

دورسنجی بقایای گیاهی سوزانده‌شده در مزارع با بهره‌گیری از تصاویر سنجنده لندست

فاطمه علینقی‌زاده - کارشناس ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه جیرفت

مجید دولتی* - استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه جیرفت

محمدعلی رستمی - استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان

کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران

ناصر برومند - دانشیار گروه مهندسی علوم خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۱ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۱۰/۱۳

چکیده

این تحقیق در مزارع ذرت و گندم منطقه آرزویی استان کرمان انجام شده است. در این مطالعه، توانایی تصاویر سنجنده لندست برای پایش مزارعی که در آن‌ها بقایای گیاهی آتش زده شده، با استفاده از شاخص‌های طیفی و آنالیز جداسازی طیفی خطی، ارزیابی شد. بدین منظور، چهار وضعیت سطح خاک- شامل زمین خاک‌ورزی نشده، زمین با بقایای گیاهی، زمین با پوشش گیاهی سبز، و زمین با بقایای گیاهی سوزانده‌شده- در نظر گرفته شد و چهار شاخص طیفی NDVI، BAI، NBR، و NBRT برای قطعات آزمایشی ایجاد شد. نتایج نشان داد شاخص BAI قادر است، بهتر از سایر شاخص‌های مورد بررسی، مزارعی را که در آن‌ها بقایای گیاهی آتش زده شده از سایر عوارض موجود در سطح زمین جدا کند. مساحت مزارع آزمایشی آتش‌زده‌شده در تصاویر ماهواره‌ای، که به وسیله شاخص BAI محاسبه شده بود، با مساحت واقعی مزارع آزمایشی همبستگی بسیاری ($R^2=0.95$) داشت. بنابراین، برای تمایز قائل شدن بین مزارع سوخته و سایر عوارض، می‌توان از شاخص BAI استفاده کرد. همچنین، سطح مزارع سوخته، که با آنالیز جداسازی طیفی خطی تخمین زده شده بود، با داده‌های به‌دست‌آمده از روش زمینی همبستگی مناسبی ($R^2=0.89$) داشت.

کلیدواژه‌ها: آتش‌سوزی، بقایای گیاهی، خاک‌ورزی حفاظتی، سنجنش از دور، لندست A.

مقدمه

همه‌ساله پس از برداشت محصولات زراعی، مانند ذرت، گندم، جو، و برنج، بقایای گیاهی در بسیاری از مزارع آتش زده می‌شود. در سال‌های اخیر، با توجه به شرایط اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک و وجود مشکلاتی نظیر محدودیت منابع آب، فقیربودن خاک‌های این مناطق از مواد آلی، و آسیب‌پذیربودن ساختمان آن‌ها و مضرات ناشی از سوزاندن بقایای گیاهی، کشاورزی حفاظتی، به منزله روشی جای‌گزین برای روش مرسوم، مورد توجه قرار گرفته است.

سنجنش از دور علم، فن، و هنر کسب اطلاعات درباره پدیده‌ها از فاصله دور و بدون تماس با آن‌هاست. این فناوری

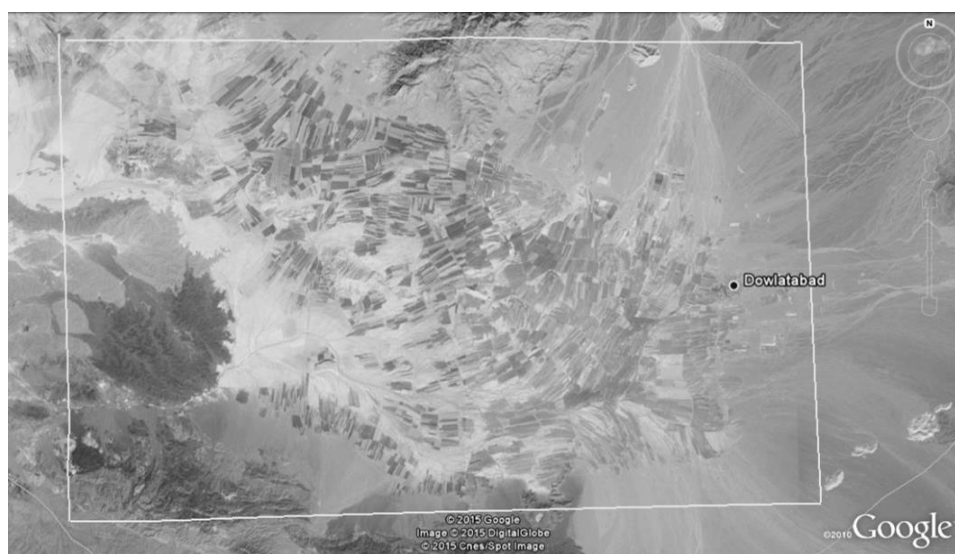
انسان را در جایگاهی فراتر از محدودیت‌هایش قرار می‌دهد (لی‌لسند و کی‌فر، ۲۰۰۰).

این تحقیق به منظور یافتن روشی دقیق، سریع، و ارزان برای پایش مزارعی که در آن‌ها بقایای گیاهی آتش زده می‌شود و عرصه‌های منابع طبیعی که دچار آتش‌سوزی می‌شوند انجام شد. در این مطالعه، توانایی تصاویر سنجندهٔ لندست ۸^۱ برای پایش مزارع سوخته و عرصه‌های منابع طبیعی که دچار آتش‌سوزی شده‌اند، با استفاده از شاخص‌های طیفی^۲ و آنالیز جداسازی طیفی خطی^۳، ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزارع ذرت و گندم شهرستان ارزوئیه انجام شد. این شهرستان، به مرکزیت شهر ارزوئیه، در ۲۵۰ کیلومتری جنوب غربی (E: 28° 27' 0", N: 56° 21' 0") شهر کرمان واقع شده است و ۱۰۴۴ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. شکل ۱ موقعیت تصویری از منطقهٔ مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

