

پایش خاک‌ورزی حفاظتی و شدت خاک‌ورزی با استفاده از تصاویر زمینی و ماهواره‌ای

محمدعلی رستمی^{۱*} - محمدحسین رئوفت^۲ - عبدالعباس جعفری^۳ - محمد لغوی^۴ - مهدی کسرائی^۵ - سید محمد جعفر ناظم

السادات^۶

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۹۲/۴/۲۵

چکیده

در دست داشتن اطلاعات مربوط به شدت خاک‌ورزی و پوشش بقایای گیاهی در سطح خاک در اعمال سیاست‌گذاری‌های مربوط به ترویج کشاورزی، طراحی و تولید ابزار خاک‌ورزی و ارتقای روش‌های مدیریتی و نظارتی سودمند است. روش‌های مرسوم برای تخمین درصد پوشش بقایای گیاهی و شدت خاک‌ورزی مانند روش توزین بقایا، خط مورب و مقایسه تصاویر، خسته‌کننده و وقت‌گیر بوده و در سطح وسیع قابل استفاده نیستند. این تحقیق به منظور بررسی و یافتن یک روش دقیق و سریع برای پایش مدیریت بقایا و شدت خاک‌ورزی انجام شد. در این مطالعه فن‌آوری تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان یک راهکار سریع و آسان برای تخمین درصد پوشش بقایا در سطح خاک و پایشگر خاک‌ورزی حفاظتی و شدت خاک‌ورزی مورد استفاده قرار گرفت. از این رو توانایی داده‌های تصویر چند طیفی سنجنده WorldView-2 با استفاده از تعداد یازده شاخص طیفی و آنالیز جداسازی طیفی خطی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور در ۹۰ موقعیت از مزارع آزمایشی پلات‌هایی در نظر گرفته شده و در هر پلات چند عکس توسط یک دوربین عکاسی دیجیتالی از سطح مزرعه برداشت شد. درصد پوشش بقایای سطح خاک در هر عکس با روش پردازش تصویر اندازه‌گیری و متوسط داده‌های همه تصاویر به‌عنوان داده زمینی در آن پلات ثبت شد. داده‌های نظیر ماهواره‌ای از تصویر سنجنده WorldView-2 استخراج شده و همبستگی درصد پوشش بقایا در زمین، که با استفاده از پردازش عکس‌های دیجیتالی به‌دست آمده بود با داده‌های تصاویر ماهواره‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد که درصد پوشش بقایا در سطح خاک با شاخص‌های IPVI، RVI1، RVI2 و GNDVI همبستگی مناسبی دارند ($R^2 = 0.74 - 0.81$). درصد پوشش بقایا در سطح خاک که با آنالیز جداسازی طیفی خطی تخمین زده شده بود، با داده‌های به‌دست آمده از عکس‌های زمینی همبستگی مناسبی داشت ($R^2 = 0.75$). دو شاخص طیفی IPVI و RVI1 که دارای بالاترین همبستگی با درصد پوشش بقایا در سطح خاک بودند برای پایش بینی شدت خاک‌ورزی در مزارع مورد مطالعه انتخاب شدند. نتایج نشان داد که دقت طبقه‌بندی شدت خاک‌ورزی به‌کمک این دو شاخص در شرایط مختلف ۷۸ - ۱۰۰ درصد و بنابراین بسیار نزدیک به اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات زمینی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز جداسازی طیفی خطی، تصاویر چند طیفی، تصاویر ماهواره‌ای، خاک‌ورزی حفاظتی، شاخص‌های طیفی

مقدمه

مدیریتی و نظارتی سودمند است. تخمین پوشش بقایا همچنین یک عامل مهم در تخمین جذب کربن توسط خاک، از طریق بهبود روش‌های مدیریت خاک می‌باشد (Lobb et al., 2007). برای اجرای دقیق برنامه‌های علمی و اجرایی و پیش‌بینی شرایط در آینده، برنامه‌ریزی و ارزیابی آثار آن‌ها در کشاورزی حفاظتی یک روش دقیق، مؤثر و سریع برای پایش مدیریت بقایا و شدت خاک‌ورزی در زمین‌های زراعی لازم است. روش‌های مرسوم برای بررسی میزان پوشش بقایای گیاهی در سطح خاک و شدت خاک‌ورزی در زمین‌های زراعی مانند روش توزین بقایا، مقایسه تصاویر و خط مورب بسیار وقت‌گیر، هزینه‌بر و مشقت‌آور بوده و در سطح وسیع کارایی ندارند. سنجش از دور علم، فن و هنر کسب اطلاعات در مورد پدیده‌ها بدون تماس با آن‌ها بوده و ما را به‌خوبی در جایگاهی فراتر از

در دست داشتن اطلاعات مربوط به شدت خاک‌ورزی و پوشش بقایای گیاهی در سطح خاک در اعمال سیاست‌گذاری‌های مربوط به ترویج کشاورزی، طراحی و تولید ابزار خاک‌ورزی و ارتقای روش‌های

۱- استادیار پژوهش بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمان

*- نویسنده مسئول: (Email: marostamy@yahoo.com)

۲ و ۴- استاد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۳ و ۵- استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۶- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

بقایای سطح زمین استفاده شود. در این روش ابتدا از ارتفاع ۲/۵ متری به وسیله یک دوربین عکاسی دیجیتال، عکس‌هایی از سطح زمین و بقایا تهیه شد. عکس‌ها با الگوریتم‌های طراحی شده در نرم افزار MATLAB پردازش شدند. نتایج نشان داد که در مورد بقایای ذرت و کلزا معیار انتخاب شده یعنی دو شاخص 2G-R-B و $(R-G)/(R+G)$ می‌تواند شاخص مناسبی جهت تخمین وزنی بقایا باشند (Jafari et al., 2010).

