



## ارزیابی شاخص‌های پوشش گیاهی مبتنی بر سنجش از دور در مراحل مختلف رشد برای برآورد زیست‌توده ذرت

هادی وروانی<sup>۱</sup>، \* بهمن فرهادی بانسوله<sup>۲</sup> و محمدعلی شریفی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه رازی، آستادپار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، آدانشیار دانشگاه تونته، همد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۹/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۵/۲۹

### چکیده

**سابقه و هدف:** روش‌های سنتی تخمین پارامترهای بیوفیزیکی گیاهان (از جمله زیست‌توده) در قالب نمونه‌برداری‌های محدود یا توزین نهایی محصول برداشت شده علاوه بر وقت‌گیر و هزینه بر است. در سالیان اخیر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و فناوری سنجش از دور برای تخمین این پارامترها مورد توجه قرار گرفته است. تاکنون شاخص‌های گیاهی متعددی برای ارزیابی و برآورد پارامترهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی گیاهان توسعه داده شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به دلیل سهولت استفاده از این شاخص‌ها، این روش یکی از متداول‌ترین تکنیک‌های سنجش از دور برای برآورد چنین پارامترهایی می‌باشند. با توجه به این‌که تاکنون چنین مطالعاتی در استان کرمانشاه انجام نگرفته است مطالعه کنونی به منظور برآورد زیست‌توده ذرت علوفه‌ای در یکی از دشت‌های استان کرمانشاه (ماهیدشت) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ انجام شده است.

**مواد و روش‌ها:** وزن خشک گیاه (زیست‌توده) در زمان گذر ماهواره لندست ۸ از ۱۵ مزرعه در سطح منطقه مطالعاتی (دشت ماهیدشت کرمانشاه) اندازه‌گیری شد. در طول دوره رشد ذرت ۸ تصویر ماهواره لندست (سنجنده OLI) وجود داشت که از سایت زمین‌شناسی آمریکا دانلود شد. در پژوهش حاضر ۱۷ شاخص پوشش گیاهی (NDVI، TNDVI، MNDVI، SAVI، OSAVI، NRVI، RVI، PD311، PD312، PD321، VI1، VI2، VI3، IPVI، DVI، MIRV1 و NIR\*) که در مطالعات قبلی همبستگی قابل قبولی با مقدار زیست‌توده داشتند مطالعه شدند. از ضریب همبستگی میان زیست‌توده اندازه‌گیری شده و مقدار متناظر شاخص‌های گیاهی جهت ارزیابی دقت عملکرد این روش‌ها استفاده شد. برای هر بازدید شاخص با همبستگی بالاتر به عنوان شاخص مطلوب برای آن مرحله از رشد گیاه تعیین و یک رابطه رگرسیونی بین مقدار زیست‌توده ذرت و شاخص مطلوب ارایه گردید. در نهایت مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌توده و برآورد شده بر اساس روابط رگرسیونی برازش یافته با استفاده از آماره جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) مورد مقایسه قرار گرفتند.

**یافته‌ها:** مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌توده در ابتدای دوره رشد کم بود و به تدریج تا بازدید هفتم (۴ شهریور) افزایش و سپس در بازدید آخر (۲۰ شهریور) کاهش یافت. میانگین زیست‌توده در مزارع ۱۵ گانه در بازدیدهای هفتم

\*مسئول مکاتبه: bfarhadi2001@yahoo.com

(۴ شهریور) و هشتم (۲۰ شهریور) به ترتیب با ۴۰۱۹۵ و ۳۶۷۴۱ کیلوگرم در هکتار اندازه‌گیری شد. نتایج بررسی شاخص‌ها بیانگر این بود که شاخص‌های PD311 برای بازدید اول، PD312 برای بازدید دوم و مراحل ابتدایی رشد، NIR\* برای بازدیدهای سوم، ششم، هفتم و هشتم، VI3 برای بازدید چهارم و NRVI برای بازدید پنجم بیشترین ضریب همبستگی را با مقادیر زیست‌توده اندازه‌گیری شده داشتند. ضریب همبستگی شاخص مطلوب در بازدیدهای ۸ گانه مراحل رشد برابر با ۰/۴۲، ۰/۵، ۰/۵۸، ۰/۷۱، ۰/۷۳، ۰/۶۶، ۰/۵۷ و ۰/۴۷ به دست آمدند. در مجموع شاخص NIR\* با میانگین ضریب همبستگی ۰/۵۱ مطلوب‌ترین شاخص برای کل دوره رشد تعیین شد. همچنین با توجه به آماره NRMSE می‌توان نتیجه گرفت که روابط برازش یافته قادر هستند که مقدار زیست‌توده ذرت را به‌جز در مرحله اول رشد با دقت متوسط تا خوب برآورد نمایند. میزان NRMSE در بازدیدهای چهارم، پنجم، ششم، هفتم و هشتم نشان‌دهنده تطابق خوب بین داده‌های مشاهداتی و برآورد شده می‌باشد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج تحقیق حاضر بیانگر این بود که زیست‌توده ذرت را می‌توان با استفاده از شاخص‌های گیاهی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای با دقت قابل قبولی تخمین زد. دقت این روش برای دوره‌های میانی رشد بهتر از دوره‌های ابتدایی رشد گیاهان می‌باشد. بهتر این است که به‌جای استفاده از یک شاخص گیاهی برای کل دوره رشد گیاه از شاخص مطلوب برای آن مرحله از رشد گیاه استفاده کرد.

