



## Estimation of Leaf Area Index of Maize by Vegetation Indices Extracted from Satellite Imaging

Saeid Jalili<sup>✉1</sup>, Masoud Parsinejad<sup>1</sup>, Peyman Daneshkar Arasteh<sup>2</sup>

1. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: [Jalili\\_saeid@yahoo.com](mailto:Jalili_saeid@yahoo.com)
2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: [parsinejad@ut.ac.ir](mailto:parsinejad@ut.ac.ir)
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, [Arasteh1348@yahoo.com](mailto:Arasteh1348@yahoo.com)

Article Info	ABSTRACT
<b>Article type:</b> Research Article	Leaf area index is an important parameter in controlling different processes between atmosphere-plant-soil and due to its importance in various modeling, its rapid measurement at different scales has been considered. The use of vegetation indices (VIs) is one of the common methods for estimation leaf area index and each of these indices shows different sensitivities in various values of leaf area index during plant growth period. The aim of this study was to estimate leaf area index using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Difference Vegetation Index (DVI), Weighted Difference Vegetation Index (WDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), Green Normalized Difference Vegetation Index (NDVIg), Normalized Difference Water Index (NDWI), Optimized Soil Adjusted Vegetation Index (OSAVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Wide Dynamic Range Vegetation Index (WDRVI) and Green Difference Vegetation Index (GDVI) and comparison with measured leaf area index during the growth period of maize under different crop densities and the application straw mulching during 2020 growing season in the Karaj. Based on the results, the sensitivity of vegetation indices to leaf area index weren't same at different growth stage and indices such as DVI, WDVI and GDVI at the initial growth stage and NDVIg, NDWI and EVI at the mid growth stage showed high sensitivity to estimation of leaf area index. Finally, OSAVI index With R2, RMSE and average noise equivalent (NE) of 0.91, 0.98 (m2/m2) and 1.8, respectively, considered as the best index for leaf area index estimation.
<b>Article history:</b>	
<b>Received:</b> June. 26, 2022	
<b>Revised:</b> Aug. 23, 2022	
<b>Accepted:</b> Aug. 29, 2022	
<b>Published online:</b> Nov. 22, 2022	
<b>Keywords:</b> Leaf Area Index, Landsat 8, Maize, OSAVI, Vegetation Indices.	

Cite this article: Jalili, S., Parsinejad, M., & Daneshkar Arasteh, P. (2022). Estimation of leaf area index of maize by vegetation indices extracted from satellite imaging. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (8), 1813-1829.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344920.669302>



## برآورد شاخص سطح برگ ذرت علوفه‌ای با استفاده از شاخص‌های گیاهی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای

سعید جلیلی<sup>۱</sup>، مسعود پارسی‌نژاد<sup>۲</sup>، پیمان دانش‌کار آراسته<sup>۳</sup>۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل: [jalili\\_saeid@yahoo.com](mailto:jalili_saeid@yahoo.com)۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل: [parsinejad@ut.ac.ir](mailto:parsinejad@ut.ac.ir)۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران، ایمیل: [arasteh1348@yahoo.com](mailto:arasteh1348@yahoo.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	شاخص سطح برگ پارامتر مهمی در کنترل فرآیندهای مختلف بین اتمسفر-گیاه-خاک بوده و به دلیل اهمیت آن در مدل‌سازی‌های مختلف، اندازه‌گیری سریع آن در مقیاس‌های مختلف همواره مورد توجه بوده است. استفاده از شاخص‌های گیاهی (VIs) از روش‌های مرسوم تخمین شاخص سطح برگ بوده و هر یک از این شاخص‌ها حساسیت‌های متفاوتی در مقادیر مختلف شاخص سطح برگ در طول دوره رشد گیاه از خود نشان می‌دهند. هدف این مطالعه برآورد شاخص سطح برگ با استفاده از شاخص‌های گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)، گیاهی تفاضلی (DVI)، تفاوت وزن شاخص (WDVI)، شاخص گیاهی تعدیل شده خاک (SAVI)، تفاضلی نرمال شده سبز (NDVIg)، تفاضلی نرمال شده آب (NDWI)، شاخص گیاهی تعدیل شده خاک بهینه (OSAVI)، پوشش گیاهی ارتقاء یافته (EVI)، شاخص طیف گسترده پویا (WDRVI) و گیاهی تفاضلی سبز (GDVI) و مقایسه با مقادیر میدانی شاخص سطح برگ در طول دوره رشد گیاه ذرت علوفه‌ای تحت تراکم کشت‌های مختلف و کاربرد مالچ کاه و کلش طی فصل رشد ۱۳۹۹ در کرج بود. بر اساس نتایج به دست آمده حساسیت شاخص‌های گیاهی به شاخص سطح برگ در مراحل مختلف رشد یکسان نبوده و شاخص‌هایی مانند DVI، WDVI و GDVI در مراحل اولیه رشد و شاخص‌های NDVIg، NDWI و EVI در مراحل میانی رشد از حساسیت بالایی در برآورد شاخص سطح برگ از خود نشان دادند و در نهایت شاخص OSAVI بر اساس معیارهای $R^2$ ، RMSE و متوسط نویز معادل (NE) به ترتیب معادل ۰/۹۱، ۰/۹۸ مترمربع بر مترمربع و ۱/۸ به عنوان شاخص برتر در برآورد شاخص سطح برگ معرفی شدند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۷	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۹/۱	
واژه‌های کلیدی: ذرت، شاخص سطح برگ، شاخص‌های گیاهی، لندست-۸، OSAVI	

استناد: جلیلی، سعید؛ پارسی‌نژاد، مسعود؛ دانش‌کار آراسته، پیمان. (۱۴۰۱). برآورد شاخص سطح برگ ذرت علوفه‌ای با استفاده از شاخص‌های گیاهی مستخرج از تصاویر

ماهواره‌ای، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۸)، ۱۸۲۹-۱۸۱۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344920.669302>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

شاخص سطح برگ (LAI) مساحت سطح برگ در دسترس برای تبادل گازها بین اتمسفر - گیاه - خاک را تشریح می‌کند (Cowling and Field, 2003). از این رو پارامتر مهمی در کنترل فرآیندهای بیولوژیکی و فیزیکی گیاهان از جمله حائل شدن نور و آب (بارندگی و مه)، کاهش نفوذ نور در داخل پوشش گیاهی، تعرق، فتوسنتز و چرخه مواد غذایی و کربن به شمار می‌رود. اندازه‌گیری LAI در مقیاس‌های مکانی مختلفی، در سطح یک بوته یا کل مزرعه یا یک منطقه صورت می‌گیرد (Deng et al., 2017; Gu et al., 2015; Bonan, 1993; Liu et al., 2018; ; Zhang et al., 2020; Wang et al., 2021). از روش‌های قدیمی و مرسوم اندازه‌گیری LAI روش اندازه‌گیری مستقیم بوده که نیازمند صرف زمان زیاد و تخریب بوته یا بخشی از مزرعه است (Zarate-Valdez et al., 2012). بنابراین اندازه‌گیری مستقیم LAI در مقیاس‌های بزرگ تقریباً غیرممکن بوده و به دلیل اهمیت کاربرد گسترده LAI در مدلسازی‌های مختلف، روش‌های غیرتخریبی جهت تخمین این شاخص مورد نیاز هستند (Nguy-Robertson et al., 2012).

در دو دهه اخیر روش‌های غیرتخریبی از راه دور به دلیل در دسترس بودن و اندازه‌گیری راحت LAI مورد توجه قرار گرفته‌اند (Martens et al., 1993; Bréda, 2003). تکنیک سنجش از دور یک ابزار شناخته شده و جایگزین برای تخمین سریع LAI در مقیاس‌های وسیع و بدون ایجاد آسیب برای گیاه است (Hansen and Schjoerring, 2003; He et al., 2016). با این حال استفاده از سنجش از دور نیازمند صحت‌سنجی اطلاعات با داده‌های واقعی زمینی در پوشش‌های گیاهی مختلف می‌باشد (Carricondo et al., 2019). استخراج متغیرهای بیوفیزیکی گیاه از سنجش از دور به دو صورت مدل‌های فیزیکی و تجربی صورت می‌پذیرد. ساده‌ترین روش برای تخمین LAI با استفاده از سنجش از دور ایجاد روابط تجربی بین شاخص‌های گیاهی سنجش از دور (VI) و LAI اندازه‌گیری شده است (Baret and Guyot, 1991; Broge et al., 2001). شاخص‌های گیاهی بر اساس بازتاب دو یا تعدادی باند طیفی اغلب در محدوده باندهای مرئی و مادون قرمز طیف الکترومغناطیسی محاسبه شده و خصوصیات بیوفیزیکی پوشش گیاهی مانند سبزینه‌گی، بیومس و شاخص سطح برگ را منعکس می‌کنند (Baghzouz et al., 2010; Liu et al., 2012). در واقع هدف اصلی شاخص‌های گیاهی افزایش اطلاعات حاوی بازتاب‌های طیفی، با استخراج تغییرات خصوصیات گیاهی مانند LAI و کمینه کردن اثرات خاک و اتمسفر است (Moulin and Guerif, 1999). مطالعات متعددی برای تخمین شاخص سطح برگ با استفاده از شاخص‌های گیاهی صورت گرفته است. (Haboudane et al., 2004) ضمن معرفی شاخص‌های  $^{*}MCARI2$  و  $^{*}MTVI2$ ، شاخص سطح برگ گیاهان سویا، ذرت و گندم را با استفاده از این شاخص‌ها تخمین زده و با مقایسه اندازه‌گیری‌های میدانی شاخص سطح برگ، مقدار  $R^2$  برابر با ۰/۹۸ برای سویا، ۰/۸۹ برای ذرت و ۰/۷۴ برای گندم و به ترتیب ۰/۲۸، ۰/۴۶ و ۰/۸۵ مترمربع بر مترمربع برای سویا، ذرت و گندم گزارش کردند. (Vina et al., 2011) شاخص‌های  $^{*}CI_{Red}$  و  $^{*}CI_{Green}$  را شاخص‌های مناسب برای ارزیابی LAI در طول فصل رشد معرفی کردند که رابطه خطی معنی‌داری با LAI داشتند. (Nguy-Robertson et al., 2012) شاخص‌های مختلفی برای تخمین شاخص سطح برگ سبز<sup>۱</sup> سویا و ذرت را مورد بررسی قرار دادند و مشخص شد شاخص NDVI<sup>۲</sup> در LAI کمتر از ۲ و شاخص‌های SR<sup>۱۱</sup> و  $^{*}CI_s$  در LAI بزرگتر از ۲ حساسیت بالایی در تخمین شاخص سطح برگ سبز داشته و برای بهبود تخمین LAI در کل فصل رشد VIs ترکیبی را پیشنهاد دادند. (Mokhtari et al., 2018) شاخص سطح برگ گیاه گندم را با استفاده از VIs مختلف مورد ارزیابی قرار دادند و بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که شاخص SAVI<sup>۱۲</sup> حساسیت بالایی در مقایسه با شاخص‌های NDVI، SR،  $^{*}WDVI$  و  $^{*}WDRVI$  در تخمین شاخص سطح برگ دارد. (Mourad et al., 2018)

