

برآورد شاخص‌های پوشش گیاهی برنج با تصاویر چندزمانه راداری و اپتیک

میرمسعود خیرخواه زرکش - استادیار دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات
مهدی درویشی* - کارشناس ارشد سنجش از دور، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات
علی اکبر آبکار - استادیار دانشکده مهندسی ژئوماتیک، گروه سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
غلامرضا احمدی - دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۱۷ تأیید نهایی: ۱۳۹۲/۱۱/۲۶

چکیده

قابلیت‌ها و توانایی‌های تصویربرداری راداری در بخش تکنولوژی تصویربرداری مایکروویو چشمگیر است. طبقه‌بندی، تشخیص و پایش محصولات زراعی به کمک سنجش از دور، امروزه به یکی از بخش‌های مهم در مدیریت کشاورزی تبدیل شده است. به سبب وجود مشکلات تصاویر اپتیک در مناطق شمالی کشور (به سبب وجود ابر) و ناکارآمدی روش‌های سنتی استفاده از باند مرئی و مادون قرمز و همچنین با توجه به کوچک بودن اندازه قطعات شالی‌های برنج، تصاویر راداری SAR (رادار روزنه مصنوعی) با قابلیت‌های خاص خود (نفوذپذیری در هر شرایط آب‌وهوایی)، می‌توانند جایگزین (یا مکمل) مناسبی برای برآورد شاخص پوشش‌های گیاهی محصول برنج باشند. در پژوهش پیش رو با استفاده از تصاویر چندزمانه اپتیک و راداری که در سه مرحله نشاء، داشت و برداشت در منطقه بهشهر استان مازندران انجام گرفت، به بررسی و مقایسه پنج شاخص پوشش گیاهی محصول برنج در تصاویر اپتیک لندست با ضریب پراکندگی راداری ماهواره رادارست-۱، در پلاریزاسیون HH پرداخته شده است. در این پژوهش، یک مدل ریاضی رگرسیون خطی با ضریب همبستگی ارائه شد و این نتیجه به دست آمد که شاخص پوشش گیاهی NDVI با ضریب همبستگی ۰/۹۲ و شاخص SR با ضریب همبستگی ۰/۸۶، به ترتیب دارای بالاترین ضریب همبستگی با ضریب پراکندگی راداری هستند.

کلیدواژه‌ها: اسپکل (نویز لکه‌ای)، رادار، شاخص پوشش گیاهی، ضریب پراکندگی رادار، فیلتور.

مقدمه

برنج یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی در سبد غذایی مردم جهان است، به گونه‌ای که منبع غذایی بیش از یک سوم جمعیت جهان را تشکیل می‌دهد. برنج در صد و یازده کشور از مختصات جغرافیایی ۵۳ درجه شمالی تا ۴۰ درجه جنوبی

