

## Deriving the Leaf Area Index of Silage Maize Using Digital Hemispherical Photography Method (Case Study: Qaleh-Now Farms, South of Tehran)

ELAHE AKBARI<sup>1</sup>, ALI DARVISHI BOLOORANI<sup>1\*</sup>, NAJMEH NEYSANI SAMANY<sup>1</sup>, SAEID HAMZEH<sup>1</sup>, SAEID SOUFIZADEH<sup>2</sup>, STEFANO PIGNATTI<sup>3</sup>

1. Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Department of Agro-ecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C, Tehran, Iran.

3. Institute of Methodologies for Environmental Analysis (CNR IMAA), Potenza, Italy.

(Received: Jan. 25, 2020- Revised: March. 17, 2020- Accepted: Apr. 14, 2020)

### ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the efficiency of digital hemispherical photography (DHP) in deriving LAI in silage maize farms in the south of Tehran. For this purpose, the DHP as well as destructive measurements for comparison were used to estimate LAI in silage maize farms in Qaleh-Now County in the south of Tehran in 2018 considering the nature of spatio-temporal variability in agricultural fields during a growing season. The results showed LAI obtained through DHP at different periods of plant growth has a strong linear correlation with the values measured by the destructive method ( $R^2 = 0.92$ , RMSE = 0.45 and Bias = 0.31). However, the intermediate LAI range (LAI: 2 - <5) with RMSE=0.63 and Bias = 0.49 is less accurate than the LAI<2 range (RMSE = 0.36, Bias = 0.24) and LAI $\geq$ 5 range (RMSE = 0.41, Bias = 0.28). The extinction coefficient is a parameter required for the implementation of agricultural models that in most studies, its value is assumed through similar researches. But in this study, the extinction coefficient which is required to calculate LAI by DHP, was calculated to be  $K=0.51$ .

**Keywords:** Leaf Area Index, Digital Hemispherical Photography, Extinction Coefficient, Silage Maize.

## استخراج شاخص سطح برگ ذرت علوفه‌ای با استفاده از روش عکسبرداری رقومی نیم‌کروی (مطالعه موردی: مزارع قلعه‌نو، جنوب تهران)

الهه اکبری<sup>۱</sup>، علی درویشی بلورانی<sup>۱\*</sup>، نجمه نیسانی سامانی<sup>۱</sup>، سعید حمزه<sup>۱</sup>، سعید صوفی‌زاده<sup>۲</sup>، استفانو پیگناتی<sup>۳</sup>

۱. گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. گروه آگرواکولوژی، موسسه تحقیقاتی علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳. موسسه روش‌شناسی برای تحلیل‌های محیطی (CNR IMAA)، پوتنزا، ایتالیا.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱/۲۶)

### چکیده

هدف این پژوهش، ارزیابی کارایی روش عکسبرداری رقومی نیم‌کروی (DHP) در برآورد LAI در مزارع ذرت علوفه‌ای جنوب تهران است. بدین منظور با در نظر گرفتن ماهیت تغییرپذیری مکانی-زمانی در مزارع کشاورزی و در طول یک فصل رشد، عکسبرداری DHP و نیز اندازه‌گیری به روش تخریبی به منظور مقایسه، برای برآورد LAI در مزارع ذرت علوفه‌ای شهرستان قلعه‌نو واقع در جنوب تهران، در سال ۱۳۹۷ انجام گردید. نتایج نشان داد که مقادیر LAI استخراج شده از طریق DHP در دوره‌های مختلف رشد گیاه، ارتباط خطی قوی با مقادیر اندازه‌گیری شده به روش تخریبی دارد ( $R^2 = 0.92$ ،  $RMSE = 0.45$  و  $Bias = 0.31$ ). هر چند، بازه LAI میانی (میزان LAI:  $5 < LAI < 2$ ) با میزان  $RMSE = 0.63$  و  $Bias = 0.49$  نسبت به دو بازه  $LAI < 2$  ( $RMSE = 0.24$ ،  $Bias = 0.24$ ) و  $LAI \geq 5$  ( $RMSE = 0.41$ ،  $Bias = 0.28$ )، از دقت کمتری برخوردار است. ضریب میرایی، پارامتری مورد نیاز برای اجرای مدل‌های کشاورزی است که در اکثریت تحقیقات، مقدار آن از طریق تحقیقات مشابه به صورت فرضی در نظر گرفته می‌شود. اما در این تحقیق، این ضریب که برای محاسبه LAI از طریق عکسبرداری DHP نیز مورد نیاز است، محاسبه و مقدار آن برابر با  $K = 0.51$  به دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** شاخص سطح برگ، عکسبرداری رقومی نیم‌کروی، ضریب میرایی، ذرت علوفه‌ای.

### مقدمه

پایش رشد و نمو گیاهان به منظور ارزیابی و مدیریت آبیاری با هدف افزایش تولید و عملکرد محصول، اهمیت زیادی دارد (Badihneshin et al., 2014) که این امر توسط پارامتر بیوفیزیکی شاخص سطح برگ<sup>۱</sup> (LAI) برای تخمین بهتر و دقیق‌تر تر بیان آب مصرفی توسط گیاه، قابل بررسی است (Faridhosseini et al., 2013). علاوه بر این، در طی فصل رشد گیاهان، برآورد LAI برای نظارت بر خصوصیات محصول (Campos-Taberner et al., 2015)، مدلسازی رشد محصول و پیش‌بینی عملکرد آن (Jin et al., 2015)، بهینه‌سازی تولید محصولات کشاورزی (Kross et al., 2015) و بهبود مدیریت مزرعه زراعی (Darvishzadeh et al., 2008) مهم و ضروری است. LAI بیانگر مجموع سطح برگ‌های گیاه نسبت به واحد سطح زمین است و ظرفیت جذب انرژی کانوپی را توصیف می‌کند، بنابراین، بررسی آن در مدل‌های جهانی اقلیمی، هیدرولوژی،

