

ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی تولید خالص اولیه در اکوسیستم‌های مرتعی ایران و ارتباط آن با خشکسالی

زهرا سنایی^۱، رضا مدرس^{۲*}، پوریا محیط اصفهانی^۳

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی علوم مرتع، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
۲- دانشیار دانشکده منابع طبیعی، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
نویسنده مسئول، ایمیل: modarres2005@gmail.com

چکیده

تغییرات مکانی و زمانی تولید خالص اولیه (NPP) نسبت به خشکسالی از معیارهای اساسی تعیین‌کننده وضعیت اکوسیستم‌های مرتعی است. پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات NPP و ارتباط آن با خشکسالی انجام گرفت. سری زمانی ماهانه داده‌های NPP برای کاربری‌های مرتع کشور از حاصل جمع تولیدات فتوسنتز خالص (PSN) هشت روزه سنجنده مودیس (MOD17A2H) با مقیاس مکانی ۵۰۰ متر طی یک دوره‌ی زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ تهیه شد. همچنین داده‌های بارش ماهانه ۱۶۵ ایستگاه سینوپتیک برای محاسبه شاخص بارش استاندارد (SPI) و پایش خشکسالی‌ها طی این دوره زمانی از سازمان هواشناسی کل کشور اخذ گردید. نمودارهای جعبه‌ای مربوط به بارش و تولید خالص اولیه تهیه شد. نتایج نشان داد که بیشترین مقادیر تولید خالص اولیه با متوسط بیش از $50 \text{ gC.m}^{-2}.\text{month}^{-1}$ طی فصل بهار و اوایل تابستان در مناطق مرطوب اتفاق می‌افتد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که NPP در اکوسیستم‌های مرتعی ایران رو به افزایش است و بطور متوسط تولید خالص اولیه کل اکوسیستم‌های مرتعی کشور حدود $112/6 \pm 13 \text{ gC.m}^{-2}.\text{year}^{-1}$ است به عبارتی حدود ۷۶ میلیون تن کربن در سال توسط گیاهان موجود در اکوسیستم‌های مرتعی کشور ترسیب می‌شود. روند تغییرات سری ماهانه NPP به دلیل تأثیرپذیری از خاصیت فصلی معنادار نشد ولی تغییرات سالانه NPP در تمام مناطق روند افزایشی معناداری را نشان داد.

کلمات کلیدی: تولید خالص اولیه، شاخص بارش استاندارد، آزمون تحلیل روند، بارش ماهانه، سنجنده مودیس

مقدمه

مراتع، تقریباً ۴۰.۵٪ از قاره‌های زمین را تشکیل می‌دهد و تقریباً ۳۴٪ از کل کربن اکوسیستم زمینی را تأمین می‌کند (۱ و ۱۲). با این حال، خشکسالی یک تهدید جدی برای ترسیب کربن اکوسیستم است که طی چند سال انباشته می‌شود (۵ و ۲۷). علاوه بر این در اکوسیستم‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، مراتع به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی برای تعادل چرخه مواد و ترسیب کربن در مقیاس محلی و منطقه‌ای شناخته می‌شوند (۱۸). اندازه‌گیری تولید خالص اولیه (NPP; Net Primary Production) اکوسیستم‌های مرتعی یکی از راهکارهایی است که می‌توان توسط آن از چگونگی فرآیندهای چرخه مواد و ترسیب کربن در این اکوسیستم‌ها مطلع شد. تولید خالص اولیه (NPP) یکی از اجزای اصلی چرخه کربن بوده و عبارت است

نشریه بوم‌شناسی کاربردی

از انرژی تولید شده توسط گیاهان منهای انرژی مصرف شده از طریق تنفس (۱۶). تغییرات در فنولوژی گیاهان بر ساختار و عملکردهای اکوسیستم در آینده تأثیر خواهد گذاشت، زیرا این تغییرات، اثر بسزایی بر تبادلات انرژی سطح، چرخه آب و چرخه کربن زمین دارد (۲۱). پایش و پیشبینی تولید خالص اولیه زمینی برای درک چرخه کربن و ارزیابی اثرات تغییرات آب و هوایی سالانه بر تولید مواد غذایی و فیبر مفید است (۲۰). علاوه بر این، تولید خالص اولیه اطلاعات مستقیمی را از وضعیت و سلامتی اکوسیستم‌های مرتعی ارائه می‌کند. از این حیث شناخت و درک الگوهای مکانی و زمانی از تغییرات تولید خالص اولیه و همچنین تعاملات آن با انواع متغیرهای انسانی و محیطی یکی از موضوعاتی است که اخیراً مورد توجه بسیاری از محققین و بوم‌شناسان قرار گرفته است (۱۵، ۲۲ و ۲۶). یکی از نتایج مشترک و قابل توجه در اغلب پژوهش‌های مرتبط با تولید خالص اولیه این است که علیرغم تغییر اقلیم و گرمایش جهانی در چند دهه اخیر تغییرات تولید خالص اولیه در اغلب اکوسیستم‌های جهان روند افزایشی داشته است (۶ و ۲۶). در این ارتباط لی و همکاران (۱۵) نشان دادند که تولید خالص اولیه در حدود ۸۰ درصد از مناطق جهان (عمدتاً در نیم کره شمالی) روند افزایشی معنی‌دار با شیب بین ۲ تا بیش از ۸ گرم کربن در متر مربع در سال داشته‌اند. ایشان در مطالعه خود نشان دادند که غلظت گاز CO₂ اتمسفر مسئول ۴۵/۳ درصد از تغییرات تولید خالص اولیه در اکوسیستم‌های خشکی است و از آنجاییکه غلظت این گاز گلخانه‌ای در قرن اخیر افزایش چشمگیری داشته است اصلی‌ترین دلیل افزایش تولید خالص اولیه در اکوسیستم‌های خشکی می‌تواند همین امر می‌باشد. همچنین با صرف نظر از اثر غلظت گاز CO₂ مطالعات متعددی نشان داده‌اند که متغیرهایی همچون بارش، دما، تابش خورشیدی، خشکسالی‌ها، فعالیت‌های انسانی و فازهای اقیانوسی اتمسفری نیز تأثیر قابل توجهی بر روی تغییرات تولید خالص اولیه اکوسیستم‌های خشکی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و حتی قاره‌ای دارند (۳، ۹ و ۱۵). برای مثال باستوس و همکاران (۴) نشان دادند تحت تأثیر پدیده انسو در سال ۲۰۱۱ بیش از ۴۰ درصد از تغییرات تولیدات خالص اولیه جهانی ناشی از واکنش اکوسیستم‌های نیمکره جنوبی به ویژه در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری بوده است. هادیان و همکاران (۸) نیز نشان دادند که تغییرات شرایط خشکسالی می‌تواند تأثیر بسزایی بر روی تولید خالص اولیه اکوسیستم‌های مرتعی داشته باشد منتها میزان شدت تأثیرگذاری آن ارتباط مستقیمی با نوع پوشش مراتع دارد؛ بطوریکه در مراتع با گونه‌های گیاهی یکساله نقش خشکسالی‌ها بر روی تولید خالص اولیه بسیار زیادتر از مراتع با گونه‌های گیاهی درختچه‌ای و بوته‌ای است. ژائو و رایننگ (۲۷) گزارش کردند که مقدار NPP جهانی طی دوره خشک ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ به میزان ۰/۵۵ پتاگرم کربن کاهش یافته

نشریه بوم‌شناسی کاربردی

است و همچنین خشکسالی‌های بلندمدت باعث کاهش مقدار NPP در نیمکره جنوبی گردیده درحالی که در نیمکره شمالی افزایش یافته است.

یکی از روش‌های معتبر برای اندازه‌گیری و پایش گسترده تولید خالص اولیه اکوسیستم‌ها با دقت مکانی و زمانی زیاد، استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور (RS) و اندازه‌گیری طیفی از خصوصیات پوشش گیاهی است (۹). داده‌های سنجش از دور فرصتی مناسب به‌منظور برآورد تولید خالص اولیه در مقیاس چشم‌انداز و منطقه‌ای با هزینه مناسب و روش دقیق فراهم می‌نمایند.

صیدزاده و همکاران (۲۳) با هدف بررسی و مدل‌سازی تغییرات تولید خالص اولیه در طول زمان در برخی از مناطق رویشی کشور شامل مناطق خزری، بلوچی، نیمه بیابانی، استپی معتدل، نیمه استپی گرم و جنگل‌های خشک و مقایسه رفتار تصادفی این مناطق با یکدیگر پژوهشی انجام دادند. جهت بررسی تغییرات تولید خالص اولیه از تولیدات تصاویر سنجنده مودیس استفاده کردند. نتایج نشان داد سری‌های زمانی مقادیر ماهیانه تولید خالص اولیه در مناطق رویشی مورد مطالعه ایستا بوده و دارای ویژگی فصلی با دوره ۱۲ ماهه می‌باشد و همه این مناطق رویشی را می‌توان با ARIMA فصلی مدل‌سازی کرد. عراقی و همکاران (۲) رابطه تولید خالص اولیه با نوسانات اقیانوسی اتمسفری به‌صورت ماهانه و فصلی در فاصله سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۶ در دامنه شمالی رشته کوه البرز مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که NPP تحت تأثیر عوامل اقلیمی به‌ویژه بارش بوده و شاخص‌های مربوط به انسو (النینو نوسان جنوبی) از عوامل مؤثر بر بارش و در نتیجه تولید خالص اولیه در منطقه شمال کشور است. طی مطالعه‌ی ساکی و همکاران (۲۲) با هدف بررسی تغییرات مکانی و زمانی تولید خالص اولیه بیوم‌های مختلف استان اصفهان در دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۴ و پاسخ آن به به فاکتورهای اقلیمی، به این نتیجه دست یافتند که پراکنش مکانی تولید خالص اولیه در منطقه روند معنی‌دار دارد. همچنین بیشترین و کمترین میزان شیب تغییرات به ترتیب در بیوم‌های جنگل و بیابان دیده می‌شود و مقدار تولید خالص اولیه بیوم‌های مرتع، بیابان و تاغزارها تحت تأثیر فاکتور بارش قرار دارد، در حالیکه درجه حرارت فاکتور کنترل‌کننده اصلی در بیوم‌های جنگل و کشاورزی است. جعفری و همکاران (۱۰) طی پژوهشی با هدف پهنه‌بندی و پایش تولید خالص اولیه اکوسیستم‌های مرتعی استان کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از داده‌های مودیس و میدانی در بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۸ به این نتیجه رسیدند که در شرایط خشکسالی، تیپ پوشش گیاهی و وضعیت مرتع در برآورد تولیدات واقعی و تولید خالص اولیه دارای اهمیت بالایی بوده و اختلاف این دو نوع تولید می‌تواند به عنوان شاخصی جهت تعیین و پایش وضعیت اکوسیستم‌های مرتعی مورد استفاده قرار گیرد.