- 
- 1 Leaf Area Index
  - 2 Vegetation indices
  - 3 Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index
  - 4 Modified Triangular Vegetation Index
  - 5 Green Chlorophyll Index
  - 6 Red-edge Chlorophyll Index
  - 7 MERIS Terrestrial Chlorophyll Index
  - 8 Green Leaf Area Index
  - 9 Normalized Difference Vegetation Index
  - 10 Simple Ratio
  - 11 Chlorophyll indices
  - 12 Soil Adjusted Vegetation Index
  - 13 Weighted Difference Vegetation Index
  - 14 Wide Dynamic Range Vegetation Index

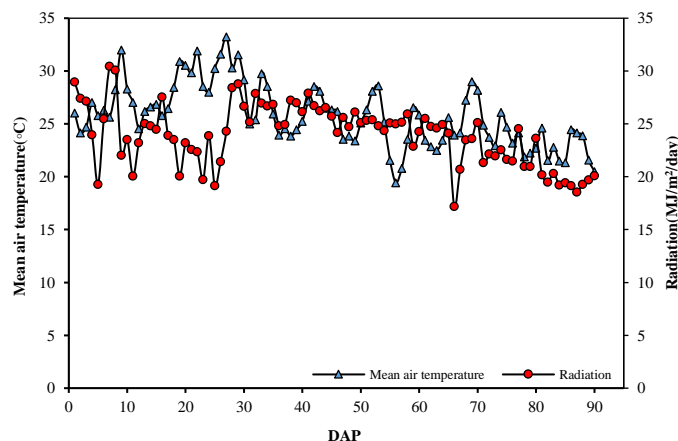
(2022) در مطالعه خود شاخص 'EVI2' را شاخص مناسبی برای تخمین سطح برگ گیاهانی چون سیب زمینی، غلات، سبزیجات و تنباکو معرفی کردند.

به دلیل اهمیت شاخص سطح برگ در روابط گیاه- خاک- اتمسفر، مطالعات متعددی جهت تخمین LAI صورت گرفته که تحت شرایط مدیریتی گوناگون و گیاهان مختلف شاخص‌های گیاهی رفتارهای متفاوتی از خود نشان داده و نمی‌توان یک VI مشخص را برای تمام گونه‌های گیاهی با ساختار سطح سایه‌انداز و برگ متفاوت به کار برد. هدف از این مطالعه ارزیابی استخراج شاخص سطح برگ از تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از شاخص‌های گیاهی مختلف مستخرج از تصاویر ماهواره لندست ۸ و مقایسه شاخص سطح برگ برآورد شده با مقادیر میدانی شاخص سطح برگ در طول دوره رشد گیاه ذرت علوفه‌ای در منطقه کرج می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

این مطالعه طی دوره رشد ذرت در سال ۱۳۹۹ در اراضی تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در شهر کرج، استان البرز (N ۳۵° ۴۸' و E ۵۰° ۵۷') به ارتفاع ۱۲۹۵ متر از سطح دریا صورت گرفت. اقلیم منطقه خشک و نیمه‌خشک بوده و در طول دوره رشد ذرت در زمان مطالعه (تیر تا مهرماه ۱۳۹۹) مقدار بارندگی ۰/۴ میلی‌متر، حداکثر و حداقل دمای روزانه برابر با ۴۰/۱ و ۱۰/۹ درجه سانتی‌گراد و مجموع تبخیر از سطح تشت برابر با ۷۹۱/۷ میلی‌متر بدست آمد. متوسط دما و تابش خورشیدی در طول دوره رشد در شکل ۱ ارائه شده است.



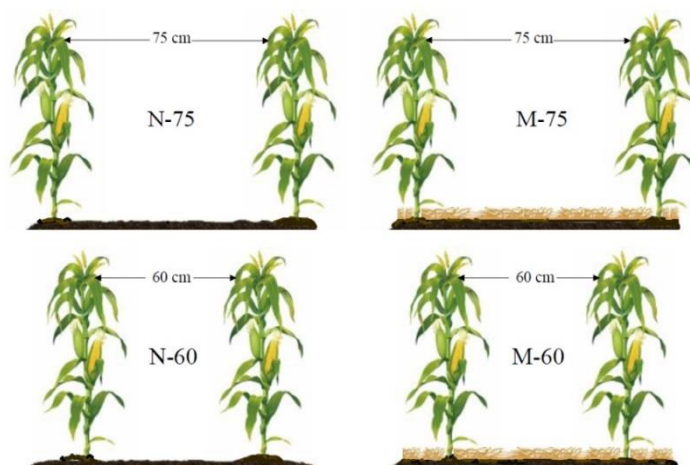
شکل ۱. متوسط دما و تابش خورشیدی در طول دوره رشد ذرت (DAP<sup>۲</sup>: روز پس از کاشت)

### شرح مطالعه میدانی

در این منطقه کشت ذرت پس از برداشت گندم زمستانه در تیر ماه انجام می‌شود. برای انجام این مطالعه یک مزرعه ۲ هکتاری انتخاب شد و نیمی از سطح اراضی با مالچ کاه و کلش و بقیه بدون مالچ و با سیستم آبیاری بارانی کلاسیک تحت کشت ذرت علوفه‌ای رقم کراس ۷۰۴ قرار گرفت. با استفاده از کاه و کلش جمع‌آوری شده از برداشت گندم، مالچ اراضی مالچ‌دار تقویت شده و پس از انجام عملیات آماده‌سازی اراضی، بذر ذرت در ردیف‌های با فواصل ۶۰ و ۷۵ سانتی‌متری (به ترتیب با تراکم کشت ۱۶۷ و ۱۳۴ هزار بوته در هکتار) در اراضی مالچ‌دار و بدون مالچ با استفاده از دستگاه ردیف‌کار در تاریخ ۱۰ تیر کشت شد و در مجموع ۴ تیمار با مساحت ۵۰۰۰ مترمربع برای این مطالعه در نظر گرفته شد (شکل ۲). همچنین همزمان با عملیات کشت کودهای سولفات پتاسیم و سوپرفسفات تریپل به میزان ۱۵۰ کیلوگرم بر هکتار و در مرحله ۱۰ برگی ذرت به میزان ۳۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود اوره مصرف شد. جهت کنترل رشد علف‌های هرز از سموم نیکوسلفورون و بیوموویت به ترتیب به میزان ۲ و ۱ لیتر در هکتار استفاده شد.

1 Enhanced Vegetation Index

2 Day after planting



شکل ۲. تیمارهای تحت مطالعه (N-75 بدون مالچ و فواصل ردیف‌های ۷۵ سانتی‌متر، N-60 بدون مالچ و فواصل ردیف‌های ۶۰ سانتی‌متر، M-75 مالچ‌دار و فواصل ردیف‌های ۷۵ سانتی‌متر، M-60 مالچ‌دار و فواصل ردیف‌های ۶۰ سانتی‌متر)

مدیریت آبیاری بر اساس میزان رطوبت تخلیه شده از خاک و با در نظر گرفتن  $MAD = 0.5$  و بدون اعمال هیچ‌گونه تنش رطوبتی برای کل تیمارها صورت گرفت.

اندازه‌گیری شاخص سطح برگ به صورت تخریبی از روز سیزدهم پس از کاشت ( $DAP = 13$ ) و هر ۱۲-۱۰ روز از هر تیمار و در دو تکرار در مساحت یک متر مربع با نمونه‌برداری از بوته‌ها انجام شد. نمونه‌ها تحت شرایط استاندارد به آزمایشگاه منتقل شده و با استفاده از دستگاه DeltaT Device, UK سطح برگ‌ها اندازه‌گیری شده و با تقسیم آن به سطح نمونه‌برداری بوته‌ها میزان شاخص سطح برگ محاسبه شد.

جهت تخمین شاخص سطح برگ با استفاده از شاخص‌های گیاهی در ابتدا تصاویر ماهواره لندست ۸ برای منطقه مورد مطالعه از پایگاه داده (<https://earthexplorer.usgs.gov>) (United States Geological Survey (USGS)) گردآوری شدند. زمان‌بندی دریافت تصاویر اخذ شده بیانگر این بود که مشکلی از نظر ابرناکی جهت بررسی‌های بعدی مشاهده نشد. در مجموع تعداد ۱۰ تصویر ماهواره‌ای در طول دوره رشد استخراج شد که دربرگیرنده دوره کامل توسعه سطح برگ گیاه بود (جدول ۱).