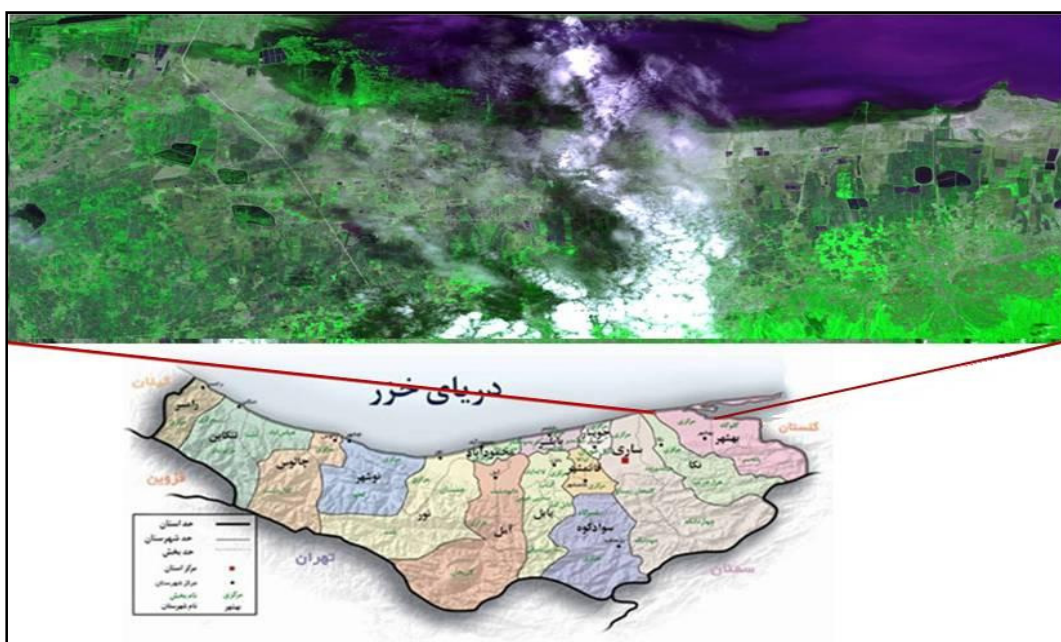
کشت می‌شود (علوی، ۱۳۸۷: ۷۲۶). به طور عمده تولید این محصول در آسیا متمرکز شده است، جایی که محل زندگی حدود ۶۰ درصد جمعیت جهان است و بیش از ۹۰ درصد نیاز جهانی را تأمین و مصرف می‌کند (هاسگاوا و هوری، ۱۹۹۶). گفتنی است که برنج مهم‌ترین محصولی است که در نواحی گرمسیری و معتدل زراعت می‌شود. در ایران نیز، برنج از جایگاه ویژه‌ای در تغذیه مردم برخوردار است؛ به گونه‌ای که سطح زیر کشت این محصول در کل کشور، حدود ۵۶۳۳۸۱ هکتار برآورد شده است (اله‌قلی‌پور و محمد صالحی، ۱۳۸۱: ۱۲). در سال‌های اخیر، دسترسی به تعداد قابل ملاحظه‌ای از داده‌های رادار روزنه مصنوعی (SAR) ^۱ به دست آمده از برخی ماهواره‌ها (ENVISAT/ASAT, ALOS/PALSAR, ERS-1/2, Terra SAR-X و RADARSAT -1/2)، امکان مطالعه روی داده‌های پراکندگی برنج را فراهم آورده است. در دو دهه گذشته، شماری از مدل‌های پراکندگی میکروویوی توسعه داده شده‌اند (انقطاع و الاچی، ۱۹۸۲؛ الابی و همکاران، ۱۹۹۰؛ سان، سیمونت و استراهلر، ۱۹۹۱؛ ونگ، دی و سان، ۱۹۹۳). شاخص‌های فیزیکی ویژه‌ای از گیاهان، به منزله ورودی‌های مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند و مشخصات پراکندگی انواع متنوعی از گیاهان، به کمک این مدل‌ها پیش‌بینی شده است. در چند مطالعه علمی، استفاده از رادار روزنه مصنوعی برای تشخیص انواع محصولات کشاورزی ثابت شده است (الابی، مور و فانگ، ۱۹۸۶؛ بورمن و حکمن، ۱۹۹۳؛ فرازولی، گوریر و اسچیاون، ۱۹۹۹). دقت طبقه‌بندی، به ضرایب پراکندگی بازگشتی متفاوت از ساختارهای زیست فیزیکی گیاه بستگی دارد که متأثر از تفاوت رفتار متقابل بین امواج الکترومغناطیس و ساختار تاج پوشش گیاهی ^۲ است (فرازولی، ۲۰۰۲). مطالعات تجربی نشان داده است که ضریب پراکندگی برنج، به بایومس حساس بوده و اغلب متأثر از شکل و ابعاد اجزای متشکله برنج (برگ‌ها و ساقه‌ها) است (اینویو، کروسو، اراتسوکا و کوزو، ۲۰۰۲). بین ضریب پراکندگی برنج و برخی از شاخص‌های مؤثر در رشد برنج، همبستگی بسیار بالایی وجود دارد که برای مثال می‌توان به شاخص‌های ارتفاع، توده زنده و شاخص سطح برگ (LAI) ^۳ اشاره کرد، اما همبستگی در مراحل مختلف رشد برنج و همچنین پلاریزاسیون‌های مختلف، متغیر است. اینویو در سال ۲۰۰۲، برای تجزیه و تحلیل رابطه بین شاخص‌های برنج و ضرایب پراکندگی آن، تغییرات فصلی پراکندگی برنج را در پنج بسامد تحلیل و مدل ابر ^۴ را به کار بردند. آنها نشان دادند که سطح برگ بهترین همبستگی را با پلاریزاسیون (HH) ^۵ و پلاریزاسیون متقاطع در باند C دارد، در حالی که توده زنده تازه، بهترین همبستگی را با پلاریزاسیون HH و پلاریزاسیون متقاطع باند L دارد. این مطالعه بر آن است که با برقراری رابطه‌ای میان ضرایب پراکندگی راداری و شاخص‌های پوشش گیاهی، به کمک تصاویر راداری در غیاب تصاویر اپتیک، مدلی را برای برآورد شاخص‌های گیاهی مورد نظر ارائه دهد.

منطقه مورد مطالعه

استان مازندران در شمال ایران و در کرانه‌های جنوبی دریای مازندران واقع شده است. شهرستان بهشهر با جمعیت ۱۸۷۱۸۴ نفر و مساحت ۱۴۱۶۲۷ متر مربع یکی از شهرستان‌های استان مازندران است که از شمال به خلیج میانکاله، از

1. Synthetic Aperture Radar (SAR)
2. Vegetation Index
3. Leaf Area Index (LAI)
4. Cloud Model
5. Horizontal-Horizontal (HH)

شرق به شهرستان کردکوی، از جنوب به دامنه‌های البرز و شهرستان دامغان و از غرب به شهرستان ساری و نکا محدود می‌شود. این منطقه به‌طور متوسط دارای ۲۰۰ روز ابری در سال است. شکل ۱ محدوده منطقه مطالعاتی را به‌همراه تصویر لندست آن به نمایش گذاشته است.



شکل ۱. نقشه منطقه مورد بررسی (سواحل بهشهر - استان مازندران)

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از سه تصویر راداری رادارست - ۱ متعلق به کشور کانادا و سه تصویر لندست مربوط به کشور آمریکا استفاده شده است. مشخصات و زمان این تصاویر به‌طور خلاصه در جداول ۱ و ۲ آمده است.

