مقاله مروری

فصلنامه انسان و محیط زیست، شماره ۶۰، بهار ۱۴۰۱، صص ۱۰۵-۱۱۶

روش‌های زمینی به منظور اندازه‌گیری مستقیم مقدار شاخص سطح برگ (LAI)

سید محمدمعین صادقی[1*]

moeinsadeghi@ut.ac.ir

ناصح میری[2]

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۲۶ **تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۵/۰۶**

چکیده

زمینه و هدف: شاخص سطح برگ (LAI) از مهم‌ترین مشخصه‌های ساختاری در بوم‌سازگان‌های کشاورزی، مرتعی و جنگلی است که بیش‌ترین تاثیر را در تغییرات انرژی، آب و گاز دارد. با توجه به نوپا بودن مطالعات مقادیر LAI در داخل کشور، هدف از این مقاله، بررسی انواع روش‌های زمینی مستقیم تعیین مقدار LAI است.

روش بررسی: این پژوهش با استفاده از مرور منابع علمی و به کارگیری پایگاه داده‌های اینترنتی به بررسی موضوع پرداخته است. روش-های اندازه‌گیری مقدار LAI به دو دسته روش‌های زمینی و سنجش از دور تقسیم می‌شوند که روش‌های زمینی نیز به دو زیردسته روش‌های مستقیم و غیرمستقیم (برآوردی) دسته‌بندی می‌شوند.

یافته‌ها: با وجود اینکه در دو دهه اخیر، گرایش به استفاده از روش‌های غیرمستقیم زمینی و سنجش از دور در برآورد مقدار LAI افزایش یافته است، اما به دلایلی هم‌چون نیاز به دستگاه‌های نیمه‌پیشرفته و پیشرفته و عدم دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای به صورت رایگان در بیش‌تر نقاط دنیا، سبب شده است که هنوز روش‌های زمینی مستقیم محاسبه مقدار LAI کاربرد وسیعی داشته باشد. هم‌چنین دقت و صحت بالای روش‌های زمینی مستقیم در مقایسه با روش‌های غیرمستقیم زمینی و سنجش از دور، دلیل دیگر بر ارجح بودن روش‌های مستقیم زمینی در اندازه‌گیری مقدار LAI است.

بحث و نتیجه‌گیری: نتایج این بررسی نشان داد که روش تله لاشبرگ، می‌تواند به عنوان کاراترین روش به دلیل صحت و دقت بالا که درجه تخریب آن به طبیعت بسیار اندک است، در پژوهش‌های پیش‌رو مورد استفاده پژوهشگران قرار بگیرد.

کلمات کلیدی: رابطه‌ی وزن برگ به سطح برگ، روش پلانی‌متر، روش تله لاشبرگ، روش درخت مدل، روش کوادرات نقطه‌ای.

۱- پژوهشگر پسادکتری اکوهیدرولوژی جنگل، مدرسه جنگل، شیلات و علوم ژئوماتیک، دانشگاه فلوریدا، گنزویل، فلوریدا، آمریکا* (مسئول مکاتبات)

۲- دانشجوی دکتری جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

Human and Environment, No. 60, Spring 2022, pp. 105-116

Ground-Based Methods for Direct Measuring of Leaf Area Index (LAI)

Seyed Mohammad Moein Sadeghi[1*]

moeinsadeghi@ut.ac.ir

Naseh Miri[2]

Received: July 17, 2015 Accepted: July 27, 2016

Abstract

Background and Objectives: Leaf Area Index (LAI) is one of the most important structural parameters in agricultural, range and forest ecosystems and variation of energy, water, and gases are tightly coupled to LAI. According to the novelty of LAI research in Iran, this study aimed to evaluate different direct ground-based methods for determining LAI.

Material and Methodology: This research has been done by literature reviews by using internet databases. There are two main categories of procedures to measure LAI: ground-based and remote sensing methods, and ground-based methods divided into direct and indirect (estimation) methods.

Findings: Although, in the past two decades, the tendency to use indirect ground-based as well as remote sensing methods for estimating g LAI has increased, but for reasons such as needing semi-sophisticated and sophisticated instruments and lack of free access to satellite images in the greater part of the world, caused the direct ground-based methods for calculating LAI has been widely used. Moreover, the high precision and accuracy of direct ground-based methods compared to direct ground-based and remote sensing methods is another reason for preferring direct ground-based methods.

Discussion and Conclusion: The results of this study showed that the Litter Trap method could be the most efficient method for measuring LAI, and we proposed this method in future research, concerning very less destruction to nature as well as high accuracy and precision.

Keywords: Litterfall Collection Method, Model Tree Method, Planimeter, Leaves Weight to Leaves Area Ratio, Point Quadrat Method.

1- Postdoctoral Researcher of Forest Ecohydrology, School of Forest, Fisheries, and Geomatics Sciences, University of Florida, Gainesville, Florida, USA (*Corresponding author)

2- PhD Student of Forestry, Department of Forestry and Forest Economics, University of Tehran, I. R. Iran

مقدمه

در حال حاضر در کشورهای پیشرفته برای شناخت وضعیت اکوسیستم‌ها، پایش و ارزیابی تغییرات ایجاد شده طی زمان در آن‌ها، از شاخص‌های اکولوژیک استفاده می‌کنند. این موضوع برای کشور ایران که از یک سو منابع طبیعی آن بر اثر عوامل مختلف دستخوش تخریب و ناپایداری و از سوی دیگر فقدان اطلاعات پایه، امکان برقراری سامانه پایش منابع را با مشکل جدی روبرو ساخته، از اهمیت زیادی برخوردار است. از جمله شاخص‌های اکولوژیک که ضعف اطلاعات مربوط به آن در داخل کشور به‌خوبی مشهود است، آگاهی از مقدار شاخص سطح برگ (LAI) بوم‌سازگان‌های جنگلی است (۱).

