



ارزیابی قابلیت تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 در تخمین میزان بایومس محصول ذرت علوفه‌ای منطقه مورد مطالعه: شرکت کشاورزی و دامپروری مگسال (قزوین)

فرزانه حدادی^۱، حسین عقیقی^{۲*}، ایوب مرادی^۱

۱. کارشناس مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران

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

تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۷

تاریخ دریافت: ۹۷/۲/۱

چکیده

استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، در برآورد دقیق مقدار بایومس محصول به‌عنوان 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 به‌منظور 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 شد. سپس ۱۰ شاخص طیفی از سری زمانی تصاویر Sentinel-2 که همزمان با نوبت‌های نمونه برداری میدانی در سال ۲۰۱۷ اخذ شده بودند، محاسبه شده و با استفاده از آنها بایومس ذرت علوفه‌ای برآورد شد. بایومس ذرت علوفه‌ای با اندازه‌گیری‌های میدانی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد شاخص CIrededge با ضریب تعیین (0.55) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (2.874 kg/m^2)، بهترین شاخص برای تخمین بایومس ذرت علوفه‌ای است. علاوه بر این، تحقیق حاضر نشان داد که تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با توان تفکیک مکانی بالا و محدوده لبه قرمز، قابلیت تخمین مقدار بایومس محصول ذرت علوفه‌ای را با دقت مناسب دارد.

کلید واژه‌ها: سنجش از دور، تحلیل سری زمانی، شاخص لبه قرمز، تخمین مقدار بایومس، ذرت علوفه‌ای

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

Email: h_aghghi@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

کرد. امروزه روش‌های سنجش از دوری، به‌منظور تخمین بایومس بالای سطح زمین در مقیاس محلی و منطقه‌ای، به‌ویژه در مناطق دور از دسترس، شناخته‌شده هستند (Hatfield and Prueger 2010). 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 (Haboudane, Miller et al. 2004, Liu, Pattey et al. 2010, Tilly, Hoffmeister et al. 2014). لذا منظور از بایومس در این مقاله، بایومس بالای سطح زمین و بایومس تر است.

به‌طور کلی با استفاده از داده‌های سنجش از دوری، 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 1996, Nelson, Kimes et al. 2000, Steininger 2000, Foody, Boyd et al. 2004, Zheng, Rademacher et al. 2003). اما در روش‌های غیرمستقیم از پارامترهای گیاه مانند قطر تاج پوشش، مدل‌های رشد محصول و یا مدل‌های فیزیکی استفاده می‌شود (Mutanga and Skidmore 2004, Popescu, Wynne et al. 2004).

به‌طور معمول روش‌های سنجش از دوری در برآورد بایومس از شاخص‌های پوشش گیاهی^۲ استفاده می‌کنند (Im and Jensen 2005). در بسیاری از مطالعات

برآورد مقدار بایومس^۱ 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 کرد. لذا، با تغییرات لازم در سیستم مدیریت مزرعه از قبیل روش‌های کود دهی، استفاده از آفت‌کش‌ها و برنامه آبیاری می‌توان میزان تولید محصولات را 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 است. بایومس به دو دسته بایومس تر و خشک تقسیم بندی می‌شود (Stoskopf 1981). از آن جمله می‌توان به زیست‌توده 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. 2005).

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 هزینه‌بر بوده و در مناطق وسیع قابل اجرا نیست. در مقابل، برآورد بایومس از طریق روش‌های جدید سنجش از دوری 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

2 Vegetation Indices

1 Biomass Estimation

برگ در مراحل مختلف رشد محصول و محتوای آب برگ تغییر می‌کند (Carlson and Ripley 1997). هاتفیلد و همکاران (۱۹۸۵) یک آزمایش مبتنی بر سنجش از 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. 1985). 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 کوچک‌تر از ۳ حساسیت نشان می‌دهد اما در مقادیر متوسط و بالای شاخص سطح برگ اشباع می‌شود (Nguy- Robertson, Gitelson et al. 2012). 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. 2010). اما شاخص‌های دیگری مانند شاخص‌های نسبتی ساده و لبه قرمز، در مقادیر بالای شاخص سطح برگ، تغییرات بایومس را به خوبی نشان داده‌اند (Haboudane, Miller et al. 2004, Nguy-Robertson, Gitelson et al. 2012). 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

کشاورزی، پیش‌بینی بایومس محصول با استفاده از متغیرهای اقلیمی و مدل‌های آماری رگرسیونی انجام شده است (Lobell, Cassman et al. 2009). 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 رگرسیون 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 هستند (Weiser, Asrar et al. 1986). در تحقیقات مختلف شاخص‌های گیاهی با پارامترهای بیوفیزیکی مانند شاخص سطح برگ (Richardson and Wiegand 1999, Turner, Cohen et al. 1977)، فعالیت‌های فتوسنتزی (Wiegand, Richardson et al. 1991)، محتوای کلروفیل (Broge and Leblanc 2001)، میزان بایومس و تولید (Thenkabail, Enclona et al. 2004) 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 1990). این ارتباط بین شاخص‌های پوشش گیاهی و شاخص سطح

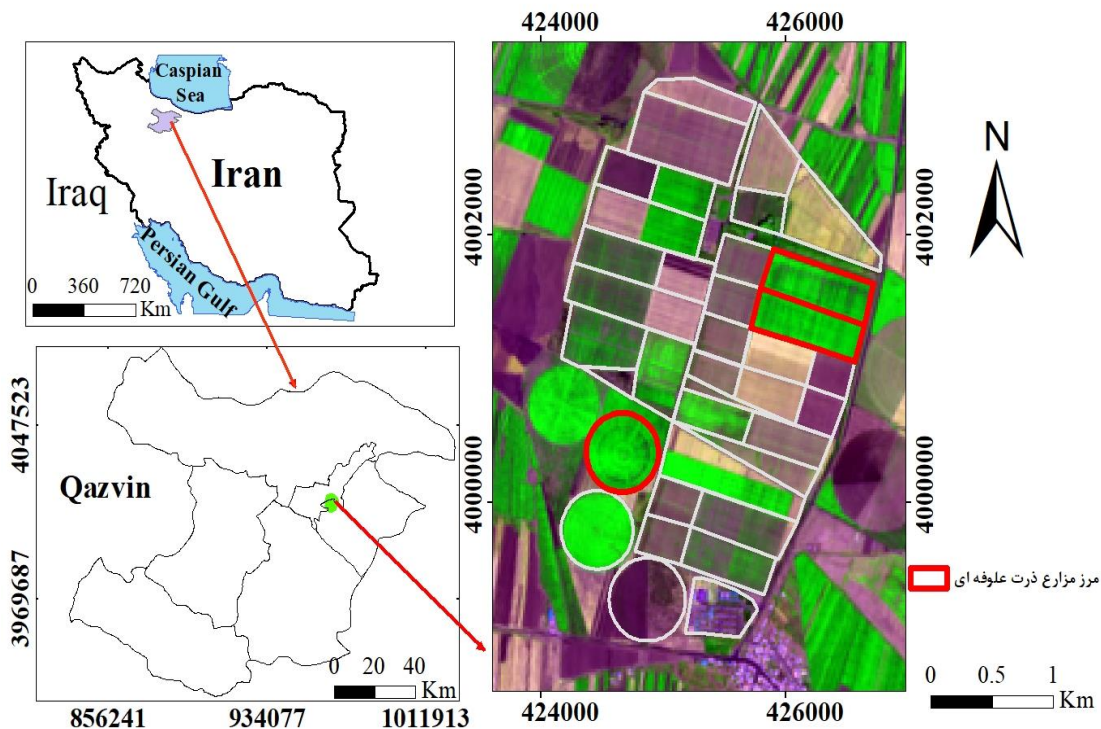
در نهایت مقدار بایومس هر مزرعه برآورد شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

