

بررسی قابلیت و حساسیت‌سنجی شاخص‌های طیفی ماهواره‌ای در پهنه‌بندی شدت آتش‌سوزی مناطق جنگلی (مطالعه موردی: جنگل کاری عرب داغ-گلستان)

محمد واثق الحاجی خلف^۱، شعبان شتایی جویباری^{۲*} و رقیه جهدی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی جنگل- مدیریت جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲. استاد گروه جنگلداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۳. استادیار علوم و مهندسی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۰۴

چکیده

تهیه نقشه دقیق شدت آتش‌سوزی برای مدیریت ریسک آتش در اکوسیستم‌های جنگلی حائز اهمیت است. شاخص‌های طیفی از سنجنده‌های نوری به‌عنوان یکی از باندهای قابل قبول برای طبقه‌بندی و نشان دادن تفاوت طیفی طبقات مختلف پوشش گیاهی شناخته شده است. در این تحقیق قابلیت مجموعه‌ای از شاخص‌های استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌های Sentinel-2 و Landsat-8 با اندازه تفکیک مکانی مختلف برای تهیه نقشه دقیق شدت آتش‌سوزی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی در منطقه دچار آتش‌سوزی سال ۱۳۹۷ جنگلکاری‌های عرب‌داغ استان گلستان بررسی شد. بعد از پیش‌پردازش‌های لازم، شاخص‌های تک و دوزمانه مناسب از تصاویر سنجنده‌های تحت بررسی ایجاد شد. مقادیر شاخص بهینه برای باندها در فضای دوبعدی قبل و بعد از آتش‌سوزی برای بررسی حساسیت این باندها به تغییرات اتفاق‌افتاده درون طبقات آتش‌سوزی محاسبه شد. بهترین نتیجه مربوط به باندهای NIR-SWIR2 با مقدار شاخص بهینه ۰/۷۷ برای سنجنده Sentinel-2 و ۰/۶۸ برای سنجنده Landsat8-OLI به‌دست آمد. براساس مقادیر شاخص بهینه، بهترین شاخص‌ها انتخاب شد و مقادیر این شاخص‌ها پس از آتش‌سوزی و همچنین شاخص‌های دوزمانه (قبل و بعد آتش‌سوزی) استخراج شدند. نقشه واقعیت زمینی نمونه‌ای طبقات شدت آتش‌سوزی با استفاده از روش نمونه‌گیری انتخابی با بازدید میدانی از طبقات شدت دچار آتش‌سوزی در منطقه تهیه شد. طبقه‌بندی شاخص‌های مختلف با الگوریتم جنگل تصادفی انجام گرفت و نتایج با نقشه واقعیت زمینی نمونه‌ای ارزیابی شد. بهترین نتیجه با تلفیق شاخص‌ها از همه باندهای استخراج‌شده از سنجنده Landsat8-OLI به روش شاخص دوزمانه با ضریب کاپای ۰/۹۶ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جنگل تصادفی، تصاویر ماهواره‌ای، شاخص طیفی دوزمانه، شاخص بهینه، شدت آتش‌سوزی.

مقدمه

و انسانی و به خطر افتادن زندگی و دارایی‌ها می‌شود [۲]. اثرگذاری آتش در سیمای سرزمین طبیعی، درجه‌های متفاوتی دارد که شدت آتش نامیده می‌شود [۳-۵]. همچنین شدت آتش‌سوزی را می‌توان درجه تغییر در خاک و پوشش گیاهی تعریف کرد [۶]. به‌طور معمول شدت آتش‌سوزی را براساس درجه تأثیر آن بر اکوسیستم‌های طبیعی به سه دسته

آتش‌سوزی از مهم‌ترین بلایای طبیعی است که سالانه در حدود ۳۵۰ میلیون هکتار از اراضی جنگلی جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱] و سبب تخریب اکوسیستم‌های طبیعی

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۱۳۳۳۱۵۱۷

ضعیف، متوسط و شدید تقسیم می‌کنند [۷]. تهیه نقشه شدت آتش‌سوزی می‌تواند توسط مدیران جنگل برای تعیین اقدامات حمایتی و بازسازی و احیای جنگل پس از آتش‌سوزی استفاده شود [۸، ۹]. همچنین نقشه‌برداری سریع و دقیق مناطق با شدت آتش‌سوزی و نوع سوختگی توده جنگلی یک کار اصلی در مدیریت آتش از جمله برنامه‌ریزی راهبردی برای احیای پوشش گیاهی است [۱۰، ۱۱]. علاوه بر آن، شدت سوختگی پارامتر مهمی برای پیش‌بینی ساختار پوشش گیاهی و احیای مجدد آن است [۱۲، ۱۳].

تهیه نقشه شدت آتش‌سوزی‌های بزرگ در سطوح وسیع با استفاده از روش‌های سنتی عموماً دشوار است، به‌خصوص هنگامی که منطقه آتش‌سوزی دارای توپوگرافی پیچیده و شیبدار، مناطق دور از دسترس و پوشش گیاهی ناهمگن باشد. یکی از روش‌ها و منابع برای تهیه نقشه شدت آتش‌سوزی استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌ویژه شاخص‌های طیفی است. در نتیجه آتش‌سوزی پوشش‌های گیاهی، تغییرات طیفی ناشی از عوامل مختلف مانند از بین رفتن کلروفیل، لخت شدن خاک، سوختن ریشه‌ها و تغییر رطوبت رخ می‌دهد [۶]. البته کاهش کلروفیل به افزایش بازتاب در محدوده مرئی و کاهش آن در محدوده مادون قرمز (NIR) منجر می‌شود. همچنین با کاهش تاج‌پوشش درختان و رطوبت خاک، بازتاب در محدوده مادون قرمز میانی (SWIR) نیز افزایش می‌یابد [۱۴]. با توجه به دلایل ذکر شده، مشخص می‌شود که استفاده از تصاویر طیفی بعد از آتش‌سوزی نمی‌تواند به‌تنهایی در تهیه نقشه دقیق شدت آتش‌سوزی کمک کند. بنابراین تهیه و به‌کارگیری داده‌های سنجنش از دوری قبل و بعد از آتش‌سوزی و تهیه شاخص‌های طیفی دوزمانه اهمیت زیادی در مشخص کردن محدوده آتش و تهیه نقشه شدت آن دارد.

