

# روشی غیر تخریبی برای برآورد میزان زیست توده گیاه با استفاده از تصاویر دوربین دیجیتال

سیدعباس حجازی<sup>۱\*</sup>، محمدرضا مباحثی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین

طوسی

hejazi@email.kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد آزمایشگاه سنجش از دور خاوران - موسسه آموزش عالی خاوران

mohammadreza.mobasheri@khi.ac.ir

(تاریخ دریافت آذر ۱۳۹۷، تاریخ تصویب مرداد ۱۳۹۸)

## چکیده

مطالعه و برآورد مستمر زیست توده از طریق تصاویر ماهواره‌ای یکی از مهمترین موضوعاتی می‌باشد که در زمینه مطالعات اکوسیستم مورد توجه هستند. روش‌های اندازه‌گیری مستقیم زیست توده علیرغم دقیق بودن، معمولاً با تخریب بخشی از پوشش گیاهی همراه می‌باشد که این عمل با توجه تعداد مورد نیاز برای مدلسازی ماهواره‌ای، علاوه بر ضرر رساندن به محیط زیست و کشاورزی، نیازمند تجهیزات خاص می‌باشد. در این پژوهش روشی ارائه شده است که بوسیله آن می‌توان با استفاده از تصاویر دوربین دیجیتال و بدون نیاز به تخریب فیزیکی، مقدار زیست توده را محاسبه کرد. در روش پیشنهادی با بررسی رابطه مقدار پوشش گیاهی (گندم زمستانه) که از تصویر دوربین دیجیتال از مزارع بدست می‌آید و NDVI که از داده‌های ماهواره‌ای همان مزارع محاسبه می‌شود، یک مدل توسعه داده شده است. با استفاده از این مدل، از تصاویر دوربین دیجیتال مقدار NDVI محاسبه می‌شود. با محاسبه NDVI از عکس دیجیتال، مقدار انرژی جذب شده فتوسنتزی با روابط معتبر موجود، محاسبه شد. سپس با استفاده از مدل‌های LUE (مونتیس) مقدار زیست توده برآورد گردید. ضریب تعیین بدست آمده در این پژوهش برای برآورد NDVI از تصاویر دوربین دیجیتال برابر با  $0.71$  ( $RMSE=0.087$ ) می‌باشد. همچنین ضریب تعیین بدست آمده در برآورد زیست توده با استفاده از داده‌های عکس دیجیتال برابر با  $0.63$  با  $RMSE=238 \text{ g/m}^2$  محاسبه شده است. از مزایای این روش نسبت به روش‌های زمینی سرعت، کمی هزینه و سهولت انجام آن می‌باشد. همچنین از این روش می‌توان در غیاب دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای نیز استفاده نمود.

**واژگان کلیدی:** زیست توده، NDVI، تصاویر دیجیتال، تصاویر ماهواره‌ای، لندست، ضریب بازده انرژی

## ۱- مقدمه

بر اساس تعریف FAO، زیست توده به مواد آلی بالای سطح زمین یا زیر این سطح (زنده و مرده) از قبیل درختان، محصولات کشاورزی (ذرت، گندم)، چمن و ریشه‌ها گفته می‌شود [۱]. زیست توده بالای سطح زمین شامل کنده، تنه، شاخه‌ها، پوست و برگ، و زیست توده زیر سطح زمین، شامل ریشه‌ها است [۲]. زیست توده، جزئی از چرخه کربن می‌باشد و از این رو برآورد دقیق آن برای بسیاری از اهداف از جمله تعیین محتوای گازهای گلخانه‌ای، محاسبه‌ی کربن زمین، کاربردهای کشاورزی، مدل‌سازی تغییرات آب و هوا مورد نیاز است. همچنین زیست‌توده می‌تواند پارامتر مهمی در ارزیابی میزان استفاده تجاری از مراتع و جنگل‌ها به عنوان سوخت محسوب شود [۳]. همچنین برآورد محصول با استفاده از زیست توده در کشاورزی بسیار رایج می‌باشد [۴]. روش‌های سنتی برآورد زیست توده، استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی است. هزینه بالا، زمان‌بر و طاقت‌فرسا بودن جمع‌آوری داده‌های زمینی از محدودیت‌های روش سنتی باشد. این محدودیت‌ها، موجب تمایل به استفاده از روش‌های غیر مستقیم مانند سنجش‌ازدور در برآورد زیست‌توده شده است [۵]. توسعه روش‌های کسب اطلاعات از زمین، به ویژه سنجش از دور، اطلاعات عظیم و با ارزشی برای مطالعات و تحقیقات در زمینه‌های مختلف، از جمله کشاورزی بوجود آورده است [۶،۷،۸]. البته برآورد زیست توده از طریق داده‌های سنجش‌ازدور نیز با چالش‌هایی روبرو می‌باشد. از جمله این مسائل استفاده از تصاویر و پارامترهای تصویری مناسب به منظور برآورد زیست‌توده با دقت بالا می‌باشد [۹].

یکی از روش‌هایی که در برآورد زیست‌توده رایج است، استفاده از مفهوم ضریب بهره‌وری انرژی (نور یا تابش) می‌باشد. در کشاورزی بهره‌وری از تابش (RUE)<sup>۱</sup> یا بهره‌وری از نور (LUE)<sup>۲</sup> به صورت زیست توده خشک تولید شده در هر واحد از تابش خورشیدی و یا تابش فعال فتوسنتزی (PAR) تعریف می‌شود [۱۰]. از این تعریف بصورت گسترده در بیان رشد دینامیک گیاهان استفاده می‌شود [۱۰]. ضریب بهره‌وری از تابش (نور) توسط

