



نشریه تولید گیاهان زراعی  
جلد هشتم، شماره دوم، تابستان ۹۴  
۵۱-۷۶  
<http://ejcp.gau.ac.ir>



## مقایسه روش زمین آمار و استفاده از داده‌های سنجش از دور به منظور پیش بینی عملکرد گندم در برخی از مراحل رشد (مطالعه موردی: اراضی مزرعه نمونه استان گلستان)

\*اسماعیل محمدی احمد محمودی<sup>۱</sup>، بهنام کامکار<sup>۲</sup> و امید عبدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آگرواکولوژی و دانشیار گروه زراعت دانشگاه علوم کشاورزی

و منابع طبیعی گرگان، <sup>۲</sup>کارشناس ارشد اداره منابع طبیعی استان گلستان

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۲/۱۵

### چکیده

سابقه و هدف: امنیت غذایی مهم‌ترین دغدغه بشر بر روی کره زمین بوده است. از سویی تولیدات کشاورزی همیشه با احتمال خطر در زمینه‌ی نوسان آب و هوا و تغییرات بازارهای بین‌المللی همراه بوده است، گرچه این احتمال خطر هرگز به‌طور کامل حذف نمی‌شود، اما می‌توان با تخمین میزان محصول قبل از فصل برداشت آن‌ها را به حداقل رساند. در این پژوهش روش‌های مختلف تهیه نقشه پوشش گیاهی جهت تعیین نقشه مطلوب عملکرد گندم مورد ارزیابی قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها: به‌منظور مقایسه سنجش از دور و زمین‌آمار برای برآورد عملکرد گندم اراضی مزرعه نمونه، پژوهشی در سال زراعی ۹۱-۱۳۹۰ انجام شد. جهت انجام عملیات میدانی، ۱۰۱ نمونه گیاهی در مراحل پنجه‌زنی، آبستنی، پر شدن دانه و رسیدگی گیاه گندم (۳ مرحله شاخص سطح برگ و زیست‌توده و یک مرحله عملکرد دانه) از ۲۵۰۰ هکتار اراضی گندم برداشت و متغیرهای گیاهی اندازه‌گیری شدند. روش‌های درون‌یابی عمومی، جهانی و فصلی کریجینگ اعمال و مدل‌های مختلف نیم‌تغییرنا ترسیم و مدل مناسب برازش داده شد. دقت روش‌های درون‌یابی با کمک معیارهای آماری مختلف ارزیابی شد. هم‌چنین در این تحقیق از ۳ تصویر چندطیفی ETM+ که با زمان انجام عملیات میدانی انطباق داشتند و همچنین ۴ تصویر سال‌های قبل استفاده شد. ۸ شاخص گیاهی از تصاویر استخراج و ارتباط بین آن‌ها و متغیرهای گیاهی استخراج و نقشه متغیرهای گیاهی با کمک تصاویر تهیه و

\*نویسنده مسئول: [esmaeil.mohammadi68@yahoo.com](mailto:esmaeil.mohammadi68@yahoo.com)

ارزیابی شد. با برآزش مدل لجستیک پیک بین مقادیر عملکرد و متغیرهای گیاهی، نقشه عملکرد با کمک سنجش از دور تهیه و با معیارهای آماری مختلف نقشه‌های عملکرد بدست آمده مقایسه شدند.

**یافته‌ها:** نتایج ارزیابی روش‌های درون‌یابی بیان‌گر برتری مدل‌های کروی، نمایی، گوسی و دایره‌ای نسبت به دیگر مدل‌ها بود. نتایج بررسی شاخص‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای ارتباط معنی‌دار در سطح آماری ۹۹ درصد بین متغیرهای گیاهی و شاخص‌های بدست‌آمده از تصاویر را در اواخر مرحله پنجه‌زنی نشان داد. ارزیابی نقشه‌های عملکرد پیش‌بینی شده برتری قاطع روش سنجش از دور را نسبت به زمین‌آمار نشان داد. نتایج بیان‌گر قابلیت تصاویر ماهواره‌ای در پیش‌بینی عملکرد گندم در اواخر پنجه‌زنی با ۷۱۵ کیلوگرم در هکتار خطای برآورد است.

**نتیجه‌گیری:** با توجه به دقت مناسب تکنیک سنجش از دور نسبت به روش زمین‌آمار و علاوه بر آن آسان و کم هزینه بودن این روش در مقابل زمین‌آمار، استفاده از سنجش از دور و شاخص‌های گیاهی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای مربوط می‌تواند تحول جدیدی در برآورد عملکرد در مقیاس منطقه‌ای باشد. با توجه به این که تصاویر برداشت شده توسط ماهواره نمایشی واقعی از وضعیت محصول را تهیه می‌کنند، می‌توانند در مدل‌سازی رشد کمک قابل توجهی کنند.

**واژه‌های کلیدی:** پیش‌بینی عملکرد، سنجش از دور، شاخص گیاهی گندم، زمین‌آمار

## مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از محصولات استراتژیک و اساسی کشورهای دنیا بوده و همچنین به عنوان تامین کننده اصلی قسمت اعظم پروتئین و کالری مورد نیاز افراد جامعه به حساب می آید (۲۵). این گیاه با تامین بیش از ۴۰ درصد کالری و ۵۰ درصد پروتئین مورد نیاز، در جیره غذایی جامعه ایرانی از اهمیت بسزایی برخوردار است (۲). تقریباً یک ششم از کل زمین های زراعی جهان زیر کشت گندم است. در ایران نیز گندم مهم ترین گیاه زراعی به شمار می رود که سطح زیر کشت آن بالغ بر نیمی از اراضی زیر کشت گیاهان زراعی (حدود ۶/۶۸ میلیون هکتار) است. امنیت غذایی همواره مهم ترین دغدغه بشر بر روی کره زمین بوده است. بسیاری از سازمان های بین المللی و دولتی برای تضمین نیازهای بشر برای نسل های آتی در حال تحقیق هستند. بنابراین، آگاهی از مدیریت محصول برای تولید غذا یکی از وظایف اصلی مدیران کشاورزی و کشاورزان است (۴۴).

استفاده از پارامترهای گیاهی از قبیل شاخص سطح برگ (LAI)<sup>۱</sup> و زیست توده در تحقیقات برآورد عملکرد امری الزامی و اجتناب ناپذیر است. از سویی جهت تخمین عملکرد در سطوح وسیع تهیه نقشه مطلوب این متغیرها بسیار مهم می باشد. سنجش از دور فن آوری بسیار مفیدی است که می توان از آن برای به دست آوردن لایه های اطلاعاتی از خاک و پوشش گیاهی استفاده کرد. فراهم ساختن دید وسیع و یکپارچه از یک منطقه، قابلیت تکرارپذیری، در دسترس بودن و دقت بالای اطلاعات حاصله و صرفه جویی در زمان از جمله ویژگی هایی است که استفاده از فن آوری سنجش از دور را برای بررسی پوشش گیاهی و کنترل تغییرات آن نسبت به سایر روش ها برتری می بخشد. بر همین اساس، محققان زیادی به منظور بررسی پوشش گیاهی از داده های سنجش از دور استفاده نموده و این فن آوری را مناسب این گونه مطالعات ارزیابی نموده اند (۳۹). در زمینه استفاده از سنجش از دور در برآورد عملکرد مطالعات زیادی صورت گرفته است.

بائو و همکاران (۲۰۰۹) در کشور چین به برآورد گندم زمستانه با استفاده از داده های سنجش از دور و با قدرت تفکیک طیفی و مکانی متنوع پرداختند. آن ها گزارش کردند با برآورد ماده خشک گندم زمستانه در مراحل سبز شدن، پنجه زنی، ساقه دهی، گلدهی و پر شدن دانه می توان وضعیت رشد گیاه

---

1- Leaf Area Index

را بررسی نمود و برای این کار از پنج تصویر لندست TM استفاده نمودند. سپس بر اساس تصاویر MODIS و Landsat TM شاخص‌های طیفی مانند NDVI<sup>۱</sup>، RDVI<sup>۲</sup>، EVI<sup>۳</sup>، MSAVI<sup>۴</sup> و NDWI<sup>۵</sup> محاسبه کردند (۷). در مطالعه‌ای دیگر ساواساوا (۲۰۰۳) برای تخمین عملکرد گیاه برنج در ناحیه نظام‌آباد ایالت آندهارا پرادش از شاخص NDVI بدست آمده از تصاویر سنجنده IRS استفاده کرد که هدف این تحقیق بررسی ارتباط شاخص NDVI و عملکرد برنج بود. نتایج بیانگر همبستگی مثبت و معنی‌دار بین این شاخص و عملکرد محصول در سطح مزارع برنج بود (۴۱).

ژانگ و همکاران (۲۰۱۲) مدلی جهت تخمین عملکرد محصول گندم با کمک داده‌های NDVI حاصل از MODIS ارائه دادند. در این مطالعه، ابتدا شاخص گیاهی NDVI محاسبه شد، سپس ارتباط بین این شاخص و میزان تولید بیوماس تعیین گردید. در گام بعد میزان عملکرد با توجه به شاخص برداشت که با کمک تغییرات شاخص NDVI در طول دوره سبز شدن تا رسیدگی بدست آمده بود، تعیین گردید (۵۱).

