

## ارزیابی قابلیت تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-۲ در تخمین میزان بایومس محصول ذرت علوفه‌ای

منطقه مورد مطالعه: شرکت کشاورزی و دامپروری مگسال (قزوین)

فرزانه حدادی<sup>۱</sup>، حسین عقیقی<sup>۲\*</sup>، ایوب مرادی<sup>۱</sup>

۱. کارشناس مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران

۲. استادیار مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی

\*نویسنده عهده دار مکاتبات: تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS.

پست الکترونیک: h\_aghghi@sbu.ac.ir

### چکیده

استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در برآورد دقیق مقدار بایومس محصول به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های سنجش از دور محیطی محسوب می‌شود. اگرچه به طور سنتی از شاخص‌های طیفی پوشش گیاهی استخراج شده از باندهای قرمز (R) و مادون قرمز نزدیک (NIR) برای برآورد آماری بایومس محصول استفاده شده است، اما بیشتر این شاخص‌ها در مقادیر خاصی از شاخص سطح برگ اشباع می‌شوند. لذا جهت غلبه بر محدودیت اشباع‌شدگی، اخیراً مطالعات زیادی بر روی استفاده از بازتابندگی طیفی در محدوده لبه قرمز انجام شده است. برای ارزیابی عملکرد شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی در برآورد بایومس محصول، پنج نوبت نمونه برداری از ویژگی‌های بیوفیزیکی ذرت علوفه‌ای در طول دوره رشد این محصول در اراضی زراعی شرکت کشت و صنعت مگسال، قزوین انجام شد و جمعاً ۱۸۲ نمونه میدانی جمع‌آوری گردید. سپس ده شاخص طیفی از سری زمانی تصاویر Sentinel-۲ که همزمان با نوبت‌های نمونه برداری میدانی در سال ۲۰۱۷ اخذ شده بودند، محاسبه شده و با استفاده از آنها بایومس ذرت علوفه‌ای برآورد گردید. بایومس ذرت علوفه‌ای با اندازه‌گیری‌های میدانی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شاخص GIrededge با ضریب تعیین (۰.۵۵) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا ( $2.874 \text{ kg/m}^2$ ) بهترین شاخص برای تخمین بایومس ذرت علوفه‌ای است. علاوه بر این، تحقیق حاضر نشان داد که تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-۲ با توان تفکیک مکانی بالا و محدوده لبه قرمز، قابلیت تخمین مقدار بایومس محصول ذرت علوفه‌ای را با دقت مناسب دارد.

**کلمات کلیدی:** سنجش از دور، تحلیل سری زمانی، شاخص لبه قرمز، تخمین مقدار بایومس، ذرت علوفه‌ای

### ۱- مقدمه

برآورد مقدار بایومس<sup>۱</sup> محصولات زراعی از اهمیت ویژه‌ای در مدیریت مزرعه برخوردار است. از طریق پایش این پارامتر می‌توان روند رشد و توسعه، سلامت محصولات کشاورزی و نوسانات مقدار تولید در سطح مزرعه را بررسی نمود. لذا، با تغییرات لازم در سیستم مدیریت مزرعه از قبیل روش‌های کود دهی، استفاده از آفت‌کش‌ها و برنامه آبیاری می‌توان میزان تولید محصولات را

<sup>۱</sup> Biomass Estimation

افزایش داد. بایومس یک محصول به عنوان زیست توده گیاه تعریف شده است. زیست توده از طریق فتوسنتز، تنفس و جذب مواد معدنی توسط گیاه تولید می‌شود و شامل مواد زیستی بالای سطح و زیر سطح زمین می‌باشد. بایومس به دو دسته بایومس تر و خشک تقسیم بندی می‌شود (Stoskopf ۱۹۸۱). از آن جمله می‌توان به زیست توده درختان، درختچه‌ها، میوه‌ها و ریشه‌ها اشاره کرد. زمین‌های کشاورزی بخش قابل توجهی از پوشش گیاهی بالای سطح زمین را تشکیل داده‌اند، لذا در بسیاری از تحقیقات کشاورزی، پارامتر بایومس جهت برآورد مقدار تولید و بررسی کیفیت زمین‌های کشاورزی مورد مطالعه قرار گرفته است (Reid, Koppmann et al. ۲۰۰۵).

به‌طور سنتی اندازه‌گیری بایومس محصول مستقیماً از طریق نمونه‌برداری‌های میدانی انجام می‌شود. علاوه بر آسیب رساندن به مزارع و گیاهان، فرآیند جمع‌آوری داده‌ها در این روش شدیداً زمانبر و هزینه بر بوده و در مناطق وسیع قابل اجرا نیست. در مقابل، برآورد بایومس از طریق روش‌های جدید سنجش‌ازدوری مزایای فراوانی دارد، از جمله می‌توان به غیر مخرب بودن اندازه‌گیری‌ها، پوشش مکانی وسیع و همبستگی بالای بین باندهای طیفی و پارامترهای پوشش گیاهی اشاره کرد. امروزه روش‌های سنجش‌ازدوری جهت تخمین بایومس بالای سطح زمین در مقیاس محلی و منطقه‌ای، به‌ویژه در مناطق دور از دسترس شناخته شده هستند (Hatfield and Prueger ۲۰۱۰). در این زمینه از تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک مکانی مختلف مانند Landsat، SPOT و AVHRR استفاده شده است.

استفاده از داده‌های سنجش از دور در مقیاس مکانی وسیع نیازمند نمونه‌برداری گسترده میدانی برای مدل‌سازی، ارزیابی و بهبود مدل‌ها است. با توجه به مشکل جمع‌آوری داده‌های بایومس در زیر سطح زمین، اکثر تحقیقات پیشین در برآورد بایومس بالای سطح زمین متمرکز شده‌اند (Tilly, Hoffmeister et al. ۲۰۱۴, Liu, Pattey et al. ۲۰۱۰, Haboudane, Miller et al. ۲۰۰۴). لذا منظور از بایومس در این مقاله، بایومس بالای سطح زمین و بایومس تر است.

به‌طور کلی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدوری، بایومس را می‌توان به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تخمین زد. در روش‌های مستقیم از آنالیز رگرسیون چندگانه، نزدیک‌ترین همسایه K، یادگیری ماشین و غیره استفاده می‌شود (Roy and Ravan ۱۹۹۶, Nelson, Kimes et al. ۲۰۰۰, Steininger ۲۰۰۰, Foody, Boyd et al. ۲۰۰۳, Zheng, Rademacher et al. ۲۰۰۴). اما در روش‌های غیرمستقیم از پارامترهای گیاه مانند قطر تاج پوشش، مدل‌های رشد محصول و یا مدل‌های فیزیکی استفاده می‌شود (Mutanga ۲۰۰۴, Skidmore ۲۰۰۴, Popescu, Wynne et al. ۲۰۰۴).

به‌طور معمول روش‌های سنجش‌ازدوری در برآورد بایومس از شاخص‌های پوشش گیاهی<sup>۲</sup> استفاده می‌کنند (Im and Jensen ۲۰۰۵). در بسیاری از مطالعات کشاورزی، پیش‌بینی بایومس محصول با استفاده از متغیرهای اقلیمی و مدل‌های آماری رگرسیونی انجام شده است (Lobell, Cassman et al. ۲۰۰۹). به‌طور کلی، یک مدل رگرسیونی ساده با استفاده از ماتریس داده‌های بایومس زمینی، چندین پارامتر مختلف محیطی (مانند دما و بارش) و شاخص‌های پوشش گیاهی ساخته می‌شود. سپس، معادله رگرسیونی بین مقدار بایومس، پارامترهای محیطی و شاخص‌های پوشش گیاهی محاسبه می‌شود. مزایای مدل‌های آماری نسبت به مدل‌های دیگر، محاسبات نسبتاً ساده و تعداد داده‌های ورودی کم می‌باشد، اما مدل‌های آماری قابلیت تعمیم در مکان و زمان دیگر را ندارند.

Weiser و همکاران (۱۹۸۶) در تحقیقات خود بر این نکته تأکید کردند که شاخص‌های گیاهی یک اندازه‌گیری مستقیم از بایومس یا تولید اولیه نبوده، اما با شاخص سطح برگ و بایومس گیاهان همبستگی داشته و به مقادیر مختلف آنها حساسیت نشان می‌دهند. بنابراین برای تخمین این پارامترها مفید می‌باشند (Weiser, Asrar et al. ۱۹۸۶). در تحقیقات مختلف شاخص‌های

<sup>۲</sup> Vegetation Indices

گیاهی با پارامترهای بیوفیزیکی مانند شاخص سطح برگ (Richardson and Wiegand ۱۹۷۷, Turner, Cohen et al. ۱۹۹۹)، فعالیت‌های فتوسنتزی (Wiegand, Richardson et al. ۱۹۹۱)، محتوای کلروفیل (۲۰۰۱ Broge and Leblanc)، میزان بایومس و تولید (۲۰۰۴ Thenkabail, Enclona et al.) ارتباط مستقیم نشان داده‌اند. با این حال، رابطه بین شاخص‌های پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ با فعالیت فتوسنتزی و بایومس در مقادیر بالای سطح برگ اشباع می‌شود (Wiegand and Richardson ۱۹۹۰). این ارتباط بین شاخص‌های پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ در مراحل مختلف رشد محصول و محتوای آب برگ تغییر می‌کند (Carlson and Ripley ۱۹۹۷). هاتفیلد و همکاران (۱۹۸۵) یک آزمایش مبتنی بر سنجش‌از دور زمینی را در تاریخ‌های کشت مختلف گندم انجام دادند و دریافتند که شاخص‌های پوشش گیاهی فوق‌الذکر در شاخص سطح برگ بیشتر از ۴ اشباع می‌شوند (Hatfield, Kanemasu et al. ۱۹۸۵). لذا، در این تحقیق رابطه شاخص‌های پوشش گیاهی لبه قرمز با مقدار بایومس محصولات زراعی مورد بررسی قرار گرفت.