مقدار LAI برابر است با سطح کل یک طرف برگ پوشش گیاهی در واحد سطح زمین و اولین بار این تعریف توسط Watson در سال ۱۹۴۷ میلادی ارایه شد (۲ و ۳). این تعریف مناسب پهن‌برگان بوده و برای درختان سوزنی‌برگ، به‌صورت نیمی از سطح سوزن‌ها در واحد سطح زمین تعریف می‌شود (۴ و ۵). از آن جایی که این شاخص، بیان‌کننده‌ی نسبت سطح برگ به سطح زمین است، بنابراین بدون واحد است.

در نیمکره شمالی، غالباً فصل بهار و پاییز به عنوان متغیرترین فصول از نظر مقدار LAI شناخته می‌شوند و پژوهشگران بر این اعتقادند که می‌بایستی مقدار LAI به صورت روزانه اندازه‌گیری شود، زیرا که مقدار آن در هر روز تفاوت پیدا می‌کند. هم‌چنین، فصل تابستان را به عنوان اوج رویش در نظر می‌گیرند که مقدار LAI تغییرات اندکی را شامل می‌شود (۶) و در این فصل، اندازه‌گیری‌های غالباً هفتگی یا دو هفته یک بار انجام می‌گیرد. پیشینه پژوهش نشان می‌دهد (جدول ۱) که مقدار LAI در بوم‌سازگان‌ها و پوشش‌های گیاهی مختلف می تواند بین ۰/۸۲ (توندرا) تا ۹/۹۱ (جنگل‌کاری‌های مناطق گرمسیری) متغیر باشد (۷).

جدول ۱- اندازه‌گیری جهانی میانگین مقدار شاخص سطح برگ (LAI) بر اساس طبقات بوم‌منظر (منبع: ۷).

Table 1- Global measurement of average value of leaf area index (LAI) based on landscape classes (reference: 7)

نوع پوشش گیاهی	میانگین مقدار LAI (± انحراف معیار)	نوع پوشش گیاهی	میانگین مقدار LAI (± انحراف معیار)
بیابان قطبی/توندرا آلپ	۳/۸۵ (± ۲/۳۷)	علف‌زارهای بلند	۲/۰۳ (± ۵/۷۹)
توندرا	۰/۸۲ (± ۰/۴۷)	علف‌زارهای کوچک	۲/۵۳ (± ۰/۳۲)
جنگل بوره‌آل	۳/۱۱ (± ۲/۲۸)	درختچه‌زارهای خشک	۱/۸۸ (± ۰/۷۴)
ساوانا معتدله	۱/۳۷ (± ۰/۸۳)	درختچه‌زارهای مدیترانه‌ای	۱/۷۱ (± ۰/۷۶)
جنگل پهن‌برگ معتدله همیشه‌سبز	۵/۴۰ (± ۲/۳۲)	تالاب‌های گرمسیری	۴/۹۵ (± ۰/۲۸)
جنگل آمیخته معتدله	۵/۲۶ (± ۲/۸۸)	ساوان‌های گرمسیری	۱/۸۱ (± ۱/۸۱)
جنگل سوزنی‌برگ معتدله	۶/۹۱ (± ۵/۸۵)	جنگل‌های بارانی همیشه‌سبز	۵/۲۳ (± ۲/۶۱)
جنگل پهن‌برگ معتدله	۵/۳۰ (± ۱/۹۶)	جنگل‌های خزان‌کننده گرمسیری	۴/۶۷ (± ۳/۰۸)
تالاب معتدله	۶/۶۶ (± ۲/۴۱)	مراتع گرمسیری	۲/۸۵ (± ۲/۶۲)
محصولات کشاورزی معتدله	۴/۳۶ (± ۳/۷۱)	محصولات کشاورزی گرمسیری	۳/۶۵ (± ۳/۱۴)
جنگلکاری معتدله	۹/۱۹ (± ۴/۵۱)	جنگل‌کاری گرمسیری	۹/۹۱ (± ۴/۳۱)

کاربرد LAI

LAI تحت تاثیر ریزاقلیم داخل تاج‌پوشش و زیر تاج‌پوشش قرار می‌گیرد و از آن جایی که تاج‌پوشش محل وقوع فرآیندهای فیزیکی و زیست-شیمیایی در بوم‌سازگان جنگلی می‌باشد (۵ و ۷)، پایش طولانی مدت شاخص LAI می‌تواند درک درستی از تغییرات پویایی جنگل و اثرات تغییر اقلیم در بوم‌سازگان‌های جنگلی را فراهم نماید و این شاخص، یک پارامتر ورودی مهم در مدل‌های کارکرد پوشش گیاهی، حاصلخیزی، فیزیولوژی و اکوهیدرولوژی جنگل می‌باشد (۵، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳). علاوه بر این، LAI می‌تواند به عنوان متغیر واکنش در جنگل‌ها به‌کار رود، یعنی نشان‌دهنده‌ی تغییرات محیطی باشد. منظور از متغیر واکنش این است که می‌توان از این شاخص در بررسی تنش وارده به بوم‌سازگان، به عنوان یک شاخص از عکس‌العمل پوشش گیاهی از آن استفاده کرد.

LAI از مهم‌ترین مشخصه‌های پوشش گیاهی است که بیشترین تاثیر را در تغییرات انرژی، آب و گاز دارد و نگه‌داشتن این متغیر در مقدار مناسب، می‌تواند منجر به تولید بیشتر بوم-سازگان گردد (۵، ۹، ۱۳، ۱۴ و ۱۵). همچنین LAI به‌عنوان یک متغیر کلیدی در فرآیندهای زیستی پوشش گیاهی محسوب می‌شود، زیرا سطح اصلی تبادل ماده و انرژی بین تاج‌پوشش درختان و هواسپهر می‌باشد (۱۵). بین مقدار شاخص LAI و درجه حاصلخیزی، میزان زی‌توده و نرخ رویش و محصول در جنگل همبستگی مثبتی وجود دارد (۵، ۱۶ و ۱۷). هم‌چنین، هرچه مقدار LAI بیشتر باشد، مقدار باران-ربایی و نورربایی تاج‌پوشش گیاهی بیش‌تر خواهد بود (۸).