زمین‌آمار شامل روش‌های مختلفی است که برای ویژگی‌های پیوسته از الگوریتم کریجینگ استفاده می‌کند. کریجینگ یک روش زمین‌آمار برای درون‌یابی داده‌ها بر اساس واریانس فضایی است. روش کریجینگ در واقع روش بهینه درون‌یابی به حساب می‌آید، به گونه‌ای که در بسیاری از موارد در مقایسه با سایر روش‌ها مثل وزن‌دهی معکوس فاصله و نوار باریک دقت بالاتری را نشان داده‌است. کریجینگ یک روش درون‌یابی زمین‌آمار است که به هر دو معیار فاصله و میزان تغییرات در زمان پیش‌بینی مقدار مجهول توجه می‌کند (۴۹).

استوارت و همکاران (۲۰۰۲) پژوهشی را به منظور بررسی رابطه بین ویژگی‌های خاکی و عملکرد گندم دوروم انجام دادند. آن‌ها با کمک دستگاه موقعیت یاب جهانی (GPS) نقاط نمونه‌گیری از گیاه گندم و خاک مزرعه را مشخص نمودند و جهت تعمیم این اطلاعات به دیگر نقاط مزرعه از روش کریجینگ با مدل کروی<sup>۶</sup> استفاده کردند (۴۳). الدیری و گارسیا (۲۰۱۲) جهت مدیریت شوری خاک

- 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
- 6- Spherical Model

و عملکرد گیاه زراعی، تحقیقی را با هدف مقایسه سه روش کریجینگ فصلی<sup>۱</sup> و شاخص<sup>۲</sup> و احتمالاتی<sup>۳</sup> در برآورد پتانسیل عملکرد گیاه یونجه و ذرت تحت آستانه‌های شوری مختلف انجام دادند. نتایج حاکی از آن بود که هر سه روش مورد بررسی در برآورد پتانسیل عملکرد توانایی خوبی دارند و از بین این سه روش، روش کریجینگ فصلی از بقیه روش‌ها مناسب‌تر می‌باشد (۱۷). بورنان و همکاران (۲۰۰۴) برای یافتن رابطه بین عملکرد گندم و برخی ویژگی‌های خاک در دو نوع تیپ خاک، روش زمین‌آمار کریجینگ را به عنوان روش مناسب برای تهیه نقشه عملکرد انتخاب کردند (۹).

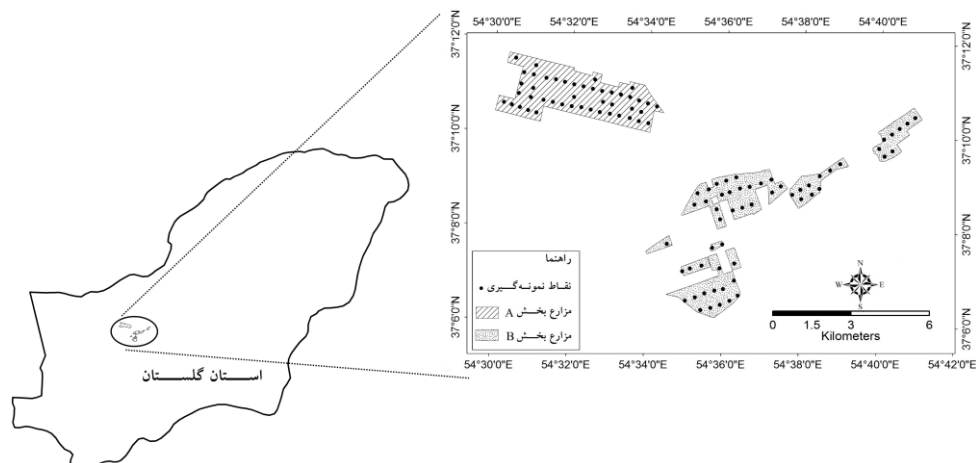
داهایا و همکاران (۲۰۰۴) در پژوهشی در شمال غرب کشور آلمان به بهبود تهیه نقشه عملکرد و ویژگی‌های خاکی با کمک روش زمین‌آمار کریجینگ پرداختند. به منظور بررسی قابلیت این روش درون‌یابی، ۱۰ روش دیگر با روش درون‌یابی کریجینگ مقایسه گردید. نتیجه بررسی نقشه‌های خروجی از تمام روش‌ها، بیانگر برتری روش کریجینگ بود (۱۵). در این پژوهش روش‌های مختلف تهیه نقشه پوشش گیاهی جهت تعیین نقشه مطلوب عملکرد گندم مورد ارزیابی قرار گرفتند.

### مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال زراعی ۹۱-۹۰ در اراضی شرکت مزرعه نمونه واقع در شمال استان گلستان و شهرستان آق‌قلا در عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۰۵ دقیقه الی ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۹ دقیقه الی ۵۴ درجه و ۴۱ دقیقه شرقی انجام شد. وسعت اراضی این مزرعه حدود ۴ هزار هکتار می‌باشد که بر اساس آمار شرکت مذکور ۲۵۰۰ هکتار از این اراضی در سال زراعی ۹۱-۹۰ تحت کشت رقم‌های مروارید، کوه‌دشت، لاین ۱۷ و N-۸۰-۱۹ گیاه گندم بود (شکل ۱).

---

1- Disjunctive Kriging  
2- Indicator Kriging  
3- Probability Kriging



شکل ۱. موقعیت مزرعه مورد مطالعه در شمال استان گلستان (مزارع شرکت نمونه) و توزیع مکانی ۱۰۱ نقطه مورد استفاده جهت نمونه‌گیری از مزارع تفکیک شده A و B

Figure 1. Geographical position of studied field in north of Golestan province and spatial distribution of 101 samples taken from A and B separated fields

جهت انجام این تحقیق ابتدا محدوده مزارع مورد مطالعه بوسیله دستگاه GPS مدل 550 Garmin تعیین گردید. سپس ۱۰۱ نقطه به صورت تصادفی در سطح مزرعه تعیین شد. به دلیل وجود فاصله زیاد بین دو منطقه از مزرعه و احتمال بروز خطا در تخمین نقاط نامعلوم و در هنگام تجزیه و تحلیل، مزرعه به دو بخش A و B تقسیم گردید (شکل ۱).

در گام بعد طی فصل رشد گیاه گندم و در سه مرحله فنولوژیکی رشد گندم شامل اواخر مرحله پنجه‌زنی، مرحله تورم غلاف برگ پرچم و اواخر مرحله پر شدن دانه به مزرعه مراجعه شد و در نقاطی که از قبل تعیین شده بودند، تعداد چهار بوته به منظور برآورد شاخص سطح برگ و همچنین وزن خشک گیاهی از محصول گندم به‌عنوان نمونه برداشت شد. همزمان تعداد بوته در سطح ۰/۲۵ مترمربع شمارش و تراکم در مترمربع محاسبه شد.

در زمان برداشت محصول نیز جهت تعیین عملکرد در نقاط مذکور به مزرعه مراجعه شد و با انتخاب و برداشت ۴ بوته در محل کوادرات قبلی اقدام به جمع‌آوری اطلاعات عملکرد از سطح مزرعه شد.

سپس نمونه‌های گیاهی به آزمایشگاه منتقل شدند و مقدار شاخص سطح برگ چهار بوته متعلق به هر کوادرات در طی هریک از مراحل با کمک دستگاه سطح برگ سنج مدل DELTA-T بدست آمد و با ضرب مقدار سطح برگ در واحد تک بوته در تراکم واقعی شمارش شده در کوادرات در همان مرحله، مقدار سطح برگ در مترمربع بدست آمد. هم‌چنین مقدار وزن خشک با قرار دادن نمونه‌های گیاهی به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد و توزین آن‌ها بدست آمد. مقدار عملکرد نیز پس از جداسازی دانه گندم از غلاف و با توزین دانه بدست آمده در تک بوته‌های برداشت شده از هر کوادرات و ضرب میانگین چهار بوته در تراکم واقعی ثبت شده در همان کوادرات بدست آمد.

در ادامه، ابتدا ارتباط بین داده‌های جمع‌آوری شده در سه مرحله اول نمونه‌برداری با اطلاعات عملکرد تهیه شده مورد بررسی قرار گرفت و متغیرهایی که ارتباط معنی‌داری با عملکرد داشتند در محیط نرم‌افزار ArcGIS 9.3 فراخوانی شدند و به منظور تهیه نقشه رستری صفات اندازه‌گیری شده، اقدام به درون‌یابی شد. از بین انواع روش درون‌یابی، روش درون‌یابی کریجینگ با توجه به اهمیت ساختار مکانی داده‌ها علاوه بر مقادیرشان و هم‌چنین وجود همبستگی بین داده‌ها، مورد استفاده گرفت و به منظور بررسی روش درون‌یابی داده‌های هر دو بخش A و B به دو بخش نقاط تست<sup>۱</sup> و نقاط آموزشی<sup>۲</sup> تقسیم شدند. (شکل ۱).

به منظور اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، توزیع فراوانی آن‌ها با کمک آماره‌های میانگین، حداقل، حداکثر، انحراف معیار، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی توسط نرم‌افزار آماری SAS و رویه proc univariate (۲۰) مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی آزمون نرمال بودن توزیع متغیرها، از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد.

