

روند تغییرات فتوسنتز در زیست کره خشکی با استفاده از داده‌های سری زمانی MODIS-GPP در دوره‌ی ۲۰۱۵-۲۰۰۰

سارا ابدالی^۱، محسن قمری اصل^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد سنجش از دور - گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب
sara.abdali90@gmail.com

^۲ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب
m.ghamary@gmail.com

(تاریخ دریافت بهمن ۱۳۹۸، تاریخ تصویب آبان ۱۳۹۹)

چکیده

با استفاده از مشاهدات ماهواره ای مانند NDVI، fPAR و GPP می‌توان تغییرات روند فتوسنتز در اکوسیستم را بررسی نمود. با این حال برآورد روندها با داده‌های سری‌های زمانی نامبرده می‌تواند اختلافاتی داشته باشد که به علت وابستگی به آنالیزهای به کار رفته در هر مجموعه داده، قدرت تفکیک مکانی و روش‌های آماری به کار رفته در محاسبه روند می‌باشد. داده به کار رفته در این مقاله مربوط به تولید ناخالص اولیه MODIS و داده‌های هواشناسی از مرجع CRU می‌باشد. مدل به کار رفته در برآورد داده MODIS GPP کارایی مصرف نور است. در این مقاله از مجموعه داده GPP، داده‌های دما و بارش برای برآورد روند فتوسنتز با قدرت تفکیک مکانی نیم درجه زیست کره خشکی در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ استفاده شده است. هدف نهایی این مقاله دستیابی به روند تولید ناخالص اولیه زیست کره خشکی با استفاده از آزمون معنی‌داری من-کندال در سطح اطمینان ۹۰ درصد و شناسایی عوامل کلیدی و فاکتورهای تاثیرگذار بر فتوسنتز است. سپس توزیع مکانی همبستگی خطی میان GPP و عوامل اقلیمی مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج به دست آمده علی‌رغم نوسانات موجود در مقادیر GPP، روند اصلی حاکم بر زیست کره خشکی در اغلب سلول‌های آن، به صورت عاری از روندهای مثبت و منفی بوده است. با این حال در مناطق جنوبی آفریقا، مناطق استوایی آسیا و آمریکا شاهد روندهای مثبت در میزان فتوسنتز هستیم. الگوهای مکانی مرتبط با تاثیر عوامل اقلیمی با فتوسنتز با مطالعات پیشین همخوانی دارد. نتایج نشان می‌دهد که در عرض‌های جغرافیایی بالا، اصلی‌ترین عامل تاثیرگذار بر مقادیر GPP دما بوده و همبستگی قوی‌تری میان GPP با دما نسبت به بارش مشاهده گردید.

واژگان کلیدی: تولید ناخالص اولیه، روند مکانی-زمانی، فتوسنتز، زیست کره خشکی، MODIS-GPP

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

پوشش گیاهی از متغیرهای بسیار مهم زیست کره خشکی زمین است و تاثیر اساسی در تنظیم سیستم اقلیم دارد [۱]. به طور کلی شناخت چگونگی روند تغییرات اقلیمی و به ویژه روند تغییرات مقادیر فتوسنتز پوشش های گیاهی و پایش فنولوژی گیاهی در سطوح مختلف مکانی، از جمله مواردی است که در سال های اخیر مورد توجه محققان قرار داشته است [۲،۳]. تجزیه و تحلیل تغییرات زمانی و مکانی وضعیت پوشش گیاهی زیست کره خشکی در دوره های ماهیانه، فصلی و سالیانه با استفاده از داده های سنجنش از دوری امکان تعیین روند تغییرات را فراهم ساخته است [۴،۵].

اندازه گیری طیفی از خصوصیات مختلف پوشش گیاهی از جمله زیست توده با استفاده از سنجنش از دور موفقیت آمیز بوده است [۶]. سنجنش از دور قادر به فراهم کردن داده های مکانی و زمانی از پوشش گیاهی، زیست توده و شاخص سطح برگ می باشد [۷]. در سنجنش- از دور برای اندازه گیری خصوصیات مراتع شامل پوشش گیاهی و تولیدات مراتع از شاخص هایی موسوم به شاخص های گیاهی استفاده می شود. شاخص های گیاهی متعددی برای بالا بردن حساسیت به رفتار طبیعی گیاهان سبز و کاهش اثرات خاک و اتمسفر ارائه شده است. شاخص گیاهی ایده آل بایستی به میزان بالایی به پارامترهای بیوفیزیکی حساس باشد [۸]. با ثبت رفلکتانس پوشش های گیاهی توسط سنجنده این شاخص های گیاهی به صورت کمی محاسبه می شوند.

تولید ناخالص اولیه^۱ (GPP) یکی از مهم ترین متغیرهای بیوفیزیکی گیاهان است [۹] و به طور کلی میزان تثبیت کربن از طریق فتوسنتز گیاهی را نشان داده و با شاخص سطح برگ همبستگی مثبتی دارد زیرا شاخص سطح برگ، کنترل کننده میزان جذب تشعشع خورشیدی و تبدیل آن به فتوسنتز می باشد [۱۰،۱۱]. برآورد دقیق کمی توزیع زمانی و مکانی تولید ناخالص اولیه برای پایش پوشش های گیاهی و کربن تبادلی میان زیست کره خشکی و اتمسفر، حیاتی است [۱۲].

روش های اندازه گیری مقادیر GPP به سه دسته اصلی روش های زمینی در مقیاس های محلی، روش های مدلسازی و روش های سنجنش از دور تقسیم می شوند. مهم ترین روش محلی اندازه گیری و برآورد شاخص تولید ناخالص اولیه، استفاده از داده های برج های با تکنیک کوریانس eddy می باشد. این تکنیک یک روش دقیق برای اندازه گیری جریانات سطح به اتمسفر است. تکنیک کوریانس eddy یک داده یکتا به عنوان منبع اندازه گیری GPP با رزولوشن بالای زمانی (کمتر از یک ساعت) در یک منطقه کوچک (یک کیلومتر مربع) می باشد. در حال حاضر حدود ۵۰۰ ایستگاه در کل دنیا وجود دارد. اندازه گیری های جریان eddy برای دستیابی به جریانات کربن زمینی (مانند GPP) در مقیاس محلی مفیدند [۱۳].