نشریه بوم‌شناسی کاربردی

همانطور که ذکر گردید هم در ایران و هم در خارج از کشور تاکنون مطالعات متعددی بر روی تغییرات تولید خالص اولیه اکوسیستم‌های مرتعی و تعاملات آن با متغیرهای محیطی انجام شده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات تولید خالص اولیه اکوسیستم‌های مرتعی ایران و ارتباط آن با خشکسالی انجام شده است. بر اساس مطالب گفته شده و بررسی سوابق انجام شده در خصوص پیش‌بینی تغییرات پوشش گیاهی اکوسیستم‌های مختلف، تاکنون مطالعه‌ای که تغییرات تولید خالص اولیه و ارتباط آن با خشکسالی را در سطح ملی بررسی کند انجام نگرفته است ولی همانطور که ذکر شد مطالعات زیادی در مقیاس‌های کوچکتر محلی و منطقه‌ای انجام شده است.

با توجه به آنچه که گفته شد، پژوهش حاضر با دو هدف اصلی انجام گرفت. اولین هدف پژوهش حاضر ارائه اطلاعاتی از کمیت تولید خالص اولیه مراتع کل کشور و روند تغییرات آن طی دو دهه گذشته است. در درجه دوم نیز سعی در پژوهش حاضر سعی شد تا به کمک تکنیک‌های مدل‌سازی ارتباط بین خشکسالی‌ها/ترسالی‌ها نیز با تغییرات تولید خالص اولیه سالانه در مراتع مختلف کشور مورد بررسی قرار گیرد. از آنجایی که خشکسالی می‌تواند بر پوشش گیاهی تاثیر شایانی بگذارد، آگاهی از واکنش عملکرد اکوسیستم‌های مختلف کشور به خشکسالی می‌تواند در مدیریت صحیح این مناطق هنگام وقوع خشکسالی مفید واقع شود و از تخریب و آسیب پوشش گیاهی جلوگیری شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده

کشور ایران با جمعیت تقریباً ۸۴ میلیون نفر و مساحت حدود ۱,۶۴۸,۱۹۵ کیلومتر مربع در جنوب شرقی آسیا واقع شده است به دلیل عرض جغرافیایی وسیع و تنوع توپوگرافی تغییرات بارش در این کشور بسیار متنوع است. در قسمت‌های شمالی این کشور بارندگی در حدود ۲۰۰۰ میلی‌متر مشاهده می‌شود، در حالی که در قسمت‌های مرکزی و شرقی بارندگی سالانه کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر رخ می‌دهد. به‌طور کلی متوسط بارندگی سالانه ایران حدود ۲۴۰ میلی‌متر می‌باشد (۱۱ و ۱۹).

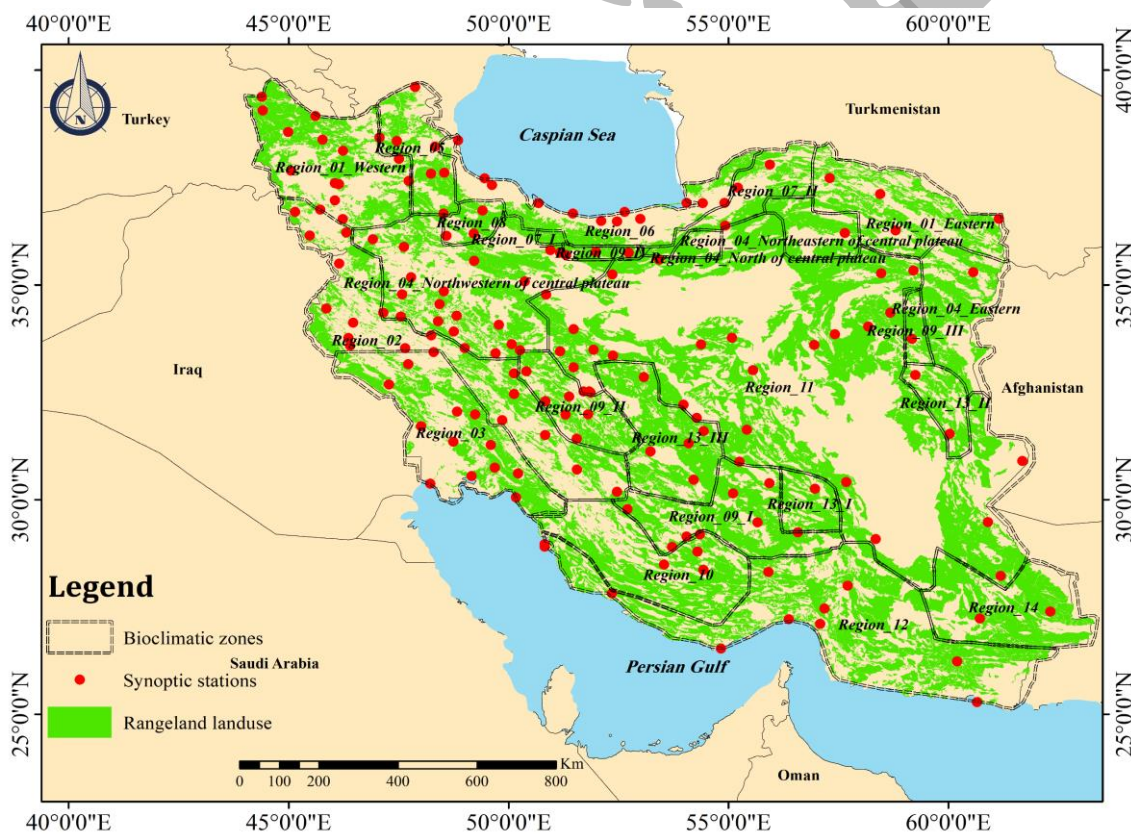
همچنین بر اساس مطالعات خطی و صابری (۱۳) کشور ایران از نظر پهنه‌های روشنی بر اساس تکنیک‌های آماری چند متغیره و ۱۹۷ متغیر اقلیمی به چهارده منطقه زیست اقلیمی (Bio-climates) همگن تقسیم‌بندی شده است. شایان ذکر است که برخی از مناطق زیست اقلیمی از نظر مکانی در موقعیت‌های جغرافیایی متفاوتی قرار دارند و دارای چند پلی‌گون در بخش‌های مختلف کشور هستند که در پژوهش حاضر برای ارتقا دقت نتایج مدل‌سازی و تفسیر بهتر نتایج پلی‌گون‌های این مناطق با نام‌های متفاوت از یک دیگر تفکیک داده شدند و در مجموع کل مناطق زیست اقلیمی به ۲۴ زیرمنطقه (پلی‌گون)، تقسیم‌بندی شدند (شکل ۱). جزئیات شرایط اقلیمی و گونه‌های غالب در هر یک از مناطق زیست اقلیمی در مطالعه‌ی خطی و

نشریه بوم شناسی کاربردی

صابری (۱۲) صورت کامل ارائه گردیده است. بطور خلاصه مناطق رویشی شماره ۹، ۱۱ و ۱۳ که در فلات مرکزی ایران واقع شده‌اند، عمدتاً دارای اقلیم بسیار بیابانی گرم و بادی همراه با گرد و غبار هستند. بارش سالانه این مناطق عمدتاً کمتر از ۱۳۰ میلیمتر می‌باشد.

مناطق رویشی شماره ۱۰، ۱۲ و ۱۴: این مناطق که در نزدیکی خلیج فارس و دریای عمان قرار دارند عمدتاً مناطق بسیار گرم و مرطوب بیابانی را تشکیل می‌دهند. بارش سالانه این مناطق عمدتاً کمتر از ۲۲۰ میلیمتر می‌باشد.

منطقه رویشی شماره ۳: این منطقه با اقلیم نیمه مرطوب بسیار گرم و نسبتاً همراه با گرد و غبار در غرب ایران می‌باشد. بارش سالانه این منطقه حدود ۳۳۸ میلیمتر می‌باشد.



شکل ۱. موقعیت کشور ایران و بیست و چهار زیرمنطقه زیست-اقلیمی بکار گرفته شده در این مطالعه

مناطق رویشی شماره ۱، ۲، ۴ و ۵: این مناطق عمدتاً کوهستانی و مرتفع بوده و لذا دارای اقلیم مرطوب خیلی سرد و نسبتاً برفی می‌باشند. بارش سالانه این مناطق حدود ۶۰۰ میلیمتر بوده و گونه‌های گیاهی غالب آنها عمدتاً به شکل کروی هستند.

منطقه رویشی شماره ۶: این منطقه در شمال ایران محصور بین رشته کوه‌های البرز و دریای خزر می‌باشد. اقلیم این منطقه معتدل و بسیار مرطوب است. متوسط بارندگی این منطقه از غرب به شرق از ۴۵۰ میلیمتر تا ۱۱۰۰ میلیمتر متغیر می‌باشد.

منطقه رویشی شماره ۷: این منطقه دارای اقلیم نیمه خشک و سرد می‌باشد و درازای متوسط بارش سالانه ۲۰۰ میلیمتر است.

نشریه بوم شناسی کاربردی

منطقه رویشی شماره ۸: این منطقه دارای اقلیم نیمه مرطوب سرد با متوسط بارش سالانه ۳۱۴ میلیمتر می باشد.

از نظر داده های مورد استفاده در پژوهش حاضر ابتدا به منظور پایش تولید خالص اولیه (فقط) در اکوسیستم های مرتعی نقشه موقعیت کاربری های مراتع کل کشور نیز از طریق مؤسسه جنگل ها و مراتع کشور ([Research Institute Forest and Rangelands R.I.F.R, 2022; www.rifr-ac.ir](#)) تهیه شد. بر اساس این نقشه وسعت اراضی مرتعی کشور ۶۷۴,۵۸۱ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۲ برآورد شده است. همچنین از سوی دیگر برای مدلسازی ارتباط بین خشکسالی ها/ترسالی ها با تغییرات تولید خالص اولیه سالانه داده های بارش ماهانه ۱۶۵ ایستگاه سینوپتیک با پراکنش یکنواخت در سراسر کشور برای محاسبه شاخص بارش استاندارد (SPI) (۱۷) و پایش خشکسالی ها طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ از سازمان هواشناسی کل کشور ([Islamic Republic of Iran Meteorological Organization IRIMO, 2022; www.irimo.ir](#)) اخذ گردید. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی کشور ایران و همسایگان آن، مناطق زیست اقلیمی، کاربری های مرتع و موقعیت ایستگاه های سینوپتیک مورد مطالعه نمایش داده شده است.