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

ارزش غذایی دارای اهمیت خاصی است و یکی از بهترین غذاهای دامی است. 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 است. 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-2 و تحلیل روابط رگرسیون خطی و غیرخطی بین داده‌های نمونه‌برداری و شاخص‌های پوشش گیاهی، معادله مناسب جهت استخراج بایومس محصول ذرت علوفه‌ای انتخاب و سپس بر روی هر یک از تصاویر اعمال شده و



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

تصاویر ماهواره‌ای موجود، نقاط نمونه جدید به نحوی انتخاب شد که بتوانند تمام تغییرات قابل مشاهده در سطح مزارع را پوشش دهند و همچنین دامنه مقادیر مربوط به هر پارامتر به طور کامل و قابل قبول برداشت شود. تاریخ‌های نمونه برداری به ترتیب شامل ۱۱ تیر، ۲۷ تیر، ۱۲ مرداد، ۲ شهریور و ۳ مهر است که همزمان با گذر تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 تعیین شده است (شکل ۳). نمونه‌برداری از هر نقطه توسط پلات‌های ۱×۱ متر انجام شد. روش نمونه برداری، به صورت سیستماتیک تصادفی و با دقت GPS (۳ تا ۵ متر) است. پارامترهایی مانند موقعیت دقیق نقاط، ارتفاع محصول و ساعت نمونه‌برداری ثبت شد. 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 به طور 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.

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 گل نر و ماده، تشکیل دانه‌ها و مرحله نهایی بلوغ و رسیدگی دانه است (Vina, Gitelson et al. 2004). در شکل ۲، مراحل فنولوژیک رشد ذرت علوفه‌ای نشان داده شده است.

۲-۲-۲- داده‌های مورد استفاده

۲-۲-۲-۱- داده‌های زمینی بایومس محصول

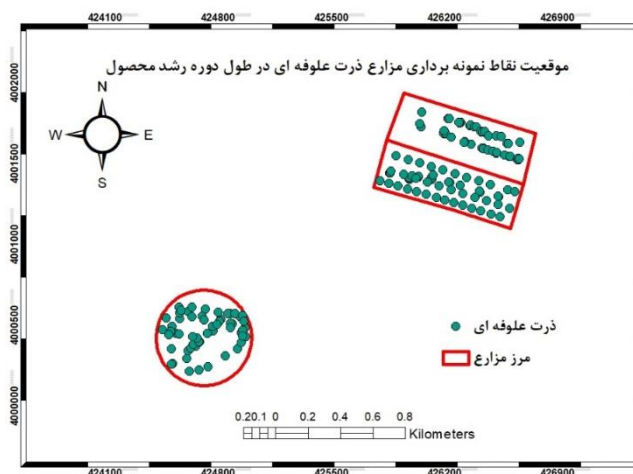
پنج نوبت نمونه‌برداری میدانی در طول دوره رشد محصول ذرت علوفه‌ای سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ انجام شد. در تمام نوبت‌های نمونه‌برداری با در اختیار داشتن اطلاعات اولیه و کلی، از منطقه و با کمک گرفتن از



ظهور گیاهچه‌ها	ساقه رفتن	پیدایش گل نر و ماده	تشکیل دانه‌ها	بلوغ و رسیدگی دانه
اوایل تیر	اواخر تیر	اوایل مرداد	اوایل شهریور	اوایل مهر

شکل ۲. مراحل رشد ذرت علوفه‌ای

ارزیابی قابلیت تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 در تخمین میزان بایومس...



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-2 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 شد. سپس اطلاعات جمع‌آوری شده مانند زمان کاشت، اوج سبزی‌نگی و برداشت محصولات مختلف در پایگاه داده ذخیره شده و تجزیه و تحلیل‌های لازم به منظور انتخاب و اخذ تصاویر Sentinel-2 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 است. تصاویر L1C ماهواره Sentinel-2 از نظر هندسی تصحیح شده هستند، اما با توجه به اینکه 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 نقشه‌برداری 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 Sen2Cor نرم افزار Snap^۱ جهت تصحیحات اتمسفری تصاویر Sentinel-2 استفاده شد.