**واژه‌های کلیدی:** تصاویر ماهواره‌ای، زیست‌توده، سنجش از دور، شاخص‌های گیاهی

### مقدمه

تخمین پارامترهای بیوفیزیکی گیاهان از جمله زیست‌توده به روش‌های سنتی در قالب نمونه‌برداری‌های محدود و توزین نهایی وزن محصول علاوه بر صرف وقت، نیروی انسانی و هزینه زیاد، بسیار مشکل و طاقت‌فرسا است. از این‌رو استفاده از تکنیک سنجش از دور به‌منظور ایجاد اطلاعات مناسب از مناطق وسیع و مشاهدات تکراری با صرف وقت و هزینه کمتر امری ضروری می‌باشد (۶، ۹، ۱۰، ۱۸، ۲۵). در طی سال‌های اخیر شاخص‌های گیاهی متعددی برای ارزیابی و برآورد متغیرهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی گیاهان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. عموماً شاخص‌ها برای ارزیابی یک یا چند متغیر خاص و بر مبنای ویژگی‌ها و رفتار طیفی پدیده‌ها توسعه داده می‌شوند. بسیاری از این شاخص‌ها بر مبنای بازتاب در محدوده طول موج‌های قرمز و مادون‌قرمز نزدیک

قرار داشته و ترکیب جبری از این دو باند هستند (۳، ۴، ۵، ۷، ۱۳، ۱۷). شاخص‌هایی که در این محدوده قرار دارند برای ارزیابی پارامترهایی چون شاخص سطح برگ<sup>۱</sup> (LAI)، زیست‌توده، درصد پوشش گیاهی و میزان تابش فعال فتوسنتزی جذب شده ایجاد شده‌اند (۲، ۵، ۱۱، ۱۴). محققان زیادی از داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی استفاده و ارزیابی کردند (۲۱). بانو و همکاران (۲۰۰۹) در کشور چین به برآورد تولید گندم زمستانه با استفاده از داده‌های سنجش از دور پرداختند (۴). آن‌ها گزارش کردند با برآورد ماده خشک گندم زمستانه در مراحل سبز شدن، پنجه‌زنی، ساقه‌دهی، گل‌دهی و پر شدن دانه می‌توان وضعیت رشد گیاه را بررسی نمود و برای این کار از پنج تصویر لندست TM<sup>۲</sup> استفاده نمودند. سپس بر اساس تصاویر

1- Leaf Area Index

2- Thematic Mapper

همکاران (۲۰۱۵) به مقایسه روش زمین آمار و استفاده از داده‌های سنجش از دور به منظور پیش‌بینی عملکرد گندم در برخی از مراحل رشد در استان گلستان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با توجه به دقت مناسب تکنیک‌های سنجش از دور نسبت به روش زمین آمار و علاوه بر آن آسان و کم هزینه بودن این روش می‌تواند تحول جدیدی در برآورد عملکرد در مقیاس منطقه‌ای به وجود آورد (۲۰). نظری و کاویانی (۲۰۱۶) به بررسی نتایج تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن حاصل از اجرای مدل‌های متریک و SEBAL با تصاویر ماهواره‌های لندست و Terra در دشت قزوین پرداختند. نتایج ارزیابی آن‌ها حاکی از آن بود که مدل متریک با  $R=0/96$ ،  $RMSE=0/28$ ،  $SE=0/29$  نسبت به مدل سبال در سطح اعتماد ۹۵ درصد به عنوان مدل برتر برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در منطقه دشت قزوین قابل توصیه است (۲۲). صباغ‌زاده و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ در حوزه مرک (استان خراسان جنوبی) و استفاده از ۱۱ شاخص گیاهی میزان زیست‌توده گیاه تاغ را برآورد کردند و به این نتیجه رسیدند که شاخص‌هایی که ضرایب خاک را در نظر می‌گیرند از دقت بالاتری برخوردارند (۲۷). رحیمی‌مقدم و عزیزی (۲۰۱۸) به بررسی تاریخ کاشت زود هنگام به عنوان راهکاری برای بهبود عملکرد و خصوصیات فیزیولوژیک و فنولوژیک ذرت در شرایط تغییر اقلیم در استان کرمانشاه پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان‌دهنده تأثیرات منفی تغییر اقلیم بر روی عملکرد ذرت در استان کرمانشاه بود (۲۴). تاکنون بیش از ۵۰ شاخص پوشش گیاهی توسعه یافته و در کاربردهای مختلف سنجش از دور از قبیل آشکارسازی تغییرات پوشش زمین برآورد زیست‌توده مورد استفاده قرار گرفته است (۳، ۴، ۸، ۹، ۱۲). با توجه به این‌که تاکنون چنین مطالعاتی در

MODIS و Landsat TM شاخص‌های طیفی مانند  $NDVI^1$ ،  $RDVI^2$ ،  $EVI^3$ ،  $MSAVI^4$  و  $NDWI^5$  را محاسبه کردند. ساواساوا (۲۰۰۳) برای تخمین عملکرد گیاه برنج در ایالت آندهاراپرداش از شاخص  $NDVI$  (سنجنده IRS) استفاده کرد. نتایج بیانگر همبستگی مثبت و معنی‌دار بین این شاخص و عملکرد محصول در سطح مزارع برنج بود (۲۹). ژانگ و همکاران (۲۰۱۲) مدلی جهت تخمین عملکرد محصول گندم با کمک داده‌های  $NDVI$  حاصل از تصاویر MODIS ارائه دادند. آن‌ها ارتباط بین شاخص  $NDVI$  و میزان تولید زیست‌توده را محاسبه کردند. در گام بعد میزان عملکرد با توجه به شاخص برداشت که با کمک تغییرات شاخص  $NDVI$  در طول دوره سبز شدن تا رسیدگی به دست آمده بود، تعیین گردید (۳۲). ماهانازی و همکاران (۲۰۱۵) به ارائه روش جدید  $SEBAL-A$  به عنوان الگوریتم محاسبه تبخیر-تعرق در مناطق با داده‌های محدود پرداختند. آن‌ها تبخیر و تعرق به دست آمده از لایس‌ترها را با تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط هر دو مدل  $SEBAL$  و  $SEBAL-A$  مورد مقایسه قرار دادند و نتیجه گرفتند که مدل  $SEBAL-A$  نسبت به  $SEBAL$  نتایج بهتری را ارائه می‌دهد (۱۹). باتود و همکاران (۲۰۱۷) اقدام به مدل‌سازی نیاز آبی و عمق آبیاری ذرت در جنوب غربی فرانسه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که تخمین‌های تبخیر و تعرق به دست آمده ( $R=0/88$  و ۲۰ درصد  $RMSE=$ ) برای عمق آبیاری در ۱۸ مزارع ذرت دقت قابل قبولی دارند (۷). محمدی احمد محمودی و