در تحقیقات مختلفی از شاخص‌های طیفی متنوعی برای تهیه نقشه مناطق سوخته‌شده و شدت آتش‌سوزی استفاده شده است. یافتن بهترین زوج باندها برای ایجاد شاخص‌های

طیفی که بیشترین تفکیک‌پذیری طبقات شدت آتش‌سوزی را ایجاد کند برای محققان بسیار مهم است. ایجاد و به‌کارگیری روش‌ها و شاخص‌های معرفی‌کننده بهترین زوج باندها برای ایجاد شاخص‌های طیفی مؤثر، می‌تواند کمک زیادی کند. به‌عنوان مثال Benson و Key (۲۰۰۵) یک شاخص به نام نسبت سوختگی نرمال‌شده (NBR) مبتنی بر باندهای مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی اول ایجاد کرده و به‌عنوان شاخص استاندارد برای پهنه‌بندی آتش‌سوزی انتخاب کردند [۱۵]. Roy و همکاران (۲۰۰۶) به‌منظور بررسی قابلیت شاخص NBR برای پهنه‌بندی آتش‌سوزی در مناطق مختلف در جهان، یک شاخص آماری به‌نام شاخص بهینه را ایجاد کردند و اظهار داشتند که شاخص NBR نتیجه متفاوتی را برحسب منطقه نشان داد [۱۶]. Escuin و همکاران (۲۰۰۸) قابلیت شاخص‌های NBR و $NDVI^2$ تصاویر Landsat TM/ETM+ با استفاده از شاخص بهینه و تعیین آستانه مناسب برای طبقات شدت آتش‌سوزی را بررسی کردند [۶]. آنها با محاسبه مقادیر پیکسل‌ها قبل و بعد از حریق برای هر شاخص، شدت آتش را با دقت ۸۴ درصد براساس آستانه مشخص برای هر منطقه محاسبه کردند. Veraverbeke و همکاران (۲۰۱۰) قابلیت شاخص‌های مبتنی بر باندهای حرارتی استخراج‌شده از ماهواره Landsat TM را برای پهنه‌بندی آتش‌سوزی با استفاده از شاخص بهینه بررسی کردند و نتیجه گرفتند که شاخص NBR تفاضلی (دوزمانه) با مقدار شاخص بهینه 0.51 از شاخص $NDVI$ تفاضلی با مقدار شاخص بهینه 0.5 و شاخص $NDMI$ با مقدار شاخص بهینه 0.41 بهتر عمل کرد [۱۷]. Stroppiana و همکاران (۲۰۱۲) برای استخراج محدوده سوخته‌شده به روش نیمه‌خودکار^۳ از شاخص‌های طیفی $NDVI$ ، EVI^4 و NBR ماهواره Landsat-TM/ETM+ استفاده کردند و نتایج با درصد

1. Normalized Burn Ratio Index
2. Normalized Difference Vegetation Index
3. Semi-automated algorithm
4. Enhancement Vegetation Index

بررسی شد. نتایج این تحقیق می‌تواند اطلاعات مفیدی درباره برنامه‌های مدیریتی با هدف کسب اطلاعات از میزان سطح مناطق سوخته‌شده با شدت‌های مختلف و ارائه برنامه‌های مناسب برای برگشت ساختار اصلی جنگل در شدت‌های مختلف آتش‌سوزی ارائه کند.

مواد و روش‌ها

منطقه تحقیق

این تحقیق در منطقه چهار آتش‌سوزی (۹ تیر ۱۳۹۷) جنگلکاری‌های عرب‌داغ واقع در ۴۰ کیلومتری شمال شرقی شهر کلاله و در حوزه سرچنگلانی گلی‌داغ با طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۴۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۳۶ درجه شمالی انجام گرفت (شکل ۱). این منطقه دارای سابقه آتش‌سوزی زیادی است که مهم‌ترین آن حریق در تاریخ ۹ تیر ۱۳۹۷ با مساحت ۲۵۰ هکتار بوده است. این منطقه از نظر پوشش گیاهی عرصه جنگلکاری، از غرب به شرق از لحاظ گونه‌ها و شرایط توپوگرافی سیمای متفاوتی دارد. مساحت این عرصه ۵۰۰۰ هکتار است که از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۶۹ با گونه‌های سرو زرین، کاج بروسیا، کاج بادامی و سرو نقره‌ای با فاصله کاشت ۳×۳ متر جنگلکاری شده است.

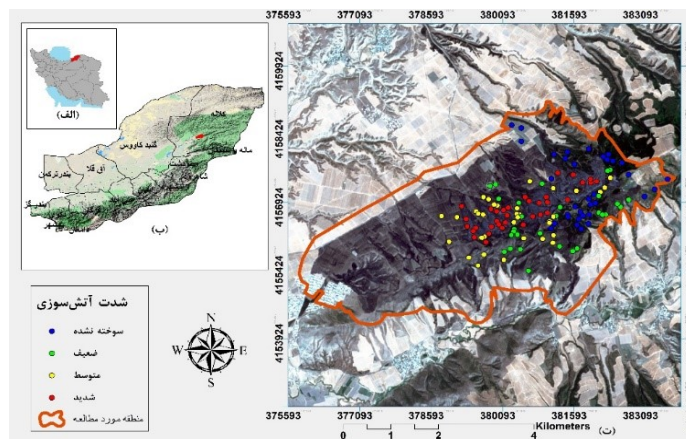
داده ماهواره‌ای

برای اجرای این تحقیق، تصاویر ماهواره‌های Sentinel-2 و Landsat-8 مربوط به قبل و بعد از آتش‌سوزی (جدول ۱) تهیه شد. داده‌های Landsat-8 در سطح ۱ تصحیحات (هندسی) دریافت شدند؛ برای تصحیحات اتمسفری تصاویر از روش FLAASH در نرم‌افزار ENVI استفاده شد. تصاویر Sentinel-2 در سطح ۲ تصحیحات (هندسی و رادیومتری) تهیه شده بودند، اما برای اجرای تصحیحات اتمسفری دقیق از ابزار Sen2core استفاده شد. برای تصحیح هندسی از نوع ارتو برای حذف اثر توپوگرافی و جابه‌جایی ناشی از آن، همه

خطای ۳ تا ۲۱ درصد ارائه شد [۱۸]. همچنین Warner و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از شاخص‌های NBR و NDVI تصاویر WorldView-3 و Landsat نقشه شدت آتش‌سوزی را تهیه کردند و به این نتیجه رسیدند که شاخص‌های طیفی WorldView-3 نتایج بهتری را در مقایسه با تصاویر Landsat ارائه می‌دهند [۱۹]. Filipponi (۲۰۱۸) با استفاده از باندهای محدوده مرئی تصاویر Sentinel-2 شاخص BAIS2 را ابداع کرد که براساس آن، به نتایج خوبی برای شناسایی مناطق سوخته‌شده در ایتالیا در سال ۲۰۱۷ دست یافت [۲۰]. Tran و همکاران (۲۰۱۸) نیز با استفاده از شاخص‌های مختلف تهیه‌شده براساس تصاویر ماهواره Landsat برای برآورد شدت آتش‌سوزی و بر مبنای شاخص بهینه به این نتیجه رسیدند که این شاخص‌ها در مناطق مختلف نتایج متفاوتی با ضرایب کاپا ۰/۵ تا ۰/۷ بر حسب منطقه ارائه دادند [۲۱]. Lasaponar و Tucci (۲۰۱۹) با استفاده از شاخص‌های RBR و RBD تصاویر Sentinel-2 طبقه‌بندی شدت آتش‌سوزی را با نتایج خوبی انجام دادند [۲۲].

با توجه به تعدد تصاویر ماهواره‌ای از طیف‌های مرئی تا مادون قرمز مرئی و حرارتی و همچنین تعدد شاخص‌های طیفی قابل ایجاد با باندهای طیفی مذکور، انتخاب بهترین و حساس‌ترین شاخص طیفی از ماهواره‌هایی با اندازه تفکیک‌های مکانی متفاوت چه به صورت تک‌زمانه (بعد از آتش‌سوزی) و چه دوزمانه (قبل و بعد آتش‌سوزی)، نیازمند بررسی‌های متعدد اکوسیستم‌های مختلف طبیعی جنگلی است. با توجه به پژوهش‌های انجام‌گرفته، هدف اصلی این تحقیق، بررسی قابلیت شاخص‌های طیفی دوزمانه (قبل و بعد از آتش‌سوزی) و شاخص‌های تک‌زمانه (پس از آتش‌سوزی) به‌عنوان یک نوآوری از دو ماهواره Landsat-8 و Sentinel-2 برای پهنه‌بندی شدت آتش‌سوزی و نشان دادن حساسیت آنها به تغییرات طیفی به آتش‌سوزی در منطقه تحقیق با استفاده از شاخص‌های است. همچنین تهیه نقشه شدت آتش‌سوزی از منطقه تحقیق به‌عنوان هدف فرعی

تصاویر با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و نقاط کنترل زمینی مورد مطابقت هندسی دقیق با زمین قرار گرفتند.



