

مقاله علمی-پژوهشی

## ارزیابی روش‌های تخمین شاخص سطح برگ ذرت علوفه‌ای در استان قزوین

عباس کاویانی<sup>۱\*</sup>، لیلا خسروی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۰

### چکیده:

شاخص سطح برگ (LAI) یک پارامتر کلیدی در تبادل انرژی و جرم بین تاج پوشش گیاه و اتمسفر است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری یا تخمین این شاخص معرفی شده است که می‌توان آنها را در دو دسته کلی تخریبی و غیرتخریبی طبقه‌بندی نمود. روش تخریبی علی‌رغم دقیق بودن، پرهزینه و وقت‌گیر است، لذا روش‌های غیرتخریبی برای تخمین شاخص LAI پیشنهاد می‌شود که نتایج آن توسط روش تخریبی ارزیابی و صحت‌سنجی می‌گردد. در این تحقیق که بر روی ذرت علوفه‌ای در دو کشت و صنعت در استان قزوین انجام شده است، میزان دقت روش‌های آلومتریک و نسبت روشنه مورد ارزیابی قرار گرفتند. براساس نتایج حاصل، مقدار شاخص سطح برگ ذرت علوفه‌ای در بازه ۰ تا ۸/۵۷ (مترمربع بر مترمربع) قرار دارد. نتایج ارزیابی آماری نشان می‌دهد که روش آلومتریک با مقادیر NRMSE و MBE به ترتیب ۱۴ درصد و ۰/۰۳ مترمربع بر مترمربع نسبت به روش نسبت روشنه (دستگاه AccuPAR) با مقادیر NRMSE و MBE به ترتیب ۲۳ درصد و ۰/۵۴ مترمربع بر مترمربع برای تخمین LAI پیشنهاد می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** روش آلومتریک، روش تخریبی، روش غیرتخریبی، نسبت روشنه، AccuPAR

### مقدمه

بیان کرده است (parker, 2020). این تعریف برای گیاهان پهن برگ قابل قبول است ولی برای گیاهانی که دارای برگ‌های سوزنی شکل و مجعد هستند، چندان مورد قبول واقع نشده است (Jonckheere et al., 2017 and Yan et al., 2019 and Colaizzi et al., 2017). روش‌های اندازه‌گیری شاخص سطح برگ را می‌توان در دو دسته کلی تخریبی<sup>۴</sup> و غیرتخریبی<sup>۵</sup> طبقه‌بندی نمود (Jonckheere et al., 2004). در روش تخریبی لازم است برگ‌های گیاه جدا شده و در محل دیگری اندازه‌گیری سطح برگ انجام شود و در روش غیرتخریبی نیازی به جداسازی برگ از گیاهان نیست. در روش تخریبی یک چارچوب استاندارد (پلات) با ابعاد مشخص (معمولاً ۱×۱ مترمربع و یا ۰/۵×۰/۵ مترمربع) بصورت تصادفی پرتاب شده و تمامی برگ‌های گیاهان موجود در چارچوب استاندارد جدا شده و برای اندازه‌گیری به آزمایشگاه انتقال می‌یابد. روش تخریبی اندازه‌گیری شاخص سطح برگ به دو بخش پلانیمتری<sup>۶</sup> و وزنی<sup>۷</sup> تقسیم می‌شود. در روش پلانیمتری مساحت همه برگ‌های موجود در چارچوب استاندارد از طریق پلانیمتر و یا قرارگیری بر روی میزهای فلئورسنت

شاخص سطح برگ (LAI) یک پارامتر گیاهی کلیدی در مدل‌های انتقال و بیلان جرم (آب و کربن) و انرژی (تابش و گرما) بین زیست کره و اتمسفر محسوب می‌شود (Yan et al., 2019). از سوی دیگر بسیاری از مدل‌های چرخه آب (مانند مدل‌های برآورد و تخمین رواناب، تبخیر-تعرق) و چرخه کربن (مانند مدل‌های فتوسنتز، تولید محصول) و مدل‌های فرسایش، شاخص سطح برگ را به عنوان یک ورودی دریافت می‌کنند (کوهی چله کران و دهقانی سانچ، ۱۳۹۶ و Gower et al., 1999) که دقت تخمین و یا اندازه‌گیری این پارامتر ورودی بسیار بر نتایج حاصل از این مدل‌ها تاثیرگذار است. قدیمی‌ترین و متداول‌ترین تعریفی که برای شاخص LAI وجود دارد مربوط است به Watson در سال ۱۹۴۷ است که شاخص سطح برگ را بصورت نسبتی بی بعد از کل مساحت یک طرف بافت‌های فتوسنتز کننده (برگ) نسبت به مساحت زمینی که آن گیاه اشغال نموده است،

۱- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

۲- کارشناس آزمایشگاه کیفیت آب، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

Email: Kaviani@eng.ikiu.ac.ir

(نویسنده مسئول)

3- Lea Area Index

4- Destructive  
5- Undestructive  
6- Planimetric  
7- Gravimetric

فاصله واقعی بخش‌های جداگانه یک گیاه از یکدیگر را به تصویر کشد. در این روش تکنیک تصویربرداری نیم‌کره‌ای<sup>۱۳</sup> و دستگاه‌های TRAC (3rd Wave Engineering, Ontario, Canada)<sup>۱۴</sup> و MVI<sup>۱۵</sup> پیشنهاد شده است (Garrigues et al., 2008) و حجازی و مباحثی، ۱۳۹۸؛ اکبری و همکاران، ۱۳۹۹). روش‌های سنجش از دوری براساس اینکه منبع انتشار امواج نور خورشید باشد یا خیر به سنجنده‌های فعال<sup>۱۶</sup> و غیرفعال<sup>۱۷</sup> طبقه‌بندی می‌شوند. به دلیل توان تفکیک زمانی و مکانی مناسب برای مزارع و دسترسی رایگان و سهولت در دریافت تصاویر سنجنده‌های غیرفعال، در حال حاضر محققان توجه ویژه‌ای به استفاده از سنجنده‌ها برای تخمین شاخص سطح برگ نموده‌اند (Jin et al., 2016) و بادیه نشین و همکاران (۱۳۹۳). در جمع‌بندی نتایج تحقیقی که روش‌های مختلف تخمین یا تعیین شاخص سطح برگ را مورد توجه قرار داده‌اند، می‌توان بیان نمود که روش تخریبی اندازه‌گیری شاخص سطح برگ علی‌رغم پرهزینه و وقت‌گیر بودن، دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری شاخص سطح برگ گیاهان زراعی می‌باشد و لازم است برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی روش‌های دیگر تخمین LAI از روش تخریبی استفاده گردد. با این وجود تحقیقات اخیر محققان بر روی استفاده از تصاویر سنجنده حاصل از ماهواره‌هایی که بصورت رایگان اطلاعات را در اختیار کاربران قرار می‌دهند، تمرکز یافته است و نشان داده شده است که استفاده از تصاویر سنجنده‌های MODIS و OLI و Sentinel 2 با دقت مناسب و البته با توان تفکیک زمانی و مکانی مناسب در اختیار قرار داده می‌شود (Pu, et al., 2023, Qiau, et al., 2024).