بطور کلی هدف از پژوهش حاضر پایش و مدلسازی تغییرات تولید خالص اولیه مراتع ایران در ارتباط با خشکسالی ها و ترسالی ها است. برای این هدف، داده های تولید خالص اولیه برای کل ایران به صورت فایل های رستری با مقیاس مکانی ۵۰۰ متر و مقیاس زمانی ماهیانه طی یک دوره ی زمانی ۲۳ ساله از ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ تهیه شد. برای این کار ابتدا محصولات ۸ روزه فتوسنتز خالص (Net Photosynthesis, PSN) سنجنده مودیس (MOD17A2H) از وب سایت <https://lpdaac.usgs.gov> اخذ گردید. مقدار تولید خالص اولیه ماهانه و سالانه نیز از حاصل جمع داده های فتوسنتز خالص ۸ روزه برای هر ماه و هر سال محاسبه گردید. بطور ساده تولید خالص اولیه از مجموع فتوسنتز خالص بدست می آید و فتوسنتز خالص از حاصل تفاضل تنفس نگهداری (Maintenance Respiration, MR) از تولید ناخالص اولیه (Gross Primary Productivity, GPP) بدست می آید. در این مطالعه تمامی محاسبات صورت گرفته به منظور تخمین میزان تولید خالص اولیه ماهیانه در سامانه ی گوگل ارث انجام گرفت. خوانندگان برای کسب اطلاعات بیشتر از کدها و نحوه محاسبات پارامترهای بالا می توانند به وب آدرس اینترنتی ([MODIS GPP/NPP Project \(MOD17\) \(umt.edu\)](#)) مراجعه کنند. در نهایت سری های تولید خالص اولیه ماهانه و سالانه مراتع برای هر زیرمنطقه زیست-اقلیمی از میانگین ارزش سلول های واقع در محدوده کاربری های مرتعی هر زیرمنطقه تهیه شد. همچنین سری های تولید خالص اولیه ماهانه و سالانه برای بررسی وضعیت کل مراتع کشور از طریق

نشریه بوم‌شناسی کاربردی

میانگین‌گیری وزنی تولید خالص اولیه مراتع هر زیرمنطقه با وزن‌دهی توسط وسعت مراتع هر زیرمنطقه تعیین شد و سری‌های زمانی ماهانه و سالانه تولید خالص اولیه از این طریق برای کل کشور تعیین شد.

تحلیل و مدلسازی تولید خالص اولیه

پژوهش حاضر بر روی تغییرات زمانی و مکانی تولید خالص اولیه اکوسیستم‌های مرتعی ایران و ارتباط آن با تغییرات شرایط خشکسالی و ترسالی نیز تمرکز دارد. برای این منظور ابتدا سعی شد تا برای تعیین برخی از خصوصیات آماری تولید خالص اولیه مانند هم‌زمانی تغییرات تولید خالص اولیه و بارش، میانگین‌های بلند مدت از تغییرات ماهانه و سالانه و همچنین روند تغییرات تولید خالص اولیه برای هر یک از مناطق زیست اقلیمی تعیین و مورد تفسیر قرار گیرد. برای تحلیل روند نیز از آزمون‌های روند من-کندال (Mann, 1945؛ Kendall, 1948) و شیب سن (۲۴) بر روی سری‌های ماهانه و سالانه تولید خالص اولیه اکوسیستم‌های مرتعی استفاده شد. فرض صفر برای آزمون روند من-کندال عدم وجود روند معنی‌دار برای متغیر مورد نظر است و چنانچه میزان قدر مطلق آماره آزمون (Z_{mk}) از مقدار $1/96$ بیشتر باشد فرض صفر در سطح اطمینان ۹۵ درصد رد خواهد و به معنی وجود روند معنی‌دار برای متغیر مورد نظر است. همچنین علامت آماره Z_{mk} بیانگر نوع روند است؛ بطوریکه علامت مثبت بیانگر روند افزایشی و علامت منفی بیانگر روند کاهشی می‌باشد.

علاوه بر این با استفاده از روش‌های رگرسیونی جمعی تعمیم یافته (Generalized Additive Models, GAMs) سعی شد تا ارتباطات خطی و غیر خطی بین خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها و تغییرات سالانه تولید خالص اولیه اکوسیستم‌های مرتعی برای هر یک از مناطق زیست اقلیمی ایران تعیین شود. مدل‌های GAM مدل‌های شبه‌پارامتریکی هستند که بر خلاف مدل‌های رگرسیونی ساده از روش حداقل‌درست‌نمایی به جای روش حداقل مربعات خطا برای برآورد ضرایب مدل رگرسیونی استفاده می‌کنند. بنابراین در مدل‌های GAM متغیر وابسته می‌تواند دارای هر توزیعی از خانواده توزیع‌های نمایی باشد و الزامی نیست که متغیر وابسته و باقی‌مانده‌های مدل حتماً دارای توزیع نرمال باشند (۲۵). در پژوهش حاضر تابع توزیع احتمال گاما برای مدل‌های رگرسیونی در نظر گرفته شد. این تابع مناسب برای متغیرهای وابسته‌ای می‌باشد که دارای مقادیر پیوسته بزرگ‌تر از صفر (مانند تولید خالص اولیه) هستند. از سوی دیگر مدل‌های GAM این قابلیت را دارند که روابط غیر خطی بین متغیرهای مستقل و وابسته را از طریق یک تابع پیوند ($g(.)$) برای میانگین شرطی متغیر وابسته در مدلسازی لحاظ کنند (۷). بطورکلی ضابطه عمومی یک مدل GAM به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$Y_i \sim EF(\mu_i, \varphi); g(\mu_i) = \alpha + \sum_{j=1}^{J_k} h_{jk}(X_{jk}) \quad (1)$$

که در آن μ_i مقدار مورد انتظار یا امید ریاضی شرطی متغیر وابسته (در پژوهش حاضر امید ریاضی NPP به شرط مقادیر مختلف شاخص SPI، $E(NPP/SPI)$ ، $EF(\mu_i, \varphi)$ یکی از توزیع‌های خانواده نمایی با پارامترهای میانگین (μ) و مقیاس (φ) که در پژوهش حاضر تابع توزیع احتمال گاما برای آن در نظر گرفته شد، $g(\mu_i)$ تابع پیوند برای امید ریاضی متغیر وابسته (Y_i) است که در پژوهش حاضر به صورت پیش فرض برای تابع گاما از تابع پیوند معکوس ($g(\mu_i)^{-1} = \mu_i$) استفاده شد. همچنین $h_{jk}(X_{jk})$ مجموعه‌ای از توابع هموارساز (عمدتاً هموارسازهای اسپیلین) ناشناخته‌ای هستند که منجر به تغییر شکل متغیرهای مستقل X_{ik} می‌شوند تا بتوان به کمک آنها روابط غیرخطی را کمی کرد. α نیز مقدار عرض از مبدأ یا همان ثابت مدل رگرسیونی است که بیانگر میانگین متغیر وابسته در حالت استقلال کامل نسبت به متغیرهای مستقل است. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد مدل‌های جمعی تعمیم یافته به مطالعه‌ی وود (۲۵) رجوع شود.

کمی‌سازی شرایط رطوبتی برای مدل‌سازی تولید خالص اولیه سالانه

در پژوهش حاضر از شاخص مشهور بارش استاندارد (SPI) (۱۷) برای کمی‌سازی شرایط ترسالی/خشکسالی استفاده شد. از آنجاییکه شاخص SPI از روی سری بارش ماهانه برای یک نقطه (ایستگاه) محاسبه می‌شود، در پژوهش حاضر برای محاسبه شاخص SPI برای یک محدوده (زیرمناطق زیست-اقليمی) ابتدا برای هر زیرمنطقه زیست-اقليمی سری وزنی بارش ماهانه باتوجه به اطلاعات بارش ایستگاه‌های هواشناسی موجود در هر زیرمنطقه و وزندهی بر اساس مساحت پلی‌گون‌های تیسن ایستگاه‌ها محاسبه شد و سپس این سری برای محاسبه شاخص SPI هر محدوده زیست-اقليمی با مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۸ ماهه مورد استفاده قرار گرفت.

شایان ذکر است که شاخص SPI دارای مقیاس ماهانه است و یا به عبارت دیگر برای یک مقیاس زمانی خاص از شاخص SPI برای هر سال دوازده عدد وجود دارد، درحالیکه در پژوهش حاضر هدف مدل‌سازی تولید خالص اولیه سالانه مناطق زیست اقلیمی در ارتباط با تغییرات خشکسالی است و برای هر سال تنها یک عدد برای تولید خالص اولیه وجود دارد. بنابراین برای اینکه بتوان به صورت متناظر با عدد تولید خالص اولیه هر سال یک عدد برای شرایط خشکسالی داشت، شاخص SPI در پژوهش حاضر به زیر مؤلفه‌های سالانه بر اساس مقیاس زمانی و ماه منتهی تفکیک شد. برای مثال در هر زیرمنطقه شاخص SPI با مقیاس زمانی دوازده ماهه به دوازده زیر سری سالانه برای هر یک از ماه‌های سال تفکیک شد. برای سایر