جدول ۱. مشخصات تصاویر ماهواره لندست ۸

شماره تصویر	تاریخ	مسیر / ردیف	ابعاد پیکسل
۱	۱۳۹۹/۴/۲۷	۱۶۴/۳۵	۳۰ متر
۲	۱۳۹۹/۵/۳	۱۶۵/۳۵	
۳	۱۳۹۹/۵/۱۲	۱۶۴/۳۵	
۴	۱۳۹۹/۵/۱۹	۱۶۵/۳۵	
۵	۱۳۹۹/۵/۲۸	۱۶۴/۳۵	
۶	۱۳۹۹/۶/۴	۱۶۵/۳۵	
۷	۱۳۹۹/۶/۱۳	۱۶۴/۳۵	
۸	۱۳۹۹/۶/۲۰	۱۶۵/۳۵	
۹	۱۳۹۹/۶/۲۹	۱۶۴/۳۵	
۱۰	۱۳۹۹/۷/۵	۱۶۵/۳۵	

در این مطالعه شاخص‌های NDVI، DVI، SAVI، WdVI، NDVIg، OSAVI، NDWI، EVI، WDRVI و GDVI که جزء

- 1 Management Allowed Depletion
- 2 Difference Vegetation Index
- 3 Green Normalized Difference Vegetation Index
- 4 Normalized Difference Water Index
- 5 Green Difference Vegetation Index

پرکاربردترین و ساده‌ترین شاخص‌های طیفی گیاهی می‌باشند جهت تخمین LAI انتخاب شدند. شاخص NDVI توسط Rouse et al. (1974) برای مطالعه شاخص سطح برگ، بررسی سلامتی و شادابی گیاهان مورد استفاده قرار گرفت. از قابلیت‌های این شاخص امکان پایش کاهش اثرات اتمسفری و توپوگرافی عنوان شده است. شاخص DVI توسط Tucker (1979) برای تشخیص بهتر بین خاک و پوشش گیاهی ارائه شده اما قادر به برآورد اختلاف بین بازتاب<sup>۱</sup> و رادیانس<sup>۲</sup> ایجاد شده توسط اثر اتمسفر نبود. (Huete (1988) برای رفع ایرادات شاخص NDVI از قبیل عدم تفکیک بازتاب بین خاک و گیاه، شاخص SAVI را ارائه کرد. همچنین Clevers (1988) با استفاده از بازتاب باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز شاخص WdVI را برای مطالعه شاخص سطح برگ معرفی کرد. (Gitelson and Merzlyak (1994) شاخص NDVIg را برای بررسی سبزیگی و شرایط فتوسنتزی گیاه ارائه کردند و یکی از شاخص‌های پرکاربرد در مطالعه جذب آب و نیتروژن گیاهان بوده و نسبت به تغییرات کلروفیل در گیاه در مقایسه با شاخص NDVI از حساسیت بالایی برخوردار بود. (Gao (1996) شاخص NDWI را برای تجزیه و تحلیل تنش آبی پوشش گیاهی و مطالعات شاخص سطح برگ در پوشش‌های گیاهی پر برگ معرفی نمود. (Rondeaux et al. (1996) برای افزایش حساسیت شاخص SAVI به پوشش گیاهی، این شاخص را اصلاح نموده و شاخص OSAVI را معرفی نمودند. (Huete et al. (2002) شاخص گیاهی EVI را برای بهبود شاخص NDVI برای سنجنده مادیس توسعه دادند. این شاخص از بازتاب باند آبی برای تصحیح اثر زمینه خاک و کاهش اثرات اتمسفری مانند آئروسول‌ها استفاده می‌کند. همچنین شاخص‌هایی مانند SAVI و NDVI در شاخص سطح برگ بیشتر از ۲/۵ و ۳/۵ قادر به تشخیص تغییرات سطح برگ نبوده و همبستگی بین NDVI و SAVI با شاخص سطح برگ وجود ندارد. برای رفع این ایرادات Gitelson et al. (2003) شاخص WDRVI را معرفی کرد. در این شاخص برای کاهش اثر طیف مادون قرمز نزدیک بر شاخص‌های گیاهی ضریب وزنی  $\alpha$  (۰/۲-۰/۰۵) به منظور ارائه رابطه‌ای خطی‌تر برای تغییرات شاخص سطح برگ تعریف شد. شاخص GDVI نیز توسط Sripada et al. (2006) در ابتدا برای تخمین نیاز نیتروژن در ذرت مورد استفاده قرار گرفته و بعدها در بررسی پوشش‌های گیاهی به کار گرفته شد. در جدول ۲ جزئیات بیشتری از این شاخص‌ها ارائه شده است.

جدول ۲. شاخص‌های طیفی گیاهی

منبع	رابطه	کلمه اختصار	شاخص‌های گیاهی
Rouse et al. (1974)	$\frac{\rho NIR - \rho RED}{\rho NIR + \rho RED}$	NDVI	تفاضلی نرمال شده
Tucker (1979)	$\rho NIR - \rho RED$	DVI	گیاهی تفاضل
Clevers (1988)	$\rho NIR - \frac{\rho NIR_{soil}}{\rho RED_{soil}} \times \rho RED$	WDVI	تفاوت وزن
Huete (1988)	$\frac{(1 + L)(\rho NIR - \rho RED)}{L + (\rho NIR + \rho RED)}$	SAVI	تعدیل شده خاک
Gitelson and Merzlyak (1994)	$\frac{\rho NIR - \rho GREEN}{\rho NIR + \rho GREEN}$	NDVIg	تفاضلی نرمال شده سبز
Gao (1996)	$\frac{\rho NIR - \rho SWIR}{\rho NIR + \rho SWIR}$	NDWI	تفاضل نرمال شده آب
Rondeaux et al. (1996)	$\frac{(1 + L)(\rho NIR - \rho RED)}{0.16 + (\rho NIR + \rho RED)}$	OSAVI	تعدیل شده خاک بهینه
Huete, et al. (2002)	$2.5 \times \frac{\rho NIR - \rho RED}{\rho NIR + 6 \times \rho RED - 7.5 \times blue + 1}$	EVI	پوشش گیاهی ارتقاء یافته
Gitelson et al. (2003)	$\frac{\alpha \times \rho NIR - \rho RED}{\alpha \times \rho NIR + \rho RED}$	WDRVI	طیف گسترده پویا
Sripada et al. (2006)	$\rho NIR - \rho GREEN$	GDVI	گیاهی تفاضل سبز

که در آن  $\rho NIR$  مقدار بازتاب باند مادون قرمز نزدیک،  $\rho RED$  بازتاب باند قرمز،  $\rho Blue$  بازتاب باند آبی،  $\rho Green$  بازتاب باند سبز،  $\rho SWIR$  بازتاب مادون قرمز طول موج کوتاه و  $L$  ثابت خاک برابر ۰/۵ است.

در این مطالعه از نرم افزار Eureka (Schmidt and Lipson, 2009) برای استخراج روابط خطی و غیرخطی برتر با حداقل میزان میانگین مربعات خطا (MSE) و حداکثر ضریب همبستگی بین VIs و LAI میدانی استفاده شد. در واقع این نرم‌افزار یک موتور جستجوی

الگوریتم بوده و با وارد کردن داده‌ها و تعریف متغیرهای وابسته و مستقل و تعیین عملیات محاسباتی (ضرب، تقسیم، جمع و غیره) و تعیین پارامترهای خطا، رابطه برتر با بیشترین درجه همبستگی استخراج می‌شود. بدین منظور  $VI_s$  در برابر  $LAI$  میدانی قرار گرفته و با استفاده از نرم‌افزار Eureqa توابع  $f(LAI)$  استخراج شدند. پس از آن برای تخمین شاخص سطح برگ، معکوس این توابع استخراج شدند.

### تحلیل‌های آماری

در این مطالعه از پارامترهای  $RMSE$  و  $R^2$  برای مقایسه روابط بدست آمده با یکدیگر و تعیین رابطه برتر استفاده شد. از آنجایی که این دو پارامتر نشان دهنده پراکندگی داده‌ها از خط رگرسیونی است، در صورت استخراج رابطه رگرسیونی غیرخطی، این دو پارامتر به ویژه زمانی که شاخص‌های گیاهی حساسیت خود را نسبت به شاخص سطح برگ از دست می‌دهند، به درستی عمل نخواهند کرد (Nguy- Robertson et al., 2012). بنابراین برای تعیین دقت روابط تخمین شاخص سطح برگ از پارامتر  $NE$  (Noise Equivalent) استفاده شد (Govaerts et al., 1999).

$$NE = \frac{RMSE(LAI)}{d(VI)/d(LAI)} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $RMSE(LAI)$  مقدار  $RMSE$  شاخص سطح برگ میدانی و شاخص سطح برگ برآورد شده و  $d(VI)/d(LAI)$  مشتق اول  $VI$  نسبت به  $LAI$  است. شاخص  $NE$  علاوه بر در نظر گرفتن شیب خط،  $RMSE$  را نیز به کار می‌گیرد که می‌تواند حساسیت تغییرات را نسبت به  $LAI$  در بازه تغییرات آن تعیین نماید. هر چه قدر میزان  $NE$  بیشتر باشد، حساسیت شاخص‌های گیاهی برای برآورد شاخص سطح برگ کمتر خواهد بود.

