

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره نهم، شماره ۲۵، پاییز ۱۳۹۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۱

تاریخ بازنگری نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۶

صفحات: ۱۹۰ - ۱۷۱

مقاله علمی پژوهشی

بررسی شبیه‌سازی آتش با استفاده از مدل فارسایت (مطالعه موردی: بیلاق قصر داغ، شهرستان مشگین‌شهر)

رقیه جهدی^{۱*}، اردوان قربانی^۲، کیومرث سفیدی^۳

*۱. استادیار، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشگاه محقق اردبیلی

۲. دانشیار، گروه مرتع، دانشگاه محقق اردبیلی

۳. دانشیار، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشگاه محقق اردبیلی

چکیده

آتش‌سوزی به‌عنوان یکی از مخاطرات طبیعی، مشکلی جدی در بسیاری از اکوسیستم‌های جنگلی و مرتعی جهان است. در مراتع نیمه استپی استان اردبیل نیز آتش‌سوزی‌ها با شدت زیاد منجر به آثار گسترده بر این اکوسیستم‌ها می‌شود. این آتش‌سوزی‌ها نتیجه ترکیب شرایط آب و هوایی، مواد سوختنی خشک و توپوگرافی است. آتش‌سوزی بیلاق قصر داغ شهرستان مشگین‌شهر در مرداد ۱۳۹۴ نمونه‌ای از آتش‌سوزی رخ داده است. در این مطالعه شرایط آب و هوایی، مواد سوختنی و توپوگرافی که اثر زیادی بر آتش دارد، به‌دقت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. داده رفتار و گسترش آتش شامل محیط‌نهایی آتش مشاهده شده و زمان رسیدن جبهه آتش به مرز شمالی محیط آتش (نقطه اطفای حریق) جمع‌آوری شده در طول این حادثه با نتایج شبیه‌سازی آتش با مدل فارسایت مقایسه شد. میانگین مقادیر صحت شبیه‌سازی برای منطقه سوخته شده، با استفاده از ضریب سورنسون و نیز کاپا ۰٫۸۴ می‌باشد. بیش برآورد شبیه‌سازی به‌ویژه در مناطق جناحی گسترش آتش مورد انتظار و مشاهده شد؛ زیرا فعالیت‌های اطفای حریق که از گسترش آتش در این مناطق جلوگیری کرده، به دلیل نبود اطلاعات دقیق در این زمینه، در این مدل بررسی نشده است. هدف اصلی این پژوهش بررسی دقیق رفتار آتش‌سوزی اخیر به‌منظور یادگیری از آن و کاستن امکان بروز اشتباهات احتمالی یا جلوگیری از عملیات خطرناک اطفای حریق در شرایط مشابه است. علاوه بر این، نکته مهم آموختن و آمادگی تیم‌های اطفای حریق است که با رفتار ناگهانی و شدت زیاد آتش تحت شرایط سخت آتش تهدید نشوند.

واژگان کلیدی: مراتع، نیمه استپی، آتش، رفتار، تجزیه و تحلیل.

مقدمه

آتش یکی از تهدیدهای جدی برای اکوسیستم‌های طبیعی و محیط‌زیست در سراسر جهان است. آثار این پدیده معمولاً در مقیاس‌های بزرگ، با توجه به وسعت تخریب، تعداد وقوع، هزینه‌های مرتبط با اطفای آتش و از بین رفتن حیات انسان‌ها، گیاهان و جانوران و نیز سایر سرمایه‌های موجود تعیین می‌شود. از این نظر، آتش‌سوزی‌ها با شدت زیاد و فاجعه‌بار در سال ۲۰۰۷ در یونان (۷۸ کشته طی یک هفته)، سال ۲۰۱۷ در پرتغال (۶۴ کشته و ۲۰۴ زخمی طی ۵ روز) و سال ۲۰۱۸ در ایالت کالیفرنیا آمریکا (۸۳ کشته طی ده روز) نمونه‌هایی از این وقایع هستند (ویگاس^۱، ۲۰۰۹؛ واکیانو^۲ و همکاران، ۲۰۱۸). معمولاً تلفات زیاد در جریان آتش‌سوزی‌ها به دلیل شرایط آب و هوایی (از جمله درجه حرارت زیاد یا گرمای محیط، رطوبت نسبی اندک و وزش شدید باد)، تجمع زیاد مواد سوختنی خشک و توپوگرافی (مانند شیب تند) است (ویگاس و همکاران، ۲۰۰۹). این ترکیب شرایط سخت محیط آتش را که به‌طور کلی شامل مثلث آب‌وهوا، ماده سوختنی و توپوگرافی است، تشکیل می‌دهد و منجر به آتش‌سوزی‌های شدید می‌شود. به‌منظور کاهش مخاطرات آتش، به‌روزرسانی و افزایش آگاهی مردم، تیم اطفای حریق و تصمیم‌گیران درباره خطرهای آتش‌سوزی ضروری است (ویگاس، ۲۰۰۹؛ الکساندر^۳ و همکاران، ۲۰۰۳). آتش‌سوزی‌های زیادی در ایالات‌متحده آمریکا، کانادا و استرالیا مورد تجزیه و تحلیل و به‌صورت عمیق بررسی شده است (ایگر^۴ و همکاران، ۲۰۱۸؛ دودی^۵ و همکاران، ۲۰۱۹). آموخته‌های به‌دست‌آمده در این کشورها در آموزش نیروها و دستورالعمل‌های کاهش خطرهای عملیات اطفای حریق بسیار مفید بودند و به افزایش ایمنی تیم آتش کمک نمودند (مک‌کافری^۶، ۲۰۰۴).

