



Leaf Area Index as an Effective parameter in Ecohydrological processes and Introduction of its Measurement Methods

Elham Davoodi*¹, Mahdi Soleimani Motlagh²

1. Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Khorramabad, Iran
2. Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Received: 03 August 2024/ **Revised:** 03 September 2024/ **Accepted:** 04 September 2024

<https://doi.org/10.22034/arwe.2024.2037417.1022>

Abstract

Measurement of leaf area index (LAI) is of great importance in various scientific fields such as environment, natural resources, plant sciences, agriculture and environment and etc. Leaf area index is one of the most important environmental and ecological parameters; Because the comprehensive and complete information from the leaf area index is useful for extensive analyzes about the performance of plants and the surrounding environment, especially the hydrological and biochemical cycle, and is used as a key criterion in studies related to plant productivity, carbon cycle, and energy balance in ecosystems. In this article, while examining the concepts and importance of leaf area index, various methods of measuring leaf area index are described in detail. Different types of devices and methods used to measure the leaf area index have been examined in detail and the advantages and limitations of each have been stated. This review article can provide researchers and students with important results for choosing the best measurement method based on the study environment and research objectives. Also, suggestions for the development of new methods of measuring the leaf area index and future research in this field have been presented.

Keywords: Canopy Cover, Dimensionless, Hydrological and Biochemical Cycle, Leaf Area Index, Quantity.



شاخص سطح برگ به‌عنوان پارامتر مؤثر در فرآیندهای اکوهیدرولوژیکی و معرفی روش‌های اندازه‌گیری آن

الهام داودی^{۱*}، مهدی سلیمانی مطلق^۲

۱. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران.
۲. گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

دریافت: ۱۳ مرداد ماه ۱۴۰۳ / اصلاحات: ۱۳ شهریور ماه ۱۴۰۳ / پذیرش: ۱۴ شهریور ماه ۱۴۰۳

<https://doi.org/10.22034/arwe.2024.2037417.1022>

چکیده

اندازه‌گیری شاخص سطح برگ (LAI) در زمینه‌های علمی مختلف از جمله زیست‌محیطی، منابع طبیعی، علوم گیاهی، کشاورزی و محیط زیست و ... از اهمیت بالایی برخوردار است. شاخص سطح برگ یکی از مهم‌ترین پارامترهای زیست‌محیطی و اکولوژیکی است؛ زیرا اطلاعات جامع و کامل از شاخص سطح برگ به تحلیل‌های گسترده درباره عملکرد گیاهان و محیط پیرامون، به ویژه چرخه هیدرولوژیکی و بیوشیمیایی کمک شایانی می‌کند و به‌عنوان معیاری کلیدی در مطالعات مربوط به بهره‌وری گیاهان، چرخه کربن و توازن انرژی در اکوسیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، ضمن بررسی مفاهیم و اهمیت شاخص سطح برگ، انواع روش‌های اندازه‌گیری شاخص سطح برگ به تفصیل بیان می‌شود. انواع مختلف دستگاه‌ها و روش‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری شاخص سطح برگ به‌طور دقیق بررسی شده و مزایا و محدودیت‌های هر یک بیان شده‌اند. این مقاله مروری، می‌تواند نتایج مهمی را برای انتخاب بهترین روش اندازه‌گیری بر اساس محیط مطالعه و اهداف تحقیقات به محققان و دانشجویان ارائه دهد. همچنین، پیشنهادهایی برای توسعه روش‌های جدید اندازه‌گیری شاخص سطح برگ و نیز تحقیقات آینده در این زمینه ارائه شده است.

کلمات کلیدی: تاج پوشش، چرخه هیدرولوژیکی و بیوشیمیایی، شاخص سطح برگ، کمیت بدون بعد.

مقدمه

شاخص سطح برگ (Leaf Area Index) برای اولین بار توسط Watson در سال ۱۹۴۷ ارائه شد و طبق تعریف برابر است با مساحت سطح سبز برگ در واحد سطح زمین (Monteith and Unsworth, 1990; Myneni et al, 1997; Chen and Cihlar, 1996). LAI یک پارامتر بحرانی در بسیاری از مدل‌های اقلیمی و اکولوژیکی است و بطور آشکار بر روی مبادلات ماده و انرژی در بین جو و سطح زمین اثر می‌گذارد. بنابراین نمایش دقیقی از تغییرات فصلی و مکانی شاخص LAI می‌تواند باعث بهبود تخمین بیلان آب سطحی شود (Wright et al., 1996; Huete et al., 2006) و در نتیجه موجب بهبود تخمین میزان جنگل‌زدایی و تاثیر گرمایش جهانی در شرایط آب و هوایی منطقه‌ای و جهانی شود (Nobre et al., 2004; Costa and Foley, 2000). پایش طولانی‌مدت LAI می‌تواند به درک بهتر تغییرات و تاثیر آن‌ها در اکوسیستم‌های جنگلی کمک کند و بعنوان نمایانگر میزان استرس در جنگل‌ها باشد (Waring et al, 1985). LAI بسته به نوع گونه‌ی گیاهی، نوع ساختار گیاه، مرحله‌ی رشد گیاه، تغییرات فصلی و شرایط محیطی تغییر می‌کند (Jonckheere, 2004)، در نتیجه می‌توان چنین گفت که یک شاخص دینامیک است زیرا دچار تغییرات روزانه و تغییرات سالانه می‌شود (Welles, 1990). LAI یک کمیت بدون بعد است که تاج پوشش را در اکوسیستم‌های مختلف توصیف می‌کند؛ یک متغیر کلیدی در بسیاری از مدل‌ها محسوب می‌شود (Breda, 2003) و شاخص مناسبی از مساحت برگ‌ها در واحد سطح است که تشعشع نور خورشید برای آن‌ها قابل دسترس است. کاهش در میزان LAI، باعث کاهش در میزان تعرق می‌شود و بر روی چرخه هیدرولوژیکی و بیوشیمیایی تاثیر می‌گذارد، زیرا سطح برگ اولین محلی است که ماده و انرژی در تبادل است و فرایندهای مهمی مانند گیرش گیاهی، فتوسنتز، تبخیر و تعرق و نفوذ مستقیم به LAI بستگی دارند. LAI از طریق کنترل تبخیر و تعرق بر روی بیلان آب تاثیر می‌گذارد و تبخیر و تعرق، تغییرات رطوبت خاک را در شرایط محدودیت آب کنترل می‌کند (Chen et al. 2015). در دهه‌های گذشته تعریف LAI توسط دانشمندان و بسته به هدف مطالعه خود مانند تعیین توالی جوامع جنگلی، شبیه‌سازی پتانسیل فعالیت‌های بیولوژیکی، رژیم تابش خورشید و تاج پوشش گیاهان ارائه می‌کردند. البته به منظور تعیین بهترین و معمول‌ترین تعریف، باید تمام تعاریف موجود را مشخص و با هم مقایسه کرده و بهترین را انتخاب کرد. از جمله مهمترین تعاریف موجود در مورد LAI عبارتند از:

LAI کلی (Total leaf area index): بعنوان اولین تعریف برابر است با مساحت یک طرف برگ به مساحت واحد سطح زمین، LAI کلی بر پایه‌ی مساحت بیرونی برگ‌ها است (Chen and Cihlar, 1996; Watson et al. 1947; Myneni et al. 2002). این تعریف برای گیاهان پهن‌برگ و در شرایطی که مساحت دو طرف برگ یکسان باشد مناسب است که در واقعیت شکل برگ‌ها این گونه نیست. LAI طرح (Projected LAI): سطح افقی زیرین که توسط یک برگ افقی که در فاصله محدودی نسبت به سطح قرار دارد، سایه انداخته است. این تعریف در مناطق بزرگ مقیاس که فاصله بین تاج پوشش و سطح زمین زیاد باشد مناسب است (Myneni et al. 1981; Ross, 2002).

