

## حساسیت تولید اولیه خالص به تغییر اقلیم در ناحیه رویشی هیرکانی

پریسا عباسیان<sup>۱</sup>، پدرام عطارد<sup>۲\*</sup>، شهرام خلیقی سیگارودی<sup>۳</sup>، جواد بذرافشان<sup>۴</sup> و جان تولند ون استان<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲\* - نویسنده مسئول، استاد، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. پست الکترونیک: attarod@ut.ac.ir

۳- دانشیار، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۵- دانشیار، گروه زمین‌شناسی و جغرافیا، دانشگاه جورجیا، جنوبی، آمریکا

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴

### چکیده

تولید اولیه خالص (Net Primary Production, *NPP*) از شاخص‌های مهم ارزیابی توان تولید بوم‌سازگان‌ها است که به شدت تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار دارد. پژوهش پیش‌رو با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر روند و حساسیت *NPP* در ناحیه رویش هیرکانی با استفاده از داده‌های طولانی‌مدت (۳۱ ساله) ایستگاه‌های هواشناسی گرگان، قائم‌شهر، بابلسر، نوشهر، رامسر، انزلی و آستارا، در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ میلادی (۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶) انجام شد. *NPP* با استفاده از مدل اقلیم‌مبنای سینتتیک برآورد شد و ارزیابی روند آن و نیز روند عوامل اقلیمی با استفاده از آزمون من-کنندال انجام شد. نتایج نشان داد که میانگین دمای سالانه در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه، روندی افزایشی و معنی‌دار داشت، درحالی‌که روند بارندگی سالانه در هیچ‌یک از ایستگاه‌ها معنی‌دار نبود. میانگین سالانه *NPP* در ناحیه رویشی هیرکانی ۱۰/۶ تن در هکتار در سال (انحراف معیار  $\pm 1/91$ ) برآورد شد. بیشترین و کمترین مقدار *NPP* به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های انزلی و گرگان بود که به ترتیب ۱۳/۴۲ (انحراف معیار  $\pm 1/38$ ) و ۷/۶ (انحراف معیار  $\pm 1$ ) تن در هکتار در سال تخمین زده شد. مقدار *NPP* از شرق به غرب ناحیه هیرکانی تا ایستگاه انزلی به صورت افزایشی برآورد شد. ضریب حساسیت *NPP* نسبت به دما در کل ناحیه، ۰/۵ برآورد شد. این عدد نشان می‌دهد که در صورت افزایش دما به مقدار تقریبی ۰/۶ درجه، *NPP* سالانه می‌تواند نزدیک به ۰/۲ تن در هکتار در سال افزایش یابد. نتایج این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی برای استفاده از خدمات بوم‌سازگان‌ها استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: بوم‌سازگان، ضریب حساسیت، مدل اقلیم‌مبنا.

### مقدمه

اقلیم و پوشش گیاهی در مقیاس‌های مکانی و زمانی در تعامل متقابل هستند. پوشش گیاهی در مقیاس منطقه‌ای، نقش مهمی در وضعیت اقلیمی ایفا می‌کند. تغییرات پوشش گیاهی زمین می‌تواند چرخه بارش را تغییر دهد و تأثیر به‌سزایی در تراز آب‌کره زمین داشته باشد (Anderson & Goulden, 2011).

اقلیم، عامل تعیین‌کننده پویایی بوم‌سازگان‌های جنگلی است، بنابراین تغییرات اقلیمی به‌ویژه افزایش دما و تغییرات در مقدار بارش و نیز شدت و فراوانی وقایع حدی اقلیمی، اثرات قابل توجهی بر جنگل‌ها دارد. جنگل‌ها با ذخیره ۸۰ درصد کربن سطح زمین و ۴۰ درصد کربن زیر زمین، نقش عمده‌ای در بودجه کربن فعلی و پیش‌بینی‌شده آینده دارند (Melillo et al., 2011).

(*al.*, 2005). پژوهش در مورد *NPP* نیز به‌عنوان یک راه‌حل اساسی برای مسائلی مانند تغییر جهانی، مدیریت پایدار و حفاظت از تنوع زیستی مطرح است (Jiang *et al.*, 1999). در حال حاضر برای برآورد *NPP*، چهار مدل اقلیمی میامی (Miami)، تورنتوایت (Thornthwaite)، چیکوگو (Chikugo) و سینتتیک (Synthetic) استفاده می‌شوند. در بین این مدل‌ها، مدل سینتتیک اگرچه براساس ویژگی‌های اکوفیزیولوژیکی گیاهان و نیز عامل‌های اقلیمی بنا شده است، اما نسبت به مدل‌های دیگر، برآورد دقیق‌تری از *NPP* به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه می‌کند (He *et al.*, 2005). تاکنون در ایران، برآورد *NPP* با استفاده از مدل سینتتیک انجام نشده است، درحالی‌که موارد استفاده از این مدل در پژوهش‌های خارج از کشور متعدد بوده است. Zhou و همکاران (۲۰۰۲) به‌کمک این مدل، تولید اولیه خالص در جنگل‌های سوزنی‌برگ طبیعی و دست‌کاشت لاریکس در کشور چین را برآورد کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که رابطه بین مقدار تولید زی‌توده و تولید اولیه خالص خطی نیست و سن درختان بر مقدار *NPP* تأثیر معنی‌داری دارد. Wang و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل سینتتیک به پیش‌بینی توزیع مکانی - زمانی تغییرات *NPP* در استپ‌های با اقلیم نیمه‌خشک در چین پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که این مدل، قابلیت مطلوبی در برآورد توزیع زمانی و مکانی *NPP* دارد.

هدف از پژوهش پیش‌رو، ارزیابی روند و تعیین حساسیت *NPP* به تغییرات اقلیمی در ناحیه ریشی هیرکانی بود.