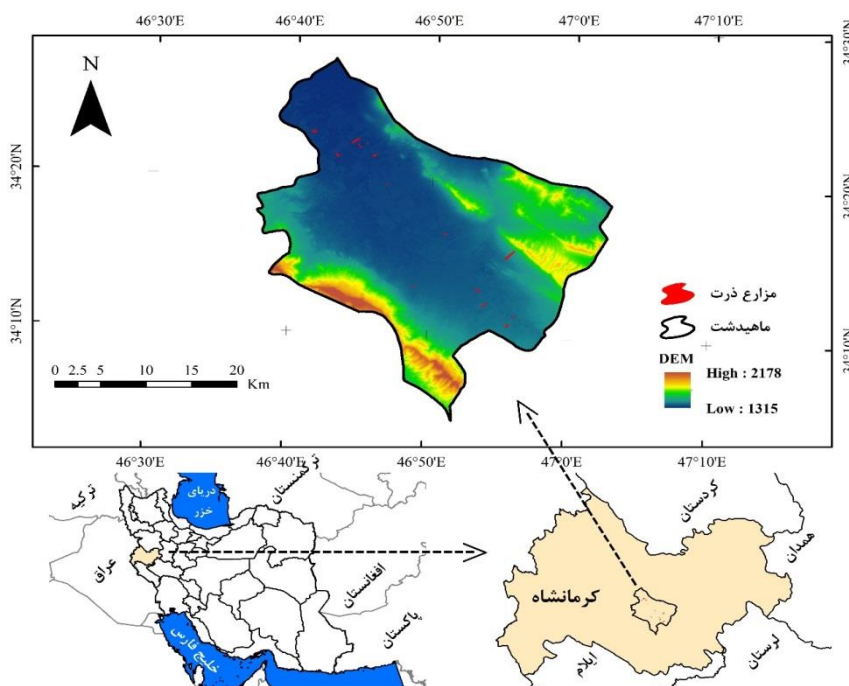
- 1- Normalized Difference Vegetation Index
- 2- Renormalized Difference Vegetation Index
- 3- Enhanced Vegetation Index
- 4- Modified Soil Adjustment Vegetation Index
- 5- Normalized Difference Water Index

منطقه مذکور که از لحاظ ژئومورفولوژیکی به عنوان دشت شناخته می‌شود از طرف شمال و شرق به حومه کرمانشاه و بخش مرکزی، از جنوب به بخش سرفیروزآباد و از غرب به شهرستان اسلام‌آباد محدود می‌گردد. از لحاظ جغرافیایی بین طول‌های " ۴۵°۰۰' ۳۴° تا " ۴۶° ۰۰' ۵۰" شرقی و عرض‌های " ۳۴° ۱۲' ۱۰ تا " ۳۴° ۲۰' ۰۰ شمالی با مساحتی حدود ۷۹۶ کیلومتر مربع واقع شده است. ارتفاع منطقه بین ۱۳۱۵ و ۲۱۷۸ متر از سطح دریا متغیر می‌باشد (شکل ۱). اقلیم منطقه مورد مطالعه بر اساس آمار ایستگاه ماهیدشت نیمه‌خشک سرد می‌باشد (برگرفته از سایت سازمان هواشناسی استان کرمانشاه).

استان کرمانشاه انجام نگرفته است مطالعه کنونی به منظور برآورد زیست‌توده ذرت در یکی از دشت‌های حاصلخیز استان کرمانشاه (ماهیدشت) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ انجام شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند در برآورد کلی میزان ذرت علوفه‌ای منطقه استفاده شود و با توجه به تغییرات مکانی عملکرد برآورد شده دلایل کاهش و یا افزایش محصول مشخص شود.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** بخش ماهیدشت واقع در استان کرمانشاه دارای دو دهستان (ماهیدشت و چقانرگس) و ۱۱۸ پارچه‌آبادی دارای سکنه می‌باشد که شهر ماهیدشت تنها نقطه شهری آن محسوب می‌شود.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه  
Figure 1. Location of the study area

مطالعاتی انجام گرفت. براساس اطلاعات مرکز خدمات جهاد کشاورزی بخش ماهیدشت، در سال ۱۳۹۴ حدود ۳۰ مزرعه با سطح زیر کشت بالغ بر

اندازه‌گیری‌های میدانی: عملیات میدانی برداشت نمونه‌های گیاهی جهت اندازه‌گیری وزن خشک زیست‌توده گیاهی در زمان گذر ماهواره از منطقه

پرتاب شده است. این ماهواره در فاصله ۷۰۵ کیلومتری با مدار قطبی قرار گرفته و دارای دو سنجنده OLI و TIRS می‌باشد. با توجه به زمان گذر ماهواره از منطقه که هر ۱۶ روز یکبار می‌باشد در طول دوره رشد این محصول ۸ تصویر وجود داشت که از طریق سایت زمین‌شناسی آمریکا دانلود شدند. **پیش پردازش تصاویر ماهواره‌ای:** اولین مرحله برای تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، در بیشتر مطالعات چند زمانه تصحیح هندسی است. به منظور انجام تصحیحات هندسی، معمولاً از این روش‌ها استفاده می‌شود: الف) انتخاب نقاط کنترل زمینی با استفاده از دستگاه GPS، ب) استفاده از نقشه‌های موجود، ج) استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تصحیح شده. در پژوهش حاضر این تصحیحات براساس سیستم مختصات UTM/WGS84 و نقاط کنترلی حاصل از برداشت میدانی و GPS روی کلیه تصاویر به انجام رسید (۱۶).

