

ارزیابی تولید اولیه ناخالص سنجنده MODIS با استفاده از برج‌های اندازه‌گیری شار کربن در جنگل‌های

معتدله

حسن عباسیان^۱، عیسی سلگی^{۲*}، سید محسن حسینی^۳، سید حسین کیا^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۷

چکیده

در این پژوهش، محصول تولید اولیه ناخالص سنجنده مودیس (MODIS-GPP) به عنوان نمایه‌ای از توان بالقوه پوشش گیاهی در ترسیب دی‌اکسید کربن جو سطح زمین با استفاده از داده‌های برج شار کربن (Flux Tower-GPP) در سه منطقه همگن جنگلی از درختان برگ پهن در جنوب انگلستان مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. پس از انجام آزمون نرمال بودن، میانگین سنجنده مودیس (پیکسل 1×1 کیلومتر) با Flux Tower GPP مقایسه شد. بر اساس نتایج آزمون تی-استیودنت دو طرفه، بین میانگین داده‌ها اختلاف معنی‌داری در سطح ۹۵٪ وجود دارد. در دو ایستگاه Alice Holt و Wytham مقادیر اندازه‌گیری شده توسط برج‌ها بیشتر از MODIS-GPP می‌باشد؛ در حالی که در ایستگاه Pang Lambourne برعکس است که می‌تواند ناشی از ناهمگنی پوشش سطح زمین باشد. روند تغییرات فصلی هر دو سری داده یکسان می‌باشد و در تمامی ایستگاه‌ها افزایش GPP در مراحل نمو گیاهان نمایان است. میزان این کمیت با یک شیب ملایم تا ابتدای ماه می افزایش می‌یابد و تا نیمه تابستان با افزایش تراکم تاج پوشش، تحت تاثیر بیشینه تابش فعال فتوسنتزی جذب شده توسط گیاهان و فعالیت فتوسنتزی، افزایش می‌یابد. در اواخر فصل تابستان مقدار آن بتدریج کاهش می‌یابد و سرانجام، با شروع فصل پاییز و افت دمای هوا، کاهش سریعی در ماه اکتبر مشاهده شد. استفاده از داده‌های MODIS-GPP برای برآورد توان تولید بوم‌سازگان‌ها به دلیل ناهمگنی ساختاری درون پیکسل این داده‌ها به تنهایی قابل اعتماد نمی‌باشد. از طرف دیگر به دلیل محدودیت تعداد برج‌های اندازه‌گیری شار کربن، از این برج‌ها نمی‌توان به تنهایی برای درون‌یابی و بررسی تغییرات مکانی و زمانی کمیت GPP استفاده کرد. بنابراین، استفاده توأم داده‌های MODIS-GPP و Flux Tower-GPP در ارزیابی توان تولید بالقوه بوم‌سازگان‌ها در سطح منطقه‌ای و جهان قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: برج‌های شار کربن، دی‌اکسید کربن، تولید اولیه ناخالص، بوم‌سازگان، MODIS

مقدمه

(2017). این گاز حیاتی در چند دهه‌ی اخیر به دلیل فعالیت‌های انسانی به عنوان یک آلاینده‌ی کمی، نقش بسزایی در کنترل فرایندهای محیط‌زیستی و اقلیمی ایفا می‌کند. بنابراین پایش و ارزیابی چرخه‌ی کربن، شناسایی منابع تولیدی و عوامل کنترل‌کننده‌ی این گاز می‌تواند نقش بسزایی در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی برای مدیریت سرزمین و کاهش انتشار بیش از حد آن داشته باشد. با توجه به اهمیت موضوع، مطالعات زیادی در رابطه با پایش، مدل‌سازی و ارزیابی چرخه‌ی دی‌اکسید کربن در سطوح مختلف مکانی و زمانی صورت گرفته است (Zhang et al., 2019; Xianming et al., 2018). در همین خصوص به موازات پیشرفت تکنولوژی، تجهیزات و دستگاه‌های متعدد نصب شده در سکوها‌ی مختلف زمینی

دی‌اکسید کربن با حجمی در حدود ۰/۰۳ درصد از مهمترین گازهای تشکیل دهنده اتمسفر زمین می‌باشد که حیات کره زمین را تامین می‌کند (Guzy et al.,

^۱ دانشجوی دکتری آلودگی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
^۲ دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ایران

(*نویسنده مسئول: e.solgi@malayeru.ac.ir)

^۳ استاد گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

^۴ بخش محیط زیست، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، تهران، ایران

نحوه ارجاع مقاله:

عباسیان، ح.، سلگی، ع.، حسینی، س.م.، کیا، س.ح. ۱۳۹۹. ارزیابی تولید اولیه ناخالص سنجنده MODIS با استفاده از برج‌های اندازه‌گیری شار کربن در جنگل‌های معتدله. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۸(۲): ۶۰-۷۲. DOI: 10.22125/agmj.2020.222114.1092

Abbasian, H., Solgi, E., Hosseini, S. M., Kia, S. H. 2020. Evaluation of MODIS-based gross primary production by flux tower measurements (Case study: Temperate forests of England). Journal of Agricultural Meteorology, 8(2): 60-72. DOI: 10.22125/agmj.2020.222114.1092

و غیره اندازه‌گیری می‌کند. در واقع، یک تکنیک خرد اقلیم‌شناسی است که برای اندازه‌گیری شارهای گازی در مناطقی به وسعت ۱۰-۱ کیلومتر مربع مورد استفاده قرار می‌گیرد (Rapson and Dacres, 2014). هم اکنون بیش از ۵۰۰ برج فعال اندازه‌گیری شار در سراسر دنیا به پایش و اندازه‌گیری گازهای تبادل سطح زمین و جو سطح زمین می‌پردازند (ORNL DAAC, 2018). افزایش قابل توجهی در خصوص شبیه‌سازی داده‌های مشاهدات زمینی در جهت شناخت فرآیندهای سطح زمین، اندازه‌گیری‌های اقلیمی، موجودی کربن و شارهای آن صورت گرفته است (IPPC, 1995). سنجنده MODIS³ هم در توسعه‌ی مدل‌های مختلف درباره‌ی سیستم‌های کربن زمین نقش مهمی دارد و محصولات آن می‌توانند در خصوص مدیریت بهینه منابع و حفاظت از محیط‌زیست تاثیر بسزایی داشته باشند. این مطالعه در صدد است تولید اولیه ناخالص (GPP) اندازه‌گیری شده توسط برج‌های اندازه‌گیری (Flux Tower-GPP) را با MODIS-GPP مقایسه نماید. نتیجه این پژوهش عدم قطعیت محصولات MODIS را در برآورد پتانسیل تولید بوم‌سازگان‌ها با توجه به PFTها⁴ نشان خواهد داد.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه

الف- بوم‌سازگان جنگلی Wytham با مختصات جغرافیایی ۱/۳۳ درجه غربی و ۵۱/۷۷ درجه شمالی یک جنگل پهن‌برگ خزان‌کننده آمیخته در پنج کیلومتری شمال غرب آکسفورد واقع در جنوب انگلستان است. ارتفاع ایستگاه در بالای تپه Wytham معادل ۱۶۰ متر می‌باشد. پوشش گیاهی Wytham را می‌توان به جنگل قدیمی، ثانویه و دست‌کاشت تقسیم کرد. در این جنگل پوشش گیاهی غالب شامل بلوط (*Quercus rober*)، زبان گنجشک (*Fraxinus excelsior*)، افرا (*Acer pseudoplatanus*) و راش (*Fagus sylvatica*) با تعدادی از گونه‌های سوزنی‌برگ که اخیراً کاشت شده‌اند و اشکوب زیرین شامل فندق (*Corylus avellana*)، گل‌های وحشی، گزنه و جگن می‌باشد. وسعت جنگل حدود ۴۰۰ هکتار

و هوایی برای اندازه‌گیری و پایش گازهای گلخانه‌ای بین سطح زمین و اتمسفر مورد استفاده قرار گرفته است (Anderson and Burba, 2010). امروزه یکی از روش‌های جامع و دقیق در اندازه‌گیری دی‌اکسیدکربن، بخار آب، متان، انرژی حرارتی و میزان تبادل آن‌ها بین بوم‌سازگان‌های مختلف و جو سطح زمین، اندازه‌گیری شار تلاطم^۱ توسط برج‌های اندازه‌گیری است که قادر است شار آشفته‌گی‌های مختلف را در جو فعال سطح زمین اندازه‌گیری نماید (Tokoro and Kuwae, 2018). روش شار تلاطم ابتدا در اوایل دهه‌ی ۱۹۵۰ مطرح گردید و در نهایت در اوایل دهه ۱۹۹۰ برای مطالعات گازهای گلخانه‌ای به کار گرفته شد (Skinner and Glaudiva, 2012). سنجنده‌های شار یا تجهیزات تحلیل‌کننده‌ی گازهای تبدالی روی برج‌هایی با ارتفاع متغیر، بسته به نوع و ارتفاع پوشش گیاهی نصب می‌شوند (شکل ۱) و بسته به شرایط خرد- اقلیمی منطقه و فصول مختلف سال، تبادل گازهای مورد نظر را بین سطح زمین و جو سطح زمین برای یک محدوده معین تحت عنوان ردپای شار^۲ اندازه‌گیری می‌کنند.