نشریه بوم شناسی کاربردی

مقایسه‌های زمانی شاخص SPI نیز به همین ترتیب عمل شد. از سوی دیگر تولید خالص اولیه سالانه هر زیرمنطقه زیست-اقلیمی حاصل برآیند تغییرات تولید خالص اولیه در مقیاس‌های زمانی کوتاه مدت‌تر مانند یک یا چند ماه خاص از سال است. از این حیث تفکیک شاخص SPI به مؤلفه‌های مختلف خشکسالی کمک خواهد کرد که برای هر منطقه مؤثرترین مؤلفه خشکسالی بر روی تغییرات تولید خالص اولیه تعیین شود. برای مثال وقتی در منطقه‌ای تولید خالص اولیه سالانه عمدتاً وابسته به تغییرات تولید در فصل‌هایی مثل بهار و پاییز است می‌توان از اثر بسیاری از مؤلفه‌های خشکسالی در فصل‌های تابستان و زمستان صرف‌نظر کرد. اما برای تعیین اینکه تولید خالص اولیه سالانه هر زیرمنطقه تحت تأثیر کدامیک از مؤلفه‌های خشکسالی است و یا اینکه کدامیک از مؤلفه‌ها نقشی در تغییرات تولید خالص اولیه ندارند، تمامی مؤلفه‌های خشکسالی در هر زیرمنطقه (۷۲ مؤلفه، شش مقیاس زمانی برای شاخص SPI و برای هر یک از ماه‌های سال) در معادله (۱) مورد آزمون قرار گرفتند و در نهایت مؤلفه‌ای که مدل رگرسیونی آن دارای بیشترین ضریب تبیین اصلاح شده (R^2_{adj}) و کمترین آماره اطلاعات آکائیک (AIC) بود به عنوان مؤثرترین مؤلفه خشکسالی بر روی تولید خالص اولیه هر زیرمنطقه زیست-اقلیمی انتخاب شد و نحوه اثرگذاری آن بر روی تولید خالص اولیه مورد تفسیر قرار گرفت. البته از آنجایی که اغلب متغیرهای SPI به علت اطلاعات نسبتاً یکسان مخصوصاً برای مقیاس‌های زمانی بلند مدت دارای خاصیت هم‌خطی شدید هستند در هر مدل تنها یک مؤلفه برای کمی‌سازی اثرات خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها استفاده شد.

نتایج

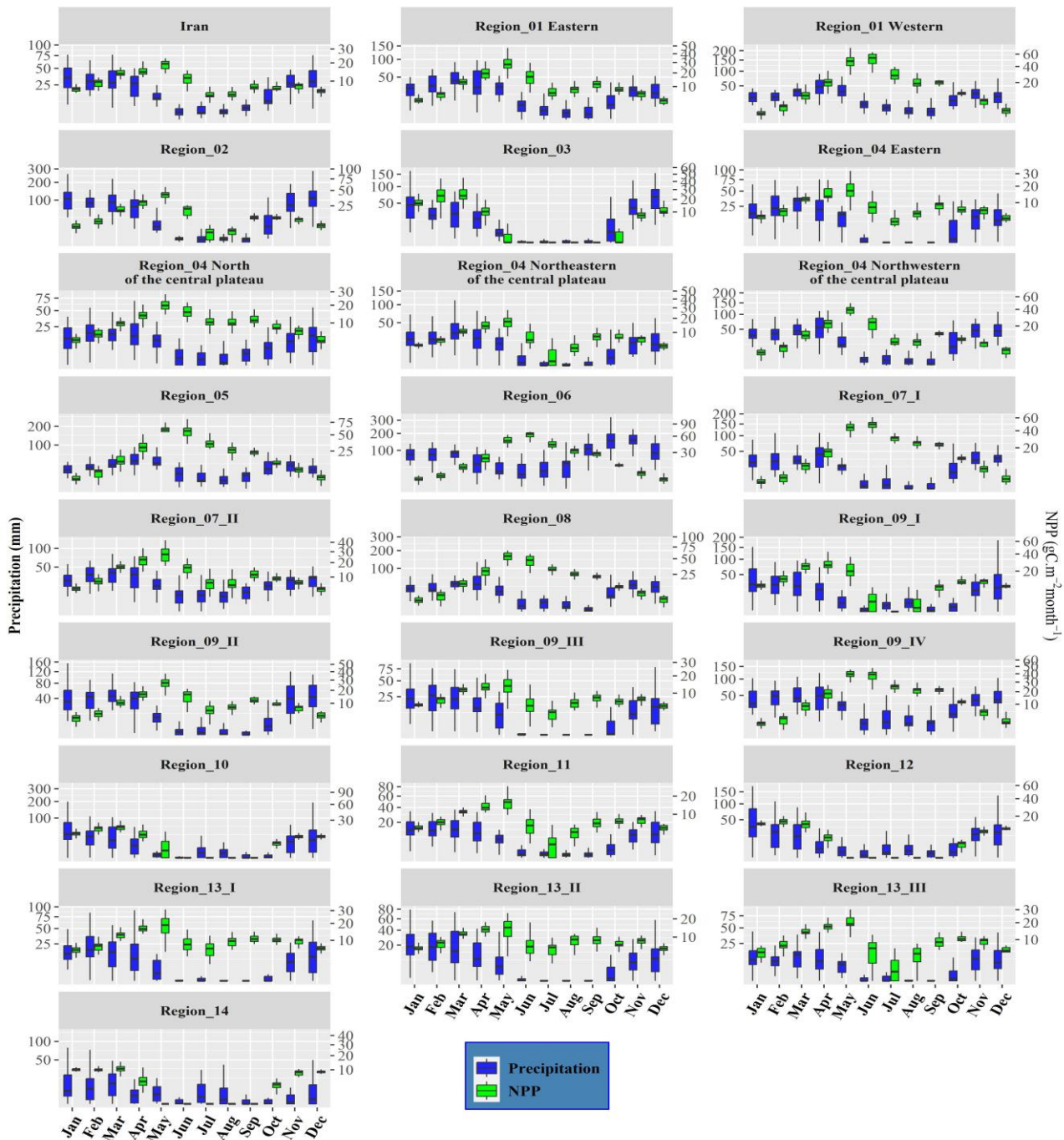
تغییرات زمانی آماره‌های تولید خالص اولیه

در شکل ۲ نمودارهای جعبه‌ای مربوط به بارش و تولید خالص اولیه هر یک از مناطق زیست اقلیمی ایران نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۲ نتایج نشان می‌دهد که بطور خلاصه بیشترین مقادیر تولید خالص اولیه به ترتیب در مناطق زیست اقلیمی شماره ۶ و ۵ (حاشیه دریای خزر)، منطقه ۸ (زنجان و قزوین) و منطقه ۷-یک (شمال تهران) با متوسط بیش از ۵۰ گرم کربن بر مترمربع در ماه، طی ماه‌های می و ژوئن اتفاق می‌افتد. این در حالی است که در اغلب مناطق خشک و نیمه‌خشک حاشیه خلیج فارس و دریای عمان شامل مناطق زیست اقلیمی ۱۰، ۱۲ و ۱۴ و همچنین منطقه‌ی غربی شماره ۳ و برخی مناطق فلات مرکزی شامل مناطق زیست اقلیمی ۹-سه، نه تنها متوسط خالص اولیه کمتر از سایر مناطق است ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$) بلکه در برخی از ماه‌های تابستان (جولای تا سپتامبر) تولید خالص اولیه صفر می‌شود. علاوه بر این نتایج حاکی از این است که در برخی از مناطق مانند منطقه ۱ شرقی (بخشی از خراسان شمالی و رضوی)، منطقه ۳ (خوزستان)، منطقه ۱۰، ۱۲ و ۱۴ (حاشیه خلیج فارس و دریای عمان) و مناطق ۹-یک (کرمان)، ۹-سه (خراسان جنوبی)، ۱۱ (اصفهان،

نشریه بوم شناسی کاربردی

یزد، سمنان) و ۱۳ در مناطق خشک فلات مرکزی تغییرات فصلی تولید خالص اولیه (جعبه‌های سبز رنگ شکل ۲) دقیقاً منطبق با تغییرات فصل بارش (جعبه‌های آبی رنگ شکل ۲) هستند و الگویی شبیه به هم دارند. این در حالی است که در برخی از مناطق زیست اقلیمی کشور با اقلیم مرطوب و نیمه مرطوب مانند منطقه یک-غربی (آذربایجان غربی و شرقی)، منطقه ۴ (سمنان)، مناطق ۵ و ۶ (حاشیه دریای خزر)، منطقه ۷-یک (شمال تهران) و منطقه ۸ (زنجان و قزوین) به علت پاسخ تأخیری پوشش گیاهی به بارندگی فصل بهار، الگوهای تغییرات فصل بارش و تولید نه تنها با هم مطابقت ندارند بلکه برعکس یکدیگر هستند، بطوریکه اوج تولید در تابستان اتفاق می‌افتد ولی بارش در این فصل به حداقل خود می‌رسد (شکل ۲).