روش‌های اندازه‌گیری LAI

روش‌های اندازه‌گیری مقدار LAI به دو دسته روش‌های زمینی (Ground-based Methods) و سنجش از دور تقسیم می-شوند (۱۸) که روش‌های زمینی نیز به دو زیردسته روش‌های مستقیم و غیرمستقیم (برآوردی) دسته‌بندی می‌شوند (۱۹ و ۲۰). البته دسته‌بندی دیگری نیز وجود دارد که روش‌های اندازه‌گیری LAI را به دو دسته روش‌های مستقیم و غیرمستقیم (شامل روش‌های برآوردی زمینی و سنجش از دور) تقسیم می‌کنند.

مرور منابع نشان می‌دهند که تاکنون شش روش اندازه‌گیری زمینی مستقیم مقادیر LAI شامل روش‌های نمونه‌برداری تخریبی (Destructive Sampling Method)، درخت مدل (Model Tree Method)، کوادرات نقطه‌ای (Point Quadrat Method)، استفاده از دستگاه پلانی‌متر (Planimeter)، استفاده از نسبت وزن به سطح برگ (Leaves Weight to Leaves Area Ratio)، تله لاشبرگ (Litterfall Collection Method) وجود دارند (۲۰، ۲۱ و ۲۲).

تاکنون مقالات متعددی در ارتباط با مقایسه روش‌های زمینی مستقیم و غیر مستقیم در محاسبه مقدار LAI در دنیا به چاپ رسیده است (۵، ۲۱، ۲۴، ۲۵ و ۲۶) که نتایج آن‌ها همگی دلالت بر این موضوع دارند که اندازه‌گیری LAI به‌صورت مستقیم، اولین و دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری مقدار LAI است (۲۱). از سوی دیگر، جهت کالیبره کردن روش‌های غیرمستقیم زمینی و سنجش از دور، استفاده از روش‌های مستقیم لازم و ضروری است (۶، ۲۰، ۲۶، ۲۷ و ۲۸). طولانی بودن زمان برآورد، هزینه‌های زیاد، نیاز به نیروی کار فراوان و همچنین اجرای آن در مقیاس‌ها بزرگ، از محدودیت‌های روش مستقیم زمینی است (۱۳، ۲۰، ۲۲، ۲۶ و ۲۹). روش‌های غیرمستقیم که در آن سطح برگ از مشاهدات متغیر دیگری به‌دست می‌آید مخرب نیستند و عموماً می‌توان مقدار LAI را سریع‌تر برآورد کرد (جدول ۲). این روش‌ها به طور عمده بر پایه تجزیه و تحلیل میزان نور عبوری از میان تاج‌پوشش درختان و با استفاده از ابزارهای پیشرفته نوری استوار می‌باشند (۵). هرچند بزرگ‌ترین عیب روش‌های غیرمستقیم، بیش‌برآوردی آن‌ها است، به طوری که مقدار LAI را بیش‌تر از مقدار واقعی آن نشان می‌دهند (۲۱، ۳۰ و ۳۱). هم‌چنین نیاز به دستگاه‌های نیمه‌پیشرفته و پیشرفته که گران قیمت می‌باشند، سبب شده است که روش‌های مستقیم در کشورهایی در حال توسعه مانند ایران، کاربرد وسیع داشته باشد.

جدول ۲- معایب (-) و مزایای (+) روش‌های مستقیم و غیر مستقیم برای تعیین شاخص سطح برگ (منبع: ۳۲)

Table 2- Disadvantages (-) and advantages (+) of direct and indirect methods for determining leaf area index (reference: 32)

	روش‌های مستقیم	روش‌های غیر مستقیم
معایب (-)	۱- وقت‌گیر ۲- با پایش بلند مدت سازگار نیست	۱- اثرپذیری از آشفتگی ۲- محاسبه مواد غیر برگ
مزایا (+)	اندازه‌گیری با دقت زیاد	سریع و به آسانی قابل اجراست
نقش	مهم از نظر روش کالیبراسیون	اجرا در مقیاس بزرگ و امکان نظارت بلند مدت

با توجه به نوپا بودن این نوع تحقیقات در جنگل‌های ایران و فقدان وسایل و ابزارهای مورد نیاز برآورد غیر مستقیم LAI، همچنین دقیق‌تر بودن روش‌های مستقیم، هدف از این مقاله، بررسی انواع روش‌های مستقیم زمینی تعیین مقدار LAI است.