ذرت از جمله غلات بسیار مهم است که اهمیت آن باعث می‌شود سطح زیر کشت این محصول در نقاط مختلف دنیا و از جمله ایران توسعه یابد (سلامتی و دانایی، ۱۳۹۹). در این پژوهش تلاش شده است تا به کمک روش‌های آلومتریک و نسبت روشنه مقادیر شاخص سطح برگ ذرت علوفه‌ای، برآورد گردد. همچنین تلاش شده است تا با کاهش تعداد نمونه‌های قطع شده از مزارع، مقادیر شاخص سطح برگ با دقت مناسب اندازه‌گیری شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

این تحقیق براساس داده‌برداری و نمونه‌برداری‌های صورت گرفته از دو کشت و صنعت مجاور یکدیگر به نام‌های هزارجلفا و مگسال در

دارای دوربین ثابت (Li-3100, Licor, NE, USA) محاسبه شده (Jonckheere et al., 2004) و بر مساحت چارچوب استاندارد تقسیم می‌شود. در روش وزنی برگ‌های جدا شده به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۷۵ تا ۱۰۵ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شود. پس از تقسیم وزن خشک برگ به مساحت چارچوب استاندارد شاخصی به نام جرم برگ در واحد سطح (LMA)<sup>۱</sup> حاصل می‌شود.

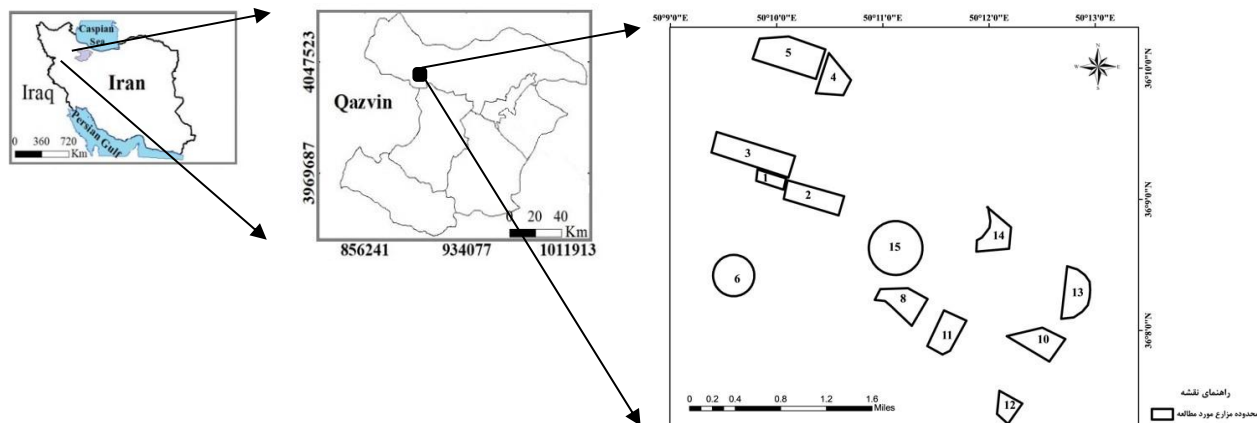
روش‌های غیرتخریبی (غیرمستقیم) در دو دسته کلی روش‌های تماسی<sup>۲</sup> و غیرتماسی<sup>۳</sup> طبقه‌بندی می‌شوند. روش تماسی از دو طریق الف) میله‌های تیز<sup>۴</sup> و ب) آلومتریک<sup>۵</sup> اقدام به اندازه‌گیری می‌نماید. در روش اول یک میله تیز در ارتفاع‌های مختلفی در داخل کنوپی گیاه نفوذ داده می‌شود و تعداد تماس و برخورد میله با گیاه شمارش می‌شود. شیوه دوم از روش‌های تماسی به روش‌های آلومتریک معروف هستند. در این تکنیک از رابطه بین سطح برگ و مشخصات هر اندامی از گیاه که برگ را بر روی خود نگه می‌دارد (مانند قطر ساقه و ارتفاع بوته) برای تخمین سطح برگ استفاده می‌شود (Colaizzi et al., 2017) و زینلی و همکاران، ۱۳۹۵). روش‌های غیرتماسی به دنبال اندازه‌گیری مقادیر نفوذ نور به داخل و بازتاب نور از کنوپی گیاه، امکان تخمین شاخص سطح برگ را فراهم می‌آورد. روش غیر تماسی به چهار طریق، الف) نسبت روشنه<sup>۶</sup> و ب) توزیع ابعاد روشنه<sup>۷</sup> و ج) سنجش از دور<sup>۸</sup> و د) جعبه نمونه‌گیری<sup>۹</sup> اقدام به تخمین شاخص سطح برگ می‌کند که دو روش الف و ب براساس اندازه‌گیری نفوذ نور به داخل کنوپی و روش ج براساس بازتاب نور از کنوپی، شاخص سطح برگ را تخمین می‌زند. روش نسبت روشنه براساس اختلاف مقادیر نور اندازه‌گیری شده در بالا و زیر کنوپی، مقادیر شاخص سطح برگ را تخمین می‌زند. برای این کار محققان از دستگاه‌هایی که تجاری سازی شده‌اند، استفاده می‌کنند که از آن جمله می‌توان به AccuPAR (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA)<sup>۱۰</sup>، Demon (CSIRO, Canberra, Australia)<sup>۱۱</sup>، LAI-2000 (Licor Inc., Nebraska)<sup>۱۲</sup> نمود (Chason et al., 1991)، دانش کارآراسته و همکاران، ۱۳۹۵ و بخشنده و همکاران، ۱۳۹۰). روش توزیع ابعاد روشنه تلاش می‌کند تا

- 1- Leaf Mass per Area
- 2- Contact
- 3- Non-Contact
- 4- Inclined Quadrat
- 5- Alometric
- 6- Gap Fraction
- 7- Gap Size Distribution
- 8- Remote Sensing
- 9- Litter
- 10- AccuPAR
- 11- Demon
- 12- Lai-2000

- 13- Hemispherical
- 14- TRAC
- 15- MVI
- 16- Active
- 17- Passive

هواشناسی موجود در کشت و صنعت مگسال، میانگین بارش سالانه منطقه ۲۹۸ میلیمتر و میانگین دمای آن ۱۴/۲ درجه سانتیگراد است و براساس اقلیم‌نمای آمبرژه اقلیم منطقه خشک و سرد است.

پایین دست شبکه آبیاری دشت قزوین انجام شده است (شکل ۱). میانگین ارتفاع از سطح دریا در منطقه مورد مطالعه ۱۲۳۰ متر است. براساس اطلاعات ثبت شده در خلال ده سال گذشته، در ایستگاه



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و موقعیت مزارع

شدند. بافت خاک مزارع با نمونه‌برداری از عمق ۹۰-۰ سانتیمتری اندازه‌گیری و برای مزارع کشت و صنعت هزارجلفا لوم شنی و بافت خاک مزارع کشت و صنعت مگسال لوم می‌باشد. اطلاعات مربوط به مدیریت زراعی هر کدام از مزارع در جدول ۱ ارائه شده است.