Monteith (1972) فرمولبندی شده است که در آن بر ارتباط بین زیست توده خشک و مقدار انرژی فعال فتوسنتزی جذب شده تمرکز می‌کند [۱۱]. مدل‌های ماهواره‌ای بهره‌وری از نور (LUE) یک جایگزین مناسب برای روش‌های زمینی و پر خرج برآورد زیست‌توده و عملکرد محصول هستند [۱۱، ۱۲]. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی با استفاده از مدل LUE برای شناسایی الگوهای مکانی و زمانی رشد گیاهان زراعی و شبیه‌سازی عملکرد محصول در مناطق وسیع صورت پذیرفته است [۱۳، ۱۴]. مطالعات انجام شده نشان از دقت مناسب این مدل دارد [۱۳، ۱۵، ۱۶، ۱۷]. از سوی دیگر برخی از محققان بر این عقیده استوار هستند که مدل LUE توانایی زیادی در زمینه برآورد عملکرد محصول ندارد. به عنوان مثال Reeves et al. (2005) با استفاده از محصول MODIS-GPP (MOD17) به دقت پایینی در برآورد محصول در شمال داکوتا و مونتانا در ایالت متحده رسید [۱۸]. علاوه بر این در پژوهش‌های صورت گرفته با مدل‌های LUE، مطالعات اغلب در سطح مقیاس بزرگ انجام شده و کمتر در سطح مقیاس یک سایت بوده است [۱۹]. محققانی مثل Xin et al (2013) و Li et al (2014) که از این مدل استفاده کرده‌اند مقادیر برآورد شده زیست‌توده و محصول را با مقادیر برداشت شده در مقیاس منطقه‌ای و وسیع مقایسه کرده‌اند [۱۳، ۱۵]. عدم اطمینان در ورودی‌های این مدل، به دلیل تنوع پوشش و کشت، در مطالعاتی که این مدل را منطقه‌ای و در سطح وسیع اجرا کرده‌اند، مانع از ارزیابی دقیق عملکرد مدل می‌شوند [۱۹]. دقت برآورد مدل‌های LUE متأثر از محدودیت‌های وارد بر پارامترهای مدل می‌باشد، چرا که عوامل موثر بر برآورد زیست‌توده توسط مدلی مانند LUE متأثر از بسیاری از پارامترها هستند [۲۰]. به طور معمول یک مقدار ثابت برای LUE فرض می‌شود و معمولاً هیچ استاندارد برای تخمین LUE وجود ندارد و این عمل کاملاً تجربی است [۲۱]. استرس‌های دمایی و آبی بر مقدار LUE تاثیرگذار بوده و مقدار واقعی آن ممکن است در شرایط محیطی مثل دمای کم و یا کمبود آب برابر با مقدار نظری آن نباشد [۲۲]. با توجه به این موارد امکان ایجاد خطا در برآورد زیست‌توده و عملکرد محصول با این مدل وجود دارد.

در پژوهش پیش‌رو هدف برآورد زیست‌توده با مدل LUE و با استفاده از تصاویر دوربین دیجیتال می‌باشد. از

<sup>۱</sup> Radiation Use Efficiency

<sup>۲</sup> Light Use Efficiency

مرحله سوم: محاسبه NDVI با استفاده از تصاویر دوربین دیجیتالی  
مرحله چهارم: اجرای مدل مونتیس و محاسبه زیست توده

## ۲-۲- منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در ۹۰ مزرعه از گندمزارهای استان‌های مرکزی و همدان انجام شده است. از این تعداد، ۵۰ مزرعه دیم و ۴۰ مزرعه فاریاب می‌باشد. استان‌های همدان و مرکزی در مجاورت یکدیگر قرار دارند و غالباً هوای کوهستانی دارند. میانگین سالانه دما و مقدار بارش سالانه باران در استان‌های همدان و مرکزی به ترتیب ۱۱٫۳ درجه، ۳۸۴ mm و ۱۳٫۹ درجه، ۳۴۵ mm می‌باشد. با توجه به همسایه بودن دو استان مرکزی و همدان اقلیمی شبیه به یکدیگر دارند. گندم از مهمترین محصولات کشاورزی این استان‌ها می‌باشد.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه (استان همدان و مرکزی)

## ۲-۳- داده‌های مورد استفاده

### ۲-۳-۱- تصاویر دوربین دیجیتالی

به منظور عکسبرداری دیجیتالی، از دوربین‌های نصب شده بر گوشی‌های Samsung Galaxy J7 و LG G4 استفاده شده است. عکسبرداری با دوربین عقب این گوشی‌ها انجام پذیرفته است. دوربین Samsung Galaxy J7، ۱۳ مگاپیکسلی با دیافراگم f/1.9 و دوربین LG G4، ۱۶ مگاپیکسلی با دیافراگم f/1.8 می‌باشد. عکسبرداری باید در شرایط نور کافی و به نحوی انجام پذیرد که کمترین میزان سایه اتفاق افتد. برای این منظور ارتفاع مناسب از سطح گیاه (نیم تا یک متر) و دید قائم در هنگام عکسبرداری الزامی است.

آنجا که یکی از مهمترین محدودیت‌های موجود در مدل‌های ماهواره‌ای LUE ماهواره‌ای، عدم اطمینان از وجود همیشگی داده ماهواره‌ای (به جهت محاسبه شاخص NDVI) با کیفیت مناسب به دلایلی از قبیل وضعیت هوا، گرد و غبار و مواردی دیگر می‌باشد، این محدودیت با جایگزین کردن NDVI محاسبه شده از تصاویر دوربین دیجیتالی به جای NDVI محاسبه شده از داده‌های ماهواره‌ای برطرف خواهد شد. همچنین از این روش می‌توان برای کالیبره کردن تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌سازی برآورد زیست‌توده برای گونه‌های مختلف گیاهی با هزینه‌ای اندک استفاده کرد.

## ۲-۲- مواد و روش

### ۲-۱- روش انجام پژوهش

مدل مورد استفاده برای تخمین زیست‌توده در این پژوهش، مدل مونتیس است که توسط Monteith (1972) ارائه شد [۱۱]، می‌باشد. در این مدل از مفهوم ضریب بهره‌وری انرژی (نور یا تابش) استفاده می‌شود. در کشاورزی بهره‌وری از تابش (نور) به صورت زیست‌توده خشک تولید شده در هر واحد از تابش فعال خورشیدی جذب شده تعریف می‌شود [۱۲]. برای محاسبه تابش فعال فتوسنتزی جذب شده از روش ماهواره‌ای، روابط تجربی قابل اعتمادی ارائه شده‌اند که در آنها از شاخص‌های گیاهی استفاده شده است. مهمترین شاخص مورد استفاده شاخص NDVI<sup>۱</sup> می‌باشد. در این پژوهش ابتدا با استفاده از تصویر دوربین دیجیتالی، شاخص NDVI برآورد شده و با استفاده از این شاخص و روابط موجود، تابش فعال فتوسنتزی جذب شده محاسبه خواهد شد. مراحل انجام این پژوهش بصورت زیر می‌باشد.

مرحله اول: طبقه‌بندی عکس‌های دیجیتالی به دو کلاس گیاه و خاک و محاسبه سهم پوشش (Cover) گیاه با استفاده از روش ML<sup>۲</sup>

مرحله دوم: مدل‌سازی بین سهم پوشش گیاه و NDVI بدست آمده از تصاویر لندست

<sup>۱</sup> Normalized Difference Vegetation Index

<sup>۲</sup> Maximum Likelihood

## ۲-۳-۲- تصاویر ماهواره‌ای

به منظور محاسبه NDVI از داده‌های سنجنده لندست ۷ و ۸ استفاده شده است. لندست ۸ در سال ۲۰۱۳ و لندست ۷ در سال ۱۹۹۹ شروع به ارسال تصویر کرده‌اند. قدرت تفکیک مکانی باندهای مورد استفاده (باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک) در این دو سنجنده ۳۰ متر می‌باشد. به منظور تصحیح اثر جو با استفاده از مدل FLAASH در نرم افزار ENVI 5.3 تصحیحات مورد نیاز اعمال شد و بازتابندگی سطح محاسبه گردید. تصاویر مورد نیاز از پایگاه اینترنتی <https://earthexplorer.usgs.gov> دانلود شده‌اند. در جدول ۱ مشخصات تصاویر مورد استفاده نشان داده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به وجود SLC در تصاویر لندست ۷، و دقت در این موضوع که این خطوط در قسمت میانی این تصاویر وجود ندارند، برای اجتناب از این مشکل، سعی شده است که مزارع مورد مطالعه در قسمت میانی تصاویر یا بین این خطوط انتخاب شوند.