روش نمونه‌برداری تخریبی

روش نمونه‌برداری تخریبی در سطوح کوچک انجام می‌گردد و بر فرض همگنی زیاد در توده (Forest Stand) استوار است (توده قسمتی از یک جنگل است که به علت تفاوت در مشخصاتی مانند نوع گونه، تراکم، سن، مقدار LAI و غیره، از قسمت‌های مجاور قابل تفکیک است و حداقل سطح توده ۰/۵ هکتار است (۳۳)). منظور از همگنی زیاد در توده این است که درختان یک توده از لحاظ سن، ارتفاع، قطر برابر سینه و نوع گونه شباهت زیادی به هم داشته باشند، مانند توده‌های جوان سوزنی‌برگ (۲۱). در این روش برای برآورد مقدار LAI، دو روش اصلی برداشت کامل و برداشت جزئی وجود دارد. در روش برداشت کامل، کلیه برگ‌های پوشش گیاهی (درختی، درختچه‌ای یا علفی) برداشت شده و سطح تمام برگ‌ها در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شود، که این روش برای محصولات کشاورزی و نیز پوشش علفی در مراتع، به صورت گسترده‌ای استفاده می‌شود (۱۳، ۳۴ و ۳۵). این روش هم در سطح تک درخت و هم در سطح توده قابل اجرا است و سطح برگ تمامی درختان موجود در توده، باید قطع و اندازه‌گیری شود (آماربرداری ۱۰۰ درصد). این روش برای گیاهان با اندازه کوچک مناسب است ولی برای درختان بزرگ به دلیل خسارت بالا و نیز زمان‌بر بودن، قابل توصیه نیست (۱۳، ۳۴ و ۳۶). از آن‌جایی که روش‌های قطع کامل، معمولاً سخت، پیچیده و پرهزینه هستند، از روش‌های برداشت جزئی (Partially-destructive methods) استفاده می‌شود و معمولاً یک سوم از برگ‌های درختان را قطع و شاخص سطح برگ را محاسبه و به کل درخت تعمیم می‌دهند (۳۷). به این منظور چند شاخه معرف از درخت مورد نظر قطع شده و وزن خشک برگ‌ها اندازه‌گیری می‌شود (۳۸). مرور منابع نشان می‌دهد که روش‌های تخریبی دقیق‌ترین روش در اندازه‌گیری LAI می‌باشند که به دلیل کامل از بین بردن پوشش گیاهی، کاربرد محدودی دارند (۲۱).

روش درخت مدل

روش درخت مدل شامل نمونه‌برداری تخریبی از تعدادی از درختان خارج از جنگل، که در نزدیکی جنگل مورد نظر قرار دارند، است که در آن مقدار LAI از طریق برداشت مستقیم برگ از درختان، اندازه‌گیری می‌شود. این روش بر این فرض استوار است که درختان خارج از جنگل، شبیه به درختان داخل جنگل می‌باشند و بنابراین عدد LAI بدست آمده درختان داخل جنگل و درختان خارج از جنگل، مشابه است. در یک جنگل همسال، که پراکنش درختان در آن به‌صورت نرمال است، نمونه‌برداری از سه تا پنج درخت می‌تواند کافی باشد. این روش نسبت به نمونه‌برداری تخریبی، میزان تخریب کمتری دارد، زیرا تعداد کم‌تری درخت مورد آسیب واقع می‌شوند (۳۹). در گذشته، این روش به‌طور گسترده در ارزیابی محصولات

کشاورزی و همچنین در جنگل‌کاری‌ها و جنگل‌های همسال - به دلیل همگنی زیاد- مورد استفاده قرار داشت (۲۱). هم-چنین این روش در پوشش‌های گیاهی با تراکم کم –به دلیل سهولت در نمونه‌گیری برگ- کاربرد زیادی دارد (۲۱). هرچند امروزه با پیشرفت علم، ثابت شده است که درختان خارج از جنگل، با درختان درون جنگل تفاوت‌های زیادی از نظر ساختار تاج‌پوشش (۳۳) و در نتیجه مقدار LAI دارند و بنابراین امروزه از این روش به ندرت استفاده می‌شود. درختان داخل جنگل دارای ارتفاع بیش‌تر، تنه بلندتر و تاج کوتاه‌تری می‌باشند و تنه‌ای استوانه‌ای‌تر دارند (۳۳) که برآیند این عوامل سبب می-شود که مقدار LAI در درختان خارج از جنگل، متفاوت از درختان داخل جنگل باشد.

روش کوادرات نقطه‌ای

روش کوادرات نقطه‌ای اولین بار در سال ۱۹۳۳ میلادی ابداع شد (۴۰). در این روش یک سوزن باریک به ابعاد یک میلی‌متر را به صورت عمودی، در اولین فرصت برای جلوگیری از تجزیه برگ‌ها، در داخل لاشبرگ‌های که بر روی خاک افتاده‌اند، فرو می‌برند. تعداد برگ‌های جمع‌آوری شده بر روی سوزن، به تعداد تماس مربوط است (۴۱). در این روش نمونه‌برداری، به ۱۰۰ تا ۳۰۰ نقطه نیاز است. سپس با مشخص کردن تعداد تماس‌ها و استفاده از روابط ریاضی (جمع تعداد تماس سوزن‌های برخورد کرده به برگ تقسیم بر تصویر تاج‌پوشش)، مقدار LAI محاسبه می‌شود (۴۲ و ۴۳). مطالعات نشان می‌دهد که تا زاویه‌ی ۵۷/۵ درجه نسبت به سطح تاج‌پوشش درختان پهن-برگ و تا ۶۲ درجه نسبت به سطح تاج‌پوشش درختان سوزنی-برگ، برگ درختان افتاده بر روی سطح خاک، مطمئناً مربوط به درخت مورد نظر است و در زاویه‌ی بیش‌تر از آن، برگ‌های روی سطح خاک احتمالاً مربوط به درختان دیگر می‌باشند (۳ و ۴۴). این روش برای گونه‌های پهن‌برگ که دارای سطح برگ بزرگ می‌باشند (مانند بلوط و راش)، بسیار مناسب است (۵) و در پژوهشی، این روش را بهترین روش اندازه‌گیری مستقیم در پوشش‌های درختچه‌ای (با ارتفاع درختچه‌ها تا یک متر) در اکوسیستم‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک معرفی کرده‌اند (۴۱). هم‌چنین این روش در جنگل‌های خالص پهن‌برگ، دقت بیش‌تری در محاسبه‌ی LAI دارد. نیاز به فرد متخصص برای شناسایی برگ‌های در حال پوسیدن درختان، وقت‌گیر بودن اندازه‌گیری‌ها و هم‌چنین تغییر شکل برگ درختان بر اثر فعالیت ارگانیسم‌های در سطح خاک، سبب شده است که این روش در بین محققین طرفداران اندکی داشته باشد (۲۱).