اندازه گیری های مستقیم GPP به کمک تکنیک های کوریانس eddy در مقیاس های محلی و با رزولوشن زمانی بالا رویکردهای مناسبی برای پایش آن است. با این حال دارای معایبی هستند که عبارتند از: عدم پوشش کافی (مناطق زیادی در جهان وجود دارد به خصوص مناطق گرمسیری که در آن ها امکان به دست آوردن این اندازه گیری ها ممکن نیست)، و پایین بودن دقت اندازه گیری ها برای تعمیم آن ها در مقیاسی بزرگ تر. بنابراین مشکلاتی در روش up-scaling در این مناطق و در بازه های زمانی در حد دهه وجود دارد که قابلیت این روش ها را دچار ابهام می کند. لذا رویکردهای مدل سازی عددی برای اندازه گیری و تعیین توزیع جغرافیایی اصلی GPP در مقیاس های محلی و جهانی توسعه داده شده اند. از نقطه نظر روش های مدل سازی، مدل های زیست کره ابزارهایی سودمند برای تشریح فرایندهای درگیر در جذب کربن در سیستم زمینی هستند و به صورت تئوری، قابلیت پیش بینی وضعیت تبادلات در آینده را فراهم می کنند. بنابراین برای برآورد جاذب های تخمینی کربن دی اکسید در مقیاس های محلی و قاره ای نیازمند ادغام با داده های اقلیمی به همراه اندازه گیری های زمینی و آزمایش های زمینی هستند. با این حال اعتبار این مدل ها در مقیاس جهانی دشوار است [۱۴].

در حال حاضر پیشرفت های زیادی در اندازه گیری و درک الگوهای زمانی و مکانی تولید ناخالص اولیه با استفاده از مشاهدات سنجنش از دوری رخ داده است. اگرچه برآوردهای جهانی برای GPP موجود است، اما در هر

^۱ Gross Primary Production

مجموعه داده، مقادیر آن وابسته به فرضیات و اطلاعات موجود در دسترس براساس مشاهدات می‌باشد. در نتیجه در خصوص GPP توافق جهانی روی داده‌های موجود وجود ندارد و عدم قطعیت‌های بزرگی در سنجش آن‌ها وجود دارد. مقایسه‌ی برآوردهای GPP در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰، نشان می‌دهد که در میانگین برآوردهای جهانی GPP اختلافات زیادی وجود دارد. مجموعه داده-های مختلف عموماً در چرخه فصلی GPP به شکل مرحله-ای یکسانند در حالیکه در مقادیر دامنه‌های آن‌ها اختلافاتی وجود دارد. فرایندهای فتوسنتز برگ و GPP متاثر از تغییرات آب و هوایی (نور، بارندگی، دما و رطوبت) و قابلیت‌های مواد مغذی موجود در آن‌ها می‌باشد، در حالیکه توزیع مکانی به واسطه شرایط آب و هوایی تعیین می‌شود [۱۵].

مدل‌های مختلف GPP بر مبنای سنجش‌ازدور ارائه شده که به صورت کلی می‌توان آن‌ها را در دو کلاس طبقه بندی نمود. یکی از انواع اصلی روش‌های برآورد GPP بر مبنای سنجش‌از دور، مدل‌های الگوریتم کارایی مصرف نور^۱ (LUE) است که توسط Monteith در سال ۱۹۷۷ ارائه گردید [۱۶]. این روش یکی از روش‌های متداول برآورد تولید ناخالص اولیه یا GPP مبتنی بر داده‌های سنجش‌از دور می‌باشد. حالت دیگر انواع مدل‌هایی هستند که از شاخص سطح برگ^۲ (LAI) در مدل فتوسنتز فتوسنتز بهره می‌گیرند. بنابراین مدل‌های مختلف، با متغیرهای مختلف و اطلاعات محیطی تأثیرگذار، برآوردهای مختلفی از GPP را ارائه می‌دهد و یا به طور کلی منجر به رفتارهای مختلف مدل‌ها خواهد شد. اختلافات در نتایج مدل‌ها تنها به علت اختلافات در معادلات معمولاً به عنوان عدم قطعیت ساختاری مطرح می‌شود [۱۷].

از مهمترین دلایل وجود اختلاف میان نتایج سری‌های زمانی این شاخص، اختلاف در داده‌های اقلیمی و محصولات پوشش سطح زمین به کار برده شده برای شبیه‌سازی می‌باشد. در دهه گذشته چندین مجموعه داده پوشش سطح زمین در مقیاس جهانی از مشاهدات ماهواره‌ای تهیه شده است که اطلاعات ارزشمندی بوده اما

اختلافاتی هم میان آن‌ها وجود دارد. این مجموعه داده‌ها اطلاعات ارزشمندی از وضعیت فعلی سطح کره زمین را ارائه می‌دهند. همان‌طور که ذکر شد این مجموعه داده‌ها اختلافاتی با همدیگر دارند و این اختلافات ناشی از طبقه‌بندی، کاربردهای خاص مانند پارامتر شده برای استفاده در مدل‌های چرخه کربن و ... می‌باشد، بنابراین چالش‌ها و عدم قطعیت‌هایی در آن‌ها وجود دارد. داده‌های اقلیمی نیز یکی از ورودی‌های مهم برای توسعه مدل‌های شبیه‌سازی می‌باشد. عدم قطعیتی که متغیرهای اقلیمی در نتایج این مدل‌ها وارد می‌کنند، حدود ۲۰٪ می‌باشد [۱۹، ۱۸].

سرعت تغییرات در برخی پدیده‌های طبیعی کند است و بررسی آن‌ها باید در دامنه زمانی طولانی مدت انجام شود. یکی از روش‌هایی که می‌توان به کمک آن سیر تحولات GPP را در گذشته و حال بررسی نمود، آنالیز روند سری‌های زمانی در مقیاس‌های مختلف زمانی است. تاکنون روش‌های آماری متعددی جهت تحلیل روند سری‌های زمانی ارائه شده است که در این مقاله از روش ناپارامتریک من-کندال استفاده شده است. تغییرات تدریجی درازمدت GPP زیست کره خشکی ناشی از تغییرات اقلیمی است که منجر به ایجاد روندهای کندی در درازمدت می‌شود. در کنار بررسی روندهای درازمدت همبستگی این شاخص بیوفیزیکی با پارامترهای اقلیمی روند تغییرات فصلی را نمایش می‌دهد [۲۰].