## مواد و روش‌ها

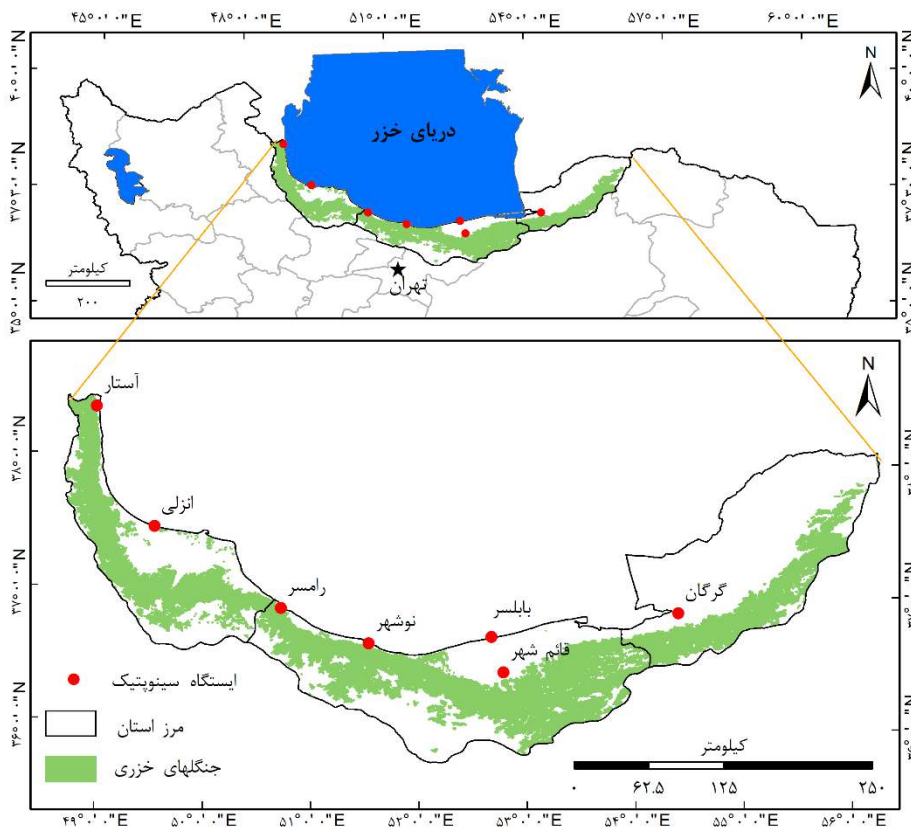
### منطقه مورد مطالعه و روش پژوهش

پژوهش پیش‌رو در ناحیه ریشی هیرکانی انجام شد (شکل ۱). این ناحیه به‌طول حدود ۸۰۰ و عرض ۲۰ تا ۷۰ کیلومتر در دامنه شمالی سلسله‌جبال البرز قرار دارد. به‌منظور برآورد *NPP* و ارزیابی روند آن، داده‌های هواشناسی (دما و بارش) طولانی‌مدت (۳۱ساله) ایستگاه‌های هواشناسی هم‌دیدهبانی در هفت ایستگاه هواشناسی گرگان، قائم‌شهر (قراخیل)،

(*al.*, 1996). در واقع، جنگل‌ها و اقلیم اثرات متقابل بر یکدیگر دارند و این کنش‌های متقابل موجب تغییرات آلیبدو (Euskirchen *et al.*, 2009)، تغییرات پویایی چرخه کربن (Phillips *et al.*, 2009)، جریان انرژی و تغییرات رطوبت (Bonan *et al.*, 2003) می‌شوند. تولید اولیه خالص (*NPP*) مقدار کربن تبدیل‌شده به زی‌توده پس از کسر تنفس گیاهان است که یکی از منابع اصلی برای مواد غذایی بشر، تولیدات چوبی و سوخت به‌شمار می‌آید. *NPP* را می‌توان از شاخص‌های مهم ارزیابی توان تولید بوم‌سازگان‌ها و نواحی رویشی جنگلی قلمداد کرد (Ren *et al.*, 2010). ازسوی دیگر، تثبیت دی‌اکسید کربن به‌وسیله گیاهان، ارتباطی مهم از چرخه بیوشیمیایی کربن در زمین است، بنابراین انتظار می‌رود که فعالیت‌های فتوسنتزی گیاهان، اثرات مهمی بر غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری داشته باشند (Seino & Uchijima, 1992).

در دهه‌های اخیر، نگرانی‌ها در مورد تغییرات اقلیمی موجب شده است که پژوهشگران توجه بیشتری به ارتباط بین چرخه آب، مواد غذایی، پویایی انرژی و چرخه کربن داشته باشند (Sun *et al.*, 2000). در اثر تغییر اقلیم، روابط بین آب، دما و تابش خورشیدی، محدودیت‌هایی را در فعالیت‌های گیاهان جهان ایجاد می‌کند و در نتیجه، موجب تغییرات در روند زمانی *NPP* می‌شود (Nemani *et al.*, 2003). به‌طور کلی، گرم شدن جهانی با بازخورد و پاسخ متقابل خدمات و عملکردهای بوم‌سازگان مانند تغییرات زمانی و مکانی *NPP* همراه است (Davie *et al.*, 2013). اساس عملکرد جنگل‌ها، توانایی آن‌ها برای گرفتن کربن موجود در جو و تولید مواد آلی است. در این راستا، *NPP* نه‌تنها نشان‌دهنده ویژگی‌های زیست‌شناختی و ساختاری بوم‌سازگان‌های جنگلی است، بلکه تأثیر عوامل محیطی بر رشد جنگل را نیز توصیف می‌کند (Field *et al.*, 1998)، بنابراین نظارت و مطالعه روند زمانی تغییرات *NPP* در بهره‌برداری از خدمات بوم‌سازگان‌های طبیعی، اهمیت زیادی دارد، به‌طوری‌که بررسی ارتباط بین پارامترهای هیدرولوژیکی و فرآیندهای اصلی بوم‌سازگان (مانند *NPP*) ضروری است. همچنین، درک روابط بین چرخه آب و کربن، به‌عنوان یکی از نقض‌های پژوهش‌های اقلیمی شناخته شده است (Jackson *et al.*

بابلسر، نوشهر، رامسر، بندرانزلی و آستارا در بازه زمانی شدند (جدول ۱).