جدول ۱. مشخصات داده‌های لندست^۱

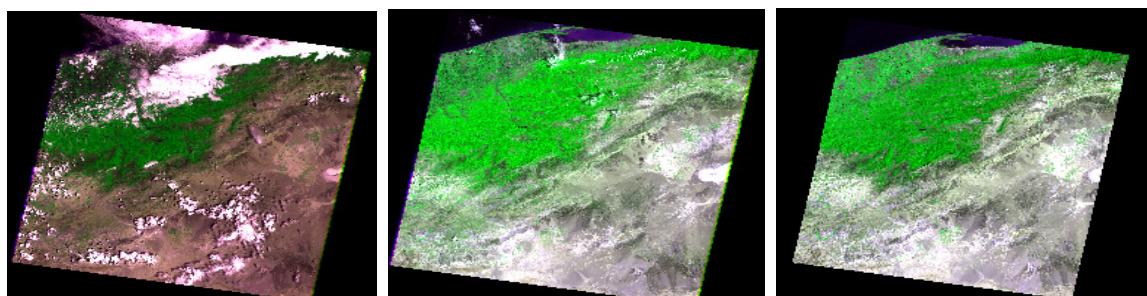
مشخصات	تاریخ تصاویر	سن برنج	تعداد باند	تفکیک	فرمت	مراحل رشد فنولوژیکی برنج
لندست	۱۹۹۸/۵/۹	۱۵	۷	$۱ \sim ۵, ۷ = ۳۰\text{m}$ $۶ = ۱۲۰\text{ m}$	Geotiff	مرحله رویشی: جوانه‌زنی تا ظهور خوشه (جوانه‌زنی، گیاهچه‌ای، پنجه‌زنی، رشد طولی ساقه)
لندست	۱۹۹۸/۶/۱۲	۴۵	۷	$۱ \sim ۵, ۷ = ۳۰\text{m}$ $۶ = ۱۲۰\text{ m}$	Geotiff	مرحله زایشی: از ظهور خوشه تا گل‌دهی (خوشه‌دهی، گل‌دهی)
لندست	۱۹۹۸/۸/۲۳	۱۱۰	۷	$۱ \sim ۵, ۷ = ۳۰\text{m}$ $۶ = ۱۲۰\text{ m}$	Geotiff	مرحله رسیدگی: گل‌دهی تا رسیدگی کامل دانه (دانه شیری، دانه خمیری، دانه رسیده)

۱. همزمانی تاریخ تصاویر با مراحل رشد فنولوژیکی تقریبی است.

جدول ۲. مشخصات داده‌های رادارست - ۱

مشخصات	تاریخ تصاویر	سن برنج	باند C	زاویه فرود	مد	تفکیک	Plz	فرمت	مراحل رشد فنولوژیکی برنج
رادارست - ۱	۱۹۹۸/۵/۵	۱۱	۵/۳GHz	۳۶/۴۲	S۴	۱۲/۵m	HH	CEOS	مرحله رویشی: جوانه‌زنی تا ظهور خوشه (جوانه‌زنی، گیاهچه‌ای، پنجه‌زنی، رشد طولی ساقه)
رادارست - ۱	۱۹۹۸/۶/۲۲	۵۵	۵/۳GHz	۳۶/۴۵	S۴	۱۲/۵m	HH	CEOS	مرحله زایشی: از ظهور خوشه تا گل‌دهی (خوشه‌دهی، گل‌دهی)
رادارست - ۱	۱۹۹۸/۸/۲۶	۱۱۳	۵/۳GHz	۳۶/۴۳	S۴	۱۲/۵m	HH	CEOS	مرحله رسیدگی: گل‌دهی تا رسیدگی کامل دانه (دانه شیرین، دانه خمیری، دانه رسیده)

اطلاعات منطقه مورد بررسی در مساحتی برابر با صد کیلومتر مربع از ده نمونه زمینی، شامل نوع ارقام محلی یا کم‌محصول، ارقام اصلاح‌شده یا پرمحصول و مساحت شالیزارها، میزان و ارتفاع پوشش گیاهی و تاریخ آغاز کشت و برداشت در شالیزارها، مقارن با تاریخ تصویربرداری از اطلاعات و داده‌های سازمان جهاد کشاورزی استخراج شد. با استفاده از نقشه‌های موجود کاربری اراضی و تفکیک محصولات کشاورزی سازمان جهاد کشاورزی در سال ۱۹۹۸ و تطبیق آن نقشه‌ها با تصاویر ماهواره‌ای سال ۱۹۹۸، ده نمونه از شالیزارهای برنج برای بررسی و تحلیل انتخاب شدند. به‌منظور اطمینان بیشتر از صحت داده‌های سازمان جهاد کشاورزی با مختصات و موقعیت زمینی شالی‌ها، مختصات ده نمونه انتخابی با حضور در محل به کمک جی.پی.اس دستی یادداشت شد و این نتایج با تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های سازمان جهاد کشاورزی مورد مقایسه قرار گرفت. ده نمونه شالی برنج مورد بررسی در این پژوهش، مربوط به ارقام کم‌محصول است.

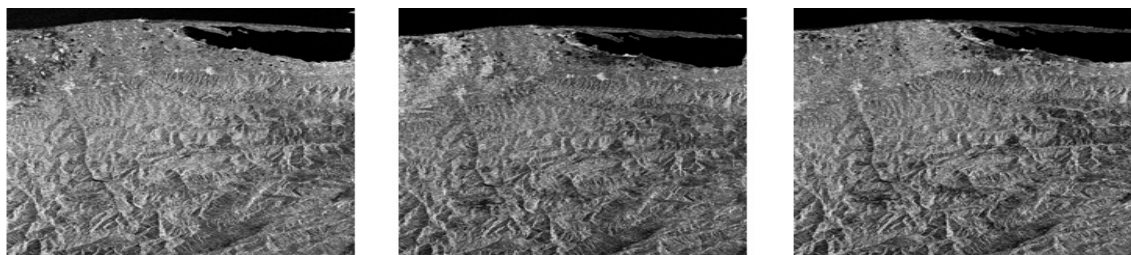


الف

ب

ج

شکل ۲. تصاویر لندست از محدوده مورد مطالعه: الف) تاریخ ۱۹۹۸/۵/۹؛ ب) تاریخ ۱۹۹۸/۶/۱۲؛ ج) تاریخ ۱۹۹۸/۸/۲۳



الف

ب

ج

شکل ۳. تصاویر رادارست از منطقه مورد بررسی: الف) تاریخ ۱۹۹۸/۵/۵؛ ب) تاریخ ۱۹۹۸/۶/۲۲؛ ج) ۱۹۹۸/۸/۲۶