جدول ۱- شناسه تصاویر مورد استفاده در این پژوهش

تاریخ اخذ	منطقه	شناسه
20/03/2018	همدان	LC08_L1TP_166036_20180320_20180403_01_T1
05/04/2018	همدان	LC08_L1TP_166036_20180405_20180417_01_T1
15/05/2018	همدان	LE07_L1TP_166036_20180515_20180610_01_T1
08/06/2018	همدان	LC08_L1TP_166036_20180608_20180615_01_T1
21/03/2018	مرکزی	LC08_L1TP_165036_20180313_20180320_01_T1
14/04/2018	مرکزی	LC08_L1TP_165035_20180414_20180501_01_T1
24/05/2018	مرکزی	LE07_L1TP_165036_20180524_20180619_01_T1

## ۲-۳-۳- داده‌های ایستگاه هواشناسی

از داده‌های ثبت شده در ایستگاه های هواشناسی، تابش خورشیدی اخذ شده است. از این داده برای محاسبه تابش فعال فتوسنتزی استفاده خواهد شد. اسامی و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی استفاده شده در این پژوهش بصورت جدول ۲ می‌باشد. میانگین فواصل مزارع از ایستگاه‌ها، ۷ کیلومتر می‌باشد.

جدول ۲- ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش و

موقعیت آنها					
Hamedan	Toyserkan	Malayer	Famenin	Razan	Saveh
48 32E	48 26E	48 51E	48 59E	49 02E	50 22E
34 52N	34 33N	34 15N	35 07N	35 23N	35 3N

## ۲-۴- اندازه‌گیری میدانی زیست‌توده

تیم نمونه‌گیری با حضور در محل مزارع گندم اقدام به نمونه‌گیری زیست‌توده بالای سطح زمین در ابعاد ۵۰ CM در ۵۰ CM کرده‌اند. این تیم مجهز به GPS گیرنده دو فرکانسه KQGeo مدل eFix R2 و با ثبت مکان نقاط نمونه برداری شده، امکان شناسایی نقطه مربوطه را در تصویر ماهواره‌ای ایجاد شده است. نمونه‌ها بعد از درو شدن، در معرض هوای خشک قرار داده شده و با طی زمان بصورت طبیعی خشک شده‌اند. سپس وزن هر نمونه با ترازوی دیجیتال Electronic Balance مدل HG-600 1N با دقت ۰٫۱۰g اندازه‌گیری شده است. با توجه به اینکه در روزهای نمونه برداری نیاز به وجود تصویر ماهواره‌ای نیز بوده است، تاریخ‌های نمونه برداری میدانی با توجه به در دسترس بودن تصاویر با کیفیت لندست ۷ و یا ۸ تنظیم شده‌اند و سعی شده فاصله زمانی بین اخذ تصویر و نمونه برداری حداقل زمان ممکن باشد. قابل ذکر است که در فاصله بین گذر ماهواره و نمونه‌برداری در مناطق مورد مطالعه بارش باران اتفاق نیفتاده است. در جدول ۳ تاریخ روزهای نمونه برداری ملاحظه می‌گردد.

جدول ۳- تاریخ‌های نمونه برداری زیست‌توده

شماره نمونه	تاریخ اخذ	فاصله زمانی از تصویر ماهواره‌ای
Hamedan 1	22/03/2018	+ 2 Day
Hamedan 2	06/04/2018	+ 1 Day
Hamedan 3	16/05/2018	+ 1 Day
Hamedan 4	11/06/2018	+ 2 Day
Markazi 1	14/03/2018	+ 1 Day
Markazi 2	14/04/2018	0 Day
Markazi 3	26/05/2018	+ 2 Day

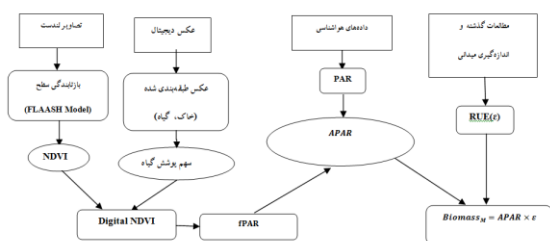
## ۲-۵- قاعده تصمیم‌گیری حداکثر احتمال

برای محاسبه سهم پوشش گیاهی، تصاویر به دو کلاس گیاه و خاک تقسیم می‌شوند. برای کلاسه‌بندی از روش حداکثر احتمال استفاده شده است. قاعده تصمیم‌گیری حداکثر احتمال مبتنی بر احتمال می‌باشد. این روش، هر پیکسل دارای الگوی اندازه‌گیری  $x$  را به کلاس  $i$  نسبت می‌دهد، در صورتی که بردار  $x$  دارای بیشترین شباهت به آن کلاس باشد. به عبارت دیگر، طبقه بندی حداکثر احتمال، احتمال تعلق یک پیکسل را به کلاسی میدهد که در آن مقدار احتمال، ماکزیمم باشد [۲۳].

فتوسنتزی (PAR)<sup>۱</sup> به قسمتی از طیف الکترومغناطیسی در ناحیه ۰/۳ تا ۳ میکرومتر اطلاق می‌شود که توسط گیاه و برای انجام فرآیند فتوسنتز جذب می‌شود. به عبارت دیگر تابش فعال کسری از انرژی تابشی فرودی خورشید ( $K_d$ ) است. هر چند نسبت  $(PAR/K_d)$  تحت تاثیر عوامل مختلفی است، ولی مقدار تقریبی آن در طول یک شبانه روز ۰/۵۰ - ۰/۴۵ است که در این تحقیق مقدار پذیرفته شده ۰/۵۰ برای آن در نظر گرفته شده است [۲۴، ۲۵، ۲۶]. مقدار انرژی فرودخورشیدی از ایستگاه‌های هواشناسی قابل دسترسی است. fPAR میزان جذب خیمه گیاهی از تابش فعال فتوسنتزی جذب شده می‌باشد. برای محاسبه میزان جذب خیمه گیاهی از تابش فعال فتوسنتزی جذب شده روش‌های متعددی ارائه شده است. یکی از روابطی که برای محاسبه fPAR توسط Goudriaa (1977) ارائه شده است [۲۷] و در پژوهش‌های بسیاری استفاده شده است، رابطه ۳ می‌باشد.

$$fPAR = 0.161 + 1.257 NDVI \quad (3)$$

ضریب بازده انرژی همانگونه که از نامش پیداست نشان‌دهنده میزان بازده انرژی جذب شده در تولید محصول نهایی است. استرس‌های دمایی و آبی بر مقدار ضریب بازده انرژی تاثیرگذار بوده و مقدار واقعی آن ممکن است در شرایط محیطی مثل دمای کم و یا کمبود آب برابر با مقدار نظری آن نباشد. مقدار این پارامتر در صورت وجود شرایط استاندارد (دمای بهینه و عدم وجود خشکسالی)، برای هر محصول تقریباً مقدار ثابتی است. تغییرات در میزان و آب مصرفی باعث تغییرات اندکی در مقدار این پارامتر می‌گردد که در مقیاس‌های بزرگ از این تغییرات صرف نظر می‌شود [۱۲، ۲۸].