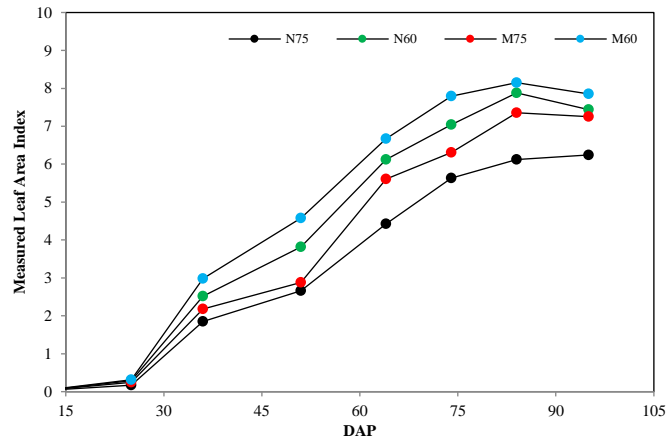
## نتایج و بحث

### شاخص سطح برگ میدانی

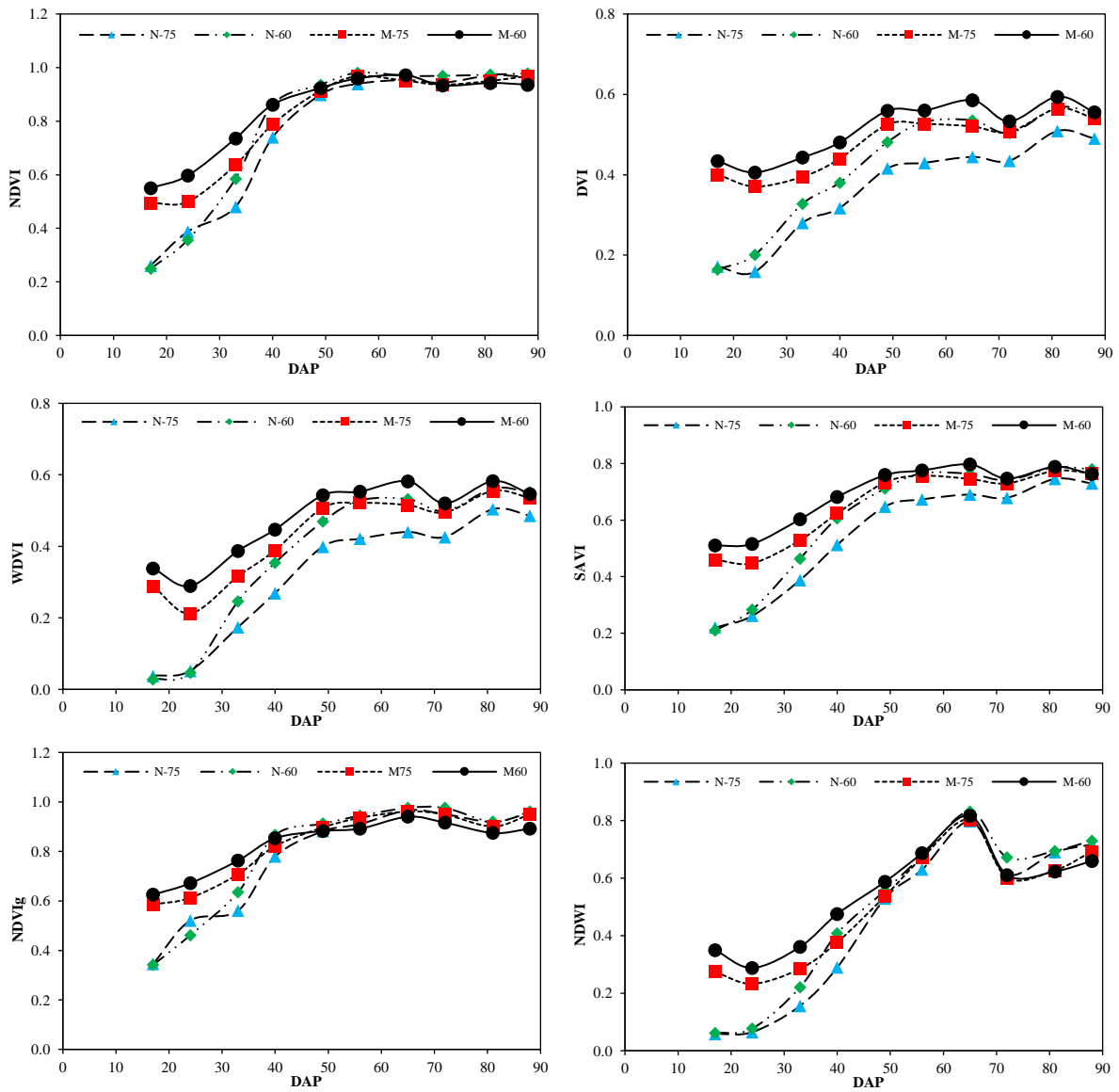
در این مطالعه شاخص سطح برگ در طول دوره رشد کشت ذرت علوفه‌ای و برای تیمارهای مختلف بصورت میدانی و به روش تخریبی اندازه‌گیری شد. روند مقادیر بدست آمده در شکل ۴ آمده است. بطور کلی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد تیمارهای مالچ‌دار  $LAI$  بیشتری در مقایسه با شرایط بدون مالچ داشتند که قابل پیش بینی بود. بدلیل تلفات تبخیر مستقیم کمتر از سطح خاک همواره رطوبت بیشتری در اختیار گیاه قرار گرفته و در نتیجه تعرق نسبی و رشد رویشی و در نتیجه شاخص سطح برگ بیشتری در بر خواهد داشت. Wang et al. (2004) نیز شاخص سطح برگ بیشتری را در تیمار با مالچ کاه و کلش در کشت ذرت گزارش داده‌اند. همچنین  $LAI$  اندازه‌گیری شده در تیمارهای با فواصل ردیف‌های ۶۰ سانتی‌متر بدلیل تراکم کشت بالاتر در تمامی مراحل رشد بیشتر از میزان شاخص سطح برگ تیمارهای با فواصل ۷۵ سانتی‌متر بدست آمد. در عین حال، نتایج نشان داد تأثیر تراکم کشت بیشتر در افزایش شاخص سطح برگ در مقایسه با کاربرد مالچ بیشتر بود و کاربرد مالچ باعث تغییر قابل توجه در میزان شاخص سطح برگ نشد. بر اساس نتایج مطالعه Jing et al. (2018) افزایش تراکم کشت نسبت به کاربرد مالچ کاه و کلش تأثیر بالایی بر روی  $LAI$  داشته و افزایش تراکم کشت از ۴۵۰۰۰ بوته در هکتار به ۹۰۰۰۰ بوته در هکتار باعث افزایش قابل توجه  $LAI$  شده و اثر تراکم کشت عامل اصلی در افزایش  $LAI$  عنوان شد. روند تغییرات شیب منحنی  $LAI$  اندازه‌گیری شده با گذشت زمان و با رشد رویشی گیاه تا مرحله رشد حداکثر افزایشی و در مراحل انتهایی فصل رشد کاهش یافت. بیشترین میزان  $LAI$  اندازه‌گیری شده برای تیمار M-60 به میزان ۸/۱۵ گزارش شد. اما نکته قابل ذکر آن است که از آنجایی که در این منطقه کشت ذرت جهت تأمین علوفه دام انجام شده و برداشت محصول تاحدی زود هنگام انجام می‌شود، لذا افت شاخص سطح برگ در انتهای رشد که در مطالعات متعددی (Li et al., 2017; Chen et al., 2019) گزارش شده است، در این منطقه مشاهده نشد.

### شاخص‌های گیاهی

نتایج حاصل از برآورد شاخص‌های گیاهی در طول فصل رشد برای تیمارهای تحت مطالعه در شکل ۵ ارائه شده است. با گذشت زمان و افزایش میزان رشد بوته‌ها، سطح پوشش سبز گیاهی ذرت افزایش یافته و از آنجایی که  $VI_s$  بر اساس سبزیگی موجود در سطح زمین میزان  $LAI$  را برآورد می‌کند (Broge and Leblanc, 2000; Haboudane et al., 2004)، لذا نتایج نشان می‌دهد با افزایش سطح سایه‌انداز میزان این شاخص‌ها تا رسیدن به حداکثر پوشش افزایش یافته و پس از آن ثابت مانده است. البته در تاریخ  $DAP = ۷۲$  یک کاهش نسبی در میزان شاخص‌های گیاهی مشاهده شد. این تاریخ مصادف با مرحله گرده افشانی بوته‌های ذرت بوده و به دلیل پوشش سطح برگ‌ها با گرده‌های زرد رنگ ذرت این کاهش رخ داده است.