جانگ و همکاران (۲۰۰۹ و ۲۰۱۱) با استفاده از مجموعه داده‌های برج‌های زمینی MTE-GPP و برج‌های با تکنیک کوریانس eddy شاخص تولید ناخالص اولیه را با استفاده از یک مدل آماری میان ۱۷۸ ایستگاه مشاهداتی برآورد کردند. قدرت تفکیک مکانی این مجموعه داده ۰.۵*۰.۵ درجه و برای دوره‌ی زمانی ماهیانه بین سال‌های ۲۰۱۱-۱۹۸۲ بود. دوره‌ی زمانی تولید دو داده به کار برده شده حدود ده سال با یکدیگر اختلاف داشت. هم‌چنین پراکنش برج‌های با تکنیک کوریانس eddy اغلب در مناطق شمالی آمریکا و اروپا بود و در مناطق استوایی و قطبی برآوردها دچار عدم قطعیت‌های بزرگی بودند [۲۱، ۱۹]. ژاو و همکاران (۲۰۰۵) و ژاو و رانینگ (۲۰۱۰) از مجموعه داده مادیس^۳ (MODIS) بین

^۱ Light Use Efficiency

^۲ Leaf Area Index

^۳ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

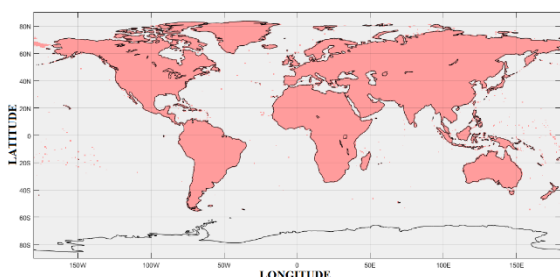
سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ در بازه زمانی سالیانه استفاده نمودند. با استفاده از درونیایی مکانی دقت داده‌های ورودی هواشناسی را برای اغلب مناطق زیست کره بهبود دادند که نتایج آن برای بهبود داده‌های MOD17A2 و MOD17A3 مورد استفاده قرار گرفت. هم‌چنین روابط بین GPP و تنفس اکوسیستم^۱ (Reco) را با استفاده از مجموعه داده‌های مادیس مورد بررسی قرار دادند [۲۲، ۱۸]. سیتچ و همکاران در سال ۲۰۱۵ خروجی های پروژه ی TRENDY در بازه زمانی ۲۰۱۰-۱۹۰۱ را ارائه دادند، در این پروژه مقادیر ماهیانه GPP براساس مدل‌های کربن زیست کره استخراج شد [۲۳]. در مطالعات دیگر نقش پارامترهای اقلیمی مانند فشار بخار آب^۲ (VPD) و تبخیر و تعرق^۳ (ET) توسط مو و همکاران (۲۰۰۷) بر روی داده‌های مادیس با قدرت تفکیک مکانی ۰.۵ درجه بررسی شد [۲۴]. پارامتر بارش و VPD توسط ژاو و رانینگ (۲۰۱۰) و پارامتر دما توسط بدای و همکاران (۲۰۱۳) بر روند GPP مورد بررسی قرار گرفت [۱۴، ۲۵]. در این مقاله با استفاده از محصول ماهیانه تولید ناخالص اولیه MODIS روند شانزده ساله این شاخص با استفاده از آزمون آماری من-کنال در سطح اطمینان ۹۰٪، در دوره های زمانی ماهیانه مورد بررسی قرار گرفت. رفتار این شاخص فاکتورهای کلیدی و تاثیرگذار بر فتوسنتز را تعیین می کند. هم چنین همبستگی مکانی این شاخص گیاهی با پارامترهای اقلیمی مانند دما و بارش ارزیابی و در عرض های جغرافیایی مختلف بررسی گردید.

۲- داده‌های مورد استفاده و پیش پردازش‌ها

۲-۱- منطقه‌ی تحقیق

منطقه مورد مطالعه در این مقاله، مناطق خشکی زیست کره از ژانویه سال ۲۰۰۰ تا دسامبر سال ۲۰۱۵ می‌باشد که در عرض‌های جغرافیایی ۹۰ درجه شمالی تا ۹۰ درجه جنوبی و طول‌های جغرافیایی ۱۸۰ درجه غربی تا ۱۸۰ درجه شرقی در سیستم مختصات جغرافیایی قرار گرفته است. شبکه‌ای از نقاط با رزولوشن ۰.۵ درجه بر روی مختصات‌های طول و عرض جغرافیایی تعریف شده

است و نقاط مراکز سلول شبکه به‌عنوان نماینده‌ی آن سلول در نظر گرفته شده است. بر اساس شکل ۱ نقشه زیست کره خشکی (مناطق صورتی رنگ) که قسمت های دارای پوشش گیاهی براساس گونه های عملکردی آن، در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند، نمایش داده شده است. هر سلول دارای مساحتی از خشکی است که بر اساس شکل بیضوی زمین برحسب کیلومتر مربع محاسبه شده است. آب‌ها و قسمت‌هایی از زیست کره خشکی فاقد پوشش گیاهی با مقادیر NO data در محاسبات در نظر گرفته شده اند.



شکل ۱- توزیع مکانی زیست کره خشکی (صورتی رنگ)

۲-۲- داده‌های به کار رفته

در این تحقیق داده های سنجنده ی MODIS روی ماهواره‌های ترا و آکوا که با اندازه ی قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر پوشش کامل از کره ی زمین برداشت می کند، استفاده شده است. سری زمانی GPP این سنجنده، برای مدلسازی مقدار فتوسنتز برای کل جهان از سال ۱۹۹۹ توسط ناسا راه اندازی گردید. محصولات GPP سنجنده مادیس روی ماهواره‌های ترا و آکوا که بر اساس مدل LUE (رابطه ۱) (فلوچارت آن در شکل ۲ نمایش داده شده است) و داده‌های بازتاب سطح زمین استخراج می‌شوند، به پارامترهای کسری تابش فعال فتوسنتز^۴ (fPAR) و راندمان مصرف نور حساسیت دارند. هدف از پروژه MOD17 برآوردهای مستمر از مقادیر GPP در سراسر سطح زمین پوشیده با گیاهان در بازه های زمانی ۸ روزه، ماهیانه و سالیانه است. خروجی این پروژه برای انواع بررسی‌های منابع طبیعی، مدیریت زمین، آنالیزهای چرخه کربن، ارزیابی وضعیت اکوسیستم و پایش تغییرات اقلیمی و زیست محیطی سودمند است [۲۱].