### مدیریت زراعی مزارع

در این تحقیق که در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ انجام شده است، هفت مزرعه تحت کشت ذرت علوفه‌ای از کشت و صنعت هزارجلفا و شش مزرعه ذرت علوفه‌ای در کشت و صنعت مگسال انتخاب

جدول ۱- مشخصات مزارع ذرت مورد مطالعه در کشت و صنعت‌های مگسال و هزارجلفا

شماره مزرعه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۸	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
ردیف کاشت	دو ردیفه						تک ردیفه						
سامانه آبیاری	قطره‌ای (تیپ)	لینیر	قطره‌ای (تیپ)	سنتریپوت	کلاسیک ثابت	سنتریپوت	کلاسیک ثابت	سنتریپوت	کلاسیک ثابت	سنتریپوت	کلاسیک ثابت	سنتریپوت	سنتریپوت
مساحت (هکتار)	۵	۱۰	۱۰	۱۵	۱۵	۲۷	۱۸	۱۱	۲۵	۱۰	۲۳	۱۶	۴۴
تاریخ کاشت	از ۱۷ تا ۳۱ خردادماه			۲۳ تیر									
دوره رشد (روز)	۱۰۱	۱۲۲	۹۵	۱۱۰	۱۱۴	۱۰۰	۹۹	۱۰۵	۱۰۱	۱۱۲	۱۰۵	۱۰۲	۱۱۵
کود (کیلوگرم در هکتار)	۲۰۰	۳۰۰	۲۵۰	۵۵۰	۴۰۰	۴۰۰	۲۷۷	۲۳۶	۲۳۲	۲۴۵	۲۰۰	۲۷۵	۲۳۰

که بصورت تصادفی در بخشی از مزرعه که به عنوان نماینده مزرعه شناخته می‌شد، پرتاب شد. با استفاده از دستگاه AccuPAR LP-80 مقادیر LAI، PAR $\uparrow$  و PAR $\downarrow$  اندازه‌گیری شد (شکل ۲-الف) (Decagon Devices Inc., 2013). براساس توضیحاتی که در دستورالعمل استفاده از دستگاه ارائه شده لازم است تا دستگاه قبل از استفاده برای ساعت و مختصات جغرافیایی محلی تنظیم شده و سنسور میله‌ای بطور کامل روشن و بصورت افقی نگهداشته می‌شد و سنسور دریافت PAR $\uparrow$  با استفاده از میله نگهدارنده و از طریق تراز لوبیایی کاملاً عمود بر سطح زمین و بالاتر از سطح برگ‌ها نگهداری شده و اندازه‌گیری صورت گرفت. سپس تمامی بوته‌های ذرت موجود در چارچوب از روی سطح زمین قطع گردید. تعداد نمونه‌ها شمارش و

### روش انجام کار

با هدف دستیابی به مقادیر مشاهداتی قابل اعتماد، نمونه‌گیری از مزارع ذرت علوفه‌ای در زمان‌های خاص و با توجه به دوره‌های مهم فیزیولوژیکی ذرت صورت گرفت (شکل ۲-ب). انتخاب وضعیت فیزیولوژی گیاه نیز براساس استانداردی که مرکز تحقیقات بیولوژیک آمریکا برای کشاورزی و جنگل‌ها بود صورت پذیرفت (Meier, 2001). بطور کلی از هر مزرعه بطور میانگین ۹ مرتبه نمونه‌برداری انجام شده و تعداد نمونه‌های تهیه شده از مزارع در کل فصل زراعی ۱۱۳ مورد بوده است. نمونه‌برداری‌ها از زمانی که ذرت دو برگه شدند آغاز و تا زمان برداشت در مزارع ادامه پیدا کرد. برای نمونه‌گیری از یک چارچوب استاندارد ۸۰×۸۰ سانتیمتری استفاده شد (شکل ۲-د)

شده، قطر و ارتفاع ساقه اندازه‌گیری شد. مساحت هر یک از برگ‌ها بطور جداگانه توسط سطح سنج Delta T Device, UK اندازه‌گیری شده (شکل ۲-ج) و بدین ترتیب با تقسیم مجموع سطح اندازه‌گیری شده نمونه‌های هر یک از کیسه‌ها بر سطح اشغال شده بر روی سطح زمین، مقادیر شاخص سطح برگ واقعی یک بوته، نیمی از بوته‌های پلات و همه بوته‌ها موجود در پلات استاندارد اندازه‌گیری شد.



ب) نمونه‌برداری تخریبی از مزرعه ذرت



د) قرارگیری پلات در مزرعه ذرت

شکل ۲- تصاویر مربوط به مراحل مختلف نمونه‌برداری و اندازه‌گیری شاخص سطح برگ از مزرعه تا آزمایشگاه

همچنین صحت‌سنجی نتایج حاصل از کالیبراسیون و صحت‌سنجی دستگاه AccuPAR از آماره‌های عمومی  $R^2$ , RMSE, NRMSE, MAE و MBA کمک گرفته می‌شود. هر یک از آماره‌های مطرح شده به طریقی به درک بهتر از وضعیت مدل‌سازی کمک خواهند نمود. مقدار NRMSE کمتر از ۱۰ درصد بیانگر انطباق خیلی خوب، در بازه ۱۰ تا ۲۰ درصد انطباق خوب، در بازه ۲۰ تا ۳۰ درصد بیانگر انطباق متوسط و مقادیر بالاتر از ۳۰ درصد عدم انطباق با نتایج را نشان می‌دهد (حسینی و همکاران، ۱۴۰۲). مقادیر مثبت MBE نشان دهنده بیش‌برآوردی و مقادیر منفی آن بیانگر کم‌برآوردی نسبت به مقادیر مشاهداتی است. مقادیر نزدیک به صفر MAE, MBE, RMSE و NRMSE بیانگر انطباق بیشتر مقادیر تخمین زده شده با مقادیر مشاهداتی و تایید نتایج معادله و مدل است. در معادلات زیر  $x_c$  به عنوان پارامتر اندازه‌گیری شده و  $x_r$  به عنوان مقدار مشاهداتی (اندازه‌گیری شده) و  $n$  تعداد نمونه‌برداری است.

بطور جداگانه در سه کیسه سیاه رنگ قرار می‌گرفتند. یکی از کیسه‌ها حاوی نیمی از نمونه‌گیری، یک کیسه حاوی یک بوته ذرت که نماینده بهتری از مزرعه بود و کیسه سوم هم حاوی نیم دیگر از نمونه‌های موجود در پلات استاندارد بودند. تمامی نمونه‌ها برای اندازه‌گیری به آزمایشگاه دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ه)</sup> در شهر قزوین انتقال یافت. هر یک از کیسه‌ها به نوبت باز شده و برگ‌ها جدا