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مورد مطالعه در ناحیه رویشی هیرکانی

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

آستارا	بندرانزلی	رامسر	نوشهر	بابلسر	قائم‌شهر	گرگان	
۴۸° ۵۲'	۴۹° ۲۸'	۵۰° ۴۰'	۵۱° ۳۰'	۵۲° ۳۹'	۵۲° ۴۶'	۵۴° ۱۶'	طول جغرافیایی
۳۸° ۲۵'	۳۷° ۲۸'	۳۶° ۵۴'	۳۶° ۳۹'	۳۶° ۴۳'	۳۶° ۲۷'	۳۶° ۵۱'	عرض جغرافیایی
-۱۸	-۲۶/۲	-۲۰	-۲۰/۱	-۲۱	۱۴/۷	۱۳/۳	ارتفاع از سطح دریا (متر)

#### محاسبه *NPP*

رسیده است و نسبت به مدل پایه خود یعنی مدل چیکوگو، توسعه یافته‌تر است. این مدل به خوبی قادر به ارزیابی مقدار واقعی *NPP* در پاسخ به تغییرات اقلیمی است (Gang et al., 2013). مطابق مدل سینتتیک، *NPP* از رابطه (۱) و برحسب تن وزن خشک در هکتار در سال محاسبه می‌شود (Gang et al., 2013):

برآورد مقدار *NPP* سالانه با استفاده از مدل اقلیم‌بنیای سینتتیک انجام شد. اساس این مدل، بر مبنای تبخیر تعرق واقعی (*AET*) است. همچنین، قابلیت آن با استفاده از داده‌های زی‌توده ۱۲۵ جنگل طبیعی و مجموعه ۲۳ داده مربوط به *NPP* جنگل‌ها، علفزارها و بیابان‌ها به اثبات

رابطه (۱)

$$NPP = RDI^2 \frac{MAP(1 + RDI + RDI^2)}{(1 + RDI)(1 + RDI^2)} \times \exp[-(9.87 + 6.25RDI)^{0.5}] \times 100$$

که در آن:  $RDI$  شاخص خشکی تابشی است که به وسیله رابطه (۲) محاسبه می شود.

$$RDI = (0.629 + 0.237PER - 0.00313PER^2)^2 \quad \text{رابطه (۲)}$$

مقدار  $PER$  نیز از رابطه ۳ محاسبه می شود.

$$PER = \frac{PET}{MAP} = \frac{BT \times 58.93}{MAP} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن‌ها:  $MAP$  میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر)،  $PER$  نرخ تبخیرتغرق (بدون واحد)،  $PET$  میانگین سالانه تبخیرتغرق پتانسیل (میلی‌متر، محاسبه شده از روش تورنتوایت)،  $BT$  میانگین دمای بیولوژیک سالانه (سانتیگراد) (بین صفر تا ۳۰ درجه سانتیگراد) در طول دوره رویش گیاهان (میانگین دمای سالانه) است.

تجزیه و تحلیل حساسیت تولید اولیه خالص

حساسیت  $NPP$  محاسبه شده با فرمول سینتیتیک به تغییر پارامتر اقلیمی دما (تا آستانه  $\pm 10$  درصد) و ثابت ماندن پارامترهای اقلیمی دیگر از رابطه ۴ برآورد شد (Mamassis *et al.*, 2014).

$$\Delta NPP = \frac{NPP_T - NPP_0}{NPP_0} \times 100 \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن:  $\Delta NPP$  تفاوت نسبی  $NPP$  (برحسب درصد)،  $NPP_T$  تولید خالص به دست آمده پس از تغییر پارامتر دما و  $NPP_0$  در حقیقت  $NPP$  اولیه (بدون تغییر پارامتر) است. از این فرمول برای تمام درصدهای تغییر پارامتر اقلیمی دما (دو، چهار، شش، هشت و ۱۰ درصد) به صورت مجزا استفاده شد. در نهایت، شیب خط به دست آمده برای هر ایستگاه به عنوان ضریب حساسیت  $NPP$  در مقابل تغییرات دما در نظر گرفته شد. به منظور محاسبه میانگین پارامترهای اقلیمی،  $NPP$  و همچنین تعیین آماره من - کندال، از نرم افزار  $R$  استفاده شد.

تجزیه و تحلیل روند تولید اولیه خالص

روند تغییرات زمانی طولانی مدت پارامترهای اقلیمی دما، بارندگی و نیز  $NPP$  به کمک آزمون پارامتری من - کندال تجزیه و تحلیل شد (Mann, 1945; Kendall, 1975) که برای تشخیص روند سری زمانی های هیدرولوژیکی و اقلیمی استفاده می شود. در آزمون من - کندال، فرض صفر ( $H_0$ ) این است که مشاهدات، فاقد رابطه و روند هستند. به عبارت دیگر، این فرض به معنی اثبات تصادفی بودن روند تغییرات سری های داده (عدم وجود روند در سری زمانی داده های مشاهده ای) است. فرض مقابل ( $H_1$ ) نیز حاکی از آن است که رابطه یکنواختی بین مشاهدات دو متغیر وجود دارد (معنی داری وجود روند در سری زمانی داده های مشاهده ای).

## نتایج

### بررسی شاخص خشکی دومارتن و پارامترهای اقلیمی

نتایج نشان داد که میانگین دمای سالانه ناحیه هیرکانی در دوره زمانی ۱۳۹۶-۱۳۶۵، ۱۶/۶ درجه سانتیگراد است. همچنین، در این بازه زمانی میانگین بارش ۱۱۳۷ میلی‌متر، رطوبت نسبی ۸۱ درصد و سرعت باد ۱/۶ متر بر ثانیه محاسبه شد. طبقه‌بندی اقلیمی براساس شاخص خشکیدگی دومارتن برای هفت ایستگاه مورد مطالعه انجام شد (جدول ۲). شاخص اقلیمی دومارتن نشان داد که در ایستگاه‌های مورد مطالعه، شرایط اقلیمی متفاوتی حاکم است، به طوری که از غرب به شرق، عدد شاخص دومارتن کمتر و در نتیجه اقلیم خشک‌تر می‌شود. حداکثر دمای سالانه (۱۷/۴) درجه سانتیگراد) متعلق به ایستگاه‌های گرگان و بابلسر بود.