شکل ۲- روندنمای انجام پژوهش

روش طبقه بندی حداکثر احتمال یکی از پرکاربردترین الگوریتم های طبقه بندی با نظارت است.



شکل ۱- تصویر دیجیتال از پوشش گیاهی (گندم)، دروی بایومس در ابعاد ۵۰ در ۵۰ سانتی متر، وزن کردن بایومس خشک

## ۲-۶- مدل مونتیس

یکی از روش‌هایی که در برآورد میزان زیست توده بسیار بکار رفته است، روش Monteith می‌باشد که در آن از مفاهیم LUE استفاده شده است. روابط در این روش بصورت زیر می‌باشد [۱۱].

$$Biomass = APAR \times \epsilon \quad (1)$$

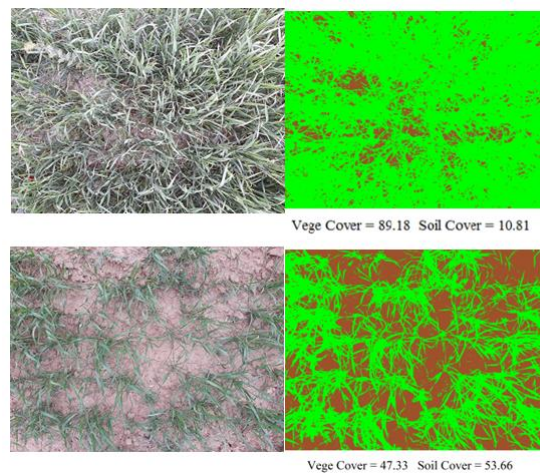
$$APAR = \sum (PAR \cdot fPAR) \Delta t \quad (2)$$

که در آن  $APAR$  و  $\epsilon$  به ترتیب انرژی فعال فتوسنتز جذب شده و ضریب بازده انرژی جذب شده می‌باشد. تابش فعال

<sup>۱</sup> Photosynthesis active radiation

### ۳- نتایج و بحث

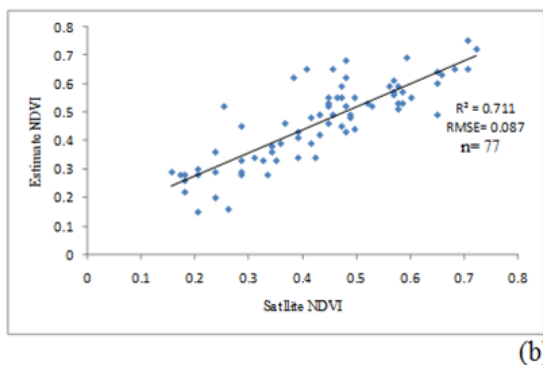
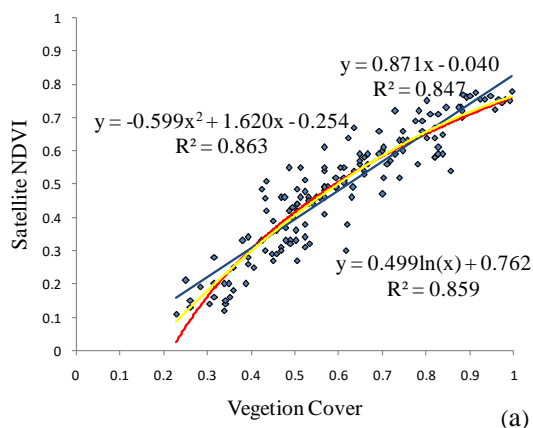
تعداد کل عکس‌های اخذ شده ۳۴۵ فریم بوده است. تمامی عکس‌ها با روش ML به دو کلاس گیاه و خاک طبقه‌بندی شده‌اند. ۵۰ تصویر بصورت رندوم انتخاب شده و دقت طبقه‌بندی مورد بررسی قرار گرفت. در نتیجه آن مشخص شد که طبقه‌بندی مذکور با دقت کاملاً مناسب انجام شده است، به نحوی که صحت کلی هیچ یک از تصاویر کلاسه‌بندی شده کمتر از ۰/۹۰ نشده است. همچنین میانگین صحت کلی طبقه‌بندی در این تصاویر ۰/۹۶ کسب شده است. قابل ذکر است تمامی روش‌های معمول طبقه‌بندی اعم از نظارت شده و نظارت نشده (مانند تست K-means و minimum distance, parallelepiped) شده و بالاترین دقت از روش ML کسب شده است. پس از کلاسه‌بندی، درصد حضور هر یک از دو کلاس خاک و گیاه مشخص می‌شود. در اولین نمونه‌برداری میانگین درصد پوشش گیاهی ۲۱٪ بوده و در آخرین نمونه‌برداری این میانگین به ۸۶٪ رسیده است.



شکل ۳- تصاویر از پوشش گیاهی و طبقه‌بندی به خاک و گیاه سمت چپ در تاریخ 06/04/2018 و سمت راست در تاریخ 11/06/2018 همان مزرعه

از ۱۵۵ عکس طبقه‌بندی شده که از مزارع مختلف اخذ شده است برای مدل‌سازی ارتباط بین NDVI ماهواره‌ای و درصد پوشش گیاه استفاده شده است. در انتخاب ۱۵۵ عکس سعی شده است که از مزارع با رشد یکنواخت و یا از مناطقی از مزارع که در حدود ابعاد زمینی پیکسل ماهواره-ای دارای پوشش و رشد یکنواخت باشد استفاده شود. رابطه بین پوشش گیاهی گندم و NDVI در حالت خطی

حالت  $NDVI = (VegCover) \times 0.808 - 0.029$  در لگاریتمی  $NDVI = \ln(VegCover) \times 0.499 + 0.76$  و در حالت غیر خطی  $NDVI = -0.599 \times (VegCover)^2 + 1.62 \times (VegCover) - 0.254$  به بیان Carlson (1998)، NDVI در تراکم‌های بسیار زیاد پوشش گیاهی به سرعت اشباع می‌شود [۲۹] و این موضوع در شکل 4(a)، دیده می‌شود. با توجه به شکل 4(b) ضریب تعیین ۰/۷۱ ( $R^2=71$ ) با  $RMSE = 0.087$  و  $RR = 0.14$  در برآورد با مدل غیر خطی NDVI را نشان می‌دهد. محاسبه NDVI با ضریب تعیین ۷۱ درصد در مجموع، برآورد نسبتاً مناسبی برای این شاخص خواهد بود.