شاخص‌های پوشش گیاهی بر اساس اطلاعات بازتابندگی طیفی پوشش گیاهی توسعه یافته‌اند. در حالت کلی این شاخص‌ها به سطوح مختلف بایومس حساسیت نشان می‌دهند. پرکاربردترین شاخص پوشش گیاهی، شاخص NDVI است که به مقادیر شاخص سطح برگ ۳ کوچک‌تر از ۳ حساسیت نشان می‌دهد اما در مقادیر متوسط و بالای شاخص سطح برگ اشباع می‌شود (۲۰۱۲ Nguy-Robertson, Gitelson et al.). نتایج مشابهی در ارتباط بین شاخص NDVI و بایومس مشاهده شده است، به طوری که این شاخص در مقادیر بایومس متوسط و بیشتر از ۲ کیلوگرم در مترمربع اشباع شده است (Nicolas, Philippe et al. ۲۰۱۰). اما شاخص‌های دیگری مانند شاخص‌های نسبتی ساده و لبه قرمز، در مقادیر بالای شاخص سطح برگ تغییرات بایومس را به خوبی نشان داده‌اند (۲۰۱۲ Nguy-Robertson, Gitelson et al. ۲۰۰۴, Haboudane, Miller et al.). در داخل کشور نیز جهت برآورد بایومس گندم عاشورلو و همکاران (۱۳۹۳) از شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف و روش‌های رگرسیون وزنی استفاده کردند. آنها مقدار بایومس را با ضریب تعیین ( $R^2$ ) ۰/۷ برآورد کردند.

در بین گیاهان علوفه‌ای، ذرت از نظر مقدار محصول و ارزش غذایی دارای اهمیت خاصی است و یکی از بهترین غذاهای دامی می‌باشد. میزان محصول ذرت علوفه‌ای تولید شده در سال ۱۳۹۴ معادل ۱۴,۵٪ کل تولیدات زراعی و ۵۷٪ کل تولید نباتات علوفه‌ای کشور در همان سال بوده است (آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۴). به همین دلیل، ذرت علوفه‌ای یکی از مهمترین محصولات کشاورزی در ایران می‌باشد. در تحقیق حاضر پس از معرفی منطقه مورد مطالعه و داده‌های سنجش از دور و زمینی، با استفاده از قابلیت سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-۲ و تحلیل روابط رگرسیون خطی و غیرخطی بین داده‌های نمونه برداری و شاخص‌های پوشش گیاهی، معادله مناسب جهت استخراج بایومس محصول ذرت علوفه‌ای انتخاب و سپس بر روی هر یک از تصاویر اعمال شده و در نهایت مقدار بایومس هر مزرعه برآورد گردیده است.

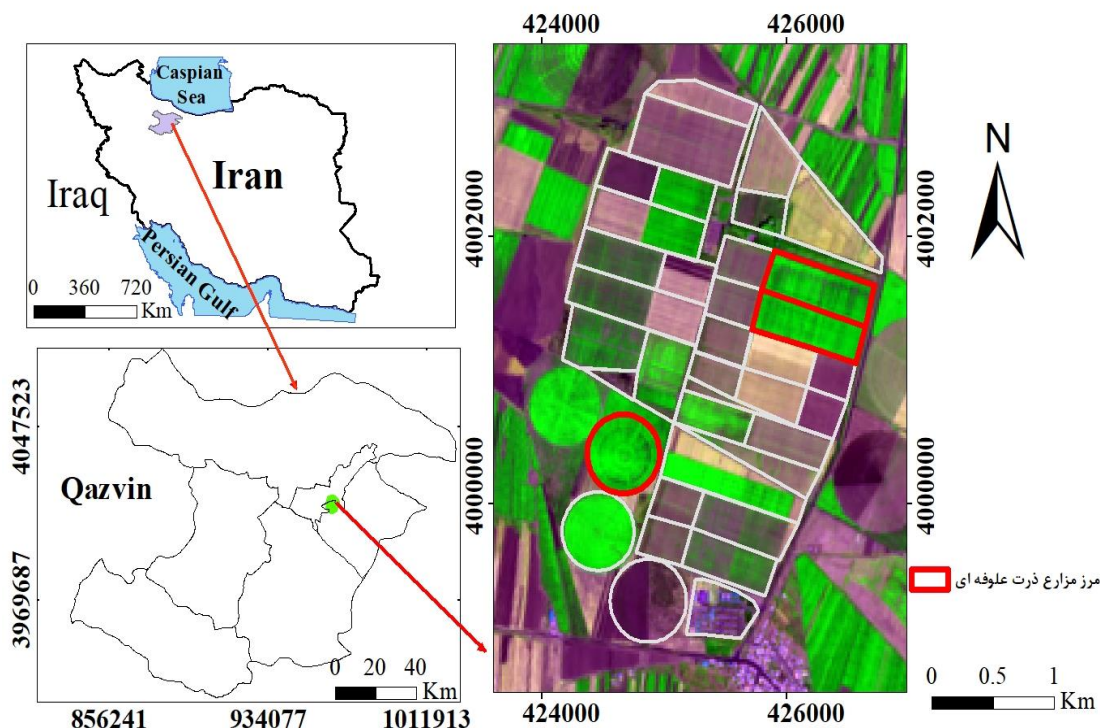
## مواد و روش‌ها

### ۱-۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق مزارع شرکت کشت و صنعت مگسال واقع در شمال غربی ایران می‌باشد. این مزارع در بخش آبیک شهرستان قزوین بین عرض جغرافیایی ۳۶/۰۹ درجه عرض شمالی و طول جغرافیایی ۵۰/۱۰ درجه شرقی قرار دارد (شکل

<sup>۲</sup> Leaf Area Index

۱). ارتفاع متوسط منطقه مورد مطالعه ۱۲۲۰ متر از سطح دریا است. اقلیم منطقه سرد و خشک با متوسط بارندگی ۲۱۰ میلی‌متر و میانگین دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.<sup>۴</sup>



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی مزارع ذرت علوفه‌ای کشت و صنعت مگسال قزوین

یکی از محصولات کشاورزی عمده در شرکت کشت و صنعت مگسال ذرت علوفه‌ای است. ذرت علوفه‌ای نسبت به سایر غلات از طول دوره رشد کمتری برخوردار است، اما مقدار عملکرد آن به مراتب بالاتر است. در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵، تنها در سه مزرعه ذرت علوفه‌ای کشت شده است. کشت این محصول در این منطقه عمدتاً از اواخر خردادماه تا حداکثر ۲۰ تیرماه و برداشت آن اواخر مهرماه تا اوایل آبان ماه انجام می‌شود و دوره رشد آن بین ۷۵ تا ۱۳۰ روز متغیر است. مهم‌ترین مراحل فنولوژیک رشد ذرت علوفه‌ای شامل ظهور گیاهچه‌ها، ساقه رفتن، پیدایش گل‌نر و ماده، تشکیل دانه‌ها و مرحله نهایی بلوغ و رسیدگی دانه است (Vina, Gitelson et al. ۲۰۰۴). در شکل ۲ مراحل فنولوژیک رشد ذرت علوفه‌ای نشان داده شده است.

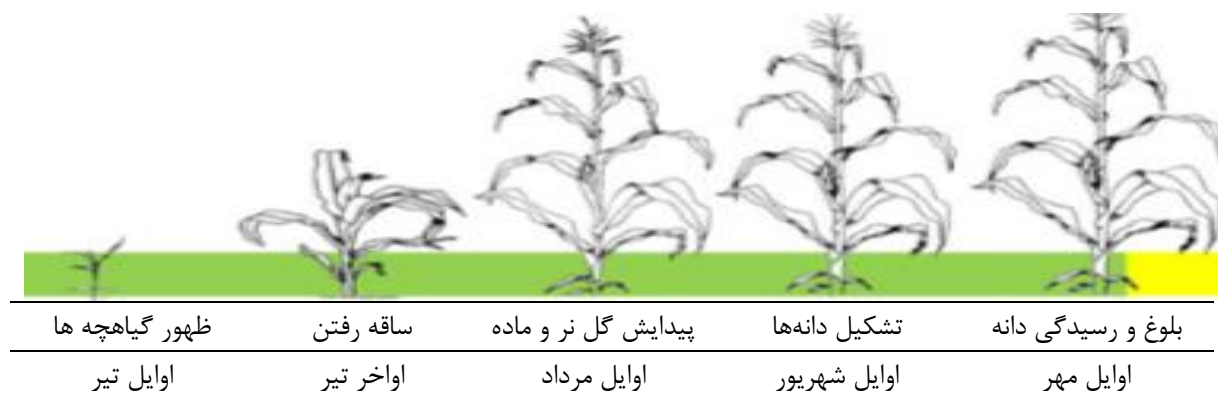
## ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

### ۲-۲-۱- داده‌های زمینی بایومس محصول

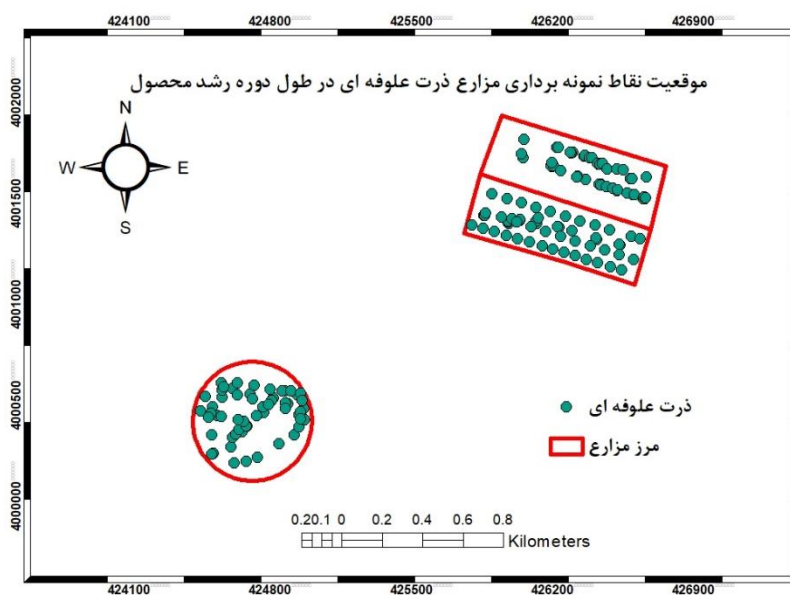
پنج نوبت نمونه‌برداری میدانی در طول دوره رشد محصول ذرت علوفه‌ای سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ انجام شد. در تمام نوبت‌های نمونه‌برداری با در اختیار داشتن اطلاعات اولیه و کلی از منطقه و با کمک گرفتن از تصاویر ماهواره‌ای موجود، نقاط نمونه جدید به نحوی انتخاب شد که بتوانند تمام تغییرات قابل‌مشاهده در سطح مزارع را پوشش دهند و همچنین دامنه مقادیر مربوط به هر پارامتر به‌طور کامل و قابل‌قبول برداشت گردد. تاریخ‌های نمونه‌برداری به ترتیب شامل ۱۱ تیر، ۲۷ تیر، ۱۲ مرداد،