1 The Sentinel Application Platform

فرزانه حدادی و همکاران

جدول ۲. مشخصات سنجنده ماهواره Sentinel-2

باند	توان تفکیک مکانی (متر)	طول موج باند (میکرومتر)
1 - Coastal aerosol	۶۰	۰/۴۴۳
2 - Blue	۱۰	۰/۴۹۰
3 - Green	۱۰	۰/۵۶۰
4 - Red	۱۰	۰/۶۶۵
5 - Vegetation Red Edge	۲۰	۰/۷۰۵
6 - Vegetation Red Edge	۲۰	۰/۷۴۰
7 - Vegetation Red Edge	۲۰	۰/۷۸۳
8 - NIR	۱۰	۰/۸۴۲
8A - Narrow NIR	۲۰	۰/۸۶۵
9 - Water Vapour	۶۰	۰/۹۴۵
10 - SWIR - Cirrus	۶۰	۱/۳۷۵
11 - SWIR	۲۰	۱/۶۱۰
12 - 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 (APAR) شناسایی می‌شوند. این شاخص‌ها بر اساس ویژگی‌های مختلفی مانند تعداد باندهای طیفی و روش محاسبات (نسبتی، نرمال شده و اختلاف) به گروه‌های مختلف طبقه‌بندی می‌شوند. جهت شناسایی پوشش‌های گیاهی در تصاویر ماهواره‌ای و از بین بردن عوارضی مانند اثرات توپوگرافی و آلودگی، از نسبت باندهایی که در محدوده مادون قرمز، نزدیک ۱۳۰۰-۷۰۰ نانومتر قرار گرفته‌اند به باندهایی که در محدوده قرمز ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر و یا جذب آب ۲۵۰۰-۱۳۰۰ 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. 1995). 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)	$NDREI = \frac{R_{NIR} - R_{band6}}{R_{NIR} + R_{band6}}$	(Gitelson and Merzlyak 1994)
Green Normal Difference Vegetation Index (GNDVI)	$GNDVI = \frac{(R_{Green} - R_{Red})}{(R_{Green} + R_{Red})}$	(Gitelson, Kaufman et al. 1996)
Normal Difference vegetation Index (NDVI)	$NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red})}$	(Rouse Jr 1972)
Chlorophyll Index Red Edge (CI red edge)	$CI_{rededge} = \left(\frac{R_{NIR}}{R_{Red}}\right) - 1$	(Gitelson, Vina et al. 2003)
Enhanced vegetation index 2 (EVI2)	$EVI2 = 2.5 \times \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{(R_{NIR} + 2.4 \times R_{Red} + 1)}$	(Jiang, Huete et al. 2008)
Chlorophyll Index Green (CI green)	$CI_{Green} = \left(\frac{R_{NIR}}{R_{Green}}\right) - 1$	(Gitelson, Vina et al. 2003)
Red-edge ratio NDVI (REPNDVI)	$REPNDVI = NDVI \times \sqrt{\frac{R_{band6}}{R_{band5}}}$	(Chang and Shoshany 2016)
Soil Adjust Vegetation Index (SAVI)	$SAVI = \frac{(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red} + 0.5)} (1 + 0.5)$	(Huete and Tucker 1991)
Sentinel-2 Red-Edge Position (S2REP)	$S2REP = 705 + 35 * \frac{(R_{NIR} + R_{Red} - R_{band5})}{R_{band6} - R_{band5}}$	(Guyot and Baret 1988)
Red-Edge Position (REP)	$REP = 700 + 40 * \frac{(R_{NIR} + R_{Red} - R_{band5})}{R_{band6} - R_{band5}}$	(Guyot and Baret 1988)

R_{band6} = مقدار بازتابندگی باند ۶

R_{band5} = 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

1 Absorbed photosynthetically active radiation

۲-۴- مدل‌های رگرسیون تک متغیره

در این مطالعه، به منظور 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:

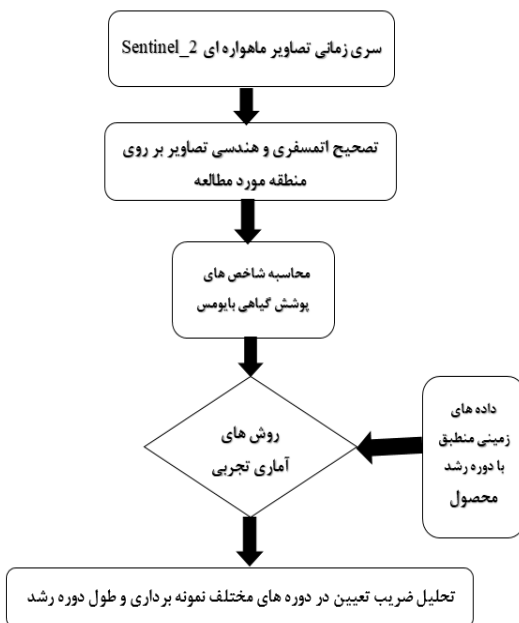
$$Y = \beta_0 + \beta_1 x \quad \text{رابطه (۱)}$$

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

در این روابط، Y متغیر وابسته مورد مطالعه (بایومس محصول ذرت علوفه‌ای)، x متغیر مستقل (شاخص گیاهی)، β_1 و β_2 ضرایب متغیر مستقل و β_0 عدد ثابت رابطه ۱ است. پس از محاسبه شاخص‌های موردنظر بر روی تصاویر Sentinel-2 در نوبت‌های مختلف نمونه برداری، ضریب تعیین بین داده‌های زمینی و مقادیر شاخص‌های گیاهی در دو حالت بصورت جداگانه بررسی گردد. 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 شد. 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 SPSS¹ انجام شده است. جهت بررسی روابط رگرسیون خطی و غیرخطی از شاخص‌های آماری مانند ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) استفاده شد. 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 بر اساس مقدار ضریب تعیین R^2 انتخاب شده ضرایب مدل ثبت شدند. سپس با قرار دادن ضرایب رگرسیونی به دست آمده، مدل‌های رگرسیون خطی ساده و نمایی شکل گرفته و در نهایت میزان بایومس ذرت علوفه‌ای برآورد شد. مراحل انجام تحقیق در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴. نمودار جریانی مراحل انجام کار

2 Root Mean Square Error

1 Statistical Package for the Social Sciences

۳- بحث و نتیجه‌گیری

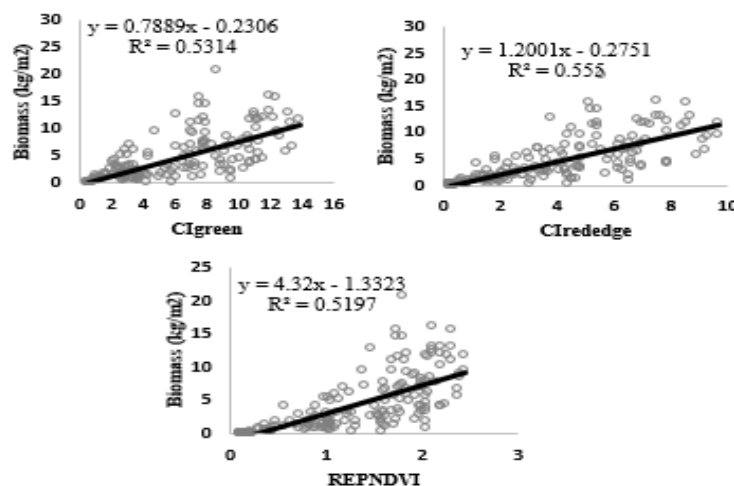
۳-۱- تخمین میزان بایومس نهایی در طول دوره

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 نمونه‌برداری 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 شد. 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 شد که مقادیر آن در جدول ۴ آورده شده است. رابطه شاخص‌های پوشش گیاهی شامل:

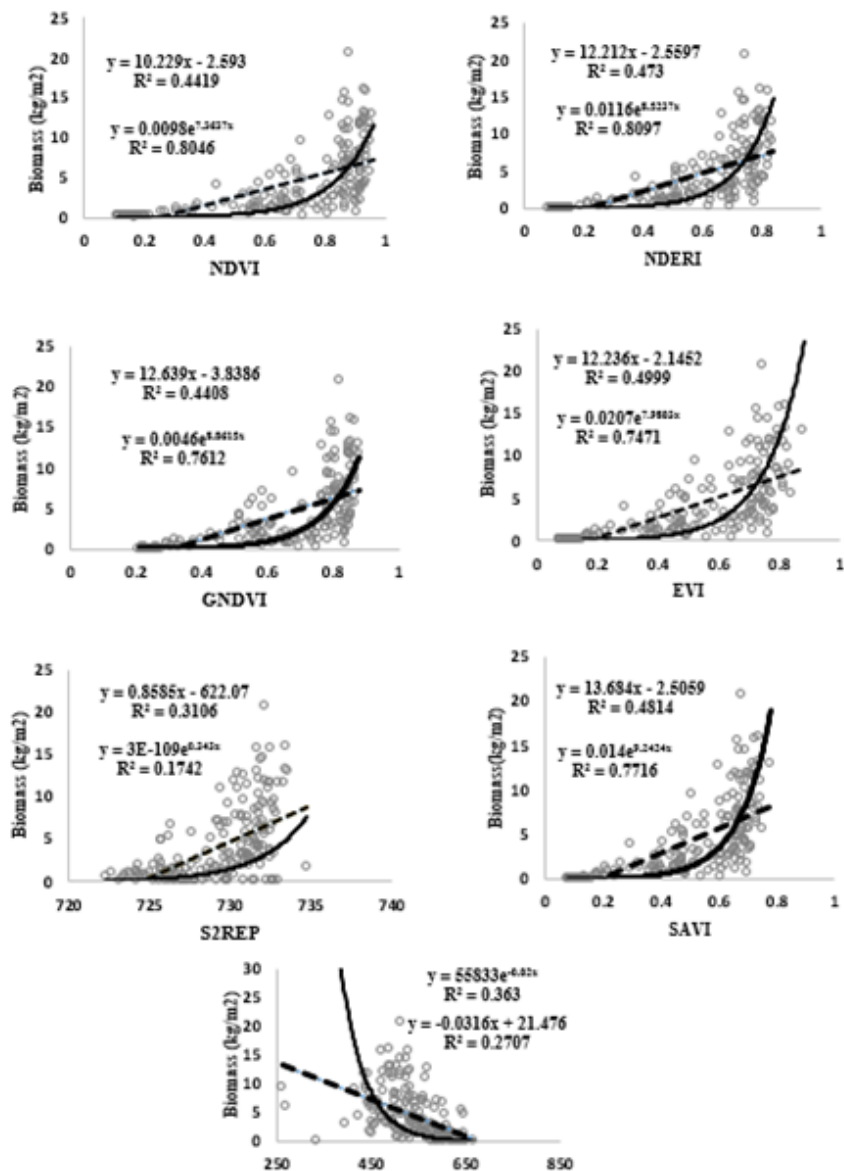
NDVI، GNDVI، SAVI، NDREI، S2REP،

REPNDVI، CI_{rededge}، CI_{green} و REP 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 NDVI، GNDVI، SAVI، NDREI، S2REP و REP و توابع خطی شامل شاخص‌های REPNDVI، CI_{rededge} و CI_{green} هستند. 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 S2REP به ترتیب با مقادیر ضریب تعیین ۰/۳۶ و ۰/۱۷ و ریشه میانگین مربعات خطا ۴/۲۱۰ و ۳/۵۷۸ 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 که 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 خطی)

ارزیابی قابلیت تصاویر ماهواره‌های Sentinel-2 در تخمین میزان بایومس...



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

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 به منظور ارزیابی شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده شده است. شاخص‌های لبه قرمز مانند CI_{green} ، $CI_{rededge}$ 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 $(CI_{green}: R^2 = 0.53, RMSE = 2.94 \text{ kg/m}^2)$ $(CI_{rededge}: R^2 = 0.55, RMSE = 2.87 \text{ kg/m}^2)$ $(REPNDVI: R^2 = 0.51, RMSE = 2.98 \text{ kg/m}^2)$.

سنجش از دور و GIS ایران
سال دهم = شماره چهارم = زمستان ۱۳۹۷

فرزانه حدادی و همکاران

گروه توابع غیرخطی تا مقدار ثابتی توانسته‌اند مقدار تغییرات بایومس نهایی را نشان دهند (شکل ۶). در نهایت شاخص $CI_{rededge}$ 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 شد و همچنین این شاخص مشکل اشباع‌شدگی شاخص‌های دیگر را تا حد زیادی برطرف کرده است.

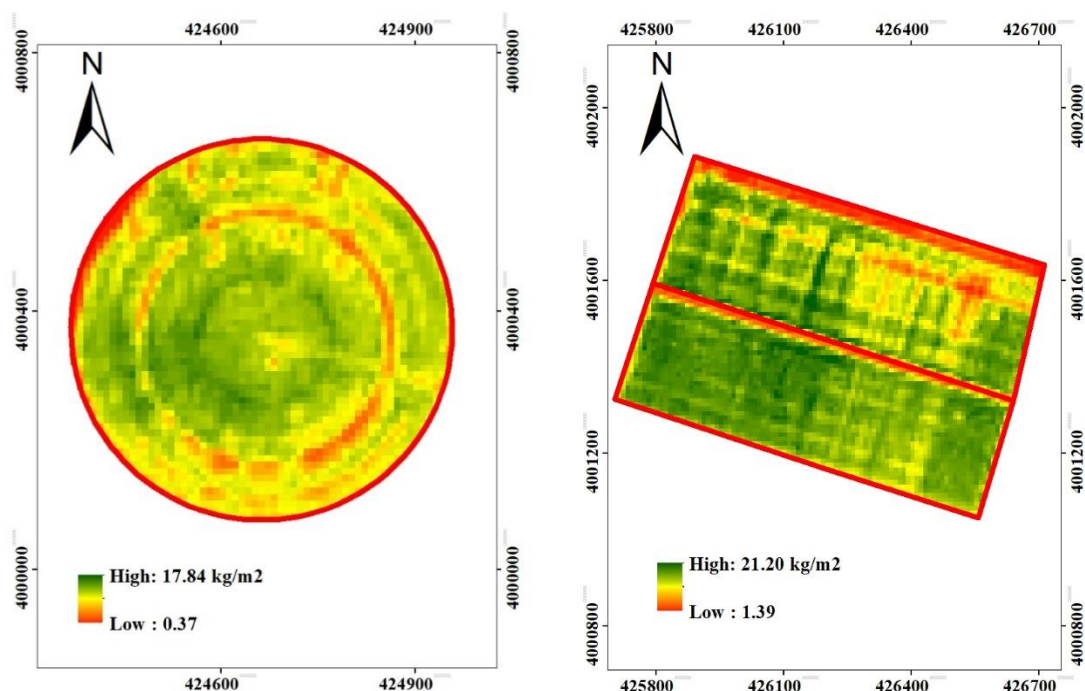
در جدول ۴، نتایج رگرسیون خطی و غیرخطی تمام شاخص‌های پوشش گیاهی با مقادیر ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا آورده شده است. همه شاخص‌های پوشش گیاهی در سطح ۰/۰۵ معنادار هستند و با مقدار بایومس نهایی ذرت علوفه‌ای در کل دوره رشد محصول رابطه معناداری را نشان می‌دهند. شاخص‌های گروه توابع خطی هم‌زمان با زیاد شدن مقدار شاخص افزایش می‌یابند (شکل ۵)، در حالی که