همچنین، حداقل دمای سالانه (۱۵/۴) درجه سانتیگراد) در آستارا به‌عنوان غربی‌ترین ایستگاه ثبت شد. بیشترین بارندگی در ایستگاه انزلی (۱۷۲۹ میلی‌متر) و کمترین آن (۵۱۹ میلی‌متر) در ایستگاه گرگان ثبت شد. در واقع، ایستگاه گرگان به‌عنوان شرقی‌ترین ایستگاه مورد مطالعه، بیشترین دما و کمترین بارندگی را داشت. بیشترین و کمترین رطوبت نسبی متعلق به ایستگاه‌های انزلی و گرگان با مقدار متوسط سالانه به ترتیب ۸۴ و ۷۴ درصد بود. بیشترین و کمترین سرعت باد نیز در ایستگاه‌های انزلی و آستارا به ترتیب با مقدار متوسط سالانه ۲/۴ و ۱/۳ متر بر ثانیه ثبت شد. سرعت باد در ایستگاه‌های گرگان، بابلسر و رامسر (۱/۷ متر بر ثانیه) و نیز در ایستگاه‌های قائم‌شهر (قراخیل) و نوشهر (۱/۶ متر بر ثانیه) مشابه بود (جدول ۲).

جدول ۲- متوسط سالانه ( $\pm$  انحراف معیار) پارامترهای اقلیمی در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ میلادی (۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶) در ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

ایستگاه	عدد شاخص خشکی دومارتن*	نوع اقلیم	دما (سانتیگراد)	بارندگی (میلی‌متر)	رطوبت نسبی (درصد)	سرعت باد (متر بر ثانیه)
گرگان	۲۱	مدیترانه‌ای	۱۷/۴ $\pm$ ۰/۶۱	۵۱۹ $\pm$ ۱۰۶	۷۴ $\pm$ ۲/۰۱	۱/۷ $\pm$ ۰/۹۷
قائم‌شهر	۲۷	نیمه‌مرطوب	۱۶/۷ $\pm$ ۰/۶۳	۷۲۲ $\pm$ ۱۳۵	۸۱/۳ $\pm$ ۱/۳۱	۱/۶ $\pm$ ۰/۴۹
بابلسر	۳۳	مرطوب	۱۷/۴ $\pm$ ۰/۶۲	۹۱۶ $\pm$ ۱۹۱	۸۰/۷ $\pm$ ۲/۰۳	۱/۷ $\pm$ ۰/۴۹
نوشهر	۴۹	خیلی مرطوب نوع الف	۱۶/۴ $\pm$ ۰/۶۱	۱۳۰۹ $\pm$ ۲۱۵	۸۲/۵ $\pm$ ۱/۵۲	۱/۶ $\pm$ ۰/۵۸
رامسر	۴۷	خیلی مرطوب نوع الف	۱۶/۵ $\pm$ ۰/۷	۱۲۲۸ $\pm$ ۳۲۳	۸۲/۱ $\pm$ ۳/۳	۱/۷ $\pm$ ۰/۵۴
بندر انزلی	۶۷	خیلی مرطوب نوع ب	۱۶/۶ $\pm$ ۰/۷	۱۷۲۹ $\pm$ ۳۲۰	۸۴ $\pm$ ۲/۳۷	۲/۴ $\pm$ ۰/۷
آستارا	۵۳	خیلی مرطوب نوع الف	۱۵/۴ $\pm$ ۰/۶۷	۱۳۵۶ $\pm$ ۲۱۸	۸۱ $\pm$ ۱/۷۳	۱/۳ $\pm$ ۰/۲۴

\* شاخص دومارتن براساس رابطه  $P/(T+10)$  محاسبه شد. P بارش سالانه (میلی‌متر) و T میانگین دمای هوای سالانه برحسب سانتیگراد است.

باد در ایستگاه‌های گرگان، انزلی و آستارا به‌صورت افزایشی و معنی‌دار بود، اما در ایستگاه‌های دیگر، روند معنی‌داری نداشت. روند تغییرات درصد رطوبت نسبی نیز در تمام ایستگاه‌ها به‌جز گرگان و قائم‌شهر به‌صورت کاهش و معنی‌دار بود (جدول ۳).

تجزیه و تحلیل روند سالانه دما، بارندگی، سرعت باد و رطوبت نسبی در ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه با استفاده از آزمون من-کندال نشان داد که روند افزایشی دمای سالانه در تمام ایستگاه‌ها معنی‌دار بود (جدول ۳)، در حالی که معنی‌داری برای روند بارندگی سالانه در هیچ‌یک از ایستگاه‌ها مشاهده نشد. همچنین، روند تغییرات سرعت

جدول ۳- مقادیر آماره من- کندال ( $Z_M$ ) برای سری‌های زمانی دما، بارندگی، سرعت باد و رطوبت نسبی در ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در مقیاس سالانه در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ (۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶)

گرگان	قائم‌شهر	بابلسر	نوشهر	رامسر	بندر انزلی	آستارا
۲/۴۴*	۴/۰۴*	۴/۱۱*	۳/۳۳*	۴/۵۵*	۴/۳۱*	۳/۹۷*
-۱/۱۲	-۱/۱۵	-۰/۷۴	۰	۰/۳۳	۰/۶۷	۰/۵۴
۶/۱*	۱/۸	۱/۶	۰/۶۷	۱/۳	۵/۲*	۳/۱*
۱	۰/۶۷	-۴/۳*	-۴*	-۳/۲*	-۲/۶*	-۲/۹*

\* معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد

میانگین سالانه و روند زمانی تولید اولیه خالص در ناحیه رویشی هیرکانی

مقدار  $NPP$  در طول دوره مورد مطالعه به‌طور میانگین  $۱۰/۶$  تن در هکتار در سال (انحراف معیار  $\pm ۱/۹۱$ ) برآورد شد. بیشترین و کمترین مقدار  $NPP$  به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های انزلی و گرگان به ترتیب با مقدار  $۱۳/۴۲$  (انحراف معیار  $\pm ۱/۳۸$ ) و  $۷/۶$  (انحراف معیار