شکل ۱- برج اندازه‌گیری بخار آب، دی‌اکسیدکربن و گرمای تبدالی بین زیست‌بوم‌های سطح زمین و جو سطح زمین در یک علفزار (برگرفته از سایت LI-COR)

Figure 1- Flux tower for measuring of water vapor, carbon dioxide and heat between terrestrial ecosystems and atmosphere in a grassland (Photo by: LI-COR)

این تکنیک در یک مقیاس مکانی معین در خلاف جهت باد با فواصل زمانی ۳۰ دقیقه شار دی‌اکسیدکربن را به همراه متغیرهای دیگری از قبیل غلظت گاز دی‌اکسیدکربن، دمای هوا، فشار هوا، سرعت باد، جهت باد

³ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

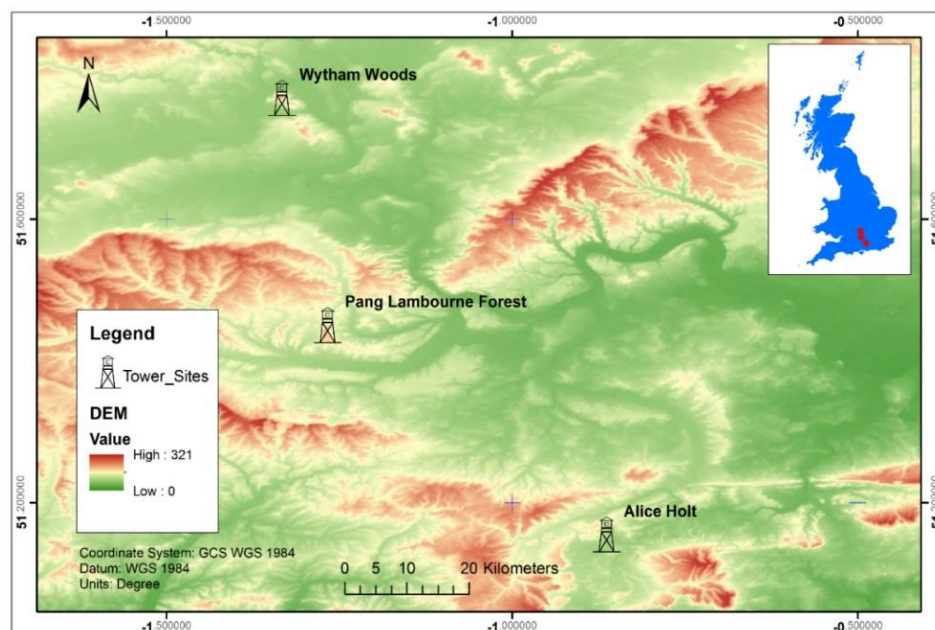
⁴ Plant Functional Types

¹ Eddy Covariance

² Flux Footprint

شرقی وجود دارند. اشکوب زیرین هم شامل فندق (*Corylus avellana*) و ولیک (*Crataegus monogyna*) می‌باشد. اقلیم منطقه طبق روش طبقه‌بندی کوپن معتدله‌ی اقیانوسی است؛ میانگین بلند مدت دمای هوا ۹/۶ درجه‌ی سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه ۷۷۹ میلی‌متر می‌باشد. ج- بوم‌سازگان جنگلی PangLambourn هم در مختصات ۱/۲۷ درجه غربی و ۵۱/۴۵ درجه شمالی واقع شده و کاربری اراضی آن غالباً شامل مناطق روستایی، کشاورزی و علفزار می‌باشد. مطالعات کاربری اراضی نشان می‌دهد که تقریباً ۲۸ درصد شامل علفزار توسعه یافته، ۲۹ درصد گونه‌های غلات، ۲۸ درصد گیاهان پرورشی و ۱۰ درصد جنگل‌های پهن‌برگ می‌باشد. کمی بیش از ۲ درصد، مناطق مسکونی است که در محل تلاقی رودخانه‌های Lambourn با Kennet و همچنین Pang با Thames در حال ازدیاد و تجمع می‌باشد (Rabb, 2010). این منطقه جزء جنگل‌های پهن برگ خزان کننده است و متوسط بارندگی و دمای سالیانه آن به ترتیب ۸۰۰ میلی‌متر و ۹/۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و نوع اقلیم نیز طبق روش طبقه‌بندی کوپن معتدله‌ی اقیانوسی است. شکل ۲ موقعیت قرارگیری ایستگاه‌های مورد مطالعه نسبت به یکدیگر را به طور خلاصه نشان می‌دهد.

می‌باشد که توسط چمنزارها و زمین‌های کشاورزی احاطه شده است (Thomas et al., 2011). اقلیم منطقه طبق روش طبقه‌بندی کوپن از نوع معتدله اقیانوسی است و متوسط بارندگی ۷۳۰ میلی‌متر می‌باشد. داده‌های اقلیمی منطقه نشان می‌دهند که گرمترین ماه سال ژوئیه با متوسط دمای هوا ۱۶/۷ درجه سانتی‌گراد و سردترین ماه سال هم ژانویه با متوسط ۴/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. ب- بوم‌سازگان جنگلی Alice Holt هم در مختصات جغرافیایی ۰/۸۶ درجه غربی و ۵۱/۱۵ درجه شمالی در نزدیکی ایستگاه تحقیقاتی Alice Holt واقع شده است. محدوده‌ی ایستگاه یک منطقه مسطح با ارتفاع ۸۰ متر از سطح دریا می‌باشد و اطراف آن هم جنگل‌های پست آمیخته با زمین‌های کشاورزی و اراضی مرتعی می‌باشد. کل محدوده‌ی ۹۰ هکتاری در دهه‌ی ۱۸۲۰ و مجدداً در دهه‌ی ۱۹۳۰ با گونه‌ی بلوط کاشته شد. مهم‌ترین گونه‌ی درختی در این ایستگاه بلوط (*Quercus rober*) است اما درختان دیگری از قبیل زبان گنجشک (*Fraxinus excelsior*) و گونه‌های بلوط *Q.cerris* و *Q.petraea* هم وجود دارند. بخش کوچکی در سطح ۴/۶ هکتار، گونه‌های سوزنی‌برگ شامل کاج سیاه (*Pinus nigra*) از زیر گونه‌ی *Laricia Maire* و کاج جنگلی (*Pinus sylvestris*) در حاشیه‌ی شمال غربی جنگل و همچنین یک قطعه محدودی کریپتومریا (*Cryptomeria japonica*) در قسمت