^۱ Ecosystem Respiration

^۲ Vapor Pressure Deficit

^۳ Evapotranspiration

^۴ Fraction of Photosynthetically Active Radiation

عملیات Aggregate با در نظر گرفتن مساحت هر سلول زیست کره خشکی مقادیر GPP در سطح هر سلول شبکه ی نیم درجه برآورد شد. مجموعه داده ماهیانه GPP از وبسایت www.ntsug.umt.edu/data دریافت و به صورت رایگان در اختیار عموم قرار دارد. خصوصیات داده ی مورد استفاده در جدول ۱ نمایش داده شده است.

هم چنین برای تحلیل روند و کشف رابطه ی بین تغییرات فعالیت فتوسنتز پوشش های گیاهی و تغییرات آب و هوایی از داده های اقلیمی استفاده شد. بنابراین داده های واحد تحقیقاتی اقلیمی Climatic Research Unit (CRU4.00) برای دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۵ میلادی در سطح زیست کره دریافت شد [۲۶]. مجموعه داده ای با رزولوشن بالای مکانی و رزولوشن زمانی ماهیانه از داده های اقلیمی در بازه زمانی ژانویه ۱۹۰۱ تا دسامبر ۲۰۱۵ فراهم کرده است. داده های دریافتی شامل میانگین دمای ماهیانه سطح برحسب درجه سانتیگراد و مقدار تجمعی بارش ماهیانه برحسب میلی متر می باشد. این مجموعه داده در یک شبکه ۰,۵ در ۰,۵ درجه می باشد. پس از دریافت فایل ها با فرمت netcdf و فراخوانی آن ها در محیط متلب، سال های موردنظر را استخراج و در ماتریس دما و بارش ذخیره شد.

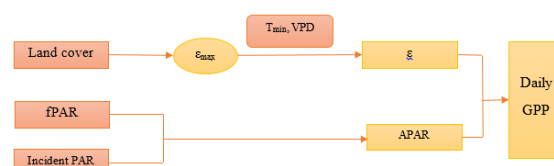
۳- روش شناسی

ماتریسی از داده های رستری GPP برای زیست کره خشکی تهیه شد. با توجه به اینکه داده ها به صورت جداگانه و ماهیانه موجود بود، پس از پیش پردازش های لازم نظیر معرفی سیستم مختصات و تبدیل به فرمت موردنظر برای تجزیه و تحلیل، داده به صورت سری زمانی درآمد. هم چنین اطلاعات مربوط به پارامترهای اقلیمی نیز در ماتریس های جداگانه ای ذخیره گردید.

روند تغییرات میزان تولید ناخالص اولیه و معنی داری آن در این مقاله به روش ناپارامتریک من-کندال انجام گرفت. آزمون من-کندال یکی از متداول ترین و پرکاربردترین روش ها جهت تحلیل روند سری های هیدرولوژیکی و هواشناسی می باشد. مطالعات مختلف صورت گرفته با استفاده از این آزمون مبین اهمیت و کاربرد فراوان آن در تحلیل روند سری های زمانی است. این آزمون ابتدا توسط من در سال ۱۹۴۵ ارائه و سپس

جدول ۱- خصوصیات مجموعه داده ماهیانه تولید ناخالص اولیه

نام داده	Monthly_MOD17A2_GPP
پوشش مکانی	Global
سیستم مختصات	WGS84 Geographic
قدرت تفکیک مکانی	1/20 degree
قدرت تفکیک زمانی	Monthly(total over month)
پوشش زمانی	2000~2015
فرمت داده	GeoTIFF
ابعاد تصویر	Rows: 3600 Columns: 7200
واحد اندازه گیری	g Carbon m ⁻²
ضریب مقیاس	0.1



شکل ۲- فلوچارت مدل کارایی مصرف نور MODIS الگوریتم استفاده شده در برآورد MOD17A2 [۲۱]

در این رابطه GPP تابعی از تابش فعال فتوسنتزی جذب شده APAR (رابطه ۱)، فشار بخار آب، دما و نوع پوشش گیاهی است. ϵ_{max} حداکثر کارایی مصرف نور خورشید در گونه ای عملکردی گیاهی و پارامترهای $f(T_{min})$ و $f(VPD)$ مقادیر عددی کاهش دهنده میزان GPP تحت شرایط تنش های آب و دما می باشد.

$$APAR = (Incident PAR) \times fPAR \quad (1)$$

$$= (0.45 \times SWrad) \times fPAR$$

شاخص APAR براساس ۰,۴۵ درصد از میزان تابش ورودی خورشید در طول موج کوتاه SWrad در تابش فعال فتوسنتزی محاسبه می گردد.

این پروژه قسمتی از برنامه سیستم مشاهده زمین ناسا EOS می باشد و اولین مجموعه داده ی به دست آمده از مشاهدات ماهواره ای نظارت بر تولیدات گیاهی در مقیاس جهانی است. در این پژوهش با استفاده از محصول مقدار ماهیانه تولید ناخالص اولیه (Monthly_MOD17A2) برحسب گرم کربن بر مترمربع، مقادیر کربن جذب شده در هر یک بیستم درجه دریافت گردید. MOD17A2- GPP شامل ۱۹۲ تصویر با فاصله زمانی ماهیانه از ژانویه ۲۰۰۰ تا دسامبر ۲۰۱۵ با قدرت تفکیک مکانی ۰,۰۵ درجه (یک کیلومتر) است [۲۵]. فرمت فایل های دریافتی Geotiff بوده که در محیط متلب فراخوانی شد و با

توسط کندال در سال ۱۹۴۸ توسعه یافت. ازجمله نقاط قوت این روش می‌توان به پیروی نکردن سری زمانی از توزیعی خاص، اثرپذیری ناچیز آن از مقادیر حدی موجود در برخی سری‌های زمانی و تحمل اثر منفی وجود داده‌های پرت اشاره کرد [۲۷، ۲۸]. نتایج به‌دست‌آمده از این آزمون مشخص‌کننده وجود یا عدم وجود روند در یک سری زمانی، معنی‌داری یا غیر معنی‌دار بودن آن و درنهایت مثبت و یا منفی بودن روند در صورت وجود است. روند تغییرات به‌صورت روندهای مثبت و منفی نمایش داده می‌شود. در این روش هر مقدار GPP در سری زمانی به‌طور پیوسته و پشت سرهم با بقیه مقادیر سری مقایسه و آماره من کندال محاسبه می‌شود [۲۸]. مراحل محاسبه مقدار آماره این آزمون با به کارگیری رابطه ۲ و رابطه ۳ به شرح زیر است:

الف- محاسبه اختلاف بین تک‌تک مشاهدات با یکدیگر و اعمال تابع علامت و استخراج پارامتر s به‌صورت زیر می‌باشد:

$$s = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(X) = \begin{cases} +1 & \text{if } (X_j - X_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (X_j - X_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (X_j - X_k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

که n تعداد مشاهدات سری و X_j و X_k به ترتیب داده‌های j ام و k ام سری می‌باشند (که در اینجا مقادیر GPP برای ۱۹۲ ماه در هر پیکسل است درواقع i و j زمان‌ها هستند). در این مطالعه تعداد مشاهدات ۱۶ سال در ۱۲ ماه مربوط به داده‌های GPP است.