شکل ۱. محدوده منطقه تحقیق در استان گلستان و ایران (الف) و (ب)؛ موقعیت نمونه‌های آتش‌سوزی ثبت‌شده روی تصویر رنگی واقعی Sentinel 2 (ت)

جدول ۱. داده ماهواره‌ای استفاده‌شده در این تحقیق

ماهواره	اندازه تفکیک مکانی (متر)	قبل از حریق	بعد از حریق
Landsat8- OLI	مرئی و مادون قرمز (۳۰)	۱۳۹۷/۴/۷	۱۳۹۷/۵/۸
Sentinel-2	مرئی و مادون قرمز نزدیک (۱۰) مادون قرمز میانی (۲۰)	۱۳۹۷/۴/۸	۱۳۹۷/۴/۱۳

جنگل^۲ که به‌طور چشمگیر تحت تأثیر قرار نگرفته و

درختچه‌ها به‌صورت جزئی سوخته شده است.

۳. متوسط: پوشش علفی و درختچه‌ها کاملاً سوخته،

طبقه هوموس به‌صورت شدید تحت تأثیر آتش قرار گرفته

و تاج درختان به‌صورت جزئی سوخته شده است.

۴. شدید: تاج درختان به‌صورت شدید سوخته، لاش

برگ تا عمق چند سانتی‌متر سوخته و مواد آلی سطحی

به‌صورت خاکستر سفید دیده می‌شود.

جدول ۲. تعداد نقاط آموزش و ارزیابی طبقات شدت آتش‌سوزی

ارزیابی	آموزش	شدت آتش‌سوزی
۸	۲۶	سوخته نشده
۹	۲۴	ضعیف
۱۰	۲۵	متوسط
۹	۲۹	شدید
۳۶	۱۰۴	مجموع

داده زمینی

برای تهیه نقشه واقعیت زمینی، ۱۴۰ نمونه دایره‌ای با شعاع ۱۷/۸۴ متر به روش نمونه‌گیری انتخابی از وضعیت‌های مختلف طبقات آتش‌سوزی با تعداد مناسب در منطقه برداشت و موقعیت مکانی آنها با GPS ثبت شد. نمونه‌ها به نسبت ۱ به ۳ به دو دسته داده آموزش و ارزیابی تقسیم شدند (جدول ۲) و با توجه به اثر آتش بر خاک، پوشش گیاهی علفی و درختچه‌ای و درختی، منطقه تحقیق در چهار طبقه شدت آتش (شکل ۲) به شرح زیر بررسی شد [۲۶-۲۳]:

۱. سوخته نشده: مناطق سوخته نشده که آثاری از

سرایت آتش در آنها وجود نداشت.

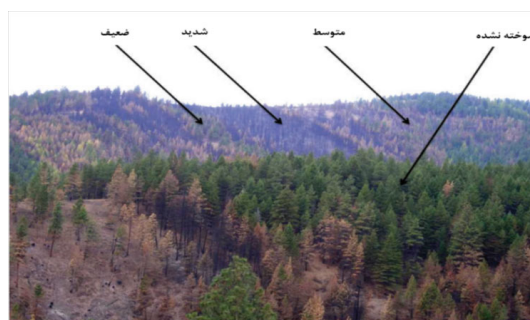
۲. ضعیف: پوشش علفی کاملاً سوخته و سطحی از

لاش‌برگ^۱ سوخته و لایه پوشش گیاهی پوسیده کف

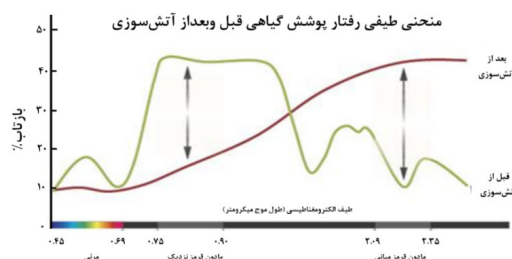
شاخص‌های طیفی به کاررفته

با بررسی رفتار طیفی پوشش گیاهی قبل و بعد از آتش‌سوزی (شکل ۳) می‌توان مشاهده کرد که بیشترین تفاوت در محدوده مادون قرمز میانی، مادون قرمز نزدیک و با درجه کمتر در محدوده مرئی است. با توجه به این موضوع، در این تحقیق برای ایجاد شاخص‌های طیفی مناسب از باندهای طیفی متناسب با تفاوت رفتار طیفی و

حساسیت آنها به تغییرات در وضعیت‌های مختلف اکوسیستم‌های جنگلی و ظرفیت‌های آنها برای ارزیابی شدت آتش استفاده شد. در این تحقیق، شاخص‌های طیفی حاصل از باندهای مرئی و مادون قرمز (نزدیک تا میانی) که در تحقیقات قبلی در انواع مختلفی از جنگل استفاده شده است [۶، ۱۰، ۱۷، ۲۱، ۲۷] ارزیابی شد (جدول ۳).



شکل ۲. تصویر شماتیک از طبقات شدت آتش‌سوزی [۲۶]



شکل ۳. رفتار طیفی گیاهان قبل و بعد از آتش‌سوزی [۲۸]

جدول ۳. شاخص‌های ارزیابی شده

منبع	فرمول	نام انگلیسی	شاخص
[۱۵، ۹]	$(NIR - SWIR2) / (NIR + SWIR2)$	Normalized Burn Ratio	NBR
[۲۹]	$(NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)$	Normalized difference water index 2	NDWI2
[۳۰]	$NIR / SWIR1$	Char Soil Index	CSI
[۳۱]	$(NIR - RED) / (NIR + RED)$	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI
[۳۲]	$1 / ((0.1 + RED)^2 + (0.06 + NIR)^2)$	Burned Area Index	BAI
[۳۳]	$n(1 - 0.25n) - ((RED - 0.125) / (1 - RED))$	Global Environment Monitoring Index	GEMI*
[۳۴]	$\sqrt{(NIR - RED) / (NIR + RED) + 0.5}$	Transformed Difference Vegetation Index	TDVI
[۳۵]	$(NIR - GREEN) / (NIR + GREEN)$	Green Normalized Difference Vegetation Index	GNDVI
[۳۶]	$NIR / GREEN$	Green Ratio Vegetation Index	GRVI
[۳۶]	$NIR - GREEN$	Green Difference Vegetation Index	GDVI
[۳۷]	$(GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$	Normalized difference water index	NDWI1
[۳۸]	$(SWIR1 - SWIR2) / (SWIR1 + SWIR2)$	Normalized Burn Ratio	NBR2
[۳۹]	$10 * SWIR2 + 9.8 * SWIR1 + 2$	Middle InfraRed Burn Index	MIRBI

$$*n = \frac{2(NIR^2 - RED^2) + 1.5NIR + 0.5RED}{NIR + RED + 0.5}$$

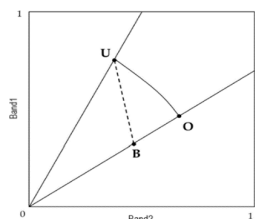
بررسی تصاویر هر دو سنجنده به مقدار بازتاب (Reflectance) تبدیل شدند و سپس با استفاده از رابطه‌های زیر مقدار شاخص بهینه محاسبه شد [۱۶].