شکل ۲- محدوده مطالعاتی و موقعیت قرارگیری ایستگاه‌های سه گانه

Figure 1- Study area and relative position of three stations

روش پژوهش و تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این مطالعه از داده‌های برج‌های اندازه‌گیری سه ایستگاه Alice Holt، Wytham و Pang Lambourne استفاده گردید. در ایستگاه Alice Holt از داده‌های کامل سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰؛ در ایستگاه Wytham از داده‌های اول ماه می (ماه پنجم) سال ۲۰۰۷ تا پایان آوریل (ماه چهارم) سال ۲۰۰۹ و در ایستگاه Pang Lambourne هم داده‌های کامل سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۶، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ مورد استفاده قرار گرفتند. همانگونه که اشاره گردید در این مطالعه، Flux Tower-GPP با MODIS-GPP مقایسه می‌شوند تا ارتباط این دو روش مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. در تمامی ایستگاه‌هایی که واجد برج‌های اندازه‌گیری هستند، GPP از جمله پارامترهایی است که محاسبه می‌شود و مقادیر آن در دسترس کاربران قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است در تمامی این ایستگاه‌ها؛ مطابق معادله ۱ تولید خالص اکوسیستمی (NEE) مستقیماً از برج‌ها به دست می‌آید و GPP هم طبق معادله ۲ از NEE مشتق می‌شود (Tagessam, 2015).

$$NEE = GPP - R_e \quad (1)$$

$$GPP = -\varepsilon_{\max} \times PAR \times fPAR \times W_s \times T_s \quad (2)$$

که در آن‌ها NEE تولید خالص اکوسیستمی، GPP تولید ناخالص اکوسیستم، R_e تنفس اکوسیستمی، ε_{\max} ماکزیمم کارایی استفاده از نور، PAR تابش فعال فتوسنتزی، fPAR درصد جذب شده تابش فعال فتوسنتزی توسط گیاهان (طول موج ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر)، W_s بردار رطوبت و T_s بردار دما می‌باشد. در این مطالعه، GPP برج‌های اندازه‌گیری از داده‌های ایستگاه‌های مربوطه استخراج گردید تا در نهایت با مقادیر GPP حاصل از MODIS مورد مقایسه قرار گیرند. برای تهیه‌ی مقادیر MODIS-GPP از داده‌های پردازش شده‌ی ایستگاه داده‌های زمین (ORNL DAAC, 2018) استفاده گردید که GPP را برای تمام نقاط سطح زمین تهیه می‌نماید. روش استخراج اطلاعات در این ایستگاه به دو روش ایستگاه‌های معین^۱ و شبکه‌ای^۲ می‌باشد. در روش اول، ایستگاه‌های معین و شناخته شده مانند Alice Holt، Wytham قرار دارند که

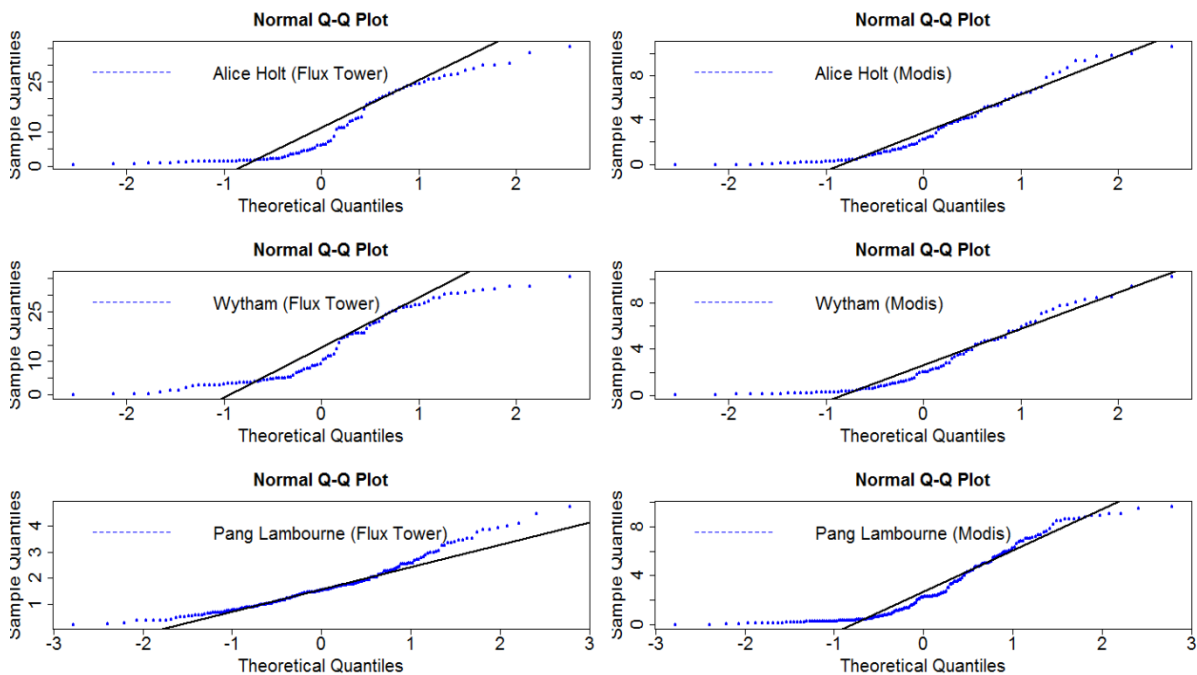
با انتخاب ایستگاه مورد نظر توسط کاربر، داده‌های MODIS-GPP از فوریه سال ۲۰۰۰ در اختیار کاربر قرار می‌گیرند. در روش دوم هم با وارد کردن مختصات جغرافیایی می‌توان محصولات مختلف MODIS از جمله GPP را تا شعاع حداکثر ۱۰۰ کیلومتر تهیه نمود. این عملیات برای هر نقطه‌ای از سطح زمین قابل اجرا می‌باشد. خوشبختانه، در تمامی برج‌های اندازه‌گیری در سرتاسر دنیا با انتخاب نام ایستگاه، داده‌های GPP را می‌توان به راحتی استخراج نمود. محصولات GPP حاصل از MODIS (MOD17A2H) هم توسط ماهواره‌های ترا (Terra) و آکوا (Aqua) تهیه می‌شوند. در این مطالعه GPP حاصل از ترا با GPP برج‌های اندازه‌گیری (رأس ساعت ۱۰:۳۰) مورد مقایسه قرار گرفتند. از آنجایی که محصولات MODIS GPP به صورت میانگین هشت روزه می‌باشند و در طول یک سال ۴۶ سری داده تولید می‌شود (Maosheng and Steven, 2015)، در این مطالعه نیز برای مقایسه واقعی‌تر، از میانگین هشت روزه GPP برج‌های اندازه‌گیری در رأس ساعت ۱۰:۳۰ استفاده گردیده است. واحد اندازه‌گیری GPP در محصولات MODIS معادل کیلوگرم کربن بر مترمربع در هشت روز هستند ولی در برج‌های اندازه‌گیری عموماً به صورت میکرومول کربن بر مترمربع در ثانیه بیان می‌شوند؛ از این رو تمامی این واحدها یکسان‌سازی شدند و در نهایت داده‌های به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار R مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

نتایج و بحث

ابتدا به منظور درک و شناخت بهتر از پتانسیل ترسیب کربن به صورت زیتوده گیاهی، توان تولیدی هر یک از سه ایستگاه مورد مطالعه، کمیت تولید ناخالص اولیه با استفاده از آمار توصیفی مورد مقایسه قرار گرفت. در ابتدا برای اطمینان از نرمال بودن داده‌ها از آزمون Normal Q-Q استفاده به عمل آمد. نتایج حاصل از این آزمون نشان می‌دهد که تمامی داده‌های هر دو روش برج‌های اندازه‌گیری و MODIS از روند نرمال تبعیت می‌کنند (شکل ۳).

¹ Fixed Sites Subsets Tool

² Global Subset Tool



شکل ۳- آزمون Q-Q برای نرمال بودن داده‌های GPP حاصل از MODIS و برج‌های اندازه‌گیری

Figure 3- Q-Q test of normality for data of MODIS and Flux Tower

فرضیه صفر گردید (جدول ۱). دامنه‌ی نوسانات Flux Tower-GPP در ایستگاه Alice Holt از ۰/۵ تا ۳۵ میکرومول بر مترمربع در ثانیه و در MODIS-GPP از صفر تا حدود ۱۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه متغیر می‌باشد. متوسط مقادیر GPP در منطقه‌ی Wytham نیز حاکی از تفاوت این دو روش با یکدیگر می‌باشد.