با توجه به اینکه در کشور ما روش‌های مبتنی بر استفاده از سنسجس از دور برای پایش خاک‌ورزی حفاظتی ارائه نشده است، هدف از این تحقیق تعیین روابطی برای پایش خاک‌ورزی حفاظتی به کمک تخمین درصد پوشش بقایا در سطح خاک و تعیین شدت خاک‌ورزی مزارع گندم با استفاده از تصاویر سنجنده WorldView-2 می‌باشد. بدین صورت بدون مراجعه به مزرعه و از طریق تصاویر این سنجنده می‌توان وضعیت پوشش بقایا و شدت خاک‌ورزی را در مزارع موردنظر بررسی و داده‌های به دست آمده را در مطالعات علمی، برنامه‌ریزی اجرایی، پیش‌بینی شرایط در آینده، اعمال سیاست‌گذاری‌های مربوط به ترویج کشاورزی، طراحی و تولید ابزار خاک‌ورزی، ارتقای روش‌های مدیریتی مفید و پایش میزان موفقیت برنامه‌های در دست اجرا به کار گرفت. هم‌اکنون در کشور ما جوایز نقدی برای اجرای خاک‌ورزی حفاظتی و جرایم نقدی برای سوزاندن هر هکتار بقایای گیاهی در مزارع کشاورزی در نظر گرفته شده و پایش مزارع به کمک سنسجس از دور کمک شایان توجهی به کاهش هزینه‌ها، افزایش سرعت و مستندسازی برای اعمال این سیاست می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به منظور پایش خاک‌ورزی حفاظتی (از طریق تخمین درصد پوشش بقایای گیاهی در سطح خاک) و تعیین شدت خاک‌ورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده WorldView-2 انجام شد. بدین منظور در ۹۰ مزارع آزمایشی پلات‌هایی در نظر گرفته شده و در هر پلات چند عکس توسط یک دوربین عکاسی دیجیتالی معمولی از سطح مزرعه برداشت شد. درصد پوشش بقایای سطح خاک در هر عکس با روش پردازش تصویر اندازه‌گیری و متوسط درصد پوشش بقایا در همه تصاویر به عنوان درصد پوشش بقایا در آن پلات ثبت شد. شکل ۱ مراحل مختلف این روش را نشان می‌دهد. سپس همبستگی درصد پوشش بقایا در پلات‌های آزمایشی با داده‌های تصاویر ماهواره‌ای شامل شاخص‌های طیفی و داده‌های آنالیز جداسازی طیفی خطی بررسی شد. در صورت وجود همبستگی مناسب درصد بقایای گیاهی در سطح مزرعه به صورت تابعی از شاخص‌های یاد شده یا داده‌های آنالیز جداسازی طیفی خطی بیان شد.

محدودیت‌های توانایی انسان قرار می‌دهد. این فن‌آوری جمع‌آوری اطلاعات در مناطقی را فراهم می‌کند که به دلیل هزینه زیاد، بعد مسافت و خطرناک بودن، انسان نمی‌تواند به‌طور مستقیم آن‌ها را شناسایی کند. خاصیت تکرار پذیری اطلاعات ماهواره‌ای از ویژگی‌های مهم این اطلاعات برای بررسی تغییرات پدیده‌های زمینی و کنترل آن‌ها می‌باشد (Darvishsefat et al., 2005).

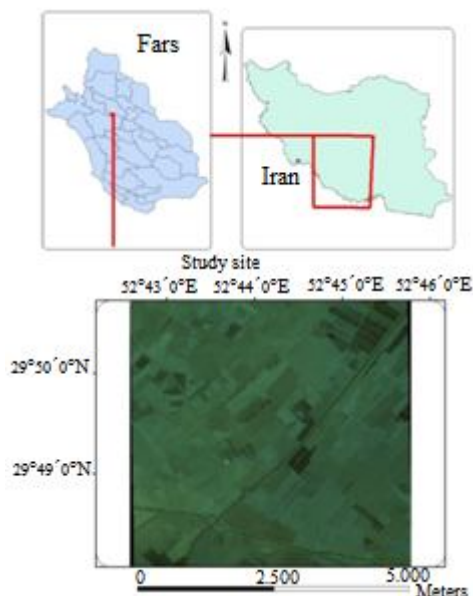
در کنار استفاده از شاخص‌های طیفی، فن‌آوری‌های طبقه‌بندی طیفی مانند آنالیز جداسازی طیفی خطی^۱ یک راه‌کار برای تخمین درصد سطحی عوارض مختلف موجود در یک تصویر ماهواره‌ای است. به‌طور کلی با استفاده از این آنالیز، که یک مدل فیزیکی است، می‌توان میزان سطحی که هر یک از عارضه‌های موجود در یک پیکسل از تصویر به‌خود اختصاص داده‌اند را تخمین زد. برخلاف شاخص‌ها که معمولاً از اطلاعات طیفی دو باند تصویر استخراج می‌شوند، آنالیز جداسازی از اطلاعات طیفی همه باندهای تصویر برای تعیین مقدار یک عارضه نسبت به سایر عارضه‌های موجود در سطح زمین (خاک، بقایای گیاهی و گیاه سبز) استفاده می‌کند (Adams et al., 1995).

در یک پژوهش چندین شاخص از تصاویر چند طیفی سنجنده ETM ماهواره Landsat و فراطیفی اسپکترومتر EO-1 برای تعیین شدت خاک‌ورزی در سه سطح شامل خاک‌ورزی شدید (بقایای سطحی کمتر از ۱۵ درصد)، کم خاک‌ورزی (بقایای گیاهی ۳۰-۱۵ درصد) و خاک‌ورزی حفاظتی (بقایای سطحی بیش از ۳۰ درصد) محاسبه شدند. بر اساس اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای، شدت خاک‌ورزی به کمک تصاویر ماهواره‌ای در ۶۸-۶۶ درصد از مزارع به صورت صحیح تعیین شد. صحت پیش‌بینی شدت خاک‌ورزی در دو گروه خاک‌ورزی مرسوم (خاک‌ورزی شدید به‌علاوه کم خاک‌ورزی) و خاک‌ورزی حفاظتی به ۸۲-۸۰ درصد رسید (Daughtry et al., 2006).

اندازه‌گیری میزان بقایای گیاهی سطح زمین یکی از نیازهای اساسی در بسیاری از تحقیقات کشاورزی می‌باشد. به‌عنوان مثال تعیین میزان کارایی ماشین‌های خاک‌ورزی حفاظتی مختلف، در به زیر بردن بقایای گیاهی نیازمند ارائه معیار و محک مناسبی برای مقایسه ماشین‌آلات می‌باشد. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری میزان بقایای گیاهی وجود دارد (از جمله روش خط قطری، وزن کردن و غیره) ولی تمامی این روش‌ها بسیار وقت‌گیر و در عین حال به شدت متأثر از خطاهای انسانی می‌باشند. در یک پژوهش برای اندازه‌گیری درصد پوشش بقایای سطح خاک بر اساس روش پردازش تصاویر، معیار جدیدی معرفی شد. این معیار که در واقع استفاده از شاخص‌های طیفی بود می‌تواند به دور از خطاهای انسانی برای تخمین درصد

1- Linear spectral unmixing analysis (LSUA)

انتخاب شدند که در آن‌ها، پس از برداشت محصول گندم، مدیریت متفاوت بقایای محصول و خاک‌ورزی اجرا شده بود، بدین صورت در مزارع انتخاب شده درصد پوشش بقایا و روش‌های مختلف خاک‌ورزی وجود داشت.