ب) محاسبه واریانس سری براساس رابطه ۴، در داده‌های بدون مقادیر تکراری (گره)

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

سپس آماره من کندال (Z) رابطه ۵ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (5)$$

اگر مقادیر Z مثبت باشد بیان‌کننده‌ی روند افزایشی و اگر منفی باشد روند کاهشی در سری داده‌ها را نشان می‌دهد. در یک آزمون دو دامنه برای روندیابی سری داده‌ها تعریف می‌شود، فرض صفر یا همان عدم وجود روند در حالتی پذیرفته می‌شود که رابطه $|z| \leq z_{\alpha/2}$ برقرار باشد که در آن α سطح معنی‌داری و z آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری α می‌باشد. در این تحقیق سطح اطمینان ۹۰٪ در نظر گرفته شده است.

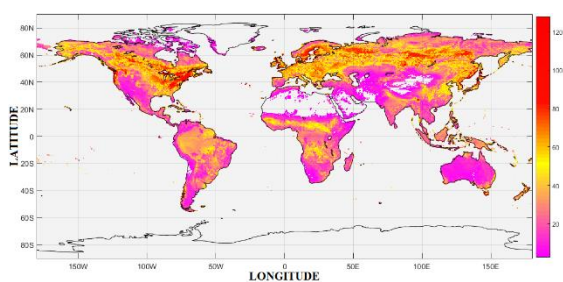
در ادامه رابطه رگرسیونی خطی بین پارامترهای اقلیمی بارش و دما با GPP نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای پیاده‌سازی مقادیر همبستگی از نرم‌افزار متلب به صورتی‌که در آن مقادیر GPP به‌عنوان متغیر وابسته و داده دما و بارش به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد، استفاده گردید و نقشه‌های خروجی در سطح زیست کره ی خشکی براساس مقادیر R^2 نمایش داده شد.

۴- نتایج و بحث

نتایج به‌دست‌آمده از مدل و هم‌چنین داده‌ها و محصولات مورد استفاده در ماتریس‌هایی با ابعاد $192 \times 72 \times 360$ در محیط متلب ذخیره شده‌اند. تعداد سطرهای این ماتریس‌ها نشان‌دهنده عرض جغرافیایی با ابعاد نیم درجه، تعداد ستون‌های این ماتریس‌ها نشان‌دهنده طول جغرافیایی با ابعاد نیم درجه و بعد سوم این ماتریس‌ها نمایش‌دهنده مقادیر هر متغیر در تعداد ماه‌های بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ (۱۹۲ ماه) می‌باشد. بنابراین هر پیکسل از تصاویری که در شکل‌هایی که در ادامه نمایش داده شده، گریدی نیم درجه‌ای از سطح زمین است. مقادیر متغیرها در سطوح پوشیده از آب یا بیابان‌ها و مناطق قطبی و یخچال‌های طبیعی با مقدار NaN تعریف شده‌اند.

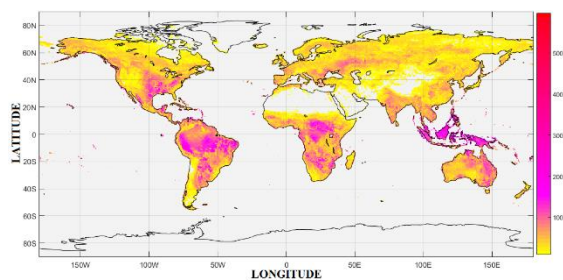
همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، مقادیر بیشینه GPP زیست‌کره متعلق به مناطق استوایی در عرض‌های جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی تا ۳۰ درجه جنوبی می‌باشد. در این مناطق پوشش‌های انبوه گیاهی شامل جنگل‌ها و woody savannas وجود دارد و مقادیر فتوسنتز از مکان‌های دیگر بزرگ‌تر می‌باشد. کمترین مقادیر مربوط به GPP مناطق با محیط‌زیست شامل عرض‌های جغرافیایی بالا که دارای کمترین زمان فصل

در شکل ۴ به بررسی انحراف معیار فصلی GPP زیست کره پرداخته شده است. به علت وابستگی این فرآیند به روند تغییرات فنولوژی پوشش گیاهی، بیشترین تغییرات در پوشش گسترده‌ای از عرض‌های نیمکره شمالی دیده می‌شود. تغییرات روند فنولوژیکی پوشش گیاهی در این مناطق و کاهش دما در فصل‌های سرد سال و کوتاه شدن دوره‌ی رویش گیاه در این مناطق سبب وجود تغییرات فصلی شدید GPP می‌گردد. به صورتی که در زمستان مقادیر GPP در نیمکره شمالی کمترین مقادیر و در تابستان دارای بیشترین مقادیر می‌باشد.



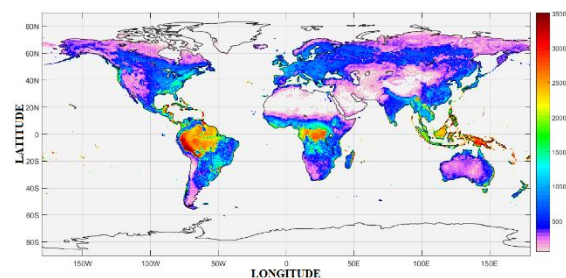
شکل ۴- نقشه جهانی انحراف معیار فصلی GPP. محاسبات در هر سلول از شبکه در بازه‌ی سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۰۰ انجام شده است. واحد اندازه گیری $\text{gCm}^{-2} \text{y}^{-1}$ می‌باشد.