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

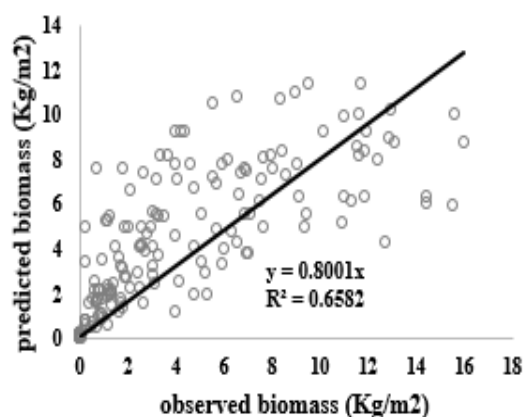
شاخص‌های پوشش گیاهی	معادلات رگرسیون	مدل رگرسیون	مقدار ضریب تعیین (R^2)	ریشه میانگین مربعات خطا (کیلوگرم در مترمربع)
NDVI	$y = 0.0098 \exp^{7.3637NDVI}$	نمایی	۰/۸۰	۳/۰۷۹
GNDVI	$y = 0.0046 \exp^{8.8615GNDVI}$	نمایی	۰/۷۶	۳/۱۰۵
NDREI	$y = 0.0116 \exp^{8.5237NDREI}$	نمایی	۰/۸۰	۳/۱۶۶
S2REP	$y = 3e - 10 \exp^{0.343S2REP}$	نمایی	۰/۱۷	۳/۵۷۸
REPNDVI	$y = 4.32REPNDVI - 1.3323$	خطی	۰/۵۱	۲/۹۸۶
$CI_{rededge}$	$y = 1.2001CI_{rededge} - 0.2751$	خطی	۰/۵۵	۲/۸۷۴
CI_{green}	$y = 0.7889CI_{green} - 0.2306$	خطی	۰/۵۳	۲/۹۴۹
REP	$y = 55833 \exp^{-0.02x}$	نمایی	۰/۳۶	۴/۲۱۰
EVI2	$y = 0.0207 \exp^{7.9003x}$	نمایی	۰/۷۴	۳/۰۴۷
SAVI	$y = 0.014 \exp^{9.2424x}$	نمایی	۰/۷۷	۳/۲۸۰

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 زده‌شده 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.

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 شد. چون در این زمان محصول ذرت علوفه‌ای در مرحله آخر دوره رشد قرار دارد و به حداکثر مقدار بایومس و ارتفاع رسیده است. در شکل ۷، نقشه



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

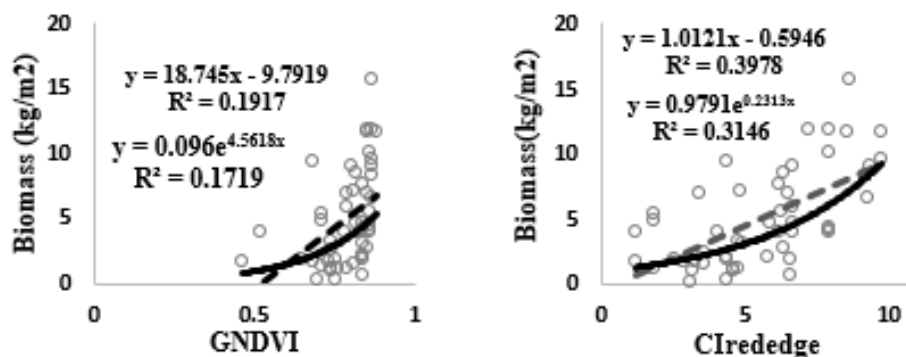
۳-۲- تخمین بایومس در روزهای مختلف دوره رشد محصول ذرت علوفه‌ای

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 مرداد ماه، اوایل شهریور ماه و اوایل مهر ماه هستند. 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

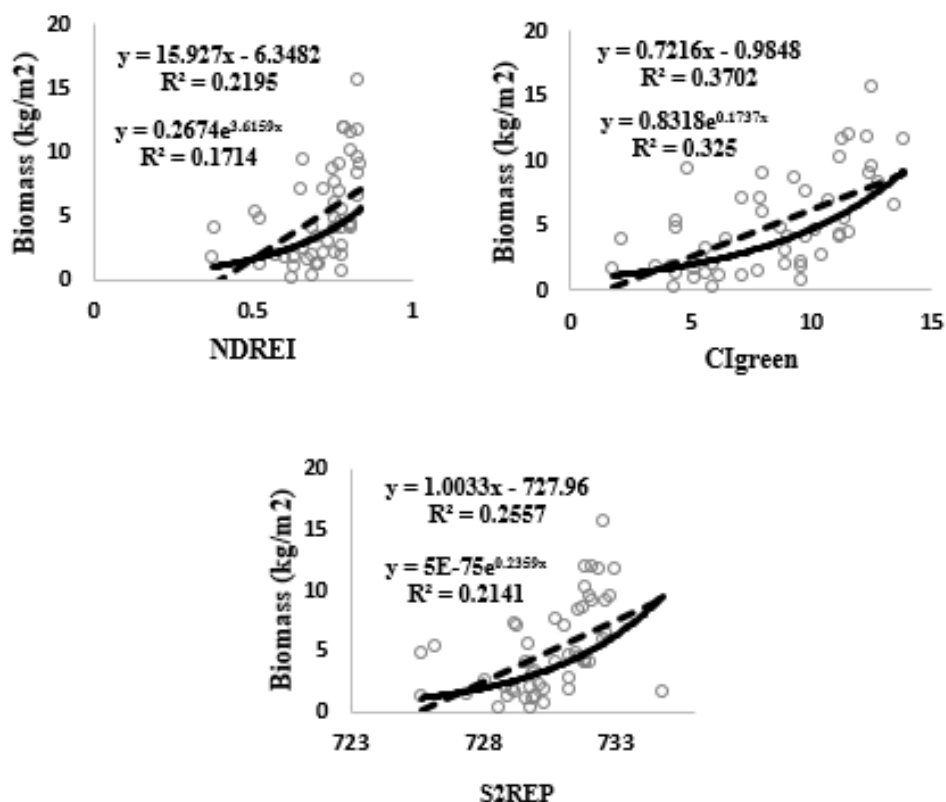
تخمین مقدار بایومس عملکرد بهتری دارند. همچنین شاخص $CI_{rededge}$ نسبت به شاخص CI_{green} در مرحله تشکیل دانه، عملکرد بهتری نشان داده است. شاخص $GNDVI$ در این مرحله ضعیف ترین عملکرد را در مقایسه با دیگر شاخص‌ها داشته است و اثر اشباع شدیدی را در مقدار بیشتر از ۰/۹ نشان می‌دهد. در تاریخ نمونه برداری ۳ 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 ۹). جدول ۵، مقادیر ضریب تعیین شاخص‌های مختلف در روزهای نمونه برداری، ۲ شهریور و ۳ مهر را برای مدل‌های رگرسیون خطی نشان می‌دهد. همان طور 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_{green} و $CI_{rededge}$ در نوبت نمونه برداری ۲ شهریور عملکرد بهتری داشته‌اند.