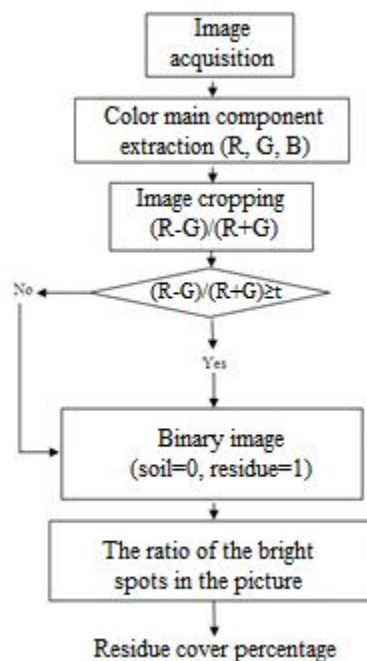
شکل ۲- موقعیت منطقه مطالعاتی، شیراز، مروداشت

Fig.2. Study site, Shiraz, Marvdasht

اندازه‌گیری درصد پوشش بقایا در پلات‌های آزمایشی

اندازه‌گیری درصد پوشش بقایای گیاهی در سطح مزارع آزمایشی در ۹۰ موقعیت انجام شد. محل‌هایی که برای اندازه‌گیری درصد پوشش بقایا در هر مزرعه انتخاب شدند به اندازه کافی از حاشیه مزرعه فاصله داشته و نماینده وضعیت پوشش بقایا در کل مزرعه بودند. ابتدا عکس‌هایی از چند نقطه از هر پلات در ارتفاع ثابت ۲ متر توسط یک دوربین دیجیتالی از نوع Canon IXUS 960IS برداشته شده و با فرمت JPEG ذخیره شدند کیفیت تصاویر این دوربین ۱۲/۱ مگاپیکسل می‌باشد (جدول ۱). مختصات جغرافیایی پلات آزمایشی و محل عکس‌برداری توسط یک دستگاه GPS با دقت ۲ متر ثبت گردید. هر عکس تقریباً یک قاب $1/5 \times 1/5$ متری از زمین را پوشش می‌دهد که این قاب برای پردازش انتخاب شد.

برای پردازش تصاویر از نرم افزار MATLAB نسخه ۷ و نوار ابزار پردازش تصویر نسخه ۶ و برای جداسازی بقایا از خاک در تصاویر از شاخص $(R-G)/(R+G)$ (R=Red, G=Green, B=Blue) که نسبت به سایر شاخص‌ها عملکرد بهتری در جداسازی بقایای گیاهی دارد استفاده شد (Jafari et al., 2010).



شکل ۱- جدا سازی بقایا و خاک با روش پردازش تصویر

Fig.1. Residue and soil segmentation with image processing method

برای تعیین شدت خاک‌ورزی از شاخص‌هایی که بالاترین همبستگی را با درصد پوشش بقایا در سطح خاک داشتند استفاده شد. برای این کار نموداری ترسیم گردید که با استفاده از آن، بدون مراجعه به مزرعه و تنها با محاسبه شاخص‌های طیفی از تصاویر ماهواره‌ای، می‌توان شدت خاک‌ورزی را در مزارع تعیین نمود. این کار به روش زیر انجام گردید:

خصوصیات محل آزمایش

آزمایش‌ها در مزارع گندم به مساحت ۲۵ کیلومتر مربع در شهرستان مروداشت واقع در ۳۰ کیلومتری شمال شیراز انجام شد (۲۹ درجه و ۴۹ دقیقه و ۲۵/۴۳ ثانیه شمالی، ۵۲ درجه و ۴۵ دقیقه و ۱/۴۰ ثانیه شرقی). شکل ۲ موقعیت منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. کشاورزان منطقه برای خاک‌ورزی مزارع از انواع مختلف ابزار و روش‌های خاک‌ورزی شامل گاوآهن برگردن‌دار، گاوآهن قلمی، خاک‌ورز مرکب (چیزل + پکر) و انواع هرس بشقابی و ماله استفاده می‌کنند. اندک زمانی پس از برداشت گندم، استفاده از ابزارهای مختلف خاک‌ورزی، تعداد عبور ماشین‌ها، مدیریت بقایا و چرای گوسفندان باعث می‌شود گستره وسیعی از درصد پوشش بقایا در سطح مزرعه مشاهده شود. در تحقیق حاضر مزارع آزمایشی به‌گونه‌ای

جدول ۱ - مشخصات دوربین دیجیتالی (Canon IXUS 960IS)

Table 1- Digital camera specification (Canon IXUS 960IS)

نوع Type	پیکسل Pixel	فاصله کانونی Focal length	بزرگنمایی Zoom	سرعت Speed	عکس‌برداری پیوسته Continuous shooting	اندازه تصویر Image size
1/1.7" CCD	12.1M	7.7-28.5 mm	Optical (3.7x) Digital (4x)	1/60-1/1600 sec	Approx. 1.5 shots/sec	Max (4000×3000) Min(320×240)

بود، محل اندازه‌گیری‌های زمینی که مختصات آن‌ها توسط یک دستگاه GPS ثبت شده بود در تصویر ماهواره‌ای مشخص گردید. داده‌های بازتاب پیکسل‌هایی از تصویر که در برگ‌برنده پلات‌های آزمایشی بودند با استفاده از نرم افزار ENVI (ENVI Tutorials, 1997) استخراج شد، بنابراین داده‌برداری در تصویر و زمین از نظر مکانی منطبق بر یکدیگر بود. شاخص‌های طیفی مورد مطالعه و داده‌های آنالیز جداسازی طیفی خطی با استفاده از نرم‌افزار ENVI از تصویر WorldView-2 استخراج یا محاسبه شدند. شاخص‌های طیفی مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۳ معرفی شده‌اند.

در ادامه درصد بقایای اندازه‌گیری شده در پلات‌های آزمایشی به صورت تابعی از شاخص‌ها و داده‌های آنالیز جداسازی طیفی خطی بیان شد. دقت این روابط و همبستگی درصد پوشش بقایا در پلات‌های آزمایشی و داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از ضریب همبستگی گشتاوری پیرسون^۳ (R^2) بیان گردید.

آنالیز جداسازی طیفی خطی، انتخاب و استخراج endmember

در این تحقیق برای استخراج endmember خاک و بقایای گیاهی، پلات‌های خالص که شامل خاک بدون بقایا و خاک با پوشش کامل بقایا بودند در مزارع آزمایشی در نظر گرفته شده و مختصات جغرافیایی آن‌ها توسط یک دستگاه GPS ثبت گردید. داده پیکسل‌های تصویر ماهواره‌ای در برگ‌برنده پلات‌های یاد شده، توسط نرم‌افزار ENVI استخراج شده و متوسط داده پیکسل‌ها برای رسم منحنی طیفی خاک و بقایا و به عنوان endmember در آنالیز جداسازی طیفی خطی مورد استفاده قرار گرفت.

طبقه‌بندی شدت خاک‌ورزی

در این تحقیق پوشش بقایا به میزان کمتر از ۱۵ درصد خاک‌ورزی شدید یا مرسوم، ۳۰ - ۱۵ درصد کم خاک‌ورزی، ۶۰ - ۳۰ درصد خاک‌ورزی حفاظتی و بیش از ۶۰ درصد بی خاک‌ورزی تعریف شد (Daughtry et al., 2006).