بعد از کسب اطمینان از نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون T-Test دو طرفه میانگین نمونه‌های Flux Tower-GPP و MODIS-GPP در هر سه ایستگاه مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج آزمون نشان داد که در تمامی ایستگاه‌ها، اختلاف معنی‌داری بین میانگین GPP در دو روش مورد اشاره وجود دارد ($P < 0/05$) که منجر به رد

Table 1- Characteristics and statistical comparison (two-tailed T-Test) of MODIS-GPP and Flux Tower-GPP in sites جدول ۱- مشخصه‌ها و مقایسه آماری (T-Test دو طرفه) MODIS-GPP و Flux Tower-GPP در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Statistical characteristics	Sites		
	Wytham	Alice Holt	Pang Lambourne
T	12.489	9.36	-7.287
Degrees of freedom	91	91	183
Mean difference ($\mu\text{mol C m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	10.778	8.210	-1.268
P-Value	< 0.05	< 0.05	< 0.05

ثانیه نوسان دارند. جدول ۲ ضریب تغییرات GPP را برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در سال‌های مختلف نشان می‌دهد. بررسی نوسانات فصلی GPP در ایستگاه Alice Holt نشان می‌دهد که در ماه‌های اول سال یعنی از ژانویه تا مارس مقادیر اندازه‌گیری شده بسیار جزئی و نادر می‌باشند و با شروع فصل بهار روند GPP صعودی می‌شود و مقدار آن بتدریج افزایش می‌یابد و در نهایت در اوایل فصل تابستان به اوج خود می‌رسد.

دامنه‌ی نوسانات Flux Tower-GPP از ۰/۲ تا ۳۵ میکرومول بر مترمربع در ثانیه و به روش MODIS-GPP از صفر تا حدود ۱۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه متغیر می‌باشد. متوسط مقادیر GPP در ایستگاه Pang Lambourne در مقایسه با دو منطقه‌ی دیگر، دامنه‌ی نوسان به مراتب کمتری نشان می‌دهد و مقادیر GPP در برج‌های اندازه‌گیری از ۰/۲ تا حدود ۵ میکرومول بر مترمربع در ثانیه است در حالی که به روش MODIS-GPP از حدود صفر تا تقریباً ۱۰ میکرومول بر مترمربع در

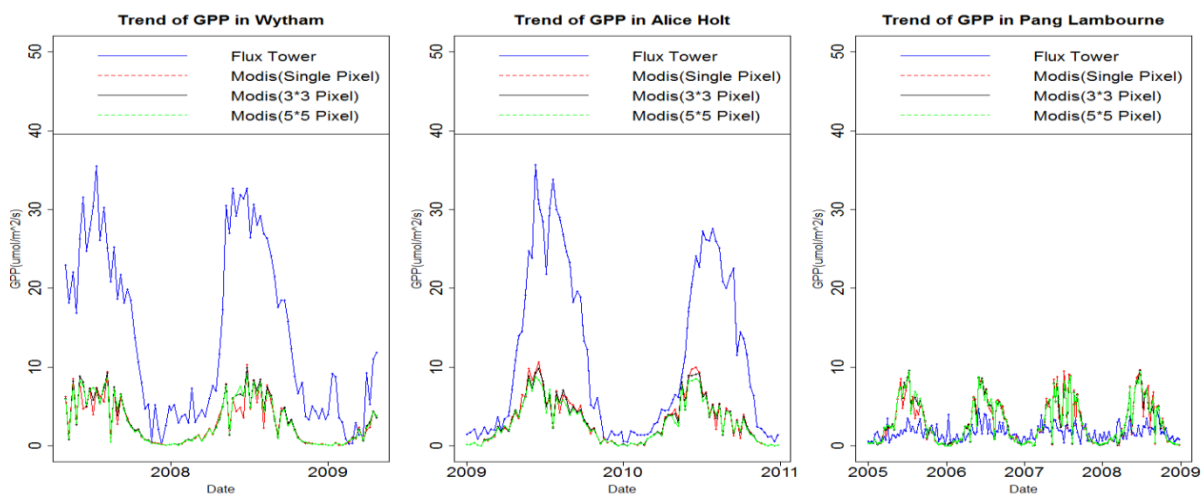
Table 2- Coefficient of variation in GPP values of different sites

جدول ۲- ضریب تغییرات در GPP در ایستگاه‌های مختلف

Year/ Site		Mean ($\mu\text{mol C m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Standard deviation ($\mu\text{mol C m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	CV (%)
Pang Lambourne	EC2005	1.57	0.85	54.14
	MODIS 2005	2.84	2.6	91.55
	EC2006	1.73	1.04	60.12
	MODIS2006	2.95	2.64	89.50
	EC2007	1.76	0.90	51.14
	MODIS2007	3.00	2.95	98.33
	MODIS2008	1.72	0.96	55.82
Wytham	EC2007	17.38	10.29	59.21
	MODIS2007	3.64	2.91	79.94
	EC2008	14.31	11.00	76.87
	MODIS2008	2.83	2.69	95.06
	MODIS2009	1.29	1.41	109.30
Alice Holt	EC2009	12.34	11.42	92.54
	MODIS2009	3.36	2.98	88.69
	EC2010	10.1	9.53	94.36
	MODIS2010	2.91	2.94	101.03

هم در مشاهدات برج‌های اندازه‌گیری و هم در MODIS مشابه می‌باشد. در ایستگاه Pang Lambourne اگر چه همانند دو ایستگاه مذکور با شروع فصل بهار مقادیر GPP افزایش می‌یابد و در ایام تابستان به حداکثر مقدار خود می‌رسد؛ ولی نکته‌ی حائز اهمیت این است که بر خلاف دو ایستگاه قبلی، روند صعودی GPP آنچنان چشمگیر و مشهود نمی‌باشد. نتایج اندازه‌گیری در طول چهار سال در این ایستگاه در هر دو روش برج‌های اندازه‌گیری و MODIS بیانگر نوسانات GPP از صفر تا حدود هشت میکرومول بر مترمربع در ثانیه می‌باشد که حاکی از تغییرات اندک آن در سرتاسر سال است (شکل ۴).

با پایان فصل تابستان و اواخر ماه سپتامبر مقدار GPP کاهش می‌یابد. این روند در هر دو روش MODIS و برج‌های اندازه‌گیری مشابه می‌باشد. نوسانات فصلی GPP در ایستگاه Wytham هم نشان می‌دهد که همانند Alice Holt در ماه‌های اولیه سال یعنی از ژانویه تا مارس مقادیر اندازه‌گیری شده بسیار جزئی و نادر می‌باشند و با شروع فصل بهار روند GPP صعودی می‌شود و مقدار آن رفته‌رفته افزایش می‌یابد. در فاز اول مقدار GPP به آرامی تا شروع ماه می می‌باشد و سپس در فاز دوم به دنبال رشد سریع و ناگهانی در ماه می است و در نهایت فاز سوم، مرحله‌ی نهایی افزایش تا نیمه‌های تابستان است. این روند



شکل ۴- تغییرات زمانی مقادیر GPP

Figure 4- Changes of GPP values in different times

تنفسی در بوم‌سازگان اتفاق می‌افتد. تنفس، فعالیتی است که به شدت تحت تاثیر دما است و بعنوان تابع نمایی دمای هوا یا خاک در نظر گرفته می‌شود که به صورت معادله ۳ خلاصه می‌گردد (Taylor and Lloyd, 1994).