روش پلانی‌متر

در این روش سطح برگ به وسیله کاغذ میلی‌متری یا توسط نرم‌افزار Image-J تعیین و سپس مساحت برگ توسط دستگاه پلانی‌متر تعیین می‌شود (۴۵) و این روش در سال ۱۹۵۸ میلادی، ابداع شده است (۴۶). در این روش نیاز است که برگ از پوشش گیاهی مورد نظر جمع‌آوری شده و روشی بسیار وقت‌گیر است (۴۷ و ۴۸). در گذشته، نمونه‌های برگ از پوشش گیاهی مدنظر تهیه و سپس در آزمایشگاه توسط دستگاه پلانی-متر، سطح برگ تعیین می‌شد که به دلیل تخریب زیاد و هم-چنین سرعت پایین، امروزه این روش کاربرد زیادی ندارند و دستگاه‌های پرتابل پلانی‌متر جایگزین آن شده است (۴۸). با استفاده از دستگاه‌های پرتابل پلانی‌متر، به زیر پوشش گیاهی رفته و سطح برگ تعیین می‌شود، هرچند بزرگ‌ترین عیب دستگاه‌های پرتابل پلانی‌متر این است که تنها مناسب پوشش گیاهی با برگ‌های کوچک و با تعداد کم است و برای پوشش درختی به علت برگ‌های بزرگ، تعداد زیاد برگ و هم‌چنین ارتفاع زیاد درختان، غیر قابل استفاده است (۴۸، ۴۹ و ۵۰).

استفاده از نسبت وزن به سطح برگ

در این روش سطح برگ‌ها توسط 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 رابطه وزن به سطح برگ، مقدار سطح برگ تعیین می‌شود. رابطه‌ی وزن برگ به سطح برگ بسته به نوع گونه، درجه حاصلخیزی رویشگاه و سن گونه، در نوسان است (۴۵) و معمولاً از رابطه‌ی بین وزن برگ خشک با سطح برگ خشک، در تعیین شاخص سطح برگ استفاده می‌شود (۵۱). در این روش، چندین قطاع از برگ پوشش گیاهی مورد نظر را گرفته و سپس با تلفیق آن، یک

نمونه معمولاً ۵۰۰ گرمی از برگ خشک را وزن و سپس نسبت سطح به برگ را بر اساس این نمونه تلفیقی، تعیین و به کل پوشش گیاهی تعمیم می‌دهند (۵۲). این روش به دلیل بریدن برگ‌های زنده، از درجه‌ی تخریبی بالایی برخوردار است. در این روش می بایست برگ‌های خشک، بیمار و آفت‌زده از نمونه برگ کل قبل از توزین جدا شوند تا از خطای اندازه‌گیری مقدار LAI کاسته شود. این روش به دلیل اینکه تنها نیاز به ترازوی دیجیتال با دقت بالا دارد، در بسیاری از نقاط کشور استفاده می‌شود (۵۳). انتخاب برگ‌های نمونه در این روش بسیار اهمیت دارد، زیرا که برگ‌های قسمت‌های پایین تاج درختان، در مقایسه با قسمت‌های بالایی تاج درختان، سطح بزرگ‌تری دارند و اگر تنها از قسمت‌های پایینی تاج جمع‌آوری شوند، مقدار LAI بدست آمده بیشتر از مقدار واقعی بدست خواهد آمد (۱۵)، بنابراین بهتر است از کلیه‌ی قیمت‌های تاج‌پوشش، برگ جمع‌آوری شود.

روش تله لاشبرگ

در پایه‌های درختی خزان‌کننده، جمع‌آوری لاشبرگ‌ها در تعدادی تله با یک سطح جمع‌آوری مشخص انجام می‌گیرد و در ماه‌های اوج خزان (مثلاً آبان و آذر ماه در جنگل‌های شمال کشور) این جمع‌آوری‌ها هر دو هفته یک‌بار انجام می‌شود و در مابقی سال، هر دو ماه یک بار انجام می‌شود (۵۴). این روش برای جنگل‌های پهن‌برگ خزان‌کننده مناسب است (۲۸ و ۵۵)، زیرا که یک دوره خزان در سال دارند که زمان تقریبی آن مشخص است، ولی در جنگل‌های همیشه‌سبز (مانند اکثر سوزنی‌برگان)، به دلیل این که در کل سال خزان وجود دارد، استفاده از تله لاشبرگ کاری زمان‌بر و پر هزینه و غالباً کم‌دقت محسوب می‌شود (۱۸). در روش تله لاشبرگ، مقدار LAI با استفاده از جمع‌آوری دستی برگ درختان موجود در تله‌های لاشبرگ برآورد می‌شود. راه‌اندازی تله‌های لاشبرگ کاری نسبتاً ساده به شمار می‌آید و دارای اندازه‌ای از پیش تعیین‌شده هستند (معمولاً به صورت مربع‌شکل: ۵۶، ۵۷، ۵۸ و ۵۹) و لازم است آن‌ها را در ارتفاع نیم‌متری از سطح زمین نصب کرد (۵۹). پروتکل مشخصی در ارتباط با تعداد و ابعاد تله‌های لاشبرگ وجود ندارد. ابعاد تله لاشبرگ‌ها بستگی به ابعاد برگ درختان و میزان ریزش برگ درختان در هر جنگل دارد و معمولاً با ابعاد نیم‌متری در جنگل مستقر می‌شوند و هرچه ابعاد برگ درختان بزرگ‌تر و میزان ریزش برگ درختان بیش‌تر باشد، ابعاد این تله‌ها بزرگ‌تر می‌شود (۵۸ و ۶۰). تعداد تله لاشبرگ ارتباط زیادی با درجه‌ی همگنی تاج‌پوشش دارد و مقالات متعدد، تعداد آن را متفاوت بیان می‌دارند و در پژوهش‌های متفاوت، تعداد تله لاشبرگ، یک عدد (۵۷)، سه عدد (۵۸)، ۲۴ عدد (۹) و ۶۴ عدد (۵۹) در نوسان است. روش تله لاشبرگ نیاز به کار کمتری نسبت به روش‌های مخرب دارد و آسیب‌رسانی آن به جنگل در مقایسه با روش‌های تخریبی و درخت مدل، کم‌تر است (۲۸ و ۶۱). هم‌چنین، محققین استفاده از این روش را هم در سطح توده و هم تک درخت، توصیه می‌کنند. در مورد پراکنش مکانی تله‌ها اتفاق نظر وجود ندارد. برخی از محققان بر این عقیده‌اند که محل قرار دادن تله‌های لاشبرگ در زیر تاج-پوشش، بایستی به‌طور تصادفی باشد (۶۰)، در حالی که برخی دیگر طراحی نمونه‌برداری منظم (۴۳) یا ترانسکت (۶۲) را ترجیح می‌دهند. از جمله بزرگ‌ترین عیب‌های این روش، شناسایی لاشبرگ‌ها است که در جنگل‌های شمال به دلیل سرعت تجزیه بالا و نیز فراهم بودن عوامل محیطی، لاشبرگ گونه‌های مختلف، نرخ تجزیه متفاوتی دارند و گونه‌های مختلف بین سه ماه تا سه سال، زمان می‌برد تا لاشبرگشان تجزیه شود (۳۳) و بنابراین در یک نقطه، ممکن است لاشبرگ‌هایی با سنین متفاوت و از گونه‌های مختلف یافت شود که سبب اریبی در برآورد مقدار LAI شود، بنابراین نیاز است که در بازه‌ی زمانی کوتاه، تله از لاشبرگ خالی و مورد بررسی قرار گیرد (۵۹). دقت و صحت بالای این روش در بسیاری از مطالعات تایید شده است (۵۵، ۶۳، ۶۴).