به منظور بررسی ساختار مکانی داده‌ها از نیم‌تغییرنما<sup>۳</sup> (۳۰) استفاده شد. پارامترهای نیم‌تغییرنما شامل اثر قطعه‌ای<sup>۴</sup>، دامنه یا شعاع تأثیر<sup>۵</sup> و آستانه یا سقف<sup>۶</sup> می‌باشند (۴۶). برای بررسی ساختار مکانی داده‌های مورد استفاده نسبت اثر قطعه‌ای به سقف در هر نیم‌تغییرنما بررسی گردید. وقتی این نسبت

- 
- 1- Test Points
  - 2- Training Points
  - 3- Semivariogram
  - 4- Nugget effect
  - 5- Range
  - 6- Sill

کمتر از ۲۵ درصد باشد متغیر مورد نظر ساختار مکانی قوی دارد، اگر بین ۲۵ تا ۷۵ درصد باشد داده‌ها ساختار مکانی متوسط دارند و هنگامی که بیش‌تر از ۷۵ درصد باشد ساختار مکانی ضعیف دارند (۱۱).

پس از تایید نرمال بودن داده‌ها و همچنین بررسی وضعیت ساختار مکانی داده‌ها برای هر دو قسمت تفکیک شده مزرعه، انواع روش‌های عمومی، جهانی و فصلی درون‌یابی کریجینگ اعمال گردید تا روش مناسب برای تهیه نقشه مناسب برای خصوصیات گیاهی تعیین گردد. از میان انواع مدل‌های موجود در روش درون‌یابی کریجینگ مدل‌های دایره‌ای<sup>۱</sup>، کروی<sup>۲</sup>، نمایی<sup>۳</sup>، گوسی<sup>۴</sup>، ثابت<sup>۵</sup> و k-Bessel (۲۹) مورد ارزیابی قرار گرفتند که برای هر متغیر میزان خطای موجود در تخمین نقاط مجهول مورد بررسی قرار گرفت. جهت تشخیص مناسب‌ترین روش؛ میزان میانگین مطلق خطا (MAE)<sup>۶</sup>، میانگین اریب خطا (MBE)<sup>۷</sup> و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)<sup>۸</sup> در هر روش محاسبه و ارزیابی شدند (۲۷).

صحت مدل با MAE تعیین می‌شود که مقدار صفر آن نشان‌دهنده صحت ۱۰۰ درصد است و هر قدر مقدار آن از صفر فاصله داشته باشد حاکی از کم شدن صحت مدل است. معیار ارزیابی MBE نیز بیانگر میانگین انحراف است. این معیار علاوه بر دارا بودن علامت مثبت (بیش برآوردی مدل) و یا منفی (کم برآوردی مدل) مقدار انحراف از مقادیر مشاهده شده را نیز نشان می‌دهد. MBE برابر صفر نشان می‌دهد که برآورد مدل خوب بوده و در آن هیچ‌گونه انحرافی وجود ندارد. به‌طور معمول هر قدر مقدار این دو معیار و همچنین ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) کمتر باشد صحت روش بیشتر است. از نظر تئوری هرگاه این دو معیار برابر صفر شوند نمایان‌گر این است که مقدار تخمین زده‌شده یک کمیت، دقیقاً برابر مقدار واقعی آن است (۲۷).

- 1- Circular
- 2- Spherical
- 3- Exponential
- 4- Gaussian
- 5- Stable
- 6- Mean Absolute Error
- 7- Mean Bias Error
- 8- Root Mean Square Error



با مقایسه روش‌های درون‌یابی بهترین روش شناسایی گردید و نقشه پارامترهای گیاهی به منظور مقایسه با اطلاعات بدست آمده از سنجش از دور انتخاب شد.

در این پژوهش از ۳ تصویر چندطیفی ETM+ سنجنده لندست ۷ که دارای ۷ باند کامل بوده و به تاریخ‌های ۲۲ مارس، ۹ می و ۲۵ می سال ۲۰۱۲ تعلق داشتند و از لحاظ زمانی با زمان انجام عملیات میدانی انطباق داشتند و همچنین سه تصویر TM سنجنده لندست ۵ مربوط به تاریخ‌های ۲۹ آوریل سال ۲۰۱۱ و ۲۸ می و ۶ ژوئن سال ۲۰۱۰ و یک تصویر IRS چهار بانده مربوط به تاریخ ۱۹ آوریل ۲۰۰۸ استفاده شد. تصاویر ETM+ تهیه شده در ابتدا به صورت باندهای جدا بودند. به این منظور با کمک نرم‌افزار ERDAS IMAGINE 9.2 باندهای خام به غیر از باند شماره ۶ که باند حرارتی می‌باشد، به ترتیب به منظور تهیه تصویر چندطیفی ادغام شدند.

در این مطالعه تعداد ۸ شاخص گیاهی مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفت که این شاخص‌ها شامل شاخص‌های گیاهی NDVI، RVI، DVI، IPVI، TVI، MSAVI، G<sub>1</sub> و G<sub>2</sub> بودند (جدول ۱). بدین منظور شاخص‌های NDVI، RVI، DVI، TVI و G<sub>1</sub> با کمک نرم‌افزار ERDAS IMAGINE 9.2 و شاخص‌های IPVI، MSAVI و G<sub>2</sub> با کمک نرم‌افزار ArcGIS 9.3 محاسبه شدند. جهت ارزیابی شاخص‌های استخراج شده از تصاویر، شاخص‌های مربوط به تصویر ۳ فروردین ۱۳۹۱ با شاخص سطح برگ و وزن خشک مربوط به نمونه‌برداری اول، شاخص‌های بدست آمده از تصاویر ۳۱ فروردین ۱۳۸۷ و ۱۰ اردیبهشت ۱۳۹۰ با شاخص سطح برگ و وزن خشک نمونه‌برداری دوم، شاخص‌های استخراج شده از تصویر ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۱ با وزن خشک مرحله سوم نمونه‌برداری و شاخص‌های بدست آمده از تصاویر ۵ خرداد ۱۳۹۱، ۸ خرداد و ۱۷ خرداد ۱۳۸۹ با عملکرد برداشت شده مقایسه گردیدند.

جدول ۱. شاخص‌های مورد استفاده در مطالعه و روابط آن‌ها. در این معادلات TM4 باند ۴ سنجنده TM (قرمز دور) و TM3 باند ۳ سنجنده می‌باشد.

Table 1. Applied indices in the study and corresponding equations. In this equations TM4 and TM3 are 4 and 3 bands of TM satellite, respectively.

شاخص گیاهی Vegetation Indices	فرمول Equation	منبع Reference
Difference Vegetation Index (DVI) شاخص گیاهی تفاضل	TM4-TM3	(۴۵)
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده	$(TM4-TM3)/(TM4+TM3)$	(۳۶)
Ratio Vegetation Index (RVI) شاخص گیاهی نسبت	TM4/TM3	(۳۱)
Infrared Percentage Vegetation Index (IPVI) شاخص گیاهی درصد مادون قرمز	$TM4/(TM4+TM3)$	(۱۴)
Transformed Vegetation Index (TVI) شاخص گیاهی تبدیل شده	$\sqrt{(TM4 - TM3)/(TM4 + TM3) + 0.5}$	(۳۷)
Modified Soil Adjustment Vegetation Index (MSAVI) شاخص گیاهی اصلاح شده‌ی تعدیل اثر خاک	$(1+L)(TM4-TM3)/(TM4+TM3+L)$	(۳۴)
Greenness index (G1) شاخص سبزیگی	$\sqrt{(TM4/TM3)}$	(۱)
Greenness index 2 (G2) شاخص سبزیگی ۲	$\sqrt{(TM4 - TM3)/(TM4 + TM3)}$	(۱)

شاخص‌های گیاهی از پرکاربردترین نمونه‌های محاسبات باندی می‌باشند که به منظور محاسبه درصد پوشش گیاهی، بررسی انواع پوشش گیاهی، وضعیت سبزیگی یک منطقه طی دوران‌های مختلف و غیره به کار برده می‌شوند (۲۰).

پس از محاسبه شاخص‌های گیاهی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 9.3، مقادیر این شاخص‌ها در محل نقاط نمونه‌گیری استخراج و ارتباط بین این شاخص‌ها با متغیرهای گیاهی مربوط به زمان تصاویر بررسی شد و معنی‌داری این شاخص‌ها با کمک رگرسیون ساده خطی مورد ارزیابی قرار گرفت و شاخص‌های مطلوب برای ادامه فرآیند انتخاب گردیدند. رابطه خطی بین مقادیر شاخص‌هایی که ارتباط معنی‌داری با متغیرهای گیاهی داشتند، با متغیرها برآورد گردید و در محیط نرم‌افزار ArcGIS 9.3 و با کمک رابطه ریاضی بدست آمده مقادیر متغیرهای گیاهی از روی شاخص‌های گیاهی بدست‌آمده از تصاویر تخمین زده شدند.

با توجه به این که در تصاویر +ETM مورد استفاده به دلیل وجود آمدن نقص در حسگر این سنجنده در سال ۲۰۰۳ در برخی مناطق اطلاعات از سطح زمین برداشت نشده است و در اصطلاح در تصاویر شکاف وجود دارد؛ در این نواحی، از روش درون‌یابی کریجینگ برای ترمیم و پر کردن این مناطق استفاده شد (۳).

به منظور تخمین بهتر و دقیق‌تر عملکرد نهایی با کمک اطلاعات گیاهی برداشت شده طی فصل رشد، با توجه به مطالعات قبلی (۲۶) از برازش مدل لجستیک پیک برای تخمین وزن خشک و عملکرد استفاده گردید (معادله ۱).

$$G = \frac{G_x}{1 + \exp[a(x - b)]} \quad (1)$$

در این معادله  $Gx$  حداکثر مقدار عملکرد،  $G$  میزان عملکرد و  $x$  میزان متغیر گیاهی است. ضرایب  $a$  و  $b$  به ترتیب بیانگر تندی شیب افزایش عملکرد در ازای واحد متغیر گیاهی و مقدار متغیر در حد واسط می‌باشند.

