of Environmental Management.*, 114: 362–371.
25. Pietsch, S.A, 2003. Stoffkreislaufmodellierung im Grasland: Machbarkeitsstudie fuer die Adaptierung eines biogeochemisch mechanistischen Modells. University of Natural Resources and Life Sciences, 13pp.
26. Pietsch, S.A., H. Hasenauer & P. E. Thornton, 2005. BGC-model parameters for tree species growing in central European forests. *Forest Ecology and Management*, 211(3): 264–295.
27. Pietsch, S.A., H. Hasenauer., J. Kueera & J. Eermak, 2003. Modeling effects of hydrological changes on the carbon and nitrogen balance of oak in floodplains. *Tree Physiology*, 23(11):735–746.
28. Pietsch, S.A, 2014. Modelling Ecosystem Pools and Fluxes. Implementation and application of biogeochemical ecosystem models. Habilitation. University of Natural Resources and Life Sciences, 303pp.
29. Prentice, I.C., M. Heimann & S. Sitch, 2000. The carbon balance of the terrestrial biosphere: ecosystem models and atmospheric observations. *Ecological Applications*, 10 (6):1553–1573.
30. Rambal, S., M. Lempereur., J. M. Limousin., N. K. Martin-StPau., J. M. Ourciva & J. Rodríguez-Calcerrada. 2014. How drought severity constrains gross primary production (GPP) and its partitioning among carbon pools in a *Quercus ilex* coppice?. *Biogeosciences*, 11(23):6855–6869.
31. Running, S. W., R. R. Nemani., F. A. Heinsch., M. Zhao., M. Reeves & H. Hashimoto, 2004. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 54(6): 547–560.
32. Raupach, M. R., J.G. Canadell & C. L. Quéré, 2008. Anthropogenic and biophysical contributions to increasing atmospheric CO₂ growth rate and airborne fraction. *Biogeosciences*, 5 (6):1601–1613.
33. Richardson, A.D., Andy Black, T., Ciais, P., Delbart, N., Friedl, M.A., Gobron, N., Hollinger, D.Y., Kutsch, W.L., Longdoz, B., Luyssaert, S., Migliavacca, M., Montagnani, L., William Munger, J., Moors, E., Piao, S., Rebmann, C., Reichstein, M. Saigusa, N., Tomelleri, E., Vargas, R., Varlagin, A., 2010. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity. *Philos. Trans.R. Soc. Ser. B*, 365 : 3227–3246.
34. Senna, M. C. A., M. H. Costa & Y. E. Shimabukuro, 2005. Fraction of photosynthetically active radiation absorbed by Amazon tropical forest: A comparison of field measurements, modeling and remote sensing. *Journal of Geophysical Research*, 110:G01008.
35. Schröter, D., W. Cramer., R. Leemans., I. C. Prentice., M. B. Araújo & N. W. Arnell, 2005. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, 310:1333–1337.
36. Scheiter, S., L. Langan & S. I. Higgins, 2013. Next-generation dynamic global vegetation models: learning from community ecology. *New Phytologist*, 198: 957–969.

37. Thornton. P. E., B. E. Law., H. L. Gholz., K.L. Clark., E. Falge., D. S. Ellsworth., A. H. Goldstein., R. K. Monson., D. Hollinger., M. Falk., J. Chen., P. Spark, 2002. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needle leaf forests. *Agricultural and forest Meteorology*, 113:185–222.
38. Thornton. P. E., S. W. Running & M. A. White, 1997. Generating surfaces of daily meteorology variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology*, 190:214–251.
39. Wang. L., J. Ding., J. Yonghua, 2009. Spatiotemporal pattern of NPP in terrestrial ecosystem of China from 1981 to 2000. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 36(6): 1–5. (in Chinese).
40. Wang. H., B. He., Y. Zhang., L. Huang., Z. Chen & J. Liu, 2018. Response of ecosystem productivity to dry/wet conditions indicated by different drought indices. *Science of the Total Environment*, 612 :347–357.
41. White. M. A., P. E. Thornton., S. W. Running & R. R. Nemani, 2000. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOMEBC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Earth Interactions*, 4(3):1.
42. Yanhua. G., Z. Xu., W. Qiao., W. Changzuo., Z. Zhiming., C. Liangfu., Y. Junxia & Q. Ran, 2013. Vegetation net primary productivity and its response to climate change during 2001–2008 in the Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 444: 356–362.
43. Yao. Z., W. L.i, Q. Zhu., H. Chen., X. Fang., T. Zhang., P. Zhao., C. Peng, 2015. Monitoring the impact of aerosol contamination on the drought-induced decline of gross primary productivity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 36: 30–40.
44. Zhao. M & S.W. Running ,2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 329:940–3.