تصحیح رادیومتری تصاویر راداری

یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های بارز در نمایش تصاویر راداری در مقایسه با تصاویر اپتیک، کیفیت رادیومتری ضعیف آنهاست که این تفاوت از ماهیت پوشش دانه‌ای (اسپکل) داده‌های راداری ناشی می‌شود. اسپکل نتیجه مستقیم این واقعیت است. انرژی تابشی همدوس^۱ است. پراکندگی افزایشی از یک مجموعه پراکنده کننده، سبب ایجاد تداخل سازنده یا افزایشی شده و این تداخل، موجب افزایش میانگین شدت و ایجاد روشنایی در تصویر می‌شود. تداخل غیرسازنده یا کاهشی، یک کاهش در میانگین شدت و در نتیجه، کاهش شدت روشنایی در پیکسل را دربرخواهد داشت. مجموع این دو پدیده، منجر به وقوع اسپکل در تصویر می‌شود. برای کاهش اثر اسپکل می‌توان از فیلترهای منطبق، مانند گاما، Lee، Frost و Map یا غیر منطبق، مانند (FFT)^۲ استفاده کرد. مهم‌ترین مزیت استفاده از فیلتر منطبق، ارائه برآوردی دقیق از ضریب پراکندگی در درون مناطق همگن و حفظ ساختار لبه و بافت در درون مناطق غیر همگن است. فیلترهای منطبق برخلاف فیلترهای غیر منطبق، ویژگی‌ها و مشخصات محلی پراکندگی زمینی یا ماهیت سنسور را در نظر گرفته و در محاسبات خود لحاظ می‌کنند. کاهش اثرات اسپکل هزینه قدرت تفکیک مکانی را کاهش داده، اما کیفیت رادیومتری تصویر را بالا می‌برد. منجر می‌شود.

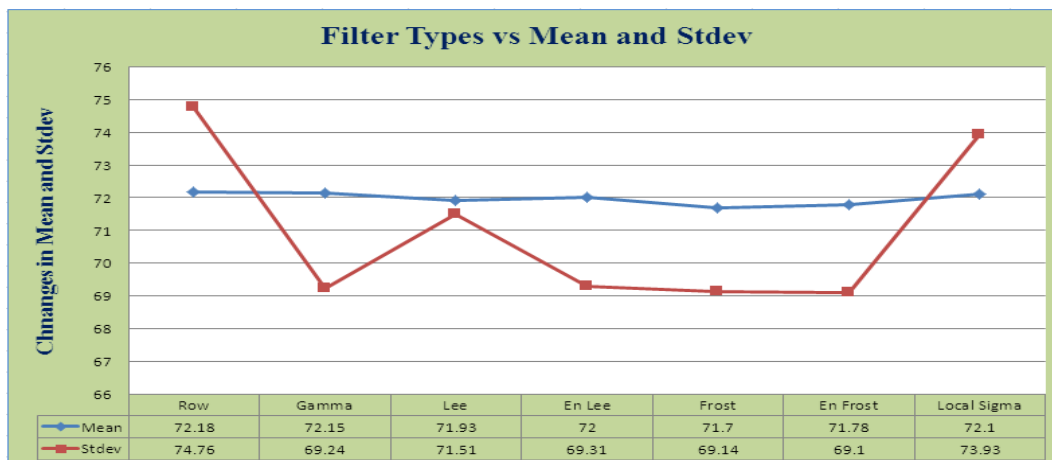
میزان هموارسازی، تابعی از اندازه کرنل است؛ هرچه اندازه کرنل افزایش یابد، میزان هموارسازی نیز افزایش خواهد یافت. در این پژوهش شش فیلتر از نوع منطبق بر تصاویر رادار اعمال شد و نتایج آماری این فیلترها با یکدیگر مقایسه شدند. با مشاهده نتایج آماری خروجی فیلترها (میانگین و انحراف معیار) و شرط بهینه انتخاب برای یک فیلتر^۳، در نهایت با احراز تقریبی این شرط، مشخص شد فیلتر گاما از عملکرد نسبی بهتری در مقایسه با هم‌تایان خود برخوردار است.

در پژوهش پیش رو، تمام اعمال پردازشی روی تصاویر به کمک دو نرم‌افزار پردازش تصویر PCI Geomatica 2012 و ENVI 4.8 با افزونه راداری (SAR scape) به‌طور موازی، انجام گرفت. شکل ۴ نتایج آماری شش فیلتر منطبق را نشان می‌دهد.

1. Coherent

2. Fast Fourier Transform

۳. فیلتری دارای بهترین عملکرد است که میانگین آن نزدیک به میانگین آماری تصویر بوده و کمترین انحراف معیار را داشته باشد.



شکل ۴. مقایسه نتایج آماری شش فیلتر منطبق اعمالی بر تصاویر راداری

استخراج ضریب پراکندگی

برای محاسبه ضریب پراکندگی سیگما، نیاز به استخراج زاویه فرود است که این شاخص را می‌توان از ماژول SARINCD موجود در کتابخانه الگوریتم نرم‌افزار ژئوماتیکا به دست آورد. این ماژول برای ایجاد آرایه زاویه‌ای، به دو لایه مدار نجومی و افست نیاز دارد که در مرحله قبل از طریق ماژول CDSAR به دست آمد. پس از ایجاد آرایه زاویه با استفاده از ماژول SARSIGM در کتابخانه الگوریتم نرم‌افزار ژئوماتیکا، نوبت به استخراج ضرایب پراکندگی سیگما صفر برحسب دسی بل می‌رسد. نرم‌افزار ENVI، روش کاملاً متفاوتی برای به دست آوردن ضرایب پراکندگی سیگما و بتا در پیش می‌گیرد. این نرم‌افزار برای استخراج زاویه فرود، به مدل رقومی ارتفاع و زوایای فرود نزدیک و دور نیاز دارد که زوایای مذکور در دفترچه مشخصات تکنیکی سنجنده رادارست ۱- در دسترس است. در این مرحله، از تصویر رستر مدل رقومی ارتفاع با دقت ۹۰ متر (SRTM) استفاده شد. سیگما و بتا صفر به ترتیب از روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند.

$$\sigma_j^\circ = \beta_j^\circ + 10 \log_{10}(\sin l_j) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\beta_j^\circ = 10 \log_{10}(DN_j^2 / K) \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه: l_j : زاویه فرود در z امین پیکسل و K : ضریب کالیبراسیون است.