در راستای اهداف این پژوهش، ناحیه‌ای به وسعت ۲۵ کیلومتر مربع در نظر گرفته شد و مزارع آزمایشی در محدودهٔ یادشده انتخاب شدند. جدول ۱ مختصات جغرافیایی منطقهٔ مورد پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱. تصویر منطقهٔ مورد مطالعه (مرجع: نرم‌افزار google map)

جدول ۱. مختصات جغرافیایی منطقهٔ مورد پژوهش

| پایین سمت چپ | پایین سمت راست | بالا سمت چپ | بالا سمت راست |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| "۵۹/۷۱' ۲۱° ۲۸ | "۹۴/۳۵' ۲۰° ۲۸ | "۴۵/۶۶' ۴۱° ۲۸ | "۹۸/۵۷' ۴۱° ۲۸ |
| "۰۷/۷۹' ۷۰° ۵۶ | "۷۹/۴۴' ۳۶° ۵۶ | "۰۲/۲۰' ۶۸° ۵۶ | "۹۹/۴۷' ۳۰° ۵۶ |

1. Landsat-8
2. Spectral Indices
3. Linear Spectral Unmixing Analysis

برای اجرای این پژوهش، در محل‌های مختلف، ۱۰ مزرعه از مزارع که در آن‌ها بقایای گیاهی آتش زده شده بود به عنوان ۱۰ تکرار در نظر گرفته شد. تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مربوط به محل اجرای آزمایش‌ها از وبگاه سنجنده دریافت شد. در این پژوهش از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای سنجنده لندست ۸ استفاده شد. جدول ۲ خصوصیات طیفی تصاویر سنجنده لندست ۸ را نشان می‌دهد.

بر طبق بازدیدهای مکرر از منطقه و ثبت تاریخ آتش‌سوزی مزارع، تصاویر گرفته شده با تاریخ‌های مشخص به وسیله سنجنده دانلود شد. جدول ۳ اطلاعات مربوط به تصاویر مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۲. خصوصیات طیفی تصاویر سنجنده لندست ۸

| باند طیفی | طول موج (نانو متر) | قدرت تفکیک (متر) |
|-----------------------------------|--------------------|------------------|
| باند ۱ (coastal/ Aerosol) | ۴۳۳ - ۴۵۵ | ۳۰ |
| باند ۲ (آبی) | ۴۵۰ - ۵۱۵ | ۳۰ |
| باند ۳ (سبز) | ۵۵۰ - ۶۰۰ | ۳۰ |
| باند ۴ (قرمز) | ۶۳۰ - ۶۸۰ | ۳۰ |
| باند ۵ (مادون قرمز نزدیک) | ۸۴۵ - ۸۸۵ | ۳۰ |
| باند ۶ (مادون قرمز طول موج کوتاه) | ۱۵۶۰ - ۱۶۶۰ | ۳۰ |
| باند ۷ (مادون قرمز طول موج کوتاه) | ۲۱۰۰ - ۲۳۰۰ | ۳۰ |
| باند ۸ (Panchromatic) | ۵۰۰ - ۶۸۰ | ۱۵ |
| باند ۹ (Cirrus) | ۱۳۶۰ - ۱۳۹۰ | ۳۰ |
| باند ۱۰ (مادون قرمز طول موج بلند) | ۱۰۴۰۰ - ۱۱۳۰۰ | ۱۰۰ |
| باند ۱۱ (مادون قرمز طول موج بلند) | ۱۱۵۰۰ - ۱۲۵۰۰ | ۱۰۰ |

جدول ۳. تاریخ برداشت تصاویر سنجنده لندست ۸ مورد استفاده در پژوهش

| سال | ماه | روز |
|------|--------|-----|
| ۱۳۹۳ | تیر | ۲۸ |
| ۱۳۹۳ | مرداد | ۱۳ |
| ۱۳۹۳ | شهریور | ۱۴ |
| ۱۳۹۳ | دی | ۲۳ |
| ۱۳۹۳ | بهمن | ۲۵ |
| ۱۳۹۳ | اسفند | ۱۱ |
| ۱۳۹۴ | خرداد | ۱۳ |
| ۱۳۹۴ | خرداد | ۲۹ |

برای استخراج داده‌های کلیه تصاویر مورد استفاده در این پژوهش از نرم‌افزار^۱ ENVI استفاده شد. پس از آتش‌زدن مزارع به دست کشاورزان، مختصات مزرعه سوخته و زمان پایش سوختگی به صورت دقیق یادداشت شد. برای استخراج داده‌های نظیر در تصاویر ماهواره‌ای، نخست نقشه کلیه مزارع آزمایشی- همان‌طور که اشاره شد- به وسیله نرم‌افزار^۲ ArcGis تهیه شد.

بر اساس نظر فاطمی و رضایی (۱۳۹۳)، انرژی دریافت‌شده از اشیا به وسیله سنجنده اندازه‌گیری شد و به هر پیکسل از تصویر (معادل یک پیکسل از سطح زمین) یک داده دیجیتالی^۳ اختصاص یافت. داده دیجیتالی در واقع داده‌ای به دست آمده از مقدار تابشی^۴ است که به وسیله سنجنده دریافت و محاسبه می‌شود. برای استفاده از این داده دیجیتالی، باید آن را به تابش و سپس بازتاب^۵ تبدیل کرد. سنجنده‌های مختلف برای این تبدیل دارای فرمول با ضرایب مخصوص به خود هستند. این تبدیلات به وسیله نرم‌افزارهای مخصوص پردازش تصاویر سنجش از دور مانند نرم‌افزار ENVI انجام می‌شود.

در این پژوهش دو گروه از داده‌های تصویر ماهواره‌ای برای هر پلات آزمایشی اندازه‌گیری و محاسبه شد که عبارت‌اند از:

۱. داده‌های آنالیز جداسازی طیفی خطی؛

۲. شاخص‌های طیفی^۶.