۲۰۰ هکتار زیر کشت ذرت علوفه‌ای قرار گرفته بود. تعداد ۱۵ مزرعه از مزارع کشاورزان که مالکین آنها برای همکاری در اجرای این مطالعه اعلام آمادگی نمودند برای انجام این مطالعه انتخاب شد. در هر بازدید پلاتی به ابعاد ۱۶×۱۶ متر از هر کدام از این مزارع جهت نمونه‌برداری انتخاب شد. سپس در مرکز هر پلات مربعی به ابعاد ۱×۱ متر انتخاب شد و با توجه به این‌که امکان برداشت کل محصول در هر زیر پلات نبود تعداد بوته‌های موجود در سطح کل مربع شمارش شد که در اکثر مزارع، ذرت علوفه‌ای با فواصل ۷۵×۱۰ سانتی‌متر کشت می‌شد و سپس ۴ بوته ذرت از اضلاع مربع برداشت و به آزمایشگاه انتقال یافت. نمونه‌برداری میدانی در ۱۵ مزرعه و در ۸ تاریخ همزمان با گذر ماهواره لندست ۸ از منطقه (جدول ۱) انجام گرفت.

**داده‌های سنجنش از دور:** ماهواره‌ی لندست ۸ هشتمین ماهواره در تاریخ برنامه لندست است که با مشارکت ناسا و سازمان زمین‌شناسی آمریکا به فضا

جدول ۱- تاریخ اخذ تصاویر ماهواره‌ای بر حسب تقویم‌های شمسی و میلادی و روز ژولوسی (سال ۱۳۹۴)

Table 1. The dates of satellite imagery in Persian and Gregorian calendars and Julian day (year: 2015)

	شماره بازدید							
	Number of visit							
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
شمسی Shamsy	۳۱ اردیبهشت	۱۶ خرداد	۱ تیر	۱۷ تیر	۲ مرداد	۱۸ مرداد	۴ شهریور	۲۰ شهریور
میلادی Milady	21 February	8 March	24 March	9 April	25 April	10 August	26 August	11 September
روز از سال Day after year	142	158	174	190	206	222	238	254

دریافت، شرایط اتمسفری و توپوگرافی و زمان تصویربرداری بستگی دارند. به دلیل عواملی که در بالا ذکر شد اعداد رقومی (DN)<sup>۲</sup> نمی‌توانند شرایط واقعی زمین را نمایش دهند. هدف از تصحیحات

**تصحیح رادیومتریکی و اتمسفری:** هر کدام از عوارض زمین، یک علامت طیفی ویژه (امضای طیفی)<sup>۱</sup> دارد. این امضاهای طیفی به عوامل زیادی، مثل خصوصیات سنجنده، تفاوت در زوایای تابش و

2- Digital Number (DN)

1- Spectral Signature

ارزیابی مدل: جهت ارزیابی میزان دقت عملکرد شاخص‌ها، از ضریب همبستگی<sup>۳</sup> میان زیست‌توده برداشت شده زمینی و مقدار متناظر در شاخص‌ها و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده<sup>۴</sup> استفاده شد. جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده، اختلاف نسبی بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد (رابطه ۴). مقدار آن بین صفر تا ۱۰۰ درصد متغیر است. اعداد بین صفر تا ۱۰ درصد نشان می‌دهد که تطابق بسیار خوبی بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. محدوده ۱۰ تا ۲۰ درصد و ۲۰ تا ۳۰ درصد به ترتیب نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب و متوسط است و مقادیر بیشتر از ۳۰ درصد بیانگر عدم تطابق بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده است (۲۷). مزیت این شاخص نسبت به جذر میانگین مربعات خطا، بدون واحد بودن آن و فراهم ساختن امکان مقایسه داده‌هایی با واحدهای متفاوت است (۲۶، ۲۸). مقدار این شاخص با توجه به روابط ۳ و ۴ محاسبه می‌گردد.

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$nRMSE = RMSE \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (4)$$

در این روابط  $P_i$  مقادیر زیست‌توده پیش‌بینی شده،  $O_i$  مقادیر زیست‌توده اندازه‌گیری شده،  $\bar{O}$  متوسط مقادیر زیست‌توده اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

رادیومتریکی حذف یا ختنی کردن اثرات فوق از تصویر است (۵). تصحیح رادیومتریکی در نسل‌های قبلی لندست شامل دو مرحله بود (الف- تبدیل DNهای بدون واحد به تشعشع طیفی<sup>۱</sup> و ب- تبدیل رادیانس به قابلیت بازتاب<sup>۲</sup>) حال آنکه برای سنجنده OLI در لندست ۸ می‌توان مقادیر DN را مستقیماً با استفاده از روابط ۱ و ۲ به قابلیت بازتاب تبدیل نمود.

$$\rho\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p \quad (1)$$

که  $\rho\lambda'$  قابلیت بازتاب بدون تصحیح برای زاویه خورشیدی،  $M_p$  فاکتور مقیاس‌گذاری افزاینده برای باند موردنظر،  $Q_{cal}$  مقدار DN و  $A_p$  فاکتور مقیاس‌گذاری جمعی برای باند موردنظر می‌باشند. قابلیت بازتاب همراه با تصحیح زاویه خورشیدی ( $\rho\lambda$ ) با استفاده از رابطه ۲ برآورد شد.

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta_{SE})} \quad (2)$$

$\rho\lambda$  قابلیت بازتاب همراه با تصحیح زاویه خورشیدی،  $\theta_{SE}$  زاویه ارتفاع محلی خورشیدی،  $\theta_{SZ}$  زاویه زینت محلی خورشیدی  $\theta_{SE} = 90^\circ - \theta_{SZ}$ ، می‌باشند. مقدار متغیرهای این روابط از طریق راهنمای تصاویر به‌دست آمد. تصحیحات اتمسفری تصاویر با استفاده از نرم‌افزار ENVI و روش QUAC انجام شد (۲۷).

پردازش تصاویر ماهواره‌ای (محاسبه شاخص‌ها): در پژوهش حاضر تعداد ۱۷ شاخص پوشش گیاهی (جدول ۲) شامل NDVI، TNDVI، MNDVI، SAVI، OSVI، NRVI، RVI، PD321، PD312، PD311، VI1، VI2، VI3، IPVI، DVI، MIRV1\* و NIR\* که برای برآورد زیست‌توده استفاده شده و از صحت بالایی برخوردار است مورد استفاده قرار گرفت (۱، ۶، ۸، ۱۱، ۱۶، ۲۳، ۲۵، ۲۶، ۳۱).