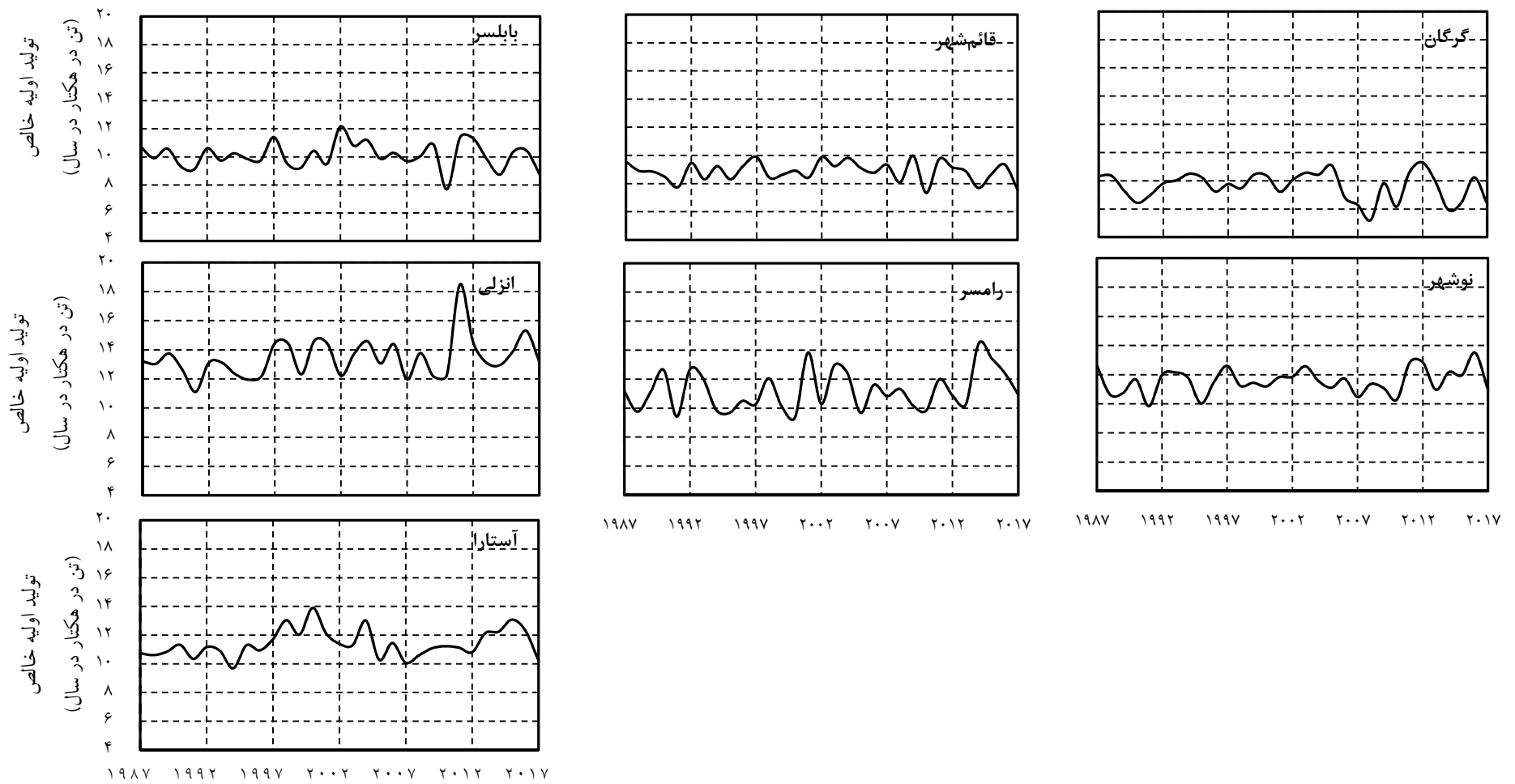
$\pm ۱$ ) تن در هکتار در سال برآورد شد (جدول ۴). همچنین،  $NPP$  در ایستگاه‌های رامسر و آستارا به تقریب یکسان برآورد شد (به ترتیب  $۱۱/۲۱$  و  $۱۱/۳۸$  تن در هکتار در سال). به‌طور کلی، مقدار  $NPP$  از شرق ناحیه هیرکانی به سمت غرب آن افزایش یافت. این افزایش تا ایستگاه انزلی ادامه داشت و پس از آن کاهش نشان داد (جدول ۴ و شکل ۲).

جدول ۴- میانگین تولید اولیه خالص ( $NPP$ ) ( $\pm$  انحراف معیار) در ایستگاه‌های مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ (۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶)

گرگان	قائم‌شهر	بابلسر	نوشهر	رامسر	بندر انزلی	آستارا
$۷/۶۰ \pm ۱$	$۸/۸۷ \pm ۰/۷۱$	$۱۰/۱۰ \pm ۰/۹۳$	$۱۱/۵۶ \pm ۰/۸۷$	$۱۱/۲۱ \pm ۱/۳۸$	$۱۳/۴۲ \pm ۱/۳۸$	$۱۱/۳۸ \pm ۰/۹۸$

$NPP$

(تن در هکتار در سال)



شکل ۲- روند تغییرات طولانی مدت تولید اولیه خالص (NPP) در ایستگاه‌های مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ میلادی (۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶)

بررسی معنی‌داری روندهای سالانه *NPP* ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از آزمون من-کندال نشان داد که در هیچ‌یک از ایستگاه‌ها، روند تغییرات *NPP* در طی ۳۱ سال اخیر معنی‌دار نبود (جدول ۵).

جدول ۵- مقادیر آماره من-کندال ( $Z_M$ ) برای سری زمانی تولید اولیه خالص (*NPP*) در ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در مقیاس سالانه در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ میلادی (۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶)

نوشهر	رامسر	آستارا	بندر انزلی	بابلسر	قائم‌شهر	گرگان	<i>NPP</i>
۰/۵۴	۱/۰۸	۱/۴۹	۱/۳۲	-۰/۰۳	-۰/۳۳	-۰/۶۴	

حساسیت تولید اولیه خالص در پاسخ به تغییرات دما نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت *NPP* نسبت به پارامتر اقلیمی دما نشان داد که بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، بیشترین و کمترین حساسیت *NPP* به تغییرات دما به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های بابلسر (۰/۵۵) و گرگان (۰/۳۹) بود. به‌طور کلی، حساسیت *NPP* نسبت به دما در ناحیه ریشی هیرکانی حدود ۰/۵ بود (جدول ۶).