$$Optamility = 1 - \frac{|OB|}{|UB|} \quad (1)$$

$|OB|$: قدر مطلق فاصله بین O , B در فضای دوبعدی و $|UB|$: قدر مطلق فاصله بین U , B در فضای دوبعدی برای محاسبه فاصله بین دو نقطه در فضای دوبعدی (اقلیدسی) از رابطه ۲ استفاده شد [۴۰، ۴۱]:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2)$$

x_1 , y_1 : مقدار بازتاب پیکسل در باندها قبل از آتش‌سوزی و x_2 , y_2 : مقدار بازتاب پیکسل در باندها پس از آتش‌سوزی است.



شکل ۴. رویکرد بهینه برای ارزیابی یک شاخص طیفی برای تعیین شدت آتش‌سوزی [۱۶، ۲۱]

به علت اینکه $|OB|$ هیچ‌وقت بزرگ‌تر از $|UB|$ نیست، مقدار بهینه همیشه بین صفر و ۱ متغیر است. وقتی که مقدار بهینه برابر صفر باشد، نشان می‌دهد که آن شاخص طیفی مبتنی بر آن زوج باندها کاملاً نسبت به تغییرات غیرحساس است. در مقابل، وقتی که مقدار بهینه برابر ۱ باشد، نشان می‌دهد که این شاخص طیفی برای بررسی تغییرات طیفی قبل و بعد از آتش‌سوزی مناسب است. میانه شاخص بهینه برای هر طبقه از شدت آتش‌سوزی محاسبه می‌شود که میانه نسبت به داده پرت کمتر حساسیت دارد و سپس میانگین آن از رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۲۱].

محاسبه شاخص بهینه زوج باندهای طیفی

پس از تصحیحات اتمسفری و هندسی با توجه به اینکه شاخص‌های تحت بررسی عموماً از دو باند ایجاد می‌شوند، به‌منظور یافتن مناسب‌ترین زوج باند برای ایجاد شاخص‌های طیفی در پهنه‌بندی و همچنین نشان دادن تغییرات طیفی رخ داده پس از آتش‌سوزی و رابطه آن با طبقات شدت آتش‌سوزی از شاخص بهینه زوج باندها استفاده شد. مقادیر بهینه شاخص‌ها، به حساسیت زوج باندها به تغییرات طیفی قبل و بعد آتش‌سوزی بستگی دارد که این شاخص، حساسیت هر یک از شاخص‌های طیفی به تغییرات طبقات آتش‌سوزی را نشان می‌دهد [۱۶، ۲۱]. مقدار این شاخص بین صفر تا ۱ متغیر است و هرچه به عدد ۱ نزدیک شود، آن زوج باند مطلوب‌ترند.

با محاسبه مقدار بهینه زوج باندهای طیفی، شاخص‌های طیفی مناسب مبتنی بر این باندها برای پهنه‌بندی شدت آتش‌سوزی انتخاب شدند. شاخص بهینه براساس تغییر و جابه‌جایی مقادیر بازتاب پیکسل از پیکسل‌های سوخته‌نشده (U) (میانگین مقادیر بازتاب پیکسل‌های در هر یک از زوج باندها قبل از آتش‌سوزی در محل قطعات نمونه زمینی) به سوخته‌شده (B) (میانگین مقادیر بازتاب پیکسل‌های در هر یک از زوج باندها پس از آتش‌سوزی در محل قطعات نمونه زمینی) عمل می‌کند. نقطه O در این شکل موقعیت ایدئال (مقدار بازتاب طیفی) یک پیکسل سوخته‌شده با حساسیت مطلوب را نشان می‌دهد (مقدار بازتاب ایدئال برای جدا کردن طبقه شدت آتش‌سوزی) (شکل ۴). محور x دامنه مقادیر بازتاب باند دوم زوج باند شاخص طیفی (هم قبل و هم بعد آتش‌سوزی) و محور y دامنه مقادیر بازتاب طیفی باند اول زوج باند شاخص طیفی (هم قبل و هم بعد آتش‌سوزی) را نشان می‌دهند. برای محاسبه شاخص بهینه، ابتدا مقادیر ارزش‌های رقومی (DN) همه باندهای تحت

$$\text{Overall accuracy} = \frac{1}{N} * \sum p_{ii} \quad (۴)$$

N: تعداد پیکسل‌های ارزیابی (واقعیت زمینی)

$$\text{Kappa} = \frac{po - pe}{1 - pe} \quad (۵)$$

p_{ii} : عناصر قطر اصلی ماتریس خطا یا تعداد

پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده

pe: صحت کلی، Po: توافق اتفاقی

نتایج و بحث

محاسبه مقادیر شاخص بهینه زوج باندهای اصلی نشان داد که زوج باندهای سنجنده Sentinel-2 دارای حساسیت بیشتری از زوج باندهای سنجنده Landsat8-OLI است؛ بهترین حساسیت مربوط به باندهای NIR_SWIR2 است که مقدار میانگین شاخص بهینه (۰/۷۷) در سنجنده Sentinel و (۰/۶۸) در سنجنده Landsat8-OLI است (جدول ۳) این مورد به این دلیل است که بیشترین تفاوت بازتاب طیفی گیاهان قبل و بعد از آتش‌سوزی در این محدوده واقع شده است (شکل ۳) مقدار شاخص بهینه این باندها حساسیت زیادی را نشان داد و چون بازتاب طیفی به شدت آتش‌سوزی بستگی داشت، با افزایش شدت سوختگی، باندها حساسیت بیشتری نشان دادند. نتیجه این ترکیب با نتیجه تحقیق Escuin و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت داشت. آنها در تحقیق خود از شاخص NBR مبتنی بر این باندها استفاده کردند [۶]، اما در پژوهش Tran و همکاران (۲۰۱۸) اشاره شده که این شاخص در بعضی مناطق حساسیت کمی به شدت آتش‌سوزی نشان داد [۲۱]. ترکیب NIR-SWIR1 حساسیتی کمتر از ترکیب NIR_SWIR2 (جدول ۴) نشان داد که برحسب رفتار طیفی گیاهان (شکل ۳) تفاوت بازتاب قبل و بعد از آتش‌سوزی در باند مادون قرمز میانی اول کمتر از باند مادون قرمز میانی دوم است. حساسیت و قابلیت تفکیک برای طبقه‌های اول و دوم ترکیب GREEN-SWIR1 بیشتر از بقیه ترکیبات باندهای است. ترکیب باندهای NIR-RED برای