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 CI_{green} ، $CI_{rededge}$ ، $S2REP$ ، $NDREI$ و شاخص $GNDVI$ استفاده شد. نمودارهای پراکنش مقادیر شاخص‌های مختلف با مقدار بایومس زمینی روزهای ۲ شهریور و ۳ مهر در شکل ۹ آورده شده است. همان طور 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 CI_{green} و $CI_{rededge}$ با محدوده تغییرات ضریب تعیین ۰/۳۹-۰/۳۱ اثر اشباع را در مدل‌های رگرسیون خطی و نمایی کمتر نشان می‌دهند و در

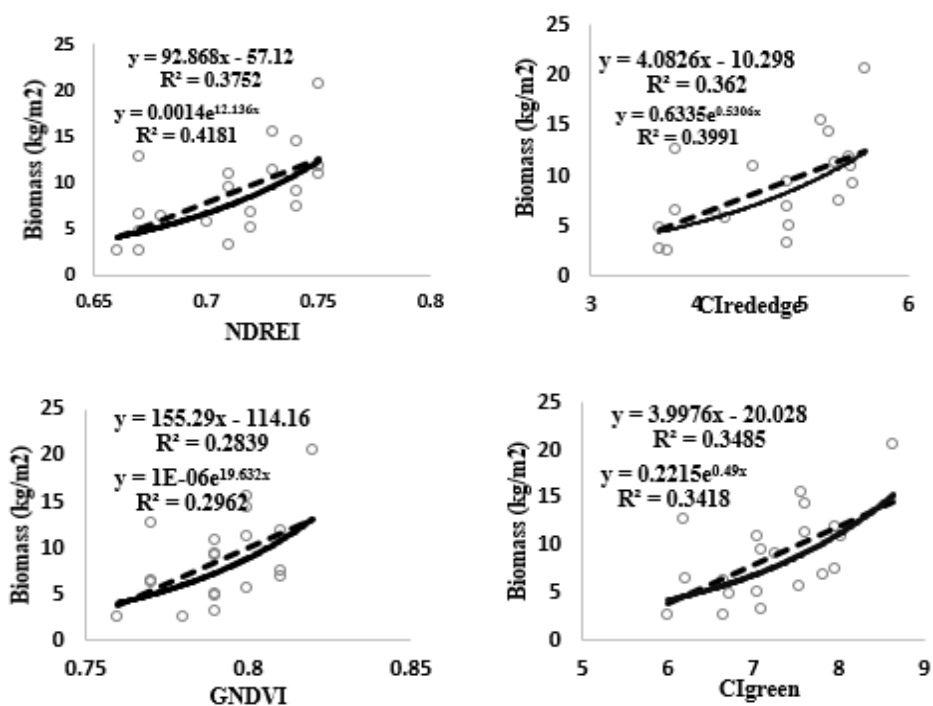


شکل ۹. نمودار پراکنش بایومس محصول ذرت علوفه‌ای مزرعه‌های مستطیل شکل با شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف در تاریخ نمونه برداری ۲ شهریور

ارزیابی قابلیت تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 در تخمین میزان بیومس...

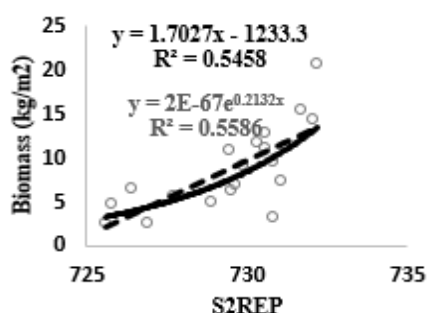


شکل ۹. نمودار پراکنش بیومس محصول ذرت علوفه‌ای مزرعه‌های مستطیل شکل با شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف در تاریخ نمونه برداری ۲ شهریور



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

فرزانه حدادی و همکاران



ادامه شکل ۱۰. نمودار پراکنش بایومس محصول ذرت علوفه‌ای با شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف در تاریخ نمونه‌برداری ۳ مهر

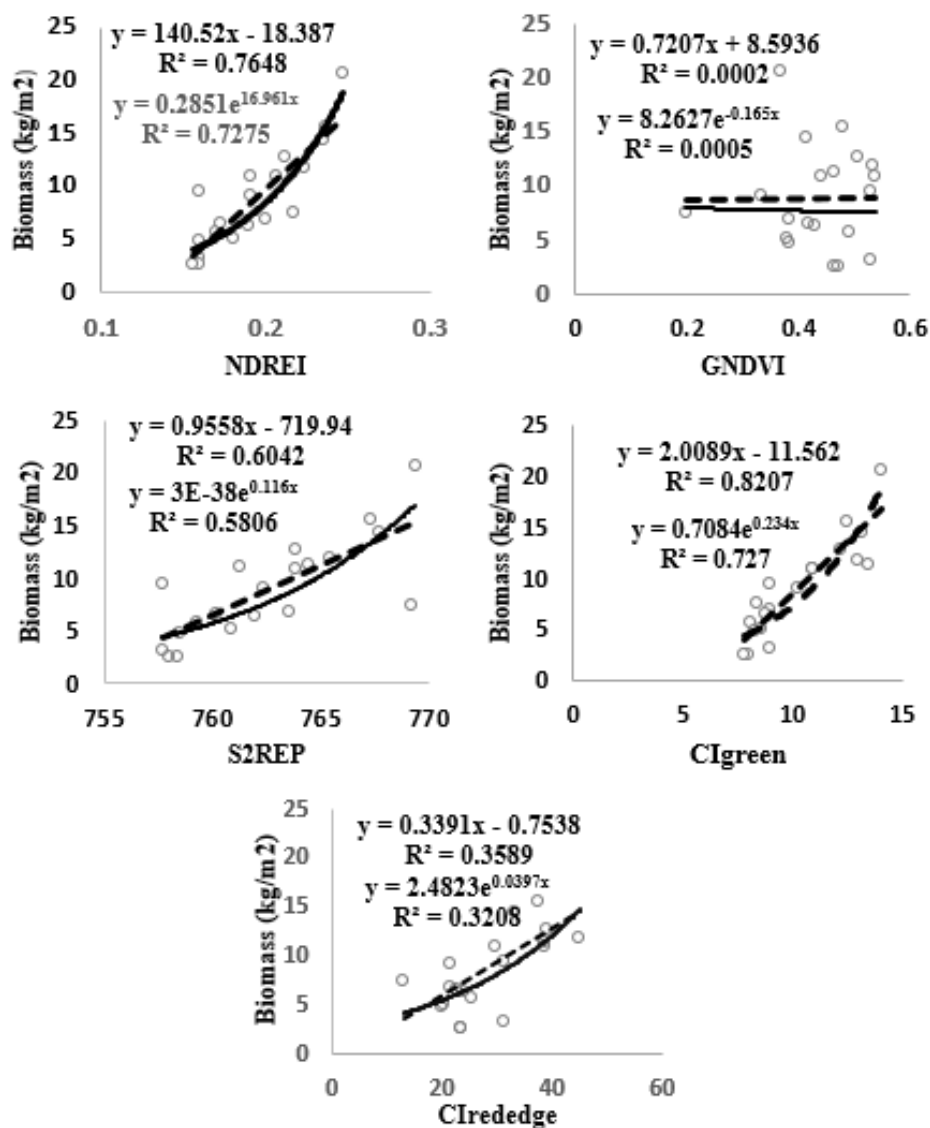
جدول ۵. خلاصه مقادیر ضریب تعیین مدل خطی، ریشه میانگین مربعات خطا در تاریخ‌های نمونه‌برداری ۲ شهریور و ۳ مهر محصول ذرت علوفه‌ای