جدول ۶- ضریب حساسیت تولید اولیه خالص (*NPP*) در پاسخ به تغییرات اقلیمی دما (تا آستانه  $\pm 10\%$  درصد) در ناحیه ریشی هیرکانی در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ میلادی (۱۳۶۵ تا ۱۳۸۶)

آستارا	بندر انزلی	رامسر	نوشهر	بابلسر	قائم‌شهر	گرگان	درصد تغییرات
۰/۴۸	۰/۴۴	۰/۵۱	۰/۵	۰/۵۵	۰/۵۳	۰/۳۹	

## بحث

درجه سانتیگراد) و کمترین بارندگی سالانه (۵۸۲ میلی‌متر) متعلق به گرگان بود، در حالی که کمترین میانگین دمای سالانه (۱۶/۳ درجه سانتیگراد) و بیشترین بارندگی (۱۷۶۳ میلی‌متر) در انزلی ثبت شد. آن‌ها همچنین نشان دادند که از شرق به غرب ناحیه هیرکانی به سرعت باد افزوده می‌شود، به طوری که بیشترین و کمترین میانگین سرعت باد اندازه‌گیری شده به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های انزلی و گرگان بود. نتایج پژوهش پیش‌رو نیز تا ایستگاه انزلی این موضوع را تأیید کرد، اما با حرکت به سمت آستارا (غربی‌ترین ایستگاه مورد مطالعه) سرعت باد به شدت کاهش نشان داد.

در پژوهش پیش‌رو مشخص شد که روند پارامتر اقلیمی دمای هوا در تمام ایستگاه‌ها افزایشی بود، در حالی که بارش روند مشخصی نداشت. عدم وجود روند معنی‌دار در مقدار

نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که از شرق به غرب ناحیه هیرکانی از دما کاسته می‌شود، اما بارندگی، رطوبت نسبی و سرعت باد تا ایستگاه انزلی افزایش و پس از آن دوباره کاهش می‌یابد. Jahanbakhsh و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که در یک دوره آماری ۲۰ ساله (۱۳۶۷ تا ۱۳۸۶) در چهار ایستگاه سینوپتیک منطقه هیرکانی (قراخیل قائم‌شهر، بابلسر، نوشهر و رامسر)، مقدار متغیرهای اقلیمی تغییر کرد، به طوری که میانگین دمای سالانه از غرب به شرق ناحیه افزایش یافت، اما مقدار بارندگی و رطوبت نسبی کاهش نشان داد. Attarod و همکاران (۲۰۱۷) نیز با بررسی پارامترهای اقلیمی در ناحیه هیرکانی طی دوره زمانی ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۸ در ایستگاه‌های گرگان، قائم‌شهر، بابلسر، رامسر و انزلی نشان دادند که بیشترین میانگین دمای سالانه (۱۷/۸



است. برای مثال، Gang و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از مدل سینتتیک، تغییرات مکانی و زمانی *NPP* را تحت تأثیر تغییر اقلیم در سال‌های ۱۹۱۱ تا ۲۰۰۰ در مقیاس جهانی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که *NPP* جهانی همبستگی قوی‌تری با متوسط بارش سالانه در مقایسه با میانگین سالانه دما دارد، بنابراین بارش، مهم‌ترین عامل برای تولید پوشش گیاهی معرفی شد. Zhang و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی مقدار *NPP* با استفاده از مدل سینتتیک در ناحیه‌ای از مغولستان بین سال‌های ۱۹۵۶ تا ۲۰۰۶ گزارش کردند که کاهش بارش و افزایش دما در این سال‌ها، مقدار *NPP* بوم‌سازگان را کاهش داده بود. تغییرات *NPP* در طول دوره مطالعه در پژوهش پیش‌رو، روند افزایشی یا کاهشی چشمگیری را در هیچ‌کدام از ایستگاه‌ها نشان نداد. در واقع، با وجود روند افزایشی تغییرات دما در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه، روند *NPP* در هیچ‌کدام از ایستگاه‌ها معنی‌دار نبود. این موضوع نشان می‌دهد که در ناحیه رویشی هیرکانی، تغییرات بارندگی نسبت به تغییرات دما، تأثیر بیشتری بر روند تغییرات *NPP* دارند. همسو با یافته‌های پژوهش پیش‌رو، Piao و همکارانش (۲۰۱۴) گزارش کردند که به دلیل افزایش خشک‌سالی، همبستگی بین *NPP* و دمای زمین در مناطق معتدل طی دهه گذشته کاهش یافته است. از سوی دیگر، Kang و همکاران (۲۰۰۶)، اثرات تغییرات اقلیم را بر مقدار *NPP* در بخش‌هایی از جنگل‌های بوره‌آل کانادا محاسبه کردند. آن‌ها نشان دادند که تحت تأثیر تغییر اقلیم، *NPP* افزایش پیدا کرده است. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که تغییرات مقدار *NPP* در این مناطق، حساسیت بیشتری به پارامتر اقلیمی دما (در مقایسه با بارش) دارد. در عرض‌های جغرافیایی زیاد، دما عامل مهم‌تر و تأثیرگذارتری بر *NPP* است. در پژوهش Gang و همکاران (۲۰۱۳) نیز مشخص شد که تغییرات جهانی *NPP*، همبستگی قوی‌تری با متوسط بارش سالانه در مقایسه با میانگین سالانه دما دارد.

نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت *NPP* نشان داد که بیشترین و کمترین حساسیت *NPP* به تغییرات دما، به ترتیب

بارش ناحیه هیرکانی توسط پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است. Hadiani (۲۰۱۵) با مطالعه روند تغییرات پارامترهای اقلیمی دما و بارش تحت تأثیر تغییر اقلیم در سال‌های ۱۹۷۸ تا ۲۰۰۷ در ایستگاه‌های ناحیه خزری (رامسر، نوشهر، بابلسر، قراخیل و ساری) نشان داد که بارش فاقد روند مشخص است، در صورتی‌که دماهای کمینه، بیشینه و متوسط، روند افزایشی معنی‌داری را در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان دادند. Attarod و همکاران (۲۰۱۷) نیز روند دما در ایستگاه‌های بابلسر، گرگان، قائم‌شهر و رامسر را به صورت افزایشی و معنی‌دار گزارش کردند، در حالی‌که روند تغییرات بارندگی معنی‌دار نبود. روند تغییرات شاخص خشکی دومارتن در ناحیه هیرکانی نشان داد که این شاخص در بیشتر ایستگاه‌ها، روندی کاهشی داشت. ادامه این روند می‌تواند تغییر طبقه شاخص دومارتن در ناحیه هیرکانی را به سمت طبقه خشک و گرم‌تر به دنبال داشته باشد.