نشریه بوم شناسی کاربردی

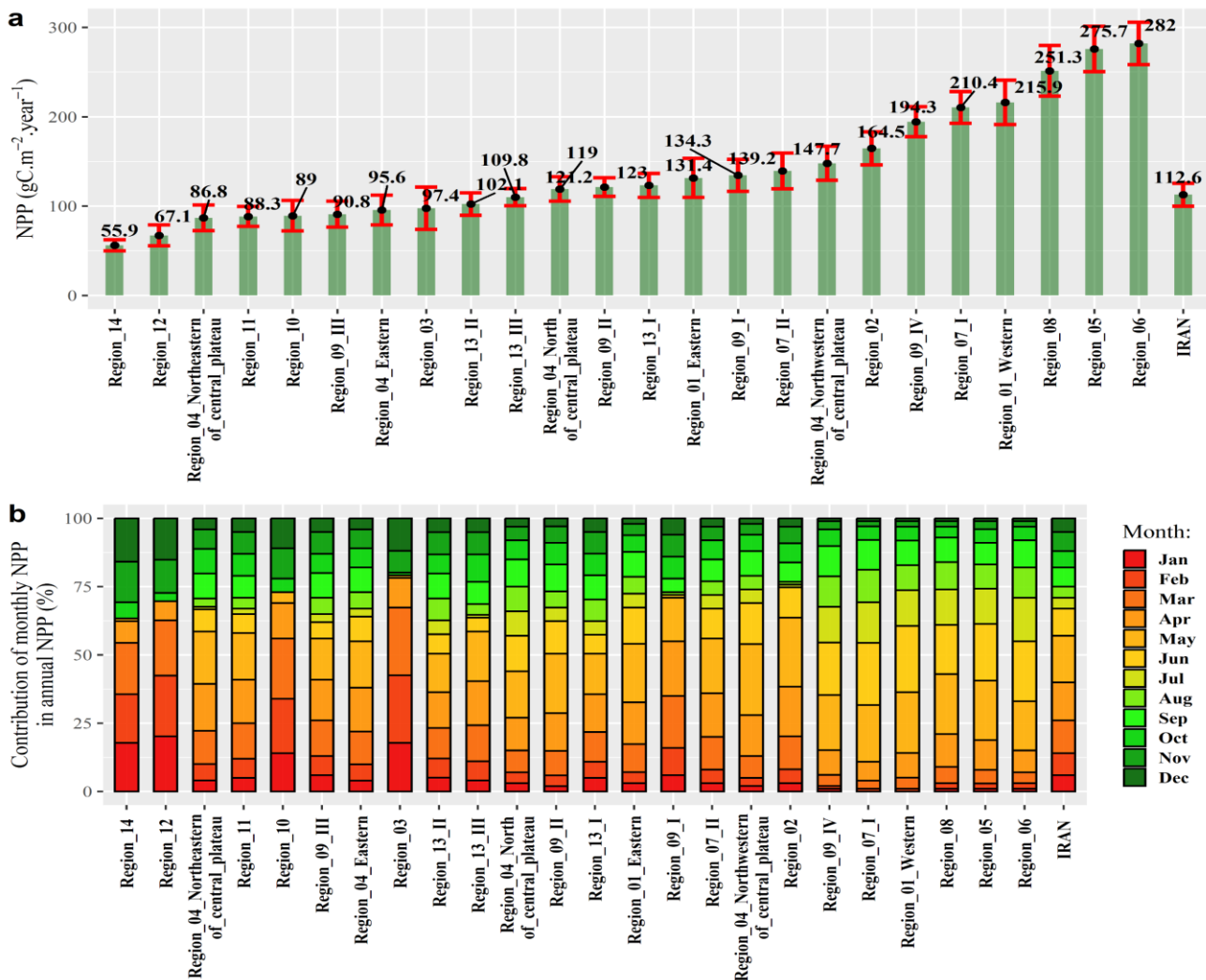


شکل ۲. نمودار جعبه‌ای تولید خالص اولیه مراتع و بارش ماهانه برای کل ایران و برای هریک از زیرمناطق زیست اقلیمی ایران (هر جعبه حاصل ۲۳ عدد دیتا سالانه از ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳)

همچنین در شکل ۳ میانگین سالانه تولید خالص اولیه اکوسیستم‌های مرتعی هر یک از مناطق زیست اقلیمی کشور نمایش داده شده است. بطور خلاصه نتایج نشان داد که تولید خالص اولیه در اکوسیستم‌های مرتعی مناطق زیست اقلیمی شماره ۶، شماره ۵، شماره ۸، منطقه یک-غربی و منطقه ۷-یک بیش از ۲۰۰ گرم کربن در متر مربع در سال است. این در حالی است که در مراتع مناطق شماره ۱۴، ۱۲، زیرمناطق شماره ۴ در شمال شرقی و شرق فلات مرکزی، ۱۱، ۱۰، ۹-سه که همگی در

نشریه بوم شناسی کاربردی

فلات مرکزی ایران قرار دارند و همچنین منطقه شماره ۳ در جنوب غربی ایران تولید خالص اولیه کمتر از ۱۰۰ گرم کربن در متر مربع در سال است (شکل ۳-ا). همچنین متوسط تولید خالص اولیه مراتع کل کشور از طریق میانگین وزنی با وزن‌دهی توسط مساحت کاربرهای مرتع هر زیرمنطقه زیست-اقلیمی حدود $112/6 \pm 13$ گرم کربن در متر مربع در سال برآورد شد که به احتساب کل مساحت اراضی مرتعی کشور (۶۷۴,۵۸۱ کیلومتر مربع) این امر به معنی ترسیب حدود ۷۶ میلیون تن کربن در سال توسط گیاهان موجود در اکوسیستم‌های مرتعی کشور است. همچنین نرخ تولید خالص اولیه اکوسیستم‌های مرتعی در ماه‌های مختلف سال متفاوت است. از این رو سهم مشارکت تولید خالص اولیه هر ماه سال نسبت به تولید خالص اولیه سالانه برای مراتع هر یک از مناطق زیست اقلیمی و مراتع کل کشور تعیین شد و نتایج آن در شکل ۳-ب نمایش داده شده است.



شکل ۳. میانگین تولید خالص اولیه سالانه مراتع هر یک از مناطق زیست اقلیمی و کل ایران (a) و همچنین درصد سهم هر ماه سال از تولید خالص اولیه سالانه (b).

نشریه بوم شناسی کاربردی

با توجه به محاسبات انجام شده مشخص شد که بخش عمده تولید خالص اولیه سالانه (بیش از ۵۰ درصد) اکوسیستم‌های مرتعی در اغلب مناطق زیست اقلیمی ایران طی ماه‌های مارس تا ژوئن (بهار و تابستان) اتفاق می‌افتد. البته نتایج نشان داد که در برخی از مناطق زیست اقلیمی واقعی در عرض‌های جغرافیایی پایین شامل مناطق شماره ۳، ۹-یک، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ عمده تولید خالص اولیه سالانه (حدود ۷۰ درصد) متعلق به ماه‌های دسامبر تا مارس (اواسط زمستان تا اوایل بهار) است. همچنین مشخص شد که بطور متوسط حدود ۶۰/۲ درصد از تولید خالص اولیه سالانه کل اکوسیستم‌های مرتعی کشور مربوط به ماه‌های فوریه تا ژوئن (اوایل بهار تا اواسط تابستان) است (شکل ۳-ب).

تحلیل روند تولید خالص اولیه

از نظر روند تغییرات سری‌های ماهانه تولید خالص اولیه، آزمون روند به دلیل وجود خاصیت فصلی شدید نتوانست روند معنی‌داری را نشان دهد. لذا برای رفع اثر خاصیت فصلی و نمایان شدن روند تغییرات تولید خالص اولیه، آزمون روند من-کندال بر روی سری‌های سالانه هر ماه سال به صورت مجزا انجام شد و نتایج آن در جدول ۱ ارائه گردید. بطور کلی نتایج نشان داد که تغییرات تولید خالص اولیه در اغلب ماه‌های سال و اغلب مناطق زیست اقلیمی ایران فاقد روند معنی‌دار است. بر اساس نتایج اکثر تغییرات افزایشی معنی‌دار تولید خالص اولیه در ماه‌های دسامبر تا مارس (اواسط زمستان تا اواسط بهار) در اغلب مناطق زیست اقلیمی ایران اتفاق می‌افتد. از نظر تغییرات سالانه تولید اکوسیستم‌های مرتعی هرچند در برخی موارد غیر معنی‌دار ولی آماره‌های روند مربوط به تولید خالص اولیه سالانه در تمام مناطق زیست اقلیمی دارای علامت مثبت (روند افزایشی) بود (جدول ۱). بطور خلاصه نتایج نشان داد که تولیدات خالص اولیه سالانه در مناطق زیست اقلیمی ۱-غربی، ۲، زیرمنطقه ۴-شمال غربی فلات مرکزی، ۶، زیرمناطق ۷-یک، ۹-دو، ۹-چهار و ۱۳-یک دارای روند افزایشی معنی‌دار هستند. بر اساس نتایج شدیدترین روند افزایشی معنی‌دار برای تولید خالص اولیه سالانه در مناطق زیست اقلیمی شماره ۶، ۱-غربی و ۷-یک به ترتیب با شیب‌های ۲۰/۱۳، ۱۹/۹۳ و ۱۸/۷۳ گرم کربن در متر مربع در هر دهه شناسایی شد. شیب تغییرات برای میانگین تولید خالص اولیه کشور ۶/۴۲ گرم کربن در متر مربع در هر دهه برآورد شد اما آماره روند مربوط به این نرخ تغییرات در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار شناخته نشد ($|Z_{mk}| < 1/96$).

خشکسالی و تولید خالص اولیه

در پژوهش حاضر واکنش تولید خالص اولیه سالانه اکوسیستم‌های مرتعی نسبت مؤلفه‌های مختلف خشکسالی/ترسالی از طریق مدل‌های جمعی تعمیم یافته کمی‌سازی شد. در شکل ۴ نمودارهای پراکنش نقطه‌ای بین تولید خالص اولیه سالانه و

نشریه بوم شناسی کاربردی

مؤثرترین مؤلفه خشکسالی بر آن برای مراتع هر یک از مناطق زیست اقلیمی و برای مراتع کل کشور نمایش داده شده است. با توجه به نتایج مشخص شد که در مناطق زیست اقلیمی مختلف مؤثرترین مؤلفه خشکسالی عمدتاً شامل مؤلفه‌هایی است که بیانگر شرایط خشکسالی/ترسالی در دوره‌های اوج تولید هر منطقه زیست اقلیمی هستند. بطوریکه در اغلب مناطق زیست اقلیمی مؤلفه‌های خشکسالی مؤثر شامل شاخص‌های SPI منتهی به ماه‌های آوریل تا اوت است (شکل ۴). همچنین از نظر مقیاس زمانی خشکسالی مشخص شد که در مناطقی که پوشش گیاهی مراتع عمدتاً شامل گونه‌های علفی و یکساله هستند خشکسالی‌ها/ترسالی‌ها در مقیاس‌های زمانی کوتاه مدت مانند سه و شش ماهه تولید اکوسیستم‌های مرتعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این در حالی است که در مناطقی که گونه‌های غالب عمدتاً شامل گونه‌های چوبی و چند ساله هستند مقیاس‌های بلند مدت تر خشکسالی‌ها و ترسالی‌های مانند مقیاس‌های نه و دوازده ماهه تأثیر بیشتری بر روی تولید مراتع دارند (مانند مناطق شماره یک-غربی، ۳، ۴، ۵، ۸، ۹-یک، ۹-سه، ۱۰، ۱۱، ۱۳-دو و ۱۳-سه در مناطق خشک فلات مرکزی و همچنین منطقه ۱۴ که شامل گونه‌های عمدتاً درختچه‌ای، چندساله و گون هستند). همچنین از نظر شدت واکنش‌پذیری تولید اکوسیستم‌های مرتعی مشخص شد که تقریباً در تمامی مناطق زیست اقلیمی مورد مطالعه یک ارتباط معنی‌دار بین شرایط خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها با تغییرات تولید خالص اولیه سالانه وجود دارد. با این وجود توجیه‌پذیری (R^2_{adj}) تغییرات تولیدات خالص اولیه در مناطق مختلف متفاوت است. بطوریکه در برخی از مناطق زیست اقلیمی واقع در مناطق خشک و نیمه خشک مانند مناطق ۴-شرقی (بخش‌هایی از خراسان رضوی و جنوبی)، ۷-دو (بخش‌هایی از خراسان شمالی و سمنان) و ۱-شرقی (بخش‌هایی از خراسان شمالی و رضوی) تا حدود ۸۰ درصد از تغییرات تولیدات خالص اولیه توسط مؤلفه‌های مختلف خشکسالی قابل توجیه است. این در حالی است که در برخی از مناطق مانند مناطق شماره ۲ (کردستان، کرمانشاه، لرستان، چهارمحال و بختیاری، کهکلوویه و بویراحمد)، ۶، ۷-یک، ۹-دو (اصفهان)، ۱۰ و ۱۳-یک، شدت اثرگذاری تغییرات شرایط خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها به حداقل خود می‌رسد ($R^2_{adj} < 50\%$). بطور خلاصه نتایج مدلسازی نشان داد که شدت تأثیرپذیری تولید خالص اولیه اکوسیستم‌های مرتعی از شرایط خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها در مناطق زیست اقلیمی با اقلیم‌های خشک و نیمه خشک مانند مناطق ۴-شرقی، ۷-دو و ۱-شرقی نسبت به مناطق زیست اقلیمی با اقلیم‌های خیلی خشک و یا استپی و خیلی مرطوب مانند مناطق شماره ۲، ۶، ۷-یک، ۹-دو، ۱۰ و ۱۳-یک، بیشتر می‌باشد.