در مطالعه‌های زیادی به بررسی اهمیت شرایط آب و هوایی در رفتار و توسعه آتش پرداخته شده است (فلنینگن و ووتون^۷، ۲۰۰۱؛ فلنینگن، ۲۰۱۱؛ کوئن و شرودر^۸، ۲۰۱۳؛ تریگو^۹ و همکاران، ۲۰۱۳؛ لوزانو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۶؛ ایگر و همکاران، ۲۰۱۸). تغییرپذیری مکانی-زمانی رفتار و گسترش آتش بیشتر مرتبط با شرایط آب و هوایی کوتاه‌مدت (از جمله سرعت و جهت باد، رطوبت نسبی، درجه حرارت) است که متغیرترین مؤلفه محیط آتش می‌باشد (پاین^{۱۱} و همکاران، ۱۹۹۶). از سوی دیگر، احتراق آتش اساساً تابعی از عوامل درازمدت از جمله خشکی، مقدار و دوره بارش، بار ماده سوختنی و نسبت ماده سوختنی زنده به مرده می‌باشد (مویلو^{۱۲} و همکاران، ۲۰۰۲). مطالعه‌های متعددی نشان داده که تغییرهای اقلیمی در مناطق مختلف جهان از جمله نواحی مدیترانه‌ای منجر به تغییرپذیری یا نوسان‌های بیشتر آب‌وهوا و افزایش در رخدادهای شدید آب و هوایی، همراه با بارندگی جمعی بیشتر در زمستان، تابستان‌های گرم‌تر و طولانی‌تر و موج‌های گرما در دفعه‌های مکرر، خواهد شد (آلکامو^{۱۳} و همکاران، ۲۰۰۷). موضوع مهم دیگر شامل رها شدن بیشتر اراضی کشاورزی و فعالیت‌های زراعی (بحث مهاجرت) که به‌صورت تدریجی منجر به

1 Viegas
2 Vacchiano
3 Alexander
4 Ager
5 Dowdy
6 Mccaffrey
7 Flannigan & Wotton
8 Coen & Schroeder
9 Trigo
10 Lozano
11 Pyne
12 Mouillot
13 Alcamo

تجمع و افزایش ماده سوختنی، احیای طبیعی علفزارها، درختچه‌زارها و جنگل‌ها و مشکلات مدیریت ماده سوختنی به‌ویژه در اکوسیستم‌های مرتعی است (کاستلنو^۱ و همکاران، ۲۰۱۰). نتایج بالقوه این تغییرها موجب افزایش تعداد فقره‌ها و شدت آتش‌سوزی‌ها، به‌ویژه در شرایط وزش بادهای شدید و امواج گرما خواهد شد (براون^۲ و همکاران، ۲۰۰۴؛ آلكامو و همکاران، ۲۰۰۷). مطالعه‌های متعددی نشان داده که فعالیت آتش‌سوزی در طول دهه‌های گذشته در بسیاری از مناطق جهان افزایش یافته است (پاوساس^۳، ۲۰۰۴؛ ویگاس و همکاران، ۲۰۰۶؛ ریانو^۴ و همکاران، ۲۰۰۷). در حقیقت آتش‌سوزی‌های فاجعه‌بار که در مناطق مختلف جهان رخ داده، اغلب در زمانی رخ داده‌اند که شرایط آب و هوایی مناسب برای شروع و گسترش آتش وجود داشته است (سالیس و همکاران^۵، ۲۰۱۲). این شرایط می‌تواند هشدار جدی برای مدیران اراضی و آتش، با توجه به سناریوهای آتی تغییرهای اقلیمی و شرایط اقتصادی-اجتماعی باشد. بدین منظور، آموزش و تعلیم تیم‌های اطفای حریق (شامل آتش‌نشان‌های حرفه‌ای یا داوطلب در مناطق جنگلی و مرتعی) در مورد درک و پیش‌بینی رفتار و گسترش آتش و نیز تعریف بهترین روش‌های پیشگیری، کاهش و اطفای حریق، برای ارتقای سطح توانمندی و اثربخشی این تیم‌ها ضروری است. از این نظر، مطالعه و درک رفتار و گسترش آتش‌سوزی‌های گذشته و ارزیابی روش‌ها، عملیات و اشتباه‌های بالقوه در طول آتش‌سوزی می‌تواند با استفاده از سیستم‌های شبیه‌سازی آتش به دست آید که بر اساس مدل نیمه تجربی پیش‌بینی رفتار آتش روترمل (۱۹۷۲) و تکنیک پخش موج بیضی‌شکل (ریچاردز^۶، ۱۹۹۰؛ فینی^۷، ۲۰۰۴) برای رشد فضایی آتش است. بر اساس این مدل‌ها، شبیه‌ساز سطح آتش فارسایت^۸ در ایالات متحده توسعه یافته که در مطالعه‌های متعددی در مناطق مختلف جهان اعتبارسنجی شده است (آرکا^۹ و همکاران، ۲۰۰۷؛ دوگوی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۷؛ جهدی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۵؛ سا^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۷؛ محمدپور و دشتی، ۲۰۱۹). از آنجایی که فارسایت یک مدل مشخص زمانی و مکانی است، می‌تواند تجزیه و تحلیل‌های دقیقی از رفتار آتش و آثار آن ارائه کند.