پژوهش‌ها نشان می‌دهند که گرچه مدل سینتتیک، بیشتر در مورد اثرات آب و گرما بر اکوفیزیولوژی گیاهی متمرکز شده است و تأثیر غلظت دی‌اکسید کربن، مواد مغذی خاک و تعاملات بین پوشش‌های گیاهی و سیستم‌های اقلیمی بر *NPP* را در نظر نمی‌گیرد، اما مقایسه داده‌های برآوردی و اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که این مدل قادر به برآورد *NPP* و تغییرات آن در پاسخ به تغییرات طولانی‌مدت آب‌وهوایی است (Gang et al., 2013). در واقع، مرور منابع نشان می‌دهد که نتایج مدل سینتتیک بسیار نزدیک به داده‌های واقعی با ضریب همبستگی تا ۰/۸۵ است (Gang et al., 2013). نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که مقدار *NPP* از شرق به غرب ناحیه هیرکانی (تا ایستگاه انزلی) در حال افزایش بود. سپس، در آستارا به‌طور چشمگیری کاهش یافت.

در پژوهش پیش‌رو، بیشینه (۱۳/۴۲) تن در هکتار در سال) و کمینه (۷/۶) تن در هکتار در سال) *NPP* در ایستگاه‌های انزلی و گرگان با بیشترین و کمترین بارندگی در ناحیه هیرکانی متقارن شد که مطابق با پژوهش‌های پیشین

### سیاسگزاری

منابع مالی مقاله فوق از محل طرح بین‌المللی شماره ۹۶۰۰۱۶۳۳ صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) تأمین شده است.

### منابع مورد استفاده

- Anderson, R.G. and Goulden, M.L., 2011. Relationships between climate, vegetation, and energy exchange across a montane gradient. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G1): 16p.
- Attarod, P., Kheirkhah, F., Khalighi Sigaroodi, S., Sadeghi, S.M.M., Dolatshahi, A. and Bayramzadeh, V., 2017. Trend analysis of meteorological parameters and reference evapotranspiration in the Caspian region. *Iranian Journal of Forest*, 9(2): 171-185 (In Persian).
- Bonan, G.B., Levis, S., Sitch, S., Vertenstein, M. and Oleson, K.W., 2003. A dynamic global vegetation model for use with climate models: concepts and description of simulated vegetation dynamics. *Global Change Biology*, 9(11): 1543-1566.
- Davie, J.C.S., Falloon, P.D., Kahana, R., Dankers, R., Betts, R., Portmann, F.T., ... and Arnell, N., 2013. Comparing projections of future changes in runoff from hydrological and biome models in ISI-MIP. *Earth System Dynamics*, 4(2): 359-374.
- Euskirchen, E.S., McGuire, A.D., Chapin III, F.S., Yi, S. and Thompson, C.C., 2009. Changes in vegetation in northern Alaska under scenarios of climate change, 2003–2100: implications for climate feedbacks. *Ecological Applications*, 19(4): 1022-1043.
- Field, C.B., Behrenfeld, M.J., Randerson, J.T. and Falkowski, P., 1998. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281(5374): 237-240.
- Gang, C., Zhou, W., Li, J., Chen, Y., Mu, S., Ren, J., Chen, J. and Groisman, P.Y., 2013. Assessing the spatiotemporal variation in distribution, extent and NPP of terrestrial ecosystems in response to climate change from 1911 to 2000. *PloS One*, 8(11): e80394.
- Hadiani, M.O., 2015. Uncertainty of climate change and synoptic Parameters and modeling the trends. *Environmental Resources Research*, 3(2): 179-190 (In Persian).
- He, Y.H., Tian, Y.L., Ye, D.M., Qin, J.Q. and Guo, L.S., 2005. Model of aboveground biomass of *Nitraria tangutorum* and relationship between

مربوط به ایستگاه‌های بابلسر (۰/۵۵) و گرگان (۰/۳۹) است. در واقع، در صورت افزایش میانگین دمای سالانه به مقدار ۱۰ درصد (معادل ۱/۸ و ۱/۷ درجه سانتیگراد به ترتیب در بابلسر و گرگان)، مقدار تغییرات *NPP* در بابلسر ۵/۵ درصد (۰/۵۵ تن در هکتار در سال) و در گرگان در حدود چهار درصد (۰/۳ تن در هکتار در سال) خواهد بود. به‌طور کلی، ضریب ۰/۵ برای حساسیت *NPP* نسبت به دما در ناحیه هیرکانی نشان داد که افزایش دما به مقدار تقریبی ۰/۶ درجه سانتیگراد یا در حدود چهار درصد (مانند آنچه در دهه اخیر در این ناحیه رخ داده است) می‌تواند *NPP* سالانه را در حدود دو درصد یا ۰/۲ تن در هکتار در سال افزایش دهد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که در اثر تغییر اقلیم و افزایش  $CO_2$ ، ممکن است *NPP* در ابتدا افزایش یابد، اما در طولانی‌مدت به دلیل محدودیت آب و یا مواد مغذی کاهش پیدا می‌کند، بنابراین پدیده تغییر اقلیم از مهم‌ترین چالش‌ها در توسعه پایدار است که تأثیرات منفی چشمگیری بر بوم‌سازگان‌های زمینی خواهد داشت. به‌طور کلی، انعطاف‌پذیری بوم‌سازگان‌ها به این تغییرات جاری و پیش‌بینی‌شده اقلیمی، نگرانی بزرگی است. زیرا حیات انسان‌ها متکی بر بسیاری از خدمات بوم‌سازگان‌های سالم است (Peters *et al.*, 2013).

هم‌اکنون تغییر اقلیم یکی از معضله‌های بزرگ محیط‌زیست است که با توجه به تأثیر آن بر زندگی بشر، تلاش به‌منظور شناخت هرچه بیشتر چگونگی وقوع تغییر اقلیم و عواقب آن ضروری است. این ضرورت به‌ویژه در حال حاضر که بحث خشک‌دگی و زوال جنگل‌ها در سطح منطقه‌ای و گرم شدن هوا در سطح جهانی به یک مسئله جدی تبدیل شده، آشکار می‌شود. از آنجایی که توزیع و پراکنش گونه‌های گیاهی به‌شدت به تغییرات متوسط دمای هوا وابسته است، بنابراین افزایش دمای بوم‌سازگان‌ها، کاهش بارندگی و تغییر در پارامترهای اقلیمی دیگر باعث تغییراتی در ترکیب جوامع گیاهی و نیز پراکنش آن‌ها می‌شود.