<sup>۴</sup> <http://irimo.ir/far/>

۲ شهریور و ۳ مهر می‌باشد که همزمان با گذر تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-۲ تعیین شده است (شکل ۳). نمونه‌برداری از هر نقطه توسط پلات‌های ۱×۱ متر انجام شد. روش نمونه برداری بصورت سیستماتیک تصادفی و با دقت GPS (۳ تا ۵ متر) است. پارامترهایی مانند موقعیت دقیق نقاط، ارتفاع محصول و ساعت نمونه‌برداری ثبت گردید. نمونه‌های جمع‌آوری شده در بسته‌های جداگانه شماره‌گذاری شده و بلافاصله در محل با استفاده از ترازوی دیجیتالی دقیق با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شدند. میانگین ارتفاع محصول در اوایل و اواخر دوره رشد به ترتیب حدود ۱۲ سانتی‌متر و ۳/۵ متر بوده و تعداد برگ‌های آن به‌طور متوسط ۱۲ تا ۱۸ عدد است. در شکل ۳ مزارع نمونه‌برداری شده در طول دوره رشد محصول و موقعیت نقاط نمونه‌برداری محصول ذرت علوفه‌ای نشان داده شده است. اطلاعات کلی نمونه‌برداری محصول ذرت علوفه‌ای در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۲ مراحل رشد ذرت علوفه‌ای



شکل ۳ موقعیت نقاط نمونه برداری مزارع ذرت علوفه‌ای

جدول ۱ خلاصه اطلاعات نمونه برداری در مزارع ذرت علوفه‌ای

پارامتر	تعداد نمونه‌ها	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)	۲۳۴	۳	۳۳۶	۵۴/۶۲	۵۴/۷۷
شاخص سطح برگ	۲۳۴	۰ (خیلی کم)	۸/۸۹	۲/۲۸	۲/۲۱
بایومس تر (کیلوگرم در مترمربع)	۱۸۲	۰/۲	۲۰/۶۱	۴/۱۰۸	۴/۳۱۷

## ۲-۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده

تصاویر مورد استفاده مربوط به ماهواره Sentinel-۲ است. این ماهواره دارای ۱۳ باند طیفی و توان تفکیک ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر در محدوده طیف مرئی و مادون قرمز طیف الکترومغناطیسی است (جدول ۲). جهت جمع‌آوری سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای منطبق با دوره رشد محصول ذرت علوفه‌ای، ابتدا تقویم زراعی این محصول در منطقه مطالعاتی قزوین بررسی گردید. سپس اطلاعات جمع‌آوری شده مانند: زمان کاشت، اوج سبزی‌نگی، برداشت محصولات مختلف در پایگاه داده ذخیره گردید و تجزیه و تحلیل‌های لازم جهت انتخاب و اخذ تصاویر Sentinel-۲ انجام گرفت. به همین منظور با داشتن این اطلاعات اقدام به انتخاب ۵ تصویر ماهواره‌ای شد، که به ترتیب مربوط به اوایل تیرماه، اواخر تیرماه، اوایل مردادماه، اوایل شهریورماه و اوایل مهرماه می‌باشد. تصاویر L۱C ماهواره Sentinel-۲ از نظر هندسی تصحیح شده می‌باشند، اما با توجه به آنکه در این تحقیق از سری زمانی تصاویر استفاده می‌شود و نیز تطبیق اطلاعات تصویر و نمونه برداری زمینی مورد نیاز است، لازم است تا تصاویر با دقت زیر پیکسل از نظر هندسی با یکدیگر و نیز با موقعیت زمینی تطابق داشته باشند. بنابراین ابتدا تطابق هندسی تصاویر با نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری و تصاویر گوگل ارث کنترل شده و سپس انطباق تصاویر با یکدیگر ارزیابی شد. تصاویری که نیاز به تصحیح هندسی داشتند با استفاده از نقاط کنترل تهیه شده از تصاویر گوگل ارث با دقت کمتر از ۱ پیکسل تصحیح شدند. الگوریتم Sen۲Cor نرم افزار<sup>۵</sup> Snap جهت تصحیحات اتمسفری تصاویر Sentinel-۲ استفاده شد.

جدول ۲ مشخصات سنجنده ماهواره Sentinel-۲

باند	توان تفکیک مکانی (متر)	طول موج باند (میکرومتر)
۱ - Coastal aerosol	۶۰	۰٫۴۴۳
۲ - Blue	۱۰	۰٫۴۹۰
۳ - Green	۱۰	۰٫۵۶۰
۴ - Red	۱۰	۰٫۶۶۵
۵ - Vegetation Red Edge	۲۰	۰٫۷۰۵
۶ - Vegetation Red Edge	۲۰	۰٫۷۴۰
۷ - Vegetation Red Edge	۲۰	۰٫۷۸۳
۸ - NIR	۱۰	۰٫۸۴۲
۸A - Narrow NIR	۲۰	۰٫۸۶۵
۹ - Water Vapour	۶۰	۰٫۹۴۵
۱۰ - SWIR - Cirrus	۶۰	۱٫۳۷۵
۱۱ - SWIR	۲۰	۱٫۶۱۰
۱۲ - SWIR	۲۰	۲٫۱۹۰

## ۲-۳- محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی و برآورد بایومس

شاخص‌های گیاهی حاصل محاسبات ریاضی بین دو یا چند باند طیفی هستند که از طریق آن‌ها پارامترهایی مانند شاخص سطح برگ (LAI)، محتوای کلروفیل، بایومس سبز و تابش فعال فتوسنتزی<sup>۶</sup> (APAR) شناسایی می‌شوند. این شاخص‌ها بر اساس ویژگی‌های مختلفی مانند تعداد باندهای طیفی و روش محاسبات (نسبتی، نرمال شده و اختلاف) به گروه‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند.

<sup>۵</sup> The Sentinel Application Platform

<sup>۶</sup> Absorbed photosynthetically active radiation

جهت شناسایی پوشش‌های گیاهی در تصاویر ماهواره‌ای و از بین بردن عوارضی مانند اثرات توپوگرافی و آلبدو، از نسبت باندهایی که در محدوده مادون قرمز نزدیک ۷۰۰-۱۳۰۰ نانومتر قرار گرفته‌اند به باندهایی که در محدوده قرمز ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر و یا جذب آب ۱۳۰۰-۲۵۰۰ نانومتر قرار دارند استفاده می‌شود. در واقع هدف این است، باندهایی که در آن‌ها پوشش گیاهی انعکاس بالایی دارند در صورت کسر و باندهایی که انعکاس کمی دارند در مخرج قرار گیرند (Bannari, Morin et al. ۱۹۹۵). در جدول ۳، تعدادی از این شاخص‌ها که در مطالعات برآورد بایومس دقت‌های قابل قبولی داشته‌اند ارائه شده است.

جدول ۳ شاخص‌های پوشش گیاهی مورد استفاده

شاخص	رابطه	منبع
Normalized Difference Red-Edge (NDREI)	$NDREI = \frac{R_{NIR} - R_{band\gamma}}{R_{NIR} + R_{band\gamma}}$	(Gitelson and Merzlyak ۱۹۹۴)
Green Normal Difference Vegetation Index (GNDVI)	$GNDVI = \frac{(R_{Green} - R_{Red})}{(R_{Green} + R_{Red})}$	(Gitelson, Kaufman et al. ۱۹۹۶)
Normal Difference vegetation Index (NDVI)	$NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red})}$	(Rouse Jr ۱۹۷۲)
Chlorophyll Index Red Edge (CI red edge)	$CI_{rededge} = \left(\frac{R_{NIR}}{R_{Red}}\right) - 1$	(Gitelson, Vina et al. ۲۰۰۳)
Enhanced vegetation index ۲ (EVI۲)	$EVI_2 = 2.5 \times \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{(R_{NIR} + 2.4 \times R_{Red} + 1)}$	(Jiang, Huete et al. ۲۰۰۸)
Chlorophyll Index Green (CI green)	$CI_{Green} = \left(\frac{R_{NIR}}{R_{Green}}\right) - 1$	(Gitelson, Vina et al. ۲۰۰۳)
Red-edge ratio NDVI (REPNDVI)	$REPNDVI = NDVI \times \sqrt{\left(\frac{R_{band\gamma}}{R_{band\delta}}\right)}$	(Chang and Shoshany ۲۰۱۶)
Soil Adjust Vegetation Index (SAVI)	$SAVI = \frac{(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red} + 0.5)} (1 + 0.5)$	(Huete and Tucker ۱۹۹۱)
Sentinel-۲ Red-Edge Position (S۲REP)	$S^2REP = 70.5 + 3.5 * \frac{\left(\frac{R_{NIR} + R_{Red}}{2} - R_{band\delta}\right)}{R_{band\gamma} - R_{band\delta}}$	(Guyot and Baret ۱۹۸۸)
Red-Edge Position (REP)	$REP = 70.0 + 4.0 * \frac{\left(\frac{R_{NIR} + R_{Red}}{2} - R_{band\delta}\right)}{R_{band\gamma} - R_{band\delta}}$	(Guyot and Baret ۱۹۸۸)

$R_{band\delta}$  = مقدار بازتابندگی باند ۶

$R_{band\delta}$  = مقدار بازتابندگی باند ۵

$R_{NIR}$  = مقدار بازتابندگی باند مادون قرمز /  $R_{Red}$  = مقدار بازتابندگی باند قرمز

$R_{Blue}$  = مقدار بازتابندگی باند آبی

$R_{Green}$  = مقدار بازتابندگی باند سبز



در این مطالعه جهت بررسی روابط تجربی شاخص‌های گیاهی با داده‌های زمینی از مدل‌های رگرسیون تک متغیره خطی و نمایی استفاده شده است. روش‌های رگرسیونی یکی از پرکاربردترین روش‌ها در توسعه مدل‌های تجربی بر روی داده‌های ماهواره‌ای است. شکل عمومی معادله رگرسیون خطی ساده و نمایی بر اساس روابط ۱ و ۲ است:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$Y = \beta_1 e^{\beta_2 x} \quad \text{رابطه (۲)}$$