الف) ثبت قرائت مقادیر شاخص سطح برگ توسط AccuPAR

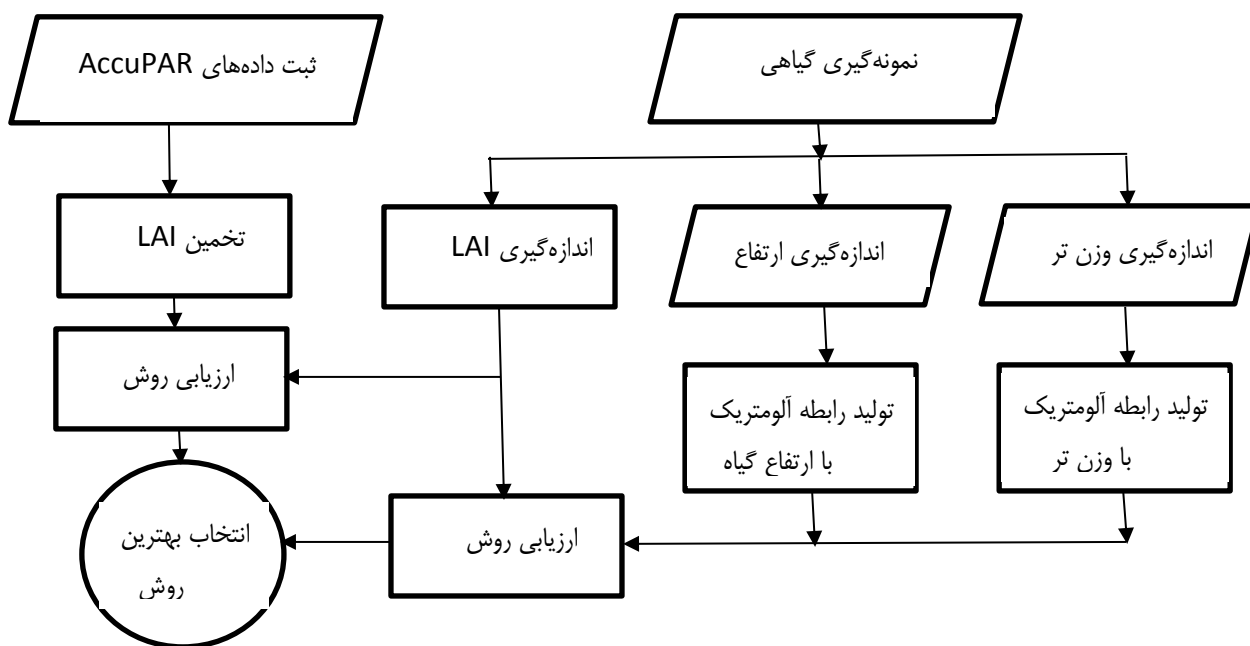


ج) اندازه‌گیری سطح برگ توسط دستگاه سطح‌سنج Delta T

پس از اندازه‌گیری سطح برگ توسط دستگاه سطح‌سنج Delta-T، وزن تر هر یک از بخش‌های اندام‌های هوایی گیاه بصورت جداگانه اندازه‌گیری شد. مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه Delta T Device به عنوان مقادیر مشاهداتی قابل قبول ثبت شد. مقادیری که با اندازه‌گیری خصوصیات فیزیولوژیکی از بوته و همچنین توسط دستگاه AccuPAR به دست آمد، به عنوان روش‌های غیرتخریبی بوسیله روش تخریبی مورد ارزیابی قرار گرفت. از میان کل داده‌های جمع‌آوری شده از روش تخریبی و غیرتخریبی، ۷۰ درصد برای کالیبره نمودن و ۳۰ درصد از داده‌ها برای ارزیابی و صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. روش انجام تحقیق در قالب فلوچارت، در شکل ۳ ارائه شده است.

#### آماره‌های مورد استفاده:

برای ارزیابی آماری نتایج حاصل از استفاده معادلات آلومتریک و



شکل ۳- فلوجارت انجام تحقیق

نمودارها براساس روز ژولیوسی ارائه شده است. بطورکلی بیشترین مقدار شاخص سطح برگ بدون توجه به نوع مدیریت زراعی در بازه زمانی ۶۰ تا ۷۰ روز پس از کاشت مشاهده می‌شود. این زمان معمولاً دوره‌ای است که دوره رشد رویشی گیاه به پایان رسیده است و گیاه وارد دوره زایشی می‌شود (Meier, 2001). بازه تغییرات شاخص سطح برگ از صفر در ابتدا دوره رشد برای تمامی مزارع تا حداکثر  $1/6 \frac{m^2}{m^2}$  در مزرعه ۲ که توسط روش قطره‌ای (تیپ) آبیاری می‌شده است، قرار دارد. این بازه برای شاخص سطح برگ در مطالعاتی که توسط دیگر محققان و بطور مشابه انجام شده است، نیز مشاهده می‌شود (بادیه‌نشین و همکاران، ۱۳۹۳). بطورکلی مقادیر LAI در مزارعی که تحت آبیاری تیپ قرار دارند بیشتر از سامانه‌های آبیاری دیگر به ازاء یک روز مشخص بعد از زمان کاشت است. سامانه آبیاری سنتریپوت نسبت به سامانه آبیاری کلاسیک ثابت مقادیر کمتری از شاخص سطح برگ را به ثبت رسانده است. مزرعه شماره ۶ نسبت به دو مزرعه دیگری که تحت آبیاری سنتریپوت قرار داشتند با تاخیر زمانی کشت شده است. ولی مقادیر بالاتری از شاخص سطح برگ را نشان می‌دهد (بخش ب شکل ۴).

نکته جالب توجه در سامانه‌های سنتریپوت آرایش فاروها است. در مزرعه شماره ۶ جهت قرارگیری فارو شرق به غرب و فاروها بصورت مستقیم قرار داشتند و در مزارع شماره ۱۳ و ۱۵ فاروها بصورت دایره‌ای و در راستای حرکت چرخ‌های سنتریپوت قرار داشتند.

$$RMSE = \left[ n^{-1} \sum_{i=1}^n (x_C - x_r)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{x}} \quad (2)$$

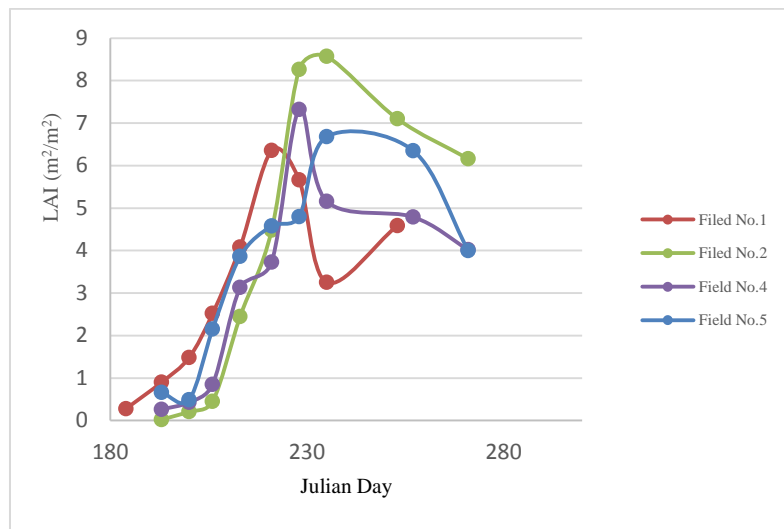
$$MBE = \left[ n^{-1} \sum_{i=1}^n x_C - x_r \right] \quad (3)$$

$$MAE = \left[ n^{-1} \sum_{i=1}^n |x_C - x_r| \right] \quad (4)$$

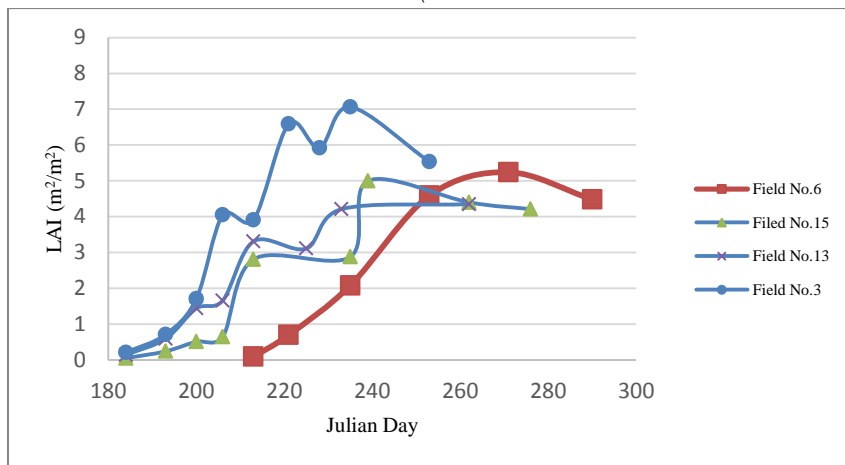
## نتایج و بحث:

### نتایج شاخص سطح برگ به روش تخریبی:

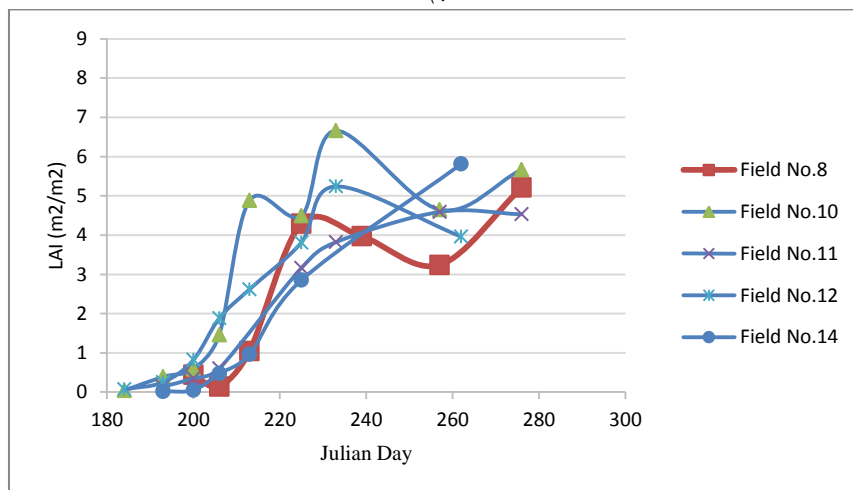
در ابتدا وضعیت تغییرات شاخص سطح برگ مزارع مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه همزمانی ارائه نتایج هر ۱۳ مزرعه در قالب یک نمودار امکان نمایش واضح و تحلیل صحیح را نمی‌دهد، لذا نمایش نتایج اندازه‌گیری‌های شاخص سطح برگ مزارع براساس نوع سامانه آبیاری در قالب سه نمودار ارائه شده است (شکل ۴). با توجه به وسعت اراضی زراعی در هر کشت و صنعت و مدیریت زراعی هر یک از کشت و صنعت‌ها از یک سو و متفاوت بودن زمان کشت مزارع مختلف ذرت از سوی دیگر و برای درک بهتر از زمان کاشت و برداشت و طول دوره رشد و همچنین یکسان‌سازی محور افقی برای مقایسه مقادیر شاخص سطح برگ در مزارع مختلف، محور افقی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- نمودار تغییرات شاخص سطح برگ به روش تخریبی برای مزارع تحت آبیاری با سامانه الف) قطره‌ای (تیپ)، ب) سنتریپوت و خطی (لینیر) و ج) کلاسیک ثابت

بوته‌ها خواهد داشت. برای اطمینان از نتیجه‌ای که در نمودار مشاهده می‌شود، ارزیابی آماری در قالب جدول ۲ ارائه شده است. همانگونه که از جدول ۲ نیز بر می‌آید مقادیر NRMSE و RMSE در بازه‌ای قرار دارند که به لحاظ آماری در دسته‌بندی خوب قرار می‌گیرند. البته مثبت بودن شاخص MBE نشان از بیش برآوردی در نتایج است. در رابطه با امکان استفاده از یک بوته به جای همه بوته‌های موجود در چارچوب استاندارد، شکل ۶ و جدول ۲ نشان می‌دهد که نتایج قابل اعتماد نیست. علت این امر نیز به دلیل وابستگی بسیار زیاد نتایج، به تجربه تکنسین نمونه‌گیر و انتخاب بوته توسط محقق است.

### نتایج شاخص سطح برگ به روش غیر تخریبی: روش‌های آلومتریک:

اندازه‌گیری شاخص سطح برگ با استفاده از روش تخریبی بسیار وقت‌گیر و مشکل است و لذا استفاده از روش‌های آلومتریک کمک شایانی به کاهش مشکلات ناشی از روش تخریبی می‌نماید. در روش آلومتریک آن بخشی از خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه مورد بررسی قرار می‌گیرد که در ارتباط مستقیم با برگ‌های گیاه باشد. در رابطه با ذرت علوفه‌ای قطر و ارتفاع ساقه از جمله این خصوصیات فیزیولوژیکی هستند و به دلیل اینکه برگ‌ها را بطور مستقیم بر روی خود حفظ می‌کنند، برای برآورد شاخص سطح برگ می‌توان به آن اعتماد کرد. شکل ۷ نموداری است که از مقادیر ارتفاع ذرت در برابر سطح برگ به دست آمده از روش تخریبی را نمایش می‌دهد. همانگونه که از شکل پیداست مقادیر سطح برگ با ارتفاع بوته همبستگی نسبتاً خوبی را نشان می‌دهند. اما برای ارزیابی آماری رابطه بین این دو پارامتر از ۷۰ درصد داده‌های موجود برای تولید رابطه و از ۳۰ درصد باقیمانده برای صحت‌سنجی نتایج رابطه آلومتریک استفاده گردید. براساس آنالیز آماری ارائه شده در جدول ۳ با استفاده از رابطه توانی، امکان تخمین سطح برگ با دقت متوسط و البته با بیش‌برآوردی را ارائه می‌دهد. به استناد ارزیابی‌های آماری می‌توان اینگونه برداشت نمود که استفاده از ارتفاع گیاه برای تخمین سطح برگ نتیجه مناسبی را ارائه نمی‌دهد. در تحقیقی که توسط دیگر محققان و با اعمال تیمارهای مختلف انجام شده است، نتایج قابل قبولی از ارتباط بین ارتفاع و شاخص سطح برگ به دست آمده است (زینلی و همکاران، ۱۳۹۵). لذا از آنجایی که در این تحقیق هدف یافتن شاخص سطح برگ است؛ لذا سطح برگ یک گیاه نمی‌تواند نماینده خوبی از چارچوب استاندارد و کل مزرعه باشد. لذا با توجه به اینکه با افزایش نمونه‌های موجود در چارچوب استاندارد امکان کاهش میزان خطا وجود خواهد داشت، شاخص سطح برگ با استفاده از حاصلضرب سطح برگ به دست آمده از رابطه آلومتریک ارتفاعی در

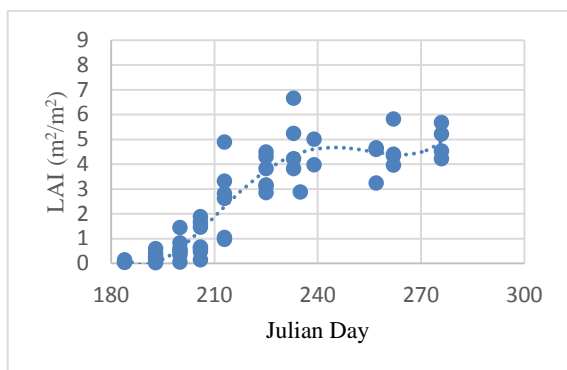
براساس اندازه‌گیری صورت گرفته توسط دماسنج مادون قرمز، دمای هوای داخل کنوپی در مزارع ۱۳ و ۱۵ بطور میانگین ۲ درجه سانتیگراد بیشتر از دمای هوای داخل کنوپی مزرعه ۶ بوده است و یکی از علل احتمالی کاهش LAI در این دو مزرعه را می‌توان تنش حرارتی ناشی از عدم امکان جابجایی هوا در داخل این مزارع دانست، که نتایج مشابهی توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است (Asseng, et al., 2015). البته ذکر این نکته هم ضروری است که رقم کشت شده در این سه مزرعه با یکدیگر متفاوت بوده و از سوی دیگر آرایش قرارگیری بذر بر روی پشته‌ها در مزرعه ۶، دو ردیفه و در دو مزرعه ۱۳ و ۱۵ بصورت تک ردیفه است. ضمناً نمی‌توان تاثیر رطوبت و تغذیه خاک را در این زمینه نادیده گرفت. در بخش ب شکل ۴ نمودار مربوط به مزرعه ۳ که دارای مقادیر بالایی از شاخص سطح برگ بوده و مربوط به آبیاری با روش خطی می‌باشد. نمودار ج در شکل ۴ مربوط به نتایج شاخص سطح برگ مزارعی است که در آن آبیاری بصورت کلاسیک ثابت با آبیاش متحرک انجام می‌شده است. تقریباً شرایط مدیریت زراعی به جز زمان کاشت در تمامی مزارع یکسان بوده است و لذا تاثیر زمان کاشت را می‌توان بر میزان شاخص سطح برگ مشاهده کرد.