شکل ۴- a: ارتباط بین درصد پوشش گیاهی و NDVI، b: برآورد NDVI با مدل توسعه داده شده

$$NDVI = (VegCover) \times 0.808 - 0.029 \quad (۴)$$

$$NDVI = -0.599 \times (VegCover)^2 + 1.62 \times (VegCover) - 0.254 \quad (۵)$$

$$NDVI = \ln(VegCover) \times 0.499 + 0.76 \quad (۶)$$

با توجه به مکانیسم بازتاب گیاه سالم، به دلیل جذب کلروفیل، بازتاب کمی در ناحیه قرمز داشته و در ناحیه مادون

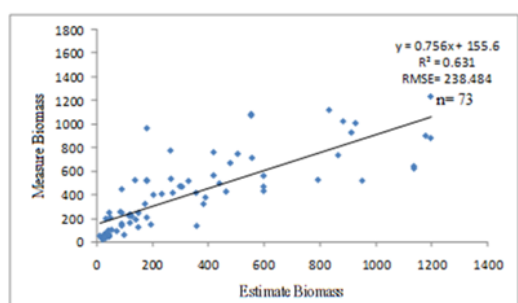
۱ Relative RMSE

جدول ۴ دیده می‌شود مقدار LUE در پژوهش‌های مشابه در بازه ۱/۷ g/MJ تا ۳/۱۳ g/MJ با میانگین ۲/۲۲ g/MJ برآورد شده است. در این پژوهش با استفاده از رابطه ۷ مقدار LUE برابر با ۲/۸۹ g/MJ محاسبه شده است. این مقدار در بازه اعلام شده از سوی محققان قرار دارد.

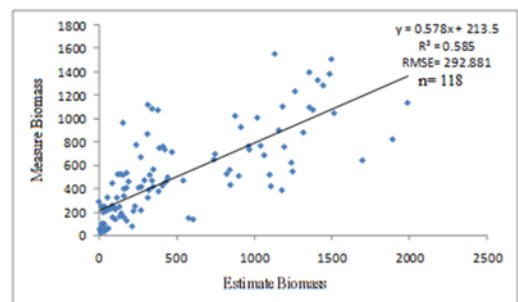
جدول ۴- مقادیر برآورد شده LUE در مطالعات قبلی

Reference	LUE, g MJ <sup>-1</sup>
[۲۱]Gallagher and Biscoe (1978)	2.2
[۲۲]Green (1987)	2.0
[۲۳]Garcia et al. (1988)	3.13
[۲۴]Gregory et al. (1992)	1.74
[۲۵]Fischer (1993)	2.58
[۲۶]Calderini et al. (1997)	2.2
[۲۷]Latiri-souki et al. (1998)	2.1
[۲۸]Lobell et al. (2003)	2.19
[۲۹]Albrizio and Steduto (2005)	1.7
[۳۰]Padilla et al. (2012)	2.5
[۳۱]Pradhan et al. (2014)	2.49
[۳۲]Campos et al (2018)	1.88
Ave	2.22

با توجه به محاسبه fPAR و متعاقب آن محاسبه APAR با رابطه ۲ و در نظر گرفتن ۲/۸۹ g/MJ برای ضریب بازده انرژی، مدل مونیتیس اجرا شد. نتایج این برآورد در شکل ۶(a) دیده می‌شود. مدل مونیتیس در حالت محاسبه fPAR از داده‌های NDVI ماهواره‌ای برای مقایسه با نتیجه اجرای مدل مونیتیس با روش این پژوهش، اجرا شده است. نتیجه و عملکرد مدل مونیتیس ماهواره‌ای در شکل ۶(b) دیده می‌شود.



(a)

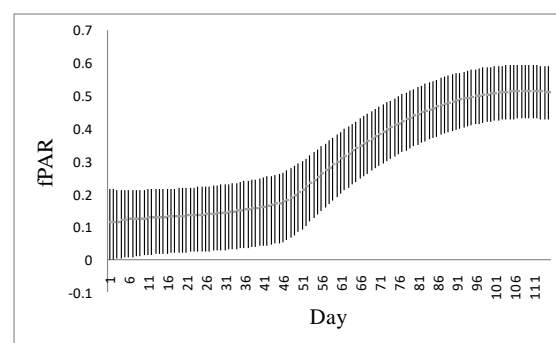


(b)

شکل ۶- a: عملکرد مدل مونیتیس با Digital NDVI. b: عملکرد مدل مونیتیس با داده‌های ماهواره‌ای

قرمز نزدیک، بازتاب زیادی دارد. استفاده ترکیبی از این دو طول موج در شناسایی و برآورد میزان گیاه بسیار مناسب است. Satellite NDVI محصول ترکیبی از این طول موج‌ها می‌باشد. با توجه به عدم وجود طول موج مادون قرمز نزدیک در دوربین‌های دیجیتال تعبیه شده در موبایل و استفاده از باندهای قرمز، سبز و آبی در آن‌ها، رسیدن به دقت ۰/۷۱ در برآورد NDVI از روشی غیر مستقیم مناسب بنظر می‌رسد.

بنابر رابطه ۲، برای محاسبه APAR نیاز به در اختیار داشتن NDVI در گام‌های زمانی روزانه می‌باشد. با توجه به اینکه در این پژوهش از تصاویر دوربین دیجیتال برای محاسبه NDVI استفاده شده است، در فواصل زمانی بین عکسبرداری از درونبایی استفاده شده است. با استفاده از NDVI استخراج شده از تصاویر دیجیتال، و درونبایی در فواصل زمانی ۱ روزه، NDVI، و متعاقب آن fPAR روزانه با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شده است. در شکل ۵، fPAR روزانه مشاهده می‌شود.