LAI نیمرخ (Silhouette leaf area index): برابر است با مساحت برگی که بصورت مایل قرار دارد به مساحت سطح افقی زمین. LAI نیمرخ را با LAI طرح و LAI کلی به منظور ارزیابی اثر جهت‌یابی برگ بر روی میزان جذب نور مقایسه کردند و نتایج نشان داد که جهت‌یابی متفاوت برگ‌ها منجر به تغییرات زیادی در میزان جذب نور می‌گردد (Smith et al. 1991).

LAI موثر (Effective leaf area index): برابر است با نصف مساحت کل برگ‌ها به مساحت سطح افقی زمین و معمولاً برای تاج پوشش محاسبه می‌شود و فرض می‌گردد که توزیع مکانی تاج پوشش تصادفی است (Chen and Cihlar, 1996; Black et al. 1991). LAI واقعی (True leaf area index): برابر است با نیمی از مساحت کل برگ به مساحت سطح زمین (Monteith and Unsworth, 1996; Myneni et al, 1997; Chen and Cihlar, 1996). این تعریف از جامعیت بیشتری برخوردار است و بطور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است.

تحقیقات زیادی بر روی روش‌های اندازه‌گیری LAI انجام شده است و در هر کدام از این مطالعات با توجه به محدوده‌ی مورد مطالعه و نوع گونه‌ی بررسی و شرایط حاکم بر منطقه، یک روش نسبت به روش‌های دیگر پاسخ مناسب‌تری داشته است. که از آن جمله، چن (Chen, 1996) نشان داد که روش‌های نوری نتایج قابل قبول‌تری نسبت به روش‌های مخرب نمونه‌برداری دارد. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2005) به بررسی استفاده عکسبرداری نیمکره‌ای دیجیتال برای تخمین LAI پرداختند. در این تحقیق از عکسبرداری نیمکره‌ای

برای تخمین LAI و از LAI-2000 برای کالیبراسیون نتایج بدست آمده استفاده کردند. نتایج این بررسی نشان داد که در مورد گیاهان با تراکم بالای تاج پوشش، عکسبرداری نیمکره‌ای مقدار LAI را کمتر از مقدار واقعی بدست می‌آورد. در حالی که در گیاهان با تراکم کم، مقدار LAI بیشتر از مقدار واقعی تعیین می‌شود. چن و همکاران (Chen et al., 2006) مقادیر LAI را در جنگل‌های کانادا بدست آوردند، در این مطالعه برای بدست آوردن LAI از ۳ روش LAI-2000، TRAC و عکسبرداری نیمکره‌ای دیجیتال در ۱۷ منطقه جنگلی استفاده کردند و نتایج حاصل را با هم مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مقادیر بدست آمده از LAI-2000 و TRAC نسبت به عکسبرداری نیمکره‌ای به واقعیت نزدیک‌ترند و خطای بیشتری (حدود ۲۵٪ بیشتر) نسبت به دو روش LAI-2000 و TRAC نشان می‌دهد، اما روش عکسبرداری نیمکره‌ای به نسبت این دو روش ارزانتر است. نیتانی و همکاران (Naithani et al., 2013) به مطالعه‌ی توزیع مکانی گونه‌های درختی غالب در تعامل زمانی و مکانی LAI و رطوبت خاک در طول چشم‌انداز جنگلی پرداختند. در این مطالعه، LAI و رطوبت خاک در یک منطقه جنگلی در پنسیلوانیا در سال ۲۰۱۰ اندازه‌گیری شد و به منظور کمی کردن الگوی تغییرات زمانی و مکانی LAI و رطوبت خاک از الگوی سلسله مراتبی Bayesian و برای بدست آوردن LAI از LI2200 و تصاویر MODIS استفاده شد. مقایسه LAI بدست آمده نتایج نشان داد که شاخص بدست آمده از MODIS محدوده بسیار وسیعی را شامل می‌شود و برای استفاده از آن باید تبدیل مقیاس انجام داد.

روش انجام کار

در این مطالعه که به صورت مروری است، روش کار به صورت مطالعات کتابخانه‌ای است و هدف ارائه‌ی مجموعه‌ی تعاریف مهم و اصلی از LAI در میان طیف وسیعی از تعاریف و لیست کاملی از روش‌های اندازه‌گیری و تخمین این شاخص است. برای این منظور در بسیاری از پایگاه داده‌های معتبر نظیر ScienceDirect، Google Scholar، Elsevier و ... به بررسی و جستجو پرداخته شد. مقالات بسیار زیادی در ارتباط با این موضوع از مجلات معتبری مانند Journal of Hydrology، Remote Sensing of Environment، Hydrological Processes و ... مرور گردید. در این منابع روش‌های بسیار متعددی برای اندازه‌گیری LAI ارائه شده که در این مقاله به جامع‌ترین و پرتکرارترین آن‌ها اشاره گردید.

مروری بر روش‌های اندازه‌گیری و تخمین شاخص سطح برگ

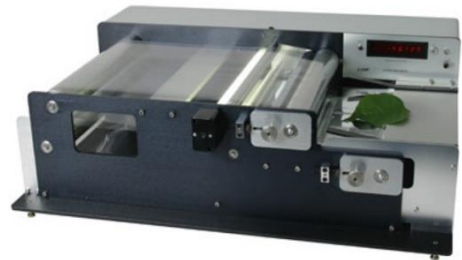
اندازه‌گیری سریع، قابل اطمینان و واقعی LAI در بسیاری از مطالعات هیدرولوژیکی لازم و ضروری است. از اینرو روش‌های بسیار متنوعی برای اندازه‌گیری LAI وجود دارد که روش‌های دقیق، معمولاً پرهزینه و انجام آن‌ها دشوار و منجر به از بین رفتن گیاه می‌شود. بطور کلی روش‌های اندازه‌گیری LAI به دو دسته روش‌های سنتی و روش‌های مدرن تقسیم‌بندی می‌شود. روش‌های سنتی شامل روش‌های مستقیم و غیرمستقیم و روش‌های مدرن شامل استفاده از تکنیک‌های جدید نظیر سنجش از دور می‌باشد (Chen and Black, 1992; Fassnacht et al. 1994; Welles and Cohen, 1996; Gower et al. 1999; Kussner and Mosandl, 2000; Breda, 2003; Jonckheere et al. 2004) که در زیر به چند مورد از مهمترین آن‌ها اشاره شده است.