3- Correlation Coefficient

4- Normalized Root Mean Square Error

1- Radiance

2- Reflectance

جدول ۲- روابط مربوط به شاخص‌های گیاهی استفاده شده در پژوهش حاضر.

Table 2. Equations of vegetation indices used in this study.

گروه Group	شاخص Index	رابطه Equation	منبع Reference
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$(NIR - R) / (NIR + R)$	26
	Transformed Normalized Difference Vegetation index (TNDVI)	$[(NIR - R) / (NIR + R) + 0.5]^{(0.5)}$	8
	Modified Normalized Difference Vegetation Index (MNDVI)	$(NIR - (1.2 \times R)) / (NIR + R)$	1
	Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$[(NIR - R) / (NIR + R + 0.5)] \times 1.5$	16
	Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI)	$(NIR - R) / (NIR + R + 0.16)$	25
VI	VI1	$R \times NIR / G$	1
	VI2	$R \times NIR$	1
	VI3	$G / (R + NIR)$	1
PD	Potential Different (PD311)	$R - B$	23
	Potential Different (PD312)	$(R - B) / (R + B)$	23
	Potential Different (PD321)	$R - G$	23
RVI	Ratio Vegetation Index (RVI)	$NIR / R$	23
	Normalized Ratio Vegetation Index (NRVI)	$(RVI - 1) / (RVI + 1)$	6
	Modified infrared Ratio Vegetation (MIRV1)	$(SWIR - R) / (SWIR + R)$	1
Else	Near Infrared Ratio (NIR*)	$NIR / R$	1
	Difference Vegetation Index (DVI)	$NIR - R$	31
	Infrared Percentage Vegetation Index (IPVI)	$NIR / (NIR + R)$	11

\*در جدول ۲، R، B، NIR، G، SWIR، به ترتیب نشان‌دهنده بازتاب طیفی باندهای مادون قرمز موج کوتاه، سبز، مادون قرمز نزدیک، آبی و قرمز می‌باشد. برای تفکیک شاخص گیاهی NIR از بازتاب طیفی در باند مادون قرمز نزدیک، این شاخص گیاهی به صورت NIR\* نمایش داده شده است.

### نتایج و بحث

نهایی رشد) با میانگین ۴۰۱۹۵ کیلوگرم در هکتار مشاهده شده است و بعد از بازدید هفتم مقدار زیست توده در اکثر مزارع کاهش پیدا کرده است که دلیل این امر با توجه به رسیدن ذرت علوفه‌ای در آن مرحله، زرد شدن و مرگ برگ‌ها است.

با توجه به جدول ۳، حداکثر مقدار زیست توده برداشت شده از مزارع حدود ۵۵ تن در هکتار (مزرعه F15) می‌باشد، که به دلیل مدیریت کارآمد (مدیریت چند وظیفه‌ای و هدف‌گرا) ناشی از آبیاری به موقع و استفاده از کودهای مناسب، این مزرعه می‌باشد. به طور کلی حداکثر مقدار زیست توده در بازدید هفتم (مرحله

جدول ۳- مقادیر زیست توده اندازه گیری شده در مزارع (کیلوگرم بر هکتار).

Table 3. Measured biomass in farms (kg / ha)

مزرعه Farm	شماره بازدید (شماره روز ژولیوسی) No. of visit (Julian day number)							
	1 (142)	2 (158)	3 (174)	4 (190)	5 (206)	6 (222)	7 (238)	8 (254)
F1	30	1888	2881	7256	14758	26049	37958	35428
F2	124	3818	5354	11256	9512	13474	36664	32628
F3	-	2138	3515	14910	16533	26085	29688	28480
F4	211	3676	2521	10382	11600	29871	45614	44916
F5	140	2639	5636	8716	16035	23215	46171	41457
F6	100	1544	6790	16048	18203	25964	35110	33826
F7	300	1977	4489	16530	27641	29617	52700	47315
F8	-	2624	5440	11024	9043	21295	43343	33791
F9	21	1388	2596	11149	15162	19871	35954	30426
F10	65	550	9940	19156	31824	32525	27537	30585
F11	155	2222	3053	9185	11134	12751	41986	37642
F12	210	2005	3337	12232	11428	23550	44573	36492
F13	98	1822	2922	15728	17731	29614	31830	35678
F14	89	1987	2730	10077	15007	21503	38984	34260
F15	115	2571	6463	17333	20537	27458	54820	48185
میانگین Average	111	2190	4511	12732	16410	24189	40195	36741

جدول ۴- مقادیر ضریب همبستگی شاخص های مطالعه شده در هر بازدید.

Table 4. The correlation coefficient of indexes used for each field survey.

گروه Group	شاخص index	شماره بازدید (شماره روز ژولیوسی) Visit No. (Julian day number)								میانگین average
		1 (142)	2 (158)	3 (174)	4 (190)	5 (206)	6 (222)	7 (238)	8 (254)	
NDVI	NDVI	0.18	0.34	0.30	0.62	0.65	0.60	0.25	0.19	0.39
	MNDVI	0.18	0.34	0.30	0.62	0.65	0.60	0.25	0.19	0.39
	TNDVI	0.19	0.30	0.31	0.61	0.61	0.60	0.23	0.19	0.31
	SAVI	0.18	0.34	0.29	0.63	0.66	0.60	0.25	0.19	0.39
	OSAVI	0.14	0.34	0.30	0.60	0.65	0.60	0.25	0.19	0.38
VI	VI1	0.04	0.06	0.00	0.05	0.04	0.00	0.00	0.05	0.03
	VI2	0.19	0.04	0.08	0.08	0.16	0.17	0.08	0.05	0.11
	VI3	0.07	0.02	0.26	0.71	0.64	0.56	0.37	0.26	0.36
PD	PD311	0.42	0.40	0.25	0.42	0.53	0.64	0.13	0.13	0.37
	PD312	0.37	0.47	0.24	0.46	0.58	0.60	0.22	0.12	0.38
	PD321	0.39	0.50	0.25	0.49	0.69	0.45	0.09	0.08	0.37
RVI	RVI	0.04	0.30	0.33	0.59	0.62	0.61	0.21	0.19	0.36
	NRVI	0.18	0.34	0.43	0.62	0.73	0.60	0.24	0.19	0.42
	MIRVI	0.10	0.04	0.14	0.00	0.18	0.08	0.41	0.05	0.13
Else	NIR*	0.19	0.46	0.58	0.60	0.55	0.66	0.57	0.47	0.51
	DVI	0.02	0.39	0.49	0.55	0.54	0.50	0.47	0.40	0.42
	IPVI	0.18	0.44	0.49	0.53	0.48	0.63	0.50	0.34	0.45
Maximum	0.42	0.50	0.58	0.71	0.73	0.66	0.57	0.47	0.51	