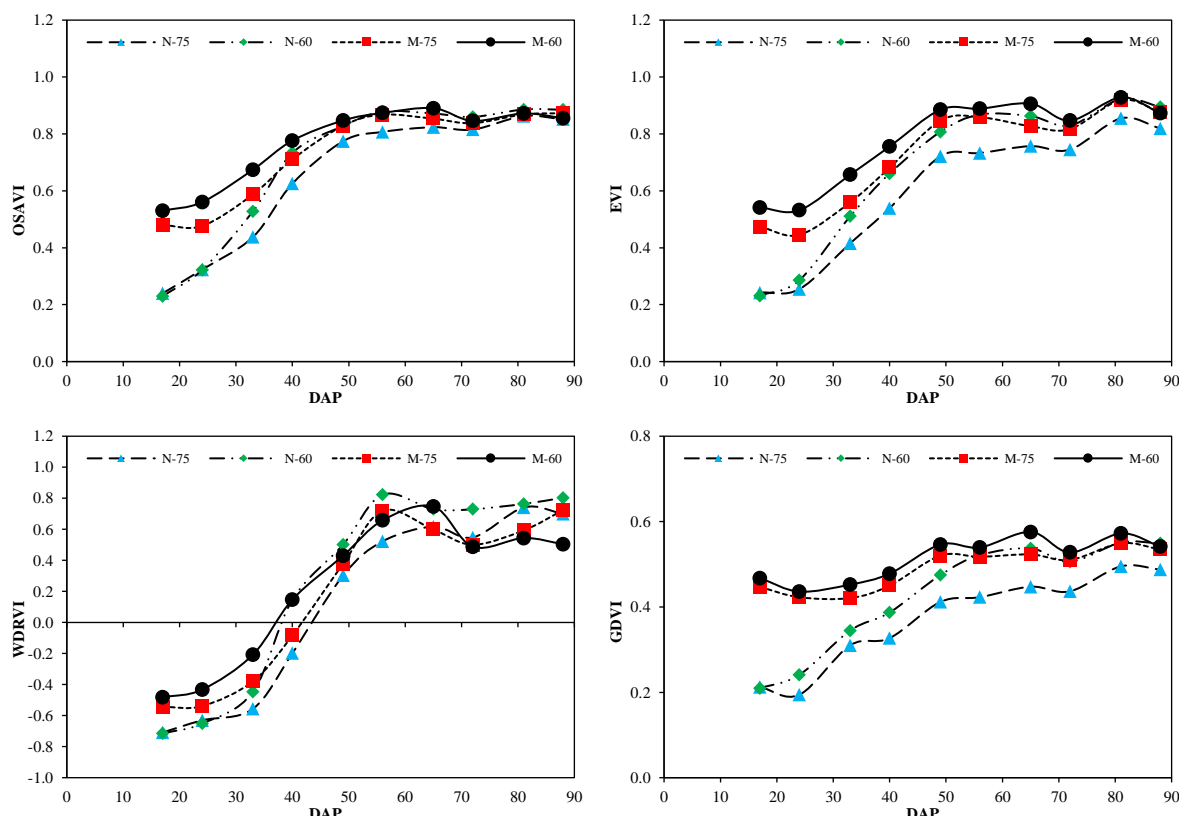


شکل ۴. تغییرات شاخص سطح برگ میدانی در طول فصل رشد برای تیمارهای مختلف



شکل ۵. تغییرات شاخص‌های گیاهی در طول فصل رشد برای تیمارهای مختلف





ادامه شکل ۵. تغییرات شاخص‌های گیاهی در طول فصل رشد برای تیمارهای مختلف

### استخراج شاخص سطح برگ از شاخص‌های گیاهی

در ابتدا به منظور بررسی رابطه بین شاخص سطح برگ و شاخص‌های گیاهی همبستگی بین این شاخص‌ها در نرم افزار SPSS.v20 تعیین شد (جدول ۳).

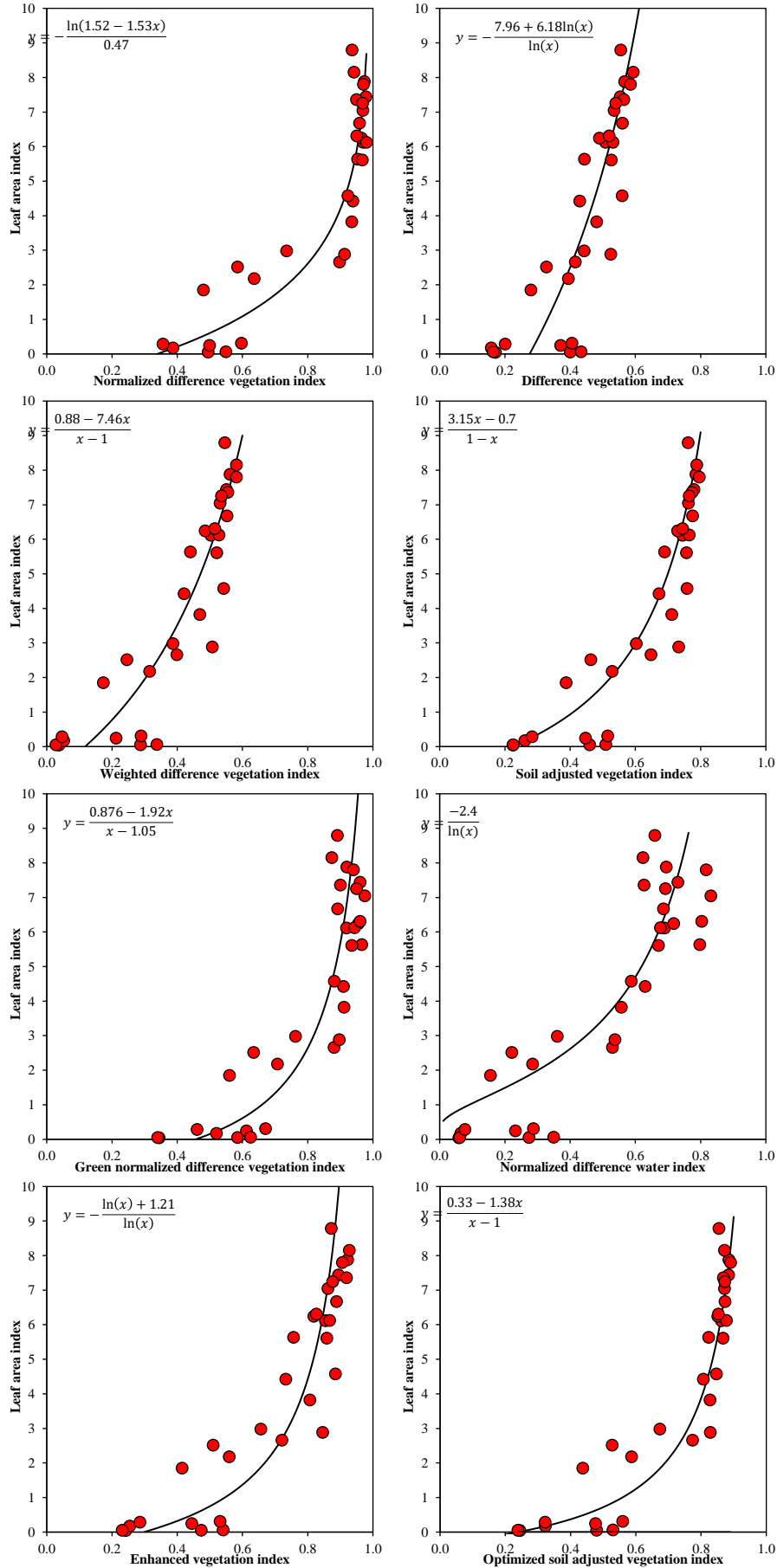
جدول ۳. ضریب همبستگی شاخص سطح برگ با شاخص‌های گیاهی

NDVIg	SAVI	WDVI	DVI	NDVI	همبستگی پیرسون	LAI
۰/۷۹۴**	۰/۸۷**	۰/۸۶۱**	۰/۸۴۳**	۰/۸۷۳**		
GDVI	WDRVI	EVI	OSAVI	NDWI		
۰/۷۸۵**	۰/۹۱**	۰/۸۵۹**	۰/۸۸**	۰/۸۰۸**		

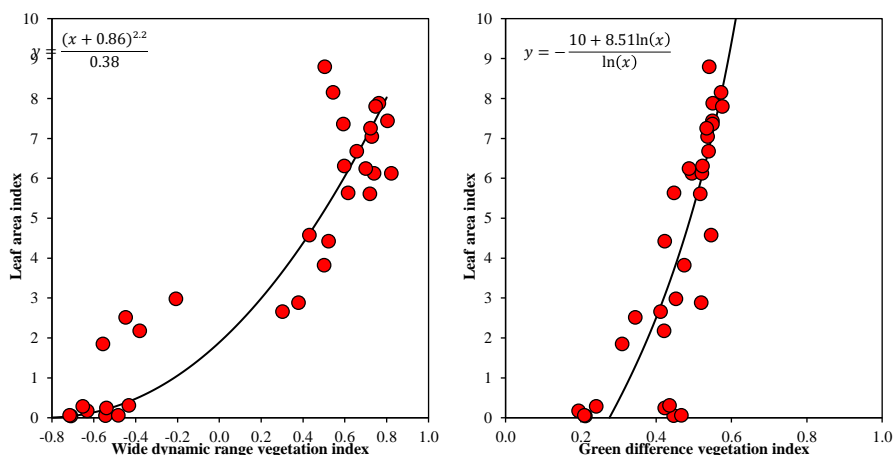
\*\*در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار است.

با توجه به اطلاعات جدول ۳ تمام VIs با LAI در سطح احتمال ۱ درصد همبستگی معنی داری داشته و از این رو می‌توان یک رابطه بین این شاخص‌ها و LAI برآورد داد. با استفاده از نرم افزار Eureqa روابط خطی و غیرخطی با حداقل میزان میانگین مربعات خطا (MSE) استخراج شدند. در این مطالعه خطی‌ترین روابط ممکن برای LAI استخراج شد تا VIs حساسیت خود را نسبت به تغییرات LAI از دست ندهند. بدین منظور VIs در برابر LAI میدانی قرار گرفته و با استفاده از نرم‌افزار Eureqa توابع f(LAI) استخراج شدند. پس از آن برای تخمین LAI، معکوس این توابع استخراج شد (شکل ۶).

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۶ شاخص سطح برگ با شاخص‌های DVI، GDVI و WDVI روندی خطی یا بسیار نزدیک به خطی دارد اما سایر شاخص‌ها روندی غیرخطی از خود نشان دادند. روندهای مختلفی بین VIs و LAI میدانی تحت شرایط مدیریتی و محصولات گوناگون مشاهده شده است. به طور مثال در مطالعه Mokhtari et al. (2018) روند شاخص‌های SR و WDVI کاملاً خطی و روند شاخص‌های SAVI، NDVI و WDRVI با شاخص سطح برگ میدانی گندم غیرخطی گزارش شد. (Mannschatz et al. (2014) نیز در مطالعه خود بر روی LAI گیاه بامبو در کشور برزیل رابطه NDVI و SAVI با شاخص سطح برگ میدانی را به صورت غیرخطی و لگاریتمی گزارش کردند. دقت روابط استخراج شده با استفاده از VIs با مقادیر میدانی LAI مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۴).