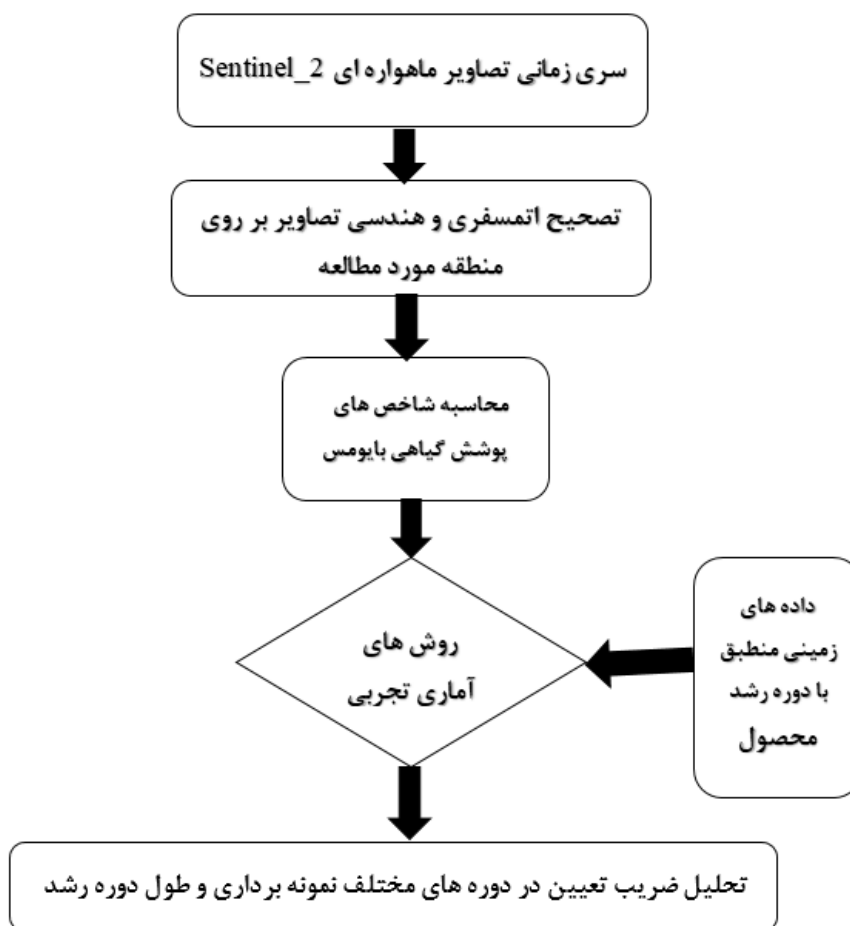
در این روابط،  $Y$  متغیر وابسته مورد مطالعه (بایومس محصول ذرت علوفه‌ای)،  $x$  متغیر مستقل (شاخص گیاهی)،  $\beta_1$  و  $\beta_2$  ضرایب متغیر مستقل و  $\beta_0$  عدد ثابت رابطه ۱ است. پس از محاسبه شاخص‌های موردنظر بر روی تصاویر Sentinel-۲ نوبت‌های مختلف نمونه برداری، ضریب تعیین بین داده‌های زمینی و مقادیر شاخص‌های گیاهی در دو حالت بصورت جداگانه بررسی گردید. در حالت اول شاخص‌های گیاهی به صورت جداگانه در تاریخ‌های مختلف نمونه برداری به ترتیب در اوایل تیرماه، اواخر تیرماه، اوایل مرداد ماه، اوایل شهریور ماه و اوایل مهر ماه محاسبه گردید. همچنین در حالت دوم رابطه داده‌های زمینی بایومس در طول دوره رشد محصول ذرت علوفه‌ای با شاخص‌های گیاهی بررسی شد.

مقادیر ضریب تعیین و شاخص RMSE در جدول ۴ و ۵ آورده شده است. ارزیابی روابط رگرسیون خطی و غیرخطی بین شاخص‌های گیاهی و بایومس محصول ذرت علوفه‌ای در محیط نرم افزار SPSS<sup>۷</sup> انجام شده است. جهت بررسی روابط رگرسیون خطی و غیرخطی از شاخص‌های آماری مانند ضریب تعیین ( $R^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۸</sup> (RMSE) استفاده گردید. ضریب تعیین ( $R^2$ ) نشان می‌دهد که چند درصد از تغییرات متغیر وابسته به وسیله متغیر مستقل بیان می‌شود. شاخص RMSE، میانگین تفاوت بین متغیرهای اندازه‌گیری شده زمینی و برآورد شده توسط مدل را نشان می‌دهد. پس از محاسبه مدل‌های رگرسیون خطی ساده و نمایی، بهترین شاخص پوشش گیاهی براساس مقدار ضریب تعیین  $R^2$  انتخاب گردید. پس از انتخاب شاخص مناسب، ضرایب مدل ثبت گردید. سپس با قرار دادن ضرایب رگرسیونی به دست آمده، مدل‌های رگرسیون خطی ساده و نمایی شکل گرفت و در نهایت میزان بایومس ذرت علوفه‌ای برآورد گردید. مراحل انجام تحقیق در شکل ۴ آورده شده است.

<sup>۷</sup> Statistical Package for the Social Sciences

<sup>۸</sup> Root Mean Square Error





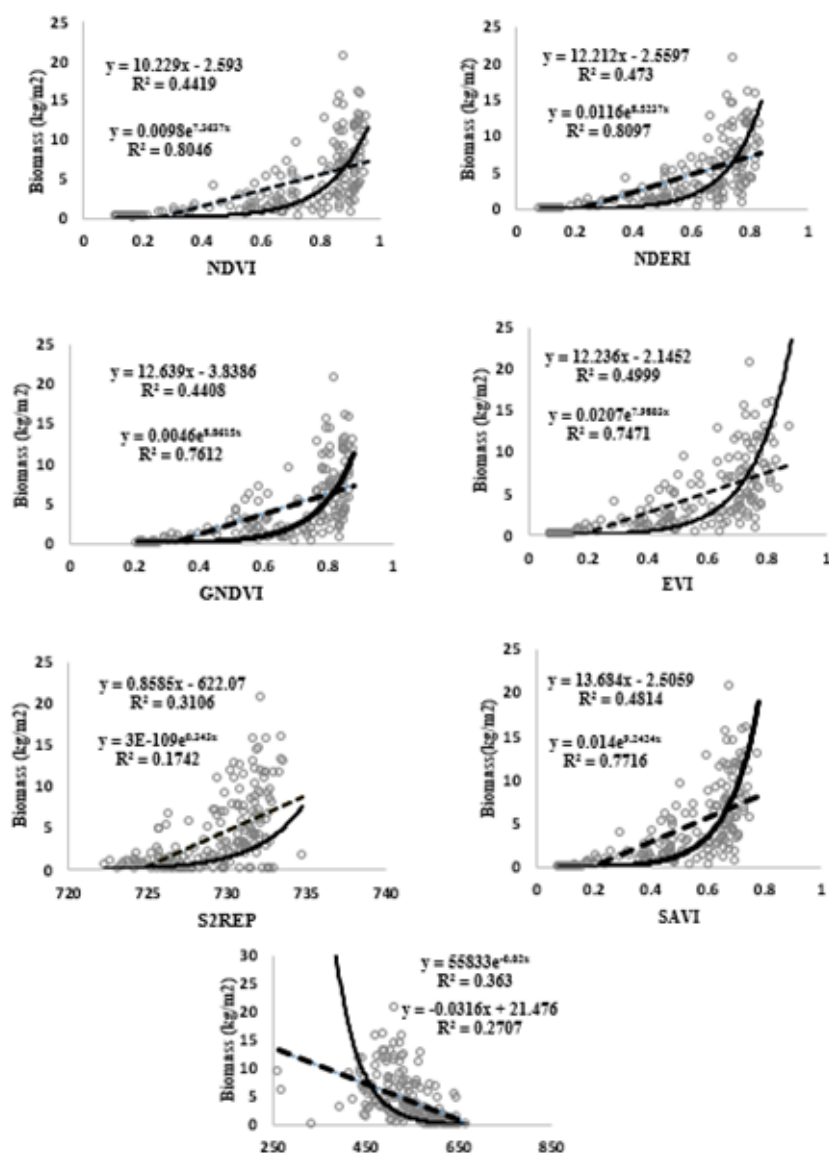
شکل ۴ نمودار جریان‌ی مراحل انجام کار

### ۳- بحث و نتیجه‌گیری

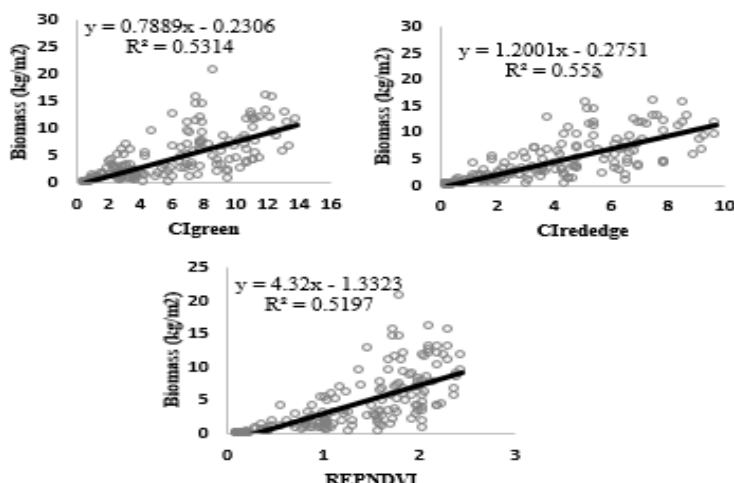
#### ۳-۱- تخمین میزان بایومس نهایی در طول دوره رشد محصول ذرت علوفه‌ای

تحقیقات بسیاری از شاخص‌های طیفی برای بررسی پارامترهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی گیاهان مانند شاخص سطح برگ، کلروفیل و مقدار بایومس در طول دوره رشد محصولات کشاورزی استفاده کرده‌اند. در این تحقیق با استفاده از بازتابندگی طیفی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و نقاط نمونه برداری محصول ذرت علوفه‌ای در طول دوره رشد محصول، شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی محاسبه شد (جدول ۳)، سپس از این شاخص‌ها جهت برآورد مقدار بایومس نهایی محصول ذرت علوفه‌ای (تصویر زمان ۳ مهر) در شرکت کشت و صنعت مگسال قزوین استفاده گردید. بر این اساس پس از محاسبه شاخص‌های موردنظر، ضریب تعیین بین داده‌های زمینی و مقادیر شاخص‌های پوشش گیاهی و معادلات رگرسیونی در طول دوره رشد ذرت علوفه‌ای محاسبه گردید که مقادیر آن در جدول ۴ آورده شده است. رابطه شاخص‌های پوشش گیاهی شامل:  $REP$ ،  $CI_{green}$ ،  $CI_{rededge}$ ،  $REPNDVI$ ،  $S\gamma REP$ ،  $NDREI$ ،  $SAVI$ ،  $GNDVI$ ،  $NDVI$  با داده‌های زمینی بایومس در طول دوره رشد محصول ذرت علوفه‌ای ارزیابی شد. سپس شاخص‌های پوشش گیاهی با مقدار ضریب تعیین مناسب به دو دسته تقسیم‌بندی شدند (شکل ۵ و شکل ۶). گروه توابع غیرخطی شامل شاخص‌های  $GNDVI$ ،  $NDVI$ ،  $REP$  و  $S\gamma REP$ ،  $NDREI$ ،  $SAVI$  و توابع خطی شامل شاخص‌های  $REPNDVI$ ،  $CI_{rededge}$  و  $CI_{green}$  می‌باشند. در حالت کلی گروه توابع غیرخطی مقدار ضریب تعیین بالاتری را نسبت به گروه خطی در محصول ذرت علوفه‌ای نشان