$$\text{Average Optimality} = 0.1 * O1 + 0.3 * O2 + 0.6 * O3 \quad (۳)$$

طبقه‌بندی

پس از محاسبه شاخص بهینه برای باندهای مورد استفاده، سنجنده‌های مختلف، برای طبقه‌بندی، شاخص‌ها با باندهایی که دارای مقدار شاخص بهینه بیشتر از ۵۰ درصد یا دارای حداقل قابلیت جدا کردن دو طبقه آتش‌سوزی [۲۱] بودند انتخاب شدند. شاخص‌های طیفی دوزمانه (قبل و بعد آتش‌سوزی) و شاخص‌های تک‌زمانه (پس از آتش‌سوزی) محاسبه شده و مقادیر پیکسل‌ها منطبق بر نمونه‌های واقعیت زمینی استخراج شد سپس همبستگی پیرسون بین تک‌تک شاخص‌ها و طبقات شدت آتش‌سوزی تعیین شد. طبقه‌بندی و تهیه نقشه شدت آتش‌سوزی با استفاده از الگوریتم ناپارامتریک جنگل تصادفی^۱ با استفاده از همه شاخص‌ها و همچنین با بهترین شاخص‌های زوج باندهای و همچنین شاخص‌هایی که بیشترین همبستگی را با طبقات آتش‌سوزی از هر ترکیب باندهای داشتند انجام گرفت. الگوریتم جنگل تصادفی یک الگوریتم یادگیری ماشین با قابلیت استفاده آسان است که اغلب اوقات نتایج بسیار خوبی را حتی بدون تنظیم پارامترهای آن فراهم می‌کند که برای طبقه‌بندی تصاویر سنجنش از دور از پرکاربردترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین محسوب می‌شود [۴۲، ۴۳]. در اجرای الگوریتم، بررسی پارامترهای مختلف مانند تعداد درختان از روش جست‌وجوی شبکه و تعداد گره‌های طبقه‌بندی به روش آزمون و خطا انجام گرفت تا بهترین نتیجه حاصل شود. محاسبات شاخص بهینه با نرم‌افزارهای R Studio و طبقه‌بندی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS Pro 2.4 انجام گرفت.

ارزیابی صحت

نتایج طبقه‌بندی با استفاده از نمونه‌های ارزیابی نمونه‌های زمینی ارزیابی شد. بررسی صحت طبقه‌بندی براساس صحت کلی [۴۴] (رابطه ۴) و ضریب کاپا [۴۵] (رابطه ۵) محاسبه شد.

GREEN و همچنین ترکیب SWIR1-SWIR2 برای سه طبقه آتش‌سوزی، دارای حساسیت متوسط بودند [۲۱]. ترکیب بانندی RED-BLUE و RED-GREEN نسبت به بقیه ترکیبات بانندی در هر دو سنجنده حساسیت ضعیف نشان داد، زیرا بانند آبی و بانند قرمز برحسب رفتار طیفی بازتاب قبل و بعد از آتش‌سوزی حساسیت بسیار کمی دارند، بنابراین این دو ترکیب در فرایند طبقه‌بندی استفاده نشد.

تفکیک طبقات شدت آتش‌سوزی حساسیت کمتری (۰/۵۲) نشان داد، زیرا تفاوت بازتاب قبل و بعد از آتش‌سوزی در محدوده قرمز بسیار کم است و همچنین به دلیل وجود مازاد محصولات کشاورزی در منطقه سوخته شده، بازتاب آن قبل از آتش‌سوزی بسیار کم است. این نتیجه مطابق با مطالعه Tran و همکاران (۲۰۱۸) است که در تحقیق خود از شاخص NDVI استفاده کردند که مقدار شاخص بهینه آن اندک بود. شاخص‌های طیفی حاصل از ترکیب NIR-

جدول ۴. مقادیر شاخص بهینه برای هر بانند (زوج باندها)

Sentinel-2				Landsat8-OLI				سنجنده
O1	O2	O3	AVG	O1	O2	O3	AVG	Optimality/index
۰/۵۲	۰/۵۸	۰/۱۹	۰/۱۷۷	۰/۱۸۴	۰/۱۶۴	۰/۱۶۸	۰/۱۶۸	NIR-SWIR2
۰/۱۶۴	۰/۱۶۵	۰/۱۶۹	۰/۱۶۷	۰/۱۶۶	۰/۱۶	۰/۱۶۴	۰/۱۶۳	Green-SWIR1
۰/۵۲	۰/۴۴	۰/۱۶۱	۰/۱۵۵	۰/۴۴	۰/۱۵۵	۰/۱۶	۰/۱۵۷	NIR-SWIR1
۰/۴۸	۰/۳۸	۰/۵۹	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۴	۰/۴۸	۰/۴۶	NIR-RED
۰/۵۶	۰/۴۸	۰/۵۲	۰/۵۱	۰/۱۶	۰/۴۹	۰/۴۴	۰/۴۶	NIR-GREEN
۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۵۱	۰/۱۶۱	۰/۵۴	۰/۵۱	۰/۵۳	SWIR1-SWIR2
۰/۴۹	۰/۴۷	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۵۱	۰/۴۸	۰/۳۱	۰/۳۸	RED-BLUE
۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۳۶	۰/۴۸	۰/۳۱	۰/۳۵	۰/۳۵	RED-GREEN

همکاران (۲۰۱۴) و Mallinis و همکاران (۲۰۱۸) که در تحقیقات خود از شاخص NBR دوزمانه استفاده کردند [۴۶، ۴۷] و نیز همسو با نتیجه Escuin و همکاران (۲۰۰۸) که در تحقیق خود از شاخص NBR دوزمانه و پس از آتش‌سوزی استفاده کردند [۶] است. در طبقه‌بندی شاخص‌های مبتنی بر ترکیب NIR-RED پس از آتش‌سوزی نتایج مناسبی با ضریب کاپا ۰/۷۲ برای تصاویر Sentinel-2 و ۰/۸ برای تصاویر Landsat-8 به دست آمد (جدول ۵)، ضمن اینکه نتیجه شایان توجهی برای روش شاخص دوزمانه در این تحقیق ارائه شد. این نتیجه همسو با نتایج تحقیقات Epting و همکاران (۲۰۰۵)، Veraverbeke و همکاران (۲۰۱۱) و Escuin و همکاران (۲۰۰۸) است که در تحقیق خود از شاخص NDVI استفاده کردند [۶، ۴۸، ۴۹] و همچنین با نتایج تحقیقات Athanasakis و همکاران (۲۰۱۷) و Schepers و همکاران (۲۰۱۴) که از شاخص‌های GEMI و BAI استفاده کردند مطابقت دارد [۴۶، ۵۰]. این مسئله احتمالاً به این موضوع ربط دارد که شاخص پس از آتش‌سوزی مبتنی

به دلیل اینکه در طبقه‌بندی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی باید دست‌کم دو متغیر مستقل (استفاده از مجموعه شاخص‌های طیفی از زوج باندها) برای برآورد یک متغیر وابسته استفاده شود و نیز شاخص NBR تنها شاخص مبتنی بر ترکیب NIR_SWIR2 است، طبقه‌بندی با تلفیق شاخص‌های طیفی مبتنی بر ترکیب NIR-SWIR1 و ترکیب NIR_SWIR2 انجام گرفت (جدول ۵). به‌طور کلی شاخص‌های طیفی مورد استفاده در فرایند طبقه‌بندی نتایج شایان توجهی را نشان دادند و طبقه‌بندی با استفاده از شاخص‌های دوزمانه به دلیل حساسیت بیشتر برای تغییرات پوشش گیاهی نتایجی بهتر از روش کاربرد شاخص‌های طیفی پس از آتش‌سوزی ارائه داد [۶]. براساس شاخص‌های مبتنی بر باندهای NIR_SWIR به روش دوزمانه، ترکیبات بانندی برای سنجنده‌های Landsat8-OLI و Sentinel-2 به ترتیب با مقدار ضریب کاپای ۰/۹۱ و ۰/۸۷ بهترین نتایج را نشان داد (جدول ۴). این نتیجه موافق با رفتار طیفی گیاهان (شکل ۳) و شاخص بهینه (جدول ۳) و همسو با یافته‌های Schepers و