با استفاده از نقشه‌های بدست آمده از پارامترهای گیاهی بوسیله شاخص‌های سنجنش از دور و همچنین نقشه‌های تهیه شده این متغیرها با کمک زمین‌آمار با توجه به رابطه برازش داده شده به این متغیرها نقشه‌های عملکرد برآورد شده بدست آمدند. سپس بهترین نقشه تخمین عملکرد با کمک میزان میانگین مطلق خطا، میانگین اریب خطا و ریشه دوم میانگین مربعات خطا انتخاب و ارائه شد. در این پژوهش از نرم‌افزارهای ArcGIS 9.3، ERDAS IMAGINE 9.2 و نرم‌افزار آماری SAS 9.1 استفاده گردید.

## نتایج

در بررسی ارتباط شاخص سطح برگ و زیست‌توده در سه مرحله رشدی با عملکرد، تمام متغیرهای گیاهی مورد بررسی بجز از شاخص سطح برگ بدست آمده در مرحله سوم نمونه‌برداری با عملکرد در سطح آماری ۵ درصد ارتباط معنی‌داری داشتند. به همین دلیل از ادامه بررسی بر روی داده‌های شاخص سطح برگ در مرحله سوم خودداری شد (جدول ۲).

جدول ۲. ضریب تبیین و معنی‌داری رابطه متغیرهای گیاهی با عملکرد در اواخر مرحله پنجه‌زنی (مرحله اول)، مرحله تورم غلاف برگ پرچم (مرحله دوم) و اواخر پر شدن دانه (مرحله سوم).

Table 2. R<sup>2</sup> and significance of vegetation variables and yield relationship in tillering (first stage), booting (second stage) and seed filling (third stage).

تعداد نقاط Number of points	F	ضریب تبیین R <sup>2</sup>	پارامترهای گیاهی Vegetation parameters
101	23.17**	0.148	شاخص سطح برگ (مرحله اول) Leaf Area Index (first stage)
101	51.08**	0.34	شاخص سطح برگ (مرحله دوم) Leaf Area Index (second stage)
101	0.03 <sup>n.s</sup>	0.003	شاخص سطح برگ (مرحله سوم) Leaf Area Index (third stage)
101	15.68**	0.137	ماده خشک (مرحله اول) Dry Matter (first stage)
101	14.59**	0.129	ماده خشک (مرحله دوم) Dry Matter (second stage)
101	92.49**	0.48	ماده خشک (مرحله سوم) Dry Matter (third stage)

نتایج نشان داد که داده‌ها بر اساس آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نرمال هستند. آماره‌های توصیفی داده‌های مورد مطالعه نیز نشان داد که اطلاعات جمع‌آوری شده در مرحله اول نمونه‌برداری دارای بیش‌ترین ضریب تغییرات بوده‌اند که این می‌تواند به دلیل تاریخ کشت متفاوت بوده که در مراحل ابتدایی رشد محصول تغییرات بیشتری را نشان داده است. از سوی دیگر ضریب تغییرات در سطح بخش B مزارع که وسیع‌تر هستند، بیش‌تر بود که می‌تواند به دلیل مدیریت جداگانه مزارع این بخش و همچنین طیف گسترده‌تر ویژگی‌های خاکی به دلیل وسعت بیش‌تر در این بخش باشد (جدول ۳).

جدول ۳. آماره‌های توصیفی متغیرهای مورد بررسی در اواخر مرحله پنجه‌زنی (مرحله اول)، مرحله تورم غلاف برگ پرچم (مرحله دوم)، اواخر مرحله پر شدن دانه (مرحله سوم) و عملکرد.

Table 3. Descriptive statistics of studied variables in tillering, booting and seed filling stages (as the first to third stages), and yield

متغیر Variable	بخش Part	واحد Unit	میانگین Average	کمینه Minimum	بیشینه Maximum	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis	ضریب تغییرات (CV)	انحراف معیار (SD)
LAI (مرحله اول)	A	m <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup>	1.43	0.2	2.65	-0.08	-0.75	0.44	0.63
LAI (first stage)	B	m <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup>	1.16	0.08	2.98	0.58	-0.26	0.60	0.7
LAI (مرحله دوم)	A	m <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup>	4.16	2.07	5.77	-0.18	0.16	0.19	0.81
LAI (second stage)	B	m <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup>	4.64	1.56	6.65	-0.87	1.9	0.20	0.95
وزن خشک (مرحله اول)	A	t.ha <sup>-1</sup>	0.88	0.13	2.17	0.72	0.11	0.48	0.46
Dry Matter (first stage)	B	t.ha <sup>-1</sup>	1.13	0.17	2.35	0.13	0.78	0.53	0.55
وزن خشک (مرحله دوم)	A	t.ha <sup>-1</sup>	5.47	1.46	8.27	-0.49	0.57	0.27	1.5
Dry Matter (second stage)	B	t.ha <sup>-1</sup>	4.23	1.59	8.34	0.60	1.02	0.32	1.36
وزن خشک (مرحله سوم)	A	t.ha <sup>-1</sup>	10.21	3.16	15.46	-0.64	0.68	0.21	2.44
Dry Matter (third stage)	B	t.ha <sup>-1</sup>	10.39	6.30	14.33	0.17	-0.83	0.23	2.18
عملکرد	A	t.ha <sup>-1</sup>	4.93	2.56	6.77	-0.31	-0.35	0.19	0.97
(yield)	B	t.ha <sup>-1</sup>	5.10	1.74	6.63	-1.11	1.68	0.20	1.06

با رسم نیم‌تغییرنما مشاهده شد که مدل‌های مناسب به خوبی برازش یافتند و نحوه برازش بیانگر وجود سهم بیش‌تر تغییرات ساختاردار (تفاضل سقف و اثر قطعه‌ای) از کل تغییرات مکانی نسبت به تغییرات بدون ساختار (اثر قطعه‌ای) بود.

با بررسی نسبت اثر قطعه‌ای به سقف در کل متغیرهای مورد بررسی، نتایج بیانگر همبستگی مکانی متوسط و مناسب برای این متغیرها بود به‌نحوی که تغییرات نسبت اثر قطعه‌ای به سقف برای تمام متغیرها بین ۰/۳۲ تا ۰/۳۶ بود.

نتایج ارزیابی نقشه‌های پوشش گیاهی بدست آمده از زمین‌آمار نشان داد در بین انواع مدل‌ها جهت پهنه‌بندی متغیرهای مورد بررسی بر اساس مقایسه میزان خطای برآورد، مدل‌های نمایی، کروی، دایره‌ای، گوسی و K-Bessel مدل‌های برتر در ۱۲ مورد درون‌یابی شدند (جدول ۴).

نتایج بدست آمده با یافته‌های برخی محققان هم‌سویی داشت. بیرل و همکاران (۱۹۹۶) مدل‌های نمایی و کروی را جهت درون‌یابی بهتر داده‌های عملکرد استفاده نمودند (۸). نتایج پژوهش بورنان و همکاران (۲۰۰۴) مدل کروی را مدل مناسب جهت درون‌یابی عملکرد نشان داد (۹). پرینگل و برانتی (۲۰۰۴) نیز مدل نمایی را مدل مناسب جهت درون‌یابی عملکرد گندم مطرح نمودند (۳۳). سالس و همکاران (۲۰۰۷) نیز در پژوهش خود جهت برآورد زیست‌توده جنگلی از مدل‌های گوسی و کروی

کمک گرفتند (۳۸). زارع ایبانه (۲۰۱۲) نیز مدل‌های دایره‌ای و نمایی را مدل‌های مناسب جهت تهیه نقشه عملکرد انتخاب کرد (۵۰). کاسا و کاستریگونانو (۲۰۰۸) مدل گوسی را مدل مناسب برآورد عملکرد تشخیص دادند (۱۲). کولیالی و همکاران (۲۰۰۸) نیز مدل گوسی را مدل مناسب جهت افزایش دقت درون‌یابی زیست‌توده جنگلی انتخاب کردند (۱۳).

جدول ۴: روش‌های کریجینگ برگزیده جهت تهیه نقشه پوشش گیاهی با روش زمین‌آمار و مقادیر خطای برآورد مربوط به هر نقشه.

Table 4. Selected Kriging methods to provide vegetation cover maps using geostatistics method and estimated error for each given map.