برای رفع خطای رادیومتریک در تصاویر لندست نیز از ماژول تصحیح اتمسفری FLAASH در نرم‌افزار ENVI استفاده شد. این ماژول با استفاده از شاخص‌های زمان و مکان و شاخص‌های فیزیکی دیگر، اقدام به تولید یک مدل انتقال تابشی با استفاده از MODTRAN4 می‌کند. از آنجاکه این ماژول بر مبنای مدلی فیزیکی است، نسبت به مدل‌های تصحیح اتمسفری دیگر، دقت بهتری دارد. در مورد تصحیحات هندسی با توجه به زمین مرجع بودن تصاویر لندست و راداری، تصاویر سری زمانی به کمک ماژول منطبق‌کننده^۲ در نرم‌افزار ENVI نسبت به یکدیگر هم مختصات

1. Shuttle Radar Topography Mission

2. Co-register

شدند. با توجه به تفاوت قدرت تفکیک مکانی تصاویر اپتیک و راداری نسبت به یکدیگر، برای هم‌پوشانی و انتخاب مناطق نمونه (برای اطمینان یافتن از عدم جابه‌جایی پیکسل‌ها)، ده منطقه نمونه از میان شالی‌های نسبتاً وسیع و همگن انتخاب شد. سپس با استفاده از تفسیر چشمی، برای تجزیه و تحلیل اطلاعات طیفی و ضریب پراکندگی، از داخل مناطق انتخابی نمونه برداری شد.

استخراج شاخص‌های پوشش گیاهی از تصاویر اپتیک

برای به‌دست آوردن مقادیر رادیومتری مورد نیاز و همچنین شاخص‌های پوشش گیاهی از تصاویر لندست، باید مقادیر DN^1 پیکسل‌ها به بازتاب^۲ سطح زمین تبدیل شوند. برای انجام این کار، می‌بایست ابتدا مقادیر DN به تابش^۳ طیفی در محل روزنه سنسور اپتیک (L_λ) تبدیل شود. سپس با تقسیم تابش بر مقدار نور تابشی، میزان بازتاب را محاسبه کرد. با تبدیل تابش به بازتاب، تفاوت در تابش خورشید به سبب برداشت تصاویر در سری زمانی متفاوت، از بین می‌رود. البته هنگام به‌دست آوردن میزان بازتاب سطح زمین، شرایط و مواد تشکیل‌دهنده اتمسفر (مانند نیمرخ^۴ بخار آب و ...) می‌تواند در زمان تصویربرداری تأثیرگذار باشد؛ ولی از آنجاکه این تأثیر ناچیز است، در نتیجه کار مشکلی ایجاد نمی‌کند. یادآوری می‌شود که محقق اطلاعات نیمرخ اتمسفری را در زمان تصویربرداری در اختیار نداشته است. روابط ریاضی به کار رفته برای استخراج مقادیر تابش و بازتاب در روابط ۳ و ۴ آمده است.

$$L_\lambda = LMIN_\lambda + \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) \times Q_{cal} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در این رابطه؛ L_λ : تابش طیفی در روزنه سنسور $Q_{cal} ; W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$: مقدار پیکسل کالیبره و کوانتیزه شده بر حسب DN ؛ $LMAX_\lambda$: تابش طیفی در مقیاس Q_{calmax} ؛ $LMIN_\lambda$: تابش طیفی در مقیاس Q_{calmin} است.

$$\rho = \frac{\Pi L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \cos\theta_s} \quad \text{رابطه ۴}$$

ρ : بازتاب سطح (بدون واحد)؛ L_λ : تابش طیفی در روزنه سنسور؛ d : فاصله زمین تا خورشید؛ $ESUN_\lambda$: میانگین تابش‌های فرا اتمسفری خورشید؛ θ_s : زاویه زینت خورشیدی (سرسو)^۵ بر حسب درجه.

در این پژوهش پنج شاخص پوشش گیاهی مورد بررسی قرار گرفت که این پنج شاخص همراه با ترکیبات طیفی آنها در شکل ۵ مشاهده می‌شود. در هر شاخص با توجه به معادله نسبت طیفی، تصویر به‌دست‌آمده متناظر با آن قرار داده شده است. در این معادله‌ها؛ ρ_{NIR} : بازتاب زمینی در باند مادون قرمز نزدیک و ρ_R : بازتاب زمینی در باند مادون قرمز (قرمز) است.

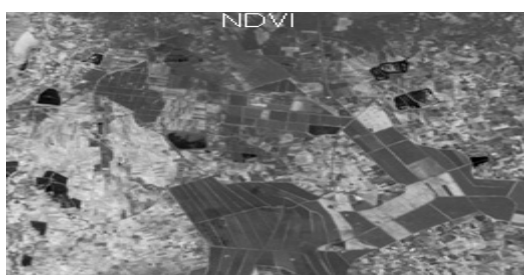
1. Digital Number
2. Reflectance
3. Radiance
4. Profile
5. Solar zenith angle



$$IPVI = (\rho_{NIR}) / (\rho_{NIR} + \rho_R) \text{ '}$$



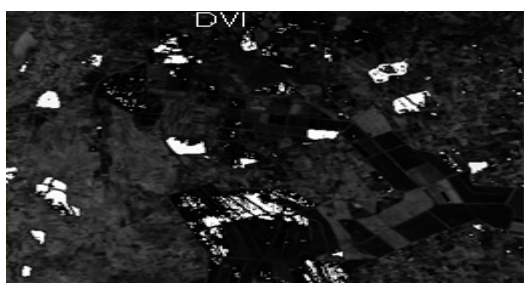
$$RVI(SR) = (\rho_{NIR}) / (\rho_R) \text{ '}$$