در شکل ۵ توزیع مکانی انحراف معیار بین سالیانه GPP زیست کره در بازه مورد مطالعه نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل ۵ قابل مشاهده است، تغییرات بین سالیانه بازه کمتری نسبت به تغییرات فصلی دارند. روند تغییرات بین سالیانه در نیمکره جنوبی و مناطق استوایی نسبت به مناطق نیمکره شمالی بیشتر است. همچنین مشخص است که مقادیر انحراف معیار بین سالیانه در مکان‌هایی که مقادیر سالیانه GPP زیست کره در آن‌ها بیشتر است، از مناطقی که دارای مقادیر کوچک این پارامتر هستند، بزرگ‌تر است.



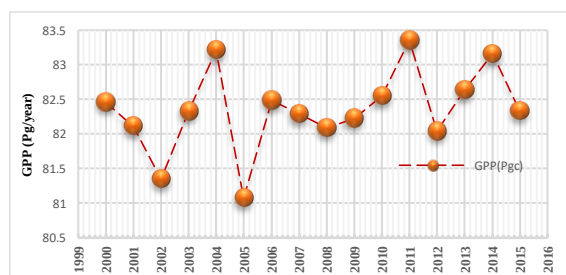
شکل ۵- نقشه جهانی انحراف معیار بین سالیانه GPP. محاسبات در هر سلول از شبکه در بازه‌ی سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۰۰ انجام شده است. واحد اندازه گیری $\text{gCm}^{-2} \text{y}^{-1}$ می‌باشد.

رشد گیاهان با دماهای بسیار پایین و همچنین مناطق خشک با کمترین مقادیر مربوط به GPP مناطق با محیط زیست شامل عرض‌های جغرافیایی بالا که دارای کمترین زمان فصل رشد گیاهان با دماهای بسیار پایین و همچنین مناطق خشک با دسترسی‌های محدود به آب هستند، تعلق دارد. بیشترین مقادیر این دو پارامتر در آمازون، آفریقای مرکزی و مناطق معتدل شمالی و جنوبی آمریکا و اروپا که دارای دما و رطوبت مناسب برای فتوسنتز هستند، می‌باشد.



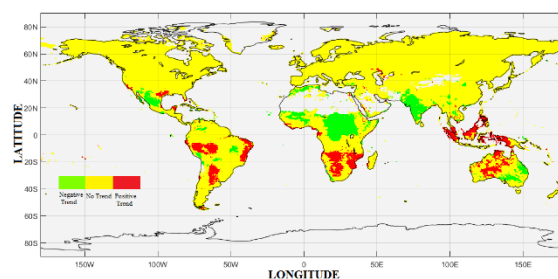
شکل ۳- نقشه جهانی میانگین سالیانه GPP. محاسبات در هر سلول از شبکه در بازه‌ی سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۰۰ انجام شده است. واحد اندازه گیری $\text{gCm}^{-2} \text{y}^{-1}$ می‌باشد.

در نمودار ۱ به بررسی تغییرات مقادیر میانگین سالیانه GPP در زیست کره پرداخته شده است. در محور x سال‌های میلادی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ نمایش داده شده و در محور y مقدار میانگین سالیانه GPP در کل زیست کره برحسب پتانسیل کربن در سال نمایش داده شده است. مقادیر به تفکیک هر سال در مجموع گریدهای زیست کره محاسبه شده است. بر اساس مدل پیاده‌سازی شده مقدار میانگین ۱۶ ساله GPP، ۸۲٫۳۵ پتانسیل کربن ($1 \text{ petagram} = 1 \times 10^{15}$) می‌باشد. اختلاف این مقدار با منابع مرجعی هم‌چون گزارش‌های هیئت بین‌الدول تغییرات اقلیمی در مدل پیاده‌سازی شده، تفاوت در نوع و قدرت تفکیک مکانی داده‌های ورودی می‌باشد [۲۹].



نمودار ۱- سری زمانی میانگین سالیانه GPP زیست کره خشکی بین سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۰۰. واحد اندازه گیری Pg C yr^{-1} ($1 \text{ Pg} = 10^{15}$ g) می‌باشد.

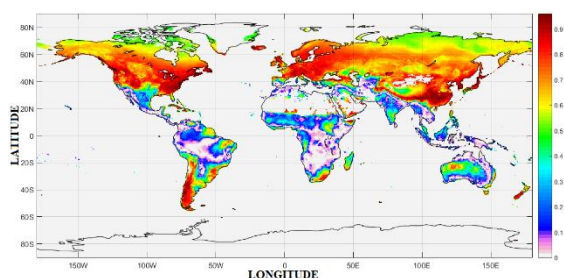
شکل ۶، پراکنش مکانی روندهای مشاهده شده براساس آزمون معنی‌داری من-کندال در نتایج حاصل از سری زمانی GPP را نمایش می‌دهد. سه کلاس با رنگ‌های سبز، زرد و قرمز بر روی نقشه تعریف شده است. رنگ زرد نشان دهنده‌ی مقادیر آماری من-کندال در بازه‌ی $[-1,645 \sim 1,645]$ می‌باشد که این موقعیت‌ها دارای مقادیر تصادفی و فاقد روند می‌باشند. موقعیت‌های سبز رنگ روند منفی معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۰٪ و موقعیت‌های قرمز رنگ روند مثبت معنی‌دار در سطح اطمینان مذکور را نمایش می‌دهند. آماری من-کندال در روندهای منفی، مقادیر کوچکتر از $-1,645$ و روندهای مثبت مقادیر بزرگتر از $1,645$ را به خود اختصاص داده‌اند. بر اساس نتایج بررسی روندهای GPP در شکل ۶، شدت روند منفی GPP زیست‌کره در آفریقای مرکزی، هند، آمریکای مرکزی و قسمت شرقی استرالیا می‌باشد. این مناطق در شکل ۶ با رنگ سبز نمایش داده شده‌اند. روند مثبت GPP در عرض‌های جغرافیایی مناطق استوایی آسیا، غرب استرالیا، جنوب آفریقا، مناطق شرقی آمازون و مناطق غربی و جنوبی آمریکای جنوبی مشاهده می‌گردد. در عرض‌های متعلق به نیمکره شمالی روندی برای GPP در سطح اطمینان ۹۰٪ مشاهده نمی‌گردد.