متغیر Variable	روش درون‌یابی Interpolation method	مدل برتر Selected model	میانگین مطلق خطا MAE	میانگین اریب خطا MBE	ریشه دوم میانگین مربعات خطا RMSE
LAI (مرحله اول)	معمولی (Ordinary)	دایره‌ای (Circular)	0.412	-0.063	0.463
LAI (first stage)	فصلی (Disjunctive)	کروی (Spherical)	0.306	0.115	0.364
LAI (مرحله دوم)	جهانی (Universal)	کروی (Spherical)	0.705	0.210	0.888
LAI (second stage)	جهانی (Universal)	دایره‌ای (Circular)	0.456	0.102	0.593
وزن خشک (مرحله اول)	معمولی (Ordinary)	گوسی (Gaussian)	0.338	-0.082	0.357
Dry Matter (first stage)	فصلی (Disjunctive)	نمایی (Exponential)	0.138	0.079	0.187
وزن خشک (مرحله دوم)	فصلی (Disjunctive)	نمایی (Exponential)	0.854	-0.078	1.124
Dry Matter (second stage)	فصلی (Disjunctive)	K-Bessel	0.623	-0.0002	0.756
وزن خشک (مرحله سوم)	جهانی (Universal)	گوسی (Gaussian)	1.603	0.819	1.948
Dry Matter (third stage)	معمولی (Ordinary)	نمایی (Exponential)	1.310	-0.042	1.462
عملکرد	معمولی (Ordinary)	نمایی (Exponential)	0.873	0.498	1.177
(yield)	معمولی (Ordinary)	کروی (Spherical)	0.602	-0.041	0.762

با توجه به جدول (۵) نتایج کار بر روی تصاویر نشان داد که شاخص‌های استخراج شده از تصاویر مربوط به سال‌های قبل (مربوط به تاریخ‌های ۱۹ و ۲۹ آوریل، ۲۸ می و ۶ ژوئن) در هیچ حالتی با متغیرهای گیاهی مورد مقایسه در هیچ سطح آماری قابل قبولی رابطه معنی‌داری نداشتند و استفاده از این نوع تصاویر حتی با اعمال مدیریت و کشت یکسان در مزارع نمی‌تواند به عنوان معرفی از محصول و وضعیت رشد آن در طی فصل رشد مورد استفاده قرار گیرند و به منظور نظارت بر رشد محصول استفاده از تصاویر مربوط به همان سال زراعی ملزم و ضروری است.

همچنین نتایج ارائه شده در جدول ۵ بیانگر رابطه مثبت و معنی‌دار (در سطح ۹۹ درصد) شاخص‌های گیاهی بدست آمده از تصویر مربوط به تاریخ ۳ فروردین ۱۳۹۱ با شاخص سطح برگ و

همچنین وزن خشک اندازه‌گیری شده در همان تاریخ می‌باشد، که گیاه در این تاریخ در انتهای مرحله پنجه‌زنی و ابتدای ساقه رفتن بود. شاخص‌های بررسی شده در این مطالعه به دلیل ماهیت مشترکی که دارند و همگی از باندهای قرمز و مادون قرمز تصاویر بدست آمده‌اند نتایج تقریباً مشابه و یکسانی داشتند و در نشان دادن میزان محصول دارای قابلیت تقریباً یکسانی هستند. ارزانی (۱۹۹۷) معتقد است که شاخص گیاهی NDVI و دیگر شاخص‌هایی که بر مبنای ترکیب باندهای ۳ و ۴ سنجنده TM و طول موج‌های ۰/۶ تا ۰/۷ میکرومتر هستند بیش‌تر به پوشش گیاهی سبز و زیست‌توده حساس هستند (۴).

بروگ و مورتسن (۲۰۰۲) در پژوهش خود دریافتند که شاخص‌های گیاهی RVI، NDVI، DVI و MSAVI با شاخص سطح سبز محصول و تراکم کلروفیل رابطه خوبی داشتند. این ارتباط برای شاخص RVI و شاخص سطح سبز محصول بهترین حالت را داشت (۱۰). سانچز و همکاران (۲۰۰۶) نیز مشاهده نمودند شاخص‌های گیاهی NDVI و RVI بالاترین ضریب همبستگی را با زیست توده گیاهی، محتوای آب و ارتفاع گیاه نشان دادند (۴۰). جعفریان (۲۰۰۸) در پژوهش خود، ترکیب دو باند قرمز و باند مادون قرمز نزدیک و ایجاد شاخص‌های گیاهی NDVI و RVI را به منظور متمایز ساختن پوشش گیاهی استفاده نمود (۲۳). درویش‌زاده و همکاران (۲۰۱۱) شاخص DVI که از باندهای قرمز و قرمز دور بدست می‌آید را به‌عنوان شاخص مطلوب برای تخمین بیوماس گیاهی پیشنهاد کردند (۱۶). یانگ و همکاران (۲۰۰۷) نیز در پژوهش خود دقت بالای شاخص DVI را تایید کردند (۴۸). فریدحسینی و همکاران (۲۰۱۲)، فان و همکاران (۲۰۰۹)، ثنایی‌نژاد و همکاران (۲۰۰۸)، ویس و همکاران (۲۰۰۴)، لیو و همکاران (۲۰۱۲)، جیانگ و همکاران (۲۰۰۵) و اسرار و همکاران (۱۹۸۴) نیز در مطالعات خود دقت بالای شاخص گیاهی NDVI را جهت بررسی پوشش گیاهی گزارش کردند (۱۹، ۱۸، ۳۹، ۴۷، ۲۸، ۲۴ و ۵).

نتایج نشان داد در بین شاخص‌های گیاهی در تصویر ۳ فروردین ۱۳۹۱، حتی شاخص گیاهی DVI که حاصل یک تفاضل ساده می‌باشد (هرچند نسبت به سایر شاخص‌ها قدرت کم‌تری جهت بیان وضعیت سطح برگ و وزن خشک گیاه دارد) همبستگی بالایی با مقدار متغیرهای گیاهی دارد ( $R^2=0/32$ ). در اکثر تصاویر مشاهدات بیانگر نتایج نزدیک شاخص‌های IPVI و MSAVI با شاخص NDVI است. از نتایج بدست آمده نیز می‌توان دریافت که با نزدیک شدن به انتهای فصل رشد میزان ارتباط شاخص‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای با متغیرهای گیاهی کم می‌شود، به‌نحوی که در هیچ کدام از تصاویر اواخر فصل رشد ارتباط معنی‌داری بین شاخص‌ها و متغیرهای گیاهی مشاهده نشد (جدول ۵).

جدول ۵. ضریب همبستگی بین شاخص‌های گیاهی مستخرج از تصاویر و متغیرهای گیاهی و معنی‌داری و غیرمعنی‌داری آن‌ها در اواخر مرحله پنجه‌زنی (مرحله اول)، مرحله تورم غلاف برگ پرچم (مرحله دوم)، اواخر مرحله پر شدن دانه (مرحله سوم) و عملکرد.

Table 5. Correlation coefficients between vegetation indices derived from the images and vegetation variables and their significance in tillering, booting and seed filling stages (as the first to third stages), and yield

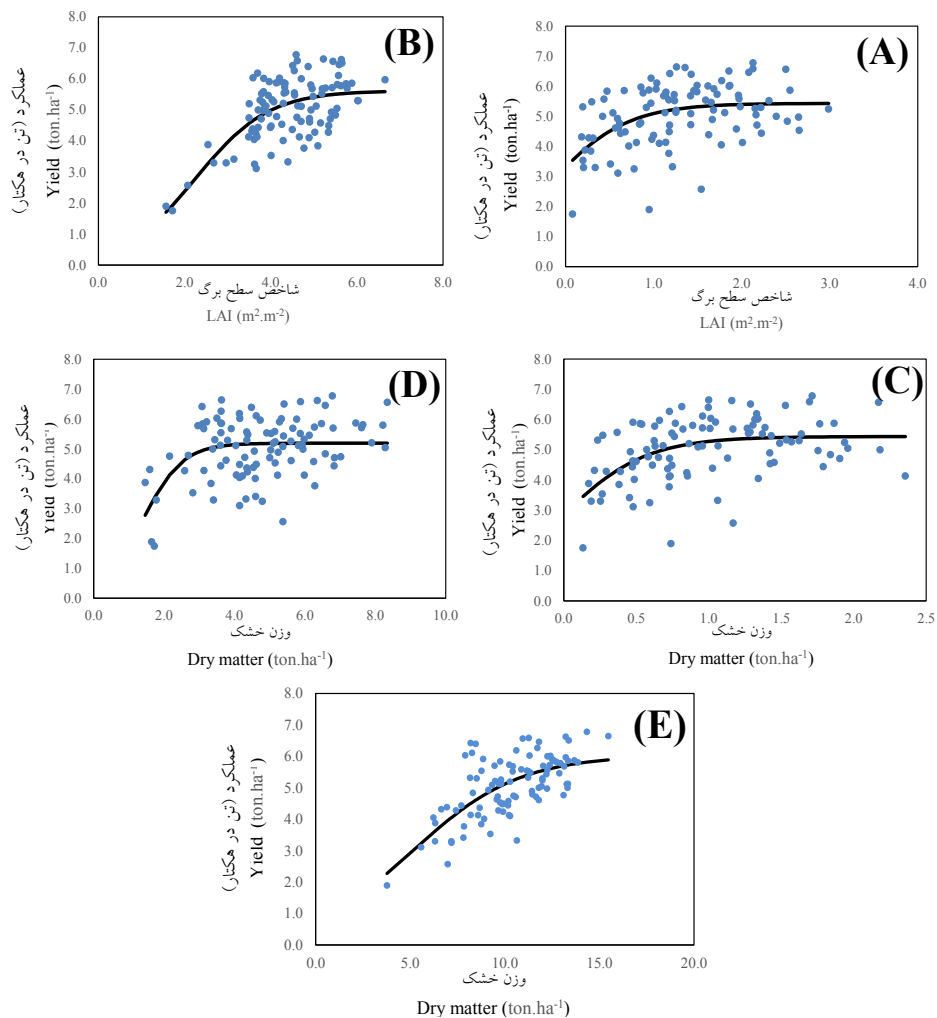
شاخص‌های گیاهی (Vegetation indices)								متغیر گیاهی	تصویر
MSAV I	IPVI	G2	G1	DVI	TVI	NDVI	RVI	Vegetation variable	Image
0.58**	0.58**	0.58**	0.57**	0.53**	0.58**	0.58**	0.56**	ماده خشک مرحله اول Dry matter (first stage)	۲۲ مارس
0.60**	0.60**	0.60**	0.59**	0.57**	0.60**	0.60**	0.58**	شاخص سطح برگ مرحله اول LAI (first stage)	22 March
-0.002 <sup>ns</sup>	-0.002 <sup>ns</sup>	-0.17 <sup>ns</sup>	0.05 <sup>ns</sup>	-0.002 <sup>ns</sup>	0.06 <sup>ns</sup>	-0.002 <sup>ns</sup>	-0.06 <sup>ns</sup>	ماده خشک مرحله دوم Dry matter (second stage)	۱۹ آوریل
-0.04 <sup>ns</sup>	-0.04 <sup>ns</sup>	-0.03 <sup>ns</sup>	-0.02 <sup>ns</sup>	-0.03 <sup>ns</sup>	-0.02 <sup>ns</sup>	-0.04 <sup>ns</sup>	-0.03 <sup>ns</sup>	شاخص سطح برگ مرحله دوم LAI (second stage)	19 April
-0.20 <sup>p</sup>	-0.17 <sup>ns</sup>	-0.15 <sup>ns</sup>	-0.17 <sup>ns</sup>	-0.07 <sup>ns</sup>	-0.17 <sup>ns</sup>	-0.17 <sup>ns</sup>	-0.16 <sup>ns</sup>	ماده خشک مرحله دوم Dry matter (second stage)	۲۹ آوریل
0.10 <sup>ns</sup>	0.11 <sup>ns</sup>	0.07 <sup>ns</sup>	0.15 <sup>ns</sup>	0.14 <sup>ns</sup>	0.10 <sup>ns</sup>	0.11 <sup>ns</sup>	0.17 <sup>ns</sup>	شاخص سطح برگ مرحله دوم LAI (second stage)	29 April
-0.04 <sup>ns</sup>	-0.01 <sup>ns</sup>	-0.06 <sup>ns</sup>	-0.02 <sup>ns</sup>	-0.04 <sup>ns</sup>	-0.03 <sup>ns</sup>	-0.04 <sup>ns</sup>	-0.01 <sup>ns</sup>	ماده خشک مرحله سوم Dry matter (third stage)	۹ می
0.11 <sup>ns</sup>	0.11 <sup>ns</sup>	0.10 <sup>ns</sup>	0.11 <sup>ns</sup>	0.11 <sup>ns</sup>	0.10 <sup>ns</sup>	0.11 <sup>ns</sup>	0.11 <sup>ns</sup>	عملکرد Yield	۲۵ می
-0.04 <sup>ns</sup>	-0.07 <sup>ns</sup>	-0.18 <sup>ns</sup>	0.004 <sup>ns</sup>	-0.03 <sup>ns</sup>	-0.06 <sup>ns</sup>	-0.04 <sup>ns</sup>	0.03 <sup>ns</sup>	عملکرد Yield	۲۸ می
-0.004 <sup>ns</sup>	-0.004 <sup>ns</sup>	-0.03 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>	-0.004 <sup>ns</sup>	-0.01 <sup>ns</sup>	-0.004 <sup>ns</sup>	0.03 <sup>ns</sup>	عملکرد yield	۶ ژوئن