روش مستقیم

در روش مستقیم از طریق جمع‌آوری برگ‌ها در طول فصل رشد و اندازه‌گیری مساحت آن‌ها در محیط یا در آزمایشگاه یا از طریق ایجاد ارتباط بین بعد و مساحت به کمک ضریب شکل، میزان LAI محاسبه می‌شود که این روش ارزیابی باعث تخریب گیاه می‌شود (Jonckheere et al. 2004). این روش نمونه‌برداری بیشتر برای اکوسیستم‌های گیاهی کم‌ارتفاع مثل چمنزارها، مزارع کشاورزی، مراتع و تندرها مناسب است. مساحت سطح برگ بطور معمول با استفاده از ابزاری مانند Li- Licor، Decagon ceptometer، Nebraska USA 3000 (شکل ۱ و ۲) اندازه‌گیری می‌شود. روش مستقیم اندازه‌گیری LAI دارای یک سری معایبی است مانند تعیین مساحت سطح برگ‌ها در آزمایشگاه کار بسیار پرحتمی است. علاوه بر این، روش اندازه‌گیری مستقیم برای گیاهان تابستانه سبز و گیاهان با ساختار کوچک مناسب است و برای گیاهان همیشه‌سبز مناسب نیست. روش نمونه‌برداری مستقیم اغلب به عنوان یک روش کامل و صحیح برای اندازه‌گیری LAI می‌باشد و به عنوان روشی برای کالیبره کردن نتایج روش غیرمستقیم بکار می‌رود (Cutini et al, 1998).



شکل ۲. دستگاه Decagon Ceptometer
Fig. 2. Decagon Ceptometer



شکل ۱. دستگاه Li-3000
Fig. 1. Li-3000

روش غیرمستقیم

روش غیرمستقیم یک روش غیرمخرب و بر پایه‌ی روش‌های آماری و احتمالاتی است. روش تخمین غیرمستقیم LAI نسبت به روش مستقیم سریع‌تر و راحت‌تر است. این روش بر اساس یک استراتژی استاندارد انجام می‌شود. به این صورت که برای هر پلات و هر سنسوری که بطور سیستماتیک در ترانسکت قرار دارد مقادیر بطور مضاعف خوانده می‌شود. LAI را نیز می‌توان به روش غیراستاندارد بدست آورد؛ در این روش به ازای هر پلات یک نقطه قرائت می‌شود و سپس فاصله و جهت از درخت را استاندارد می‌کنند تا میزان تغییرات را کاهش بدهند. LAI بوسیله‌ی معکوس معادله‌ی نمایی *gap fraction* (Warren Wilson, 1963, Jones, 1992) بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P(\theta) = e^{\frac{-G(\theta, \alpha)LAI}{\cos(\theta)}} \quad (1)$$

که در آن θ زاویه‌ی دید، α زاویه‌ی برگ، $P(\theta)$ *gap fraction* و $G(\theta, \alpha)$ تابع G نامیده می‌شود. روش غیرمستقیم تخمین LAI را می‌توان به ۲ دسته تقسیم‌بندی کرد: الف) روش تماسی غیرمستقیم ب) روش نوری غیرمستقیم.

الف- روش تماسی غیرمستقیم

۱- در مناطق جنگلی، اندازه‌گیری LAI به روش مستقیم از طریق ایجاد ارتباط آلومتری بین میزان مساحت برگ بر درخت و ضخامت درخت تا ارتفاع سینه^۱ صورت می‌گیرد. معادله آلومتریک نشان می‌دهد که ضخامت ساقه بر حسب سطح برگ برابر است با:

$$\log y = a + b \log x \quad (2)$$

که y برابر سطح برگ در واحد مترمربع، x ضخامت ساقه به سانتیمتر در DBH، ضرایب a و b با توجه به نوع گونه‌ی گیاهی، اندازه‌ی درخت، مواد غذایی در دسترس و ... تغییر می‌کنند. زمانی که مقدار صحیح LAI تخمین زده شد نیازمند معادله آلومتری خاص داریم که باید توسعه داده شود.

۲- روش کوادرات نقطه‌ای معمولاً در روش اندازه‌گیری غیرمستقیم LAI استفاده می‌شود. در این روش تاج پوشش گیاهان را با یک خط‌کش تا یک ارتفاع مشخص و زاویه مشخص اندازه می‌گیرند. که تعداد برخورد تاج پوشش گیاه با خط‌کش را محاسبه می‌کنند و LAI را از فرمول زیر مشخص می‌کنند:

$$N_i = L * K_i \quad (3)$$

1. DBH: diameter at breast height

که در آن، N_i تعداد برخورد تاج پوشش گیاه با خط‌کش در ارتفاع h_i کی یک ضریب ثابت است. روش کوادرات نقطه‌ای برای گیاهان با تاج پوشش کم ارتفاع و برگ‌های بزرگ مناسب است اما برای مناطق جنگلی مناسب نیست. در این روش، نیاز به فرض تصادفی بودن برگ‌ها نیست و یک روش غیرمخرب است. این روش برای گونه‌های گیاهی با ارتفاع کمتر از ۱/۵ متر قابل اجرا نیست. برای رفع محدودیت این روش، برخی اصلاحات انجام شد مانند استفاده از لیزر در اندازه‌گیری ارتفاع و تعیین تعداد برخورد تاج پوشش گیاه (Vanderbilt et al, 1979) یا استفاده از وزنه عمودی (Miller and Lin, 1985).

ب- روش نوری غیرمستقیم

در این روش که جزو روش‌های غیرمخرب و پرکاربرد می‌باشد، LAI از طریق اندازه‌گیری میزان پراکنش تاج پوشش محاسبه می‌شود. پراکنش تاج پوشش با استفاده از قانون Beer-Lambert به LAI تبدیل می‌شود (Monsi and Saeki, 1953).

$$L = -\ln\left(\frac{Q_i}{Q_0}\right) / K \quad (4)$$

که در آن K ضریب تخریب ملایم، $\frac{Q_i}{Q_0}$ پراکنش تاج پوشش گیاه، Q برابر است با تشعشع فعال فتوسنتز در تاج پوشش زیرین گیاه (PAR) و Q_0 برابر است با میانگین تشعشع فعال فتوسنتز (PAR) کلی. در قانون Beer-Lambert فرض می‌شود که زاویه شیب برگ کروی مانند بوده و دارای توزیع تصادفی است و شاخ و برگ‌ها در فضا توزیع تصادفی دارند. این روش شامل اندازه‌گیری‌های زمینی و تعیین میزان نور بازتابیده شده بوسیله‌ی رادیومتر یا لیزر است.

در سال‌های اخیر ابزارهای نوین در تخمین غیرمستقیم LAI توسعه پیدا کرده‌اند که این روش‌ها به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: گروه اول که اندازه‌گیری‌ها بر پایه‌ی آنالیز ضریب شکاف (gap fraction) است و در گروه دوم اندازه‌گیری بر پایه‌ی آنالیز اندازه شکاف (gap size). در اندازه‌گیری‌های gap fraction از ابزاری مانند Digital Plant Canopy Imager CI 100، Accupar، Demon و Licor LAI-2000 از طریق مقایسه‌ی مقدار نور اندازه‌گیری شده در بالا و پایین گیاه، مقدار LAI را تخمین می‌زند. در اندازه‌گیری‌های gap size از ابزاری مانند Tracing Radiation Architecture of Canopies و hemispherical photography استفاده می‌شود. مطالعات نشان داده است که نتایج حاصل از استفاده از این ابزار بسیار موثر و واقعی است (Welles, 1990). از جمله پرکاربردترین روش‌های اندازه‌گیری LAI می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

LAI-2000-

یکی از ابزارهایی است که بطور معمول برای تخمین LAI از طریق اندازه‌گیری gap fraction استفاده می‌کند (شکل ۳). این دستگاه قابل حمل بوده و بسیار سریع مقدار LAI را تخمین می‌زند. این دستگاه در مورد گیاهان همگن نتایج بسیار خوبی ارائه داده است. در استفاده از این دستگاه، اندازه‌گیری‌ها باید در شرایط آسمان ابری یا در نزدیکی غروب آفتاب یا طلوع آفتاب باشد. مطابق با دستورالعمل 2002 Chen et al. اصلی‌ترین ابزار در اندازه‌گیری LAI موثر، LAI-2000 می‌باشد البته با پیشرفت تکنولوژی و ارائه‌ی ابزارهای جدید اندازه‌گیری، روش عکسبرداری نیمکره‌ای دیجیتال (DHP) بعنوان روشی مناسب در اندازه‌گیری LAI پیشنهاد می‌شود (Zhang et al. 2005).