نتیجه‌گیری

با وجود اینکه در دو دهه اخیر، گرایش به استفاده از روش‌های غیرمستقیم زمینی و سنجش از دور در برآورد مقدار LAI افزایش یافته است، اما به دلایلی هم‌چون نیاز به دستگاه‌های

نیمه‌پیشرفته و پیشرفته و عدم دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای به صورت رایگان در بیش‌تر نقاط دنیا، سبب شده است که هنوز روش‌های زمینی مستقیم محاسبه مقدار LAI کاربرد وسیعی داشته باشد. هم‌چنین دقت و صحت بالای روش‌های زمینی مستقیم، دلیل دیگر ارجح بودن این روش‌ها در اندازه‌گیری مقدار LAI است. نتایج این بررسی نشان داد که روش تله لاشبرگ، می‌تواند به عنوان کارآترین روش که درجه تخریب آن به طبیعت بسیار اندک است، در پژوهش‌های پیش‌رو در علوم طبیعی، مورد استفاده محققین قرار بگیرد. در دیگر مقالات مروری در سال‌های اخیر (۵ و ۲۱) کارآیی این روش در اندازه-گیری مستقیم LAI تایید شده است. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی در کشور، بر روی ابعاد و تعداد مناسب تله‌های لاشبرگ در اکوسیستم‌های مختلف کشور مطالعه شود تا بتوان با صحت بیش‌تری از این روش در اندازه‌گیری مقدار LAI بهره جست.

منابع

1- Sadeghi, S. M. M., Attarod, P., Van Stan, J. T., & Pypker, T. G. (2016). The importance of considering rainfall partitioning in afforestation initiatives in semiarid climates: A comparison of common planted tree species in Tehran, Iran. Science of the Total Environment, 568, 845–855.

2- 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.

3- Sadeghi, S.M.M., Van Stan, J.T., Pypker, T.G., Tamjidi, J., Friesen, J., & Farahnaklangroudi, M. (2018). Importance of transitional leaf states in canopy rainfall partitioning dynamics. European Journal of Forest Research, 137, 121–130

4- Chen, J. M. (1996). Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. Agricultural and Forest Meteorology, 80, 135–163.

5- Breda, 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.

6- Rahbarisisakht, S., Moayeri, M. H., Hayati, E., Sadeghi, S. M. M., Kepfer-Rojas, S., Pahlavani, M. H., Kappel Schmidt, I., & Borz, S. A. (2021). Changes in soil's chemical and biochemical properties induced by road geometry in the Hyrcanian temperate forests. Forests, 12(12), 1805.

7- Asner, G. P., Scurlock, J. M. O., & Hicke, J. A. (2003). Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. Global Ecology & Biogeography, 12, 191–205.

8- Sadeghi, S. M. M., Van Stan II, J. T., Pypker, T. G., & Friesen, J. (2017). Canopy hydrometeorological dynamics across a chronosequence of a globally invasive species, *Ailanthus altissima* (Mill., tree of heaven). Agricultural and Forest Meteorology, 240, 10–17.

9- Maass, J. M., Vose, J. M., Swank, W. T., & Martinez-Yrizar, A. (1995). Seasonal changes of leaf area index (LAI) in a tropical deciduous forest in west Mexico. Forest Ecology and Management, 74, 171–180.

10- Potter, C., Bubier, J., Crill, P., & Lafleur, P. (2001). Ecosystem modeling of methane and carbon

dioxide fluxes for boreal forest sites. Canadian Journal of Forest Research, 31, 208–223.

11- Breuer, L., Eckhart, K., & Frede, H. G. (2003). Plant parameter values for models in temperate climates. Ecological Modelling, 169, 237–293.