- Peters, G.P., Andrew, R.M., Boden, T., Canadell, J.G., Ciais, P., Le Quéré, C., Marland, G., Raupach, M.R. and Wilson, C., 2013. The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nature Climate Change*, 3(1): 4-6.
- Phillips, O.L., Aragão, L.E., Lewis, S.L., Fisher, J.B., Lloyd, J., López-González, G., ... and Torres-Lezama, A., 2009. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 323(5919): 1344-1347.
- Piao, S., Nan, H., Huntingford, C., Ciais, P., Friedlingstein, P., Sitch, S. and Chen, A., 2014. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity. *Nature Communications*, 5: 5018.
- Ren, Z.C., Zhu, H.Z., Li, R. and Liu, X., 2010. Variation in vegetation net primary productivity and its response to climate in Buryatiya Republic, Russia. *Resources Science*, 32(10): 2018-2027.
- Seino, H. and Uchijima, Z., 1992. Global distribution of net primary productivity of terrestrial vegetation. *Journal of Agricultural Meteorology*, 48(1): 39-48.
- Sun, G., Riekerk, H. and Kornhak, L.V., 2000. Ground-water-table rise after forest harvesting on cypress-pine flatwoods in Florida. *Wetlands*, 20(1): 101-112.
- Wang, X., Li, F., Gao, R., Luo, Y. and Liu, T., 2014. Predicted NPP spatiotemporal variations in a semiarid steppe watershed for historical and trending climates. *Journal of Arid Environments*, 104: 67-79.
- Zhang, G., Kang, Y., Han, G. and Sakurai, K., 2011. Effect of climate change over the past half century on the distribution, extent and NPP of ecosystems of Inner Mongolia. *Global Change Biology*, 17(1): 377-389.
- Zhou, G., Wang, Y., Jiang, Y. and Yang, Z., 2002. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: a case study of China's Larix forests. *Forest Ecology and Management*, 169(1-2): 149-157.
- biomass and leaf area. *Journal of Desert Research*, 25(4): 541-546.
- Jackson, R.B., Jobbágy, E.G., Avissar, R., Roy, S.B., Barrett, D.J., Cook, C.W., Farley, K.A., le Maitre, D.C., McCarl, B.A. and Murray, B.C., 2005. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science*, 310(5756): 1944-1947.
- Jahanbakhsh, S., Hadiani, M.O., Rezaie Banafsheh, M. and Dinpajouh, Y., 2010. Modeling the climate change's parameters in Mazandaran province. 4th International Congress of the Islamic Worlds Geographers. Zahedan, Iran, 14-16 Apr. 2010: 13p (In Persian).
- Jiang, H., Apps, M.J., Zhang, Y., Peng, C. and Woodard, P.M., 1999. Modelling the spatial pattern of net primary productivity in Chinese forests. *Ecological Modelling*, 122(3): 275-288.
- Kang, S., Lee, D., Lee, J. and Running, S.W., 2006. Topographic and climatic controls on soil environments and net primary production in a rugged temperate hardwood forest in Korea. *Ecological Research*, 21(1): 64-74.
- Kendall, M.G., 1975. *Rank Correlation Methods*. 4th Edition, Griffin, London, 202p
- Mamassis, N., Panagoulia, D. and Novkovic, A., 2014. Sensitivity analysis of Penman evaporation method. *Global NEST Journal*, 16(4): 628-639.
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 13(3): 245-259.
- Melillo, J.M., Prentice, I.C., Farquhar, G.D., Schulze, E.D. and Sala, O.E., 1996. Terrestrial biotic responses to environmental change and feedbacks to climate: 445-482. In: Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. and Maskell, K. (Eds.). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 557p.
- Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W.M., Piper, S.C., Tucker, C.J., Myneni, R.B. and Running, S.W., 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300(5625): 1560-1563.

## Sensitivity of net primary production to climate change in the Hyrcanian region

P. Abbasian<sup>1</sup>, P. Attarod<sup>2\*</sup>, Sh. Khalighi Sigaroodi<sup>3</sup>, J. Bazrafshan<sup>4</sup>, J.T. Van Stan<sup>5</sup>

1- Ph.D. Student, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2\*- Corresponding author, Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: attarod@ut.ac.ir

3- Associate Prof., Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4- Associate Prof., Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran

5- Associate Prof., Department of Geology and Geography, Georgia Southern University, USA

Received: 28.02.2019

Accepted: 14.05.2019

### Abstract

Net primary production (*NPP*) is an important indicator of ecosystem production potential, which is heavily affected by climate change. The purpose of this study was to investigate the effect of climate change on-trend and sensitivity of *NPP* in the Hyrcanian region of northern Iran using long-term (31 years, 1987-2017) meteorological data recorded in Gorgan, Ghaemshahr, Babolsar, Nowshahr, Ramsar, Bandar Anzali, and Astara synoptic stations. The synthetic climate-based model was used to estimate *NPP* and Mann-Kendal test was employed to test the trends of *NPP* and other meteorological parameters. We observed that the trends of annual temperature were statistically significant in all stations, whereas the annual precipitation trends were not statistically significant. The average annual *NPP* in the Hyrcanian region was found to be 10.6 t. ha<sup>-1</sup> per year on average (SD: ±1.91), in which the maximum and minimum *NPP*s were corresponded to Bandar Anzali (13.42 t. ha<sup>-1</sup> per year; SD: ±1.38) and Gorgan (7.6 t. ha<sup>-1</sup> per year; SD: ±1) stations, respectively. The amount of *NPP* showed an increasing trend from the eastern to the western Hyrcanian region up to Bandar Anzali. Furthermore, the sensitivity of the *NPP* coefficient was estimated at 0.5 throughout the Hyrcanian region in response to changing temperature. This indicated that a 0.6 °C increase in temperature could approximately increase annual *NPP* by 0.2 t. ha<sup>-1</sup> per year. Conclusively, understanding the temporal change of *NPP* in response to changing climate is necessary for the utilization of ecosystem services and benefits.

**Keywords:** Climate-based model, ecosystem, sensitivity coefficient.