اطلاعات دقیق و توصیف جامع مشخصات و شرایط ماده سوختنی، موضوعی مهم در توصیف خطر آتش (دیمینگ^{۱۳} و همکاران، ۱۹۷۷)، و پیش‌بینی آثار آن (راین‌هارت^{۱۴} و همکاران، ۱۹۹۷) است. اطلاعات در زمینه بار طبیعی ماده سوختنی (نوع و اندازه) و ترکیب گونه‌ها برای بهبود برنامه‌های مدل‌سازی رفتار آتش و جلوگیری از آتش نیز ضروری است (تیان^{۱۵} و همکاران، ۲۰۰۵). در طول دهه گذشته، تلاش‌های گسترده‌ای برای تشخیص مقدار و نوع مواد سوختنی انجام شده است (دیمیتراکوپولوس^{۱۶}، ۲۰۰۲؛ کین^{۱۷} و همکاران، ۲۰۰۱؛ سندبرگ^۱ و همکاران، ۲۰۰۱؛

1 Castelnou
2 Brown
3 Pausas
4 Riano
5 Salis
6 Richards
7 Finney
8 FARSITE
9 Arca
10 Duguay
11 Jahdi
12 Sá
13 Deeming
14 Reinhardt
15 Tian
16 Dimitrakopoulos
17 Keane

فرناندز^۲ و همکاران، ۲۰۰۶). همچنین طبقه‌بندی‌های مختلف تیپ ماده سوختنی توسعه یافته و توسط بخش‌های مختلف مدیریت جنگل در سراسر جهان استفاده شده است (اوتمار^۳ و همکاران، ۲۰۰۷). در حالی که در کشور ما تجزیه و تحلیل مشخصات پوشش گیاهی در ارتباط با رفتار و ریسک آتش جزء موضوع‌هایی است که کمتر در مطالعه‌ها به‌ویژه در جنگل‌های شمال کشور مورد توجه قرار گرفته است (جهدی و همکاران، ۲۰۱۵). اگرچه فراوانی آتش، سطح سوخته‌شده و شدت و آسیب‌پذیری نسبت به آتش‌سوزی‌ها در استان اردبیل کمتر از جنگل‌های هیرکانی در شمال کشور است. ارزیابی ریسک و نیز تجزیه و تحلیل رفتار آتش به دلیل آنچه در مناطق نزدیک (به‌عنوان مثال جنگل‌های غرب گیلان) رخ می‌دهد و به دلیل آثار تغییرهای اقلیم که می‌تواند منجر به افزایش فعالیت آتش در استان اردبیل شود، ضروری است. همچنین مقدار زیاد تغییرهای کاربری اراضی، گردشگری گسترده در فصل تابستان و نیز تمرکز فعالیت‌های کشاورزی در این منطقه روی حوادث آتش‌سوزی اثرگذار است.