فاکتور خاک به شاخص NDVI نتوانسته بهبودی در دقت پیش‌بینی به‌وجود بیاورد (۲۳).

شاخص‌های سری VI، خصوصاً VI1 و VI2 با توجه به ساختار درونی شاخص که در مورد VII از باند سبز و در مورد VI2 از ضرب دو باند قرمز و باند مادون‌قرمز نزدیک استفاده شده است، نتوانستند نتایج مطلوبی را در این منطقه ارائه دهند. حداکثر مقدار ضریب همبستگی شاخص‌های VI2 و VII به مقدار ۰/۱۹ بود که نسبت به سایر شاخص‌ها خیلی پایین می‌باشد. در بین شاخص‌های سری VI شاخص VI3 به دلیل استفاده از باندهای قرمز و مادون‌قرمز نتایج بهتری خصوصاً در اواسط دوره رشد داشت. این شاخص در بازدید چهارم با مقدار همبستگی ۰/۷۱ رتبه اول را در بین شاخص‌های مورد مطالعه کسب کرد (جدول ۴). شاخص‌های سری PD در مراحل اولیه رشد که مقدار زیست‌توده کم بوده است نسبت به سایر شاخص‌های مورد مطالعه عملکرد بهتری داشتند. روند ضریب همبستگی شاخص‌های این گروه تقریباً مشابه می‌باشد. شاخص‌های سری PD از اختلاف بین باند قرمز و سبز حاصل شده است که وجود باند سبز در ساختار این شاخص باعث می‌شود که به میزان کلروفیل حساس باشد به‌طوری‌که حتی می‌تواند میزان کم پوشش گیاهی را در مراحل اولیه رشد نشان دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از باند سبز در ساختار شاخص‌های گیاهی تنها در مراحل اولیه رشد می‌تواند مفید باشد. شاخص‌های این گروه در بازدیدهای اول و دوم رتبه اول را کسب کردند (جدول ۴).

ضریب همبستگی شاخص‌های RVI و NRVI همانند شاخص‌های سری NDVI در اوایل دوره رشد اندک و به تدریج افزایش و در انتهای دوره رشد دوباره کاهش یافته است. شاخص NRVI در بازدید پنجم با میزان ضریب همبستگی ۰/۷۳ رتبه اول را

به‌طورکلی نتایج این بخش حاکی از آن بود که شاخص PD311 برای بازدید اول، شاخص PD321 برای بازدید دوم و مراحل ابتدایی رشد، شاخص NIR\* برای بازدیدهای سوم، ششم، هفتم و هشتم، شاخص VI3 برای بازدید چهارم و شاخص NRVI برای بازدید پنجم بیشترین ضریب همبستگی را داشتند (جدول ۴). در مجموع شاخص NIR\* با میانگین ضریب همبستگی ۰/۵۱ برای کل دوره در ۵ بازدید از ۸ بازدید به‌عنوان بهترین شاخص برآورد زیست‌توده مشخص گردید.

با توجه به جدول (۴) و همبستگی شاخص‌های گروه NDVI، می‌توان بیان داشت که این شاخص‌ها مشابه هم عمل کرده‌اند. مقدار همبستگی شاخص‌های این گروه در اوایل دوره رشد پایین و به تدریج افزایش یافته است به‌نحوی‌که حداکثر مقدار آن در بازدید پنجم (اوایل مرداد) با مقدار ۰/۶۱ تا ۰/۶۶ اتفاق افتاده است و بعد از آن دوباره روند کاهشی داشت. شاخص‌های این گروه در هیچ‌کدام از بازدیدها نتوانستند رتبه اول را کسب نمایند. همان‌طور که بانو و همکاران (۲۰۰۹) نیز بیان داشتند مقادیر پایین ضریب همبستگی شاخص NDVI بیانگر این واقعیت است که مقدار این شاخص در مقادیر بالای زیست‌توده به حد اشباع، نزدیک می‌شود و افزایش در مقدار زیست‌توده تغییری در مقدار شاخص NDVI به وجود نمی‌آورد (۴). در این پژوهش نیز این شاخص و سایر شاخص‌های مبتنی بر آن قادر نبوده است نسبت به دیگر شاخص‌های مورد استفاده نتیجه مطلوبی در بازدیدهای مختلف فراهم کند. شاخص‌های SAVI و OSAVI نیز به‌ویژه در مواردی که زیست‌توده اندازه‌گیری شده مزرعه بالا بوده است دقتی مشابه به شاخص NDVI داشته است. دلیل این امر می‌تواند اثر بسیار کم خاک در پلات‌های اندازه‌گیری شده باشد، به‌طوری‌که افزودن

شده مقایسه گردید. این مقایسه با استفاده از آماره جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده انجام شد. همانطور که قبلا نیز اشاره شده مقادیر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد نشان‌دهنده تطابق خوب بین داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های مشاهداتی می‌باشد که شاخص‌های VI3، NRVI و NIR\* در بازدهی‌های چهارم تا هشتم به خود اختصاص داده‌اند. مقدار این شاخص در بازدید اول ۵۵/۳ درصد بود که نشان‌دهنده ضعیف بودن داده‌های پیش‌بینی شده در این بازدید می‌باشد که با توجه به این که در مراحل ابتدایی رشد بوده قابل توجه می‌باشد. مقدار این آماره در بازدیدهای دوم و سوم بین ۲۰ تا ۳۰ درصد بود که نشان‌دهنده تطابق متوسط مدل در این بازدیدها می‌باشد. به‌طور کلی نتایج بیانگر این است که دقت پیش‌بینی مدل‌های برازش یافته به جز مراحل اولیه رشد متوسط تا خوب می‌باشد.