$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R) \text{ '}$$



$$RDVI = \rho_{NIR} - \rho_R / \sqrt{\rho_{NIR} - \rho_R} \text{ '}$$

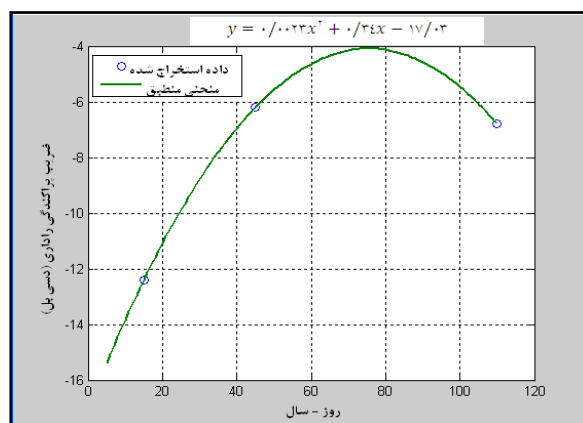
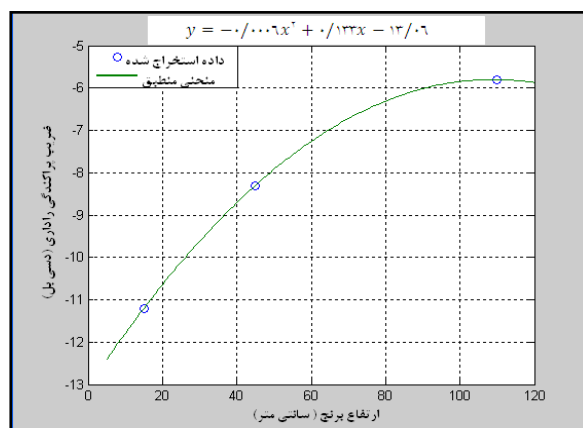


$$DVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) \text{ '}$$

شکل ۵. پنج شاخص پوشش گیاهی استخراج شده از تصاویر لندست

1. Infrared Percentage Vegetation Index (Crippen, 1990)
2. Ratio Vegetation Index (RVI) or Simple Ratio (SR) (Jordan, 1969)
3. Normalized Difference Vegetation Index (Tucker, 1979)
4. Renormalized Difference Vegetation Index (Breon, 1995)
5. Difference Vegetation Index (Richardson)

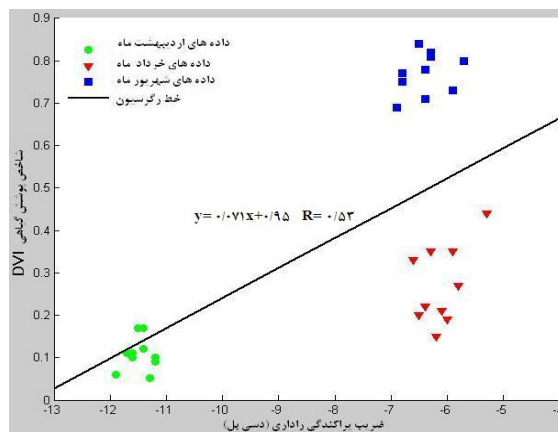
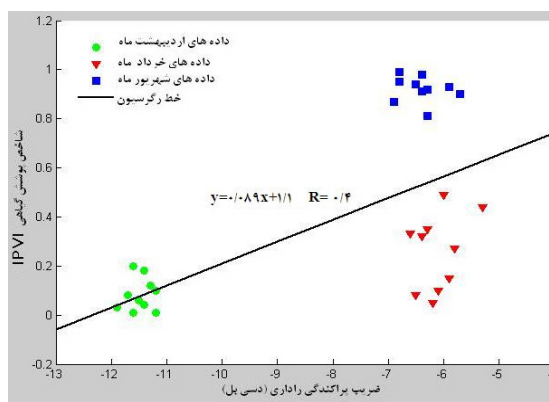
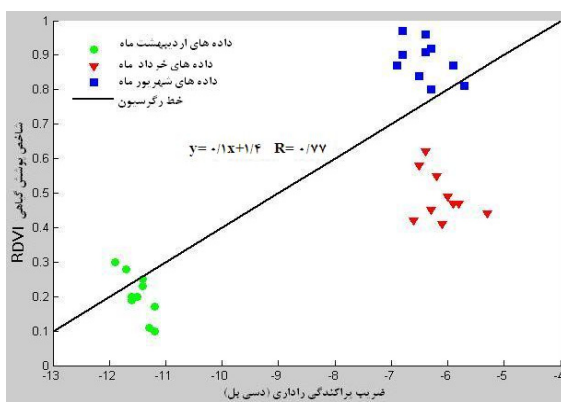
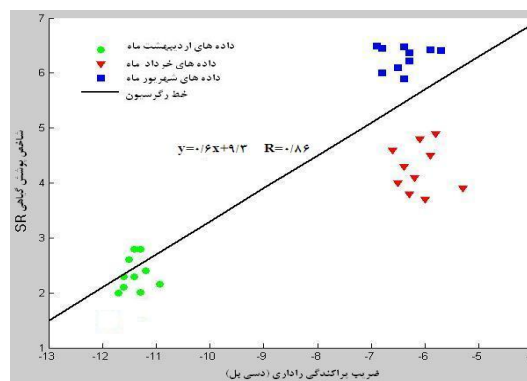
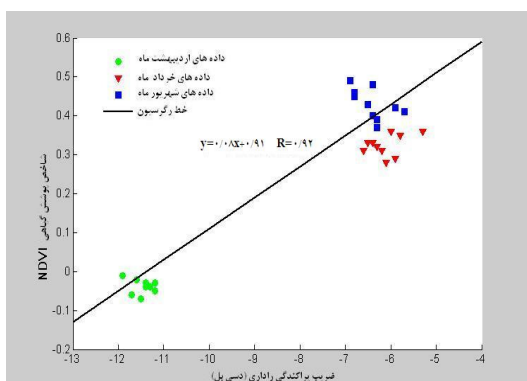
برای تصاویر راداری نیز همان ده نمونه شالی برنج روی تصاویر اپتیک انتخاب شدند و ضرایب پراکندگی هر قطعه زمین برای سری زمانی (نشا، داشت و برداشت) و میزان همبستگی آن با روز-سال و ارتفاع برنج، استخراج شد. این مرحله از تحلیل و نتایج آماری آن، به کمک نرم‌افزار متلب انجام گرفت. در این نمودارها برای هر مقطع زمانی، ده نمونه مورد بررسی قرار گرفت و میانگین این ده نمونه، به منزله نماینده آن مقطع زمانی در نظر گرفته شد که برای برازش مدل مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۶. معادله رگرسیون و ضریب پراکندگی رادار با ارتفاع و روز - سال (در زمان نشا) برنج