داده‌اند، اما شاخص‌های غیرخطی REP و S<sub>2</sub>REP به ترتیب با مقادیر ضریب تعیین ۰/۳۶ و ۰/۱۷ و ریشه میانگین مربعات خطا ۳/۵۷۸ و ۴/۲۱۰ کیلوگرم در مترمربع، در تخمین مقدار بایومس عملکرد ضعیف‌تری داشته‌اند. در گروه توابع غیرخطی، اکثر شاخص‌های پوشش گیاهی در مقادیر شاخص‌های پوشش گیاهی بیشتر از ۰/۸ و مقدار بایومس بیشتر از ۵ کیلوگرم در مترمربع اشباع شده‌اند. این درحالی است توابع گروه خطی نسبت به گروه غیرخطی عملکرد بهتری برای مناطق پوشش گیاهی متوسط و متراکم نشان داده است.



شکل ۵ رابطه شاخص‌های پوشش گیاهی بایومس و داده‌های زمینی بایومس محصول ذرت علوفه‌ای در طول دوره رشد (گروه توابع غیرخطی)



شکل ۶ رابطه شاخص‌های پوشش گیاهی بایومس و داده‌های زمینی بایومس محصول ذرت علوفه‌ای در طول دوره رشد (گروه توابع خطی)

داده‌های زمینی بایومس کل گیاه، شامل اجزای فعال و غیرفعال در فتوسنتز مانند ساقه، دانه و برگ‌ها نسبت به بایومس برگ و سطح برگ تأثیر بیشتری بر رابطه بین شاخص‌های پوشش گیاهی و فعالیت فتوسنتزی دارند، به همین دلیل از بایومس کل گیاه جهت ارزیابی شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده شده است. شاخص‌های لبه قرمز مانند CIrededge، CIgreen و REPNDVI با ضرایب تعیین مناسب و رفع اثر اشباع شاخص‌های گروه توابع غیرخطی تا حدودی توانسته‌اند تغییرات مقدار بایومس نهایی محصول ذرت علوفه‌ای را نشان دهند ( $CI_{green}: R^2 = 0.53, RMSE = 2.94 kg/m^2$ ) ( $CI_{rededge}: R^2 = 0.55, RMSE = 2.87 kg/m^2$ ) ( $REPNDVI: R^2 = 0.51, RMSE = 2.98 kg/m^2$ ).

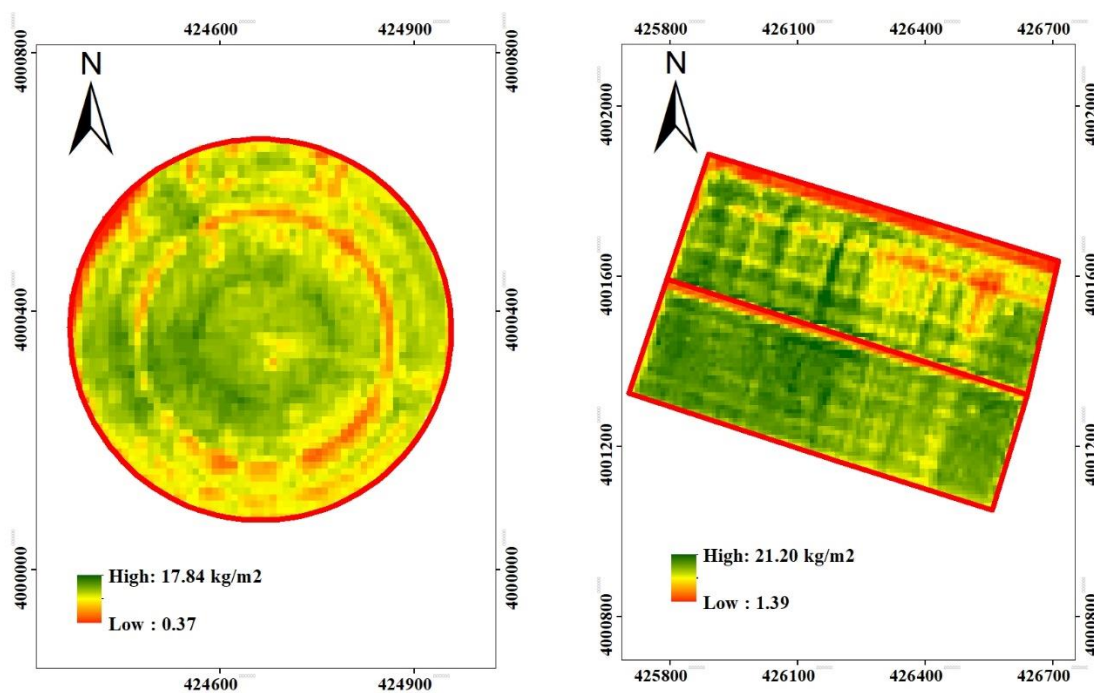
در جدول ۴ نتایج رگرسیون خطی و غیرخطی تمام شاخص‌های پوشش گیاهی با مقادیر ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا آورده شده است. همه شاخص‌های پوشش گیاهی در سطح ۰/۰۵ معنادار هستند و با مقدار بایومس نهایی ذرت علوفه‌ای در کل دوره رشد محصول رابطه معناداری را نشان می‌دهند. شاخص‌های گروه توابع خطی هم‌زمان با زیاد شدن مقدار شاخص افزایش می‌یابند (شکل ۶)، در حالی که گروه توابع غیرخطی تا مقدار ثابتی توانسته‌اند مقدار تغییرات بایومس نهایی را نشان دهند (شکل ۵). در نهایت شاخص CIrededge با مقدار ضریب تعیین ۰/۵۵ و کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا جهت ساخت مدل تخمین مقدار بایومس نهایی محصول ذرت علوفه‌ای در این منطقه انتخاب گردید و همچنین این شاخص مشکل اشباع‌شدگی شاخص‌های دیگر را تا حد زیادی برطرف کرده است.

جدول ۴ خلاصه مقادیر ضریب تعیین، ریشه میانگین مربعات خطا و سطح معناداری آزمون برای هر دو گروه شاخص‌های خطی و غیرخطی

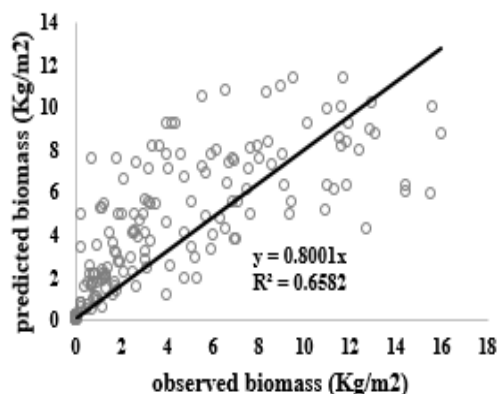
شاخص‌های پوشش گیاهی	معادلات رگرسیون	مدل رگرسیون	مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ )	ریشه میانگین مربعات خطا (کیلوگرم در مترمربع)
NDVI	$y = 0.0098 \exp^{0.3637NDVI}$	نمایی	۰/۸۰	۳/۰۷۹
GNDVI	$y = 0.0046 \exp^{0.8615GNDVI}$	نمایی	۰/۷۶	۳/۱۰۵
NDREI	$y = 0.0116 \exp^{0.5337NDREI}$	نمایی	۰/۸۰	۳/۱۶۶
$S^2REP$	$y = 3e - 10 \exp^{0.343S^2REP}$	نمایی	۰/۱۷	۳/۵۷۸
REPNDVI	$y = 4.32REPNDVI - 1.3323$	خطی	۰/۵۱	۲/۹۸۶

۲/۸۷۴	۰/۵۵	خطی	$y = ۱.۲۰۰۱ CI_{rededge} - ۰.۲۷۵۱$	$CI_{rededge}$
۲/۹۴۹	۰/۵۳	خطی	$y = ۰.۷۸۸۹ CI_{green} - ۰.۲۳۰۶$	$CI_{green}$
۴/۲۱۰	۰/۳۶	نمایی	$y = ۵۵۸۳۳ \exp^{-۰.۰۲x}$	REP
۳/۰۴۷	۰/۷۴	نمایی	$y = ۰.۰۲۰۷ \exp^{۷.۹۰۰۳x}$	EVI۲
۳/۲۸۰	۰/۷۷	نمایی	$y = ۰.۰۱۴ \exp^{۹.۲۳۳۳x}$	SAVI

جهت ساخت مدل تخمین مقدار بایومس نهایی در طول دوره رشد محصول ذرت علوفه‌ای در شرکت کشت و صنعت مگسال از شاخص  $CI_{rededge}$  تصویر ۳ مهر، به عنوان بهترین زمان جهت برآورد بایومس ذرت علوفه‌ای استفاده گردید. چون در این زمان محصول ذرت علوفه‌ای در مرحله آخر دوره رشد قرار دارد و به حداکثر مقدار بایومس و ارتفاع رسیده است. شکل ۷ نقشه برآورد مقدار بایومس نهایی ذرت علوفه‌ای دو مزرعه در تاریخ ۳ مهر آورده شده است. شکل ۸ رابطه بین مقدار بایومس زمینی محصول ذرت علوفه‌ای و تخمین زده شده از مدل (کیلوگرم در مترمربع) در کل دوره رشد محصول را نشان داده است. بخش‌های سبز رنگ و قرمز رنگ به ترتیب بیانگر مقدار حداکثر و حداقل بایومس ذرت علوفه‌ای در دو مزرعه با دوره رشد مشابه هستند.