پس از اعمال شاخص، تصاویر ۸ بیتی با استفاده از روش اوتسو^۱ به تصاویر باینری تبدیل شدند. در انتها درصد پوشش بقایای گیاهی در ۹۰ موقعیت یاد شده از تقسیم سطح بقایای جدا شده از خاک بر مساحت کل عکس محاسبه شده (شکل ۱) و متوسط درصد پوشش بقایای کلیه تصاویر برداشته شده در هر پلات به عنوان درصد پوشش بقایا در آن پلات ثبت گردید. برای جلوگیری از تغییر شرایط مزارع آزمایشی در هنگام تصویر برداری توسط ماهواره، عکس‌برداری با دوربین عکاسی دیجیتالی از سطح پلات‌ها در زمانی نزدیک به زمان تصویر برداری توسط ماهواره انجام شد. زمان گذر و تصویر برداری ماهواره از هر منطقه با استفاده از تقویم مداری ماهواره دقیقاً قابل پیش‌بینی است. درخصوص زمان تصویر برداری ماهواره، از منطقه موردنظر با شرکت فروشنده تصویر هماهنگی شده بود. کلیه مزارع آزمایشی، برای حصول اطمینان از ثابت ماندن شرایط سطحی مزرعه در حین تصویر برداری زمینی و ماهواره‌ای، همه روزه پایش می‌شدند.

محاسبه داده‌های ماهواره‌ای

برای انجام این پژوهش از تصویر ماهواره‌ای سنجنده WorldView-2 استفاده شد (جدول ۲). تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این پژوهش در تاریخ بیستم تیرماه ۱۳۹۱ (۱۰ جولای ۲۰۱۲) از منطقه برداشت شد. این تصویر با ابعاد ۵×۵ کیلومتر کلیه مزارع آزمایشی را در برگرفته و در دو فرمت تک طیفی با قدرت تفکیک زمینی ۰/۵ متر و چند طیفی با قدرت تفکیک ۲ متر، که توسط شرکت DigitalGlobe تصحیحات رادیومتری و هندسی آن انجام شده بود، از این شرکت که صاحب ماهواره‌های Worldview-1, 2, 3 و Quickbird می‌باشد خریداری گردید. اطلاعات و نمایی از تصاویر گرفته شده با این ماهواره ۲ ساعت بعد از برداشت در وبگاه این شرکت قرار گرفته و با دادن مختصات جغرافیایی منطقه مورد نظر قابل دستیابی است (DigitalGlobe, Inc, 2012).

برای استخراج داده‌های نظیر در تصاویر ماهواره‌ای، پس از کنترل زمین مرجع‌سازی^۲ تصویر که توسط شرکت دیجیتال گلوب انجام شده

1- Pearson product moment correlation coefficient

1- Otsu algorithm
2- Georeferencing



شکل ۳- جداسازی بقایا و خاک (روش پردازش تصویر)

Fig.3. Residue and soil segmentation (Image processing method)

جدول ۲- خصوصیات سنجنده و ۴ باند استاندارد تصاویر WorldView-2 (DigitalGlobe Inc, 2012)

Table 2- WorldView-2 sensor and 4 standard bands image specification (DigitalGlobe Inc, 2012)

باند‌های سنجنده Sensor Bands	طول موج (نانومتر) Wavelength (nm)	خصوصیات سنجنده Sensor Specification	
Panchromatic	450 - 800 nm	Launch date	October 8, 2009
Blue	450 - 510 nm	Orbit altitude	770 km
Green	510 - 580 nm	Mission life	10-12 years
Red	630 - 690 nm	Period	100 min
Near infrared	770 - 895 nm	Dynamic range	11-bits per pixel

جدول ۳- اطلاعات شاخص‌های طیفی مختلف مورد استفاده در این مطالعه

Table 3- Information of various spectral indices used in this study

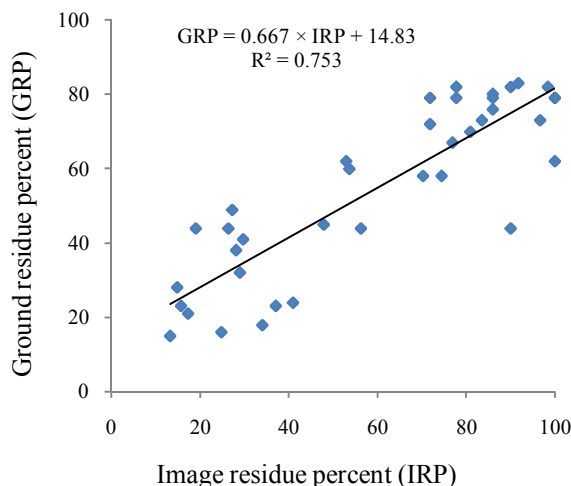
شاخص Index	تعریف Definition	مرجع Reference
MPRI (Modified photochemical reflectance index)	$(G-R)/(G+R)$	Yang <i>et al.</i> (2008)
BNDVI (Blue normalized difference vegetation index)	$(NIR-B)/(NIR+B)$	Yang <i>et al.</i> (2006)
GNDVI (Green normalized difference vegetation index)	$(NIR-G)/(NIR+G)$	Gitelson <i>et al.</i> (1996)
RV11 (Ratio vegetation index 1)	NIR/R	Jordan (1969)
RV12 (Ratio vegetation index 2)	G/R	Jordan (1969)
RV13 (Ratio vegetation index 3)	G/B	Jordan (1969)
IPVI (Infrared percentage vegetation index)	$NIR/(NIR+R)$	Crippen (1990)
DVI (Difference vegetation index)	NIR-Red	Roujean and Breon (1995)
VARI (Visible atmospherically resistant index)	$(G-R)/(G+R-B)$	Kaufman and Tanre (1992)
GRCI (Green residue cover index)	$(G-B)/(G+B)$	This study
BRCI (Blue residue cover index)	$(R-B)/(R+B)$	This study

نتایج و بحث

پس از تعیین درصد پوشش بقایا در پلات‌های آزمایشی توسط عکس‌های دیجیتالی که با استفاده از روش پردازش تصویر انجام شد (شکل ۳)، همبستگی داده‌های به‌دست آمده از این عکس‌ها (داده‌های زمینی) و داده‌های ماهواره‌ای بررسی و درصد پوشش بقایا در سطح مزرعه به‌صورت تابعی از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای ارائه گردید. با توجه به روش تحقیق مراحل ارزیابی داده‌ها به‌صورت زیر انجام شد.

برای طبقه‌بندی شدت خاک‌ورزی با استفاده از دو شاخص که بالاترین همبستگی را با درصد پوشش بقایا در سطح خاک داشتند نموداری برازش گردید که به کمک آن، بدون مراجعه به مزرعه و تنها با محاسبه شاخص‌های طیفی، می‌توان شدت خاک‌ورزی را در چهار سطح خاک‌ورزی شدید، کم خاک‌ورزی، خاک‌ورزی حفاظتی و بی خاک‌ورزی در مزارع تعیین نمود. دقت پیش‌بینی شدت خاک‌ورزی توسط این نمودار در ۳۶ پلات آزمایش شده و نتایج حاصله بررسی گردید.