با توجه به این که شاخص‌های گروه NDVI از عملکرد خوبی برخوردار نبودند، قابل ذکر است که این گروه از شاخص‌ها در مناطق خشک و نیمه خشک به علت اثر سایه ایجاد شده توسط اندام‌های هوایی گیاه و جذب نور قرمز توسط برگ‌ها و ساقه‌ها توانایی خوبی در برآورد پوشش گیاهی و به‌طور کلی بیوماس ندارند که نتایج این بخش با نتایج بارت و همکاران (۱۹۹۱) و صباغ‌زاده (۲۰۱۷) همخوانی دارد (۵) و (۲۷).

کسب کرده است. شاخص MIRVI که از باندهای مادون‌قرمز موج کوتاه (SWIR) و قرمز (R) برای محاسبات استفاده می‌کند نتوانسته با دقت خوبی با مقادیر زیست‌توده ذرت ارتباط داشته باشد. ضریب همبستگی شاخص‌های گروه متفرقه (NIR\*, DVI و IPVI) به جز در بازدید اول در سایر زمان‌ها نوسانات کمتری نسبت به سایر شاخص‌ها داشته‌اند. همبستگی شاخص NIR\* نسبت به دو شاخص دیگر بالاتر بود و در بازدیدهای سوم، ششم، هفتم و هشتم بالاترین ضریب همبستگی را با مقادیر زیست‌توده اندازه‌گیری شده ذرت داشت. این شاخص در مجموع با میانگین ضریب همبستگی ۰/۵۱ برای هر ۸ بازدید وضعیت بهتری نسبت به سایر شاخص‌ها داشت. لازم به ذکر است که دقت این شاخص در اواخر دوره رشد که مربوط به عملکرد نهایی می‌باشد از سایر شاخص‌ها بهتر بوده است. از نتایج جدول ۴ استنباط می‌شود که تقریباً در تمامی شاخص‌ها حداکثر همبستگی در مرحله میانی رشد اتفاق افتاده است و با زرد شدن برگ‌ها (در اواخر دوره رشد) این ضریب کاهش یافته است. در نهایت شاخص با بالاترین میزان همبستگی در هر بازدید جهت تهیه نقشه تولید در تقویم زراعی برحسب کیلوگرم بر هکتار مورد استفاده قرار گرفت که روابط رگرسیونی آن ارائه شده است (جدول ۵). با توجه به این روابط مقدار زیست‌توده برای هر کدام از مزارع برآورد و با مقادیر اندازه‌گیری

جدول ۵- روابط رگرسیون شاخص‌های مطلوب جهت تهیه نقشه تولید.

Table 5. Regression equations of appropriate indicators for mapping of crop production.

بازدید Visit	شاخص Index	روابط برازش یافته* Regression equation	ضریب تبیین R <sup>2</sup>	NRMSE (%)	دقت مدل Model precision
اول (First)	PD311	BM = -14.9 + 67.2 PD311	0.42	55.3	ضعیف (Poor)
دوم (Second)	PD312	BM = -196 + 17169 PD312	0.50	26.4	متوسط (Moderate)
سوم (Third)	NIR*	BM = -1623 + 2982 NIR*	0.58	29.2	متوسط (Moderate)
چهارم (Fourth)	VI3	BM = 43828 - 108833 VI3	0.71	14.7	خوب (Good)
پنجم (Fifth)	NRVI	BM = -6075 - 54752 NRVI	0.73	19.5	خوب (Good)
ششم (Sixth)	NIR*	BM = 1344 + 5576 NIR*	0.66	14.5	خوب (Good)
هفتم (Seventh)	NIR*	BM = 18529 + 5683 NIR*	0.57	12.3	خوب (Good)
هشتم (Eighth)	NIR*	BM = 22575 + 4545 NIR*	0.47	11.7	خوب (Good)

\* در این روابط BM مقدار زیست‌توده برحسب کیلوگرم در هکتار می باشد.

اطلاعات می‌تواند کمک شایانی در پیش‌بینی تولید و تخمین بیلان اقتصادی مزرعه داشته باشد. بدون شک نهادینه کردن این روش‌ها در مقیاس‌های کلان کمک شایانی به برنامه‌ریزان جهت تنظیم بازار و واردات احتمالی محصولات می‌نماید. از سوی دیگر با تهیه و فراهم کردن این قبیل اطلاعات می‌توان، میزان عملکرد واقعی موجود در سطح مزارع را پوشش داده و با ارائه این نقشه‌ها به مدیران زراعی در نزدیک کردن عملکرد واقعی به سطح عملکرد مطلوب گام مؤثری برداشت. دقت این روش برای دوره‌های میانی رشد بهتر از دوره‌های ابتدایی رشد گیاهان می‌باشد. بهتر این است که به جای استفاده از یک شاخص گیاهی برای کل دوره رشد گیاه از شاخص مطلوب برای آن مرحله از رشد گیاه استفاده کرد.

### نتیجه‌گیری کلی

پوشش گیاهی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای هر اکوسیستم به‌شمار می‌رود. تعیین بیوماس هر گیاه به‌منظور تأثیر آن بر اقلیم، فرسایش خاک و مدیریت منابع طبیعی بسیار ضروری است. نتایج تحقیق حاضر بیانگر این مطلب بود که شاخص‌های PD311 و PD312 در مراحل ابتدایی رشد، شاخص‌های NIR\*، VI3 و NRVI برای مراحل میانی رشد و شاخص NIR\* برای مراحل پایانی رشد، بهترین عملکرد را داشته‌اند. در نهایت می‌توان بیان داشت نتایج این تحقیق می‌تواند به برنامه‌ریزان مزرعه مورد مطالعه این امکان را بدهد که به راحتی با تهیه تصویر برگزیده در سال‌های بعد و استخراج شاخص برتر از هریک از مراحل تولید ذرت، عملکرد مزرعه را با دقت متوسط تا خوب پیش‌بینی کنند. همچنین اکتساب این قبیل

- Asrar, G., Hipps, L.E., and Kanemasu, E.T. 1984. Assessing solar energy and water use efficiencies in winter wheat: A case study. *Agri. For. Meteorol.*, 31(1): 47-58.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., and Huete, A.R. 1995. A review of vegetation indices, *Remote Sens. Rev.*, 13: 95-120.