در این تحقیق، برای استخراج طیف‌های خالص خاک، بقایای گیاهی، پوشش گیاهی سبزرنگ، و بقایای سوخته پلات‌های خالص- که شامل خاک بدون بقایای گیاهی، پوشش کامل بقایای گیاهی، مزارع سبز، و مزارعی با پوشش بقایای سوخته بودند- در مزارع آزمایشی در نظر گرفته شده ثبت شد.

داده پیکسل‌های تصویر ماهواره‌ای دربرگیرنده پلات‌های یادشده به وسیله نرم‌افزار ENVI استخراج شد و از آن‌ها، به منزله طیف‌های خالص، در آنالیز جداسازی طیفی خطی استفاده گردید. به نظر پاچکو و مکنارین (۲۰۱۰)، استخراج طیف‌های خالص از خود تصویر باعث می‌شود که آنالیز جداسازی به تغییرات محیطی، مانند درصد رطوبت خاک و بقایا، حساسیت نداشته باشد.

با استفاده از آنالیز جداسازی طیفی خطی، درصد سوختگی بقایا در کلیه پیکسل‌های دربرگیرنده مزارع آزمایشی (در تصویر ماهواره‌ای) محاسبه شد. بدین ترتیب، دو گروه از داده‌های نظیر یعنی سطح سوختگی- که در تصویر ماهواره‌ای با استفاده از آنالیز جداسازی طیفی تعیین شد- و سطح واقعی سوختگی در مزرعه- که با دستگاه GPS ساخت شرکت

۱. محصول شرکت RSI (Research Systems, Inc)

۲. محصول شرکت ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc)

3. Digital Number (DN)

4. Radiance

5. Reflectance

6. Linear Spectral Unmixing Analysis (LSUA)

7. Spectral Indices

GARMIN با دقت دو متر و مجهز به آنتن برداشت شد. وجود داشت. همبستگی این داده‌های نظیر بررسی شد و سطح سوختگی در زمین با یک منحنی رگرسیون خطی به صورت تابعی از سطح سوختگی در تصویر ماهواره‌ای بیان شد. برای تشخیص خاکستر بقایای گیاهی سوخته در سطح زمین و تمایز آن از خاک، بقایای گیاهی و گیاه سبز، شاخص‌های طیفی متعددی در این پژوهش بررسی شد. از میان آن‌ها، چهار شاخص طیفی، که عملکرد بهتری نسبت به سایر شاخص‌ها داشتند، ارزیابی شدند. در جدول ۴ شاخص‌های طیفی مورد استفاده در این پژوهش معرفی شده‌اند. برای هر یک از تصاویر سنجنده، شاخص‌های طیفی مورد مطالعه در تصویر اعمال و تصاویر شاخص‌ها تولید شد. سپس، شاخص‌های طیفی برای پلات‌های آزمایشی شامل ۱۰ مزرعه بدون هر نوع پوشش (خاک)، ۱۰ مزرعه با پوشش سطحی بقایای گیاهی، ۱۰ مزرعه با پوشش گیاه سبز، و ۱۰ مزرعه با پوشش بقایای سوخته به وسیله نرم‌افزار ENVI استخراج شد.

جدول ۴. اطلاعات شاخص‌های طیفی مورد استفاده در این پژوهش

| شاخص | مشخصات | منبع |
|-------------------|---|---|
| NDVI ^۱ | $(\text{Red-NIR})/(\text{Red+NIR})$ | Tucker, 1979 |
| BAI ^۲ | $1/[(0.1 - \text{Red}) + (0.06 - \text{NIR})]$ | Martín, 1998 |
| NBR ^۳ | $(\text{NIR-SWIR}^۴)/(\text{NIR+SWIR})$ | Lopez and Caselles, 1991; Key and Benson, 2005 |
| NBRT ^۵ | $[\text{NIR-SWIR}(\text{Thermal}/1000)]/[\text{NIR+SWIR}(\text{Thermal}/1000)]$ | Holden et al., 2005 |
| | NIR: 0.76 to 0.9 μm | SWIR: 2.08 to 2.35 μm |
| | | Thermal: 10.4 to 12.5 μm |

با استخراج شاخص‌های طیفی، با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۱ درصد، وجود یا فقدان اختلاف معنی‌دار بین شاخص‌های طیفی در پلات‌های آزمایشی. شامل خاک، بقایای گیاهی، پوشش سبز، و بقایای سوخته. بررسی شد. این کار به وسیله نرم‌افزار SAS انجام شد. بدین صورت، سطح سوخته به وسیله نرم‌افزار محاسبه و با سطوح به‌دست‌آمده در روی زمین مقایسه شد. سپس، سطح سوختگی به‌دست‌آمده در زمین به صورت تابعی از سطح سوختگی در تصویر بیان شد. دقت روابط رگرسیونی و همبستگی داده‌های زمینی و ماهواره‌ای محاسبه شد.