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پنج شاخص پوشش گیاهی برنج در سه دوره رشد گیاه برنج (آخرین ستون جداول ۱ و ۲)، برحسب بازتاب زمینی روی سه تصویر اپتیک به دست آمد. سپس ضرایب پراکندگی (برحسب دسی بل) متناظر با همان نقاط آزمایشی در تصاویر راداری استخراج شدند و داده‌ها برای محاسبه نتیجه آماری وارد نرم‌افزار متلب شد. هر شاخص پوشش گیاهی مربوط به یک دوره زمانی کشت برنج با داده‌های ضریب پراکندگی راداری متناظر دوره زمانی خود، تحلیل شدند و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. به منظور یافتن رابطه همبستگی بین متغیرهای وابسته (شاخص‌های پوشش گیاهی یا محور y) و متغیرهای مستقل (ضرایب پراکندگی راداری یا محور x) و همچنین برازش مدل، از مدل رگرسیون خطی استفاده شد.



شکل ۷. نمودارهای پراکندگی ضرایب پراکندگی راداری و پنج شاخص پوشش گیاهی برنج در سه مقطع زمانی برداشت‌داده

جدول ۳. ضریب همبستگی و معادله رگرسیون خطی بین ضریب پراکندگی رادار و پنج شاخص پوشش گیاهی برنج

Index	R	Regression Eq.	Index	R	Regression Eq.
NDVI	$R = 0.92$	$y = 0.08x + 0.91$	IPVI	$R = 0.4$	$y = -0.89x + 1.1$
RDVI	$R = 0.77$	$y = -0.1x + 1.4$	SR(RVI)	$R = 0.86$	$y = 0.6x + 9.13$
DVI	$R = 0.53$	$y = 0.071x + 0.95$			

از بین پنج شاخص گیاهی مورد بررسی، شاخص NDVI دارای بالاترین ضریب همبستگی ($R = 0/92$) بین چهار شاخص گیاهی دیگر بود.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به محدوده طول موج‌های راداری و حساسیت مستقیم این طول موج‌ها به ساختار هندسی گیاه و میزان آب موجود در توده زنده گیاهی، می‌توان در طول مدت رشد یک گیاه، روند و میزان رشد آن را با یک منحنی ریاضی پیش‌بینی کرد. همان‌گونه که مشاهده شد، همزمان با مرحله نشا (پانزده روز بعد از نشا) با توجه به کوچک‌بودن نشاهای برنج و نمایان‌بودن سطح غرقاب زیرین آن، به سبب پراکندگی ترکیبی ناشی از پراکندگی سطحی (آب) و حجمی (نشاهای برنج)، ضریب پراکندگی برنج دارای مقدار $-11/4$ dB بوده است. با آغاز رشد برنج تا اواسط مرحله رشد خود (تقریباً روز پنجاهم) با افزایش حجم و گسترش تاج پوشش گیاهی و رؤیت‌نشدن زمین غرقاب زیرین (پراکندگی غالب یا حجمی) و میزان بایومس (میزان بیشتر آب و درنهایت ضریب دی‌الکتریک بالاتر)، ضریب پراکندگی به میزان $-6/2$ dB افزایش پیدا می‌کند که این پدیده در تصویر راداری روشن‌تر دیده می‌شود. در مرحله پایانی رشد برنج (تقریباً بعد از روز صدم)، پس از کامل‌شدن مراحل خوشه‌دهی کامل برنج و درنهایت شکل‌گیری دانه‌ها که به سنگین‌شدن خوشه‌ها منجر می‌شود، شالی‌ها حالت خوابیده‌ای به خود می‌گیرند که به این حالت در اصطلاح ورس می‌گویند. حالت ورس موجب صاف و یک‌دست‌شدن سطح کلی شالیزار خواهد شد؛ یعنی میزان پراکندگی حجمی و تفوق پراکندگی سطحی کاهش می‌یابد. مرحله دانه‌دهی برنج نیز موجب ازدست‌رفتن مقداری از آب موجود در توده زنده گیاهی می‌شود و به کاهش دی‌الکتریک می‌انجامد. به سبب این دو عامل، ضریب پراکندگی رادار در مرحله برداشت محصول (شکل ۳) اندکی کاهش می‌یابد ($-6/8$ dB). از آنجاکه شاخص‌های پوشش گیاهی مورد بررسی، حاصل ترکیبات مختلف ریاضی بازتاب زمینی در باند قرمز (جذب شدید توسط کلروفیل) و قرمز نزدیک (بازتاب شدید توسط کلروفیل) هستند، این دو باند ارتباط تنگاتنگی با کلروفیل دارند. باند مادون قرمز نزدیک در سنجنده‌ها به تاج پوشش و بایومس گیاهان بسیار حساس است. به همین دلیل بیشتر محققان با استفاده از ترکیبات مختلف این دو باند و با دو رویکرد تجربی و ریاضی، به ایجاد مدلی (شاخص) برای برآورد بایومس گیاهی اقدام می‌کنند. در این پژوهش در رابطه با صحت‌سنجی، عدم قطعیت و منابع خطا در نتایج آماری به دست آمده، می‌توان به اختلاف فاصله زمانی بین تصاویر راداری با تصاویر اپتیک، در دسترس نبودن اطلاعات هواشناسی به ویژه در مورد بارش یا عدم بارش باران در فواصل بین تصویربرداری‌ها و شمار اندک تصاویر راداری در بازه آغازین و انتهایی تقویم زراعی برنج اشاره کرد. در رابطه با مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج کار محققان دیگر، می‌توان به یک کار پژوهشی بر روی گونه‌های جنگلی برزیل اشاره کرد. نتایج آماری آنها نشان داد که به ترتیب، شاخص NDVI با $R = 0/98$ و شاخص EVI با $R = 0/93$ ، دارای روابط آماری با ضریب پراکندگی راداری (JERS-1) در باند L است (سانو، رزا، بریتو و فریرا، ۲۰۰۵). نتایج آماری پژوهش پیش رو نشان داد که ارتباط مستقیم و معنادار میان ضریب پراکندگی راداری با ارتفاع و شاخص‌های پوشش گیاهی و به تبع توده زنده گیاهی، می‌تواند در مدیریت و کنترل آفات و