شکل ۵- میانگین fPAR روزانه مزارع محاسبه شده از درونبایی NDVI روزانه مزارع

مقدار جذب انرژی در روزهای ابتدایی سبز شدن گیاه بسیار کم می‌باشد. تقریباً در ۵۰ روز اول بعد از جوانه زدن گیاه، که مصادف با فصل زمستان بوده و جوانه گیاه در خواب زمستانه می‌باشد سرعت رشد گیاه نیز بسیار کم می‌باشد که متعاقب آن سرعت رشد جذب انرژی نیز ناچیز است. با گرمتر شدن هوا از روز ۵۰ به بعد، که تقریباً اوایل فصل بهار می‌باشد، رشد گیاه و مقدار جذب انرژی شدت بیشتری می‌گیرد. ضریب بازده انرژی دیگر پارامتر مورد نیاز برای اجرای مدل مونیتیس می‌باشد. ضریب بازده انرژی از رابطه ۷، [۳۰] محاسبه می‌شود.

$$e = \frac{B_i - B_j}{acAPAR_i - acAPAR_j} \quad (7)$$

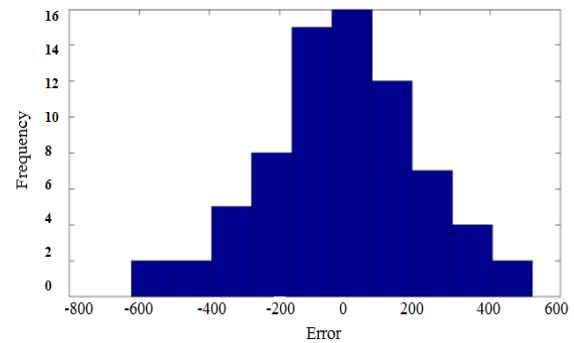
در این رابطه  $B_{i,j}$  میزان زیست‌توده در روزهای  $i$  و  $j$  و همچنین  $acAPAR_{i,j}$  مقدار تجمع انرژی فعال فتوسنتزی جذب شده در بازه زمانی  $i$  تا  $j$  می‌باشد. همانطور که در

### ۳-۱- مقایسه دو روش ماهواره‌ای و روش پیشنهادی

با توجه با اینکه محاسبه fPAR و متعاقباً APAR نیازمند محاسبه NDVI است، و NDVI نیز از داده‌های ماهواره‌ای محاسبه می‌شود، بنابراین روش‌های ماهواره‌ای برآورد زیست توده کاملاً وابسته به وجود داده ماهواره‌ای دقیق و با کیفیت می‌باشد. به طور مثال در بازه زمانی انجام این پژوهش، در استان همدان از تاریخ 5/4/2018 تا 15/5/2018 تصویر با کیفیت توسط سنجنده لندست‌ثبت نشده است. راهکار پیشنهاد شده در این پروژه استفاده از عکس‌های دوربین دیجیتال می‌باشد که نتیجه بخش بوده است. برتری دیگر روش پیشنهادی، خالص بودن عکس‌های دیجیتال از نظر پوشش گیاهی مورد نظر می‌باشد که در دقت برآورد زیست توده تاثیرگذار است. در حالی که در تصاویر ماهواره‌ای ممکن است در هر پیکسل بیش از یک نوع گیاه وجود داشته باشد. همچنین از تصاویر دوربین دیجیتال می‌توان به عنوان داده کمکی در برآورد زیست توده با روش‌های ماهواره‌ای بهره برد.

نکته دیگر چگونگی اخذ تصویر دیجیتال می‌باشد. یک سری ملاحظات برای رسیدن به بهترین دقت در عکس برداری باید لحاظ شود. به عنوان مثال اخذ تصویر بصورت قائم، وجود نور کافی در لحظه عکسبرداری، ارتفاع کافی دوربین از سطح گیاه و رعایت دوره تکرار عکسبرداری از مزرعه از جمله این ملاحظات هستند. برای سهولت در فرایند عکسبرداری می‌توان از فریم‌های چوبی و یا فلزی با ابعاد مناسب، که در این پژوهش از فریم‌های ۵۰ در ۵۰ سانتی‌متر بکار گرفته شد، استفاده نمود. نیاز به رعایت این موارد نسبت به حالت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای که بصورت مرتب و روتین با تاریخ‌های مشخص اقدام به اخذ تصویر می‌کند، از محدودیت‌های روش پیشنهادی می‌باشد. با توجه به اینکه پارامترهای استرس دمایی و استرس آبی بر مقدار ضریب بازده انرژی تاثیرگذار هستند، روابط تجربی وجود دارند که می‌توان تاثیرات این پارامترها را تا حدودی تعدیل کرد. در این روابط از داده‌های دمایی ایستگاه‌های هواشناسی یا ماهواره‌ای و همچنین محاسبه پارامتر تبخیر و تعرق محاسبه شده از داده‌های ماهواره‌ای استفاده می‌شود. امکان استفاده از این روابط در حالت ماهواره‌ای وجود دارد و برای روش پیشنهادی میسر نیست.

دقت مدل مونیتیس در روش Digital ndvi برابر با ۰/۶۳ با  $RMSE=238.484$  برآورد شده است. همچنین در روش Satellite NDVI دقت برآورد زیست توده ۰/۵۸۵ با  $RMSE=292.881$  کسب شده است. دقت برآورد در روش Digital NDVI نسبت به Satellite NDVI بهتر بوده است.



شکل ۷- فراوانی خطای برآورد زیست توده با استفاده از Digital NDVI

همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود، بازه خطا در داده‌های تست بین  $600 \text{ g/m}^2$  تا  $520 \text{ g/m}^2$  متغیر است. توزیع فراوانی خطا بصورت گوسی است، که تأییدی بر اتفاقی بودن خطاهای باقیمانده و عدم وجود خطای سیستماتیک در نتایج مدل است. خطای نسبی در این محاسبات ۰/۳۶ و انحراف معیار  $248.2 \text{ g/m}^2$  محاسبه شده است.

یکی از عوامل ایجاد کننده خطا در روش ماهواره‌ای، خالص نبودن پوشش گیاهی در هر پیکسل عکس ماهواره‌ای است. با توجه به اینکه ضریب بازده انرژی برای هر گونه گیاهی متفاوت است، اگر در یک پیکسل بیش از یک نوع گیاه وجود داشته باشد، برآورد زیست توده با خطا همراه می‌شود. همانطور که در جدول ۴ دیده می‌شود مقدار میانگین ضریب بازده انرژی برای گیاه گندم  $2/22 \text{ g/MJ}$  می‌باشد و بعنوان مثال این مقدار برای نیشکر در حدود  $3 \text{ g/MJ}$  [۴۳] می‌باشد. این موضوع در پیکسل‌های ماهواره‌ای قابل ملاحظه است. به عنوان مثال یک پیکسل لندست‌تکه محدوده  $900 \text{ m}^2$  را شامل می‌شود، ممکن است خالص نبوده و شامل بیش از یک نوع گیاه باشد. در منطقه مورد مطالعه (همدان)، گندم، جو، سیب‌زمینی، نخود فرنگی و سیر در مجاورت یکدیگر کشت می‌شود و این پژوهش با پیکسل‌های مخلوط در حالت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مواجه بوده است. اما با توجه به ابعاد عکس دیجیتال و انتخابی بودن محدوده عکس برداری، این مشکل در روش پیشنهادی این پژوهش وجود ندارد.



محاسبه Digital NDVI وسایر پارامترهای مورد نیاز، مدل مونتیس اجرا شده است.