ماهواره‌ای) محاسبه و همبستگی درصد پوشش بقایا که توسط عکس‌های دیجیتالی محاسبه شده بود و داده‌های شاخص‌های تصویر ماهواره‌ای بررسی گردید. درصد پوشش بقایا در زمین که با روش پردازش تصویر محاسبه شده بود با یک منحنی رگرسیون خطی به صورت تابعی از درصد پوشش بقایا در تصویر ماهواره‌ای بیان شد ($R^2=0.75$) (شکل ۵).



شکل ۵- رابطه بین درصد پوشش بقایا در زمین و تصویر ماهواره‌ای
Fig.5. Relationship between ground and satellite image residue cover percents

بررسی همبستگی شاخص‌های طیفی ماهواره‌ای با درصد پوشش بقایا در زمین (روش پردازش تصویر)

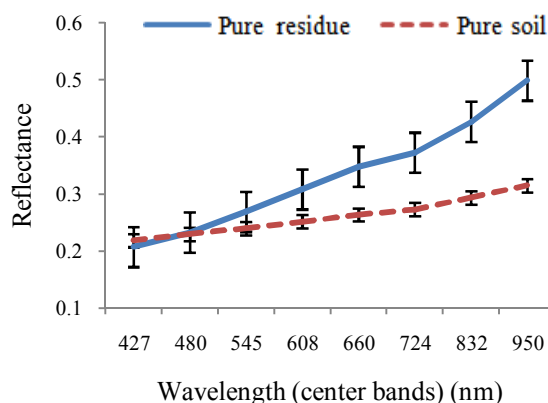
میزان همبستگی شاخص‌های طیفی با درصد پوشش بقایا در مزارع آزمایشی که به وسیله پردازش تصاویر دیجیتالی محاسبه شدند، بررسی شد. نتایج نشان داد که درصد پوشش بقایا که به وسیله پردازش تصاویر دیجیتالی محاسبه شدند با ۷ شاخص RVI3، GRCI، BRCI، VARI، BNDVI، MPRI و DVI از ۱۱ شاخص مورد مطالعه همبستگی ضعیف (جدول ۴)، با ۲ شاخص RVI2 و GNDVI دارای همبستگی متوسط (جدول ۴ و شکل ۶) و با ۲ شاخص RVI1 و IPVI دارای بالاترین همبستگی می باشد (جدول ۴ و شکل ۷). شاخص‌های RVI2، GNDVI، RVI1 و IPVI دارای R^2 بیش از ۰/۷۵ و بالاترین همبستگی مربوط به دو شاخص IPVI و IVI1 با R^2 ۰/۸۱۳ و ۰/۸۰۹ می باشد.

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد تمام شاخص‌هایی که در فرمول آن‌ها داده‌های باند آبی وجود دارد (جدول ۳) همبستگی مناسبی با درصد پوشش بقایا نداشته‌اند، زیرا خاک و بقایای گیاهی در باند آبی دارای بازتاب تقریباً برابری هستند (شکل ۴). بنابراین جداسازی این دو عارضه به کمک شاخص‌هایی که شامل باند آبی هستند راه به جایی نمی‌برد.

بررسی همبستگی داده‌های آنالیز جدا سازی طیفی خطی با درصد پوشش بقایا در زمین (روش پردازش تصویر)

برای شرایط این تحقیق که در مزارع گندم مدتی بعد از برداشت محصول انجام شد. در سطح مزارع آزمایشی دو عارضه مختلف یعنی خاک و بقایا وجود داشت. این دو عارضه باید در تصویر ماهواره‌ای از یکدیگر جدا و نسبت سطحی هر یک تعیین می‌شد. بدین منظور برای هر یک از دو عارضه یاد شده منحنی بازتاب طیفی^۱ از تصویر WorldView-2 استخراج گردید (شکل ۴).

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، طیف بازتاب یافته از خاک و بقایا در باند آبی و سبز تصویر تقریباً بر هم منطبق بوده یا فاصله بسیار کمی باهم دارند، اما در باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک تباین بین طیف بازتاب یافته از خاک و بقایا زیاد می‌باشد. یافته‌های مشابهی توسط پاچیکو و مکنیرن (۲۰۱۰)، پاچیکو و مکنیرن (۲۰۱۱)، بانری و همکاران (۲۰۰۶) برای تصاویر سایر ماهواره‌ها، حتی با قدرت تفکیک مکانی کمتر از تصویر مورد استفاده در این تحقیق گزارش شده است.



شکل ۴- منحنی بازتاب طیفی بقایا و خاک

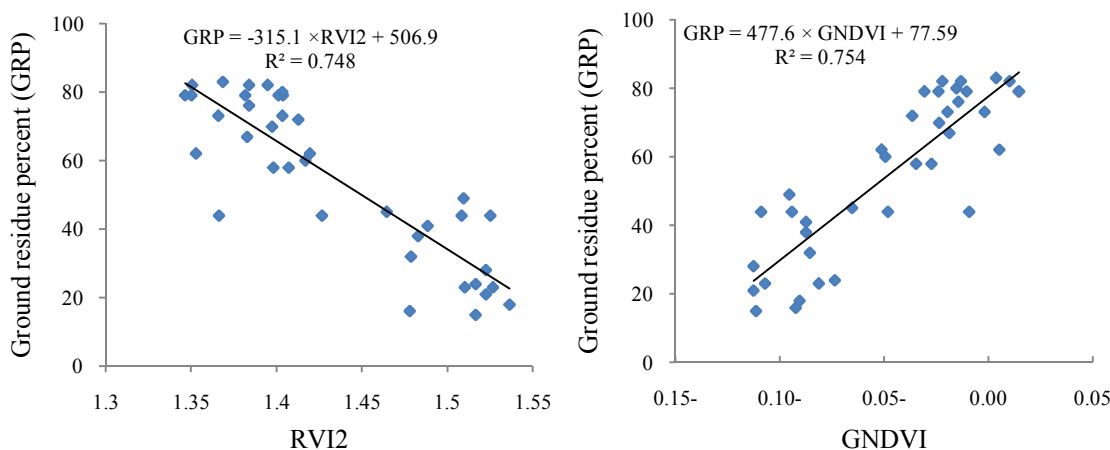
Fig.4. Soil and Residue spectral reflectance curve

نتایج شکل ۴ نشانگر آن است که بقایای گیاهی در باندهای قرمز و به‌ویژه باند مادون قرمز نزدیک نسبت به خاک بازتاب بیشتری دارند. با توجه به این یافته می‌توان دریافت که در صورت استفاده صحیح از آنالیز جداسازی طیفی خطی و انتخاب یا تعریف شاخص‌های طیفی مناسب در باندهای قرمز و به‌ویژه باند مادون قرمز نزدیک تصویر می‌توان بین خاک و بقایای گیاهی موجود در سطح خاک تمایز قابل شد.