شکل ۷ نقشه برآورد بایومس ذرت علوفه‌ای در تاریخ ۳ مهر در دو مزرعه با شرایط مشابه



شکل ۸ نمودار پراکنش مقدار بایومس زمینی و برآورد شده توسط مدل در طول دوره رشد محصول ذرت علوفه‌ای

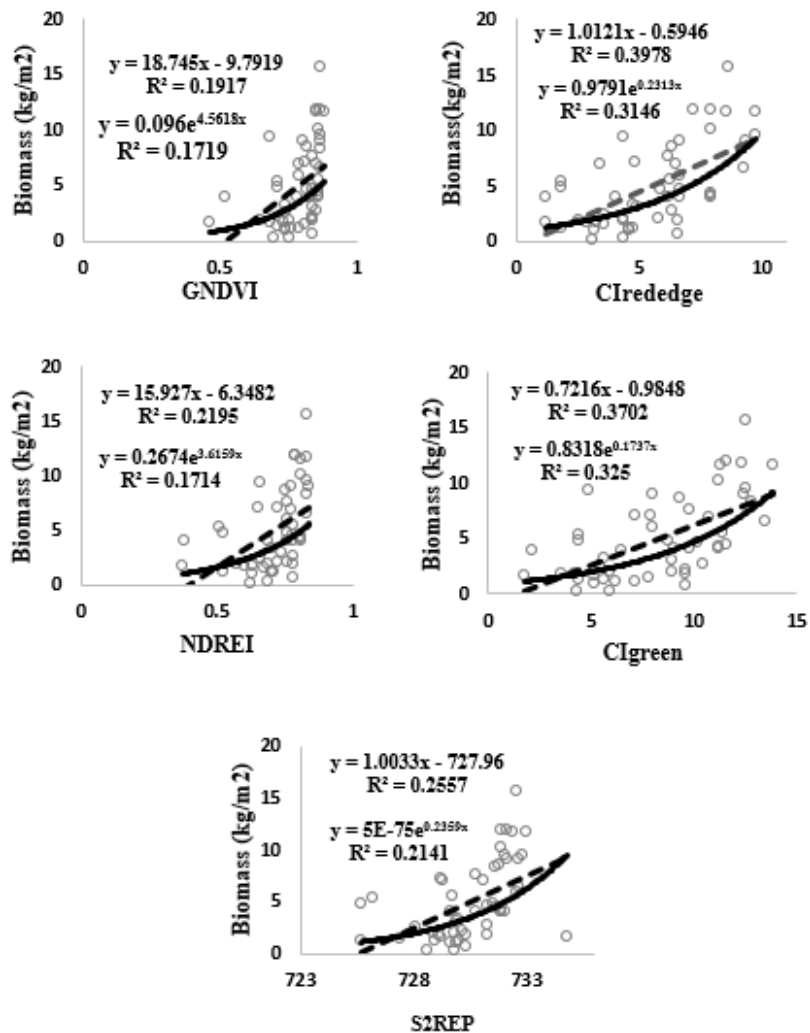
### ۳-۲- تخمین بایومس در روزهای مختلف دوره رشد محصول ذرت علوفه‌ای

جهت بررسی روابط بایومس محصول ذرت علوفه‌ای در روزهای مختلف دوره رشد با شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی، ۵ نوبت نمونه برداری میدانی انجام شد. همان‌طور که در بخش ۲-۲-۲ اشاره شده است، تاریخ‌های نمونه برداری به ترتیب در اوایل تیرماه، اواخر تیرماه، اوایل مردادماه، اوایل شهریورماه و اوایل مهرماه می‌باشند. در اوایل و اواسط رشد محصول متوسط ارتفاع محصول ذرت علوفه‌ای در مزارع به ترتیب ۳۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر و میانگین شاخص سطح برگ ۱،۵، ۳ و ۴،۵ اندازه‌گیری شده است. به دلیل ارتفاع کم محصول، مقدار کم شاخص سطح برگ و اثر خاک، ضریب تعیین شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف با داده‌های زمینی بایومس مقادیر کمتر از ۰،۳ را نشان دادند. اما در اواخر دوره رشد محصول که ارتفاع و شاخص سطح برگ افزایش می‌یابد، مقدار ضریب تعیین بین شاخص‌های پوشش گیاهی و میزان بایومس روند صعودی داشته است. در ادامه نتایج تحلیل آماری روابط رگرسیونی شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف و میزان بایومس در روزهای ۲ شهریور و ۳ مهر آورده شده است.

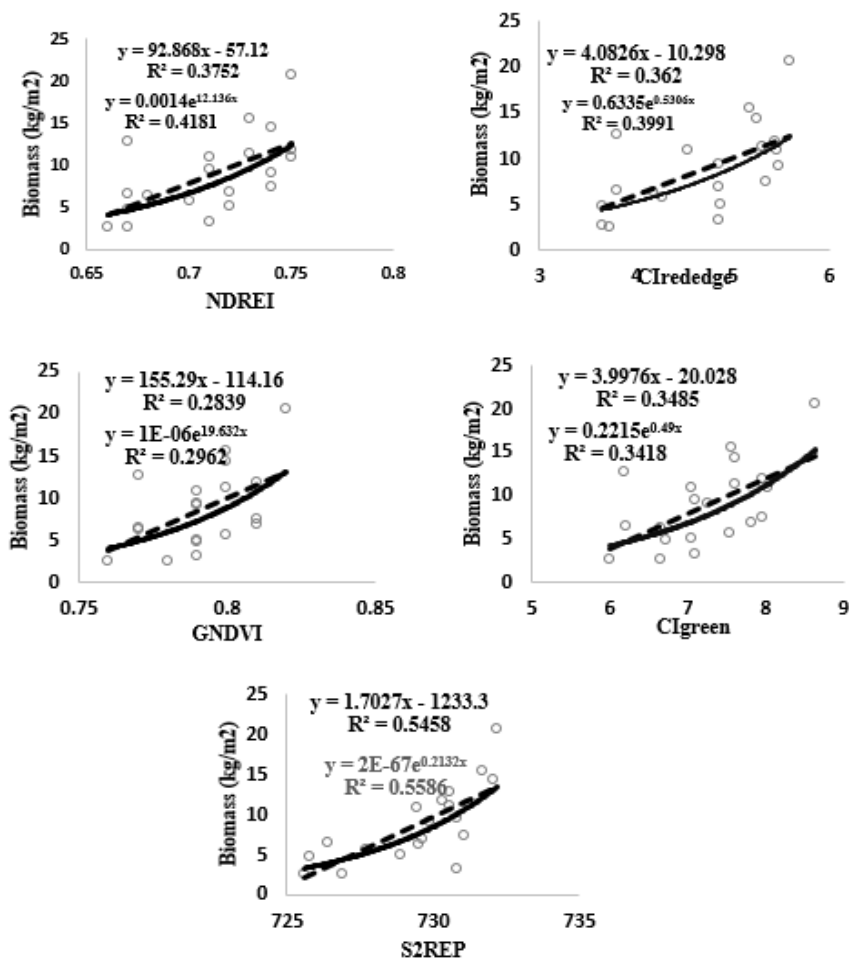
به منظور برآورد میزان بایومس محصول ذرت علوفه‌ای در اواسط و اواخر دوره میانی همزمان با تشکیل دانه، بلوغ و رسیدگی (۲ شهریور و ۳ مهر) از شاخص‌های لبه قرمز NDREI، S2REP، CIrededge، CIgreen و شاخص GNDVI استفاده گردید. نمودارهای پراکنش مقادیر شاخص‌های مختلف با مقدار بایومس زمینی روزهای ۲ شهریور و ۳ مهر در شکل ۹ و ۱۰ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تاریخ نمونه برداری ۲ شهریور، شاخص‌های GNDVI و NDREI در مقادیر نزدیک به ۰،۸ و مقدار بایومس بیشتر از ۵ کیلوگرم در مترمربع به اشباع می‌رسند، اما شاخص‌های لبه قرمز مانند CIrededge و CIgreen با محدوده تغییرات ضریب تعیین ۰/۳۹-۰/۳۱ اثر اشباع را در مدل‌های رگرسیون خطی و نمایی کمتر نشان می‌دهند و در تخمین مقدار بایومس عملکرد بهتری دارند. همچنین شاخص CIrededge نسبت به شاخص CIgreen در مرحله تشکیل دانه عملکرد بهتری نشان داده است. شاخص GNDVI در این مرحله ضعیف‌ترین عملکرد را در مقایسه با دیگر شاخص‌ها داشته است و اثر اشباع شدیدی را در مقدار بیشتر از ۰/۹ نشان می‌دهد.

در تاریخ نمونه برداری ۳ مهر، شاخص S2REP با مقدار ضریب تعیین رگرسیون خطی و نمایی ۰/۵۴ و ۰/۵۵ بایومس محصول ذرت علوفه‌ای را نسبت به دیگر شاخص‌ها با دقت بهتری در اواخر مرحله رسیدگی دانه‌ها تخمین زده است و پس از آن شاخص NDREI با ضریب تعیین خطی و نمایی ۰/۳۷ و ۰/۴۱ عملکرد بهتر نشان داده است (شکل ۱۰). جدول ۵ مقادیر ضریب تعیین شاخص‌های مختلف در روزهای نمونه برداری ۲ شهریور و ۳ مهر برای مدل‌های رگرسیون خطی نشان می‌دهد. همان‌طور که

در این جدول مشاهده می‌شود ضریب تعیین شاخص‌های  $S2REP$ ، NDREI و GNDVI در روز نمونه برداری ۳ مهر نسبت به تاریخ ۲ شهریور مقادیر بالاتری دارند. اما شاخص‌های  $CI_{rededge}$  و  $CI_{green}$  در نوبت نمونه برداری ۲ شهریور عملکرد بهتری داشته‌اند.