1. Normalized Difference Vegetation Index

2. Burned Area Index

3. Normalized Burn Ratio

4. Short Wave Infrared

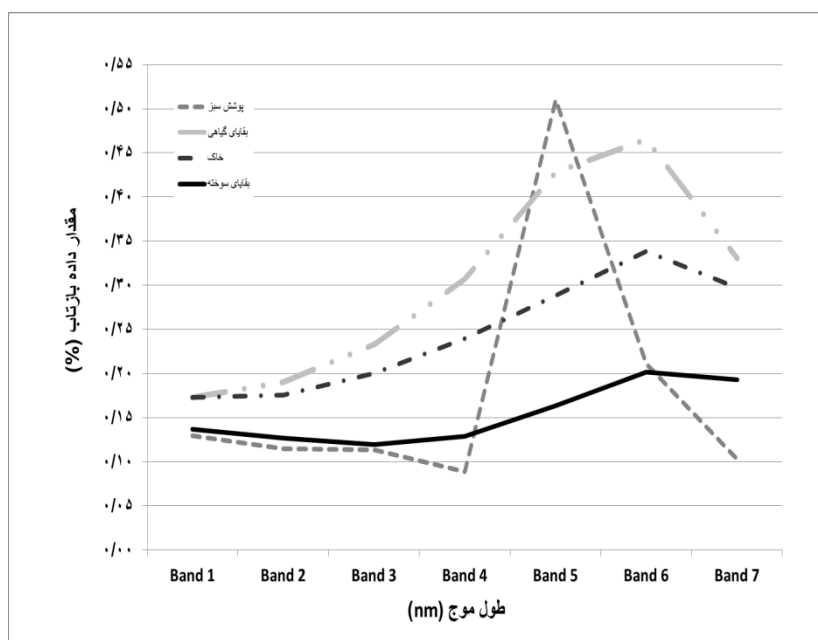
5. Normalized Burn Ratio-Thermal

یافته‌های پژوهش

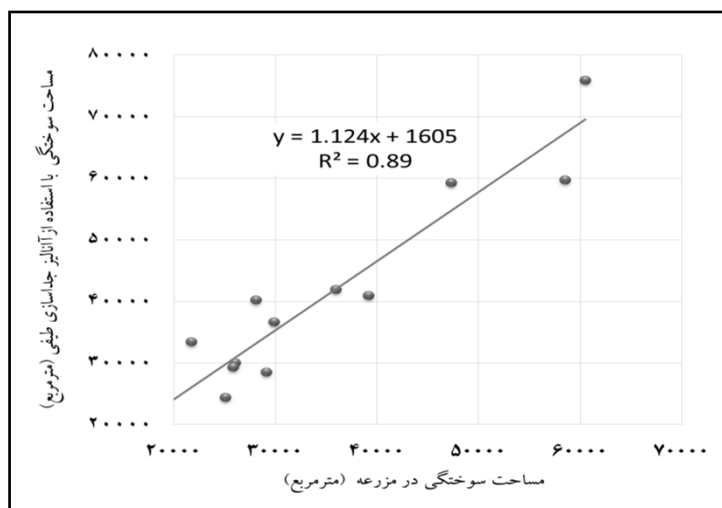
برای بررسی رفتار طیفی عوارض یادشده از پلات‌هایی که طیف‌های خالص، یعنی عارضه خالص (با خلوص بیش از ۹۰ درصد) در نظر گرفته شده بود، استفاده شد (شکل ۲).

شکل ۲ نشان می‌دهد که طیف بازتاب‌یافته از چهار نوع پوشش سطح مزرعه در باندهای ۱ تا ۳ تصویر تقریباً بر هم منطبق‌اند یا فاصله بسیار کمی با هم دارند، اما در باند ۴ تا ۷، تباین بین طیف بازتاب‌یافته افزایش یافته است.

همبستگی داده‌های آنالیز جداسازی خطی و میدانی بررسی شد و مساحت مزارع سوخته در زمین با یک منحنی رگرسیون خطی به صورت تابعی از مساحت مزارع سوخته در تصویر ماهواره‌ای بیان شد (شکل ۳).



شکل ۲. نتایج نمودار منحنی پاسخ طیفی چهار نوع پوشش سطح مزرعه در تصاویر سنجنده لندست ۸



شکل ۳. رابطه مساحت سوختگی با استفاده از آنالیز جداسازی طیفی خطی و مساحت سوختگی در مزرعه

با استفاده از آنالیز جداسازی طیفی خطی می‌توان محل و مساحت مزارع سوخته در تصویر ماهواره‌ای را محاسبه کرد و با ضریب تبیین ۰/۸۹ آن را با استفاده از رابطه ۱ به مساحت واقعی سوختگی در مزرعه تبدیل کرد؛ که در آن x مساحت سوختگی از آنالیز جداسازی طیفی خطی است و y مساحت سوختگی در مزرعه.

$$Y=1.124x+1605 \quad (1)$$

به منظور امکان‌سنجی استفاده از شاخص‌های طیفی برای تعیین محل و مساحت مزارع سوخته، نخست اختلاف میانگین شاخص‌های طیفی در چهار عارضه مورد مطالعه از نظر آماری بررسی شد. جدول ۵ خلاصه نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر چهار نوع پوشش سطح مزرعه بر شاخص‌های طیفی و جدول ۶ مقایسه میانگین شاخص‌های مورد مطالعه در چهار نوع پوشش سطح مزرعه را نشان می‌دهد.

جدول ۷ مقادیر آستانه بالا و پایین هر یک از شاخص‌ها در چهار عارضه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۵. تجزیه واریانس اثر چهار نوع پوشش سطح مزرعه بر شاخص‌های مورد مطالعه

| میانگین مربعات | | | | درجه آزادی | منابع تغییرات |
|----------------|-------------|---------|---------|------------|--------------------|
| NDVI | BAI | NBR | NBRT | | |
| ۰/۰۰۴ | ۷۵/۳۶۵ | ۰/۰۰۱ | ۰/۱۲۵ | ۹ | تکرار |
| ۰/۳۲۵** | ۱۶۶۹۱/۰۲۳** | ۰/۵۰۰** | ۰/۵۹۱** | ۳ | نوع پوشش سطح مزرعه |
| ۰/۰۰۴ | ۷۸/۴۶۳ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۷ | ۲۷ | خطا |