در صورتی که بدون توجه به نوع مدیریت زراعی تمامی مقادیر شاخص سطح برگ برداشت شده از سطح مزارع در یک نمودار ترسیم شود، امکان مشاهده روند تغییر این نمودار در قالب چهار بخش مشهود است. این چهار بخش بر خصوصیات فیزیولوژیکی ذرت علوفه‌ای منطبق است (شکل ۵). نمودار الف مربوط به مزارع با کشت دو ردیفه و نمودار ب مربوط به مزارع با کشت یک ردیفه ذرت است. با کمی دقت در نمودارهای ترسیم شده در شکل ۵ می‌توان روند تغییرات نمودار برآزش داده شده در آنها را مشابه با آن چیزی که در نمودارهای تاج پوشش گیاهی (CC) و ضریب گیاهی (KC) دیده می‌شود، مشاهده کرد.

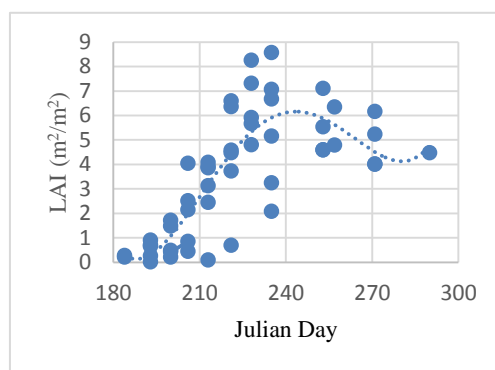
از آنجایی که اندازه‌گیری مقدار LAI به روش تخریبی کاری دشوار و البته با دقت بالاست، لذا در این تحقیق فرضیه کاهش حجم عملیات مزرعه‌ای اندازه‌گیری تخریبی شاخص سطح برگ با کاهش تعداد بوته‌های جدا شده از سطح زمین که در چارچوب استاندارد قرار گرفته‌اند؛ به نصف تعداد بوته‌های موجود در چارچوب استاندارد و یک نمونه از بوته‌های درون چارچوب استاندارد مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که از شکل ۶ و مقایسه مقادیر شاخص سطح برگ در اطراف خط ۱:۱، می‌توان استنباط کرد، کاهش حجم کاری اندازه‌گیری تخریبی LAI با استفاده از نیمی از بوته‌ها نتایجی مشابه و قابل اعتماد در مقابل مقادیر اندازه‌گیری این شاخص با استفاده از تمام

بوته و سپس ضرب نتیجه در تعداد بوته‌های موجود در چارچوب استاندارد، مقدار شاخص سطح برگ ذرت علوفه‌ای با دقت خوب و البته با سرعت بالا و بدون نیاز به قطع بوته‌های ذرت و در مزرعه تخمین زده شود.

تعداد بوته‌های موجود در چارچوب استاندارد تخمین زده شد و نتایج ارزیابی آماری حاصل از آن در جدول ۳ ارائه شد. بهبود شاخص NRMSE و کاهش قابل توجه در آماره MBE، روندی را به وجود می‌آورد تا با استفاده از دو گام (تخمین سطح برگ با استفاده از ارتفاع

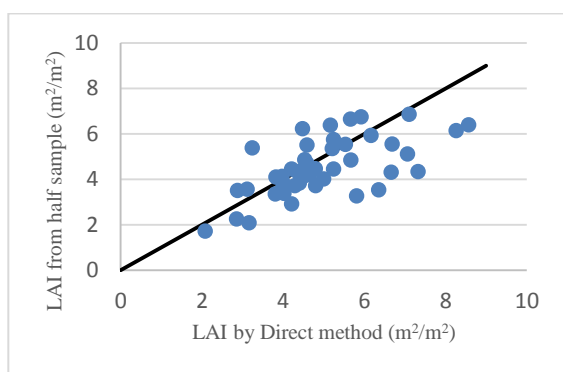


ب) کشت تک ردیفه

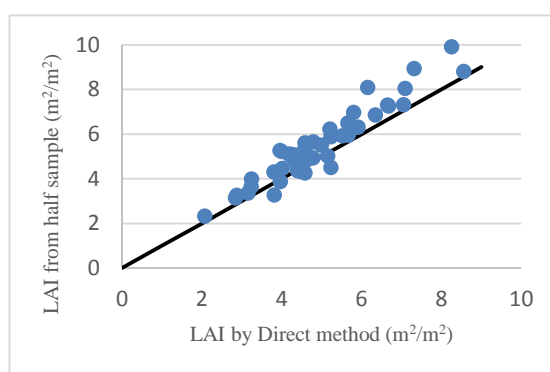


الف) کشت دو ردیفه

شکل ۵- نمودار تغییرات شاخص سطح برگ به روش تخریبی در تمامی مزارع



ب) یک بوته



الف) نیمی از تعداد بوته‌ها

شکل ۶- مقایسه مقادیر LAI به دست آمده از روش تخریبی با استفاده از یک بوته و نیمی از بوته‌ها

جدول ۲- ارزیابی آماری نتایج شاخص سطح برگ ناشی از کاهش تعداد نمونه برداری‌های تخریبی به نصف و یک بوته از چارچوب استاندارد

MBE (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	MAE (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	NRMSE (%)	RMSE (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup>	آماره
-۰/۴۴	۰/۹	۲۴	۱/۲	۰/۳۷	اندازه‌گیری با یک بوته
-۰/۴۵	۰/۶۸	۱۸	۰/۸۸	۰/۹۰	اندازه‌گیری با نیمی از بوته‌ها

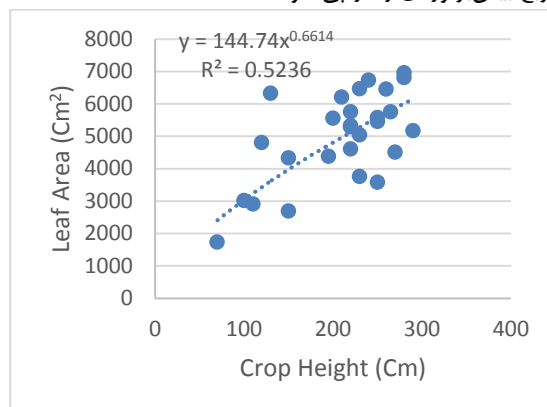
مساحت برگ به وضعیت فیزیولوژیکی (مانند ابریشمی شدن، ضخیم‌تر شدن و خشک شدن برگ ذرت علوفه‌ای در خلال دوره رشد) گیاه نیز بستگی دارد. با توجه به موارد فوق‌الذکر رابطه بین شاخص سطح برگ با وزن تر برگ بوته‌هایی که در داخل چارچوب استاندارد قرار داشتند، برقرار شد. براساس ارزیابی آماری، رابطه خطی تولید شده در جدول ۳ که با ۳۰ درصد داده‌های باقیمانده به دست آمده است، نشان می‌دهد که امکان استفاده از وزن تر برگ برای تخمین با دقت خوب با توجه