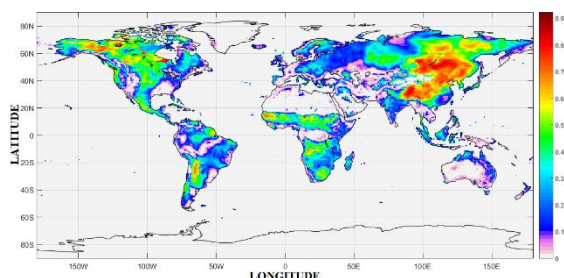
شکل ۶- نقشه جهانی آزمون معنی‌داری روند من کندال در سطح اطمینان ۹۰٪ داده‌ی شبکه‌ای با سلول‌های نیم درجه GPP زیست‌کره بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵. مقادیر مثبت (قرمز رنگ) و مقادیر منفی (سبز رنگ) به ترتیب نشان دهنده‌ی افزایش و کاهش روند GPP می‌باشند.

در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب رابطه رگرسیونی خطی بین پارامترهای اقلیمی دما و بارش با GPP نمایش داده شده است. همبستگی‌های به دست آمده برای بررسی و درک تأثیر پارامترهای اقلیمی دما و بارش روی جریان‌ات کربن به شکل GPP در زیست‌کره به کار برده می‌شود. مطالعات بسیاری نشان‌دهنده وجود روابط قوی میان میانگین سالیانه پارامترهای اقلیمی و توزیع پوشش گیاهی

و تولیدات اکوسیستم است. همان‌طور که از مقایسه شکل‌های ۷ و ۸ مشخص است، در عرض‌های جغرافیایی نیمکره شمالی تأثیر دما بر روی میزان GPP از دیگر عامل اقلیمی، بارش بیشتر است. این موضوع نشانگر این حقیقت است که در دمای کم انرژی لازم برای عمل فتوسنتز ضعیف بود و نرخ انجام فتوسنتز کم و آهسته است. بنابراین دمای بسیار پایین سالیانه که عرض‌های جغرافیایی شمالی بیشتر با آن درگیر هستند، منجر به تولیدات گیاهی کمتری می‌شود. این تغییرات در عرض‌های جغرافیایی میانی و جنوبی کمتر رخ می‌دهد و تولیدات گیاهی به‌خصوص در مناطق عرض‌های میانی با انرژی مناسب برای فتوسنتز تولید می‌شوند. بحرانی که در روندهای نامناسب مناطق مرکزی آفریقا مشاهده می‌گردد، علاوه بر روند افزایشی دما با روند کاهش بارش نیز مواجه است.



شکل ۷- همبستگی GPP با دما. پراکنش مکانی ضریب R^2 بین GPP و دما در سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۵.



شکل ۸- همبستگی GPP با بارش. پراکنش مکانی ضریب R^2 بین GPP و بارش در سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۵.

بنابراین پوشش‌های گیاهی در این مناطق، با استرس میزان آب و رطوبت درگیر هستند. با مقایسه دو شکل نامبرده می‌بینیم که تأثیر بارش در مناطق مختلف زیست‌کره روی GPP با مقدار رگرسیون مثبت و توزیع تقریباً یکنواخت اما با شدت بیشتر در نیمکره جنوبی و مناطق استوایی است.

۵- نتیجه گیری

های سنجش از دور و هواشناسی با هم اختلافاتی دارند. این تفاوت ها با تاثیری که بر داده ها و محصولات این سنجنده ها می گذارند، منجر به وقوع اختلافات در نتایج خواهند شد. به همین علت استفاده از داده هایی مانند محصولات MODIS که توسط محققان بسیاری مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته اند و هم چنین به علت شرایط قدرت تفکیک مکانی و پوشش محصولات این سنجنده، اغلب برای مطالعات در سطوح جهانی به کار برده می شوند، قابل توجیه است. عدم دسترسی به اطلاعات اقلیمی با پوشش جهانی کمتر از نیم درجه منجر به بررسی روند و همبستگی تولید ناخالص اولیه با این قدرت تفکیک مکانی گردید.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می دانند از ناسا برای فراهم سازی مجموعه داده MODIS GPP و هم چنین از CRU برای مجموعه داده های اقلیمی تشکر کنند.

همبستگی بالای تولید ناخالص اولیه با دما در عرض-های شمالی کره زمین، به علت افزایش بیشتر میانگین دما در این مناطق نسبت به سایر عرض های جغرافیایی است. برای مناطقی از زیست کره خشکی به خصوص در نیمکره جنوبی و مناطق استوایی تأثیر میزان رطوبت هوا و میزان تابش خورشید روی GPP بیشتر از تأثیر دما و بارش می باشد. وابستگی عرض های مختلف جغرافیایی با میزان انرژی دریافتی از خورشید برای انجام فتوسنتز روی مقادیر GPP زیست کره تأثیرگذار است. به طوریکه در عرض های استوایی بیشترین مقادیر GPP به دست آمده است. در بازه ی زمانی بررسی شده در این تحقیق، اغلب سلول های شبکه نیم درجه نیمکره شمالی در سطح اطمینان ۹۰٪ روند خاصی مشاهده نگردید و روندهای مثبت و منفی در سطح اطمینان مذکور، در عرض های استوایی و جنوبی مشاهده شد. بدون شک تنظیمات سنجنده ها و ماهواره