$$R_{eco} = R_{ref} \times e^{E0((1/T_{ref}) - (T_{air} - T_0))} \quad (3)$$

که در آن T_{ref} معادل ۱۰ درجه سانتی‌گراد، T_0 مقدار ثابت ۴۶/۰۲- درجه سانتی‌گراد، T_{air} دمای هوا، $E0$ انرژی فعال‌سازی و R_{ref} تنفس مرجع اکوسیستمی در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد است. اتفاقات مذکور در منطقه‌ی Pang Lambourne تا حدی کم‌رنگ‌تر است و GPP فاقد نوسانات شدید و مرزبندی محرز فصلی می‌باشد. از جمله دلایل آن می‌توان به نوع کاربری اراضی و اختلاف در میزان پوشش جنگلی اشاره نمود. در ایستگاه‌های Wytham و Alice Holt بیشترین کاربری مربوط به پوشش گیاهی با گونه‌های مختلف جنگلی است در حالیکه در اطراف منطقه جنگلی Pang Lambourne چشم‌اندازی با موزائیک‌های مختلف از قبیل جنگل، مرتع و کشاورزی وجود دارد و صرفاً ۱۰ درصد منطقه به پوشش جنگلی اختصاص دارد. مطالعات (Kia and Milton, 2015) نشان دادند که مقادیر بالای شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI) در نیمه‌ی ماه ژوئن در Wytham متأثر از رشد درختانی مانند بلوط است که منجر به افزایش فعالیت فتوسنتزی می‌شوند. دماهای بالاتر ممکن است شرایط مطلوب‌تری برای فتوسنتز فراهم کند. ظرفیت فتوسنتزی در ماه سپتامبر یعنی قبل از ریزش بیشتر برگ‌ها در ماه‌های اکتبر- نوامبر به شدت کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که پیری برگ‌ها قبل از ریزش آن‌ها به شدت روی ظرفیت فتوسنتزی تاثیر می‌گذارد و بروز این پدیده و کاهش شدید در GPP مخصوصاً ایستگاه‌های Wytham و Alice Holt مشهود می‌باشد. نوسات فصلی که به آن‌ها اشاره گردید در واقع تابعی از وضعیت تابش خورشیدی هستند که تنظیم‌کننده‌ی پارامترهای وابسته از قبیل دما و شرایط نوری می‌باشند که به شدت بر فعالیت‌های فتوسنتز و تنفس گیاهی تاثیرگذار می‌باشند. در هر سه ایستگاه در ماه می اختلاف دمای شب و روز نیز به حداکثر مقدار خود می‌رسد که دقیقاً منطبق با میزان حداکثر GPP در این مناطق است. تابش خورشیدی

نتایج مطالعات در سه ایستگاه مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقادیر GPP به روش MODIS در مناطق جنگلی Wytham و Alice Holt نسبت به برج‌های اندازه‌گیری به مراتب کمتر است و به عبارتی دست کم گرفته می‌شود در حالیکه در ایستگاه Pang Lambourne عکس این قضیه اتفاق افتاده و GPP روش MODIS بیشتر از برج‌های اندازه‌گیری تخمین زده شده است. بر اساس مطالعات انجام شده، در حال حاضر مشاهدات و متغیرهای اندازه‌گیری شده توسط برج‌های شار کربن از دقیق‌ترین و قابل اعتمادترین داده‌های مشاهداتی برجا می‌باشند (Paul et al., 2020). لذا با توجه به این نکته که محدوده اندازه‌گیری شده توسط روش شار تلاطم (وسعت و فاصله) تحت تاثیر پارامترهای خرد اقلیمی مانند سرعت و جهت جریان باد، میزان توربالانس‌های عمودی و گرمای سطح زمین و همچنین میزان زبری پوشش سطح زمین قراردارند، با محصول تولید ناخالص اولیه MODIS مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در ایستگاه‌های مورد مطالعه، افزایش GPP در سه فاز مشاهده می‌گردد. در فاز اول مقدار GPP به آرامی تا شروع ماه می می‌باشد که احتمالاً نتیجه‌ی گسترش و افزایش پوشش گیاهی زمینی و درختان زود برگ‌ده می‌باشد. فاز دوم به دنبال رشد سریع و ناگهانی در ماه می است چونکه بیشتر تاج پوشش جنگلی به مرحله‌ی برگ‌دهی رسیده و فعالیت فتوسنتزی شروع می‌شود. فاز سوم، مرحله‌ی نهایی افزایش تا نیمه‌های تابستان است که علت آن از یک طرف افزایش ظرفیت فتوسنتزی درختانی مانند بلوط، راش، زبان کنجشگ تا نیمه‌ی ژوئن است و از طرفی نتیجه‌ی افزایش تابش خورشید و طول روز می‌باشد؛ بعبارتی دیگر میزان تابش فعال فتوسنتزی (PAR) افزایش می‌یابد. کاهش سریع مقدار GPP با شروع ماه اکتبر اتفاق می‌افتد که دلیل آن پیر شدن و ریزش برگ‌ها است. نوسانات فصلی در جذب CO_2 می‌تواند بیانگر ترکیب تاج پوشش گیاهی و گونه‌های زیر تاج پوشش (اشکوب‌های زیرین) در این مناطق جنگلی باشد که منجر به تغییرات فصلی در فتوسنتز بین گونه‌ها می‌شود. مقادیر GPP و تنفس همگی در فصل تابستان به اوج می‌رسند و تنفس خالص در پاییز و زمستان اتفاق می‌افتند. لازم به ذکر است که بعد از فتوسنتز، دومین جریان بزرگ CO_2 در حین فعالیت‌های

فتوسنتزی ارتباط مستقیمی دارد و با شروع ماه‌های گرم میزان آن روند صعودی به خود می‌گیرد.

بیشترین تاثیر را بر مقادیر شار روزانه CO₂ دارد و درجه حرارت محرکه‌ی قوی برای نوسانات تنفسی R_e می‌باشد. شکل ۵ نشان می‌دهد که میزان تولید GPP با تابش فعال

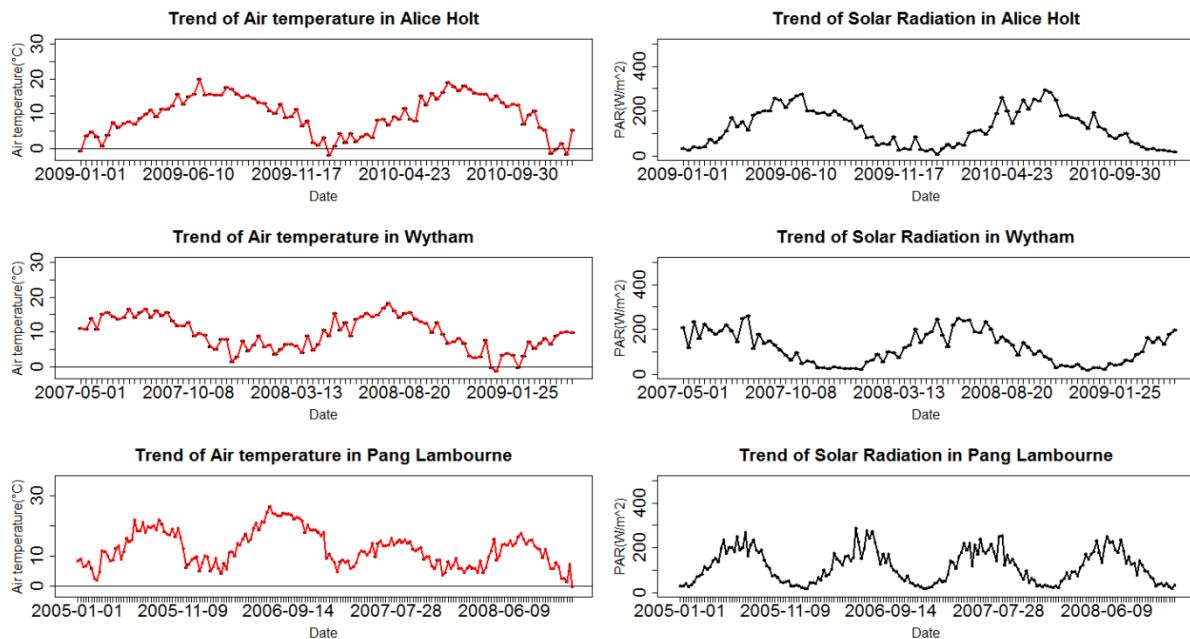


Figure 5- Changes of temperature and PAR in different months of year

شکل ۵- روند تغییرات دمایی و تابش فعال فتوسنتزی در ماه‌های مختلف سال

گذشت ۱۰۰ سال جنگل در وضعیت تعادل و پایدار نمی‌باشند ولی به نظر می‌رسد تغییرات تولید اولیه تحت تاثیر تغییرات تنفسی است که در اثر نوسانات و تغییرات آب و هوایی فصلی به وجود می‌آیند (Savill et al., 2010). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که MODIS-GPP در مقایسه با Flux Tower-GPP کمتر می‌باشد که با نتایج بسیاری از تحقیقات صورت گرفته همخوانی دارد. بعنوان مثال، مطالعات (2015) Gustav در ناحیه‌ی Sahel در قاره‌ی آفریقا هم بیانگر آن است که MODIS-GPP به نسبت کمتر از Flux Tower-GPP می‌باشد. در مطالعه‌ی وی مطرح شده وقتی MODIS-GPP در طول فصل رشد با Flux Tower-GPP مقایسه می‌شود کمتر تخمین زده می‌شود؛ به طوری که در سال ۲۰۱۲ به میزان ۲۵-۳۰ درصد مقدار Flux Tower-GPP در فصل رشد می‌باشد. مطالعه‌ی در خصوص میزان GPP در توده‌های جنگلی کاج داگلاس (*Pinus douglasiana*) در کانادا صورت گرفت و نتایج حاصله، میزان MODIS-GPP را ۳۰ درصد کمتر از برج‌های اندازه‌گیری نشان دادند (Coops et al., 2007).