**بیانگر معنی‌داری در سطح یک درصد است.

جدول ۶. مقایسه میانگین چهار نوع پوشش مزرعه و شاخص‌های مورد مطالعه

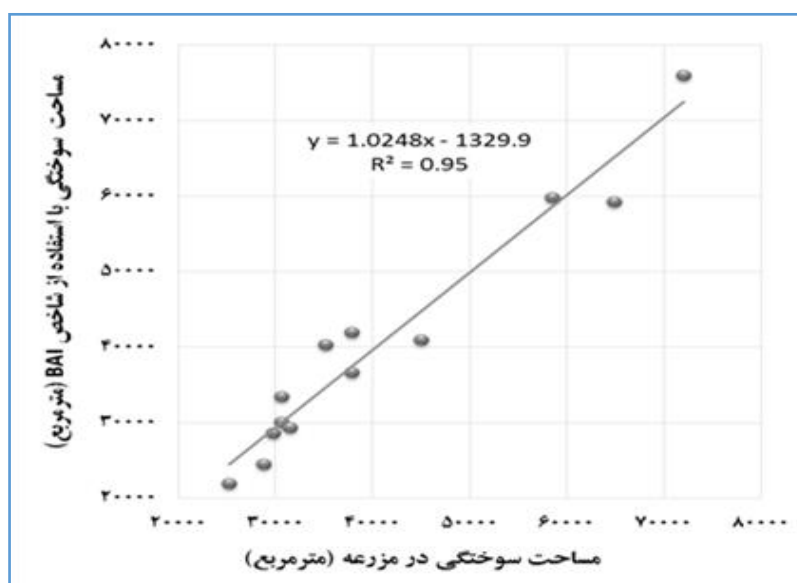
| NBRT | NBR | BAI | NDVI | |
|-------|----------|--------|-------|--------------|
| ۰/۱۴a | -۰/۰۱۷a | ۸۸/۳۹a | ۰/۱۱a | بقایای سوخته |
| ۰/۱۵ | -۰/۰۰۹۴a | ۹/۲۹b | ۰/۱۲a | خاک |
| ۰/۶۳b | ۰/۱۷b | ۴/۲۰b | ۰/۱۵a | بقایای گیاهی |
| ۰/۴۶c | ۰/۴۶c | ۶/۸۷b | ۰/۴۸b | پوشش سبز |

اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشترک‌اند فاقد اختلاف معنی‌دارند.

جدول ۷. آستانه بالا و پایین شاخص‌های مورد مطالعه در چهار نوع پوشش سطحی مزارع

| شاخص‌ها | آستانه بالا | آستانه پایین | آستانه بالا | آستانه پایین | آستانه بالا | آستانه پایین | آستانه بالا | آستانه پایین |
|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| NDVI | NDVI | BAI | BAI | NBR | NBR | NBRT | NBRT | |
| بقایای سوخته | ۰/۱۴۹ | ۰/۱۲۴ | ۰/۰۰۱ | -۰/۰۳۶ | ۱۰۷/۲ | ۶۹/۵ | ۰/۱۱۶ | ۰/۱۰۱ |
| خاک | ۰/۱۵۲ | ۰/۱۴۳ | -۰/۰۰۴ | -۰/۰۱۵ | ۹/۴ | ۹/۱ | ۰/۱۱۴ | ۰/۱۱۲ |
| بقایای گیاهی | ۰/۶۳۷ | ۰/۶۲۲ | ۰/۱۸۱ | ۰/۱۵۶ | ۴/۴ | ۴ | ۰/۱۵۶ | ۰/۱۴۷ |
| پوشش سبز | ۰/۴۹۱ | ۰/۴۳۵ | ۰/۵۰۵ | ۰/۴۱۶ | ۷/۴ | ۶/۴ | ۰/۵۱۸ | ۰/۴۵۰ |

برای تمایز بقایای گیاهی سوخته از سایر پوشش‌ها، آستانه پایین (۶۹/۵) و بالای (۱۰۷/۲) شاخص BAI استفاده شد. جدول ۴ نتایج همبستگی داده‌های به‌دست‌آمده از شاخص BAI و داده‌های میدانی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. رابطه بین مساحت سوختگی به‌دست‌آمده از شاخص BAI و مساحت سوختگی در مزرعه

می‌توان با استفاده از رابطه ۲ مساحت سوختگی در مزارع را با ضریب تبیین ۰/۹۵ تخمین زد؛ که در آن x مساحت سوختگی حاصل از شاخص BAI است و y مساحت سوختگی در مزرعه.

$$Y = 1.0248x - 1329.9 \quad (۲)$$

بحث و نتیجه‌گیری

شکل ۲ نشان می‌دهد که طیف بازتاب‌یافته از چهار نوع پوشش سطح مزرعه در باندهای ۱ تا ۳ تصویر تقریباً بر هم منطبق‌اند یا فاصله بسیار کمی با هم دارند. اما در باند ۴ تا ۷، تباین بین طیف بازتاب‌یافته افزایش یافته است.

در بازتاب طیفی گیاهان، کلروفیل، ذرات رنگی، آب موجود در گیاه، شکل، ساختار فیزیکی، و بسیاری از پارامترها تأثیر دارند، اما طرح کلی انعکاس گیاهان یکسان است. بخش‌های متفاوت برگ تأثیرات متفاوتی در انرژی الکترومغناطیسی تابیده شده از خورشید دارند. در بخش مرئی میزان جذب بالاست. انعکاس در این بخش تحت کنترل کلروفیل و مواد رنگی برگ مانند گزانتوفیل، کاروتنوئیدها، و آنتوسیانین‌ها قرار می‌گیرد.