مراجع

- [1] Hashimoto, H., Wang, W., Cristina, M., Xiong, J., ganguly, s., Zhu, Z., & Nemani, R. (2013). Structural Uncertainty in Model-Simulated Trends of Global Gross Primary Production. *Remote Sensing*, 5, 1258-1273. Doi: 10.3390/rs5031258.
- [2] Wang, J., Dong, J., Liu, J., Huang, M., Li, G., Running, S., Xiao, X. (2014). Comparison of gross primary productivity derived from GIMMS NDVI3g, GIMMS, and MODIS in Southeast Asia. *Remote Sensing*, 6, 2108-2133. Doi: 10.3390/rs6032108
- [3] Joiner, J., Yoshida, Y., Zhang, Y., Duveiller, G., Jung, M., Lyapustin, A., Wang, Y., Tucker, C.J., 2018. Estimation of Terrestrial Global Gross Primary Production (GPP) with Satellite Data-Driven Models and Eddy Covariance Flux Data. *Remote Sens.* 2018, 10, 1346.
- [4] Ardö, J., 2015. Comparison between remote sensing and a dynamic vegetation model for estimating terrestrial primary production of Africa. *Carbon Balance Manage* 10: 8. <https://doi.org/10.1186/s13021-015-0018-5>.
- [5] Friedl, M.A., Sulla-Menashe, M.A., Tan, D., Schneider, B., Ramankutty, A., Sibley, N., Huang, A., Xiaoman, A., 2010. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 2010. 114(1): p. 168-182.
- [6] Hall, F., Masek, J. G., and Collatz, G. J.: Evaluation of ISLSCP Initiative II FASIR and GIMMS NDVI products and implications for carbon cycle science, *J. Geophys. Res.*, 111, 15 pp., Doi: 10.1029/2006JD007438, 2006.
- [7] Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., Ciais, P., Jung, M., Carvalhais, N., Papale, D., 2010. Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate. *Science*, 329, 834-838. doi:10.1126/science.1184984.
- [8] Ji, J. A climate-vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface. *J. Biogeogr.* 1995, 22, 445-451.
- [9] Frank, D., Reichstein, M., Bahn, M., Thonicke, K., Frank, D., Mahecha, M. D., Smith, P., van der Velde, M., Vicca, S., Babst, F., Beer, C., Buchmann, N., Canadell, J. G., Ciais, P., Cramer, W., Ibrom, A., Miglietta, F., Poulter, B., Rammig, A., Seneviratne, S. I., Walz, A., Wattenbach, M., Zavala, M. A., Zscheischler, J., 2015. Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: Concepts, processes and potential future impacts. *Global Change Biology*, 21(8), 2861- 2880, doi: 10.1111/gcb.12916.

- [10] Frankenberg, C., Fisher, J., Worden, J., Badgley, G., Saatchi, S., Lee, J.-E., Yokota, T., 2011. New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 38. Doi: 10.1029/2011GL048738.
- [11] Turner, D., Ritts, W., Cohen, W., Maeirspenger, T., Gower, S., Kirschbaum, A., Gamon, J. (2005). Site-level evaluation of satellite-based global terrestrial gross primary production and net primary production monitoring. *Global Change Biology*, 11, 666-684. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.00936.x.
- [12] Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R. B., Piao, S., Thornton, P., 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 465-570.
- [13] Jung, M., Reichstein, M., Margolis, H., Cescatti, A., Richardson, A., A, A., Williams, C., 2011. Global Patterns of Land-Atmosphere Fluxes of Carbon Dioxide, Latent Heat, and Sensible Heat Derived from Eddy Covariance, Satellite, and Meteorological Observations. *Journal of Geophysical Research*, 116. Doi:10.1029/2010JG001566.
- [14] Badawy, B., Rödenbeck, C., Reichstein, M., Carvalhais, N., and Heimann, M., 2013. Technical Note: The Simple Diagnostic Photosynthesis and Respiration Model (SDPRM), *Biogeosciences*, 10, 6485–6508, <https://doi.org/10.5194/bg-10-6485-2013>.
- [15] Anav, A., Friedlingstein, P., Beer, C., Ciais, P., Harper, A., Jones, C., Zhao, M. (2015). Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: A review. *Reviews of Geophysics*, 53(3), 785-818. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/2015RG000483>.doi: 10.1002/2015RG000483.
- [16] Monteith, J. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 1972, 9, 747–76667.
- [17] Ichii, K., Kondo, M., Okabe, Y., Ueyama, M., Kobayashi, H., Lee, S.-J., Saigusa, N., Zhu, Z., Myneni, R.B 2013. Recent Changes in Terrestrial Gross Primary Productivity in Asia from 1982 to 2011. *Remote Sens.* 2013, 5, 6043-6062.
- [18] Zhao, M., Heinsch, F. A., Nemani, R. R., Running, S. W., 2005. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set, *Remote Sens. Environ.*, 95(2), 164–176, 2005.
- [19] Jung, M., Reichstein, M., Margolis, H., Cescatti, A., Richardson, A., A, A., Williams, C., 2011. Global Patterns of Land-Atmosphere Fluxes of Carbon Dioxide, Latent Heat, and Sensible Heat Derived from Eddy Covariance, Satellite, and Meteorological Observations. *Journal of Geophysical Research*, 116. Doi: 10.1029/2010JG001566.
- [20] Kiapasha, K., Darvishsefat, A., Zargham, N., Julien, Y., Sobrino, J., & Nadi, M. (2017). SHIFTS OF START AND END OF SEASON IN RESPONSE TO AIR TEMPERATURE VARIATION BASED ON GIMMS DATASET IN HYRCANIAN FORESTS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W4, 155-160. Doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-155-2017.
- [21] Jung, M., M. Reichstein, and A. Bondeau, Towards global empirical upscaling of FLUXNET eddy covariance observations: validation of a model tree ensemble approach using a biosphere model. *Biogeosciences*, 2009. 6(10): p. 2001-2013.
- [22] Zhao, M., and S. W. Running (2010), Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009, *Science*, 329, 940–943.
- [23] Sitch, S., P. Friedlingstein, N. Gruber, S. D. Jones, G. Murray-Tortarolo, A. Ahlström, S. C. Doney, H. Graven, C. Heinze, C. Huntingford, S. Levis, P. E. Levy, M. Lomas, B. Poulter, N. Viovy, S. Zaehle, N. Zeng, A. Arneth, G. Bonan, L. Bopp, J. G. Canadell, F. Chevallier, P. Ciais, R. Ellis, M. Gloor, P. Peylin, S. L. Piao, C. Le Quéré, B. Smith, Z. Zhu and R. Myneni (2015). "Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide." *Biogeosciences* 12(3): 653-679.
- [24] Mu, Q., F. Heinsch, M. Zhao and S. Running (2007). "Development of a Global Evapotranspiration Algorithm Based on MODIS and Global Meteorology Data." *Remote Sensing of Environment* 111: 519-536.
- [25] Running, S.W., Zhao, M., 2015. User's Guide Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm, Geography, Published 2015.
- [26] University of East Anglia Climatic Research Unit (CRU), CRU Time Series (TS) High Resolution Gridded Datasets. Climatic Research Unit (CRU) Time-Series Datasets of Variations in Climate with Variations in Other Phenomena. Available online: http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__dataent_1256223773328276 (accessed on 13 June 2018).
- [27] Kendall, M.G., 1975. Rank Correlation Measures, Charles Griffin, London.

- [28] Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, Vol. 13, PP. 245–259.
- [29] IPCC. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2007; p. 996.