ایستگاه‌های Wytham و Alice Holt از نظر چشم‌انداز، پوشش و نوع گونه‌های گیاهی شباهت بیشتری دارند و نتایج اندازه‌گیری‌ها نیز بیانگر شباهت کارکردی آن‌هاست؛ از این رو نوسانات فصلی آن‌ها شباهت بیشتری با هم دارند ولی در ایستگاه Pang Lambourne رفتار متفاوت‌تری مشاهده می‌گردد. اگرچه ممکن است مقدار تولید خالص اولیه با سن توده کاهش یابد، جنگل‌های بالغ برگ‌ریز معتدله هنوز به واسطه‌ی تکثیر و تولید طبیعی، تنوع سنی گیاهان و جابجایی گونه‌ها، افزایش احتمالی رشد درختان با حضور CO₂ و تاثیر آن روی میزان فتوسنتز، جوانه‌زنی زودرس و همچنین افزایش دسترسی مواد مغذی پتانسیل جذب کربن را افزایش می‌هند. مطالعات (2011) Thomas et al. نشان می‌دهد مقدار GPP در جنگل Wytham و ترسیب خالص موجودی کربن در مقایسه با بسیاری از جنگل‌های معتدله خزان کننده نسبتاً بالا می‌باشد (جدول ۳). این امر تا حدی می‌تواند نتیجه اقدامات مدیریتی گذشته از قبیل برش انتخابی و شاخه‌زادهایی باشد که حدود ۱۰۰-۴۰ سال گذشته صورت گرفته‌اند. کاملاً محرز است که هنوز بعد از

جدول ۳ - داده‌های شار در جنگل‌های معتدله خزان کننده یا نیمه خزان کننده در مناطق مختلف (Thomas et al., 2011)
 Table 3- Collection of flux data from temperate deciduous or semi deciduous woodland across the globe (Thomas et al., 2011)

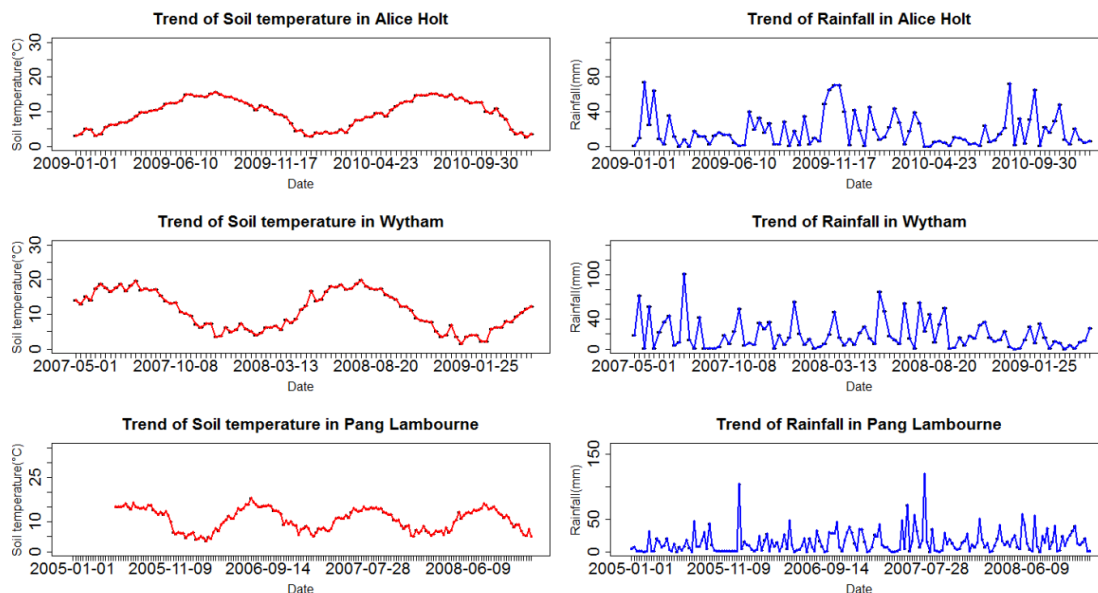
Country	Site	longitude	latitude	Years of data	NEP	GPP	Re	Mean Temp. (°C)	Annual precipitation (mm)
					(Mg C ha ⁻¹ yr ⁻¹)				
Italy	Collelongo	13°35.4'E	41°51'N	1	6.6	13.0	6.4	6.2	1180
Germany	Hainich	10°24'E	51°6'N	2	4.9	15.6	10.7	8.3	992
UK	Alice Holt	0°51.6' W	51°9'N	1	3.8	14.0	10.2	10.5	800
	Harvard								
USA	Forest, New England	72°10'W	42°32'N	13	2.5	14.0	11.5	8.5	1050
	Walker								
USA	Branch, Tennessee	84°17'W	35°57'N	6	2.5	-	-	13.8	1350
France	Hesse	7°4.2'E	48°40.2'N	1	2.3	11.3	9.0	9.2	820
Japan	Tomakomai, National Forest	141°31'E	42°44'N	3	2.1	16.7	14.6	6.2	1040
Denmark	Zealand	11°45'E	55°30'N	2	1.8	13.1	11.2	8.1	510
Canada	Ontario	79°56'W	44°19'N	3	1.7	-	-	6.6	798
	Wytham Woods	1°19.8' W	51°46.2'N	2	1.3	21.1	19.8	9.7	900
China	Laoshan	127°34.7'E	45°16.72'N	1	0.2	14.0	13.8	5.0	640
	Campine								
Belgium	region, De Inslag	4°31' E	51°18'N	5	-0.9	12.4	13.3	9.8	750

می‌باشد. آن‌ها دلایل اختلاف این دو روش را پارامترسازی مدل Penman-Monteith، خطاهای اندازه‌گیری برج‌ها و ردپای کربن برج‌ها در مقایسه با پیکسل‌های MODIS می‌دانند. در مطالعات Gustav (2015) اشاره شده که بزرگ‌نمایی مکانی کم MODIS یکی از دلایلی است که نوسانات GPP را نسبت به برج‌های اندازه‌گیری کمتر نشان می‌دهد. به عنوان مثال، (Friedl et al., 2010) معتقدند که نقشه‌های پوشش گیاهی MODIS حدود ۸۰-۶۵ درصد دقت دارند و البته مناطقی که همگنی بیشتری داشته از دقت بالاتری برخوردارند. از طرفی دیگر، fPAR در الگوریتم GPP برگرفته از MODIS در تفاوت بین GPP برج‌های اندازه‌گیری و MODIS نقش زیادی دارد. بدیهی است که نتایج این تحقیق نیز دقت کمتر MODIS را نسبت به اندازه‌گیری‌ها برج‌ها کاملاً تأیید می‌کند و با مطالعات پیشین کاملاً همخوانی دارد. نتایج مطالعات Thomas et al., (2011) نشان می‌دهد که به موازات افزایش دمای هوا در ماه‌های تابستان، دمای خاک نیز افزایش می‌یابد که جدای از افزایش نرخ تولید ناخالص اولیه، میزان تنفس هم افزایش می‌یابد. در مطالعات Zhao et al., (2006) مشخص شد که هر چه میزان بارندگی بیشتر باشد ارتباط MODIS-GPP و Flux Tower-GPP