اکولوژی و اکوسیستم کشاورزی با اهمیت است (Mousivand et al., 2015) و نیز نقش مهمی در تخمین زیست توده و تخییر-تعرق پوشش گیاهی بازی می‌کند (Verrelst et al., 2012). با توجه به کاربردهای فراوان LAI، چگونگی اندازه‌گیری و میزان دقت برآورد آن در کشاورزی و علوم مرتبط با آن، حائز اهمیت است. روش‌های مستقیم اندازه‌گیری LAI معمولاً به تخریب نمونه‌هایی از برگ‌ها یا گیاهان نیاز دارند و در آزمایشگاه قابل اندازه‌گیری هستند. نمونه‌برداری وسیعی برای بررسی تغییرپذیری‌های مکانی در سطح مزارع باید انجام شود و از آنجا که روش‌های تخریبی باعث از بین رفتن کانوپی و نیز وقت‌گیر و هزینه‌بر هستند، معمولاً به نمونه‌برداری کم و محدود اکتفا می‌شود (Jonckheere et al., 2004; Liu et al., 2013; Yan et al., 2019). ماهیت تغییرپذیری مکانی-زمانی در ساختار کانوپی در مناطق وسیع و در طول یک فصل رشد به معنی ضرورت ایجاد روش‌های جایگزین برای اندازه‌گیری و محاسبه LAI است (Liu

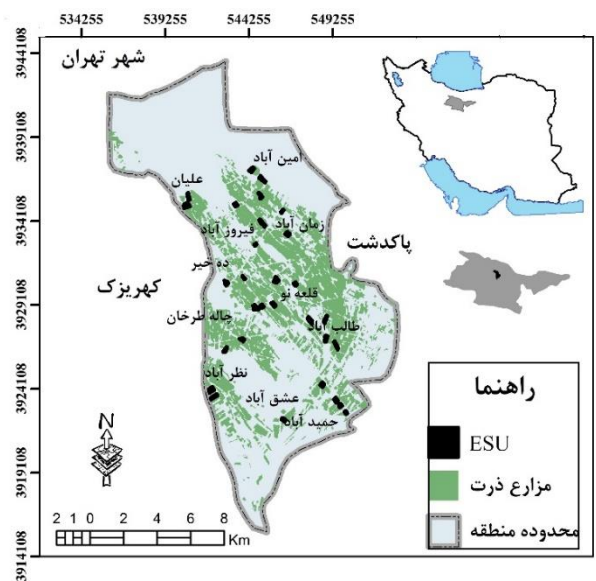
\* نویسنده مسئول: ali.darvishi@ut.ac.ir

شد. داده‌های مورد استفاده برای این بررسی از مزارع ذرت علوفه-ای شهرستان قلعه‌نو واقع در جنوب تهران، مطابق با فنولوژی ذرت علوفه‌ای در کل دوره رشد آن در تابستان ۱۳۹۷، از طریق اندازه-گیری تخریبی و نیز عکسبرداری DHP در هر واحد نمونه‌برداری اولیه<sup>۴</sup> (ESU) در مزرعه، جمع‌آوری شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

مزارع مطالعاتی ذرت علوفه‌ای در طی فصل رشد آن در ۱۳۹۷، متعلق به شهرستان قلعه‌نو در شهر تهران می‌باشد (N ۳۶° ۳۵' - ۳۵° ۲۳' و E ۵۱° ۲۴' - ۵۱° ۳۵'). حداقل و حداکثر دما و میانگین بارش سالانه به ترتیب ۴-، ۲۴ درجه سانتیگراد و ۲۰۰ میلی متر است (IRIMO, 2018). منطقه مورد مطالعه با مورفولوژی دشت، به وسعت ۲۲ کیلومتر × ۱۰ کیلومتر و اغلب با مزارع کشاورزی ذرت علوفه‌ای (۷۵۰۰ هکتار) وسعت یافته است. دو رقم محلی ذرت علوفه‌ای (سینگل کراس ۷۰۴ و ۷۰۶) از اواسط خرداد تا اواسط تیر ۱۳۹۷ کاشته شده است و از اواسط شهریور تا اواسط مهر سال ۱۳۹۷ برداشت گردید. منبع آب آبیاری مزارع شامل آب قنات، چاه و فاضلاب تصفیه نشده شهری و سیستم آبیاری بارانی و غرقابی می‌باشد. در این مطالعه، مزارع مطالعاتی شامل ۳۰ مزرعه تحت کشت ذرت علوفه‌ای می‌باشد که نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌های مربوطه در هر واحد ESU انجام شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه، مزارع ذرت علوفه‌ای در شهرستان قلعه‌نو و مزارع ESU تحت مطالعه

(*et al.*, 2013). اندازه‌گیری‌های سریع‌تر و غیر تخریبی می‌توانند با استفاده از روش‌های اپتیکی غیر مستقیم نظیر AccuPAR LU80 (Decagon, Pullman, WA) تحلیل‌گر کانوپی LAI-2000 (LI-COR, Lincoln, NE) و عکسبرداری رقومی نیم‌کروی<sup>۱</sup> انجام شوند (Demarez *et al.*, 2008; Fang *et al.*, 2019; Ariza-Carricondo *et al.*, 2019).

مزیت عمده عکسبرداری رقومی نیم‌کروی نسبت به سایر روش‌های اپتیکی غیر مستقیم، علاوه بر سهولت دسترسی به دوربین رقومی نسبت به ابزارهای مورد استفاده در سایر روش‌ها، امکان تجزیه و تحلیل با نرم افزار مربوطه در آزمایشگاه برای کسب نتایج با اطمینان در بافتهای مختلف گیاهی وجود دارد (Liu *et al.*, 2013). وقتی که دوربین رقومی مجهز به یک لنز fisheye می‌شود، با قابلیت محاسبه gap fraction در طیف وسیعی از زاویه‌های زنیته، توانایی تعیین همزمان چندین ویژگی کانوپی نظیر LAI، متوسط زاویه میل برگ (ALIA) و اثر clumping شاخ و برگ، FAPAR<sup>۲</sup>، Cover و غیره را داراست (Leblanc *et al.*, 2005; Macfarlane *et al.*, 2007; Demarez *et al.*, 2008). تاکنون در تحقیقات انجام شده، عمدتاً شاخص سطح برگ به روش تخریبی، دستگاه AccuPAR، دستگاه Leaf area meter، LiCor LAI-2000 و یا معادلات آلومتریک محاسبه شده است. این دستگاه‌ها برای همه محققین در دسترس نیست و روش تخریبی نیز بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است. البته در تحقیقاتی نظیر (Deljouei *et al.*, 2016)؛ (Darvishsef *et al.*, 2017) و (Ashrafi *et al.*, 2019)، به کارایی روش عکسبرداری نیم‌کروی در محاسبه LAI در جنگل اشاره کرده‌اند. در تحقیقات (Liu *et al.*, 2013) و (Ariza-Carricondo *et al.*, 2019)، در یک دوره کوتاه در ابتدای رشد گیاه یا در یک پلات، به بررسی کارایی روش DHP پرداخته شده است. در این تحقیقات به ترتیب بر روی گیاهان (ذرت، سویا و گندم) و (ذرت) مطالعه شده و لزوم بررسی کارایی این روش را در منطقه وسیع با در نظر گرفتن تغییرپذیری مکانی LAI و در دوره کامل رشد گیاه بیان داشته‌اند.