وزن تر برگ از جمله پارامترهایی است که اندازه‌گیری آن به سادگی و با سرعت نسبتاً بالایی اتفاق می‌افتد. این اندازه‌گیری از طریق جداسازی برگ‌ها و انتقال به آزمایشگاه خواهد بود که در قالب روش‌های تخریبی طبقه‌بندی می‌شوند. انتظار می‌رود که با افزایش مساحت برگ در خلال دوره رشد، مقدار شاخص سطح برگ افزایش یابد و از سویی افزایش وزن تر برگ با سطح برگ رابطه‌ای متناسب و مستقیم دارد. البته لازم به ذکر است که وزن تر برگ علاوه بر

چهار جهت به عنوان نتیجه نهایی ثبت شده است. نتایج حاصل در شکل ۸ نمایش داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است مقادیر شاخص سطح برگ تا ۶ با دقت نسبتاً خوبی توسط AccuPAR برآورد شده است و داده‌ها در اطراف خط ۱:۱ پراکنده می‌شوند، اما با افزایش مقادیر شاخص سطح برگ، دستگاه در برآورد آن و به خصوص در انتهای فصل رشد عملکرد خوبی را ثبت نکرده است. علت این امر در رابطه با برخی از گیاهان قد بلندی همچون درختان به واسطه حضور شاخه، تنه و اندام‌هایی از گیاه است که در فتوسنتز نقشی ندارند ولی بر روی میزان نفوذ نور خورشید به داخل کنوپی نقش ایفا می‌کنند (Yan et al., 2019).

این موضوع در رابطه با ذرت نیز با توجه به بلند شدن قد گیاه (بیش از دو متر) در بازه زمانی که شاخص سطح برگ به بیش از ۶ می‌رسد، قابل قبول است. از آنجایی که در انتهای فصل رشد برگ‌های پایینی ذرت به زردی می‌گیرند، لذا ورود نور خورشید به داخل پوشش گیاهی به دلیل فیزیولوژی برگ‌ها بیشتر از دوره‌های قبلی رشد صورت می‌گیرد و لذا علی‌رغم بالا بودن شاخص سطح برگ، دستگاه AccuPAR در ثبت اختلاف بین میزان PAR بالا و زیر کنوپی دچار خطا می‌شود.

به مقدار NRMSE و RMSE وجود دارد و به مقدار ۰/۰۳ مترمربع بر مترمربع بیش‌برآوردی را در پی خواهد داشت.



شکل ۷- نمودار مقادیر شاخص سطح برگ به دست آمده با روش تخریبی در برابر ارتفاع ذرت

### روش‌های نسبت روشنه:

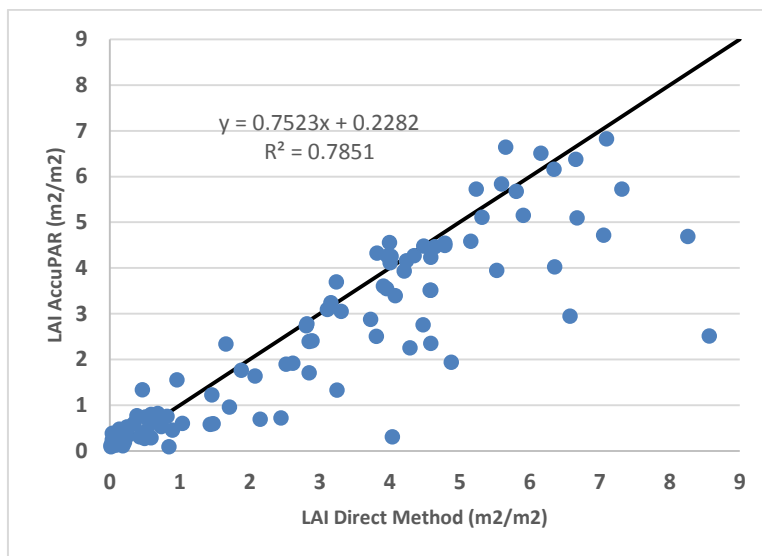
در این تحقیق از روش نسبت روشنه نیز به دلیل سهولت در برآورد مقادیر شاخص سطح برگ استفاده شد. برای این کار از دستگاه AccuPAR-LP80 استفاده شد. قرائت توسط AccuPAR در چهار جهت انجام شد. میانگین مقادیر ثبت شده توسط AccuPAR

جدول ۳- ارزیابی آماری روابط آلومتریک مورد استفاده برای تخمین شاخص سطح برگ ذرت علوفه‌ای

پارامتر	رابطه	واحد	NRMSE (%)	MAE (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	MBE (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
رابطه سطح برگ با ارتفاع یک گیاه	$Leaf Area = 144.74 \times Height^{0.6614}$	Leaf area: Cm <sup>2</sup> Height: Cm	۲۵	۱۰۳۱/۶	۷۶۰/۶
رابطه شاخص سطح برگ با مساحت کل برگ در چارچوب استاندارد	$LAI = 0.00005 \times Area + 1.3785$	LAI: m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> Area: Cm <sup>2</sup>	۱۸	۰/۵۸	۰/۰۳
رابطه شاخص سطح برگ با وزن تر برگ	$LAI = 0.0004 \times Weight_{Wet Leaf}$	LAI: m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> Weight: Kg/ha	۱۴	۰/۲۲	۰/۰۳

با هدف صحت‌سنجی مقادیر گزارش شده توسط AccuPAR، با استفاده از ۷۰ درصد داده‌ها فرایند کالیبراسیون دستگاه و با ۳۰ درصد باقیمانده نسبت به صحت‌سنجی نتایج اقدام شد که نتایج ارزیابی آماری آن در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول نتایج ارزیابی آماری در دو ردیف جداگانه ارائه شده است. در ردیف اول هیچ محدودیتی برای استفاده از دستگاه AccuPAR در نظر گرفته نشده است و تمامی داده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که با توجه به مقادیر RMSE و NRMSE استفاده از این دستگاه در تمامی بازه‌های شاخص سطح برگ و در تمامی دوران رشد ذرت علوفه‌ای

دارای دقتی متوسط است. با حذف مقادیر شاخص سطح برگ بزرگتر از ۶ و ارزیابی مجدد، روند ارزیابی نتایج بهبود پیدا کرده است. با عنایت به نتایج ارزیابی آماری، استفاده از دستگاه AccuPAR برای تخمین شاخص سطح برگ با دقت متوسط توصیه می‌شود. مشابه نتایج به دست آمده از این بخش در مطالعه دیگر محققان نیز مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد رابطه حاصل از AccuPAR با مقادیر مشاهداتی با R<sup>2</sup> حدود ۰/۷ مورد پذیرش می‌باشد (بخشنامه و همکاران، ۱۳۹۰).