شکل ۳. دستگاه LAI-2000

Fig. 3. LAI-2000

– عکسبرداری تاج پوشش نیمکره‌ای^۱

در این روش عکس‌ها بوسیله‌ی یک لنز نیمکره‌ای تهیه می‌شوند. عکس‌های نیمکره‌ای یا عکس fish-eye یک دید کاملی از آسمان ارائه می‌دهند (شکل ۴). در واقع از الگوی نور جذب شده توسط گیاه، عکسبرداری می‌شود (Nilson, 1999; Ross, 1981; Chen et al. 1996). عکس‌های نیمکره‌ای برای پایش طولانی‌مدت تغییرات LAI در مناطق نیمه‌خشک بسیار موثرند (Zhang et al. 2005). از جمله مزیت‌های این روش می‌توان به قدرت تفکیک مکانی بالا، مناسب برای تشریح نحوه‌ی توزیع شاخ و برگ گیاهان در زاویه‌های متفاوت اشاره کرد. البته توسعه‌ی کامپیوترها و استفاده از نرم‌افزارها امکان استفاده تصاویر نیمکره‌ای را افزایش داده است. در مقایسه با LAI-2000، تصاویر نیمکره‌ای می‌توانند جزئیات و اطلاعات بیشتری در مورد تاج پوشش ارائه بدهند. البته دقت تصاویر نیمکره‌ای بستگی به تنظیمات دوربین مورد استفاده دارد. عکس‌های نیمکره‌ای با فرمت JPEG دارای ۳ کانال ۸ بیتی قرمز، سبز و آبی هستند و محدوده‌ی (Digital Number) DN آنها بین ۰ تا ۲۵۵ متغییر است.



شکل ۴. عکس برداری نیمکره‌ای

Fig. 4. Hemispheric imaging

– ابزار TRAC^۲

از نوع روش غیرمستقیم می‌باشد و برای استفاده از این ابزار فرد آنرا در دست گرفته و در طول مسیر با گام‌های یکنواخت حرکت می‌کند. این دستگاه توزیع Gap size تاج پوشش و Gap fraction تاج پوشش را محاسبه می‌کند (شکل ۵). با استفاده از داده‌های بدست آمده از TRAC می‌توان LAI موثر و LAI واقعی را محاسبه کرد. با استفاده همزمان از TRAC و LAI-2000 می‌توان مقدار LAI را با سرعت بالا و دقت زیاد تعیین کرد (Jonckheere et al, 2004). مطابق با دستورالعمل Chen et al. 2002 در اندازه‌گیری شاخص تراکم (Ω_E)، استفاده از TRAC مهمترین وسیله اندازه‌گیری است. البته استفاده از روش عکسبرداری نیمکره‌ای دیجیتال (DHP: digital hemispherical photography) روش دیگری است که دقت کمتری نسبت به TRAC دارد (Leblanc et al. 2005).



شکل ۵. دستگاه TRAC

Fig. 5. TRAC

- روش هیبرید^۱

MVI^۲ یکی از جدیدترین ابزار نوری است که به وسیله یک فیلتر که بر روی دوربین سوار است، تغییرات را در دو باند طیفی ۴۰۰-۶۲۰ nm و ۷۲۰-۹۵۰ nm بررسی می‌کند. بواسطه بررسی این دو باند طیفی، MVI قادر به جداسازی بخش‌های متفاوت پوشش گیاهی در یک تصویر است. این روش قابلیت عکس‌برداری با ریزولوشن بسیار بالا را دارد (Welles and Cohen, 1996).

- روش‌های وزنی^۳

این روش مقدار LAI را بصورت غیرمستقیم و در طول فصل رشد تخمین می‌زند. مزیت روش وزنی عبارتند از در تراکم بالای گیاهان مانند سایر روش‌های غیرمستقیم دارای محدودیت نیست، زمانی که از روش‌های مستقیم استفاده می‌شود بعثت مخرب بودن باعث ایجاد تغییر در ساختار گیاهان می‌شود (Aschonitis et al, 2014). روش وزنی بر پایه‌ی ارتباط بین وزن خشک برگ و مساحت برگ با استفاده از تعیین نسبت مساحت سبز برگ به وزن خشک برگ محاسبه می‌شود (Jonckheere et al. 2004; Gratani and Bombelli 2000) که این روش برای گیاهان یکساله مناسب نیست. در این روش سطح برگ‌ها بوسیله‌ی سیلندرهایی با قطر معین بریده و سپس توزین و تعداد آن‌ها شمارش و سطح آن‌ها با توجه به قطر هر کدام مشخص می‌شود و از طریق وزن به سطح برگ می‌رسند.

- تکنیک پلانیمتر^۴

این تکنیک بطور گسترده برای اندازه‌گیری LAI در گیاه برنج استفاده می‌شود و بر پایه‌ی ارتباط بین مساحت برگ اندازه‌گیری شده توسط پلانیمتر و مساحتی که توسط برگ در سطح افقی پوشیده شده است، می‌باشد. روش مخرب پلانیمتر بسیار دقیق است و بطور معمول بعنوان پایه و اساس برای صحت‌سنجی و اعتبارسنجی دیگر روش‌ها بکار می‌رود اما اجرای این روش در مقیاس بزرگ کار بسیار سختی است (Jonckheere et al. 2004).

- دستگاه فتوالکترونیک

در این روش برگ را بین یک منبع نور و سلول نوری قرار داده و از روی کاهش بازده سلول نوری سطح برگ اندازه‌گیری می‌شود. دقت این روش به مسطح بودن برگ‌ها و همچنین عمود بودن برگ بر جهت نور دارد.

- تصاویر استاندارد برگ

در این روش با تطبیق عینی برگ‌ها با برگ‌های استاندارد و شمارش آن‌ها با تقریب قابل قبول سطح به دست می‌آید ولی نتیجه کار به تبحر محقق بستگی زیاد دارد. در این روش، کار طولانی است و در مزرعه صورت می‌گیرد؛ اما برگ‌ها از بین نمی‌روند. پیشنهاد شده که برگ‌های استاندارد باید شکل سری‌های عددی را نداشته باشد بلکه باید به صورت لگاریتمی باشند. این روش معایبی از جمله اشتباه به هنگام قضاوت و یا هنگام گروه‌بندی مساحت‌های برگ را دارد، ولی دارای مزایایی از جمله جلوگیری از هدر رفتن برگ در مزرعه و اندازه‌گیری نسبتاً دقیق سطح برگ توسط افراد مجرب می‌باشد (اکبری، ۱۳۷۰).

- دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (LAM)

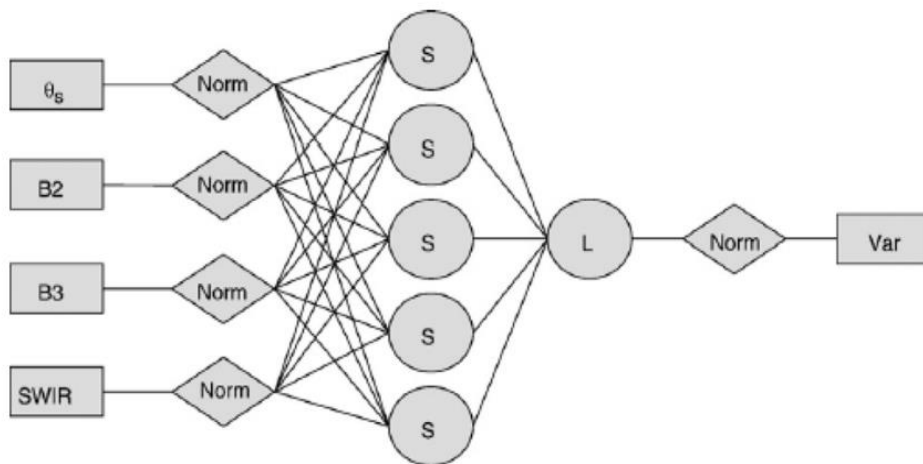
در حال حاضر روش فوق معمول، رایج و دقیق می‌باشد. در این روش برگ را از گیاه جدا کرده و بایستی بلافاصله به آزمایشگاه منتقل و سطح آنرا اندازه‌گیری نمود. اندازه‌گیری سطح برگ با این روش بسیار دقیق بوده اما هزینه آن بسیار زیاد است و فقط در مراکز تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما در این روش زمان زیادی صرف می‌شود و یک روش مخرب است چرا که برگ‌ها از گیاه جدا می‌شود.

۱- روش RTM^۱

تئوری انتقال بازتابش به‌عنوان یک روش مدل‌سازی شناخته شده و به‌طور وسیع در مدل‌سازی سطح زمین به‌کار برده می‌شود. تعامل بین گیاهان دائمی و نور خورشید شامل فرایند جذب و پراکندگی است در نتیجه روش RTM درباره‌ی فیزیک جوی و انتقال ذرات مطالعه می‌کند. از مزیت‌های عمده این روش اینست که در مورد گونه‌های گیاهی همگون بسیار حائز اهمیت است علی‌الخصوص در باند میکروویو و مادون قرمز. راهنمای کلی در مورد RTM توسط Ross (۱۹۸۱) ارائه شده است.

۲- شبکه عصبی^۲

شبکه عصبی روش محاسباتی کارآمد و قابل آموزش محسوب می‌شود که می‌تواند بین پارامترها حداکثر همبستگی را ایجاد نماید. شبکه عصبی می‌تواند در توابع غیرخطی پیچیده به‌عنوان یک راهکار موثر و کارآمد به‌کار برده شود. مطالعات نشان داد که شبکه عصبی را با داده‌های مشاهده‌ای آموزش می‌دهند که دقت بالایی مانند نتایج حاصل از مدل‌ها ارائه می‌دهد. با استفاده از شبکه عصبی می‌توان مقادیر LAI کلی را بدست آورد (شکل ۶).



شکل ۶. ساختار شبکه عصبی برای بدست آوردن LAI

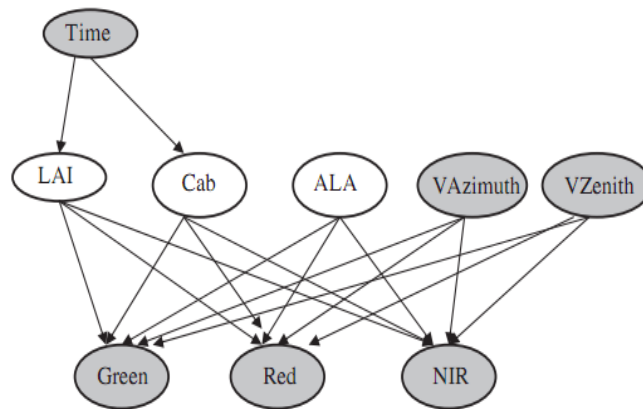
Fig. 6. Neural network structure to obtain LAI

۳- الگوریتم ژنتیک^۳

الگوریتم ژنتیک بدنبال کمینه‌سازی توابع با استفاده از روش شباهت انتخاب طبیعی و تکامل (Davis, 1991; Goldberg, 1989). در این روش راه حل از ترکیب کروموزوم‌های N ژنی (پارامتر). جمعیت کروموزوم‌ها (تعداد راه حل‌های موجود) برای تکرارهای بعدی نگه‌داشته می‌شوند. راه حل‌های جدید از ترکیب راه حل‌های موجود ایجاد می‌شود. راه حل بهینه از طریق تکرار تولید کروموزوم‌ها انتخاب و راه حل نامناسب کار گذاشته می‌شود. به منظور استفاده از الگوریتم ژنتیک در تخمین LAI از داده‌های ETM+ و نرم‌افزار GENESIS استفاده می‌شود.

۴- شبکه بی‌زین^۴

الگوریتم بی‌زین به‌طور گسترده در ژئوفیزیک استفاده می‌شود. به‌منظور بدست آوردن پارامترهای سطح زمین بر پایه‌ی داده‌های سنجش از دور پارامترهای سطح زمین و داده‌های مشاهده شده به‌عنوان پارامترهای تصادفی در نظر گرفته می‌شوند. شبکه‌ی بی‌زین مجموعه‌ای از علوم گرافیک و احتمالات است (شکل ۷).



شکل ۷. مدل شبکه‌ی بیزین برای به‌دست آوردن LAI
Fig. 7. Bayesian network model to obtain LAI

- روش جدول استاندارد^۱

جدول استاندارد داده‌های منظم‌شده به همراه آیت‌های محاسبه شده هستند که نشان‌دهنده‌ی تطابق ورودی‌ها و خروجی‌هاست. هدف از این جدول استاندارد جایگزینی فرایندهای محاسباتی پیچیده با روش‌های ساده‌تر است. جدول استاندارد بین بازتابش پوشش گیاهی و مقادیر پارامترهای گوناگون ارتباط برقرار می‌کند. مانند نظریه هندسه، پارامترهای ساختاری پوشش گیاهی، بازتابش برگ و پیش‌زمینه خاک و ویژگی‌های آن. جدول استاندارد معمولاً برای پارامترهای بزرگ و شبیه‌سازی مدل‌های معکوس محاسبه می‌شوند.

- روش‌های آماری

سنجش رادیومتری طیفی نشان می‌دهد که پارامترهای سطحی مانند LAI به رادیومتری طیفی وابسته‌اند؛ بنابراین LAI را می‌توان با اطلاعات رادیومتری به‌وسیله‌ی روابط تجربی یا مدل‌سازی فیزیکی تخمین زد. اخیراً در مطالعات مربوط به LAI به‌جای استفاده از روش‌های آماری و تجربی به‌دنبال استفاده از مدل‌های فرآیندمحور هستند که شامل داده‌های سنجش از دور و مدل‌های اکولوژیکی عددی می‌باشند.

- روش‌های ترکیب داده

بسیاری از روش‌ها و مدل‌ها برای تخمین LAI بر پایه‌ی داده‌های سنجش از دور و بر پایه‌ی رابطه‌ی بین LAI و شاخص‌های گیاهی توسعه پیدا کرده‌اند.