### منابع

- Arzani, H. 2002. Examination of vegetation indices for vegetation parameters measurements in semi-arid and arid area. The 3rd international Iran and Russia conference (agriculture and natural resources), 2: 596-603. (In Persian)

- indices. *Remote Sens. Environ.*, 54 (1): 38-48.
14. Gilabert, M.A., Gandia, S., and Melia, J. 1996. Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sens. Environ.*, 55 (1): 11-20.
  15. Gu, Y., Brown, J., Verdin, J., and Wardlow, A. 2007. A five year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophys. Res. Lett.*, 34: 1-6.
  16. Huete, H. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, 25: 295-309.
  17. Lefsky, M.A., and Cohen, W.B. 2003. Selection of remotely sensed data. In M.A. Wulder and S.E. Franklin (eds.), *Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case studies*. Kluwer Academic Publishers, Boston., USA. 13-46.
  18. Lillesand, T., Kiefer, R.W., and Chipman, J. 2014. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley and Sons., 167p.
  19. Mkhwanazi, M., Chávez, J.L., and Andales, A.A. 2015. SEBAL-A: A remote sensing ET algorithm that accounts for advection with limited data. Part I: Development and validation. *Remote Sens.*, 7(11): 15046-15067.
  20. Mohammadi Ahmad Mahmoudi, E., Kamkar, B., and Abdi, O. 2015. Comparison of geostatistical- and remote sensing data-based methods in wheat yield predication in some of growing stages (A case study: Nemooneh filed, Golestan province). *J. Crop Prod.*, 8 (2): 51-76. (In Persian)
  21. Mosleh, M.K., Hasan, Q.K., and Chowdhury, E.H. 2015. Application of remote sensors in mapping rice area and forecasting its production: a review. *Sensors.*, 15: 769-791.
  22. Nazari, R., and Kaviani, A. 2016. Comparing the estimates of reference crop evapotranspiration in Qazvin plain using SEBAL and METRIC models. *Iran. J. Water Res. Agric.*, 30(2): 187-199. (In Persian)
  4. Bao, Y., Gao, W., and Gao, Z. 2009. Estimation of winter wheat biomass based on remote sensing data at various spatial and spectral resolutions. *Front. Earth Sci.*, 3(1): 118-128.
  5. Baret, F., and Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.*, 35 (2-3): 161-173.
  6. Baret, F., Guyot, G., and Major, D.J. 1989. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1989. IGARSS'89. 12th Canadian symposium on remote sensing*. Canada. Pp: 1355-1358.
  7. Battude, M., Al Bitar, A., Brut, A., Tallec, T., Huc, M., Cros, J., and Demarez, V. 2017. Modeling water needs and total irrigation depths of maize crop in the south west of France using high spatial and temporal resolution satellite imagery. *Agric. Water Manag.*, 189: 123-136.
  8. Broge, B.H., and Mortensen, J.V. 2002. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. *Remote Sens. Environ.*, 81: 45-57.
  9. Cho, M.A. 2007. Hyper-spectral remote sensing of biochemical and biophysical parameters: the derivate red-edge" double-peak feature", a nuisance or an opportunity?, PhD Thesis, Wageningen University, The Netherlands, 241p.
  10. Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., and Muys, B. 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *Int. J. Remote Sens.*, 25(9): 1565-1596.
  11. Crippen, R.E. 1990. Calculating the vegetation index faster. *Remote Sens. Environ.*, 34 (1): 71-73.
  12. Dengshen, L. 2006. The potential and challenge of remote sensing based biomass estimation. *Int. J. Remote Sens.*, 27(7): 1297-1328.
  13. Elvidge, C.D., and Chen, Z. 1995. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation

28. Savage, M.J. 1993. Statistical aspects of model validation. In At Workshop on the field water balance in the modelling of cropping systems, University of Pretoria, South Africa., 227p.
29. Sawasawa, H.L. 2003. Crop yield estimation: Integrating RS, GIS, and management factors. A case study of Birkoor and Kortigiri Mandals, Nizamabad District India, MSc Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands.
30. Stehman, S.V. 2004. A critical evaluation of the normalized error matrix in map accuracy assessment. Photogramm. Eng. Remote Sens., 70(6): 743-751.
31. Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens. Environ., 8: 127-150.
32. Zhang, H., Chen, H., and Zhou, G. 2012. The model of wheat yield forecast based on modis-ndvi: a case study of xinxiang. In Proceedings of the ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Congress., 12p.
23. Pickup, G., Chewings, V.H., and Nelson, D.J. 1993. Estimating changes in vegetation cover over time in arid rangelands using Landsat MSS data. Remote Sens. Environ., 43: 243-263.
24. Rahimi Moghaddam, S. 2018. Early sowing date as a strategy for improvement of maize yield and maize physiological and phenological characteristics in climate change conditions at Kermanshah Province. J. Crop Prod., 10(4): 91-105. (In Persian)
25. Rondeaux, G., Steven, M., and Baret, F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. Remote Sens. Environ., 55: 98-107.
26. Rouse J.W., Haas, R.H., Deering, D.W., Schell, J.A., and Harlan, J.C. 1974. Monitoring the Vernal Advancement and Retro Gradation (green wave effect) of Natural Vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, MD., 371p.
27. Sabaghzadeh, S. Zare, M. and Mokhtari, M.H. 2017. Estimation biomass using Landsat satellite images (case study: Merck basin, Birjand). J. Range and Watershed Manag., 69 (4): 907-920. (In Persian)