\*\* : معنی‌دار در سطح ۱ درصد. \* : معنی‌دار در سطح ۵ درصد. n.s : عدم تفاوت معنی‌دار.

\*\* : Significant in 1% of probability, \* : Significant in 5% of probability, NS: Non-significant.

شکل (۲) برازش معادله لجستیک پیک را به داده‌های عملکرد در مقابل متغیرهای گیاهی نشان می‌دهد که ضرایب تبیین ارائه شده برازش مناسب این معادله را نشان می‌دهد.





شکل ۲. مدل لجستیک پیک برازش داده شده جهت توصیف بهتر ارتباط بین عملکرد و شاخص سطح برگ در اواخر پنجه‌زنی (A)، شاخص سطح برگ در تورم غلاف برگ پرچم (B)، وزن خشک در اواخر پنجه‌زنی (C)، وزن خشک در تورم غلاف برگ پرچم (D) و وزن خشک در اواخر پر شدن دانه (E).

Figure 2. Fitted logistic peak model to improve description of the relationship between yield and LAI in tillering (A) and booting stages (B) and dry matter in tillering (C), booting (D) and seed filling stage (E).

جدول ۶. روابط خطی استفاده شده جهت محاسبه متغیرهای گیاهی با کمک شاخص‌های بدست آمده از تصاویر.

Table 6. Applied linear relationships to calculate vegetation variables using image-derived indices

معادله Equation	متغیر گیاهی Vegetation variable	شاخص Index	معادله Equation	متغیر گیاهی Vegetation variable	شاخص Index
$y = 2.8872x - 0.1868$	DM1	NDVI	$y = 0.6601x - 0.3631$	LAI1	RVI
$y = 5.4128x - 4.1577$	DM1	TVI	$y = 3.876x - 0.3057$	LAI1	NDVI
$y = 0.0215x - 0.1064$	DM1	DVI	$y = 7.2545x - 5.625$	LAI1	TVI
$y = 1.5477x - 1.4293$	DM1	G1	$y = 0.0303x - 0.2723$	LAI1	DVI
$y = 3.4829x - 1.2125$	DM1	G2	$y = 2.0883x - 1.9903$	LAI1	G1
$y = 5.7743x - 3.0739$	DM1	IPVI	$y = 4.6559x - 1.6701$	LAI1	G2
$y = 1.9321x - 0.1866$	DM1	MSAVI	$y = 7.752x - 4.1817$	LAI1	IPVI
$y = -1.5407x + 5.8641$	DM2	MSAVI	$y = 2.5943x - 0.3057$	LAI1	MSAVI
			$y = 0.4879x - 0.2202$	DM1	RVI

LAI1: شاخص سطح برگ در مرحله اول، DM1: ماده خشک در مرحله اول و DM2: ماده خشک در مرحله دوم

LAI1, DM1 and DM2: Leaf area index (first stage), dry matter in first and second stages, respectively.

پس از بدست آوردن رابطه بین عملکرد و متغیرهای گیاهی و استفاده از این رابطه در تهیه نقشه عملکرد، این نقشه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج ارزیابی نشان داد که نقشه‌های عملکرد بدست آمده با کمک روش سنجش از دور در مقایسه با نقشه‌های عملکرد بدست آمده با کمک روش زمین‌آمار دقیق‌تر و مناسب‌تر می‌باشند (جدول ۷).

جدول ۷. ارزیابی روش‌های مختلف در برآورد عملکرد گندم در اراضی مزرعه نمونه ارتش استان گلستان.

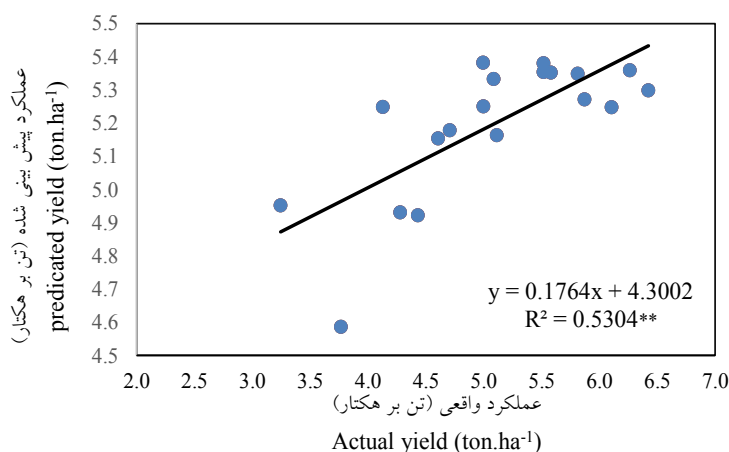
Table 7. Evaluation of different methods used for wheat yield estimation in Armeiy fields of Golestan province.

ضریب همبستگی (Correlation coefficient)	ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)	میانگین اریب خطا (MBE)	میانگین مطلق خطا (MAE)	روش و متغیر مورد استفاده جهت تهیه نقشه عملکرد Applied method and variable for yield maps
0.746**	0.733	0.141	0.599	شاخص RVI و متغیر DM1 (RVI Index and DM1 variable)
0.726**	0.716	0.137	0.589	شاخص NDVI و متغیر DM1 (NDVI Index and DM1 variable)
0.721**	0.718	0.137	0.590	شاخص TVI و متغیر DM1 (TVI Index and DM1 variable)
0.738**	0.747	0.155	0.615	شاخص DVI و متغیر DM1 (DVI Index and DM1 variable)

ادامه جدول ۷.