شکل ۹ نمودار پراکنش بایومس محصول ذرت علوفه‌ای مزرعه‌های مستطیل شکل با شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف در تاریخ نمونه برداری ۲ شهریور



شکل ۱۰ نمودار پراکنش بایومس محصول ذرت علوفه‌ای با شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف در تاریخ نمونه برداری ۳ مهر

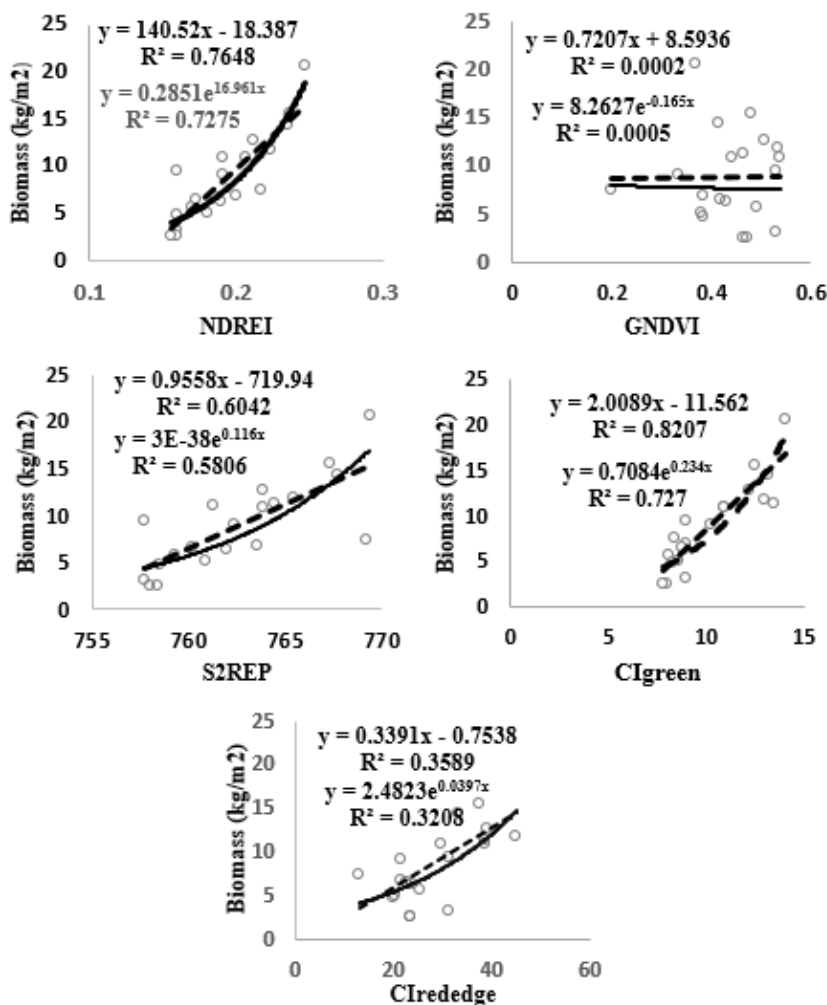
جدول ۵ خلاصه مقادیر ضریب تعیین مدل خطی، ریشه میانگین مربعات خطا در تاریخ‌های نمونه برداری ۲ شهریور و ۳ مهر محصول ذرت علوفه‌ای

شاخص‌های گیاهی بایومس محصول ذرت علوفه‌ای	تاریخ نمونه برداری	ضریب تعیین مدل خطی (کیلوگرم در مترمربع)	ریشه میانگین مربعات خطا (کیلوگرم در مترمربع)
GNDVI	۲ شهریور	۰/۱۹	۰/۴۶۴
	۳ مهر	۰/۲۸	۰/۸۷۰
NDREI	۲ شهریور	۰/۲۲	۰/۴۵۶
	۳ مهر	۰/۳۵	۰/۸۲
Clrededge	۲ شهریور	۰/۳۹	۰/۴۰۱
	۳ مهر	۰/۳۶	۰/۸۲۰
Clgreen	۲ شهریور	۰/۳۷	۰/۴۱۰
	۳ مهر	۰/۳۴	۰/۸۲۰
SYREP	۲ شهریور	۰/۲۵	۰/۴۴۰
	۳ مهر	۰/۵۴	۰/۶۹

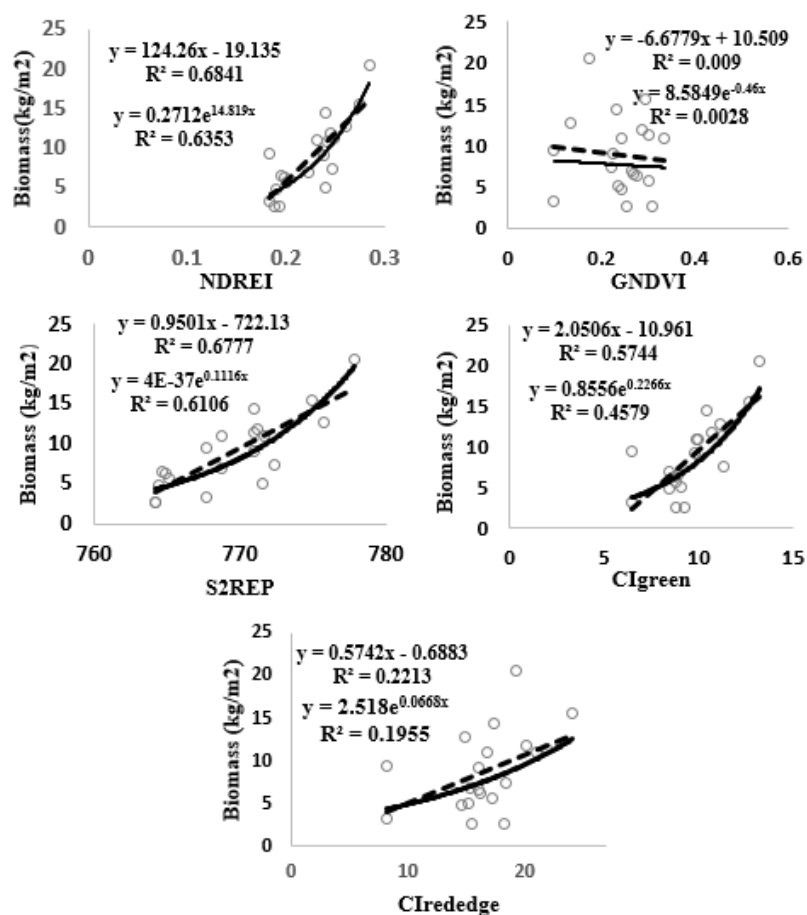


همان طور که در قسمت قبل توضیح داده شد، جهت برآورد بایومس ذرت علوفه‌ای از سری زمانی تصاویر Sentinel-2 هم‌زمان با ۵ نوبت نمونه برداری زمینی استفاده شد. در ادامه به منظور بررسی روابط شاخص‌های پوشش گیاهی با مقدار بایومس زمینی محصول ذرت علوفه‌ای در تاریخ نمونه برداری ۳ مهر، از تصاویر Sentinel-2 زمان‌های ۱۰ و ۲۷ شهریور استفاده گردید.

در شکل ۱۱ و ۱۲، نمودارهای پراکنش مقادیر شاخص‌های NDREI، GNDVI، S2REP، CIrededge و CIgreen با مقدار بایومس زمینی تاریخ ۳ مهر و تصاویر Sentinel-2 زمان‌های ۱۰ و ۲۷ شهریور آورده شده است. همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، شاخص پوشش گیاهی لبه قرمز NDREI و CIgreen به ترتیب با مقدار ضریب تعیین ۰/۷۶ و ۰/۸۲ توانسته‌اند بایومس ذرت علوفه‌ای را به خوبی برآورد کنند. اما شاخص GNDVI مقدار ضریب تعیین بسیار کمی را نشان داده است. همچنین ضریب تعیین بین شاخص‌های NDREI، S2REP، CIgreen و CIrededge با مقدار بایومس زمینی محصول ذرت علوفه‌ای به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۶۷ و ۰/۵۷ محاسبه شده است (شکل ۱۲). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت شاخص‌های پوشش گیاهی لبه قرمز، توانایی خوبی در برآورد بایومس محصولات زراعی دارند.



شکل ۱۱ نمودار پراکنش بایومس محصول ذرت مزرعه‌های مستطیل شکل با شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف در تاریخ نمونه برداری ۳ مهر و تصویر Sentinel-2 زمان ۱۰ شهریور



شکل ۱۲ نمودار پراکنش بایومس محصول ذرت علوفه‌ای مزرعه‌های مستطیل شکل با شاخص‌های گیاهی مختلف در تاریخ نمونه برداری ۳ مهر و تصویر Sentinel-۲ زمان ۲۷ شهریور

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد محصولات محصولاتی مانند ذرت علوفه‌ای که تراکم و ارتفاع بالایی دارند، به دلیل ساختار پیچیده تاج پوشش و نحوه قرارگیری برگ‌های گیاه با بایومس رابطه پیچیده‌تری نشان می‌دهند، بطوری که شاخص‌هایی مانند شاخص NDVI در مقادیر بالای بایومس به اشباع می‌رسند. اما شاخص‌های پوشش گیاهی مانند CIrededge به دلیل وجود محدوده لبه قرمز به مقادیر مختلف بایومس حساسیت بیشتری نشان می‌دهند. در مقایسه با نتایج تحقیقات گذشته، Chang و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از شاخص‌های لبه قرمز مانند CIrededge و REPNDVI بایومس محصول ذرت دانه‌ای را با ضریب تعیین ۰/۸ برآورد کرده‌اند. البته در تحقیق آنها از داده‌های بازتابندگی برداشت شده توسط طیف سنج زمینی استفاده شده است. در تحقیق دیگری، Wang و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از شاخص‌های گیاهی لبه قرمز به تخمین بایومس محصول ذرت پرداختند که به نتایج نزدیک به تحقیق حاضر با ضریب تعیین ۰,۴۸ دست یافتند. داده‌های مورد استفاده آنها از سنجنده ابرطیفی CASI بدست آمده است. Prabhakara و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف و روش‌های رگرسیون خطی و غیرخطی، بایومس محصولات زمستانه مانند گندم و جو برآورد کردند. نتایج آنها نشان داد که شاخص TVI با ضریب تعیین ۰,۸۶ نسبت به شاخص‌های NDVI و خاک نتایج بهتری ارائه می‌دهد. بطوری که شاخص NDVI در مقادیر بایومس بالاتر از ۱۵۰۰ کیلوگرم در هکتار اشباع شده است. در سال ۲۰۰۹، Bao و همکاران با استفاده از سری زمانی تصاویر لندست و MODIS، شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف مانند NDVI، REPNDVI، EVI، SIPI و NDWI و

روش‌های رگرسیون خطی و غیرخطی به برآورد بایومس محصول در طول دوره رشد محصول گندم زمستانه پرداختند. نتایج آنها نشان داد شاخص NDVI با ضریب تعیین ۰/۸۹ و تابع نمایی بهترین مدل برآورد بایومس گندم است. بیشترین مقدار ضریب تعیین را تا قبل از زمان گل‌دهی محصول گندم بدست آوردند.