جدول ۱. آماره‌های آزمون‌های روند من-کندال و شیب سن بر روی سری‌های زمانی مختلف تولید خالص اولیه در هر یک از مناطق زیست

اقلیمی ایران (اعداد برجسته و نمایان شده بیانگر وجود روند معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد)

Region	Statistic s	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
--------	----------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	--------

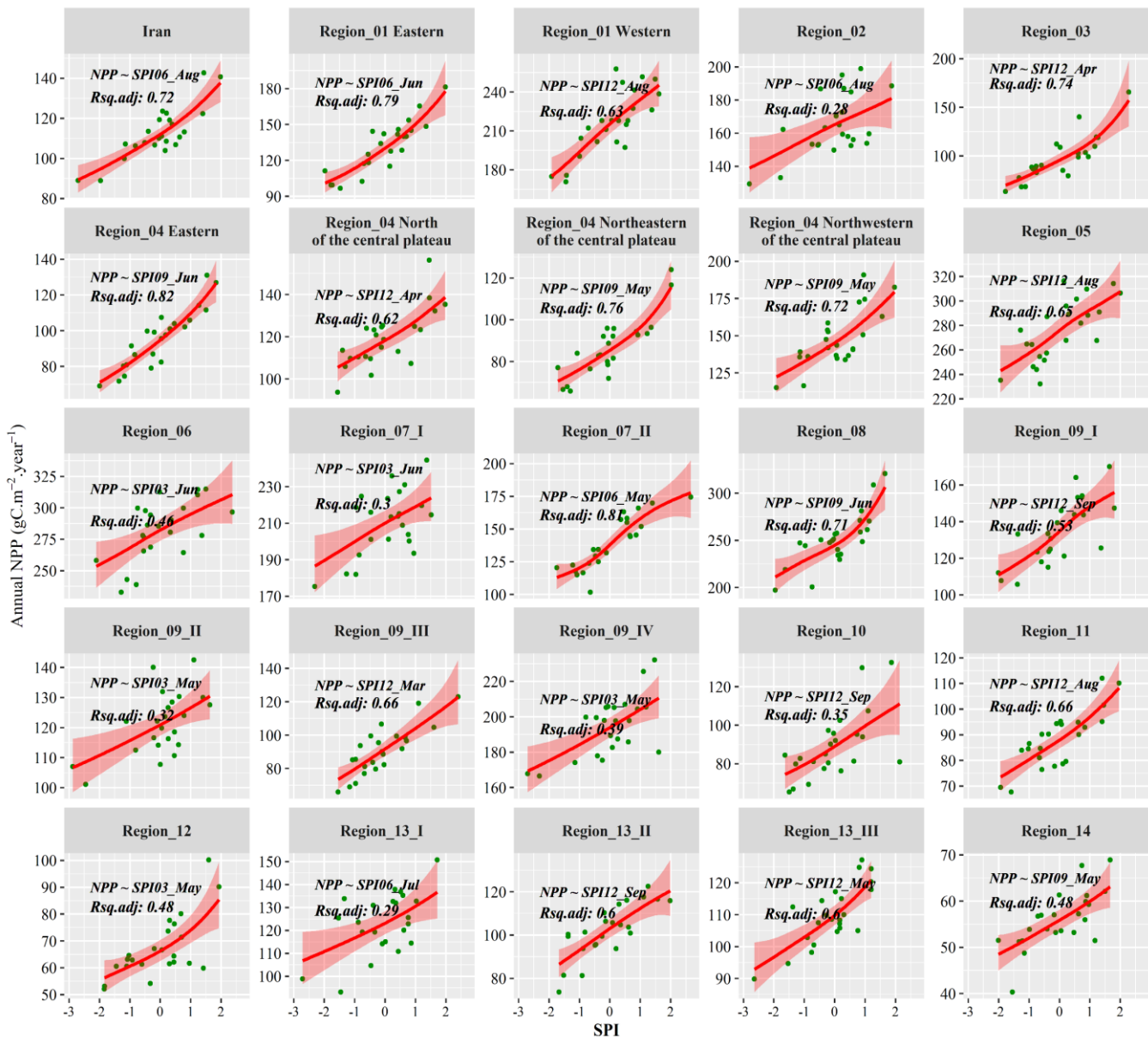
نشریه بوم شناسی کاربردی

Region_01_Eastern	Z _{mk}	1.64	0.58	0.11	1.06	0.63	0.11	-0.42	<u>2.75</u>	0.85	-	0.05	1.27	1.21
	Slope*	0.56	0.37	0.09	1.58	1.53	0.19	-0.64	<u>2.41</u>	0.75	-	0.04	0.39	9.84
Region_01_Western	Z _{mk}	0.96	1.74	1.32	1.85	<u>2.80</u>	0.26	-0.58	0.11	1.27	0.32	1.58	1.64	<u>2.01</u>
	Slope	0.18	0.90	1.36	3.28	<u>7.28</u>	0.90	-1.40	0.04	1.02	0.31	0.79	0.60	<u>19.93</u>
Region_02	Z _{mk}	<u>2.31</u>	<u>2.75</u>	<u>2.69</u>	1.80	1.21	0.74	-1.41	-	-	0.95	<u>2.01</u>	<u>3.64</u>	<u>2.64</u>
	Slope	<u>1.50</u>	<u>2.88</u>	<u>4.12</u>	3.23	3.38	-	-0.73	-	-	0.77	<u>1.17</u>	<u>1.63</u>	<u>15.70</u>
Region_03	Z _{mk}	1.30	1.43	1.00	-0.53	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	1.21	<u>2.96</u>	1.95
	Slope	2.54	4.95	2.04	-1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	<u>2.68</u>	16.36
Region_04_Eastern	Z _{mk}	1.30	0.85	0.16	1.48	1.21	-	-0.74	<u>2.48</u>	0.85	0.00	-	0.48	1.11
	Slope	0.55	0.58	0.13	1.38	3.11	-	-0.71	<u>1.64</u>	0.44	-	0.07	0.12	0.22
Region_04_North of cent. plateau	Z _{mk}	1.52	0.95	1.11	-0.26	0.48	-	-1.32	0.58	0.32	0.00	0.21	0.95	0.58
	Slope	0.64	0.49	0.45	-0.23	0.77	-	-1.32	0.62	0.23	-	0.01	0.09	0.43
Region_04_North eastern of cent. plateau	Z _{mk}	<u>2.26</u>	0.90	1.48	0.85	0.48	-	-0.70	1.88	0.00	-	0.11	0.90	0.53
	Slope	<u>0.46</u>	0.46	0.78	1.27	0.81	-	0.00	1.37	0.01	-	0.15	0.05	0.29
Region_04_North western of cent. plateau	Z _{mk}	<u>2.20</u>	<u>2.43</u>	1.85	1.69	1.48	-	-1.32	0.26	-	0.37	1.06	1.64	<u>2.11</u>
	Slope	<u>0.87</u>	<u>1.36</u>	2.36	3.15	2.71	-	-1.31	0.23	-	0.10	0.21	0.42	<u>11.39</u>
Region_05	Z _{mk}	1.18	1.43	1.11	0.74	1.32	-	-0.42	1.06	1.95	0.53	1.06	1.11	1.37
	Slope	0.49	1.46	2.70	2.98	3.12	-	-1.36	1.82	2.01	0.41	0.80	0.52	13.74
Region_06	Z _{mk}	0.96	1.00	1.37	0.32	1.95	0.69	0.74	1.80	1.74	0.00	0.42	1.27	<u>2.43</u>
	Slope	0.48	0.54	0.99	0.86	4.38	1.35	1.30	3.44	1.91	0.03	0.32	0.53	<u>20.13</u>
Region_07_I	Z _{mk}	<u>1.97</u>	1.48	1.37	0.42	<u>2.54</u>	0.58	0.26	<u>2.17</u>	1.32	0.11	0.21	<u>2.01</u>	<u>3.33</u>
	Slope	<u>0.31</u>	0.40	1.21	1.43	<u>5.81</u>	1.74	0.09	<u>1.86</u>	1.53	0.10	0.49	<u>0.49</u>	<u>18.73</u>
Region_07_II	Z _{mk}	1.47	1.06	1.43	0.11	0.05	-	-1.74	0.21	-	-	0.21	1.06	0.00
	Slope	0.61	1.22	1.03	0.31	0.47	-	-1.75	0.23	-	-	0.11	0.46	0.68
Region_08	Z _{mk}	1.86	1.53	1.90	1.58	1.16	-	0.11	1.90	1.69	0.26	0.74	1.43	1.90
	Slope	0.78	1.24	2.62	4.82	4.23	-	0.30	2.88	1.71	0.31	0.73	0.80	18.68
Region_09_I	Z _{mk}	1.52	0.79	-	-0.90	0.00	-	0.27	0.98	-	-	1.85	<u>2.80</u>	0.26
	Slope	1.05	1.03	-	-1.87	0.05	-	0.00	0.00	-	-	0.78	<u>0.92</u>	2.24
Region_09_II	Z _{mk}	<u>2.37</u>	<u>2.69</u>	1.80	1.32	1.06	-	-0.74	1.11	-	0.53	0.85	<u>2.43</u>	<u>2.06</u>
	Slope	<u>1.17</u>	<u>1.49</u>	1.29	1.64	2.07	-	-1.00	0.74	-	0.08	0.50	<u>0.86</u>	<u>7.84</u>
Region_09_III	Z _{mk}	0.90	1.16	0.00	0.95	1.48	-	-1.72	<u>2.48</u>	0.63	0.00	-	0.42	1.00
	Slope	0.27	0.66	-	0.86	3.29	-	-1.02	<u>1.60</u>	0.37	0.01	-	0.17	5.78
Region_09_IV	Z _{mk}	<u>2.26</u>	1.69	1.69	0.42	<u>2.17</u>	0.74	0.26	1.95	1.37	0.26	0.37	1.53	<u>3.01</u>
	Slope	<u>0.55</u>	0.90	1.77	1.33	<u>4.40</u>	2.09	0.28	2.25	1.19	0.16	0.31	0.57	<u>15.47</u>
Region_10	Z _{mk}	1.75	1.06	-	-0.48	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	-	1.58	<u>3.06</u>	0.58
	Slope	1.63	1.47	-	-0.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.83	<u>1.42</u>	4.43
Region_11	Z _{mk}	<u>2.09</u>	1.69	1.90	0.95	1.11	-	-0.92	1.95	-	0.37	0.53	1.43	1.37
	Slope	<u>0.65</u>	0.84	0.70	0.91	1.82	-	-0.35	1.07	-	0.18	0.19	0.51	5.44
Region_12	Z _{mk}	1.41	1.21	0.11	0.37	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	0.53	<u>2.11</u>	1.00
	Slope	0.66	1.66	0.04	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.20	<u>0.59</u>	3.45
Region_13_I	Z _{mk}	1.80	1.43	0.53	1.95	<u>2.17</u>	0.53	-0.32	1.37	0.32	0.42	1.80	1.69	<u>3.33</u>
	Slope	1.00	0.71	0.56	1.71	<u>4.93</u>	0.58	-0.46	1.33	0.39	0.22	0.62	0.63	<u>13.41</u>