بر ترکیب زوجی SWIR1_SWIR2 با ضریب کاپا ۰/۹۲ و ۰/۸۷ به ترتیب برای سنجنده Landsat8-OLI و Sentinel-2 به دست آمد. اگرچه شاخص بهینه حساسیت متوسط برای این ترکیب محاسبه شد و نتیجه چشمگیری در مقایسه با روش شاخص پس از آتش‌سوزی به دست آمد که بیشترین تفاوت بین بازتاب پوشش گیاهی در این محدوده واقع شده است (شکل ۳). برای افزایش دقت طبقه‌بندی، بررسی همبستگی بین شاخص‌ها و طبقات شدت آتش‌سوزی انجام شد (جدول ۵) و شاخص‌های دارای بیشترین همبستگی از هر ترکیب بانندی انتخاب شدند. همچنین طبقه‌بندی مجدد با استفاده از همه شاخص‌ها انجام گرفت و ارزیابی صحت نتایج با داده‌های آزمون استخراج شد (جدول ۶). در طبقه‌بندی با بهترین مقدار همبستگی، دقت طبقه‌بندی افزایش یافت و توافق تقریباً کاملی با روش شاخص دوزمانه با ضریب کاپا ۰/۹۷ برای سنجنده Landsat-8 و ۰/۹۲ برای سنجنده Sentinel-2 به دست آمد (شکل ۵). همچنین با روش شاخص پس از آتش‌سوزی دقت افزایش یافت (شکل ۵) که برای شاخص‌های NBR, NDWI2, BAI, NDWI1 بیشترین همبستگی را با طبقات شدت آتش‌سوزی داشتند (جدول ۵). درحالی که استفاده از همه شاخص‌ها در طبقه‌بندی نسبت به انتخاب بهترین شاخص‌ها نتایج ضعیف‌تری را ارائه داد.

بر باندهای NIR-RED با وضعیت پوشش گیاهی قبل از آتش‌سوزی ارتباطی ندارد و تفاوت بازتاب بین طبقات آتش‌سوزی زیاد است، درحالی که شاخص دوزمانه به وضعیت پوشش گیاهی در قبل و پس از آتش‌سوزی وابسته بوده و بر مبنای شاخص بهینه حساسیت متوسط نشان داده شده است (جدول ۳). با وجود این، نتیجه تحقیق Tanase و همکاران (۲۰۱۱) که از شاخص NDVI استفاده کردند [۵۱] با یافته‌های این تحقیق مغایرت دارد، زیرا استفاده از مجموعه شاخص‌های مبتنی بر باندهای NIR-RED به خصوص شاخص GEMI در کاهش اثر خطای اتمسفری مؤثر است [۴۶] که در نتیجه موجب افزایش دقت طبقه‌بندی شد.

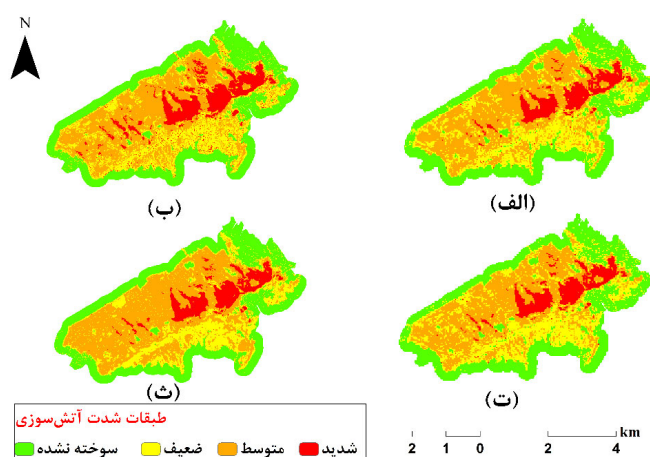
نتایج طبقه‌بندی با شاخص‌های مبتنی بر باندهای NIR_GREEN استخراج شده از سنجنده Landsat8-OLI دارای نتیجه بهتری از شاخص‌های استخراج شده از سنجنده Sentinel-2 بودند. تفاوت بازتاب پوشش گیاهی قبل و بعد از آتش‌سوزی در باندهای NIR و GREEN زیاد است (شکل ۳) و در نتیجه استفاده از شاخص‌های طیفی مبتنی بر این باندها نتایج شایان توجهی در طبقه‌بندی نشان داد (جدول ۶). این نتیجه طبقه‌بندی با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر باندهای NIR-GREEN با نتیجه تحقیق Mallinis و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت داشت [۴۷]. بهترین نتیجه در هر دو سنجنده به روش شاخص دوزمانه شاخص‌های مبتنی

جدول ۵. مقادیر همبستگی بین شاخص‌ها و طبقات شدت آتش‌سوزی

Sentinel-2		Landsat8- OLI		سنجنده	
دوزمانه	پس از آتش	دوزمانه	پس از آتش	شاخص	باندهای مورد استفاده
۰/۹۴	۰/۸	۰/۹۲	۰/۸۸	NBR	NIR_SWIR2
۰/۹۲	۰/۶۳	۰/۸۸	۰/۸۳	NDWI2	NIR_SWIR1
۰/۸۱	۰/۶۵	۰/۸۲	۰/۶۴	CSI	NIR-Red
۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۸۲	NDVI	
۰/۹۳	۰/۸۸	۰/۹۲	۰/۸۲	BAI	
۰/۸۷	۰/۹	۰/۸۶	۰/۹۳	GEMI	
۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۸۲	TDVI	
۰/۹۱	۰/۲۱	۰/۹۱	۰/۸۳	GNDI	NIR_GREEN
۰/۸۴	۰/۲۱	۰/۸۴	۰/۸۳	GRVI	
۰/۸۴	۰/۰۷	۰/۸۴	۰/۹۳	GDVI	
۰/۹۱	۰/۸۶	۰/۹۱	۰/۸۳	NDWI1	SWIR1_SWIR2
۰/۹۳	۰/۸۶	۰/۹۳	۰/۸۸	NBR2	
۰/۷۱	۰/۸۸	۰/۴۸	۰/۰۶	MIRBI	

جدول ۶. مقادیر نتایج ارزیابی صحت نقشه‌های طبقه‌بندی شاخص‌ها با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (OA=Overall accuracy)