نتایج مطالعات قبلی نشان می‌دهد وقتی مقیاس مطالعه را از برج‌های اندازه‌گیری به سطح ناحیه‌ای تعمیم می‌دهیم، عدم قطعیت در نقشه‌های پوشش زمینی منجر به عدم قطعیت در تخمین میزان انتشار کربن می‌شود (Xiao et al., 2012; Nicolini et al., 2018; Teng et al., 2020). مطالعات صورت گرفته توسط Sjostrom et al., (2011) بیانگر آن است که GPP برج‌ها روش دقیق‌تری هستند به شرطی که مناطق اطراف آن همگن و یکنواخت‌تر باشند. با این وجود، می‌توان چنین تصور نمود که یک مشکل در بحث GPP عدم وجود ایستگاه‌های اندازه‌گیری ثابت مانند برج‌های اندازه‌گیری هستند تا بتوان مطمئن شد که داده‌های سنجش از دوری GPP تا چه اندازه دقیق هستند. بروز چنین مشکلاتی ضرورت استقرار ایستگاه‌های ثابت را بیش از پیش ایجاب می‌نماید. لازم به ذکر است که عدم کارایی محصولات MODIS محدود به GPP نمی‌باشد. به عنوان مثال، مطالعه‌ی Ramoelo et al., (2014) در پارک ملی Kruger واقع در آفریقای جنوبی روی میزان تبخیر و تعرق، لزوم استفاده از داده‌های شار تلاطم را در کنار داده‌های MODIS تأکید می‌نماید. نتایج اندازه‌گیری تبخیر و تعرق حاصل از MODIS حاکی از تفاوت آن‌ها با برج‌های اندازه‌گیری

زیرزمینی می‌تواند تاثیر جدی روی میزان انتشارات گازهای CO_2 و CH_4 داشته باشد. در ایستگاه‌های سه‌گانه مورد مطالعه با توجه به نوع اقلیم و موقعیت جغرافیایی‌شان، به طور متوسط سالیانه حدود ۸۰۰ میلی‌متر بارندگی دارند که به طور نسبتاً منظم در طول سال مشاهده می‌گردد. در این ایستگاه‌ها در خصوص تاثیر وضعیت هیدرولوژیکی و میزان بارندگی بر نرخ تولید کربن، ارتباط قوی و موثری همانند دما و تابش فعال فتوسنتزی را نمی‌توان یافت ولی می‌توان اظهار نمود که بیشترین میزان تولید تا حدودی منطبق با ایامی است که بارش کمتری وجود دارد (شکل ۶).

کمتر است و از این رو انتظار همبستگی کمتری در جنگل‌های حاره‌ای نسبت به ساوانا وجود دارد. به طور کلی MODIS-GPP در فصول خشک عملکرد بهتری دارد که البته این موقع از سال نسبت به دوره‌ی رویش و رشد گیاهی از اهمیت کمتری برخوردار است ولی در فصول رشد، GPP کمتر تخمین زده می‌شود. مطالعه Kanniah (2009) در استرالیا نشان داده که ظاهراً وضعیت هیدرولوژی آب‌های سطحی و زیرزمینی، میزان رطوبت دراز مدت خاک و دمای خاک فاکتورهای کلیدی و موثر در نوسانات فصلی تا سالیانه تنفس بوم‌سازگانی و نهایتاً میزان GPP باشند. نتایج مطالعات (Desai et al., 2015) هم نشان داده که تغییرات درازمدت در سطح آب‌های



شکل ۶- بررسی ارتباط دمای خاک و میزان بارندگی با میزان تولید کربن

Figure 6- Comparison of soil temperature and precipitation with amount of carbon production

در بوم‌سازگان‌های ناهمگن و مختلط. به بیان دیگر استفاده و تعمیم یافته با استفاده از محصولات MODIS از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد تا تصویری دقیق و واضحی از عملکرد و کارایی اکوسیستم پدید آورند. بنابراین، در بسیاری از موارد برای دستیابی به اطلاعات دقیق‌تر قابل اعتماد عملیات اعتبارسنجی با استفاده از مشاهدات زمینی صورت می‌گیرد. برج‌های اندازه‌گیری قادرند با تناوب زمانی نیم‌ساعته متغیرهای مختلف محیطی را اندازه‌گیری نمایند. در مطالعه فعلی با استفاده از داده‌های برج‌ها، مدل‌سازی فتوسنتزی به موازات MODIS صورت گرفت که عمدتاً بر مبنای میزان تنفس و تولید ناخالص اولیه

نتیجه‌گیری

طیف وسیعی از محصولات MODIS توسط دانشمندان و محققین علوم مختلف از قبیل محیط‌زیست، هواشناسی، بیولوژی، علوم خاک و زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله این محصولات می‌توان به شاخص‌های سطح برگ، دمای سطح زمین، شاخص پوشش گیاهی، تبخیر و تعرق و میزان تولید بوم‌سازگان اشاره نمود. استفاده از این محصولات و تعمیم یافته‌ها در سطح منطقه‌ای و جهانی به شدت تحت تاثیر نوع پوشش، بزرگ‌نمایی مکانی محصولات MODIS و یا به عبارت دیگر تحت تاثیر مقیاس مکانی قرار می‌گیرند؛ به خصوص

در شرایط خرد- اقلیم می‌تواند برآورد GPP را تحت تاثیر قرار دهد که این از محدودیت‌های سنجنده MODIS محسوب می‌شود. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که بین میانگین داده‌های این دو روش اختلاف معنی‌داری وجود دارد و همانند بسیاری از مطالعات قبلی، MODIS-GPP به دلیل ناهمگنی‌های درون سلولی نسبت به برج‌های اندازه‌گیری از دقت کمتری برخوردارند و مقادیر کمی آن‌ها نسبت به برج‌های اندازه‌گیری دست کم گرفته می‌شوند. این مسئله ضرورت استفاده از روش‌های مکمل از قبیل برج‌های اندازه‌گیری را نمایان می‌سازد. در حال حاضر برج‌های اندازه‌گیری با بیش از ۵۰۰ ایستگاه اندازه‌گیری در بسیاری از نقاط مختلف جهان استقرار دارند که طیف وسیعی از بوم‌سازگان شامل مناطق جنگلی، مرتع، مناطق کشاورزی و تالاب‌ها را دربر می‌گیرند. بدیهی است که استقرار چنین تجهیزاتی در کشور بسیار مفید و حائز اهمیت می‌باشد و می‌تواند افق جدیدی برای محققین و دانشمندان در حیطه‌های مختلف باز نماید و نتایج حاصل از آن می‌تواند نقش موثری در مدیریت منابع طبیعی و سرزمین داشته باشد.

منابع

- Burba, G., Anderson, D. 2010. A brief practical guide to eddy covariance flux measurements: principles and workflow examples for scientific and industrial applications. Li-Cor Biosciences, 214 pp.
- Coops, N.C., Black, T.A., Jassal, R.P.S., Trofymow, J.T., Morgenstern, K. 2007. Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand. *Remote Sensing of Environment*, 107(3): 385-401.
- Desai, A.R., Xu, K., Tian, H., Weishampel, P., Thom, J., Baumann, D., Andrews, A.E., Cook, B.D., King, J.Y., Kolka, R. 2015. Landscape-level terrestrial methane flux observed from a very tall tower. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201: 61-75.
- Friedl, M. A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., Huang, X. 2010. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 168-182.
- Gustav, W. 2015. Remote sensing of GPP in the Sahel using MSG/SEVIRI and MODIS satellite data. M. Sc. thesis. Department of Physical Geography and Ecosystem Science, Lund University.
- Guzy, P., Pietrzycki, D., Świerczewska, A., Sechman, H., Twaróg, A., Góra, A. 2017. Emission Measurements of Geogenic Greenhouse Gases in the Area of "Pusty Las" Abandoned Oilfield (Polish Outer Carpathians). *Journal of Ecological Engineering*, 18(4): 100-109.
- IPCC. 1995. IPCC Second Assessment Synthesis of Scientific. Available on: www.ipcc.ch.
- Kanniah, K. D., Beringer, J., Hutley, L. B., Tapper, N. J., Zhu, X. 2009. Evaluation of Collections 4 and 5 of the MODIS Gross Primary Productivity product and algorithm improvement at a tropical savanna site in northern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 113(9): 1808-1822.
- Kia, S. H. Milton, E. J. 2015. Hyper-Temporal Remote Sensing for Scaling between Spectral Indices and Flux Tower Measurements. *Applied Ecology and Environmental Research* 13(2): 465-487.
- LICOR Environmental News. Available on: www.licor.com.