منحنی بازتاب طیفی ترسیم شده به‌عنوان endmember خاک و بقایا در نرم افزار ENVI وارد شده و به کمک آنالیز جداسازی طیفی خطی، درصد پوشش بقایا در کلیه پلات‌های آزمایشی (در تصویر

جدول ۴- رابطه بین شاخص‌های طیفی و درصد پوشش بقایا در زمین
Table 4- Correlations of spectral indices data and ground residue cover percent

شاخص Index	معادله رگرسیون خطی Linear regression equation	ضریب تبیین R ²
RVI3	GRP = 234.2 × RVI3 - 348.2	0.194
GRCI	GRP = 867.3 × GRCI - 174.8	0.197
BRCI	GRP = 515.4 × BRCI + 7.014	0.484
VARI	GRP = -514.2 × VARI + 192.9	0.618
BNDVI	GRP = 371.4 × BNDVI - 26.62	0.648
MPRI	GRP = -961.6 × MPRI + 224.2	0.660
DVI	GRP = 3.944 × DVI - 22.27	0.697
RVI2	GRP = -315.1 × RVI2 + 506.9	0.748
GNDVI	GRP = 477.6 × GNDVI + 77.59	0.754
RVII	GRP = 357.4 × RVII - 409.4	0.809
IPVI	GRP = 2112 × IPVI - 1131	0.813



شکل ۶- رابطه بین شاخص‌های طیفی RVI2 و GNDVI با درصد پوشش بقایا در زمین

Fig.6. Relationship between RVI2 and GNDVI spectral indices with ground residue cover percent

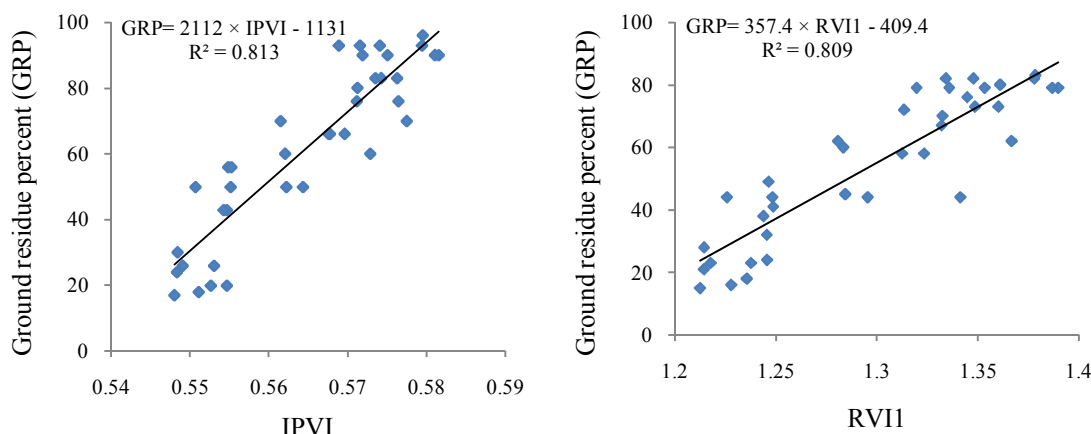
۰/۵۵۲ و ۱/۲۳۵، برای شکل ۸ b (پوشش متوسط بقایا) ۰/۵۶۷ و ۱/۳۱۲ و برای شکل ۸ c (پوشش کامل بقایا) ۰/۵۷۹ و ۱/۳۷۸ بوده است.

طبقه‌بندی شدت خاک‌ورزی

نتایج تحقیق نشان می‌دهد پیکسل‌های تصویر ماهواره‌ای که در برگرفته مزارع آزمایشی با خاک‌ورزی حفاظتی یا بدون خاک‌ورزی هستند دارای متوسط بازتاب بالاتری نسبت به مزارع با خاک‌ورزی کم و شدید بوده‌اند (جدول ۵). بالاتر بودن بازتاب در پیکسل‌های تصاویر مربوط به این مزارع به علت وجود بقایای بیشتر در سطح خاک در مقایسه با دو روش دیگر خاک‌ورزی می‌باشد، زیرا همان‌گونه که از نتایج شکل ۴ مشاهده می‌شود بازتاب پیکسل‌هایی از تصویر که شامل بقایای گیاهی هستند بیش از بازتاب پیکسل‌های شامل خاک می‌باشد. این یافته با نتایج پژوهش‌های وان دوتنر و همکاران (۱۹۹۷) و استونر و همکاران (۱۹۸۰) هم‌راستا می‌باشد.

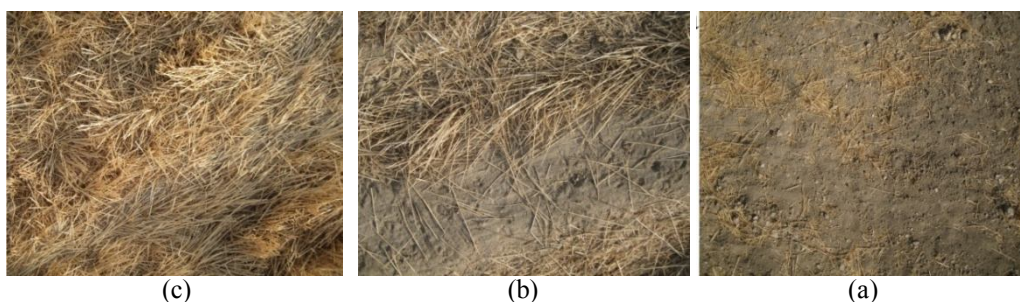
نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد شاخص‌های RVI2 و GNDVI که فرمول آن‌ها شامل باندهای سبز و قرمز می‌باشد (جدول ۳) با درصد پوشش بقایای گیاهی دارای همبستگی متوسط هستند. این نتیجه به خاطر نزدیک بودن بازتاب خاک و بقایا در باند سبز می‌باشد. به‌علت تباین کم بین بازتاب دو عارضه یاد شده تخمین درصد پوشش بقایا با شاخص‌های شامل باند سبز نتایج متوسطی دربردارد. بالاترین تباین بین بازتاب خاک و بقایا در باند مادون قرمز نزدیک و پس از آن باند قرمز می‌باشد (شکل ۴)، بنابراین شاخص‌های IPVI و RVII که با داده‌های این دو باند محاسبه می‌شوند (جدول ۳) به خوبی بین خاک و بقایا تمایز قائل شده و بهترین تخمین را از درصد پوشش بقایای گیاهی داشته‌اند (شکل ۷).