Sentinel-2		Landsat8- OLI		ماهواره		
دو زمانه		دو زمانه		باند‌ها		
پس از آتش	پس از آتش	پس از آتش	پس از آتش	پس از آتش	پس از آتش	
Kappa	OA	Kappa	OA	Kappa	OA	
۰/۵۷	۰/۶۹	۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۶۵	۰/۷۴	NIR_SWIR(1-2)
۰/۷۲	۰/۸	۰/۸۴	۰/۸۸	۰/۸	۰/۸۵	NIR-RED
۰/۶۵	۰/۷۴	۰/۷۶	۰/۸۲	۰/۷۶	۰/۸۲	NIR_GREEN
۰/۶۵	۰/۷۴	۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۸	۰/۸۵	SWIR1_SWIR2
۰/۸	۰/۸۵	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۸۸	۰/۹۱	NBR+NDWI2+BAI+NDWI1+NBR2
۰/۷۶	۰/۸۲	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۸۸	۰/۹۱	ALL



شکل ۵. نتایج طبقه‌بندی شدت آتش‌سوزی، روش شاخص‌های تک‌زمانه (تصویر پس از آتش‌سوزی) استخراج‌شده از سنجنده Landsat8-OLI (الف)، روش شاخص پس از آتش‌سوزی استخراج‌شده از سنجنده Sentinel 2 (ب)، روش شاخص دو زمانه (تصاویر قبل و بعد آتش‌سوزی) استخراج‌شده از سنجنده Landsat8- OLI (ت)، روش شاخص دو زمانه استخراج‌شده از سنجنده Sentinel 2 (ث)

نتیجه‌گیری

بررسی شاخص‌های طیفی مبتنی بر ترکیبات باندهای مختلف برای پهنه‌بندی شدت آتش‌سوزی در این تحقیق نشان داد که شاخص‌های مختلف نتایج متفاوتی را برحسب نوع سنجنده و روش ساختن شاخص ارائه می‌دهند. به‌طور کلی بررسی صحت نقشه طبقه‌بندی مناطق با شدت آتش‌سوزی مختلف نشان داد که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای پهنه‌بندی شدت آتش نتایج دقیقی را ارائه می‌دهد و استفاده از شاخص‌های طیفی دو زمانه حاصل از تفاضل تصاویر قبل و بعد از آتش‌سوزی سبب افزایش دقت طبقه‌بندی به دلیل ارتباط بیشتر با وضعیت گیاهان قبل و بعد از آتش‌سوزی در

مقایسه با شاخص‌های طیفی بعد از آتش‌سوزی می‌شود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای طبقه‌بندی شدت آتش‌سوزی در مناطق دچار آتش‌سوزی باید از تصاویر قبل و بعد از آتش‌سوزی استفاده کرد. نتایج طبقه‌بندی با تک‌شاخص‌های طیفی مختلف نشان داد که بهترین نتیجه طبقه‌بندی مربوط به شاخص‌های مبتنی بر زوج باندهای SWIR1_SWIR2 و NIR_SWIR2 است، علی‌رغم اینکه برحسب شاخص بهینه، این موارد حساسیت متوسطی را نشان دادند (جدول ۳). همچنین استفاده از ترکیبات باندهای (بهترین شاخص‌ها) مختلف در مقایسه با

به‌کارگیری همه شاخص‌های تهیه‌شده در این تحقیق در فرایند طبقه‌بندی موجب بهبود نتیجه طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۵) و در نتیجه نقشه دقیق‌تری برای شدت آتش‌سوزی حاصل می‌شود. اگرچه این تحقیق نتایجی خوبی را برای تهیه نقشه شدت آتش‌سوزی کسب کرد، برای اطمینان و قطعیت بیشتر، باید بررسی بیشتری درباره رابطه این شاخص‌ها با دیگر الگوریتم‌های طبقه‌بندی و شاخص‌های حساسیت مختلف صورت گیرد و همچنین بررسی قابلیت شاخص‌های طیفی در مناطق مختلف برای پهنه‌بندی شدت آتش‌سوزی پیشنهاد می‌شود.

References

- [1]. Van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Giglio, L., Collatz, G.J., Kasibhatla, P.S., and Arellano Jr, A.F. (2006). Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6 (11): 3423-3441.
- [2]. Cardil, A., and Molina, D. (2015). Factors causing victims of wildland fires in Spain (1980–2010). *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 21(1): 67-80.
- [3]. Sugihara, N.G., Van Wagtenonk, J.W., Fites-Kaufman, J., Shaffer, K.E., and Thode, A.E. (2006). *Fire in California's Ecosystems*. University of California Press.
- [4]. Hessburg, P.F., Agee, J.K., and Franklin, J.F. (2005). Dry forests and wildland fires of the inland Northwest USA: contrasting the landscape ecology of the pre-settlement and modern eras. *Forest Ecology and Management*, 211(1-2): 117-139.
- [5]. Kasischke, E.S., and Stocks, B.J. (2012). *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*. Springer-Verlag, New York, Inc.
- [6]. Escuin, S., Navarro, R., and Fernandez, P. (2008). Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4): 1053-1073.
- [7]. DeBano, L.F., Neary, D.G., and Ffolliott, P.F. (1998). *Fire Effects on Ecosystems*. John Wiley & Sons, USA.
- [8]. Brewer, C.K., Winne, J.C., Redmond, R.L., Opitz, D.W., and Mangrich, M.V. (2005). Classifying and mapping wildfire severity. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(11): 1311-1320.
- [9]. García, M.L., and Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto International*, 6(1): 31-37.
- [10]. Parks, S., Dillon, G., and Miller, C. (2014). A new metric for quantifying burn severity: the relativized burn ratio. *Remote Sensing*, 6(3): 1827-1844.
- [11]. Keeley, J.E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1): 116-126.
- [12]. Macdonald, S.E. (2007) Effects of partial post-fire salvage harvesting on vegetation communities in the boreal mixedwood forest region of northeastern Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management*, 239(1-3): 21-31.
- [13]. Johnstone, J., and Chapin, F. (2006). Fire interval effects on successional trajectory in boreal forests of northwest Canada. *Ecosystems*, 9(2): 268-277.
- [14]. Chuvieco, E. (2012) *Remote sensing of large wildfires: in the European Mediterranean Basin*. Springer Science & Business Media.
- [15]. Key, C., and Benson, N. (2005). Landscape assessment: remote sensing of severity, the normalized burn ratio and ground measure of severity, the composite burn index. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system Ogden, Utah: USDA Forest Service, Rocky Mountain Res. Station.
- [16]. Roy, D.P., Boschetti, L., and Trigg, S.N. (2006) Remote sensing of fire severity: assessing the performance of the normalized burn ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1): 112-116.