12- Hakimi, L., Sadeghi, S. M. M., Van Stan, J. T., Pypker, T. G., & Khosropour, E. (2018). Management of pomegranate (*Punica granatum*) orchards alters the supply and pathway of rain water reaching soils in an arid agricultural landscape. Agriculture, Ecosystems & Environment, 259, 77–85.

13- Sadeghi, S. M. M., Gordon, D. A., & Van Stan II, J. T. (2020). A global synthesis of throughfall and stemflow hydrometeorology. In Precipitation partitioning by vegetation (pp. 49-70). Springer, Cham.

14- Johansson, T. (2002). Increment and biomass in 26- to 91- year – old European aspen and some practical implication. Journal of Biomass and Bioenergy, 23, 245–255.

15- Eriksson, H., Eklundh, L., Hall, K., & Lindroth, A. (2005). Estimating LAI in deciduous forest stands. Agricultural and Forest Meteorology, 129, 27–37.

16- Arias, D. (2007). Calibration of LAI-2000 to estimate leaf area index and assessment of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in Costa Rica. Forest Ecology and Management, 247, 185–193.

17- Afas, N., Pellis, A., & Niinemets, U. (2005). Growth and production of a short rotation coppice culture of poplar. II. Clonal and year-to-year differences in leaf and petiole characteristic and stand leaf area index. Journal of Biomass and Bioenergy, 28: 536–547.

18- Liu, Z., Chen, J. M., Jin, G., & Qi, Y. (2015). Estimating seasonal variations of leaf area index using litterfall collection and optical methods in four mixed evergreen-deciduous forest. Agricultural and Forest Meteorology, 209–210, 36–48.

19- Gower, S. T., Kucharik, C. J., & Norman, J. M. (1999). Direct and indirect estimation of leaf area index, $f_{APAR,}$ and net primary production of terrestrial ecosystems. Remote Sensing of Environment, 70, 29–51.

20- Shen, L., Li, Z., & Guo, X. (2014). Remote sensing of leaf area index (LAI) and a spatiotemporally parameterized model for mixed grasslands. International Journal of Applied Science and Technology, 4(1), 46–61.

21- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Coppin, P., Muys, B., Weiss, B., & 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.

22- Campillo, C., Garcia, M. I., Dazza, C., & Prieto, M. H. (2010). Study of a non-destructive method for estimating the leaf area index in vegetable crops using digital images. HortScience, 45(10), 1459–1463.

23- Chason, J., Baldocchi, D., & Hutson, M. (1991). A comparison of direct and indirect methods for estimating forest leaf area. Agricultural and Forest Meteorology, 57, 107–128.

24- Brenner, A. J., Cueto Romero, M., Garcia Haro, J., Gilabert, M. A., Incoll, L. D., Martinez Fernandez, J., Porter, E., Pugnaire, F. I., & Younis, M. T. (1995). A comparison of direct and indirect methods for measuring leaf and surface areas of individual bushes. Plant, Cell and Environment, 18, 1332–1340.
25- Levy, P.E., and Jarvis, P. G. (1999). Direct and indirect measurements of LAI in millet and fallow vegetation in HAPEX-Sahel. Agricultural and Forest Meteorology, 97, 199–212.
26- Atzberger, C., Darvishzadeh, R., Immitzer, M., Schlerf, M., Skidmore, A., & Le Maire, G. (2015). Comparative analysis of different retrieval methods for mapping grassland leaf area index using airborne imaging spectroscopy. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 43, 19–31.
27- Kalacska, M. E. R., Sanchez-Azofeifa, G. A., Calvo-Alvarado, J. C., Rivard, B., & Quesada, M. (2005). Effects of season and successional stage on leaf area index and spectral vegetation indices in three Mesoamerican tropical dry forest. Biotropica, 37(4), 486–496.
28- Ishihara, M. I., & Hiura, T. (2011). Modeling leaf area index from litter collection and tree data in a deciduous broadleaf forest. Agricultural and Forest Meteorology, 151, 1016–1022.
29- Deljouei, A., Sadeghi, S. M. M., Abdi, E., Bernhardt-Römermann, M., Pascoe, E. L., & Marcantonio, M. (2018). The impact of road disturbance on vegetation and soil properties in a beech stand, Hyrcanian forest. European Journal of Forest Research, 137(6), 759–770.
30- Sampson, D. A., & Allen, H. L. (1995). Direct and indirect estimates of leaf area index (LAI) for lodgepole and loblolly pine stands. Trees, 9, 119–122.
31- Baldocchi, D. D., Hutchison, B. A., Matt, D. R., & McMillen, R. T. (1985). Canopy radiative transfer models for spherical and known leaf inclination angle distributions: a test in an oak hickory forest. Journal of Applied Ecology, 22, 539–555.
32- Bequet, R. (2011). Environmental determinants of the temporal and spatial variability of leaf area index in *Fagus sylvatica* L., *Quercus robur* L., and *Pinus sylvestris* L. Forestry PhD thesis, Antwerpen University, 119 p.
33- Sefidi, K., Copenheaver, C. A., & Sadeghi, S. M. M. (2022). Anthropogenic pressures decrease structural complexity in Caucasian forests of Iran. Écoscience, 29(3), 199–209.
34- Wilhelm, W., Ruwe, K., & Schlemmer, M. R. (2000). Comparison of three leaf area index meters in a corn canopy. Publications from USDA-ARS / UNL Faculty, 71, 1179–1183.
35- Zhao, D., Xie, D., Zhou, H., Jiang, H., & An, S. (2012). Estimation of leaf area index and plant area index of a submerged *Macrophyte* canopy using digital photography. PLOS One, 7(12), 1–10.
36- Villalobos F. J., Orgaz F., & Mateos L. (1995). Non-destructive measurement of leaf area in olive (*Olea europaea* L.) trees using a gap

inversion method. Agricultural and Forest Meteorology, 73, 29–42.