در این پژوهش نتایج زیر اخذ شده است.  
۱- برآورد Digital NDVI با ضریب تعیین ( $R^2=0.71$ ) ۰٫۷۱ با  $RMSE=0.875$  نشان از موفقیت مدل ارائه شده برای برآورد NDVI با تصاویر دوربین دیجیتال دارد.

۲- میزان دقت در برآورد زیست توده با مدل مونتیس و Digital NDVI برابر ۰٫۶۳۱ با  $RMSE=238.84$  شده است. این میزان با استفاده از Satellite NDVI برابر با ۰٫۵۸۸ با  $RMSE=292.881$  بوده است.

۳- یکی از دلایل بهبود دقت برآورد زیست توده با روش مونتیس در حالت استفاده از Digital NDVI در مقایسه با Satellite NDVI، خالص بودن یک تصویر دیجیتال از یک نوع پوشش گیاهی می باشد و در حالی که در داده های ماهواره ای به دلیل پوشش وسیع تر، در یک پیکسل عکس ماهواره ای، امکان وجود انواع مختلف پوشش گیاهی در آن وجود دارد.

با توجه به اینکه یک پارامتر مهم در برآورد زیست توده با مدل مونتیس، تابش فرودی خورشیدی است، پیشنهاد می شود برای رسیدن به دقت بالاتر، از مدل های ماهواره ای برآورد تابش فرودی خورشیدی استفاده شود. در این پژوهش این پارامتر از ایستگاه های هواشناسی اخذ شده است، که برای نقطه مورد اندازه گیری معتبر است و با فاصله گرفتن از مکان ایستگاه از دقت آن کاسته می شود.

در این پژوهش روش پیشنهادی برای گونه کشاورزی گندم اجرا شده است. لذا پیشنهاد می شود این روش برای گونه های دیگر کشاورزی همچون برنج، جو، کلزا و ... اجرا شده و نتایج آن با روش ماهواره ای مقایسه گردد.

قدردانی: از شرکت تعاونی زرین کشت و شرکت تعاونی اعتمادی و کشاورزان محترم مناطق مورد مطالعه، که در تهیه داده های مورد نیاز این پژوهش همکاری لازم را داشته اند، کمال تشکر و قدردانی می شود.

فاصله ایستگاه های هواشناسی که از آنها داده هواشناسی مورد نیاز اخذ می شود، محدودیت دیگر در هر دو روش ماهواره ای و روش ارائه شده در این پژوهش می باشد. تابش وردی خورشید از این ایستگاه ها اخذ می شود، به صورت نقطه ای بوده و احتمالاً نتواند به طور دقیق مقدار این پارامترها را در کل منطقه تحت پوشش هر ایستگاه نمایان سازد. در استان های همدان و مرکزی حداکثر فاصله بین مزارع تا ایستگاه هواشناسی ۱۷/۰۷ km و ۱۷/۳۱ با فاصله میانگین ۷ کیلومتر می باشد. با وجود فاصله های ذکر شده تفاوت در مقدار تابش خورشیدی فرودی محل در ایستگاه تا محل مزرعه وجود دارد که بررسی تاثیر این موضوع نیازمند تحقیقات بیشتری است.

#### ۴- نتیجه گیری

زیست توده، جزئی از چرخه کربن می باشد و از این رو برآورد دقیق آن برای بسیاری از اهداف از جمله تعیین محتوای گازهای گلخانه ای، محاسبه ی کربن زمین، کاربردهای کشاورزی، مدل سازی تغییرات آب و هوا مورد نیاز است. به دلیل پرهزینه بودن روش های زمینی برآورد زیست توده، یکی از روش های رایج برآورد زیست توده استفاده از داده های ماهواره ای می باشد. از داده های ماهواره ای مورد استفاده در مدل های برآورد زیست توده، NDVI می باشد. علیرغم در دسترس بودن داده های ماهواره ای و سهولت محاسبه NDVI، مسئله قابل توجه کیفیت این داده ها می باشد. داده های ماهواره ای شدت متاثر از شرایط آب و هوایی هستند. با توجه به این مسئله، در این پژوهش مدلی ارائه شده است که NDVI را از تصاویر دوربین دیجیتال محاسبه کند. به این منظور با بررسی رابطه مقدار پوشش گیاهی استخراج شده از تصاویر دیجیتال و NDVI استخراج شده از تصاویر ماهواره ای مدلی استخراج شد و با استفاده از این مدل، Digital NDVI برای سایر تصاویر دیجیتال محاسبه شده است. با

#### مراجع

- [1] Samalca, I.K. (2007). "Estimation of Forest Biomass and its Error, a Case in Kalimantan, Indonesia, Enschede, Netherlands." M.Sc. Thesis, International Institute for Geo-Information science and earth observation (ITC).
- [2] Deo, R.K. (2008). "Modelling and Mapping of Above-ground Biomass and Carbon Sequestration in the Cool Temperate Forest of North-east China." M.Sc. Thesis, International Institute for Geo-Information science and earth observation (ITC), Enschede, Netherlands.