شکل ۶. روابط بین شاخص‌های گیاهی با شاخص سطح برگ

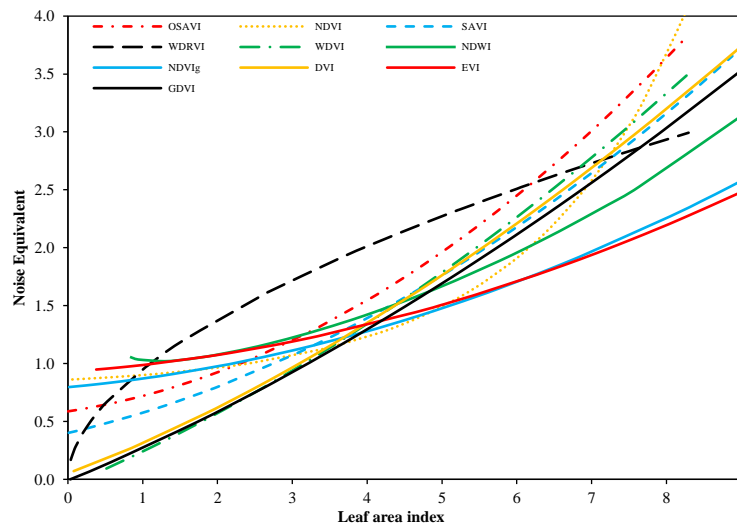


ادامه شکل ۶. روابط بین شاخص‌های گیاهی با شاخص سطح برگ

جدول ۴. روابط مربوط به هر یک از شاخص‌های گیاهی و معیارهای دقت آن‌ها

شاخص گیاهی طیفی	رابطه	R <sup>2</sup>	RMSE
NDVI	$LAI = -\frac{\ln(1.52 - 1.53NDVI)}{0.47}$	۰/۸۲	۱/۲۸
DVI	$LAI = -\frac{7.96 + 6.18\ln(DVI)}{\ln(DVI)}$	۰/۷۱	۱/۵۲
OSAVI	$LAI = \frac{0.33 - 1.38OSAVI}{OSAVI - 1}$	۰/۹۱	۰/۹۸
SAVI	$LAI = \frac{3.15SAVI - 0.7}{1 - SAVI}$	۰/۸۹	۱/۱۲
NDVIg	$LAI = \frac{0.876 - 1.92NDVIg}{NDVIg - 1.05}$	۰/۶۳	۲/۶۲
NDWI	$LAI = -\frac{2.4}{\ln(NDWI)}$	۰/۶۵	۲/۱۳
EVI	$LAI = -\frac{\ln(EVI) + 1.21}{\ln(EVI)}$	۰/۷۴	۲/۷۱
WDVI	$LAI = \frac{0.88 - 7.46WDVI}{WDVI - 1}$	۰/۸۲	۱/۱۸
WDRVI	$LAI = \frac{(WDRVI + 0.86)^{2.2}}{0.38}$	۰/۸۵	۱/۲۷
GDVI	$LAI = -\frac{10 + 8.51\ln(GDVI)}{\ln(GDVI)}$	۰/۶۲	۱/۸۲

با توجه به نتایج جدول ۴ میزان مقادیر R<sup>2</sup> در بازه ۰/۶۲ تا ۰/۹۱ متغیر بوده که شاخص GDVI کمترین و شاخص OSAVI بیشترین درجه همبستگی را دارند. بالاترین RMSE مربوط به شاخص EVI، برابر با ۲/۷۱ و کمترین آن مربوط به شاخص OSAVI با مقدار ۰/۹۸ مترمربع بر مترمربع برآورد شد. بیشتر VIs مانند NDVI، NDVIg، WDRVI و WDVI ضریب R<sup>2</sup> و RMSE مشابهی داشته اما فرم معادلات تخمین شاخص سطح برگ بسیار متفاوت بوده (لگاریتمی و توانی) همچنین با کاهش حساسیت VIs به LAI پراکندگی نقاط خط برازش داده شده در شکل ۶ نسبتاً بالا رفته و از این رو نیاز به شاخص‌هایی مانند NE برای مقایسه عملکرد VIs در تخمین LAI در طول تغییرات آن وجود دارد (شکل ۷).



شکل ۷. تغییرات NE نرمال شده برای شاخص های گیاهی مختلف در مقابل تغییرات شاخص سطح برگ

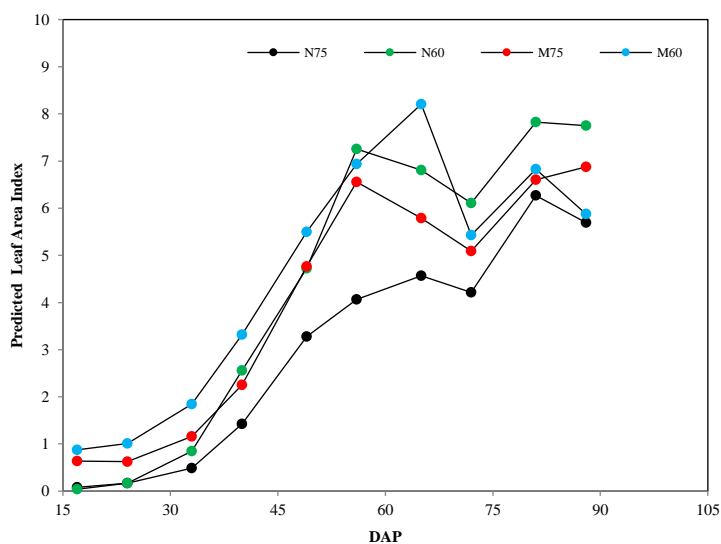
با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۷ شاخص هایی مانند WDWI، DVI و GDVI در شاخص سطح برگ کمتر از ۴ حساسیت بالایی در تخمین شاخص سطح برگ در مقایسه با سایر شاخص های گیاهی دارند. شاخص WDRVI در بازه  $6 < LAI < 1$  در مقایسه با شاخص های دیگر حساسیت کمتری در تخمین شاخص سطح برگ از خود نشان داد. در نیمه دوم فصل رشد ( $LAI > 4/5$ ) شاخص های EVI و NDVIg در مقایسه با سایر شاخص ها حساسیت بالایی در تخمین شاخص سطح برگ داشتند. همچنین در بازه تغییرات  $LAI > 3$  تا انتهای فصل رشد اختلاف قابل توجهی در پارامتر NE شاخص هایی مانند SAVI، OSAVI، DVI، GDVI و WDWI مشاهده نشد. اما در مجموع برای انتخاب بهترین VIs برای برآورد LAI بایستی هر سه پارامتر  $RMSE$ ،  $R^2$  و NE را به صورت همزمان در نظر گرفت (Mokhtari et al., 2018). شاخص OSAVI دارای کمترین میزان  $RMSE$  و بیشترین میزان  $R^2$  نسبت به سایر شاخص ها است. همچنین حساسیت آن در مراحل ابتدایی رشد در مقایسه با شاخص های NDVI، NDVIg، EVI و NDWI نیز بیشتر بود. با وجود اینکه حساسیت شاخص OSAVI در نیمه دوم فصل رشد ذرت کمتر از شاخص هایی مانند EVI، NDVIg، GDVI و NDWI بوده اما با در نظر گرفتن  $RMSE$  کمتر و  $R^2$  بیشتر این شاخص در مقایسه با سایر شاخص های گیاهی، شاخص OSAVI را می توان به عنوان شاخص برتر برای تخمین میزان شاخص سطح برگ برای کل فصل رشد ذرت در نظر گرفت. مطالعات متعددی شاخص OSAVI را برای تخمین شاخص سطح برگ گیاهان مختلف معرفی کرده اند. (Anderson et al. (2010) در مطالعه خود شاخص OSAVI را به عنوان شاخص برتر در تخمین شاخص سطح برگ ذرت و سویا معرفی کردند. (Fern et al. (2018) وضعیت پوشش گیاهی مراتع نیمه خشک تگزاس آمریکا را با استفاده از شاخص های NDVI و OSAVI مورد ارزیابی قرار داده و مشخص شد که شاخص OSAVI نسبت به NDVI تخمین مناسبی از وضعیت بیومس و پوشش گیاهی ارائه می دهد. (Das et al. (2020) نیز در مطالعه خود بر روی شاخص سطح برگ گندم، OSAVI را برای تخمین شاخص سطح برگ با استفاده از تصاویر ماهواره ای معرفی کردند.

### شاخص سطح برگ ماهواره ای

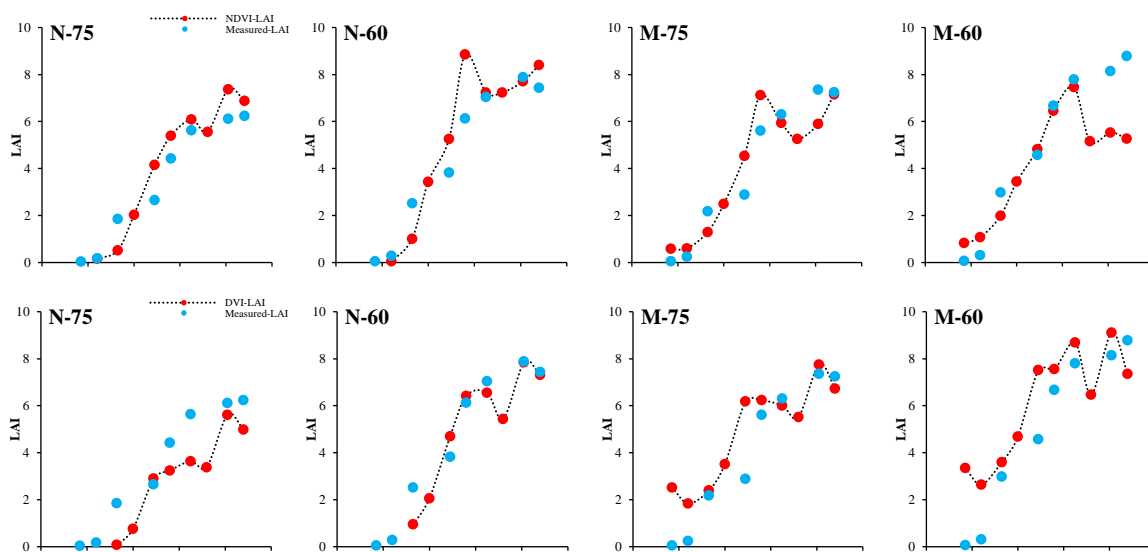
با توجه به بررسی انجام شده نهایتاً در این مطالعه از شاخص برتر OSAVI برای برآورد شاخص سطح برگ با استفاده از شاخص های مستخرج از تصاویر ماهواره ای استفاده شد. نتایج حاصل از شاخص سطح برگ برآورد شده با استفاده از رابطه مستخرج از شاخص OSAVI در شکل ۸ ارائه شده است.