37- Jones, D. A., O'Hara, K. L., Battles, J.J., & Gersonde, R.F. (2015). Leaf area prediction using three alternative sampling methods for seven Sierra Nevada conifer species. Forests, 6, 2631–2645.

38- Abasi, L. (2014). Estimating the leaf area index of the Oak stand in the control and logged forests of Baneh, Master's Thesis, University of Kurdistan, 77 p. (In Persian)

39- Schauvliege, M. (1995). C-accumulation in old stands of the Aelmoeseneie forest. Master Thesis, Universities Gent, Faculteit van de landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, 99 p.

40- Levy, E. B., & Madden, E. A. (1933). The point method of pasture analysis. New Zealand Journal of Agricultural Research, 46, 267–279.

41- Goreneveld, D. P. (1997). Vertical point quadrat sampling and an extinction factor to calculate leaf area index. Journal of Arid Environments, 36, 475–485.

42- Nizinski, J. J., & Saugier, B. (1988). A model of leaf budding and development for a mature *Quercus* forest. Journal of Applied Ecology, 25, 643–655.

43- Dufrêne, E., & Breda, N. (1995). Estimation of deciduous forest leaf area index using direct and indirect methods. Oecologia. 104, 156–162.

44- Zheng, G., & Moskal, L. M. (2009). Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors. Sensors, 9, 2719–2745.

45- Bourdin, F., Morell, F. J., Combemale, D., Clastre, P., Guérif, M., & Chanzy, A. (2017). A tool based on remotely sensed LAI, yield maps and a crop model to recommend variable rate nitrogen fertilization for wheat. Advances in Animal Biosciences, 8(2), 672–677.

46- Donald, C. M., & Balck, J. N. (1958). The significance of leaf area in pasture growth. Herbal, 28, 1–6.

47- Sepaskha, A. R. (1977). Estimation of individual and total leaf areas of safflowers. Agronomy Journal, 73, 1027–1032.

48- Olfati, J. A., Peyvast, G., Shabani, H., & Nosratie-Rad, Z. (2010). An estimation of individual leaf area in cabbage and broccoli using non-destructive methods. Journal of Agricultural Science and Technology, 12, 627–632.

49- Daughtry, C. (1990). Direct measurements of canopy structure. Remote Sensing Reviews, 5, 45–60.

50- Nyakwende, E., Paull, C. J., & Atherton, J. G. (1997). Non-destructive determination of leaf area in tomato plants using image processing. Journal of Horticultural Science, 72, 225–262.

51- Khayamim, S., Mazaheri, D., Banayan Aval, M., Gohari, J., & Jahansoz, M. R. (2004). Investigating the physiological and technological characteristics of sugar beet at different levels of density and nitrogen fertilizer. Research and Development in Agriculture and Horticulture, 60, 21–29. (In Persian)

52- Kouchaki, A.R., & Sarmadnia, G. H. (1998). Physiology of Agricultural Plants, Mashhad University Press, Mashhad, 400 p. (In Persian)

53- Pourhashemi, M., Eskandari, S., Dehghani, M., Najafi, T., Asadi, A., & Panahi, P. (2012). Biomass and leaf area index of Caucasian Hackberry (*Celtis caucasica* Willd.) in Taileh urban forest, Sanandaj, Iran. Iranian Journal of Poplar Research, 19(4), 609–620. (In Persian)

54- Rahmani, R., Ghorbani, S., & Naghash Zargaran, M. (2014). Measurement and modelling litter biomass and leaf area index using allometry in a Beech-Hornbeam stand in the mid-elevation of the Hyrcanian region, Iran. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 22(4), 687–701. (In Persian)

55- Neumann, H. H., Den Hartog G. D., & Shaw, R. H. (1989). Leaf-Area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall. Agricultural and Forest Meteorology, 45, 325–345.

56- Hashemi, S. F., Hojati, S. M., & HosSeini Nasr, S. M. (2012). Soil chemical properties, amount of litterfall and nutrients recycling into Caucasian elm, maple and ash plantation stands at Darabkola Experimental Forest Station. Iranian Journal of Poplar Research, 20(4), 645–655. (In Persian)

57- Bouriaud, O., Soudani, K., & Breda, N., (2003). Leaf area index from litter collection: impact of specific leaf area variability within a beech stand. Canadian Journal of Remote Sensing, 29(3), 371–380.

58- Dewey, J. C., Roberts, S. D., & Hartley, I., (2006). A comparison of tools for remotely estimating leaf area index in loblolly pine plantations. Proceedings of the 13th Biennial Southern Silvicultural Research Conference. Gen. Tech. Rep. SRS–92. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 71-75 p.

59- Nazari, M., Sadeghi, S. M. M., Van Stan II, J. T., & Chaichi, M. R. (2020). Rainfall interception and redistribution by maize farmland in central Iran. Journal of Hydrology: Regional Studies, 27, 100656

60- McShane, M. C., Carlile, D. W., & Hinds, W. T. (1993). The effect of collector size on forest litter-fall collection and analysis. Canadian Journal of Forest Research, 13, 1037–1042.

61- Jurik, T. W., Briggs, G. M., & Gates, D. M., (1985). A comparison of four methods for determining leaf area index in successional hardwood forests. Canadian Journal of Forest Research, 15, 1154–1158.

62- Battaglia, M., Cherry, M. L., Beadle, C. L., Sands, P. J., & Hingston, A., (1998). Prediction of leaf area index in Eucalypt Plantations: effects of water stress and temperature. Tree Physiology, 18(8-9), 521–528.

63- 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, 55–65.

64- Mussche, S., Samson, R., Nachtergale, L., De Schrijver, A., Lemeur, R., & Lust, N. (2001). A comparison of optical and direct methods for monitoring the seasonal dynamics of leaf area index in deciduous forests. Silva Fennica, 35, 373–384.