### ۳-۳ نتیجه‌گیری

ماهواره Sentinel-۲ با هدف جایگزینی و بهبود مکانی و طیفی نسل‌های قدیمی سنجنده‌های Landsat و SPOT توسعه یافته است. تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-۲ با داشتن محدوده طیفی لبه قرمز در مطالعات کشاورزی و سنجش از دور نقش بسزایی دارد. در این تحقیق به منظور ارزیابی قابلیت محدوده لبه قرمز سری زمانی تصاویر Sentinel-۲، با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف برآورد بایومس ذرت علوفه‌ای در مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی باهم مقایسه گردید. مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی در روزهای مختلف نمونه برداری و در طول دوره رشد محصول ذرت علوفه‌ای با استفاده از شاخص‌هایی مانند ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین ارزیابی دقت شدند. شاخص‌های پوشش گیاهی مانند  $CI_{rededge}$ ،  $CI_{green}$  و REPNDVI مقادیر بایومس بیشتر از ۵ کیلوگرم در مترمربع را نسبت به شاخص‌های دیگر بهتر نشان داده‌اند و باندهای مادون قرمز نزدیک و محدوده لبه قرمز با رفع اثر اشباع عملکرد بهتری داشته‌اند. بطوری‌که این شاخص‌ها تغییرات مقدار کلروفیل گیاه را در سرتاسر تاج پوشش نشان می‌دهند و با افزایش مقدار بایومس، رابطه بین بایومس و شاخص‌های لبه قرمز روند صعودی دارد. اما شاخص‌های گیاهی نرمال شده و نسبتی در دوره ابتدایی رشد تحت تاثیر اثر آب و خاک پس زمینه و اثر اشباع در مراحل متوسط و پایانی رشد گیاه قرار دارند. شاخص‌هایی مانند NDVI، GNDVI، SAVI، NDREI، S<sub>2</sub>REP و REP در مقادیر بایومس کمتر از ۵ کیلوگرم در مترمربع زودتر به حد اشباع می‌رسند و در کل مراحل رشد گیاه بصورت نمایی با بایومس ارتباط دارند. بر اساس تجزیه و تحلیل انجام شده در شرکت کشت و صنعت مگسال، سری زمانی تصاویر Sentinel-۲ قادر به برآورد بایومس محصول ذرت علوفه‌ای در سطح مزرعه با دقت متوسط می‌باشد. پیشنهاد می‌شود جهت بهبود نتایج از دیگر شاخص‌های لبه قرمز و همچنین سایر داده‌های سنجش از دوری مانند داده‌های رادار Sentinel-۱ همراه با تصاویر Sentinel-۲ استفاده گردد.

### منابع

عاشورلو داوود، متکان علی اکبر، میرباقری بابک و شهری متین. "استخراج توده زنده گندم با استفاده از داده‌های ماهواره ای و رگرسیون وزنی مکانی".

آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۵-۱۳۹۴.

Bao, Y., Gao, W. and Gao, Z., ۲۰۰۹. Estimation of winter wheat biomass based on remote sensing data at various spatial and spectral resolutions. *Frontiers of earth science in China*, ۳(۱), p.۱۱۸.

Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. and Huete, A.R., ۱۹۹۵. A review of vegetation indices. *Remote sensing reviews*, ۱۳(۱-۲), pp.۹۵-۱۲۰.

Chang, J. and M. Shoshany (۲۰۱۶). Red-edge ratio Normalized Vegetation Index for remote estimation of green biomass. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), ۲۰۱۶ IEEE International, IEEE.

Foody, G.M., Boyd, D.S. and Cutler, M.E., ۲۰۰۳. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote sensing of environment*, ۸۰(۴), pp.۴۶۳-۴۷۴.

Gitelson, A. and M. N. Merzlyak (۱۹۹۴). "Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves." *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* ۲۲(۳): ۲۴۷-۲۵۲.

Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J. and Merzlyak, M.N., ۱۹۹۶. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote sensing of Environment*, ۵۸(۳), pp.۲۸۹-۲۹۸.

Gitelson, A.A., Viña, A., Arkebauer, T.J., Rundquist, D.C., Keydan, G. and Leavitt, B., ۲۰۰۳. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical Research Letters*, ۳۰(۵).

Guyot, G. and F. Baret (۱۹۸۸). Utilisation de la haute resolution spectrale pour suivre l'etat des couverts vegetaux. *Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*.

Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J. and Strachan, I.B., ۲۰۰۴. 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*, ۹۰(۳), pp.۳۳۷-۳۵۲.

Hatfield, J. L. and J. H. Prueger (۲۰۱۰). "Value of using different vegetative indices to quantify agricultural crop characteristics at different growth stages under varying management practices." *Remote Sensing* ۲(۲): ۵۶۲-۵۷۸.

Huete, A. and C. Tucker (۱۹۹۱). "Investigation of soil influences in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery." *International journal of remote sensing* ۱۲(۶): ۱۲۲۳-۱۲۴۲.

Im, J. and J. R. Jensen" (۲۰۰۵) A change detection model based on neighborhood correlation image analysis and decision tree classification." *Remote Sensing of Environment* ۹۹(۳): ۳۲۶-۳۴۰.

Jiang, Z., Huete, A.R., Didan, K. and Miura, T., ۲۰۰۸. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote sensing of Environment*, ۱۱۲(۱۰), pp.۳۸۳۳-۳۸۴۵.

Liu, J., Pattey, E., Miller, J.R., McNairn, H., Smith, A. and Hu, B., ۲۰۱۰. Estimating crop stresses, aboveground dry biomass and yield of corn using multi-temporal optical data combined with a radiation use efficiency model. *Remote Sensing of Environment*, ۱۱۴(۶), pp.۱۱۶۷-۱۱۷۷.

Mutanga, O. and A. K. Skidmore (۲۰۰۴). "Hyperspectral band depth analysis for a better estimation of grass biomass (*Cenchrus ciliaris*) measured under controlled laboratory conditions." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* ۵(۲): ۸۷-۹۶.

Nelson, R.F., Kimes, D.S., Salas, W.A. and Routhier, M., ۲۰۰۰. Secondary forest age and tropical forest biomass estimation using thematic mapper imagery: single-year tropical forest age classes, a surrogate for standing biomass, cannot be reliably identified using single-date tm imagery. *Bioscience*, ۵۰(۵), pp.۴۱۹-۴۳۱.

Nguy-Robertson, A., Gitelson, A., Peng, Y., Viña, A., Arkebauer, T. and Rundquist, D., ۲۰۱۲. Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agronomy Journal*, ۱۰۴(۵), pp.۱۳۳۶-۱۳۴۷.

Nicolas, T., Philippe, V. and HUANG, W.J., ۲۰۱۰. New index for crop canopy fresh biomass estimation. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, ۳۰(۲), pp.۵۱۲-۵۱۷.

Popescu, S.C., Wynne, R.H. and Scrivani, J.A., ۲۰۰۴. Fusion of small-footprint lidar and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia, USA. *Forest Science*, ۵۰(۴), pp.۵۵۱-۵۶۵.

Prabhakara, K., Hively, W.D. and McCarty, G.W., ۲۰۱۰. Evaluating the relationship between biomass, percent groundcover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, ۳۹, pp.۸۸-۱۰۲.

Reid, J.S., Koppmann, R., Eck, T.F. and Eleuterio, D.P., ۲۰۰۰. A review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, ۰(۳), pp.۷۹۹-۸۲۰. Rouse Jr, J. W. (۱۹۷۲). "Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation".

Roy, P. and S. A. Ravan (۱۹۹۶). "Biomass estimation using satellite remote sensing data—an investigation on possible approaches for natural forest." *Journal of biosciences* ۲۱(۴): ۰۳۰-۰۶۱.

Steininger, M. (۲۰۰۰). "Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: data from Brazil and Bolivia." *International journal of remote sensing* ۲۱(۶-۷): ۱۱۳۹-۱۱۵۷.

Stoskopf, N. C. (۱۹۸۱). *Understanding crop production*, Reston Publishing Company, Inc.

Tilly, N., Hoffmeister, D., Schiedung, H., Hütt, C., Brands, J. and Bareth, G., ۲۰۱۴. TERRESTRIAL LASER SCANNING FOR PLANT HEIGHT MEASUREMENT AND BIOMASS ESTIMATION OF MAIZE. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.

Vina, A., Gitelson, A.A., Rundquist, D.C., Keydan, G., Leavitt, B. and Schepers, J., ۲۰۰۴. Monitoring maize (*Zea mays* L.) phenology with remote sensing. *Agronomy Journal*, ۹۶(۴), pp.۱۱۳۹-۱۱۴۷. Weiser, R., et al. (۱۹۸۶). "Assessing grassland biophysical characteristics from spectral measurements." *Remote Sensing of Environment* ۲۰(۲): ۱۴۱-۱۵۲.

Zheng, D., Rademacher, J., Chen, J., Crow, T., Bresee, M., Le Moine, J. and Ryu, S.R., ۲۰۰۴. Estimating aboveground biomass using Landsat ۷ ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote sensing of environment*, ۹۳(۳), pp.۴۰۲-۴۱۱.

## Evaluation of Sentinel-2 imagery for the estimation of Silage maize biomass: A case study of Magsal Animal Husbandry & Agriculture, Qazvin, Iran

Farzaneh Haddadi<sup>1</sup>, Hossein aghighi<sup>2\*</sup>, Ayob Moradi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>. Remote sensing expert, Iranian Space Research Center

<sup>2</sup>. Assistant Professor in Remote Sensing, Remote Sensing and GIS Research Center

\*Correspondence Address: Remote Sensing & GIS Research Center, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email address: h\_aghghi@sbu.ac.ir

### Abstract

The accurate estimation of crop biomass using satellite data is one of the important challenges in environmental remote sensing. Traditionally, spectral vegetation indices (VIs) derived from spectral reflectances in red (R) and near infrared (NIR) bands have been employed to statistically estimate the crop biomass; however, most of these VIs saturate at some level of LAI. Therefore, most of the recent studies have been investigated on using the reflectance spectra in the red-edge region to overcome the saturation limitation. In order to evaluate the performance of different VIs for the estimation of crop biomass, we conducted five sampling campaigns during the growing season of silage maize in Magsal, Qazvin and we totally collected 112 silage maize biomass samples. Then, ten spectral indices from the time series of Sentinel-2 images of 2019 which were simultaneous with our campaigns were computed and employed to statistically estimate the silage maize biomass. The silage maize biomasses were evaluated with the field measurements. The results showed that  $CI_{rededge}$  index with  $R^2 = 0.90$  and the lowest root mean square error ( $RMSE = 2.89 \text{ kg/m}^2$ ) was the best index to estimate silage maize biomass. Moreover, this work also showed that Sentinel-2 satellite which delivers high spatial resolution images of the red-edge band can be employed to accurately estimate the silage maize biomasses.

Keywords: Remote sensing, Time Series Analysis, Red edge Index, Biomass estimation, Silage maize