حداکثر انعکاس در بخش مرئی در طول موج ۰/۵۵ میکرومتر (سبز) است. جذب شدید انرژی الکترومغناطیسی به وسیله کلروفیل در طول موج‌های آبی و قرمز و همچنین عبور نسبتاً بالا در این محدوده باعث پایین بودن میزان انعکاس می‌شود. در نمودار واکنش طیفی (شکل ۲) مشاهده می‌شود که گیاه سبز دارای کمترین بازتاب است و به همین علت نمودار واکنش طیفی گیاه سبز پایین تر از سایر نمودارها قرار دارد. در محدوده مادون قرمز نزدیک (۰/۷ تا ۳/۱ میکرومتر) مقدار جذب و عبور کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان انعکاس به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این اتفاق در همه پوشش‌های سطحی مورد مطالعه از باند ۵ به بعد افتاده است. ساختمان برگ، فضای بین سلولی، و آب داخل سلولی در ساختار اسفنجی مزوفیل برگ انعکاس این محدوده را کنترل می‌کند. باند مادون قرمز نزدیک در سنجنده‌ها به تاج پوشش و توده حیاتی^۱ گیاهان خیلی حساس است.

تاگر (۱۹۷۹)، بر اساس همین خصوصیات انعکاسی گیاهان در باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک، شاخص پوشش گیاهی (NDVI) را برای تشخیص سلامتی، شادابی، و همچنین تراکم پوشش گیاهی معرفی کرد. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده شد، میزان بازتاب در باند ۵ برای گیاه سبز به یک‌باره افزایش یافته است. این موضوع به سبب واکنش کلروفیل در طول موج مادون قرمز نزدیک است.

با توجه به نتایج این منحنی، می‌توان دریافت که جداسازی بقایای گیاهی و خاک با استفاده از تصاویر سنجنده لندست ۸ در باندهای سه‌گانه اول کار دشواری است، اما در باندهای ۴ تا ۷، که تباین بین طیف بازتاب یافته از بقایای سوخته با سایر عوارض زیاد است، این امکان وجود دارد.

با توجه به نتایج شکل ۲، تباین بین بازتاب سطحی خاکستر با بازتاب سطحی سایر پوشش‌ها در باندهای ۴ تا ۷ و به‌ویژه در باند ۵ مقدار درخور توجهی است.

پژوهشگران (پاچکو و مکنارین، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲؛ بناری و همکاران، ۲۰۰۶)، برای تصاویر سایر ماهواره‌ها، حتی با قدرت تفکیک مکانی کمتر از تصویر مورد استفاده در این تحقیق، یافته‌های مشابهی گزارش کرده‌اند.

نتایج شکل ۲ بیانگر آن است که بقایای گیاهی در باندهای قرمز و به‌ویژه باند مادون قرمز نزدیک نسبت به خاک بازتاب بیشتری دارند. سلیمان و همکاران (۲۰۰۷) در بررسی‌های خود با استفاده از رادیومتر دستی به نتایج مشابهی دست یافتند.

پلات‌هایی که به عنوان طیف‌های خالص برای چهار عارضه پوشش سبز، سوختگی، بقایای گیاهی، و خاک در نظر گرفته شده بود به نرم‌افزار معرفی شد و در آنالیز جداسازی طیفی خطی برای تخمین درصد مساحت هر یک از عوارض در پیکسل‌های تصویر در پلات‌های سوخته استفاده شد.

نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد که مساحت مزارع سوخته، که به وسیله آنالیز جداسازی خطی تخمین زده شد، همبستگی مناسبی ($R^2=0.89$) با مساحت سوختگی اندازه‌گیری شده در زمین دارد. به علت اینکه طیف‌های خالص خاک و بقایای گیاهی مستقیم از تصویر لندست ۸ مورد استفاده در این پژوهش استخراج شد، آنالیز جداسازی طیفی به تغییرات طیفی ناشی از شرایط مانند درصد رطوبت خاک و بقایا حساسیت ندارد (پاچکو و مکنارین، ۲۰۱۲: ۴) با توجه به نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۵)، ملاحظه می‌شود که شاخص‌های مورد مطالعه تحت تأثیر نوع پوشش سطح مزرعه قرار گرفته و اختلاف آن‌ها در سطح یک درصد معنی‌دار است.

تفاوت معنی‌دار بین مقادیر شاخص‌ها در پوشش‌های مختلف از آنجا ناشی می‌شود که پوشش‌های سطحی مختلف در باندهای مادون قرمز نزدیک و طول موج کوتاه بازتاب‌های طیفی بسیار متفاوتی نسبت به یکدیگر دارند. تفاوت بازتاب بین پوشش‌های سطحی مختلف مورد مطالعه در این پژوهش به ساختار سطحی مواد تشکیل‌دهنده، میزان رطوبت، سلولز، میزان کلروفیل، فضای بین مولکولی، آرایش مولکول‌ها، و سایر عوامل بستگی دارد (فاطمی و رضایی، ۱۳۹۳). تفاوت یادشده با اعمال شاخص‌ها شدت بیشتری نیز خواهد گرفت، زیرا شاخص از یک کسر تشکیل شده است که کار آن بازسازی تفاوت بازتاب دو عارضه در یک یا چند باند تصویر ماهواره‌ای است. در این پژوهش، به‌ویژه مقدار شاخص BAI تفاوت بسیار بارزی با سایر شاخص‌ها داشته است؛ به همین سبب، باعث به‌وجود آمدن اختلاف در سطح شاخص‌ها شده است.

مقایسه میانگین شاخص‌ها برای چهار نوع پوشش سطح مزرعه (جدول ۶) نشان داد که در بین شاخص‌های مورد مطالعه فقط متوسط مقدار شاخص BAI برای پوشش بقایای سوخته با سایر پوشش‌ها از نظر آماری اختلاف دارد و در سایر موارد مقدار شاخص‌ها برای بقایای سوخته با سایر پوشش‌های سطح مزرعه تمایز معنی‌داری نداشت. بنابراین، به احتمال زیاد، قادر به جداسازی این عوارض از یکدیگر نیستند. شاخص BAI برای پوشش بقایای سوخته با مقدار متوسط ۸۸/۳۹ فاصله زیادی با مقدار این شاخص در سایر پوشش‌های سطح مزرعه با مقادیر متوسط ۹/۲۹، ۴/۲۰، و ۶/۸۷ به ترتیب برای عوارض خاک، بقایای گیاهی، و پوشش سبز دارد.