روند تغییرات مقادیر اندازه گیری شده LAI (شکل ۴) تشابه خوبی با روند مقادیر برآورد شده دارد. بنحویکه همانطور که انتظار می رود در هر دو حالت تیمارهای با تراکم بیشتر شاخص سطح برگ بیشتر و هم چنین تیمارهای مالچ دار شاخص سطح برگ بیشتری در مقایسه با تیمار بدون مالچ داشته است. در عین حال روند افزایشی این شاخص در طول فصل رشد و مقادیر حداکثر آن برای تیمارهای متناظر مشابه بوده است. در عین حال رشد علف های هرز در سطح مزرعه می تواند بر مقدار شاخص سطح برگ برآورد شده اثر گذار باشد (Thorp and Tian, 2004; Asad and Bais, 2020) لذا سعی بر این بوده که علف های هرز موجود در مزرعه به صورت دستی و استفاده از علف کش ها به ویژه در مراحل اولیه و توسعه رشد به صورت مداوم کنترل شده تا حتی الامکان LAI برآورد شده از تصاویر ماهواره ای معرف

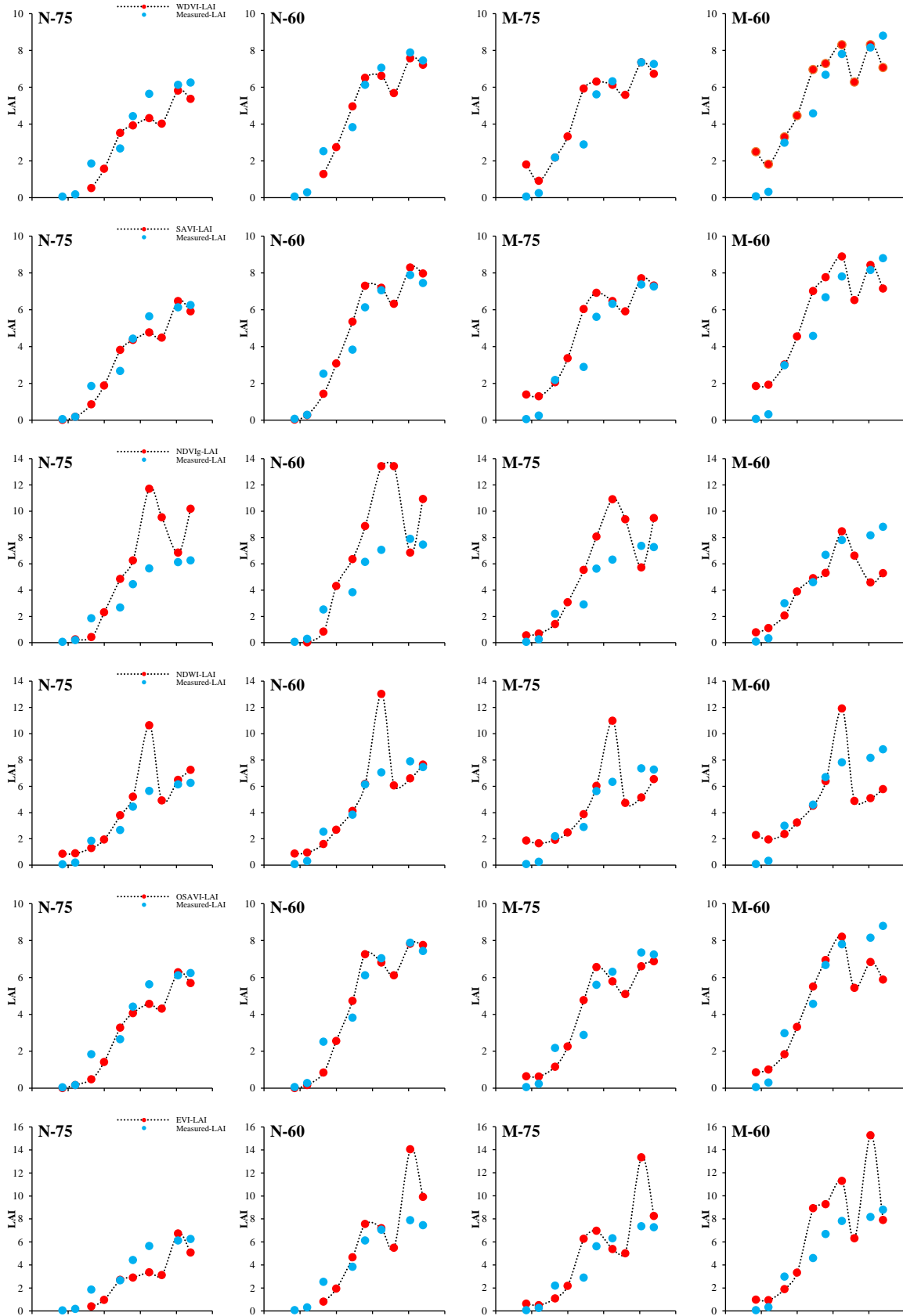
شاخص سطح برگ بوته‌های ذرت باشد. در شکل ۴ و ۸ با مقایسه مقادیر LAI برآورد شده با تصاویر ماهواره‌ای و اندازه‌گیری شده، مشاهده شد که روند تغییرات LAI برآورد شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، متفاوت از LAI اندازه‌گیری شده بود. از آنجایی که تعداد نمونه‌های برداشت از سطح مزرعه جهت اندازه‌گیری LAI بسیار محدود و در ابعاد کوچک صورت گرفته، از این رو در چنین شرایطی احتمال معرف نبودن اندازه‌گیری‌های میدانی با LAI تخمین زده شده با تصاویر ماهواره‌ای بالا می‌رود. در مطالعات متعددی LAI برآورد شده با تصاویر ماهواره‌ای با LAI اندازه‌گیری شده مورد ارزیابی قرار گرفته است (Xiao et al., 2014; Liu et al., 2018) و عدم تطابق مقیاس LAI ماهواره‌ای و میدانی باعث بروز عدم قطعیت در تخمین شاخص سطح برگ شد. به طور کلی عواملی نظیر تفاوت در مقیاس تصاویر ماهواره‌ای و محدوده نمونه برداری میدانی، تداخل پوشش علف‌های هرز و پوشش گیاهی ذرت، عدم یکنواختی آبیاری و در نتیجه تفاوت در عملکرد محصول در نقاط مختلف، می‌تواند در بروز اختلاف بین برآوردهای ماهواره‌ای شاخص سطح برگ با اندازه‌گیری‌های میدانی مؤثر باشد. به هر حال اطلاعات جمع‌آوری شده در شرایط وجود ناهمگنی میدانی ممکن است دقت تخمین شاخص سطح برگ با سنجش از دور را کاهش دهد (Vina et al., 2011). در شکل ۹ مقدار LAI تخمین زده شده با VIS مختلف برای هر تیمار نشان داده شده است.



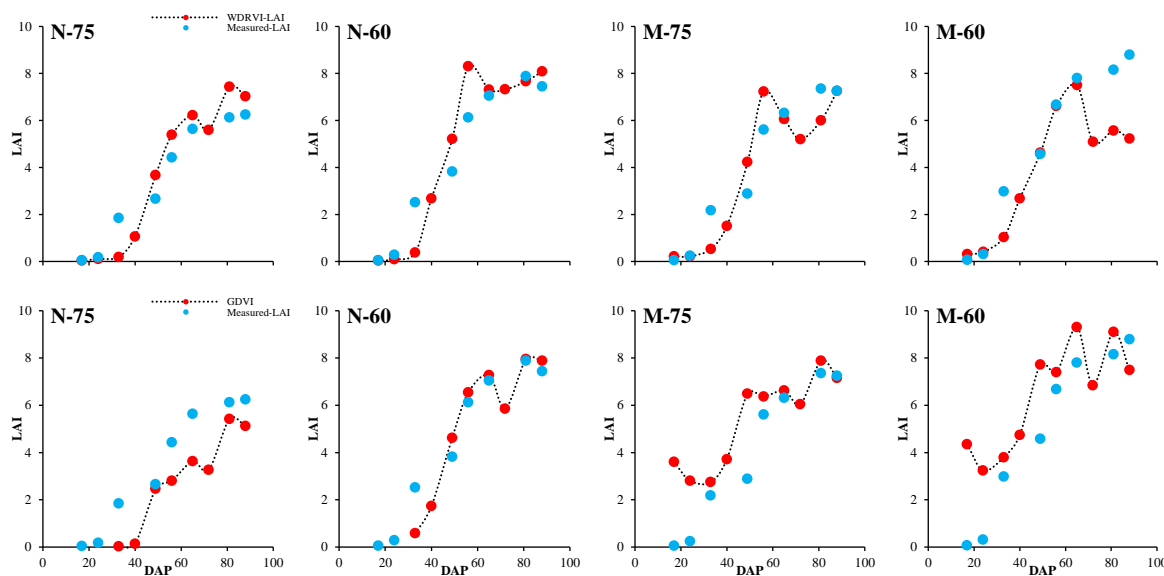
شکل ۸. تغییرات LAI تخمین زده شده در تیمارهای مختلف



شکل ۹. تغییرات LAI میدانی و برآورد شده با VIS مختلف در تیمارهای تحت مطالعه



ادامه شکل ۹. تغییرات LAI میدانی و برآورد شده با VI مختلف در تیمارهای تحت مطالعه



ادامه شکل ۹. تغییرات LAI میدانی و برآورد شده با VI‌s مختلف در تیمارهای تحت مطالعه