نشریه بوم شناسی کاربردی

Region_13_II	Z _{mk}	1.13	1.43	0.58	0.79	1.64	-	-1.43	2.48	0.32	-	0.00	0.95	1.37
	Slope	0.50	0.79	0.20	0.91	3.43	-	-1.27	1.85	0.23	-	0.05	0.37	5.88
Region_13_III	Z _{mk}	2.14	1.85	1.16	0.16	0.42	1.64	-0.76	0.87	1.16	0.32	1.11	2.27	1.21
	Slope	1.53	1.63	0.87	0.06	1.10	-	-0.01	0.57	-	0.18	0.62	0.71	4.75
Region_14	Z _{mk}	1.58	1.58	0.85	0.90	0.36	0.00	0.33	1.58	0.53	0.69	1.27	0.42	1.95
	Slope	0.54	0.71	0.61	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.37	0.08	3.87
Iran	Z _{mk}	2.32	2.11	2.01	0.79	0.74	-	-1.16	1.90	0.16	0.26	1.27	2.80	1.53
	Slope	0.83	1.25	0.82	0.55	0.99	0.30	-0.44	0.90	0.19	0.12	0.40	0.71	6.42

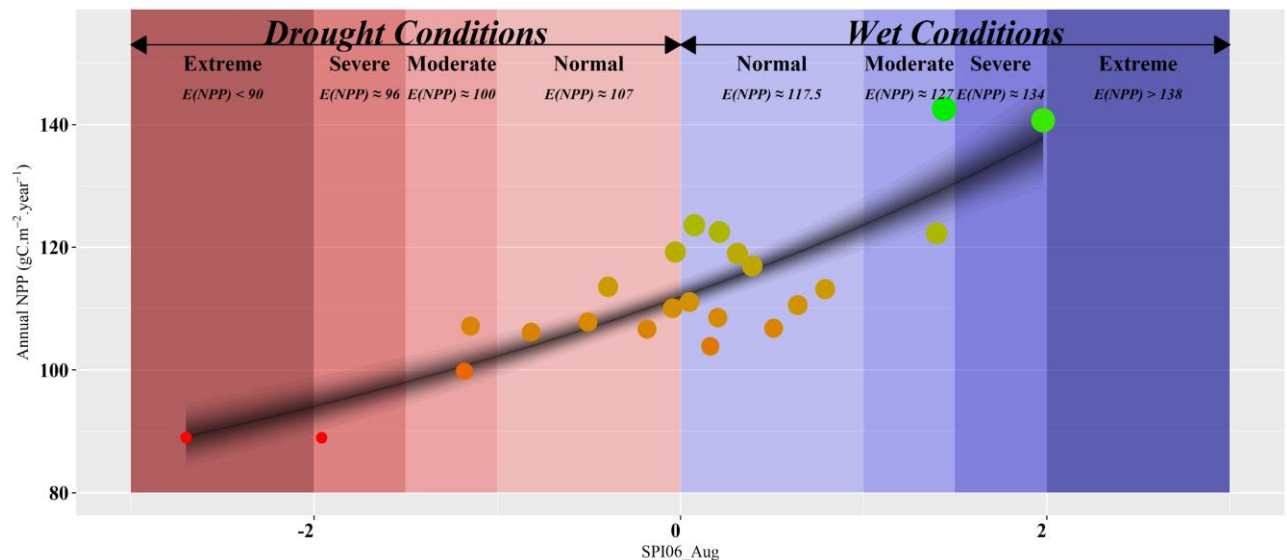
۹. آماره شیب بر اساس تغییرات در هر دهه می باشد (gC.m⁻².decade⁻¹).



شکل ۴. نمودارهای پراکنش نقطه‌ای و مدل GAM بین تولید خالص اولیه سالانه و مؤثرترین مؤلفه خشکسالی در هر منطقه زیست اقلیمی همچنین نتایج نشان داد که تغییرات تولیدات خالص اولیه کل اکوسیستم‌های مرتعی کشور تا ۷۲ درصد تحت تأثیر شرایط خشکسالی/ترسالی شش ماهه منتهی به اوت (SPI06_Aug) است (شکل ۵). از این حیث بر اساس مدل رگرسیونی انتظار

نشریه بوم شناسی کاربردی

می‌رود که در شرایط کاملاً نرمال خشکسالی/ترسالی ($SPI_{06_Aug} = 0$) امید ریاضی تولید خالص اولیه ($E(NPP)$) سالانه مراتع کشور حدود $112/6$ گرم کربن در متر مربع در سال باشد. در حالی که در شرایط ترسالی‌ها و خشکسالی‌های استثنایی (به ترتیب $SPI_{06_Aug} > 2$ و $SPI_{06_Aug} < -2$) امید ریاضی تولید خالص اولیه سالانه کل اکوسیستم‌های مرتعی کشور به ترتیب بیش از ۱۳۸ و کمتر از ۹۰ گرم کربن در متر مربع در سال انتظار می‌رود (شکل ۵).



شکل ۵. تغییرات تولید خالص اولیه سالانه کل اکوسیستم‌های مرتعی در شرایط مختلف خشکسالی‌های شش ماهه منتهی به ماه اوت

بحث و جمع‌بندی

خشکسالی که یکی از مخاطرات طبیعی است، زندگی انسان و اکوسیستم‌های طبیعت را به طور گسترده‌ای تحت تاثیر قرار می‌دهد (۱۴). تغییرات اقلیمی نقش بسیار مهمی در پویایی و تغییرات پوشش گیاهی دارد. بنابراین بررسی روابط این دو و شناسایی نقاط تغییر این روابط برای ارزیابی پتانسیل تاثیر تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم‌ها بنیادی بوده و در برنامه‌ریزی و مدیریت منطقه‌ای اراضی بسیار اهمیت دارد. نوسانات اقلیمی از عوامل مهم و اصلی تأثیرگذار بر تغییرات پوشش گیاهی است که در درازمدت در صورت تداوم این شرایط باعث ایجاد تغییرات زیاد در پوشش گیاهی می‌شود (۲۸). یکی از موارد مهم تأثیر تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم‌های مرتعی، میزان اثرات خشکسالی حاصل از تغییرات بارش بر روی تولید خالص اولیه پوشش گیاهی این مناطق می‌باشد. در پژوهش حاضر بر روی تغییرات زمانی و مکانی تولید خالص اولیه در فاصله سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۰۰ در اکوسیستم‌های مرتعی ایران و ارتباط آن با تغییرات شرایط خشکسالی، تحلیل روند بر روی سری‌های ماهانه و سالانه تولید خالص اولیه اکوسیستم‌های مرتعی پرداخته شد. همانطور که انتظار می‌رفت بیشترین مقادیر تولید خالص اولیه مربوط به مناطق مرطوب در فصل بهار تا تابستان و کمترین مقادیر تولید خالص اولیه مربوط به مناطق خشک و نیمه‌خشک در