همانگونه که از شکل ۷ مشاهده می‌شود وقتی درصد پوشش بقایا افزایش می‌یابد مقدار شاخص‌های IPVI و RVII نیز افزایش می‌یابد. این نتیجه در شکل ۸ به صورت دیداری قابل مشاهده است. مقدار این دو شاخص برای شکل ۸ a (پوشش کم بقایا) به ترتیب



شکل ۷- رابطه بین شاخص‌های طیفی IPVI و RVII با درصد پوشش بقایا در زمین

Fig.7. Relationship between IPVI and RVII spectral indices with ground residue cover percent



شکل ۸- تصاویری از سطح مزارع آزمایشی با (a) پوشش کم، (b) متوسط، (c) کامل

Fig.8. Photographs of the surface of experimental plots with (a) Sparsely, (b) Partially and (c) Fully covered residue

جدول ۵- متوسط داده‌های بازتاب برای هر گروه از شدت خاک‌ورزی

Table 5- Mean reflectance data for each category of tillage intensity

شدت خاک‌ورزی Tillage intensity	باند ۱ Band 1	باند ۲ Band 2	باند ۳ Band 3	باند ۴ Band 4
خاک‌ورزی شدید Intensive tillage	49.7	82.2	54.2	65.7
خاک‌ورزی کم Reduced tillage	51.0	84.9	55.9	68.0
خاک‌ورزی حفاظتی Conservation tillage	53.0	90.2	62.1	79.4
بی خاک‌ورزی No till (NT)	53.7	93.5	67.6	91.1

دارای بالاترین همبستگی با درصد پوشش بقایا در سطح خاک هستند برای چهار گروه شدت خاک‌ورزی آورده شده است. نتایج مقایسه میانگین شاخص‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ نشان می‌دهد که بین میانگین این شاخص‌ها در چهار گروه از شدت خاک‌ورزی اختلاف معنی‌دار وجود دارد. وجود همین اختلاف معنی‌دار بین داده‌های شاخص‌ها در مزارع با شدت خاک‌ورزی مختلف

متوسط بازتاب کلیه باندهای تصویر در مزارع آزمایشی با خاک‌ورزی حفاظتی به ترتیب ۹/۵ و ۱۳/۱ درصد بالاتر از مزارع با خاک‌ورزی کم و شدید بوده و برای بی خاک‌ورزی متوسط بازتاب به ترتیب ۱۷/۵ و ۲۱/۴ درصد بیش از خاک‌ورزی کم و شدید بوده است (جدول ۵).

در جدول ۶ مقایسه میانگین‌های دو شاخص IPVI و RVII که

استفاده از عکس‌های دیجیتالی معمولی و پردازش تصاویر اندازه‌گیری و نتایج حاصله با داده‌های نظیر آن‌ها که توسط شکل ۹ پیش‌بینی شده است مقایسه گردید (جدول ۷). در این جدول هنگامی که شدت خاک‌ورزی با استفاده از دو شاخص RVI1 و IPVI برای یک مزرعه در مرز بین دو روش خاک‌ورزی قرار می‌گیرد نمی‌توان با اطمینان یکی از این دو شدت خاک‌ورزی را برای مزرعه مورد بررسی انتخاب کرد، به چنین پیش‌بینی‌هایی، پیش‌بینی مرزی اطلاق شده است. هنگامی که پیش‌بینی مرزی را به‌عنوان پیش‌بینی صحیح به حساب نیاوریم از آن به‌عنوان پیش‌بینی واقعی و زمانی که آن را به‌عنوان پیش‌بینی صحیح به حساب آوریم به‌عنوان پیش‌بینی کلی نام برده شده است.

باعث می‌گردد که بتوان شدت خاک‌ورزی هر مزرعه را در تصویر WorldView-2 با استفاده از شاخص‌های IPVI و RVI1 تعیین کرد.

برای این کار شکل ۹ به‌منظور پیش‌بینی شدت خاک‌ورزی مزارع با استفاده از داده‌های دو شاخص یاد شده برازش شد. بدین ترتیب با در دست داشتن شاخص‌ها، که از تصویر WorldView-2 استخراج می‌شوند بدون مراجعه به مزرعه می‌توان شدت خاک‌ورزی در مزرعه را تعیین کرد.

ارزیابی دقت طبقه‌بندی شدت خاک‌ورزی

برای ارزیابی دقت پیش‌بینی شدت خاک‌ورزی با استفاده از شکل ۹، درصد پوشش بقایای گیاهی در ۳۶ نقطه از مزارع آزمایشی با

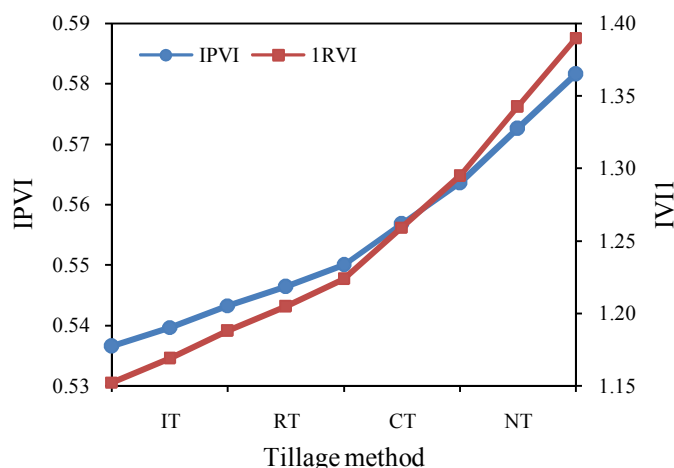
جدول ۶- مقایسه متوسط مقادیر شاخص‌های IPVI و RVI1 در چهار گروه شدت خاک‌ورزی

Table 6- Comparison of mean IPVI and RVI1 indices in four tillage intensity categories

شدت خاک‌ورزی Tillage intensity	متوسط IPVI Mean IPVI	متوسط RVI1 Mean RVI1
خاک‌ورزی شدید Intensity tillage	0.5740 a	1.3480 a*
کم خاک‌ورزی Reduced tillage	0.5603 b	1.2749 b
خاک‌ورزی حفاظتی Conservation tillage	0.5486 c	1.2155 c
بی خاک‌ورزی No tillage	0.5480 d	1.2124 d

* حروف متفاوت در ستون مشابه نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد.

* Different letter in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$).