بنابراین با در نظر گرفتن محدودیت ذکر شده در تحقیقات پیشین، به ارزیابی کارایی روش عکسبرداری رقومی نیم‌کروی در اندازه‌گیری و محاسبه LAI در مزارع کشاورزی به منظور صرفه-جویی در زمان و هزینه و نیز در نظر گرفتن ماهیت تغییرپذیری مکانی-زمانی در ساختار کانوپی در مناطق وسیع و در اراضی کشاورزی ذرت علوفه‌ای در دوره‌های مختلف رشد گیاه پرداخته

3. Fraction of Absorbed Photo-synthetically Active Radiation  
4. Elementary Sampling Unit

1. Digital Hemispherical Photography  
2. Average Leaf Inclination Angle

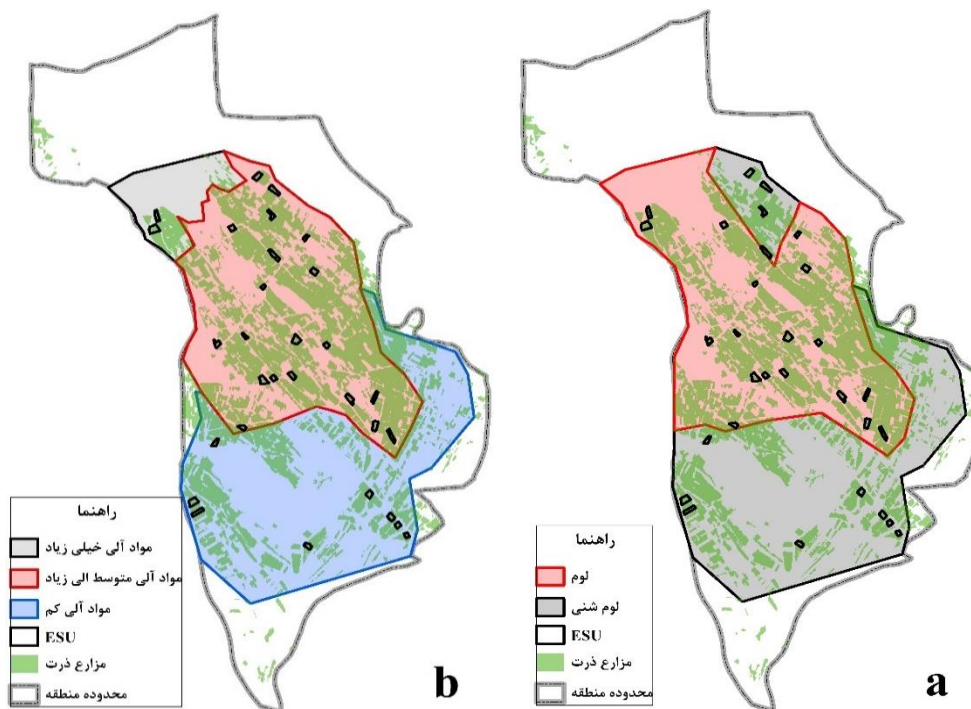
داده‌های میدانی

به منظور پوشش دادن هرچه بیشتر تغییر پذیری منطقه مورد مطالعه، بر اساس نقشه پراکنش مزارع ذرت علوفه‌ای در منطقه (شکل ۱)، بافت خاک و مواد آلی (شکل ۲) و اطلاعات ارائه شده توسط کشاورزان نظیر نوع گونه و زمان در نظر گرفته شده برای کشت آن، نمونه‌برداری طبقه‌بندی شده<sup>۱</sup> برای انتخاب ESU (تعداد ۳۰ محل نمونه‌برداری) با احتساب گونه‌های مختلف ذرت علوفه‌ای و تاریخ کاشت متفاوت آنها، در نظر گرفته شده است. بدین منظور مساحت پلی‌گونهای هر نوع بافت خاک و نیز نواحی با مقادیر مختلف مواد آلی، محاسبه و تعداد ESUها در هر یک براساس درصد مساحت آنها بدست آمد. از طرفی در انتخاب محل‌های نمونه‌برداری، فواصل مناسب بین آنها، توزیع مناسب آنها در منطقه، نحوه دسترسی به مزرعه، همکاری مالک مزرعه با نمونه‌برداری و نیز برخورداری از هر دو گونه کشت در نمونه‌برداری‌ها لحاظ گردید. نمونه‌برداری در فصل رشد ذرت علوفه‌ای در سال ۱۳۹۷ انجام شد و با استفاده از دو پروتکل تخریبی و DHP، به جمع‌آوری داده LAI، پرداخته و سپس نتایج دو پروتکل مقایسه شدند. تعداد دفعات نمونه‌برداری با فواصل زمانی ۱۰ الی ۱۵ روزه (۶ بار در هر ESU)، با در نظر گرفتن فنولوژی ذرت علوفه‌ای در کل دوره رشد و پوشش دادن زمانهای مهم فنولوژی گیاه شامل سه تا چهار برگ، هشت تا نه برگ،

دوازده برگ، گلدهی، شکل‌گیری دانه و شروع پر شدن دانه لحاظ شده است (شکل ۳). البته شایان ذکر است که برخی از اراضی به دلیل تأخیر در زمان کشت، به طور مثال در زمان ۵ یا ۱۰ مرداد و نیز ۲۰ یا ۲۵ مرداد، در مرحله سه تا چهار برگ بوده‌اند. بنابراین، زمان شروع اولین نمونه‌برداری، تقریباً سه هفته بعد از کشت مزرعه در نظر گرفته شده و در مراجعات مختلف به ۳۰ محل نمونه‌برداری، اراضی مختلف در مراحل متفاوت فنولوژی قرار داشتند.