- ORNL DAAC. 2018. Fixed Sites Subsetting and Visualization Tool. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. Available on: www.modis.ornl.gov.
- Paul, L. E., Wolf, S., Schneider, F.D., Longo, M., Moorcroft, P., Gharun, M. and Damm, A. 2020. Partitioning evapotranspiration with concurrent eddy covariance measurements in a mixed forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 280, p.107786.
- Nicolini, G., Aubinet, M., Feigenwinter, C., Heinesch, B., Lindroth, A., Mamadou, O., Moderow, U., Mölder, M., Montagnani, L., Rebmann, C. and Papale, D. 2018. Impact of CO₂ storage flux sampling uncertainty on net ecosystem exchange measured by eddy covariance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248: 228-239.
- Rabb, B. 2010. Integrated modelling of climate and land use change impacts on groundwater flooding risk in a Chalk catchment. PhD Thesis, Cardiff University.
- Ramoelo, A., Majazi, N., Mathieu, R., Jovanovic, N., Nickless, A., Dziki, S. 2014. Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data in the African savanna, South Africa. *Remote Sensing*, 6(8): 7406-7423.
- Rapson, T. D., Dacres, H. 2014. Analytical techniques for measuring nitrous oxide. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 54: 65-74.
- Rapson, T.D., Dacres, H. 2014. Analytical techniques for measuring nitrous oxide. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 54: 65-74.
- Savill, P. S., Perrins, C. M., Kirby, K. J., Fisher, N. 2010. *Wytham Woods: Oxford's Ecological Laboratory*. Oxford University Press. 282 pp.
- Sjöström, M., Ardö, J., Arne, A., Boulain, N., Cappelaere, B., Eklundh, L., De Grandcourt, A., Kutsch, W.L., Merbold, L., Nouvellon, Y., Scholes, R.J. 2011. Exploring the potential of MODIS EVI for modeling gross primary production across African ecosystems. *Remote sensing of environment*, 115(4):1081-1089.
- Skinner, R.H., Wagner-Riddle, C., Liebig, M.A., Franzluebbers, A.J., Follett, R.F. 2012. Micrometeorological methods for assessing greenhouse gas flux. *Managing agricultural greenhouse gases: coordinated agricultural research through GRACEnet to address our changing climate*. Academic Press, Cambridge, MA, USA, 367-384.
- Steven, W. R., Maosheng, Z. 2015. User's Guide Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm, 28 pp.
- Tagesson, T., Fensholt, R., Cropley, F., Guiro, I., Horion, S., Ehammer, A., Ardö, J. 2015. Dynamics in carbon exchange fluxes for a grazed semi-arid savanna ecosystem in West Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 205: 15-24.
- Teng, D., He, X., Wang, J., Wang, J. and Lv, G. 2020. Uncertainty in gap filling and estimating the annual sum of carbon dioxide exchange for the desert Tugai forest, Ebinur Lake Basin, Northwest China. *PeerJ*, 8, p.e8530.
- Thomas, M. V., Malhi, Y., Fenn, K. M., Fisher, J. B., Morecroft, M. D., Lloyd, C. R., Taylor, M. E., McNeil, D. D. 2011. Carbon dioxide fluxes over an ancient broadleaved deciduous woodland in southern England, *Biogeosciences*, 8: 1595-1613.
- Tokoro, T., Kuwae, T. 2018. Improved Post-processing of Eddy-Covariance Data to Quantify Atmosphere-Aquatic Ecosystem CO₂ Exchanges. *Frontiers in Marine Science*, 5: 286.
- Xianming, D., Yongguo, Y., Jinhui, L. 2018. Estimating Forest Carbon Fluxes Using Machine Learning Techniques Based on Eddy Covariance Measurements. *Sustainability*, 10: 203.
- Xiao, J., Chen, J., Davis, K.J., Reichstein, M. 2012. Advances in upscaling of eddy covariance measurements of carbon and water fluxes. *Journal of Geophysical Research*, 117: 1-4.
- Zhang, K., Gong, Y., Escobedo, F.J., Bracho, R., Zhang, X., Zhao, M. 2019. Measuring Multi-Scale Urban Forest Carbon Flux Dynamics Using an Integrated Eddy Covariance Technique. *Sustainability*, 11: 4335.
- Zhang, L.X., Zhou, D.C., Fan, J.W., Hu, Z.M. 2015. Comparison of four light use efficiency models for estimating terrestrial gross primary production. *Ecological Modelling*, 300: 30-39.
- Zhao, M., Running, S. W., and Nemani, R. R. 2006. Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalysis. *Journal of Geophysical Research*, 111: G01002.



Evaluation of MODIS-based gross primary production by flux tower measurements (Case study: Temperate forests of England)

H. Abbasian¹, E. Solgi², S. M. Hosseini³, S. H. Kia⁴

Received: 03/03/2020

Accepted: 28/08/2020

Abstract

MODIS-based Gross Primary Production (MODIS-GPP) as a proxy of the potential of vegetation cover in the atmospheric carbon sequestration was evaluated using Flux Tower measurements (Flux Tower-GPP) across three sites, broadleaved temperate deciduous woodlands, in the south of England. Ensuing to the normal evaluation of data distribution, the mean value of MODIS-GPP (cell size: 1km²) compared with the Flux Tower-GPP through the Two-Tailed T-Test ($P < 0.05$). A significant difference between two groups, MODIS-GPP vs. Flux Tower-GPP, was found that there is a measurable difference between the groups and that, statistically. The results show that Flux Tower-GPP values for both Alice Holt and Wytham Woods sites are higher than the MODIS-GPP, while in Pang Lambourne the opposite is true due to land cover heterogeneity. The trend of seasonal changes of both groups is the same and the increase of GPP in plant phenology is observable in all sites. GPP values gradually increase to early of May, then a prompt rising observed in May that extend to late of summer which arisen from development of solar radiation, day length and photosynthetic activity. In late of summer, GPP values gradually decrease so that by advent of autumn a rapid decline come about in the early of October that corresponds with senescence and abscission, due to decreasing temperature, which reflects the seasonal variation in terms of carbon uptake. The research finding reveals that the MODIS-GPP alone is unable to estimate accurately the potential of vegetation cover in the atmospheric carbon sequestration due to sub-pixel variability in plant functional type. On the other hand, despite at certain sites the meteorological bias influences estimates of GPP significantly and flux towers provide an excellent means to estimate accurately GPP across their footprint, they are sparse worldwide, even at the regional scale. Thus, the Flux Tower GPP may not truly be used to estimate a continuous GPP map at a larger area. Therefore, Flux Tower and MODIS individually have large uncertainty but their combination as a complementary could result in a robust estimation of GPP.

Keywords: Flux tower, Carbon dioxide, GPP, Ecosystem, MODIS

¹ Ph. D. student of Environmental Pollution, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran

² Associate Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran

(*Corresponding Author Email Address: e.solgi@malayeru.ac.ir)

³ Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modarres University, Noor, Iran

⁴ Division of Environment, Mahabghodss Consulting Engineering Co., Tehran, Iran

نحوه ارجاع مقاله:

عباسیان، ح، سلگی، ع، حسینی، س.م، کیا، س.ح. ۱۳۹۹. ارزیابی تولید اولیه ناخالص سنجنده MODIS با استفاده از برج‌های اندازه‌گیری شار کربن در جنگل‌های معتدله. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۸(۲): ۶۰-۷۲. DOI: 10.22125/agmj.2020.222114.1092

Abbasian, H., Solgi, E., Hosseini, S. M., Kia, S. H. 2020. Evaluation of MODIS-based gross primary production by flux tower measurements (Case study: Temperate forests of England). Journal of Agricultural Meteorology, 8(2): 60-72. DOI: 10.22125/agmj.2020.222114.1092