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه شاخص سطح برگ ذرت تحت شرایط تیمارهای مالچ‌دار و بدون مالچ و تراکم کشت‌های متفاوت اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که کاربرد مالچ کاه و کلش اثر معنی‌داری بر روی شاخص سطح برگ نداشته و تراکم کشت متراکم‌تر عامل اصلی در اختلاف قابل توجه بین شاخص سطح برگ تیمارهای تحت مطالعه بود. همچنین شاخص‌های گیاهی با استفاده از باندهای طیفی ماهواره لندست ۸ برآورد شده و برای ارزیابی شاخص سطح برگ ماهواره‌ای ذرت مورد استفاده قرار گرفت. شاخص‌های گیاهی مورد مطالعه تغییرات متفاوتی در NE در مراحل مختلف رشد ذرت از خود نشان داده و با استفاده از پارامترهای  $R^2$  و RMSE به همراه NE برترین شاخص گیاهی برای برآورد شاخص سطح برگ ماهواره‌ای انتخاب شد. بر اساس پارامترهای ارزیابی در نظر گرفته شده در این مطالعه شاخص‌های OSaVI به عنوان شاخص نهایی در برآورد شاخص سطح برگ انتخاب شد. اما با توجه به این که حساسیت این شاخص در نیمه دوم فصل رشد ذرت در مقایسه با سایر شاخص‌ها کمتر بوده لذا استفاده از شاخص‌های گیاهی ترکیبی جهت تخمین شاخص سطح برگ ذرت در کرج توصیه می‌شود. در نهایت با استخراج شاخص‌های گیاهی و برآورد شاخص سطح برگ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌توان دقت برآورد متغیرهایی مانند تبخیر- تعرق و تعرق را با استفاده از تکنیک سنجش از دور افزایش داد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

### REFERENCES

- Anderson, M. C., Neale, C. M. U., Li, F., Norman, J. M., Kustas, W. P., Javanthi, H and Chavez, J. (2004). Upscaling ground observations of vegetation water content, canopy height, and leaf area index during SMEX02 using aircraft and Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 92, 447-464.
- Asad, M. H. and Bais, A. (2020). Crop and weed leaf area index mapping using multi-source remote and proximal sensing. *IEEE Access*, 8, 138179- 138190.
- Baghzouz, M., Devitt, D. A., Fenstermaker, L. and Young, M. H. (2010). Monitoring vegetation phenological cycles in two different semi-arid environmental settings using a ground-based NDVI system: A potential approach to improve satellite data interpretation. *Remote Sensing*, 2, 990-1013.
- Baret, F. and Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, 161-173.
- Bonan, G. B. (1993). Importance of leaf-area index and forest type when estimating photosynthesis in boreal forests. *Remote Sensing of Environment*, 43, 303-314.
- Bréda, N. J. 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.
- Broge, N. and Leblanc, E. (2001). Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing*



- of Environment*, 76, 156–172.
- Carricondo, C. A., 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, 67–80.
- Chen, Z., Sun, S., Zhu, Z., Jiang, H. and Zhang, X. (2019). Assessing the effects of plant density and plastic film mulch on maize evaporation and transpiration using dual crop coefficient approach. *Agricultural Water Management*, 225, 105765.
- Clevers, J. G. P. W. (1988). The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 25(1), 53–69.
- Cowling, S. A., and Field, C. B. (2003). Environmental control of leaf area production: Implications for vegetation and land-surface modeling. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(1), 1-14.
- Das, B., Sahoo, R. N., Pargal, S., Krishna, G., Verma, R., Viswanathan, C., Sehgal, V. K. and Gupta, V. K. (2020). Comparative analysis of index and chemometric techniques based assessment of leaf area index (LAI) in wheat through field spectroradiometer, Landsat-8, Sentinel-2 and Hyperion bands. *Geocarto International*, 35, 1415- 1432.
- Deng, Z., Guan, H., Hutson, J., Forster, M. A., Wang, Y. and Simmons, C. T. (2017). A vegetation-focused soil-plant-atmospheric continuum model to study hydrodynamic soil-plant water relations. *Water Resources Research*, 53, 4965–4983.
- Fern, R. R., Foxley, E.A., Bruno, A. and Morrison, M. L. (2018). Suitability of NDVI and OSAVI as estimators of green biomass and coverage in a semi-arid rangeland. *Ecological Indicators*, 94, 16–21.
- Gao, B. C. (1996). NDWI- A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257- 266.
- Gitelson, A. A., and Merzlyak, M. N. (1994). Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves: Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 143, 286–292.
- Gitelson, A. A., Viña, A., Arkebauer, T. J., Rundquist, D. C., Keydan, G. and Leavitt, B. (2003). Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical Research Letter*, 30 (5), 1-4.
- Govaerts, Y. M., Verstraete, M. M., Pinty, B. and Gobron, N. (1999). Designing optimal spectral indices: a feasibility and proof of concept study. *International Journal of Remote Sensing*, 20 (9), 1853–1873.
- Gu, Z., Sanchez-Azofeifa, A., Feng, J. and Cao, S. (2015). Predictability of leaf area index using vegetation indices from multiangular CHRIS/PROBA data over eastern China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1), 096085.
- Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. J. and Strachan, I. B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90, 337-352.
- Hansen, P. and Schjoerring, J. K. (2003). Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment*, 86, 542–553.
- He, L., Zhang, H. Y., Zhang, Y. S., Song, X., Feng, W., Kang, G. Z., Wang, C. Y. and Guo, T. (2016). Estimating canopy leaf nitrogen concentration in winter wheat based on multi-angular hyperspectral remote sensing. *European Journal of Agronomy*, 73, 170–185.
- Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25 (3), 295–309.
- Huete, A., Justice, C. and van-Leeuwen, W. (1996). MODIS vegetation index (MOD13), EOS MODIS algorithm; theoretical basis document; *NASA Goddard Space Flight Center: Greenbelt*, MD, USA.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X. and Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the modis vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195–213.
- Li, S., Li, Y., Lin, H., Feng, H. and Dyck, M. (2017). Effects of different mulching technologies on evapotranspiration and summer maize growth. *Agricultural Water Management*, 201, 309-318.
- Liu, J., Pattey, E. and Jegou, G. (2012). Assessment of vegetation indices for regional crop green LAI estimation from Landsat images over multiple growing seasons. *Remote Sensing of Environment*, 123, 347–358.
- Liu, Y., Xiao, J., Ju, W., Zhu, G., Wu, X., Fan, W., Li, D. and Zhou, Y. (2018). Satellite-derived LAI products exhibit large discrepancies and can lead to substantial uncertainty in simulated carbon and water fluxes. *Remote Sensing of Environment*, 206, 174–188.



- Mannschatz, T., Pflug, B., Borg, E., Feger, K. H. and Dietrich, P. (2014). Uncertainties of LAI estimation from satellite imaging due to atmospheric correction. *Remote Sensing of Environment*, 153, 24- 39.
- Martens, S. N., Ustin, S. L. and Rousseau, R.A. (1993). Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis. *Forest Ecology and Management*. 61, 91–108.
- Mokhtari, A., Noory, H. and Vazifedoust, M. (2018). Improving crop yield estimation by assimilating LAI and inputting satellitebased surface incoming solar radiation into SWAP model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250–251, 159–170.
- Moulin, S. and Guerif, M. (1999). Impacts of model parameter uncertainties on crop reflectance estimates: A regional case study on wheat. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 213–218.
- Mourad, R., Jaafar, H., Anderson, M. and Gao, F. (2020). Assessment of Leaf Area Index Models Using Harmonized Landsat and Sentinel-2 Surface Reflectance Data over a Semi-Arid Irrigated Landscape. *Remote Sensing*, 12(19), 3121.
- Nguy-Robertson, A. L., Gitelson, A., Peng, Y., Vina, A., Arkebauer, T. and Rundquist, D. (2012). Green leaf area index estimation in maize and soybean: combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agronomy Journal*, 104(5), 1336- 1347.
- Nguy-Robertson, A. L. and Gitelson, A. A. (2015). Algorithms for estimating green leaf area index in C3 and C4 crops for MODIS, Landsat TM/ETM+, MERIS, Sentinel MSI/OLCI, and Venüs sensors. *Remote Sensing Letters*, 6(5), 360- 369.
- Rondeaux, G., Steven, M. and Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95-107.
- Rouse, R. J., Haas, R. H., Schell, J. A. and Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *NASA special publication*, 351, 0- 309.
- Schmidt, M. and Lipson, H. (2009). Distilling free-form natural laws from experimental data. *Science*, 324 (5923), 81–85.
- Sripada, R., Heiniger, R. W., White, J. G. and Meijer, A. D. (2006). Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn. *Agronomy Journal*, 98, 968–977.
- Thorp, K. R. and Tian, L. F. (2004). A review on remote sensing of weeds in agriculture. *Precision Agriculture*, 5, 477–508.
- Tucker, C. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8; 127–150.
- Vina, A., Gitelson, A. A., Nguy-Robertson, A. L. and Peng, Y. (2011). Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment*, 115, 3468–3478.
- Wang, S. X., Wang, Z. J., Zuo, Z. and Guo, Y. Z. (2004). Effects of difference mulching on the soil environment and maize yield in rain fed land. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 18(9), 134–137.
- Wang, R., He, N., Li, S., Xu, L. and Li, M. (2021). Spatial variation and mechanisms of leaf water content in grassland plants at the biome scale: Evidence from three comparative transects. *Scientific Reports*, 11, 9281.
- Xiao, Z. Q., Liang, S. L., Wang, J. D., Chen, P., Yin, X. J., Zhang, L. Q. and Song, J. L. (2014). Use of general regression neural networks for generating the GLASS leaf area index product from time-series MODIS surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52, 209–223.
- Zarate-Valdez, J. L., Whiting, M. L., Lampinen, B. D., Metcalf, S., Ustin, S. L. and Brown, P. H. (2012). Prediction of leaf area index in almonds by vegetation indexes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 85, 24–32.
- Zhang, Y., Yang, J., Liu, X., Du, L., Shi, S., Sun, J. and Chen, B. (2020). Estimation of multi-species leaf area index based on chinese GF-1 satellite data using look-up table and gaussian process regression methods. *Sensors*, 20(9), 2460.
- Zheng, J., Fan, J., Zhang, F., Yan, S., Guo, J., Chen, D. and Li, Z. (2018). Mulching mode and planting density affect canopy interception loss of rainfall and water use efficiency of dryland maize on the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Land*, 10(5), 794- 808.