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
CIrededge	۲ شهریور	۰/۳۹	۰/۴۰۱
	۳ مهر	۰/۳۶	۰/۸۲۰
CIgreen	۲ شهریور	۰/۳۷	۰/۴۱۰
	۳ مهر	۰/۳۴	۰/۸۲۰
S2REP	۲ شهریور	۰/۲۵	۰/۴۴۰
	۳ مهر	۰/۵۴	۰/۶۹

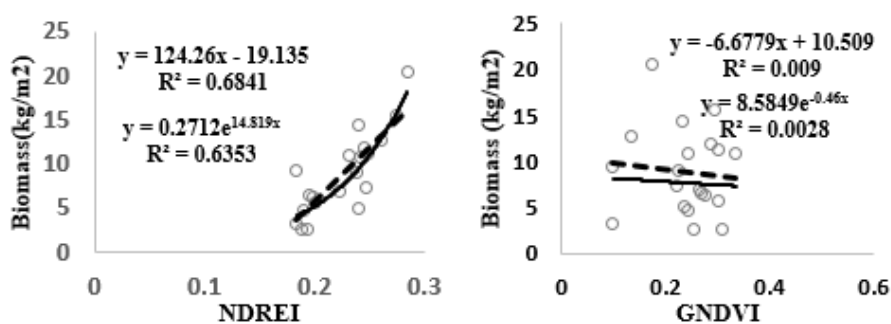
آورده شده است. همان طور که در شکل ۱۱، مشاهده می‌شود، شاخص پوشش گیاهی لبه قرمز NDREI و CIgreen به ترتیب با مقدار ضریب تعیین ۰/۷۶ و ۰/۸۲ توانسته‌اند بایومس ذرت علوفه‌ای را به خوبی برآورد کنند. اما شاخص GNDVI مقدار ضریب تعیین بسیار کمی را نشان داده است. همچنین در تصویر ۲۷ شهریور ضریب تعیین بین شاخص‌های NDREI، S2REP و CIgreen با مقدار بایومس زمینی محصول ذرت علوفه‌ای به ترتیب ۰/۶۷، ۰/۶۸ 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.

همانطور 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 شد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، نمودارهای پراکنش مقادیر شاخص‌های NDREI، GNDVI، S2REP، CIgreen و CIrededge با مقدار بایومس زمینی تاریخ ۳ مهر و تصاویر Sentinel-2 زمان‌های ۱۰ و ۲۷ شهریور

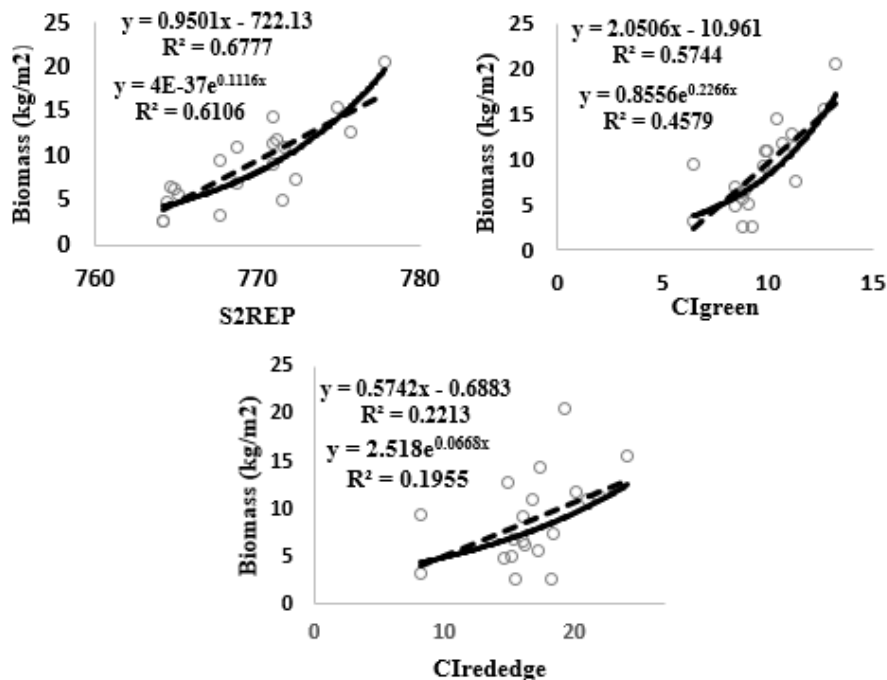
ارزیابی قابلیت تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 در تخمین میزان بیومس...



شکل ۱۱. نمودار پراکنش بیومس 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 بیومس محصول ذرت علوفه‌ای مزرعه‌های مستطیل شکل با شاخص‌های گیاهی مختلف در تاریخ نمونه برداری ۳ مهر و تصویر Sentinel-2 زمان ۲۷ شهریور



ادامه شکل ۱۲. نمودار پراکنش بایومس محصول ذرت علوفه‌ای مزرعه‌های مستطیل شکل با شاخص‌های گیاهی مختلف در تاریخ نمونه برداری ۳ مهر و تصویر Sentinel-2 زمان ۲۷ شهریور

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 را برآورد کردند. نتایج آنها نشان داد که شاخص TVI با ضریب تعیین ۰/۸۶ نسبت به شاخص‌های NDVI و خاک نتایج بهتری ارائه می‌دهد. به طوریکه 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

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، 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، به طوریکه 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 طیف‌سنج زمینی استفاده شده است. در تحقیق دیگری، Wang و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از شاخص‌های

پایانی رشد گیاه قرار دارند. شاخص‌هایی مانند REP، S2REP، NDREI، SAVI، GNDVI، NDVI مقادیر بایومس کمتر از ۵ کیلوگرم در مترمربع زودتر به حد اشباع می‌رسند و در کل مراحل رشد گیاه به صورت نمایی با بایومس ارتباط دارند. بر اساس تجزیه و تحلیل انجام شده در شرکت کشت و صنعت مگسال، سری زمانی تصاویر Sentinel-2 قادر به برآورد بایومس محصول ذرت علوفه‌ای در سطح مزرعه با دقت متوسط است. پیشنهاد می‌شود جهت بهبود نتایج از دیگر شاخص‌های لبه قرمز و همچنین سایر داده‌های سنجش از دوری مانند داده‌های رادار Sentinel-1 همراه با تصاویر Sentinel-2 استفاده شود.