0.745**	0.725	0.138	0.594	شاخص G1 و متغیر DM1 (G1 Index and DM1 variable)
0.711**	0.717	0.139	0.591	شاخص G2 و متغیر DM1 (G2 Index and DM1 variable)
0.728**	0.716	0.136	0.589	شاخص IPVI و متغیر DM1 (IPVI Index and DM1 variable)
0.728**	0.716	0.136	0.589	شاخص MSAVI و متغیر DM1 (MSAVI Index and DM1 variable)
0.743**	0.732	0.122	0.597	شاخص RVI و متغیر LAI1 (RVI Index and LAI1 variable)
0.733**	0.718	0.119	0.590	شاخص NDVI و متغیر LAI1 (NDVI Index and LAI1 variable)
0.728**	0.715	0.120	0.589	شاخص TVI و متغیر LAI1 (TVI Index and LAI1 variable)
0.737**	0.739	0.130	0.608	شاخص DVI و متغیر LAI1 (DVI Index and LAI1 variable)
0.742**	0.725	0.120	0.593	شاخص G1 و متغیر LAI1 (G1 Index and LAI1 variable)
0.719**	0.720	0.122	0.593	شاخص G2 و متغیر LAI1 (G2 Index and LAI1 variable)
0.733**	0.718	0.119	0.590	شاخص IPVI و متغیر LAI1 (IPVI Index and LAI1 variable)
0.733**	0.718	0.119	0.590	شاخص MSAVI و متغیر LAI1 (MSAVI Index and LAI1 variable)
-0.148 <sup>n.s</sup>	0.849	0.102	0.699	شاخص MSAVI و متغیر DM2 (MSAVI Index and DM2 variable)
0.318 <sup>n.s</sup>	0.800	0.032	0.604	زمین آمار و متغیر LAI1 (Geostatistics and LAI1 variable)
0.535*	0.722	0.002	0.541	زمین آمار و متغیر DM1 (Geostatistics and DM1 variable)
0.226 <sup>n.s</sup>	0.836	0.158	0.675	زمین آمار و متغیر LAI2 (Geostatistics and LAI2 variable)
0.067 <sup>n.s</sup>	0.844	0.081	0.688	زمین آمار و متغیر DM2 (Geostatistics and DM2 variable)
0.404 <sup>n.s</sup>	0.780	0.122	0.606	زمین آمار و متغیر DM3 (Geostatistics and DM3 variable)

اطلاعات شکل (۳) نشان می‌دهد که در تمام نقشه‌های عملکرد بدست آمده با روش سنجش از دور میزان برآورد عملکرد با میزان عملکرد اندازه‌گیری شده در ۱۹ نقطه تست ارتباط معنی‌دار (در سطح احتمال ۹۹ درصد) دارد. شی و زینگو (۲۰۱۰) نتایج حاصل از سنجش از دور را برای پیش‌بینی منطقه‌ای قابل‌اعتماد پیشنهاد کردند (۴۲). بالاقی و همکاران (۲۰۰۸) نیز در مطالعه خود با استفاده از داده‌های NDVI، عملکرد گندم زمستانه را در سطح استانی با ۸۰ الی ۷۶۲ کیلوگرم خطا برآورد نمودند و میزان خطا در مقیاس ملی را معادل ۷۳۰ کیلوگرم خطا گزارش کردند (۶). پراساد و همکاران (۲۰۰۶) نیز همبستگی بالای مقادیر پیش‌بینی شده با کمک سنجش از دور و مقادیر درون‌یابی شده را برای گیاه ذرت ( $R^2=0.78$ ) و سویا ( $R^2=0.86$ ) گزارش کردند (۳۲). نتیجه ارزیابی نقشه عملکرد تهیه شده با کمک سنجش از دور و وزن خشک در مرحله تورم غلاف برگ پرچم (DM2) بیانگر ضعف این نقشه می‌باشد که این می‌تواند به دلیل وجود اختلاف زمانی در زمان برداشت تصویر و زمان رشد محصول باشد.



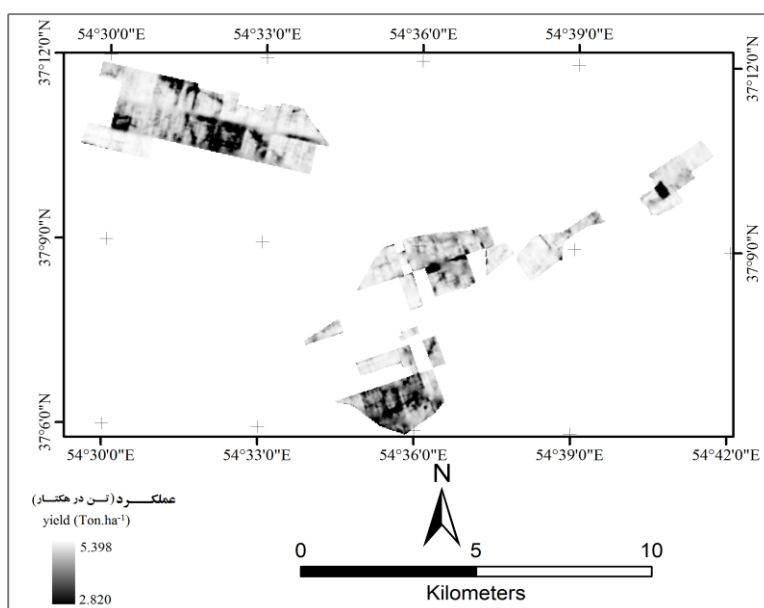
شکل ۳. عملکرد واقعی و پیش‌بینی شده با کمک شاخص TVI و شاخص سطح برگ در ۱۹ نقطه تست.

Figure 3. Actual and predicted yield using TVI index and leaf area index in 19 test points.

نتایج نهایی نشان داد که هرچند عملکرد برآورد شده با کمک نقشه وزن خشک مربوط به مرحله اول نمونه‌برداری (DM1) با کمک روش کریجینگ در سطح احتمال ۹۵ درصد با عملکرد اندازه‌گیری شده ارتباط معنی‌داری داشت اما استفاده از زمین‌آمار در ارتباط با ویژگی‌های گیاهی به دلیل اینکه در مراحل تورم غلاف برگ پرچم و اواخر مرحله پر شدن دانه دقت قابل قبولی ندارد اما در اواخر مرحله پنجه‌زنی در سطح احتمال ۹۵ درصد از دقت قابل قبولی برخوردار است، تنها در اواخر پنجه‌زنی

(نمونه برداری اول) می تواند روشی قابل توصیه به منظور برآورد پیش از موعد عملکرد باشد. هر چند در بین نقشه های عملکرد تهیه شده با کمک زمین آمار، نقشه های مربوط به اواخر مراحل پنجه زنی و پر شدن دانه (LAI1 و DM3) نسبت به نقشه عملکرد تهیه شده با زمین آمار با کمک متغیرهای گیاهی در مرحله تورم غلاف برگ پرچم (DM2 و LAI2) نتایج بهتری داشتند.

بررسی انواع شاخص های گیاهی مورد مطالعه در این پژوهش نشان داد که همه شاخص های مستخرج از تصویر مربوط به تاریخ ۲۲ مارس ۲۰۱۲ (همزمان با اواخر پنجه زنی گیاه گندم) سنجنده +ETM دقت خوبی جهت برآورد عملکرد گیاه گندم در اواخر مرحله پنجه زنی دارند و استفاده از تصاویر منطبق با این دوره و این چنین شاخص های گیاهی مورد مطالعه در این پژوهش جهت تخمین عملکرد گیاه گندم در سطوح وسیع و ۷۰ روز پیش از رسیدن محصول قابل توصیه است. مقایسه نقشه های عملکرد تخمین زده شده از شاخص های مختلف نشان می دهد نقشه عملکرد تهیه شده با کمک شاخص TVI و شاخص سطح برگ در مرحله اول نمونه برداری (شکل ۴) به دلیل خطای کمتر (۰/۷۱۵ RMSE= و MAE=۰/۵۸۹) نسبت به دیگر روش ها و شاخص ها بهترین نقشه عملکرد را ارائه می دهد.



شکل ۴. مناسب ترین نقشه تخمین عملکرد بدست آمده از داده های سنجنش از دور.

Figure 4. The best map for estimated yield acquired from remote sensing data

## نتیجه گیری کلی

نتایج این تحقیق می‌تواند به برنامه‌ریزان مزرعه مورد مطالعه این امکان را بدهد که به راحتی با تهیه تصویر برگزیده (تصویر سنجنده +ETM مربوط اواخر مرحله پنجه‌زنی گندم) در سال‌های بعد و استخراج شاخص برتر (TVI) در اواخر مرحله پنجه‌زنی از عملکرد مزرعه را با دقت قابل قبولی پیش بینی کنند. توجه به واریانس عملکرد (۲/۵۷۸ تن در هکتار) مشاهده شده این نکته را به خوبی آشکار می‌سازد که اکتساب این قبیل اطلاعات می‌تواند کمک شایانی در پیش‌بینی تولید و تخمین بیلان اقتصادی مزرعه داشته باشد. بی‌شک نهادینه کردن این روش‌ها در مقیاس‌های کلان کمک شایانی به برنامه‌ریزان جهت تنظیم بازار و واردات احتمالی محصولات می‌نماید. از سوی دیگر با تهیه این قبیل نقشه‌ها می‌توان میزان خلاء عملکرد احتمالی 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 موثری برداشت.