- روش‌های سنجش از دور

روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری و تخمین LAI وجود دارد که به تعدادی از مهمترین آن‌ها اشاره شد. روش‌های مستقیم اگرچه دقت بالایی دارند اما در برخی مناطق قابلیت اجرا ندارند و در مقایسه با روش‌های تخمین نوری نیاز به هزینه و زمان بیشتری دارند. روش‌های غیرمستقیم، از طریق استفاده از یک سری روابط و ابزار مقادیر LAI را با دقت و سرعت مناسب تخمین می‌زنند. در روش‌های سنجش از دور به‌صورت غیرمستقیم مقادیر LAI را تخمین می‌زنند. در روش سنجش از دور از آنالیز تصاویر ماهواره‌ای یا رادیومتری چندطیفی استفاده می‌شود. در مقایسه با روش‌های زمین مرجع، روش‌های سنجش از دور شرایطی را فراهم می‌کند که برای مناطق با مقیاس بزرگ بتوان مقادیر LAI را با دقت زمانی و مکانی بالا تخمین بزنیم. برای این منظور در اکثر موارد از شاخص‌های گیاهی^۲ استفاده می‌شود. شاخص NDVI بیشترین همبستگی را با LAI دارد که اولین بار توسط Rouse^۳ و همکاران در سال ۱۹۷۳ به آن اشاره شد.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (5)$$

1. Look-up Table Methods
2. Vegetation in Running dices
3. Rouse

که ρ_{RED} و ρ_{NIR} نشان‌دهنده‌ی انعکاس طیفی قرمز و مادون قرمز هستند. در واقع این شاخص‌ها تفاوت درخشندگی بین پوشش گیاهی و خاک را بالا می‌برد. در جدول ۱ لیستی از انواع شاخص‌های گیاهی که با LAI در ارتباطند ارائه شده است.

جدول ۱. شاخص‌های گیاهی مرتبط با LAI
Table 1. Vegetation index related to LAI

شاخص‌های گیاهی	فرمول	رفرنس
Simple ratio (SR)	ρ_{NIR}/ρ_{RED}	Jordan, 1969
Infrared simple ratio (ISR)	ρ_{NIR}/ρ_{SWIR}	Fernandes et al. 2003
Difference vegetation index (DVI)	$\rho_{NIR} - \rho_{RED}$	Tucker, 1979
Enhanced vegetation Index (EVI)	$\frac{2.5(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{1 + \rho_{NIR} + (6\rho_{RED} - 7.6\rho_{BLUE})}$	Huete et al. 1994

هر کدام از این شاخص‌ها را بوسیله‌ی تصاویر ماهواره‌ای مانند MODIS (Running et al., 2004)، TM Landsat (Turner et al., 1999)، Landsat ETM+ یا سنجنده‌ی hyperspectral که بر روی هواپیما یا ماهواره‌ی AVIRIS، CASI (Lee et al., 2004) و Hyperion (Bulcock and Jewitt, 2010) قرار می‌گیرد و از طریق ایجاد ارتباط تجربی بین شاخص‌های گیاهی و مقادیر مشاهده شده LAI و مقادیر محاسبه شده LAI، مقدار LAI را محاسبه می‌کنند. مقادیر بدست آمده LAI بستگی به نوع شاخص گیاهی، نوع پوشش گیاهی و شرایط آزمایشگاهی دارد. مهمترین مزیت این روش‌ها سادگی و سهولت در محاسبه است اما مهمترین محدودیت این روش در اینست که در مورد همه گونه‌های گیاهی قابلیت استفاده نداشته چون این روابط دارای ضرایب تجربی بوده و هر کدام از این ضرایب مختص یک گونه گیاهی است. برای این منظور باید ضرایب تجربی را برای تمامی گونه‌های گیاهی تهیه کرد و توسعه این معادلات در سطح گسترده نیاز به اندازه‌گیری دقیق LAI و ایجاد ارتباط آن با داده‌های سنجنش از دور دارد.

LAI جهانی و LAI منطقه‌ای

به‌دنبال پرتاب ماهواره‌ها به فضا، داده‌هایی به دست آمده که دارای ریزولوشن زمانی و مکانی متفاوتی هستند و اهمیت بسیار زیادی در به‌دست آوردن LAI جهانی دارند. این داده‌ها در تولید LAI جهانی به‌کار برده می‌شود مانند MODIS LAI که از ماهواره‌ی TERRA-AQUA به‌دست می‌آید و از سال ۲۰۰۰ به بعد داده‌برداری انجام می‌دهد. دو نوع دیگر از LAI جهانی توسط سنجنده‌ی SPOT/VEGETATION تولید می‌شود. (GLOBECARBON LAI و CYCLOPES LAI). ECOCLIMAP LAI از داده‌های NOAA/AVHRR NDVI مشتق می‌شود. برخی از LAI‌های با محدودیت زمان و محدودیت پوشش مانند POLDER LAI از ماهواره‌ی MERIS LAI به‌دست می‌آید.

MODIS LAI-

MODIS LAI به‌وسیله‌ی ماهواره‌ی TERRA-AQUA که از سال ۲۰۰۰ به فضا پرتاب شد، تولید می‌گردد. LAI تولیدی توسط این ماهواره کاربردهای بسیار زیادی دارد. به‌واسطه‌ی پیشرفت مداوم، پنجمین ورژن این ماهواره، بر پایه‌ی LAI توسعه پیدا کرد. این تصاویر دقت مکانی ۱ کیلومتر و دقت زمانی ۸ روز دارند. این تصاویر را می‌توان از وب سایت ORNL-DAAC به آدرس https://lpdaac.usgs.gov/get_data/ تهیه کرد.

CYCLOPES LAI-

CYCLOPES LAI پروژه‌ی FP5 اتحادیه اروپا، به‌وسیله‌ی CNES حمایت می‌شود. CYCLOPES LAI بسیار مؤثر در بدست آوردن LAI است و به‌وسیله‌ی سنجنده‌ی SPOT و VEGETATION از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۷ تولید می‌شود.

GLOBECARBON LAI-

توسط LAI GLOBECARBON LAI با دقت زمانی ۱ ماه به‌دست می‌آید که به‌وسیله‌ی سنجنده‌ی ATSR و VEGETATION در طی

دوره‌ی ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۷ تهیه می‌شود. در این حالت، گیاهان به دو دسته‌ی جنگلی و غیرجنگلی طبقه‌بندی می‌شوند. مطابق با نوع پوشش گیاهی متفاوت الگوریتم GLOBECARBON LAI برپایه‌ی رابطه‌ی بین باندهای قرمز، فروقرمز و مادون قرمز ایجاد می‌شود.

ECOCLIMAP LAI-

مجموعه داده‌ی ECOCLIMA میانگین مقادیر فیزیکی و بیولوژیکی متغیرها را به منظور شبیه‌سازی عناصر سطح زمین، مانند LAI فراهم می‌کند. برپایه‌ی الگوی طبقه‌بندی جهانی، داده‌های ECOCLIMAP به ۱۵ گروه پوشش گیاهی بزرگ تقسیم می‌شوند. برای هر طبقه از پوشش گیاهی تغییرات LAI به‌وسیله‌ی بازدید میدانی تعیین می‌شود. برای هر پیکسل در شبکه‌ی ECOCLIMAP، NDVI بر پایه‌ی ماهانه با پیکسل‌های متناظر آن که حاصل از NOAA/AVHRR می‌باشد ترکیب می‌شود. مزیت مهم این روش تغییرات مکانی اندک LAI برای هر گونه‌ی گیاهی است.