تفاوت بسیار زیاد مقدار شاخص BAI با سایر شاخص‌ها در بقایای سوخته به سبب درصد بسیار پایین بازتاب طیفی خاکستر در باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک است. به سبب وجود مقدار داده بازتاب در مخرج کسر رابطه شاخص BAI و ثابت بودن صورت کسر مقدار عددی میانگین شاخص BAI برای خاکستر بسیار بزرگ‌تر از سایر پوشش‌های سطح مزرعه شد.

بنابراین، شاخص BAI به منزله شاخص تمایز بین خاکستر بقایای گیاهی سوخته و سه نوع پوشش دیگر سطح مزرعه انتخاب شد. با توجه به نتایج جدول ۶، مشاهده می‌شود که در سایر شاخص‌ها بین مقادیر متوسط شاخص برای دو یا سه پوشش سطح مزرعه اختلاف معنی‌دار وجود ندارد و همچنین گستره کمینه و بیشینه داده‌ها با یکدیگر همپوشانی دارد. بنابراین، امکان استفاده از این شاخص‌ها برای تمایز بین چهار پوشش مورد مطالعه وجود ندارد یا با خطای زیادی همراه خواهد بود.

مقادیر شاخص NBR در پوشش بقایای سوخته و خاک اختلاف معنی‌دار نداشتند، ولی در دو پوشش بقایای گیاهی

و پوشش سبز اختلاف معنی‌دار وجود داشت. اختلاف معنی‌دار بین مقادیر شاخص NBR در گیاه سبز و بقایای گیاهی احتمالاً به سبب میزان بازتاب این دو عارضه به علت داشتن ساختار سلولزی است. از آنجا که شاخص NBR، مانند شاخص NDVI، نسبت به کلروفیل موجود در گیاه واکنش نشان می‌دهد، در گیاه سبز مقدار زیادی دارد.

استفاده از شاخص NBR این مشکل را به همراه دارد که نمی‌توان با استفاده از این شاخص بین مزرعه فاقد پوشش یعنی خاک و بقایای سوخته تمایزی ایجاد کرد و این موضوع در تعیین محل و مساحت مزارعی که در آن‌ها بقایای گیاهی آتش زده شده‌اند خطای زیادی ایجاد خواهد کرد.

بین مقادیر شاخص NDVI در پوشش بقایای سوخته، خاک، و بقایای گیاهی اختلاف معنی‌دار وجود نداشت، اما در پوشش سبز اختلاف معنی‌دار وجود داشت.

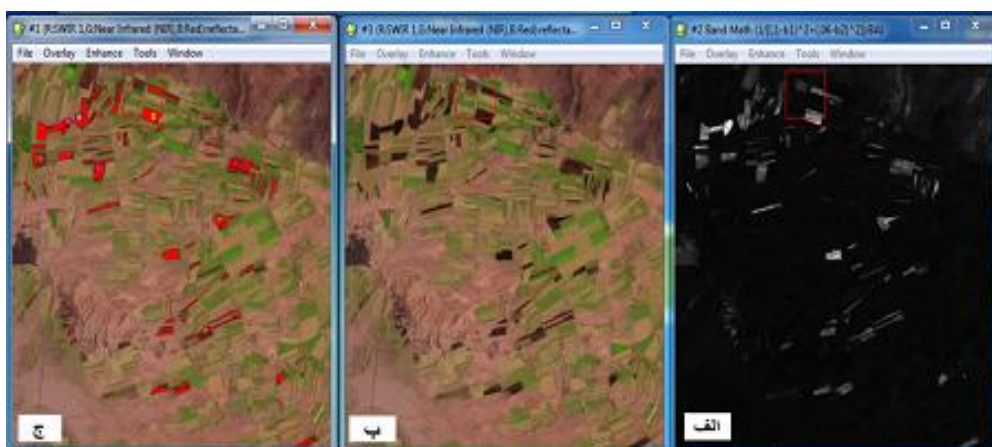
بین مقادیر شاخص NBRT در پوشش بقایای سوخته و خاک اختلاف معنی‌دار وجود نداشت، اما بین مقادیر این شاخص در پوشش بقایای گیاهی و پوشش سبز اختلاف معنی‌دار وجود داشت. بنابراین، استفاده از شاخص NBRT این مشکل را به همراه دارد که نمی‌توان با استفاده از این شاخص بین سطح خاک بدون پوشش و بقایای سوخته تمایزی ایجاد کرد.

بالا بودن مقدار شاخص NBRT در بقایای گیاهی شاید بدین سبب باشد که بقایای گیاهی به علت داشتن رنگ روشن و جذب کمتر طیف نور درجه حرارت پایین‌تری نسبت به خاک و خاکستر دارند و به سبب وجود داده باند حرارتی در رابطه این شاخص در مخرج کسر مقدار این شاخص برای بقایا بسیار بیشتر از سایر پوشش‌های سطحی بوده است. به همین شکل، تناسب درخور ملاحظه‌ای بین رنگ پوشش و میزان شاخص NBRT وجود دارد که ناشی از وجود داده باند حرارتی در رابطه این شاخص است.

می‌توان از شاخص BAI برای تمایز بقایای سوخته در سطح مزرعه و سایر پوشش‌ها استفاده کرد. نتایج همچنین نشان داد، به سبب تفاوت زیاد بین متوسط شاخص BAI با سایر شاخص‌ها، گستره این شاخص برای سوختگی هیچ‌گونه همپوشانی با گستره سایر شاخص‌ها ندارد.