## منابع

1. Abdi, O., Akbari, H., Soosani, J., and Shirvani, Z. 2009. Comparison of vegetation index in determine of Zagros forests cover density using +ETM data. Geomatic 88 national congress. 9-10 May. National cartographic center in Iran. Tehran. (In Persian)
2. Ahmadi, J., Khatibi, M., Amirshakari, H., and Amini Dehagi, M. 2011. Evaluation of the effective morpho-physiological indices on the yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) using multivariate statistical methods. *Agro. Know. J.* 4:55-66. (In Persian)
3. Alavi-panah, S.K., Matinfar, H.R., and Rafiei emam, A. 2008. Application of Information Technology in Earth Sciences. Tehran University press. 472 p. (In Persian)
4. Arzani, H., King, G., and Froster, B. 1997. Using of TM Landsat satellite data in plant production and cover. *Iran Nat. Res. J.* 1: 3-20. (In Persian)
5. Asrar, G.M., Fuchs, E.T., and Kanemas.1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agr. J.* 76: 300-306.
6. Balaghi, R., Tychon, B., Eerens, H., and Jlibene, M. 2008. Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for the early prediction of wheat grain yields in Morocco. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geo.* 10: 438-452.
7. Bao, Y., Gao, W., and Gao, Z. 2009. Estimation of winter wheat biomass based on remote sensing data at various spatial and spectral resolutions. *Earth Sci.* 3(1):118-128.
8. Birrell, S.J., Sudduth, and K.A., and Borgelt, S.C. 1996. Comparison of sensors and techniques for crop yield mapping. *Comput. Elect. Agr.* 14: 215-233.
9. Bourenane, H., Nicoulaud, B., Couturier, A., and King, D. 2004. Exploring the spatial relationships between some soil properties and wheat yields in two soil types. *Precision Agri.* 5: 521-536.
10. Broge, N.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.

11. Cambardella C.A., Moorman T.B., Novak J.M., Parkin T.B., Karlen D.L., Turco R.F., and Koropaka, A.E. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501-1511.
12. Casa, R., and Castrignano, A. 2008. Analysis of spatial relationships between soil and crop variables in a durum wheat field using a multivariate geostatistical approach. *Eur. J. Agron.* 28: 331-342.
13. Coulibaly, L., Migolet, P., Adegbidi, H.G., Fournier, R., and Hervet, E. 2008. Mapping aboveground forest biomass from IKONOS satellite image and multi-source geospatial data using neural networks and A Kriging interpolation. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. July 6-11. Boston. Massachusetts. U.S.A. 298-301.
14. Crippen, R.E. 1990. Calculating the vegetation index faster. *Remote. Sens. Environ.* 34: 71-73.
15. Dahiya, I.S., Anlauf, R., and Schoen, H.G. 2004. Improved mapping of crop yield and soil properties with the help of Geostatistical techniques: 1. Kriging. *Eurosoil*. September 4-12. Freiburg, Germany.
16. Darvish zadeh, R., Motakan, A.A., and Eskandari, N. 2011. Evaluation of ALOS-AVNIR-2 spectral indices for prediction of rice biomass. *J. Geograph. Land.* 14:61-73. (In Persian)
17. Eldeiry, A.A., and Garcia, L.A. 2012. Management of soil salinity and crop yield using conditional probability maps. 32rd Annual American Geophysical Union Hydrology days. 25 – 27 March. Colorado State University: 52-69.
18. Fan, L., Gao, Y., Brocks, H., and Bernhofer, C. 2009. Investigating the relationship between NDVI and LAI in semi-arid grassland in Inner Mongolia using in-situ measurements. *Theor. Appl. Climatol.* 95: 151-156.
19. Faridhosseini, A., Astaraei, A.R., Sanaeinejad, S.H., and Mirhoseini Moosavi, P. 2012. Estimation of leaf area index using IRS satellite images. *Iran. J. Field Crops Res.* 3: 577-582. (In Persian)
20. Fatemi, B., and Rezaei, Y. 2006. *Basic of Remote Sensing*. Azade publication. 257 p. (In Persian)
21. Fazeli Rostam poor, M. 2010. *Statistical Analysis Using SAS*. Sepehr publication. First printing. 333 p. (In Persian)
22. Houghton, R.A., Lawrence. K.T., Hackler. J.L., and Brown. S. 2001. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Glob. Change Biol.* 7: 731-746.
23. Jafarian jeloudar, Z. 2008. *Spatial modeling of rangeland vegetation types using ecological indicators and satellite data*. Ph.D thesis in Rangeland Science. University of Tehran. 192 p. (In Persian)
24. Jiang, J., Suozhong, C., Shunxian, C.A.O., Hongan, W.U., Li, Z., and Hailong, Z. 2005. Leaf area index retrieval based on canopy reflectance and vegetation index in eastern China. *J. Geograph. Sci.* 15: 247-254.
25. Kamali, G.A., Momenzadeh, H., and Vazifeh Doust, M. 2011. Study of wheat yield production over Esfahan province during periods of dry and wet years using MODIS satellite data. *Agroecol. J.* 2: 181-190. (In Persian)
26. Kamkar, B., Jami Al-Alahmadi, M., and Mahdavi-Damghani, A.M. 2012. Quantification of the cardinal temperatures and thermal time requirement of opium

- poppy (*Papaver somniferum* L.) seeds to germinate using non-linear regression models. *Ind. Crops Prod.* 35: 192–198.
27. Kazemi Poshtmasari, H., Tahmasebi Sarvestani, Z., Kamkar, B., Shataei, Sh., and sadeghi, S. 2012. Evaluation of geostatistical methods for estimating and zoning of macronutrients in agricultural lands of Golestan province. *Water Soil Sci.* 22(1):201-218. (In Persian)
  28. Liu, R., Chen, J.M., Liua, F., Deng, R., and Sunk, D. 2007. Application of a new leaf area index algorithm to China's land mass using MODIS data for carbon cycle Research. *J. Environ. Management.* 85: 649–658.
  29. Mohammadi, J. 2006. *Pedometry (Geostatistic)*. Second volume Spatial Statistics. Pelk press. 554 p. (In Persian)
  30. Mohammadi, J., Shataee, Sh., Habashi, H., and Yaghmaee, F. 2008. Comparison of remote sensing and geostatistics techniques in forest tree density estimation, Case Study Loveh Forests, Gorgan. *J. Agri. Sci. Nat. Res.* 63:10-21. (In Persian)
  31. Pearson, R.L., Tucker, C.J., and Miller, L.C. 1976. Spectral mapping of short grass prairie biomass. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing Journal.* 42: 317-323.
  32. Prasad, A.K., Chai, L., Singh, R.P., and Kafatos, M. 2006. Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.* 8: 26-33.
  33. Pringle, M.J., McBratney, A.B., and Cook, S.E. 2004. Field-scale experiments for site-specific crop management. Part II. Ageostatistical analysis. *Precision Agri.* 5: 625–645.
  34. Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., and Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 48: 119–126.
  35. Qian, B., De Jong, R., Warren, R., Chipanshi, A., and Hill, H. 2009. Statistical spring wheat yield forecasting for the Canadian Prairie provinces. *Agri. Forest Meteorol.* 149: 1022–1031.
  36. Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.W., and Harlan, J.C. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASE/GSFCT Type III final report, Greenbelt, MD, USA.
  37. Rouse, J.W., Schell, J.A., and Deering, D.W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-3511: 309-317.
  38. Sales, M.H., Souza Jr, C.M., Kyriakidis, P.C., Roberts, D.A., and Vidal, E. 2007. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: A case study for Rondonia, Brazil. *Ecol. Modell.* 205: 221–230.
  39. Sanaeinejad, H., Shah Tahmasebi, A.R., Sadr Abadi Haghghi, R., and Kelarestai, K. 2008. A study of spectral reflection on wheat fields in Mashhad using MODIS data. *J.f Sci. Technol. Agri. Nat. Res.* 45:11-19. (In Persian)
  40. Sánchez, N., González, R., Prado, J., Martínez-Fernández, J., and Pérez-Gutiérrez, C. 2006. Estimating vegetation parameters of cereals using an Aster 1A Image. Commission VII, WGVII/1, Spain.
  41. Sawasawa, H.L.A. 2003. Crop yield estimation: integration RS, GIS and management factors. ITC, International Institute for Geo-information science and earth observation enschede, The Netherlands.
  42. Shi, M., and Xingguo, M. 2010. Interpreting spatial heterogeneity of crop yield with a process model and remote sensing. *Ecol. Model.* 222: 2530-2541.



43. Stewart, C.M., McBratney, A.B., and Skerritt, J.H. 2002. Site-specific durum wheat quality and its relationship to soil properties in a single field in Northern New South Wales. *Precision Agri.* 3: 155–168.
44. Torabi, B., Soltani, A., Galeshi, S., and Zeinali, E. 2011. Analyzing wheat yield constraints in Gorgan. *Electronic J. Crop Prod.* 4: 1-17. (In Persian)
45. Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8: 127-150.
46. Utset, A., Lopez, T., and Diaz, M. 2000. A comparison of soil maps, kriging and a combined method for spatially prediction bulk density and field capacity of Ferralsols in the Havana-Matanaz Plain. *Geoderma.* 96: 199-213.
47. Weiss, J.L., Gutzler, D.S., Allred Coonrod, J.E., and Dahm, C.N. 2004. Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico. USA. *J. Arid Environ.* 58: 248–271.
48. Yang, P., Wu, W., Tang, H., Zhou, Q., Zou, J., and Zhang, L. 2007. Mapping spatial and temporal variations of leaf area index for winter wheat in north China. *Agri. Sci. China.* 6(12): 1437-1443.
49. Yue, T.X., Du, Z.P., Song, D.J., and Gong, Y. 2007. A New method of surface modeling and its application to DEM construction. *Geomorphology.* 91: 161–172.
50. Zare abyaneh, H. 2012. Evaluation of artificial neural network and geostatistical methods in estimating the spatial distribution irrigated and dry wheat yield (case study: Khorasan Razavi). *Phys. Geogr. Res. Quar.* 4:23-42. (In Persian)
51. Zhang, H., Chen, H., and Zhou, G. 2012. The model of wheat yield forecast based MODIS-NDVI (A case study of Xinxiang). XXII ISPRS Congress. 25 August–01 September. Melbourne. Australia.