GLASS LAI-

GLASS LAI دارای دقت زمانی ۸ روز است و از ۱۹۸۵ به بعد دارای داده است. از سال ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۹ LAI به‌وسیله‌ی AVHRR با دقت مکانی ۵ کیلومتر و از سال ۲۰۰۰ به بعد بوسیله‌ی MODIS (MOD09A1) با دقت مکانی ۱ کیلومتر تهیه می‌شود.

CCRS LAI-

CCRS LAI از سنجنده‌ی SPOT/VEGETATION به‌دست می‌آید. این داده‌ها توسط نمونه‌برداری زمینی نرمال می‌شوند.

-تصاویر RapidEye

به منظور به‌کار بردن داده‌های ماهواره‌ای در مانیتورینگ و بررسی تغییرات، به تصاویر با دقت زمانی و مکانی بالا نیاز است. RapidEye با ریزولوشن بالا امکان بررسی تغییرات را فراهم می‌کند. RapidEye محدوده‌ی وسیعی را در حدود ۷۷ کیلومتر شامل شده و دقت زمانی ۱ روز و دقت مکانی ۵ متر دارد. با استفاده از ترکیب داده‌های بدست آمده از RapidEye با داده‌های SPOT و Landsat می‌توان مقدار LAI را با دقت بالایی تخمین زد. از RapidEye در بدست آوردن LAI توسط Kross و همکاران در سال ۲۰۱۵ ارائه شده است.

-airborne laser scanning

سیستم تصویربرداری لیزری که معمولاً با نام LiDAR خوانده می‌شود، دقت مکانی بسیار بالایی داشته و توانایی اندازه‌گیری در شرایط هوایی ابری را دارد (Cook et al., 2009; Lee et al., 2009). LiDAR یک تکنولوژی سنسجش از دوری است و پلتفرم‌های LiDAR به ۳ گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: ۱- زمین محور؛ ۲- هوابرد و ۳- فضابرد. با استفاده از تکنیک LiDAR می‌توان نقشه‌ی DEM را با دقت بسیار بالا برای مناطق مختلف تهیه کرد (Rose et al, 2013; Lefsky et al., 2002). با استفاده از این تکنیک در مکان‌هایی که سایر روش‌های تعیین LAI کارایی ندارد، مقادیر LAI با دقت بسیار بالا تخمین زده می‌شود (Dolan et al, 2011; Korhonen, 2011; Zhao et al, 2011). همچنین قابلیت مانیتورینگ فرآیندهای هیدرولوژیکی را نیز دارد (Lang and McCarty, 2009).

نتیجه‌گیری

در این مقاله، مرور جامعی بر روش‌های مختلف اندازه‌گیری شاخص سطح برگ ارائه شد. ما به بررسی و مقایسه انواع مختلف دستگاه‌ها و روش‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری سطح برگ پرداختیم و مزایا و محدودیت‌های هر کدام را بررسی کردیم. نتایج حاصل از این مرور نشان داد که هر روش دارای ویژگی‌ها و کاربردهای خاص خود است و استفاده از یک روش خاص باید با در نظر گرفتن شرایط خاص مطالعه و اهداف تحقیق تعیین شود. برخی از روش‌های اندازه‌گیری شاخص سطح برگ مناسب برای تحقیقات میدانی و برخی از آن‌ها برای استفاده در مطالعات آزمایشگاهی بهینه‌اند. پیشنهاد می‌شود که پژوهشگران قبل از انتخاب روش مناسب، شرایط محیطی، هزینه‌ها و هدف نهایی تحقیقات خود را به دقت بررسی کنند. علاوه بر این، با افزایش نیازهای تحقیقاتی در زمینه شاخص سطح برگ، توصیه می‌شود که تحقیقات آتی بر روی بهبود و توسعه روش‌های اندازه‌گیری نیز تمرکز شود. همچنین، مطالعات بیشتری برای ارزیابی دقیق‌تر کارایی روش‌های مختلف اندازه‌گیری و ارتباط آنها با متغیرهای محیطی و زیستی پیشنهاد می‌شود.

منابع

- Akbari, Gh. (1991). Investigating the effects of plant density and planting arrangement on growth, yield and yield components of corn in Isfahan. Master's thesis in agriculture. Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. (In Persian).
- Aschonitis, V. G., Papamichail, D. M., Lithourgidis, A., & Fano, E. A. (2014). Estimation of leaf area index and foliage area index of rice using an indirect gravimetric method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(13), 1726-1740.
- Black, T. A., Chen, J. M., Lee, X., & Sagar, R. M. (1991). Characteristics of shortwave and longwave irradiances under a Douglas-fir forest stand. *Canadian Journal of Forest Research*, 21(7), 1020-1028.
- Bréda, N. J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of experimental botany*, 54(392), 2403-2417.
- Bulcock, H. H., & Jewitt, G. P. W. (2010). Spatial mapping of leaf area index using hyperspectral remote sensing for hydrological applications with a particular focus on canopy interception. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(2), 383-392.
- Chen, J. M., Black, T. A., & Adams, R. S. (1991). Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand. *Agricultural and forest meteorology*, 56(1-2), 129-143.
- Chen, J. M., & Black, T. A. (1992). Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment*, 15(4), 421-429.
- Chen, J. M. (1996). Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 80(2-4), 135-163.
- Chen, J. M., & Cihlar, J. (1996). Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote sensing of Environment*, 55(2), 153-162.
- Chen, J. M., Pavlic, G., Brown, L., Cihlar, J., Leblanc, S. G., White, H. P., ... & Pellikka, P. K. E. (2002). Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements. *Remote sensing of environment*, 80(1), 165-184.
- Chen, J. M., Govind, A., Sonnentag, O., Zhang, Y., Barr, A., & Amiro, B. (2006). Leaf area index measurements at Fluxnet-Canada forest sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140(1-4), 257-268.
- Chen, M., Willgoose, G. R., & Saco, P. M. (2015). Investigating the impact of leaf area index temporal variability on soil moisture predictions using remote sensing vegetation data. *Journal of Hydrology*, 522, 274-284.
- Cook, B. D., Bolstad, P. V., Næsset, E., Anderson, R. S., Garrigues, S., Morissette, J. T., ... & Davis, K. J. (2009). Using LiDAR and quickbird data to model plant production and quantify uncertainties associated with wetland detection and land cover generalizations. *Remote Sensing of Environment*, 113(11), 2366-2379.
- Costa, M. H., & Foley, J. A. (2000). Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia. *Journal of Climate*, 13(1), 18-34.
- Cutini, A., Matteucci, G., & Mugnozza, G. S. (1998). Estimation of leaf area index with the Li-Cor LAI 2000 in deciduous forests. *Forest Ecology and Management*, 105(1-3), 55-65.
- Davis, M. M. S. F. L. (1991). Handbook of Genetic Algorithms. New York: Van Nostrand Reinhold. *Santa Fe*.
- Dolan, K. A., Hurr, G. C., Chambers, J. Q., Dubayah, R. O., Frolking, S., & Masek, J. G. (2011). Using ICESat's Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) to assess large-scale forest disturbance caused by hurricane Katrina. *Remote Sensing of Environment*, 115(1), 86-96.
- Goldberg, D. E. (1989). Genetic algorithms in search. *Optimization, Machine Learning*.
- Fassnacht, K. S., Gower, S. T., Norman, J. M., & McMurtric, R. E. (1994). A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71(1-2), 183-207.
- Fernandes, R., Butson, C., Leblanc, S., & Latifovic, R. (2003). Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ based accuracy assessment of leaf area index products for Canada derived from SPOT-4 VEGETATION data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(2), 241-258.
- Fournier, R. A., Landry, R., August, N. M., Fedosejevs, G., & Gauthier, R. P. (1996). Modelling light obstruction in three conifer forests using hemispherical photography and fine tree architecture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 82(1-4), 47-72.
- Gratani, L., & Bombelli, A. (2000). Correlation between leaf age and other leaf traits in three Mediterranean maquis shrub species: *Quercus ilex*, *Phillyrea latifolia* and *Cistus incanus*. *Environmental and experimental botany*, 43(2), 141-153.
- Gower, S. T., Kucharik, C. J., & Norman, J. M. (1999). Direct and indirect estimation of leaf area index, f_{PAR} , and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 70, 29-51.
- Huete, A., Justice, C., & Liu, H. (1994). Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of environment*, 49(3), 224-234.
- Huete, A., Justice, C., & Liu, H. (1994). Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of environment*, 49(3), 224-234.