نشریه بوم شناسی کاربردی

فصل تابستان می باشد که حتی ممکن است تولید خالص اولیه صفر شود. علیرغم تغییر اقلیم و گرمایش جهانی در چند دهه اخیر تغییرات تولید خالص اولیه در اغلب اکوسیستم های جهان روند افزایشی داشته است (۶ و ۲۷). در مطالعه لی و همکاران (۱۵) هم که در سطح جهانی انجام شده است نیز به این امر اشاره شده که تولید خالص اولیه سالانه در سطح جها رو به افزایش است یافته های این پژوهش نیز نشان داد که بطور متوسط تولید خالص اولیه کل اکوسیستم های مرتعی کشور حدود $112/6 \pm 13$ گرم کربن در متر مربع در سال است که این امر به معنی ترسیب حدود ۷۶ میلیون تن کربن در سال توسط گیاهان موجود در اکوسیستم های مرتعی کشور می باشد. از دلایل احتمالی این امر می توان به غلظت CO_2 اتمسفر و انتشار گازهای گلخانه ای اشاره کرد. از آنجاییکه تغییرات سری های ماهانه تولید خالص اولیه نتوانست روند معنی داری را نشان دهند، بنابراین از تغییرات سالانه NPP برای آزمون تحلیل روند استفاده شد و شدیدترین روند افزایشی معنی دار برای تولید خالص اولیه سالانه در مناطق زیست اقلیمی مرطوب در هر دهه شناسایی شد. لی و همکاران (۱۴) نیز عنوان کردند که خشکسالی محرک اصلی تغییرات سالانه NPP بوده است. سپس واکنش تولید خالص اولیه سالانه اکوسیستم های مرتعی نسبت مؤلفه های مختلف خشکسالی/ترسالی از طریق مدل های جمعی تعمیم یافته کمی سازی شد، نتایج نشان داد که در مناطقی که پوشش گیاهی مراتع عمدتاً شامل گونه های علفی و یکساله هستند، خشکسالی ها/ترسالی ها در مقیاس های زمانی کوتاه مدت مانند سه و شش ماهه و در مناطقی که گونه های غالب عمدتاً شامل گونه های چوبی و چند ساله هستند، مقیاس های بلند مدت تر تولید اکوسیستم های مرتعی را تحت تأثیر قرار می دهند. بطور خلاصه نتایج مدلسازی نشان داد که شدت تأثیر پذیری تولید خالص اولیه اکوسیستم های مرتعی از شرایط خشکسالی ها و ترسالی ها در مناطق زیست اقلیمی با اقلیم های خشک و نیمه خشک بیش از مناطق زیست اقلیمی با اقلیم های خیلی خشک و یا استپی و خیلی مرطوب است. . از جمله کاربردهای پژوهش حاضر می توان به ارائه اطلاعاتی از کمیت تولید خالص اولیه مراتع کل کشور و روند تغییرات آن طی دو دهه گذشته اشاره کرد. همچنین دیگر کاربرد این پژوهش این است که می توان به کمک تکنیک های مدلسازی ارتباط بین خشکسالی ها/ترسالی ها را نیز با تغییرات تولید خالص اولیه سالانه در مراتع مختلف کشور مورد بررسی قرار داد و از آنجایی که خشکسالی می تواند بر پوشش گیاهی تأثیرگذار باشد، در راستای مدیریت صحیح این مناطق هنگام وقوع خشکسالی و جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی از واکنش عملکرد اکوسیستم های مختلف کشور به خشکسالی می توان آگاهی داشته باشیم. پیشنهاد می شود در مطالعات آتی از مدل هایی استفاده شود که مانند رگرسیون خطی تک بعدی عمل نکند و مانند رگرسیون چندکی نسبت به تمامی شرایط واکنش نشان دهد تا نتایج به واقعیت نزدیک تر باشد.

1. Acharya, B.S., Rasmussen, J., Eriksen, J. 2012. Grassland carbon sequestration and emissions following cultivation in a mixed crop rotation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 153 (24): 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.03.001>.
2. Araghi Shahri, S. M., S. Soltani, M. Tarkesh and S. Pourmanafi. 2020. Investigating the Effects of Teleconnection Indices on Net Primary Production in the North of Iran's Alborz Mountains, *Journal of applied ecology*. 9 (3): 1-16. (In Farsi).
3. Bazmkame, H. C., Althoff, D., Filgueiras, R., Calijuri, M. L. & Oliveira, J. C. D. 2019. Modeling the Net Primary Productivity: A Study CaS in the BraZmkilian Territory. *Journal of the Indian Society of Remote Snsing* 47(10): 1727-1735.
4. Bastos, A.; Running, S.W.; Gouveia, C. & Trigo, R.M. 2013. The global NPP dependence on ENSO: La Niña and the extraordinary year of 2011. *Journal Of Geophysical ReSarch: Biogeosciences* 118: 1247–1255.
5. Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Og'ee, J., Allard, V. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature (London)* 437 (7058): 529–533. <https://doi.org/10.1038/nature03972>.
6. FernánZmk-MartínezZmk, M., Sardans, J., Chevallier, F., Ciais, P., Obersteiner, M., Vicca, S., Canadell, J.G., Bastos, A., Friedlingstein, P., Sitch, S., Piao, S.L., JansSns, I.A. and Peñuelas, J. 2019. Global trends in carbon sinks and their relationships with CO2 and temperature. *Nature Climate Change* 9: 73-79.
7. Guisan, A., J.R.T.C. Edwards and T. Hastie. 2002. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological modelling* 157(2-3): 89-100.
8. Hadian, F., Jafari, R., Bashari, H., Tarkesh, M. & Clarke, K. D. 2019. Estimation of spatial and temporal changes in net primary production baSd on Carnegie Ames Stanford Approach (CASA) model in Smi-arid rangelands of Smirom County, Iran. *Journal of Arid Land* 11(4): 477-494. (In Farsi).
9. Huang, Q., ZMKhang, F., ZMKhang, Q., Ou, H. & Jin, Y. 2020. Quantitative assessment of the impact of human activities on terrestrial net primary productivity in the Yangt Zmke River delta. *Sustainability* 12(4): 1697.
10. Jafari, F., R. Jafari and H. Bashari. 2023. Comparing Actual and Potential Productions of Rangeland Ecosystems of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province in Different Rangeland Conditions. *Iran. Journal of applied ecology*. Winter 2023: 1-14.
11. Karandish, F. & Mousavi, S. S. 2018. Climate change uncertainty and risk assessment in Iran during twenty-first century: evapotranspiration and green water deficit analysis. *Theoretical and applied climatology* 131(1): 777-791.
12. Kemp, D.R., Guodong, H., Xiangyang, H., Michalk, D.L., Yingjun, Z. 2013. Innovative grassland management systems for environmental and livelihood benefits. *Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am.* 110 (21), 8369–8374. <https://doi.org/10.1073/pnas.1208063110>.
13. Khatibi, R. & Saberi, M. (2020). Bio-climatic classification of Iran by multivariate statistical methods. *SN Applied Sciences*, 2(10), 1-30.
14. Lei, T., Feng, J., Lv, J., Wang, J., Song, H., Song, W., & Gao, X. 2020. Net Primary Productivity Loss under different drought levels in different grassland ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 274: 1-12.
15. Li, P., Peng, C., Wang, M., Li, W., ZMKhao, P., Wang, K. & ZMKhu, Q. 2017. Quantification of the responS of global terrestrial net primary production to multifactor global change. *Ecological Indicators*, 76: 245-255.
16. Lu Q S, Gao ZMK Q, Ning J C. 2015. Impact of progressive urbanization and changing cropping systems on soil erosion and net primary production. *Ecological Engineering*, 75: 187–194.
17. McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. 1995. Drought monitoring with multiple time scales. *Proceedings of the 9th conference on Applied Climatology*. AMS: Boston, MA; 233–236.
18. Mgalula, M. E., Wasonga, O. V., Hülsbusch, C., Richter, U., & Hensi, O. 2021. Greenhouse gas emissions and carbon sink potential in Eastern Africa rangeland ecosystems: A review. *Pastoralism*, 11(1): 1-17.
19. Modarres, R. & da Silva, V. D. P. R. 2007. Rainfall trends in arid and Semi-arid regions of Iran. *Journal of arid environments* 70(2): 344-355.
20. Patel, N. R., Dadhwal, V. K., Saha, S. K., Garg, A. and Sharma, N. 2010. Evaluation of MODIS data potential to infer water stress for wheat NPP estimation, *Tropical Ecology*, 51(1): 93-105.

21. Richardson, A. D., T. A., Black, P. Ciais, N. Delbart, M. A. Friedl, N. Gobron and S. Luyssaert. 2010. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences* 365(1555): 3227-3246.
22. Saki, M., S. Soltani Koupaei., M. Taekesh Esfahani and R. Jafari. 2018. Spatial and Temporal Changes of Net Primary Production (NPP) and Their Relationship with Climatic Factors from 2000 to 2014 in Isfahan Province. *Journal of Applied Ecology*. Spring 2018. Vol,7. No (1): 27-40. (In Farsi).
23. Saydzade, F., S. Soltani and R. Modarres. 2022. Prediction of Net Primary Production Changes in Different Phytogeographical Regions of Iran from 2000 to 2016, Using Time Series Models, Iran. *Journal of Applied Ecology*. Summer 2022:19-35. (In Farsi).
24. Sen, P. K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324): 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>.
25. Wood, S. 2006. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. CRC Press, University of Bristol, UK.
26. Yu, T., Sun, R., Xiao, ZMK., ZMKhang, Q., Liu, G., Cui, T. and Wang, J. 2018. Estimation of global vegetation productivity from Global Land Surface Satellite data. *Remote Sensing* 10: 327, doi:10.3390/rs10020327.
27. Zhao, M., Running, S.W. 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science* 329 (5994), 940-943. <https://doi.org/10.1126/science.1192666>.
28. Zhao, J., S. Huang, Q. Huang, H. Wang and G. Leng. 2018. Detecting the dominant cause of streamflow decline in the Loess Plateau of China based on the latest Budyko Equation. *Water* 10(9): 1-19.

Evaluation of spatial and temporal changes of net primary production in Iran's rangeland ecosystems and its relationship with drought

Zahra Sanaei^{1*}, Reza Modarres², Poria mohit esfahani³

1. PhD student, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2. Associate Professor, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
3. M.Sc. Graduate of Watershed Management, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*Corresponding Author, mail: modarres2005@gmail.com

Spatial and temporal changes of net primary production (NPP) in relation to drought are the basic criteria that determine the state of rangeland ecosystems. The present study was conducted with the aim of investigating NPP changes and its relationship with drought. The monthly time series of NPP data for the country's rangeland uses was prepared from the sum of net photosynthesis production (PSN) of the eight-day MODIS sensor (MOD17A2H) with a spatial scale of 500 m over a period of 2000 to 2022. Also, the monthly rainfall data of 165 synoptic stations were obtained from the National Meteorological Organization to calculate the Standard Precipitation Index (SPI) and monitor droughts during this time period. Box plots of precipitation and net primary production were prepared and the results showed that the highest values of net primary production with an average of more than $50 \text{ gC.m}^{-2}.\text{month}^{-1}$ occur during spring and early summer in humid areas. The findings of this research showed that NPP is increasing in Iran's rangeland ecosystems, and on average, the net primary production of all rangeland ecosystems in the country is about $112.6 \pm 13 \text{ gC.m}^{-2}.\text{year}^{-1}$, in other words, about 76 million tons of carbon per year. It is absorbed by the plants in the rangeland ecosystems of the country. The trend of changes in the monthly series of NPP was not significant due to the influence of seasonal characteristics, but the annual changes of NPP showed a significant trend of increase in all regions.

Keywords: NPP, SPI, trend analysis test, monthly precipitation, MODIS sensor