روش تخریبی

نمونه‌های گیاهی ذرت علوفه‌ای با فواصل زمانی ۱۰ الی ۱۵ روزه با در نظر گرفتن فنولوژی ذرت علوفه‌ای در کل دوره رشد، جمع‌آوری شد. در هر ESU چهار بوته چیده و طول و عرض هر برگ به صورت دستی اندازه‌گیری شد. مساحت هر برگ جداگانه بر اساس طول × عرض حداکثر هر برگ × ۰/۷۵ محاسبه شد. LAI با تقسیم سطح برگ کل برگهای چهار بوته بر مساحت منطقه نمونه‌برداری محاسبه گردید (مساحت منطقه نمونه‌برداری: تعداد نمونه‌های تخریبی × فاصله ردیف × فاصله بین بوته‌ها در هر ردیف) (Gao et al., 2010; Munz et al., 2014; Xia et al., 2016). داده اندازه‌گیری شده LAI به‌صورت تخریبی، برای ارزیابی و اعتبارسنجی LAI محاسبه شده از طریق عکسبرداری نیم‌کروی استفاده می‌شود.



شکل ۲- نقشه پراکنش بافت خاک (a) و مواد آلی (b) ایجاد شده بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش خاک



مرحله سه - چهار برگ ۲۱ و ۲۶ تیر	مرحله هشت- نه برگی ۵ و ۱۰ مرداد	مرحله دوازده برگ ۲۰ و ۲۵ مرداد	مرحله گلدهی ۴ و ۹ شهریور	مرحله شکل‌گیری دانه ۱۴ و ۱۹ شهریور	مرحله شروع پرشدن دانه ۸ و ۱۸ مهر ۲۹ و ۳۰ شهریور
---------------------------------------	---------------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------	---------------------------------------	---

شکل ۳- فنولوژی رشد گیاه ذرت علوفه‌ای در منطقه مورد مطالعه و زمان‌های نمونه‌برداری

قبیل fCover، FAPAR و ALIA را براساس برآورد gap fraction و با استفاده از معکوس مدل Poisson، فراهم می‌کند. در این روش، با استفاده از Look Up Table، با محدوده زاویه زینت مختلف، مقادیر موردنظر برآورد می‌شود (ESA, 2005).



شکل ۴- طرح عکسبرداری در هر ESU برای کانوی همگن (ESA, 2005)

### روش تحقیق

محاسبه LAI از طریق fCover در روش عکسبرداری نیم‌کروی در نرم‌افزار CAN-EYE، به طور مستقیم LAI محاسبه نمی‌شود، اما از طریق عکس‌های DHP و این نرم‌افزار، می‌توان fCover را محاسبه و با استفاده از مدل Ritchie، (رابطه ۱)، LAI را محاسبه نمود.

$$fCover = 1 - \exp(-K * LAI) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن K ضریب میرایی است. در اکثریت تحقیقات، مقدار K را از طریق تحقیقات مشابه به صورت فرضی در نظر می‌گیرند، اما می‌توان این ضریب را نیز از طریق پردازش عکس‌های DHP و قانون Beer-Lambert محاسبه نمود (رابطه ۲).

$$K(\theta) = \frac{-LN(P_o(\theta))}{PAI_{eff}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

### روش عکس‌برداری رقومی نیم‌کروی

در طی فصل رشد ذرت علوفه‌ای، عکسبرداری نیم‌کروی در هر ESU به منظور جمع‌آوری و محاسبه داده fCover به صورت سری زمانی و منطبق بر زمانهای مهم فنولوژی گیاه صورت گرفت. طرح نمونه‌برداری در هر ESU با تعداد دفعات ۶ بار، منطبق بر دستورالعمل‌ها و توصیه‌های پروتکل اعتبارسنجی از طریق ابزارهای سنجش از دور در اروپا<sup>۱</sup> (VALERI) انجام شد (http://w3.avignon.inra.fr/valeri/; Baret et al., 2005). ابعاد هر ESU سازگار با اندازه پیکسل تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2 در حدود ۱۰ × ۱۰ متر است، موقعیت آنها دور از مرز زمین کشاورزی (حداقل ۳۰ متر داخل) برای رفع اثر مرز واقع شده است. به منظور محاسبه و در نظر گرفتن تغییرپذیری مکانی در هر ESU، بین ۹ الی ۱۲ عکس DHP بر اساس برنامه عکاسی پیشنهاد شده برای کانوی همگن (مشابه ذرت) در (ESA, 2005)، عکسبرداری شد (با طرح عکسبرداری مشابه شکل ۴). در این منطقه، تعداد ۱۸۰ گروه عکس DHP (گروه عکس DHP: بین ۹ الی ۱۲ عکس در هر ESU)، در سری زمانی رشد گیاه ذرت علوفه‌ای، با دوربین Canon 5d mark ii مجهز به لنز فیش آی FC-E8 عکسبرداری شده است. براساس Claverie et al., 2012 برای کاهش خطاها در برآورد gap fraction جهتی<sup>۲</sup>، دوربین در بالای سه پایه تلسکوپی قرار گرفت تا جهت مشاهده به سمت پایین و فاصله کانوی تا سنسور ثابت باشد (حدوداً ۱/۵ متر). برای محاسبه fCover از پردازشگر V6.491 CAN-EYE (http://www4.paca.inra.fr/can-eye) استفاده شده است. این پردازشگر، امکان به دست آوردن پارامترهای بیوفیزیکی کانوی از

( $\hat{Y}$ ) در نظر گرفته شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)}{n} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (\text{رابطه ۵})$$

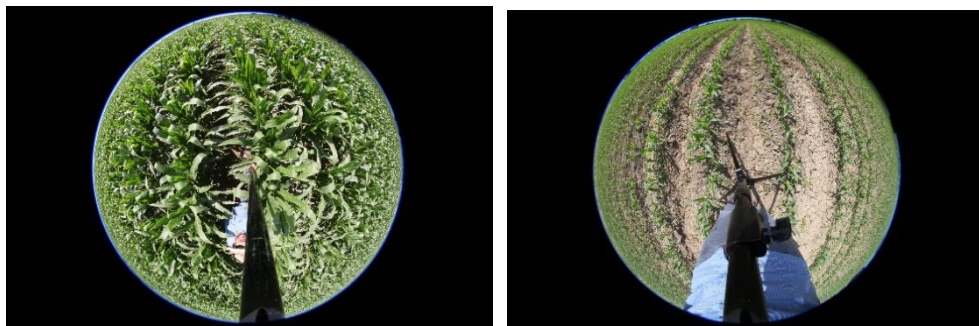
### نتایج و بحث

بررسی صحت برآورد شاخص سطح برگ به روش DHP شکل (۵)، دو نمونه از عکس‌های DHP اخذ شده در دو تاریخ مهم فنولوژی گیاه ذرت علوفه‌ای را نشان می‌دهد. شکل (۶)، نیز نمونه‌ای از پردازش عکس‌های DHP در مرحله classification برای ورود به محاسبات gap fraction و بعد از آن، محاسبات پارامترهای بیوفیزیکی PAI، fCover و FAPAR، را ارائه می‌دهد که این عکس‌ها در تاریخ ۲۶ تیر در یکی از ESUهای منطقه مورد مطالعه اخذ شده است.