شکل ۹- طبقه‌بندی شدت خاک‌ورزی با استفاده از شاخص‌های IPVI و RVI1

Fig.9. Tillage intensity classification with IPVI and RVI1 indices

جدول ۷- ارزیابی دقت طبقه‌بندی شدت خاک‌ورزی
Table 7- Validation of tillage intensity classification

بی خاک‌ورزی No tillage	خاک‌ورزی حفاظتی Conservation tillage	کم خاک‌ورزی Reduced tillage	خاک‌ورزی شدید Intensity tillage	شدت خاک‌ورزی Tillage intensity
9	9	9	9	تعداد محل ارزیابی شده Number of location validate
9	9	7	8	تعداد نتیجه منطبق بر اندازه‌گیری در زمین Number of results coincident with ground measurement
-----	-----	1	-----	تعداد نتیجه غیر منطبق بر اندازه‌گیری در زمین Number of results no coincident with ground measurement
-----	-----	1	1 (IT and RT)	طبقه‌بندی مرزی Border classification
100	100	78	89	دقت پیش‌بینی واقعی (بدون نتایج مرزی) Exact prediction accuracy (no boarder)
100	100	89	100	دقت پیش‌بینی کلی (با نتایج مرزی) Overall prediction accuracy

به‌ویژه باند مادون قرمز نزدیک تصویر سنجنده WorldView-2 می‌توان بین خاک و بقایای گیاهی موجود در سطح خاک تمایز قایل شد. در باندهای آبی و سبز تصویر ماهواره‌ای تفاوت بین بازتاب طیفی بقایا و خاک ناچیز می‌باشد، بنابراین همان‌گونه که از این نتیجه انتظار می‌رفت شاخص‌هایی که شامل باندهای آبی و سبز تصویر ماهواره‌ای بودند نتوانستند بین خاک و بقایا تمایز قائل شده و با داده‌های عکس‌های دیجیتال که از سطح پلات‌های آزمایشی برداشته شده بود همبستگی مناسبی نداشتند. درصد پوشش بقایای سطحی که توسط آنالیز جداسازی خطی تخمین زده شده است همبستگی بالایی با درصد پوشش بقایا که در سطح خاک با روش عکس دیجیتال اندازه‌گیری شده است دارد ($R^2=0.75$). درصد پوشش بقایا در سطح خاک که با عکس دیجیتال محاسبه شده بود همچنین با دو شاخص طیفی ماهواره‌ای RVI و IPVI همبستگی بالایی داشت ($R^2=0.81$ و 0.80). با توجه به نتایج حاصله دو شاخص یاد شده برای پیش‌بینی شدت خاک‌ورزی در مزارع انتخاب شده و یک منحنی برای پیش‌بینی شدت خاک‌ورزی استخراج گردید. دقت کلی پیش‌بینی شدت خاک‌ورزی در پلات‌های آزمایشی ۸۹-۱۰۰ درصد بود.

نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که دقت پیش‌بینی شدت خاک‌ورزی به کمک شکل ۹، یعنی استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای، بسیار نزدیک به اندازه‌گیری‌ها در سطح مزرعه می‌باشد. در پیش‌بینی‌های مرزی توسط شکل ۹، در خصوص تصمیم‌گیری تردید وجود دارد. برای مثال هنگامی که مقدار شاخص IPVI برابر 0.55 می‌باشد شدت خاک‌ورزی پیش‌بینی شده توسط شکل ۹ در مرز خاک‌ورزی کم و شدید می‌باشد. در این موارد مراجعه به نتایج شکل ۷ که درصد پوشش بقایا را با دقت تعیین می‌کند به اطمینان بخشی در پیش‌بینی کمک می‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که بقایای گیاهی محصول گندم در گستره مورد مطالعه (۴۵۰-۸۹۵ nm) دارای بازتاب طیفی بیشتری نسبت به خاک هستند. تباین بین بازتاب طیفی بقایا و خاک خصوصاً در باند مادون قرمز نزدیک قابل توجه می‌باشد. با توجه به این یافته می‌توان دریافت که در صورت استفاده صحیح از آنالیز جداسازی طیفی خطی و انتخاب یا تعریف شاخص‌های طیفی مناسب در باندهای قرمز و

منابع

- Adams, J. B., D. E. Sabol, V. Kapos, R. A. Filho, D. A. Roberts, and M. O. Smith. 1995. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: Application to land-cover change in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment* 52: 137-154.
- Bannari, A., A. Pacheco, K. Staenz, H. McNairn, and K. Omari. 2006. Estimating and mapping crop residues cover on agricultural lands using hyperspectral and IKONOS data. *Remote Sensing of Environment* 104: 447-459.
- Crippen, R. E. 1990. Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment* 34: 71-73.

4. Darvishsefat, A. A., M. Pir Bavaghar, and M. Rajab-Pourrahmati. 2005. Remote Sensing for GIS Managers. University of Tehran publications, Iran, Tehran. (In Farsi).
5. Daughtry, C. S. T., P. C. Doraiswamy, E. R. Hunt, A. J. Stern, J. E. McMurtry, and J. H. Prueger. 2006. Remote sensing of crop residue cover and soil tillage intensity. *Soil and Tillage Research* 91: 101-108.
6. DigitalGlobe, Inc. 2012. Basic satellite imagery. Available from <http://digitalglobe.com>. Accessed 15 July 2012.
7. ENVI Tutorials. 1997. Better solutions consulting limited liability company. Lafayette, Colorado, USA.
8. Gitelson, A. A., Y. J. Kaufman, and M. N. Merzlyak. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOSMODIS. *Remote Sensing of Environment* 58: 289-298.
9. Jafari, A., V. Asadi, R. Rasekhi, and M. Moradi. 2010. Precise measurement of residue cover by means of image processing techniques. International Conference on Agricultural Engineering. Clermont-Ferrand, France.
10. Jordan, C. F. 1969. Derivation of leaf area index from quality measurements of light on the forest floor. *Ecology* 50: 663-666.
11. Kaufman, Y. J., and D. Tanre. 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOSMODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30: 261-270.
12. Lobb, D. A., E. Huffman, and C. Reicosky. 2007. Importance of information on tillage practices in the modeling of environmental processes and in the use of environmental indicators. *Journal of Environmental Management* 82: 377-387.
13. Pacheco, A., and H. McNairn. 2010. Evaluating multispectral remote sensing and spectral unmixing analysis for crop residue mapping. *Remote Sensing of Environment* 114: 2219-2228.
14. Pacheco, A., and H. McNairn. 2011. Mapping crop residue cover over regional agricultural landscapes in Canada. Available from <http://www.isprs.org/proceedings/2011/isrse-34/211104015Final00921.pdf>. Accessed 19 September 2012.
15. Roujean, J. L., and F. M. Breon. 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment* 51 (3): 375-384.
16. Stoner, E. R., M. F. Baumgartner, R. A. Weismiller, L. L. Biehl, and B. F. Robinson. 1980. Extension of laboratory measured soil spectra to field conditions. *Soil Science Society of America Journal* 44: 572-574.
17. Van Deventer, A. P., A. D. Ward, P. H. Gowda, and J. G. Lyon. 1997. Using thematic mapper data to identify contrasting soil plains and tillage practices. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63: 87-93.
18. Yang, Z., P. Willis, and R. Mueller. 2008. Impact of band ratio enhanced a WIFS image to crop classification accuracy. *Pecora 17. The Future of Land Imaging...Going Operational*, Denver, Colorado.
19. Yang, C., J. H. Everitt, and J. M. Bradford. 2006. Comparison of QuickBird satellite imagery and airborne imagery for mapping grain sorghum yield patterns. *Precision Agriculture* 7: 33-44.