- [17]. Veraverbeke, S., Verstraeten, W.W., Lhermitte, S., and Goossens, R. (2010). Evaluating Landsat Thematic Mapper spectral indices for estimating burn severity of the 2007 Peloponnese wildfires in Greece. *International Journal of Wildland Fire*, 19(5): 558-569.
- [18]. Stroppiana, D., Bordogna, G., Carrara, P., Boschetti, M., Boschetti, L., and Brivio, P. (2012). A method for extracting burned areas from Landsat TM/ETM+ images by soft aggregation of multiple Spectral Indices and a region growing algorithm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 69: 88-102.
- [19]. Warner, T.A., Skowronski, N.S., and Gallagher, M.R. (2017). High spatial resolution burn severity mapping of the New Jersey Pine Barrens with WorldView-3 near-infrared and shortwave infrared imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(2): 598-616.
- [20]. Filipponi, F. (2018). BAIS2: Burned Area Index for Sentinel-2, 2nd International Electronic Conference on Remote Sensing, 22 March–5 April, 2018.
- [21]. Tran, B., Tanase, M., Bennett, L., and Aponte, C. (2018). Evaluation of spectral indices for assessing fire severity in Australian temperate forests. *Remote Sensing*, 10(11): 1680.
- [22]. Lasaponara, R., and Tucci, B. (2019). Identification of Burned Areas and Severity Using SAR Sentinel-1. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(6): 917-921.
- [23]. Lotan, J.E. (1985). Proceedings - Symposium and Workshop on Wilderness Fire; November 15, 1983; Missoula, Montana. General Technical Report. INT-GTR-182. USDA Forest Service. 434 p.
- [24]. Ryan, K.C. (2002). Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems. *Silva Fennica*, 36(1): 13-39.
- [25]. Turner, M.G., Hargrove, W.W., Gardner, R.H., and Romme, W.H. (1994). Effects of fire on landscape heterogeneity in Yellowstone National Park, Wyoming. *Journal of Vegetation Science*, 5(5): 731-742.
- [26]. Morgan, P., Keane, R.E., Dillon, G.K., Jain, T.B., Hudak, A.T., Karau, E.C., Sikkink, P. G., Holden, Z. A., and Strand, E. K. (2014). Challenges of assessing fire and burn severity using field measures, remote sensing and modelling. *International Journal of Wildland Fire*, 23(8): 1045-1060.
- [27]. Van Wagtendonk, J.W., Root, R.R., and Key, C. H. (2004). Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sensing of Environment*, 92(3): 397-408.
- [28]. Pepe, M., and Parente, C. (2018). Burned area recognition by change detection analysis using images derived from Sentinel-2 satellite: The case study of Sorrento Peninsula, Italy. *Journal of Applied Engineering Science*, 16(2): 225-232.
- [29]. Gao, B. C. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266
- [30]. Smith, A.M., Wooster, M.J., Drake, N.A., Dipotso, F.M., Falkowski, M.J., and Hudak, A.T. (2005). Testing the potential of multi-spectral remote sensing for retrospectively estimating fire severity in African Savannahs. *Remote Sensing of Environment*, 97 (1), 92-115.
- [31]. Rouse Jr, J.W., Haas, R., Schell, J., and Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Remote Sensingcenter, Texas A&M University, Colfegp Station, Texas.
- [32]. Chuvieco, E., Martin, M.P., and Palacios, A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23): 5103-5110.
- [33]. Pinty, B., and Verstraete, M. (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetation*, 101(1): 15-20.
- [34]. Bannari, A., Asalhi, H. and Teillet, P.M. (2002). Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002. IGARSS '02, 5: 3053-3055.
- [35]. Gitelson, A.A., and Merzlyak, M.N. (1998). Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research*, 22(5): 689-692.
- [36]. Sripada, R.P., Heiniger, R.W., White, J.G., and Meijer, A.D. (2006). Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn. *Agronomy Journal*, 98(4): 968-977.

- [37]. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7): 1425-1432.
- [38]. Guide, P. (2017). *Landsat Surface Reflectance-Derived Spectral Indices; 3.6 Version*. Department of the Interior US Geological Survey (USGS): Reston, VA, USA.
- [39]. Trigg, S., and Flasse, S. (2001). An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing*, 22(13): 2641-2647.
- [40]. Gray, A., Abbena, E., and Salamon, S. (2006). *Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica*. Chapman and Hall/CRC; 3 Edition. 1016 pages.
- [41]. Zacharski, R. (2015). *A Programmer's Guide to Data Mining: The Ancient Art of the Numerati*. Available: www.guidetodatamining.com
- [42]. Lowe, B., and Kulkarni, A. (2015). Multispectral image analysis using random forest. *International Journal on Soft Computing*, 6(1): 1-1
- [43]. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1): 5-32.
- [44]. Congalton, R.G., and Green, K. (2002). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. CRC press.
- [45]. Jenness, J., and Wynne, J.J. (2005). Cohen's Kappa and classification table metrics 2.0: An ArcView 3. x extension for accuracy assessment of spatially explicit models. Open-File Report OF 2005-1363. Flagstaff, AZ: US Geological Survey, Southwest Biological Science Center. 86 p.
- [46]. Schepers, L., Haest, B., Veraverbeke, S., Spanhove, T., Vanden Borre, J., and Goossens, R. (2014). Burned area detection and burn severity assessment of a heathland fire in Belgium using airborne imaging spectroscopy (APEX). *Remote Sensing*, 6 (3):1803-1826.
- [47]. Mallinis, G., Mitsopoulos, I., and Chrysafi, I. (2018). Evaluating and comparing Sentinel 2A and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a Mediterranean pine ecosystem of Greece. *GIScience & Remote Sensing*, 55 (1): 1-18.
- [48]. Epting, J., Verbyla, D., and Sorbel, B. (2005). Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sensing of Environment*, 96 (3-4): 328-339.
- [49]. Veraverbeke, S., Lhermitte, S., Verstraeten, W.W., and Goossens, R. (2011). Evaluation of pre/post-fire differenced spectral indices for assessing burn severity in a Mediterranean environment with Landsat Thematic Mapper. *International Journal of Remote Sensing*, 32 (12): 3521-3537.
- [50]. Athanasiadis, G., Psomiadis, E., and Chatziantoniou, A. (2017). High-resolution Earth observation data and spatial analysis for burn severity evaluation and post-fire effects assessment in the Island of Chios, Greece. *International Society for Optics and Photonics*, 104281P.
- [51]. Tanase, M., de la Riva, J., and Pérez-Cabello, F. (2011). Estimating burn severity at the regional level using optically based indices. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(4):863-872.

Ability and Sensitivity Study of Spectral Indices for Wildfire Severity Mapping (Case Study: Arabdagh-Golestan Reforestations)

Mhd.wathek Alhaj Khalaf; M.Sc. Student, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran

Shaban Shataee Jouibary*; Prof., of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran

Roghayeh Jahdi; Assist. Prof., of Forest Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, I.R. Iran

(Received: 14 January 2020, Accepted: 23 February 2020)

ABSTRACT

Fire severity mapping is very important for managing the fires in forest ecosystems. The extraction of spectral indices from optical sensors is recognized as one of the most effective bands for the classification of vegetation classes. In this study, the ability and sensitivity of some spectral indices extracted from Sentinel-2 and Landsat 8-OLI images with different spatial resolutions have been investigated for fire severity mapping using the Random Forest algorithm in a burned area located in the reforested area of Arabdagh, Golestan province. After necessary preprocessing on the bands, the appropriate mono and bi-temporal spectral vegetation indices were created. The optimal index values for bands in the bi-spectral spaces pre/post-fire were calculated to evaluate the sensitivity of bands to the changes occurring within the fire classes. The best results were obtained for the NIR-SWIR2 bands with an optimal index value of 0.77 for Sentinel-2 and 0.67 for Landsat8-OLI. The best indices were selected based on values of optimality index. The values of these indices were calculated after the fire as well as the differential (pre/post-fire) ones. The ground truth of fire severity classes map was prepared by a selective sampling method through field surveying. The classification was done with different indices by random forest (RF) algorithm and the results were assessed by the ground truth points. The result showed that the best results were obtained for a combination of many differential indices from all bi-bands of Landsat 8-OLI with kappa coefficient (0.96).

Keywords: Bi-Spectral indices, optimality, random forest algorithm, satellite images, wildfire severity.

* Corresponding Author, Email: shataee@gau.ac.ir, Tel: +989113231517