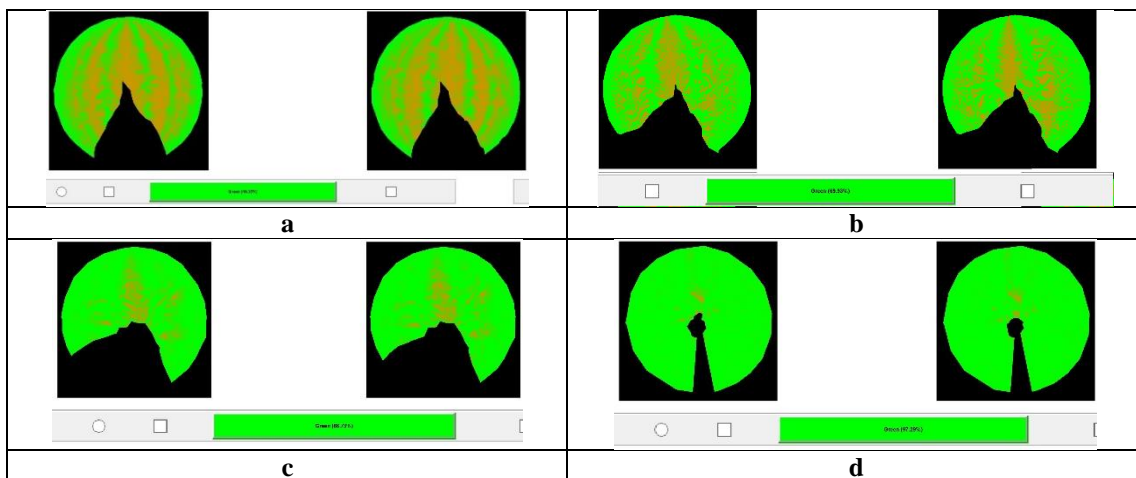
که در آن،  $Po(\theta)$  gap fraction کانوپی، PAI eff، شاخص سطح گیاه مؤثر<sup>۱</sup> و  $\theta$  زاویه زنیت مختلف می‌باشد (Liu et al., 2013).

بررسی صحت برآورد شاخص سطح برگ به روش DHP در این تحقیق، از دو روش تخریبی و عکسبرداری رقومی نیم-کروی برای محاسبه و اندازه‌گیری LAI بصورت سری زمانی در زمان‌های مختلف رشد در مزارع ذرت علوفه‌ای استفاده شد. با مقایسه نتایج این دو روش، میزان صحت و کارایی روش عکسبرداری نیم‌کروی در برآورد LAI از طریق آزمون‌های آماری ضریب تبیین<sup>۲</sup> ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup> (RMSE) و Bias، در سه گروه مقادیر LAI، کم ( $0 < LAI < 2$ )، میانی ( $2 < LAI < 5$ )، زیاد ( $5 < LAI < 6$ )، ارزیابی گردید.

در این آزمون‌های آماری، برای ارزیابی و اعتبارسنجی روش عکسبرداری نیم‌کروی، داده اندازه‌گیری شده LAI بصورت تخریبی، به عنوان داده‌ی روش کنترل (Y) و مقادیر LAI محاسبه شده در روش عکسبرداری نیم‌کروی به عنوان مقادیر برآورد شده



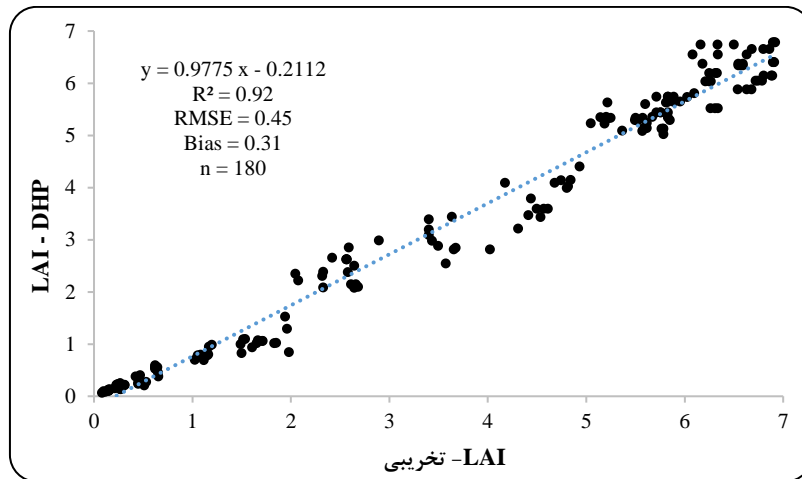
شکل ۵- عکس‌های DHP اخذ شده از مزارع ذرت علوفه‌ای برای محاسبات LAI در مرحله ۵-۴ برگی و ۱۲ برگی به ترتیب از راست به چپ



شکل ۶- نمونه‌ای از پردازش عکس‌های DHP در مراحل مختلف رشد گیاه (در هر مرحله از پردازش، بایستی حداقل ۹ عکس وارد مراحل پردازش شود، در اینجا به علت رعایت حجم مقاله، تنها تصویر دو عکس در هر مرحله ارائه شده است)، به ترتیب عکس‌های اخذ شده در تاریخ‌های (a) ۲۶ تیر، (b) ۵ مرداد، (c) ۲۰ مرداد، (d) ۹ شهریور، در یکی از ESUهای منطقه مورد مطالعه

این شکل ارائه شده است. همان‌طور که در شکل نیز مشهود است، ارتباط معنی‌داری بین LAI اندازه‌گیری شده از طریق این دو روش با  $R^2 = 0.92$ ،  $RMSE = 0.45$  و  $Bias = 0.31$  بدست آمده که بر کارایی و صحت روش اندازه‌گیری LAI از طریق عکسبرداری DHP در مزارع ذرت علوفه‌ای در این منطقه دلالت دارد.