۵- منابع

- عاشورلو، د.، متکان، ع.، میرباقری، ب. و شهری، م.، استخراج توده زنده گندم با استفاده از داده‌های ماهواره ای و رگرسیون وزنی مکانی. آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۵-۱۳۹۴.
- Bao, Y., Gao, W. & Gao, Z., 2009, **Estimation of winter wheat biomass based on remote sensing data at various spatial and spectral resolutions**, *Frontiers of earth science in China*, 3(1), p.118.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. & Huete, A.R., 1995, **A review of vegetation indices**, *Remote sensing reviews*, 13(1-2), pp.95-120.
- Chang, J. & Shoshany, M., 2016, **Red-edge ratio Normalized Vegetation Index for remote estimation of green biomass**. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2016 IEEE International, IEEE.

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.

۴- نتیجه‌گیری

ماهواره Sentinel-2 با هدف جایگزینی و بهبود مکانی و طیفی نسل‌های قدیمی سنجنده‌های Landsat و SPOT توسعه یافته است. تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با داشتن محدوده طیفی لبه قرمز در مطالعات کشاورزی و سنجش از دور نقش به‌سزایی دارد. در این تحقیق، به منظور ارزیابی قابلیت محدوده لبه قرمز سری زمانی تصاویر Sentinel-2، با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف برآورد بایومس ذرت علوفه‌ای در مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی باهم مقایسه شد. مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی در روزهای مختلف نمونه‌برداری 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_{green} ، $CI_{rededge}$ 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 سراسر 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

- Hatfield, J.L. and J.H. Prueger, 2010, **Value of using different vegetative indices to quantify agricultural crop characteristics at different growth stages under varying management practices**, *Remote Sensing* 2(2): 562-578.
- Huete, A. & Tucker, C., 1991, **Investigation of soil influences in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery**, *International journal of remote sensing* 12(6): 1223-1242.
- Im, J. & Jensen, J.R., 2005, **A change detection model based on neighborhood correlation image analysis and decision tree classification**, *Remote Sensing of Environment* 99(3): 326-340.
- Jiang, Z., Huete, A.R., Didan, K. & Miura, T., 2008, **Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band**, *Remote sensing of Environment*, 112(10), pp.3833-3845.
- Liu, J., Pattey, E., Miller, J.R., McNairn, H., Smith, A. & Hu, B., 2010, **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*, 114(6), pp.1167-1177.
- Mutanga, O. and A. K. Skidmore, 2004, **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* 5(2): 87-96.
- Foody, G.M., Boyd, D.S. & Cutler, M.E., 2003, **Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions**, *Remote sensing of environment*, 85(4), pp.463-474.
- Gitelson, A. and M. N. Merzlyak, 1994, **Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves**, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 22(3): 247-252.
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J. and Merzlyak, M.N., 1996, **Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS**, *Remote sensing of Environment*, 58(3), pp.289-298.
- Gitelson, A.A., Viña, A., Arkebauer, T.J., Rundquist, D.C., Keydan, G. & Leavitt, B., 2003, **Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies**, *Geophysical Research Letters*, 30(5).
- Guyot, G. & Baret, F., 1988, **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., 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(3), pp.337-352.

- Reid, J.S., Koppmann, R., Eck, T.F. & Eleuterio, D.P., 2005, **A review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles**, Atmospheric Chemistry and Physics, 5(3), pp.799-825.
- Rouse Jr, J.W., 1972, **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**.
- Roy, P. & Ravan, S.A., 1996, **Biomass estimation using satellite remote sensing data-an investigation on possible approaches for natural forest**, Journal of biosciences 21(4): 535-561.
- Steininger, M., 2000, **Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: data from Brazil and Bolivia**, International journal of remote sensing 21(6-7): 1139-1157.
- Stoskopf, N. C., 1981, **Understanding crop production**, Reston Publishing Company, Inc.
- Tilly, N., Hoffmeister, D., Schiedung, H., Hütt, C., Brands, J. and Bareth, G., 2014, **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. & Schepers, J., 2004, **Monitoring maize (Zea mays L.) phenology with remote sensing**, Agronomy Journal, 96(4), pp.1139-1147.
- Nelson, R.F., Kimes, D.S., Salas, W.A. & Routhier, M., 2000, **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, 50(5), pp.419-431.
- Nguy-Robertson, A., Gitelson, A., Peng, Y., Viña, A., Arkebauer, T. & Rundquist, D., 2012, **Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity**, Agronomy Journal, 104(5), pp.1336-1347.
- Nicolas, T., Philippe, V. & HUANG, W.J., 2010, **New index for crop canopy fresh biomass estimation**, Spectroscopy and Spectral Analysis, 30(2), pp.512-517.
- Popescu, S.C., Wynne, R.H. & Scrivani, J.A., 2004, **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, 50(4), pp.551-565.
- Prabhakara, K., Hively, W.D. & McCarty, G.W., 2015, **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, 39, pp.88-102.

Weiser, R., et al., 1986, **Assessing grassland biophysical characteristics from spectral measurements**, Remote Sensing of Environment 20(2): 141-152.

Zheng, D., Rademacher, J., Chen, J., Crow, T., Bresee, M., Le Moine, J. & Ryu, S.R., 2004, **Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA**, Remote sensing of environment, 93(3), pp.402-411.

ارزیابی قابلیت تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 در تخمین میزان بایومس...



سنجش از دور
,
GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال دهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۷
Vol.10, No.4, Winter 2019 Iranian Remote Sensing & GIS

99-120

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

Haddadi F.¹, aghighi H.^{2*}, Moradi A.¹

1. Remote sensing expert, Iranian Space Research Center
2. Assistant Professor in Remote Sensing, Remote Sensing and GIS Research Center

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 182 silage maize biomass samples. Then, ten spectral indices from the time series of Sentinel-2 images of 2017 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 $R^2 = 0.55$ and the lowest root mean square error ($RMSE = 2.874 \text{ kg/m}^2$) 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

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