شکل ۸- نمودار مقادیر شاخص سطح برگ اندازه گیری شده توسط AccuPAR در برابر شاخص سطح برگ اندازه گیری شده به روش تخریبی

جدول ۴- آنالیز آماری صحت سنجی نتایج حاصل از AccuPAR

پارامتر	رابطه	R <sup>2</sup>	NRMSE (%)	MAE (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	MBE (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
استفاده از تمامی داده های AccuPAR	$LAI = 1.2142 \times LAI_{AccuPAR}$	۰/۶۲	۲۳	۰/۹۸	۰/۵۴
استفاده از داده های کوچکتر از ۶ دستگاه AccuPAR	$LAI = 1.1439 \times LAI_{AccuPAR} + 0.1389$	۰/۶۹	۲۲	۰/۷۷	۰/۴

## نتیجه گیری

شاخص سطح برگ از جمله مهمترین پارامترهای گیاهی است که اندازه گیری و یا تخمین با دقت مناسب این پارامتر تاثیر زیادی بر روی نتایج مدل های مختلف بیلان آب و انرژی و همچنین تولید و عملکرد محصول دارد. در این تحقیق دو روش اصلی آلومتریک و نسبت روشنه برای تخمین شاخص سطح برگ مورد توجه قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان می دهد که روش های آلومتریک نسبت به دستگاه AccuPAR نتایج بهتری را برای تخمین شاخص سطح برگ ارائه می دهد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از همکاری صمیمانه مدیران و کارکنان کشت و صنعت مگسال و هزارجلفا کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## منابع

اکبری، الف.، درویشی بلورانی، ع.، نیسانی سامانی، ن.، حمزه، س.، صوفی زاده، س.، و پیگناتی، الف. ۱۳۹۹. استخراج شاخص سطح برگ ذرت علوفه ای با استفاده از روش عکسبرداری رقومی نیم

کروی (مطالعه موردی: مزارع قلعه نو، جنوب تهران). تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۱(۶): ۱۳۳۱-۱۳۴۰.

بادیه نشین، ع.ر.، نوری، ح. و وظیفه دوست، م. ۱۳۹۳. واسنجی معادلات برآورد شاخص سطح برگ محصولات ذرت و چغندر قند با استفاده از داده های ماهواره ای سنجنده مودیس (شبکه آبیاری قزوین). تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۵(۲): ۱۵۵-۱۶۵.

بخشنده، الف.، سلطانی، الف. و غدیریان، ر. ۱۳۹۰. اندازه گیری شاخص سطح برگ با استفاده از دستگاه AccuPAR در گندم. مجله پژوهش های تولید گیاهی. ۱۸(۴): ۹۷-۱۰۱.

حجازی، ع. و مباحثی، م.ر. ۱۳۹۸. روش غیرتخریبی برای برآورد میزان زیست توده گیاه با استفاده از تصاویر دوربین دیجیتال. نشریه علمی پژوهشی علوم و فنون نقشه برداری. ۹(۳): ۱-۱۱.

حسینی، س.ت.، رضانی اعتدالی، ه.، کاویانی، ع.، سلطانی، م. و نظری، ب. ۱۴۰۲. شبیه سازی حرکت آب و شوری در آبیاری قطره ای نواری در کشت ذرت با استفاده از نرم افزار HYDRUS-2D. نشریه دانش آب و خاک. ۳۳(۴): ۵۰-۷۷.

دانش کارآراسته، پ.، ستوده نیا، س.، ستوده نیا، ع. و کاویانی، ع. ۱۳۹۵. تخمین مقدار ماده خشک با استفاده از شاخص سطح

1209. برگ. مدیریت آب و آبیاری. ۱۳-۱: (۱)۶.
- Gower. S. T., Kucharik. C. J., and Norman. M. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index,  $f_{PAR}$ , and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sens. Environ.* 70: 29-51.
- Jin. H., Li. A., Wang. J. and Bo. Y. 2016. Improvement of spatially and temporally continuous crop leaf area index by integration of CERES-Maize model and MODIS data. *European journal of agronomy.* 78: 1-12.
- Jonckheere. I., Fleck. S., Nackaerts. K., Muys. B., Coppin. P., Weiss. M. and 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: 19-35.
- Meier. W. 2001. Growth stages of mono-and dicotyledonous plants. Federal biological research center for agriculture and forestry. Pp. 158.
- Parker. G. G. 2020. Tamm review: Leaf Area Index (LAI) is both a determinant and a consequence of important processes in vegetation canopies. *Forest ecology and management.* 477: 1-15.
- Pu, J., Yan, K., Gao, S., Zhang Y., Park, T., Sun, X., Weiss, M., Knyazikhin Y. and Myneni, R.B. 2023. Remote sensing of environment. 287.
- Qiao, K., Zhu, W., Xie, Z., Wu, S. and Li, S. 2024. New three red-edge vegetation index (VI3RE) for crop seasonal LAI prediction using Sentinel-2 data. *International journal of applied earth observation and geoinformation.* 130.
- Yan. G., Hu. R., Luo. J., Weiss. M. J., H., Mu. X., Xie. D. and Zhang. W. 2019. Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and forest meteorology.* 265: 309-411.
- زینلی، الف، سلطانی، الف. و خادم پیر، م. ۱۳۹۵. بررسی روابط آلومتریک بین سطح برگ و تعدادی از صفات رویشی در ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴. نشریه پژوهش‌های زراعی ایران. ۱۴(۲): ۳۵۴-۳۶۸.
- سلامتی، ن. و دانایی، الف.م. ۱۳۹۹. بررسی شاخص‌های تنش خشکی در کم آبیاری سطحی ذرت. نشریه علوم آب و خاک. ۲۴(۴): ۷۵-۹۱.
- کوهی چله کران، ن. و دهقانی سانچ، ح. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی شاخص سطح برگ ذرت دانه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴ در شرایط تنش خشکی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۱(۳): ۴۸۳-۴۹۱.
- Asseng. S., et al. 2015. Rising temperature reduce global wheat production, *Nature climate change.* 5. 143-147.
- Chason. J. W., Baldocchi. D. D. and Huston, M. A. 1991. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agricultural and forest meteorology.* 57. 107-128.
- Colaizzi. P. D., Evett. S. R., Brauer. D. K., Howell. T. A., Tolck. J. A. and Copeland. K. S. 2017. Allometric method to estimate leaf area index for row crops. *Biometry, modeling & statistics.* 109(1): 1-12.
- Decagon devices Inc. 2013. Decagon AccuPAR ceptometer operating manual. Decagon Devices Incorporation. Pullman. WA. Pp: 98 .
- Garrigues. S., Shabanov. N.V., Swanson. K., Morisette. J.T., Baret. F. and Myneni, R.B. 2008. Intercomparison and sensitivity analysis of leaf area index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands. *Agricultural and forest meteorology.* 148: 1193-

## Evaluation of Methods for Estimating Leaf area Index in Maize in Qazvin Province

A. Kaviani<sup>1\*</sup>, L. Khosravi<sup>2</sup>

Received: Apr.01, 2024

Accepted: May.30, 2024

### Abstract:

The leaf area index (LAI) shows exchanges between the atmosphere and crops. There are different methods to measure/estimate LAI. These methods are categorized into two sections, as named Destructive and Undestructive methods. Destructive methods are laborious and costly, but they are precision methods. Undestructive methods suggest to LAI estimation and then the result of undestructive methods is calibrated and verified by the destructive method. This study tries to evaluate maize LAI estimation results achieved by allometric and gap fraction methods (GP) in two agro-industrial companies in Qazvin. Briefly, maize LAI amount was in the range of 0 to 8.57 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. The relation between height and wet leaf weight by LAI was selected in the allometric method and the AccuPAR instrument was selected in the GP. Results of statistical analysis showed that allometric methods have a better coincident to LAI amount from the destructive method by NRMSE and MBE, 14% and 0.03 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> versus GP by NRMSE and MBE amount of 23% and 0.54 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, respectively.

**Keywords:** AccuPAR, Allometric, Destructive Method, Gap Fraction, Undestructive Method

---

1- Associate Prof., water science and engineering Dept., Faculty of agriculture and natural resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2- Water quality Lab staff, irrigation and reclamation Dept., College of agriculture and natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(\*- corresponding Author Email: kaviani@eng.ikiu.ac.ir)