تنش‌های وارده احتمالی به گیاه (سیل، گرمزدگی، سرمازدگی و خشکسالی) و همچنین برآورد سطح زیر کشت محصول برنج در کشاورزی، به کار رود.

تقدیر و تشکر

در پایان نگارنده بر خود واجب می‌داند از جناب آقای دکتر پرویز ضیائی‌ان برای در اختیار قرار دادن تصاویر راداری تشکر و سپاس‌گزاری خود را اعلام دارد.

منابع

- علوی، س.ا. (۱۳۸۷). **دایره‌المعارف جامع علوم کشاورزی**. جلد اول. تهران: انتشارات وزارت کشاورزی.
- اله‌قلی‌پور، م؛ صالحی، م؛ صالح، م. (۱۳۸۱). **تعیین خصوصیات برخی از ارقام محلی برنج در شرایط گیلان**، نشریه فنی مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، وزارت کشاورزی، شماره ۱، صص ۱۲.
- Alahgholipour M., and Mohamad Salehi MS., 2002, **Characterization of Some Local Varieties of Rice in Gilan**, Rice Research Institute Technical Bulletin, The Organization Promotes Research, Education and Agriculture, Ministry of Agriculture, , No.1, PP.12.
- Alavi, S.A., 2008, **Comprehensive Encyclopedia of Agricultural Science**, Publication of Ministry of Agriculture, Vol. 1, Tehran.
- Bourman, B. A. M. and Hoekman, D. H., 1993, **Multitemporal Multifrequency Radar Measurements of Agricultural Crops During the Agriscatt-88 Campaign in the Netherlands**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 14, No. 4, PP. 1595-1614.
- Sano, E. E., Rosa, R., Brito, J.L.S., Ferreira, L.G., 2010, **Land Cover Mapping of the Tropical Savanna Region in Brazil**, Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 166, No. 1- 4, PP. 113-124.
- Engheta, N. and Elachi, C., 1982, **Radar Scattering from a Diffuse Vegetation Layer over a Smooth Surface**, IEEE Trans on Geosci & Remote Sensing, Vol. GE-20, No.2, PP. 212-216.
- Ferrazzoli, P., 2002, **SAR for Agriculture: Advances, Problems and Prospects**, in: Proceedings of the Third International Symposium on Retrieval of Bio-Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, 11-14 September, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-741-0, 2002, PP. 47 - 56.
- Ferrazzoli, P., Guerriero, L. and Schiavon, G., 1999, **Experimental and Model Investigation on Radar Classification Capability**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37, No. 1, PP.960-968.
- Hasegawa, T. and Horie, T., 1996, **Leaf Nitrogen, Plant Age and Crop Dry Matter Rice in Production**, Field Crop Research, Vol. 47, No. 2-3, PP. 107-116.
- Inoue, Y., Kurosu, T., Maeno, H., Uratsuka, S., Kozu, T., Dabrowska-Zielinska, K., Qi, J., 2002, **Season-long Daily Measurements of Multifrequency Paddy Rice Field**, Remote Sensing of Environment, Vol. 81, No. 2-3, PP. 194-204.
- Sun, G., Simonett, D. and Strahler, A., 1991, **A Radar Backscatter Model for Discontinuous Coniferous Forests**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 29, No. 4, PP.639-650.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K. and Fung, A.K., 1986, **Microwave Remote Sensing: Active and Passive**, Norwood, Massachusetts: Artech House, Vol. 3, PP. 1065-1068.
- Ulaby, F.T., Sarabandi, K., McDonald, K., Whitt, M. and Dobson, M., 1990, **Michigan Microwave Canopy Scattering Model (MIMICS)**, International Journal of Remote Sensing, Vol.11, No.7, PP.1223-1253.
- Wang, Y., Day, J. and Sun, G., 1993, **Santa Barbara Microwave Backscattering Modeling for Woodland**, International Journal of Remote Sensing, Vol.14, No.8, PP.1477-1493.