- [3] Nichol, J.F. and Sarker, M.L.R. (2011). "Improved biomass estimation using the texture parameters of two high-resolution optical sensors." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(3), 930-946.
- [4] Akumaga, U., Tarhule, A. and Yusuf, A.A. (2017). "Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa." *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, pp.225-234.
- [5] Ghasemi, N, Sahebi, M.R. and Mohammadzadeh, A. (2013). "Biomass estimation of a temperate deciduous forest using wavelet analysis." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(2), 765-776.
- [6] Liu, P. (2015) "A survey of remote-sensing big data". *Frontiers in Environmental Science*, 3, 1-6.
- [7] Chi, M., Plaza, A., Benediktsson, J.A, Sun, Z., Shen, J. and Zhu, Y. (2016) "Big data for remote sensing: Challenges and opportunities." *Proceedings of the IEEE*, 104, 2207-2219.
- [8] Khanal, S., Fulton, J., Klopfenstein, A., Douridas, N. and Shearer, S. (2018). "Integration of high resolution remotely sensed data and machine learning techniques for spatial prediction of soil properties and corn yield." *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 153, Pages 213-225.
- [9] Zheng, G., Chen, J. and Tian, Q. (2007). "Combining remote sensing imagery and forest age inventory." *Journal of Environmental Management*, 85(3), 616-623.
- [10] Stöckle, C.O. and Kemanian, A.R. (2009). "Crop Radiation Capture and Use Efficiency: A Framework for Crop Growth Analysis. In *Crop Physiology*." Academic Press: San Diego, CA, USA, Chapter 7; pp. 145-170, ISBN 978-0-12-374431-9.
- [11] Monteith, J.L. (1972). "Solar radiation and productivity in tropical ecosystems". *J. Appl. Ecol.* 9, 747-766.
- [12] Monteith, J.L. (1977). "Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B.*" 281, 277-294.
- [13] Xin, Q., Gong, P., Yu, C., Yu, L and Broich, M. (2013). "Andrew E. Suyker 4 and Ranga B. Myneni; A Production Efficiency Model-Based Method for Satellite Estimates of Corn and Soybean Yields in the Midwestern US." *Remote Sens.* 2013, 5, 5926-5943; doi:10.3390/rs5115926
- [14] Chen, T., van der Werf, G.R., Gobron, N., Moors, E.J. and Dolman, A.J. (2014). "Global cropland monthly gross primary production in the year 2000." *Biogeosciences* 11, 3871-3880.
- [15] Li, Z.P., Liu, S.G., Tan, Z.X., Bliss, N.B., Young, C.J., West, T.O. and Ogle, S.M. (2014). "Comparing cropland net primary production estimates from inventory, a satellite-based model, and a process-based model in the Midwest of the United States." *Ecol. Model.* 277, 1-12.
- [16] Awad, M.M., 2019. Toward Precision in Crop Yield Estimation Using Remote Sensing and Optimization Techniques. *Agriculture*, 9(3), p.54.
- [17] Liao, C., Wang, J., Dong, T., Shang, J., Liu, J. and Song, Y. (2019). "Using spatio-temporal fusion of Landsat-8 and MODIS data to derive phenology, biomass and yield estimates for corn and soybean." *Science of the Total Environment.* 650, 1707-1721.
- [18] REEVES, M.S., ZHAO, M. and RUNNING, S.W. (2005). "Usefulness and limits of MODIS GPP for estimating wheat yield; 2005." *International Journal of Remote Sensing* Vol. 26, No. 7, 1403-1421.
- [19] Yuana, W., Chena, Y., Xiaa, J. and Donga, W. (2016). "Vincenzo Magliulo b, Eddy Moors c, Jørgen Eivind Olesend, Haicheng Zhanga; Estimating crop yield using a satellite-based light use efficiency model." *Ecological Indicators.* 60, 702-709.
- [20] Morel, J., Bégué, A., Todoroff, P., Martiné, J.-F., Lebourgeois, V. and M. Petit. (2014). "Coupling a sugarcane crop model with the remotely sensed time series of fIPAR to optimise the yield estimation." *European journal of agronomy* 61: 60-68.
- [21] Tewes, A. and Schellberg, J. (2018). "Towards remote estimation of radiation use efficiency in maize using uav-based low-cost camera imagery." *Agronomy*, 8(2), p.16.
- [22] Lecam, L. (1990). "Maximum likelihood - an introduction". *ISI Review.* 58 (2): 153-171.
- [23] Papaioannou, G., Papanikolaou, N. and Retalis, D. (1993). "Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance." *Theor. Appl. Climatol.* 48, 23-27.
- [24] Stanhill, G. and Fuchs, M. (1977). "The relative flux density of photosynthetically active radiation". *J. Appl. Ecol.* 14, 317-322.
- [25] Martiné, J.F. (2003). "Modélisation de la Production Potentielle de la Canne à Sucre en Zone Tropicale, Sous Conditions Thermiques et Hydriques Contrastées." *Institut National Agronomique Paris-Grignon: Paris, France.*

- [26] Goudriaan, J. (1977). "Crop Micrometeorology: A Simulation Study. Centre for Agricultural Publishing and Documentation." Wageningen: 1977.
- [27] Russel, J.T. and Caldwell, R.M. (1989). "Effect of component densities and nitrogen fertilization on efficiency and yield of maize/soyabean intercrop." *Experimental Agriculture*, Cambridge, England, v. 25, p. 529-540, 1989. Carlson, T.N. and Ripley, D.A. (1998). "On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index." *Remote Sensing Environ.* 62: 241-252.
- [28] Plénet, D., Mollier, A. and Pellerin, S. (2000). "Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. II. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and yield components." *Plant Soil*, 224: 259–272.
- [29] Gallagher, J.N. and Biscoe, P.V. (1978). "Radiation absorption, growth and yield of cereals." *J. Agric. Sci.* 91, 47–60.
- [30] Green, C.F. (1987). "Nitrogen nutrition and wheat growth in relation to absorbed solar radiation." *Agric. For. Meteorol.* 41, 207–248.
- [31] Garcia, R., Kanemasu, E.T., Blad, B.L., Bauer, A., Hatfield, J.L., Major, D.J., Reginato, R.J. and Hubbard, K.G. (1988). "Interception and use efficiency of light in winter wheat under different nitrogen regimes." *Agric. For. Meteorol.* 44, 175–186.
- [32] Gregory, P., Tennant, D. and Belford, R., (1992). "Root and shoot growth, and water and light use efficiency of barley and wheat crops grown on a shallow duplex soil in a mediterranean-type environment." *Australian Journal of Agricultural Research* 43(3)
- [33] Fischer, R.A. (1993). "Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response." *Field. Crop Res.* 33, 57–80.
- [34] Calderini, D.F., Dreccer, M.F. and Slafer, G.A. (1997). "Consequences of breeding on biomass, radiation interception and radiation-use efficiency in wheat." *F. Crop. Res.* 52, 271–281.
- [35] Latiri-souki, K., Nortcliff, S. and Lawlor, D.W. (1998). "Nitrogen fertilizer can increase dry matter, grain production and radiation and water use efficiencies for durum wheat under semi-arid conditions." *Eur. J. Agron.* 9, 21–34.
- [36] Lobell, D.B., Asner, G.P., Ortiz-Monasterio, J.I. and Benning, T.L. (2003). "Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties." *Agric. Ecosyst. Environ.* 94, 205–220.
- [37] Albrizio, R. and Steduto, P. (2005). "Resource use efficiency of fieldgrown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. I. Radiation use efficiency." *Agric. For. Meteorol.* 130, 254–268.
- [38] Padilla, F.L.M., Maas, S.J., González-Dugo, M.P., Mansilla, F., Rajan, N., Gavilán, P. and Domínguez, J. (2012). "Monitoring regional wheat yield in Southern Spain using the GRAMI model and satellite imagery." *F. Crop. Res.* 130, 145–154.
- [39] Pradhan, S., Sehgal, V.K., Sahoo, R.N., Bandyopadhyay, K.K. and Singh, R. (2014). "Yield, water, radiation and nitrogen use efficiencies of wheat (*Triticum aestivum*) as influenced by nitrogen levels in a semi-arid environment. *Indian J. Agron.* 59, 267–275.
- [40] Camposa, I., González-Gómez, L., Villodrea, J., González-Piquer, A. and Calera, A. (2018). "Remote sensing-based crop biomass with water or light-driven crop growth models in wheat commercial fields." *Field Crops Research.* 216, 175–188.
- [41] Robertson, M.J., Wood, A.W. and Muchow, R.C. (1996). "Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning." *Field Crops Res.* 99, 48, 11–25.