بعد از پردازش تمام عکس‌های DHP در تمام ESUها، مقادیر پارامترهای PAI، fCover، LAI و FAPAR محاسبه شده است. مقادیر LAI اندازه‌گیری و محاسبه شده از طریق عکس‌های DHP (متغیر وابسته) و LAI اندازه‌گیری شده به صورت تخریبی (متغیر مستقل) برای تمام ESUها در کل دوره رشد گیاه ذرت علوفه‌ای، در شکل (۷) مقایسه شده و نتایج تحلیل آماری نیز در



شکل ۷- بررسی صحت برآورد LAI از طریق DHP در مقایسه با روش تخریبی در کل دوره رشد گیاه ذرت علوفه‌ای

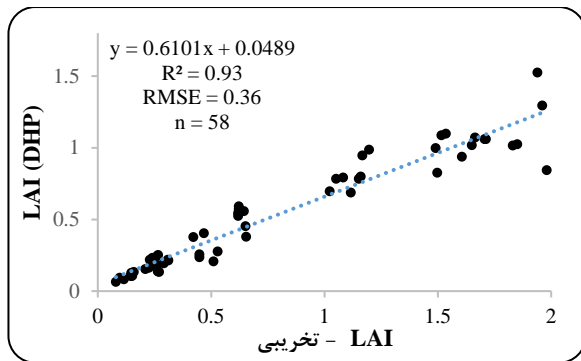
در این مرحله از نمونه‌برداری دلالت دارد. شاید دلیل این امر این است که در عکسبرداری DHP، امکان تمایز بین ساقه و برگ در پردازش وجود ندارد و در مرحله‌ای که میزان ساقه‌ها افزایش یافته، اختلاف بین LAI محاسبه شده از طریق روشهای DHP و تخریبی، تا حدی افزایش یافته، البته در گیاه ذرت، که ابعاد برگ‌ها بزرگ است و ساقه‌ها پوشیده می‌شوند، تأثیر این عامل نسبت به سایر گیاهان، کمتر است. در مرحله LAI زیاد، به‌خاطر ابعاد بزرگ برگ‌ها، تأثیر این عامل کمتر شده، چرا که بعد از مرحله گلدهی و یا نزدیک به این مرحله، در گیاه ذرت، عمدتاً برگ‌ها بخش اعظم مزرعه را می‌پوشانند و ساقه‌ها در اکثریت عکس‌ها ثبت نمی‌شوند.

در تحقیق Liu *et al.*, (2013) در گیاهان مختلف ذرت، گندم و سویا، کارایی برآورد LAI از طریق DHP بررسی شده و به این نتیجه رسیدند که ضمن اینکه این روش در برآورد LAI نیز کاراست، دقت برآورد LAI در ذرت و سویا نسبت به گندم؛ به علت تأثیرگذاری ساقه در گندم، بالاتر بوده است. آنها بیان نموده‌اند که در گیاه ذرت، میزان  $R^2$  و  $RMSE$  در برآورد LAI، به ترتیب  $0.92$  و  $0.57$  بوده که در مقایسه با تحقیق حاضر، دقت کمتری را برآورد نموده‌اند. علاوه بر این، تحقیق نامبردگان تنها منحصر به ابتدای دوره رشد گیاهان بوده، اما تحقیق حاضر به

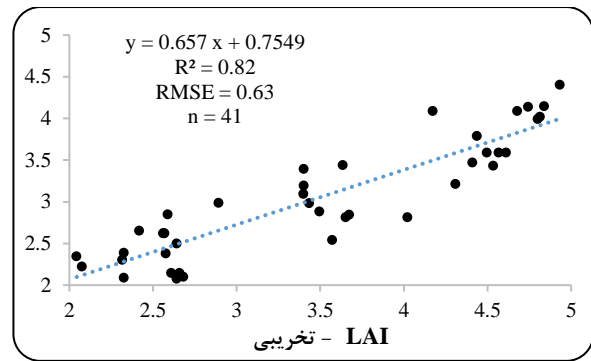
برای ارزیابی کارایی روش اندازه‌گیری LAI با استفاده از DHP و بررسی صحت برآورد آن در مراحل مختلف رشد گیاه و به بیان دیگر مقادیر متفاوت LAI، سه گروه LAI کم ( $0 < LAI < 2$ )، LAI میانی ( $2 < LAI < 5$ ) و LAI زیاد ( $5 < LAI < 6$ )، از نظر آماری مقایسه شدند (شکل ۸). نتایج نشان می‌دهد که در هر سه مرحله رشد گیاه، بین مقادیر LAI محاسبه شده از طریق DHP و روش تخریبی، ارتباط خطی معنی‌داری وجود دارد. ضریب  $R^2$  معرف میزان انطباق مدل<sup>۱</sup> رگرسیونی در ارتباط بین LAI محاسبه شده از طریق DHP و تخریبی می‌باشد، به طوری که نتایج نشان می‌دهد با افزایش رشد گیاه ذرت، میزان  $R^2$  کاهش یافته و میزان انطباق مدل رگرسیون برآورد شده در مرحله LAI کمتر از ۲، بسیار قوی‌تر است. اما از نظر دقت و صحت برآورد LAI از طریق DHP، دو آماره  $RMSE$  و  $Bias$  کمک کننده است. در مقایسه بین این سه گروه LAI از نظر  $RMSE$  و  $Bias$ ، میزان این آماره‌ها بسیار کوچک بدست آمده که بر صحت و دقت روش اندازه‌گیری LAI از طریق DHP دلالت دارد. با این حال، مرحله LAI میانی با میزان  $RMSE = 0.63$  و  $Bias = 0.49$  نسبت به دو مرحله دیگر LAI در نظر گرفته شده ( $RMSE = 0.36$ ،  $Bias = 0.24$ ) در LAI کم و ( $RMSE = 0.41$ ،  $Bias = 0.28$ ) در LAI زیاد، از دقت کمتری برخوردار است که بر صحت کمتر و کارایی پایین‌تر روش DHP

کل دوره رشد گیاه ذرت علوفه‌ای در ۳۰ مزرعه در کل منطقه با اخذ ۱۸۰ گروه عکس یا نمونه‌برداری (جمعا حدود ۱۸۰۰ عکس DHP)، ارزیابی گردیده است. بنابراین از آنجایی که در تحقیق حاضر، تغییرپذیری مکانی LAI در منطقه وسیع نیز در نظر گرفته شده، نتایج ارزیابی از نظر مکانی و نیز زمانی قابل استنادتر است.