- Huete, A. R., Didan, K., Shimabukuro, Y. E., Ratana, P., Saleska, S. R., Hutyra, L. R., ... & Myneni, R. (2006). Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical research letters*, 33(6).
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and forest meteorology*, 121(1-2), 19-35.
- Jones, H. G. (1992). Plants and microclimate. 2nd edn. *Cam-bridge University Press, Cambridge, UK*.
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50(4), 663-666.
- Korhonen, L., Korpela, I., Heiskanen, J., & Maltamo, M. (2011). Airborne discrete-return LIDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 1065-1080.
- Küßner, R., & Mosandl, R. (2000). Comparison of direct and indirect estimation of leaf area index in mature Norway spruce stands of eastern Germany. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(3), 440-447.
- Kross, A., McNairn, H., Lapen, D., Sunohara, M., & Champagne, C. (2015). Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34, 235-248.
- Lang, M.W., & McCarty, G.W. (2009). LiDAR intensity for improved detection of inundation below the forest canopy. *Wetlands* 29, 1166-1178.
- Lee, K., Cohen, W.B., Kennedy, R.E., Maiersperger, T.K., & Gower, S.T. (2004). Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. *Remote Sensing of Environment*, 91(3), 508-520.
- Lee, H., Slatton, K. C., Roth, B. E., & Cropper, W. P. (2009). Prediction of forest canopy light interception using three-dimensional airborne LiDAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 30(1), 189-207.
- Leblanc, S. G., Chen, J. M., Fernandes, R., Deering, D. W., & Conley, A. (2005). Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(3-4), 187-207.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G., & Harding, D.J. (2002). LiDAR remote sensing for ecosystem studies. *BioScience* 52(1), 19-30.
- Miller, E. E., & Norman, J. M. (1971). A Sunfleck Theory for Plant Canopies II. Penumbra Effect: Intensity Distributions along Sunfleck Segments 1. *Agronomy Journal*, 63(5), 739-743.
- Myneni, R. B. (1997). Estimation of global leaf area index and absorbed Par using radiative transfer models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 35, 1-380.
- Myneni, R. B., Hoffman, S., Knyazikhin, Y., Privette, J. L., Glassy, J., Tian, Y., ... & Running, S. W. (2002). Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 214-231.
- Monteith, J.L., & Unsworth, M.H. (1990). Principles of Environmental Physics, second Edition. Edward Arnold, London.
- Monsi, M. (1953). Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jap. J. Bot.*, 14, 22-52.
- Naithani, K.J., Baldwin, D.C., Gaines, K.P., Lin, H., & Eissenstat, D.M. (2013). Spatial Distribution of Tree Species Governs the Spatio-Temporal Interaction of Leaf Area Index and Soil Moisture across a Forested Landscape. *Vegetative Controls on Hydrology*. 8(3), pp. 12, e58704.
- Nilson, T. (1999). Inversion of gap frequency data in forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98, 437-448.
- Nobre, C. A., Silva Dias, M. A., Culf, A. D., Polcher, J., Gash, J. H., Marengo, J. A., & Avissar, R. (2004). *The Amazonian climate* (pp. 79-92). Springer Berlin Heidelberg.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ*, 351(1), 309.
- Rose, L. S., Seong, J. C., Ogle, J., Beute, E., Indridason, J., Hall, J. D., ... & Humphrey, J. (2013). Challenges and lessons from a wetland LiDAR project: a case study of the Okefenokee Swamp, Georgia, USA. *Geocarto International*, 28(3), 210-226.
- Ross, J. (2012). *The radiation regime and architecture of plant stands* (Vol. 3). Springer Science & Business Media.
- Ross, J. (1981). *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Junk, London, Dr. W. Junk Publisher.
- Ross, J. (1981). Phytometric methods. In *The radiation regime and architecture of plant stands*; *Kluwer academic publishers: Holland*, 42-44.
- Running, S.W., Nemani, R.R., Heinsch, F.A., Zhao, M., Reeves, M., & Hashimoto, H. (2004). A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 54(6): 547-560.
- Smith, W. K., Schoettle, A. W., & Cui, M. (1991). Importance of the method of leaf area measurement to the interpretation of gas exchange of complex shoots. *Tree physiology*, 8(2), 121-127.

- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
- Turner, D. P., Cohen, W. B., Kennedy, R. E., Fassnacht, K. S., & Briggs, J. M. (1999). Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. *Remote sensing of environment*, 70(1), 52-68.
- Vanderbilt, V. C., Bauer, M. E., & Silva, L. F. (1979). Prediction of solar irradiance distribution in a wheat canopy using a laser technique. *Agricultural Meteorology*, 20(2), 147-160.
- Wilson, J. W. (1963). Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined point quadrats. *Australian journal of botany*, 11(1), 95-105.
- Watson, D.J. (1947). Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany* 11, 41-76.
- Welles, J. M., & Cohen, S. (1996). Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *Journal of experimental botany*, 47(9), 1335-1342.
- Welles, J. M., & Norman, J. M. (1991). Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agronomy journal*, 83(5), 818-825.
- Welles, J. M. (1990). Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote sensing reviews*, 5(1), 31-43.
- Welles, J. M., & Cohen, S. (1996). Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *Journal of experimental botany*, 47(9), 1335-1342.
- Waring, R. H., & Pitman, G. B. (1985). Modifying lodgepole pine stands to change susceptibility to mountain pine beetle attack. *Ecology*, 66(3), 889-897.
- Wright, I., Nobre, C.A., Tomasella, J., da Rocha, H.R., Roberts, J., Vertamatti, E., Culf, A., Alvala, R., Hodnett, M., and Ubarana, V. (1996). Towards a GCM surface parameterisation for Amazonia. In: Gash, J. Nobre, C. Roberts, J. Victoria, R. (Eds.), *Amazon Deforestation and Climate*. Chichester, UK, pp. 473-504.
- Zhang, Y., Chen, J. M., & Miller, J. R. (2005). Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1-4), 166-181.
- Zhao, K., Popescu, S., Meng, X., Pang, Y., & Agca, M. (2011). Characterizing forest canopy structure with lidar composite metrics and machine learning. *Remote Sensing of Environment*, 115(8), 1978-1996.