مطالعات آونسو و همکاران (۲۰۰۷)، در خصوص تخمین سطوح سوخته جنگل‌های اسپانیا با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS به کمک شاخص BAI، نشان داد که این شاخص از کارایی لازم برای تمایز قائل شدن بین نواحی سوخته جنگلی و نواحی سبز در تصاویر سنجنده MODIS، که دارای تفکیک‌پذیری مکانی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر است، برخوردار است. با کنار هم گذاشتن نتایج پژوهش حاضر و نتایج پژوهش آونسو و همکاران (۲۰۰۷)، می‌توان دریافت که شاخص BAI قادر است در طیف وسیعی از اندازه پیکسل‌های تصویر یعنی از تصاویر بسیار دقیق تا تصاویری با دقت کم و همچنین در شرایط مزرعه و جنگل نواحی سوخته را شناسایی کند.

مقادیر آستانه شاخص‌های NDVI، NBR، و NBRT برای خاکستر بقایای سوخته با سایر عوارض همپوشانی دارد، اما آستانه پایین و بالای شاخص BAI اختلاف بسیار زیادی با مقادیر آستانه‌های این شاخص برای سایر عوارض دارد.



شکل ۵. الف) اعمال شاخص BAI؛ ب) بدون اعمال شاخص؛ و ج) اعمال آستانه بالا و پایین شاخص BAI

در شکل ۵ تعداد زیادی مزرعه با چهار نوع پوشش مشاهده می‌شود. در بخش الف مزارع مورد مطالعه با رنگ‌های متفاوت، در بخش ب مزارع مورد مطالعه پس از اعمال شاخص BAI سوختگی با رنگ سفید، و سایر پوشش‌های سطح مزرعه با رنگ تیره دیده می‌شود.

در بخش ب قسمتی از مزارع به رنگ تیره دیده می‌شود که ممکن است بیننده فکر کند که چون رنگ سطح این بخش از مزرعه تیره (کادر مستطیلی) است، بنابراین سوختگی است، اما در بخش الف مشاهده می‌شود که این‌گونه نیست و رنگ‌های تیره بخش ب کاذب است و نمی‌توان بر اساس آن‌ها پوشش سطحی را تعیین کرد، بلکه اظهار نظر بر اساس شاخص‌های طیفی امکان‌پذیر است. همچنین، در بخش ج آستانه پایین (۶۹/۵) و بالای (۱۰۷/۲) شاخص BAI اعمال و مزارع سوخته با رنگ قرمز از سایر پوشش‌ها متمایز شد.

اصولاً اندک خطای به‌وجود آمده در تخمین مساحت سوختگی با استفاده از شاخص‌های طیفی و آنالیز جداسازی طیفی خطی به سبب خاصیت پیکسلی تصاویر ماهواره‌ای است. چون در تصاویر ماهواره‌ای برای هر پیکسل فقط یک داده طیفی وجود دارد، پیکسل‌هایی که داده طیفی آن‌ها بیشتر از آستانه باشد جزو پیکسل سوخته به‌شمار می‌آیند. در حالی که ممکن است بخشی از پیکسل سوخته باشد؛ این موضوع باعث تخمین بیش از مقدار واقعی می‌شود. همچنین، پیکسل‌هایی که مقدار داده طیفی آن‌ها کمتر از آستانه باشد جزو پیکسل‌هایی به‌شمار خواهند آمد که در آن‌ها بقایای گیاهی آتش زده نشده است، اگرچه ممکن است بخشی از پیکسل سوخته باشد - که این موضوع باعث تخمین مساحت سوختگی کمتر از اندازه واقعی می‌شود.

منابع

فاطمی، س.ب. و رضایی، ی. (۱۳۹۳). *مبانی سنجش از دور*، انتشارات آزاده.

Alonso, F.G.; Miguel, S.M. and Cuevas, J.M. (2007). Using AWiFS and MODIS data to estimate burned areas: the case of Galicia forest fires during the 2006 summer season, *Remote Sensing Laboratory*, CIFOR-INIA, Madrid, PP.1-4.

Bannari, A.; Pacheco, A.; Staenz, K.; McNairn, H. and Omari, K. (2006). Estimating and mapping crop residues cover on agricultural lands using hyperspectral and IKONOS data, *Remote Sensing of Environment*, 104(4): 447-459.

Fatemi, S.B. and Rezaie, Y. (2014). *Principals of Remote Sensing*, Azadeh, Tehran.

- Holden, Z.A.; Smith, A.M.S.; Morgan, P.; Rollins, M.G. and Gessler, P.E. (2005). Evaluation of novel thermally enhanced spectral indices for mapping fire perimeters and comparisons with fire atlas data, *International Journal of Remote Sensing*, 26(21): 4801-4808.
- Key, C. and N. Benson (2005). Landscape Assessment: Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio; and ground measure of severity, the Composite Burn Index, In *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*, RMRS-GTR, Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Lillesand, T.M. and Keifer, R.W. (2000). Remote sensing and Image Interpretation, John Wiley & Sons, New York.
- Lopez Garcia, M.J. and Caselles, V. (1991). Mapping Burns and Natural Reforestation using Thematic Mapper Data, *Geocarto International*, 6: 31-37.
- Martín, M. P. (1998). Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. Doctoral thesis, Departamento de Geografía. Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá, Spain.
- Pacheco, A. and McNairn, H. (2010). Evaluating multispectral remote sensing and spectral unmixing analysis for crop residue mapping, *Remote Sensing of Environment*, 114(10): 2219-2228.
- Pacheco, A. and McNairn, H. (2012). Mapping Crop Residue Cover Over Regional Agricultural Landscapes in Canada, Agriculture and Agri-Food Canada, 960 Carling Avenue, Ottawa, Ontario, *Canada KIA*, 0C6: 1-4.
- Sullivan, D.G.; Fulmer, J.L.; Strickland, T.C.; Masters, M. and Yao, H. (2007). Field scale evaluation of crop residue cover distribution using airborne and satellite remote sensing, *Proceedings of the 2007 Georgia Water Resources Conference*, at the University of Georgia, PP. 127-150.
- Tucker, C.J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127-150.