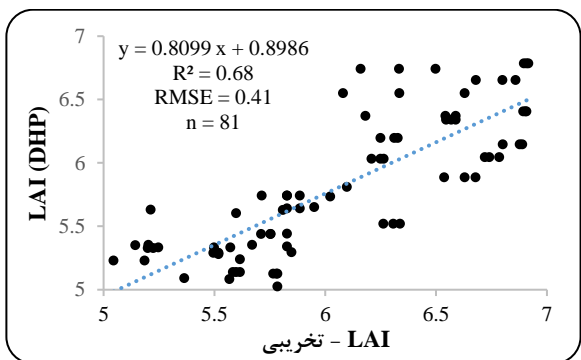
بررسی کارآیی DHP در کل دوره رشد پرداخته است. در تحقیق Ariza-Carricondo *et al.*, (2019) در بین روشهای غیرمستقیم اپتیکی که برای اندازه‌گیری LAI در نظر گرفته‌اند، LAI-2200 و DHP را در توافق خوبی برای برآورد LAI با دقت  $R^2$  در حدود ۰/۸۳ یافته‌اند. در تحقیق ذکر شده نیز تنها ۱۶ بار نمونه‌برداری در یک پلات ۳×۳ متر، انجام شده، در حالی که تحقیق حاضر در



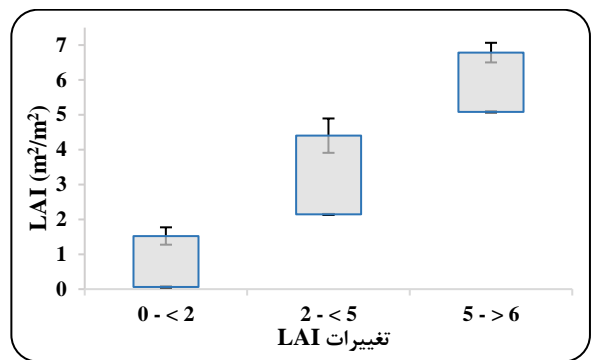
۰ - < 2 LAI گروه (الف)



2 - < 5 LAI گروه (ب)



5 - > 6 LAI گروه (ج)



(د) میزان Bias برآورد LAI از طریق DHP در مقایسه با روش تخریبی

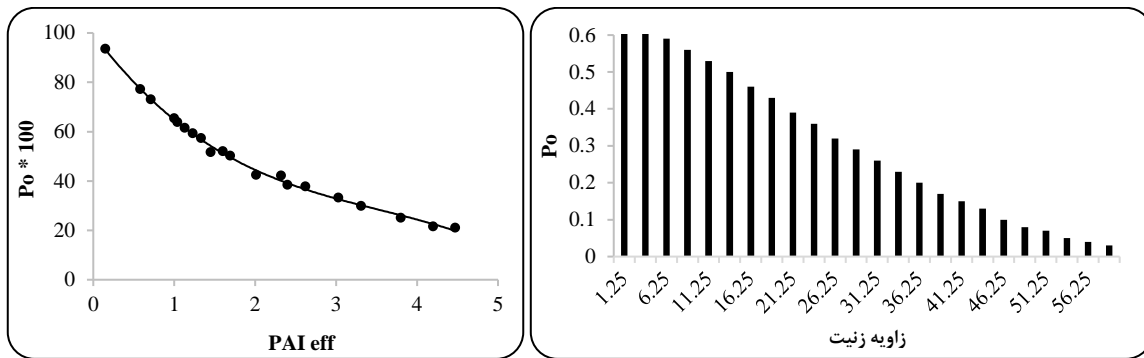
شکل ۸- (الف الی ج) ارتباط بین LAI اندازه‌گیری شده به صورت تخریبی و DHP در گروه‌های مختلف LAI در نظر گرفته شده، (د) ارزیابی میزان Bias برآورد LAI از طریق DHP در مقایسه با روش تخریبی، بصورت error line در گروه‌های مختلف LAI در نظر گرفته شده. هیستوگرام، مقادیر حداقل و حداکثر هر گروه را نشان می‌دهد.

(2016) *et al.*، به میزان ۰/۵ برای ذرت می‌باشد. در تحقیقات ذکر شده، براساس مروری بر تحقیقات سایرین و یا ایجاد رابطه بین مقادیر FAPAR و LAI اندازه‌گیری شده به روش light probe و تخریبی به ترتیب، مقدار K را در نظر گرفته‌اند. علاوه بر این، در شکل (۹)، تغییرات Po در زوایای زینت مختلف در یک ESU مطالعاتی در این منطقه (به علت رعایت اختصار، چرا که در تمام موارد، رفتار و نحوه تغییر نمودار به همین صورت بوده است)، ارائه شده که نشان می‌دهد روند تغییرات آن در زوایای زینت مختلف بصورت نزولی است.

### ضریب میرایی

منحنی تغییرات  $Po \cdot 100$  (gap fraction کانویی) نسبت به PAI در شکل (۹) با استفاده از ESUهای مختلف منطقه مورد مطالعه، ارائه شده است. با افزایش مقدار PAI eff، مقدار gap fraction کاهش و با کاهش آن، مقدار gap fraction افزایش می‌یابد. براساس رابطه بین این دو عامل در تمام ESUهای منطقه، طبق فرمول ۲، مقادیر K در زوایای زینت مختلف محاسبه شد و مقدار میانگین آن برابر با  $K = 0.507643$  بدست آمد. این مقدار تقریباً معادل K در تحقیقات Cavero *et al.*, (2000); Battude





شکل ۹- نمودار تغییرات Po در زوایای زینت مختلف در یک ESU و نیز تغییرات آن نسبت به PAI eff با استفاده از ESUهای منطقه مورد مطالعه به ترتیب از راست به چپ

عکسبرداری DHP، به طور همزمان، امکان محاسبه چند پارامتر بیوفیزیکی و پارامترهای موردنیاز مدل‌های کشاورزی وجود دارد، در این تحقیق، ضریب میرایی نیز محاسبه شد. مقدار این ضریب در این تحقیق، برابر با  $K = 0.507643$  بدست آمد که در بازه مقادیر اندازه‌گیری شده در تحقیقات مشابه است. بنابراین با توجه به دقت قابل قبول بدست آمده در روش DHP، و با استفاده از میانگین مقادیر LAI در دو روش اندازه‌گیری زمینی ذکر شده در این تحقیق، می‌توان به محاسبه و تخمین میزان LAI به صورت پیکسل مبنا از طریق سنجش از دور پرداخت.

### سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از رساله دکتری دانشجو در دانشگاه تهران به شماره ثبت ۱۱۲۸۰۳۵۰ می‌باشد و هیچ تأمین‌کننده منابع مالی نداشته است.

### REFERENCES

- Ariza-Carricondo, C., Di Mauro, F., de Beeck, M.O., Roland, M., Gielen, B., Vitale, D., Ceulemans, R. and Papale, D., (2019). A comparison of different methods for assessing leaf area index in four canopy types. *Central European Forestry Journal*, 65(2), 67-80.
- Ashrafi A, Amiraslani F, Darvishi Bolorani A, Mousivand A J. (2019). Leaf Area Index (LAI) Responses of tree species to industrial dust (case study: the Caspian hyrcanian mixed forests). *Geographical space*. 18 (64). 267-286. (In Farsi).
- Badiheshin, A., Noori, H., Vazifehdoost, M. (2014). Calibration of leaf area index estimating equations in maize and sugar beet based on MODIS sensor satellite data (Qazvin irrigation network). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(2), 155-165. doi: 10.22059/ijswr.2014.51617. (In Farsi).
- Baret, F., Weiss, M., Allard, D., Garrigues, S., Leroy, M., Jeanjean, H., Fernandes, R., Myneni, R., Privette, J., Morisette, J. and Bohbot, H., (2005). VALERI: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products. *Remote Sensing of Environment*, 76(3), 36-39.
- Battude, M., Al Bitar, A., Morin, D., Cros, J., Huc, M., Sicre, C.M., Le Dantec, V. and Demarez, V. (2016). Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 184, 668-681.
- Campos-Taberner, M., García-Haro, F. J., Moreno, A., Gilabert, M. A., Sanchez-Ruiz, S., Martinez, B., and Camps-Valls, G. (2015). Mapping leaf area index with a smartphone and Gaussian processes. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(12), 2501-2505.
- Cavero, J., Farre, I., Debaeke, P., and Faci, J. M. (2000). Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agronomy journal*. 679-690. doi:10.2134/agronj2000.924679x.
- Claverie, M., Demarez, V., Duchemin, B., Hagolle, O., Ducrot, D., Marais-Sicre, C., Dejoux, J.F., Huc, M., Keravec, P., Béziat, P. and Fieuzal, R. (2012).

- Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using high spatial and temporal resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 124, 844-857.
- Darvishsefet, A., Miri, N., Shakeri, Z., Zargham, N. (2017). Estimation of leaf area index in Zagros forests using Landsat 8 data. *Iranian Journal of Forest*, 9(1), 29-42. (In Farsi).
- Darvishzadeh, R.; Skidmore, A.; Schlerf, M.; Atzberger, C. (2008) Inversion of a radiative transfer model for estimating vegetation LAI and chlorophyll in a heterogeneous grassland. *Remote Sensing of Environment*. 112, 2592-2604.
- Deljouei, A., Sadeghi, S.M.M, Abdi, E., (2016). Comparing leaf area index at different distances from constricted forest roads edge in hyrcanian forest (case study: a hornbeam-beech forest in kheyroud, mazandaran). *Forest research and development*, 2(2). 169-180. (In Farsi).
- Demarez, V., Duthoit, S., Baret, F., Weiss, M., Dedieu, G., (2008). Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs. *Agriculture and Forest Meteorology*. 148, 644-655.
- ESA, (2005). SPARC 2004, Contract No. 18307/04/NL/FF, SPARC Data Acquisition Report.
- Fang, H., Baret, F., Plummer, S., and Schaepman-Strub, G. (2019). An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications. *Reviews of Geophysics. Wiley Online Library*. 1-61.
- Faridhosseini, A.R., Astaraei, S.H., Sanaeinejad, P., Mirhoseini Moosavi, P. (2013). Estimation of leaf area index using IRS satellite images. *Iranian journal of field crops research*. 10(3). 577-582. (In Farsi).
- Gao, Y., Duan, A., Qiu, X., Sun, J., Zhang, J., Liu, H., & Wang, H. (2010). Distribution and use efficiency of photosynthetically active radiation in strip intercropping of maize and soybean. *Agronomy journal*, 102(4), 1149-1157.
- IRIMO [WWW Document], (2018). URL www.irimo.ir (accessed 9.30.18).
- Jin, X., Yang, G., Xu, X., Yang, H., Feng, H., Li, Z., Shen, J., Zhao, C. and Lan Y., (2015). Combined multi-temporal optical and radar parameters for estimating LAI and biomass in winter wheat using HJ and RADARSAR-2 data. *Remote Sensing*, 7(10), 13251-13272. doi:10.3390/rs71013251.
- 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(1-2), 19-35.
- Kross, A., McNairn, H., Lapen, D., Sunohara, M., and 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.
- 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, 187-207.
- Liu, J., Pattey, E., and Admiral, S. (2013). Assessment of in situ crop LAI measurement using unidirectional view digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, 25-34.
- Macfarlane, C., Hoffman, M., Eamus, D., Kerp, N., Higginson, S., McMurtrie, R., Adams, M., (2007). Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology*. 143, 176-188.
- Mousivand, A., Menenti, M., Gorte, B., & Verhoef, W. (2015). Multi-temporal, multi-sensor retrieval of terrestrial vegetation properties from spectral-directional radiometric data. *Remote Sensing of Environment*, 158, 311-330.
- Munz, S., Feike, T., Chen, Q., Claupein, W., and Graeff-Hönninger, S. (2014). Understanding interactions between cropping pattern, maize cultivar and the local environment in strip-intercropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 195, 152-164.
- Verrelst, J., Muñoz, J., Alonso, L., Delegido, J., Rivera, J. P., Camps-Valls, G., and Moreno, J. (2012). Machine learning regression algorithms for biophysical parameter retrieval: Opportunities for Sentinel-2 and-3. *Remote Sensing of Environment*, 118, 127-139.
- Xia, T., Miao, Y., Wu, D., Shao, H., Khosla, R., and Mi, G. (2016). Active optical sensing of spring maize for in-season diagnosis of nitrogen status based on nitrogen nutrition index. *Remote sensing*, 8(7), 605.
- Yan, G., Hu, R., Luo, J., Weiss, M., Jiang, 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, 390-411.