دوره‌های بحرانی آتش‌سوزی معمولاً با وقوع تعدادی از روزهای با شرایط سخت محیط آتش شناخته می‌شود (سالیس و همکاران، ۲۰۱۲). در چنین روزهایی، حرارت شعله‌های آتش می‌تواند داغ‌تر باشد و به سرعت از کنترل خارج شود و منجر به آتش‌سوزی‌هایی با شدت زیاد و بزرگ شود. در این وضعیت کنترل و اطفای حریق برای مدیران اراضی بسیار مهم است، ضمن اینکه این مدیران به امداد و نجات و حفظ ایمنی تیم‌های آتش، مردم و حیات‌وحش نیز توجه دارند. با توجه به آمار تعداد فقره‌های حریق و سطح سوخته در طی سال‌های گذشته، دوره بحرانی آتش‌سوزی در استان اردبیل چهار ماه (خرداد تا شهریور) است. در این مطالعه یک آتش‌سوزی با شدت زیاد که در مرداد ۱۳۹۴ در شهرستان مشگین‌شهر رخ داد و در حدود ۹۰ هکتار از مراتع منطقه را سوزاند، به‌دقت مورد بررسی قرار گرفت. اهداف اصلی این مطالعه شامل (۱) بررسی گسترش و رفتار آتش و تجزیه و تحلیل آثار مواد سوختنی، شرایط آب و هوایی و توپوگرافی بر آتش و (۲) تولید اطلاعات کاربردی برای تجزیه و تحلیل پس از آتش‌سوزی به‌منظور ارزیابی روش‌های مقابله با آتش است. قابلیت پیش‌بینی پارامترهای رفتار آتش برای مدیریت آن به‌منظور تعیین فنون اطفای حریق، منابع مالی و تجهیزات مناسب برای آتش‌سوزی‌های بالقوه و حتی آتش‌سوزی‌های فعال، بسیار مهم است. علاوه بر این، استفاده از مدل‌های آتش برای تجزیه و تحلیل فعالیت‌های مکانی مدیریت ماده سوختنی و بررسی گزینه‌های اطفای حریق‌ها در موقعیت‌ها و تحت سناریوهای آب و هوایی مختلف، ضروری است. همچنین این مورد به تعیین پیامدهای اقتصادی آتش‌سوزی‌های بالقوه با فعالیت‌های مدیریت ماده سوختنی و بدون این فعالیت‌ها، کمک می‌کند.

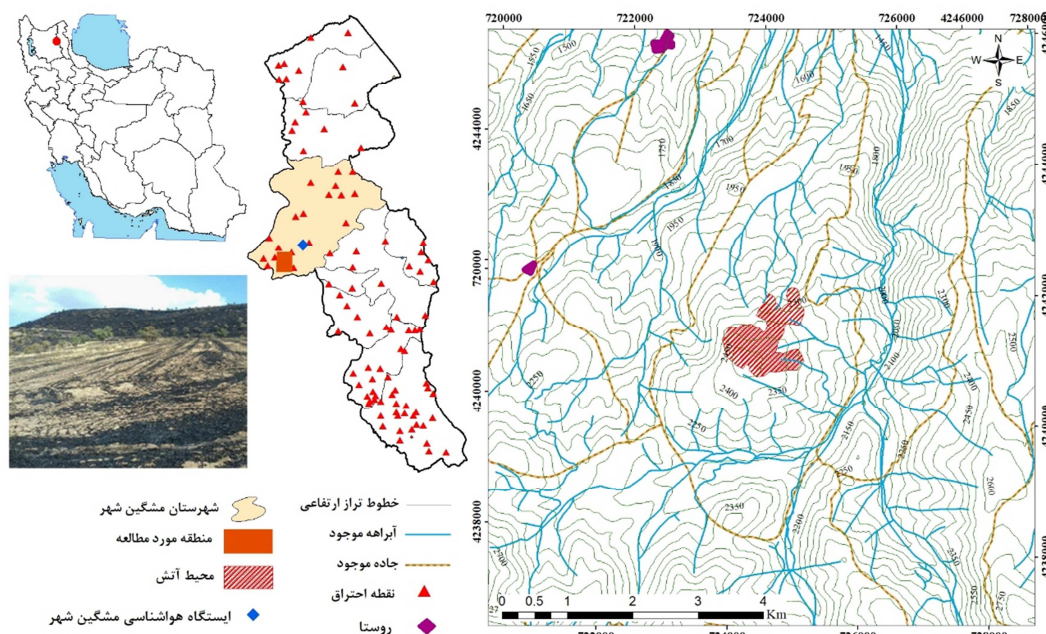
داده‌ها و روش‌ها

الف - منطقه مطالعه

استان اردبیل واقع در شمال غرب ایران، در مجاورت استان‌های آذربایجان شرقی، زنجان و گیلان با مساحت تقریباً ۱۸،۰۰۰ کیلومترمربع، در حدود ۱،۱ درصد کل کشور است (شکل ۱). این مطالعه در شهرستان مشگین‌شهر در استان اردبیل (۴۸،۲۹° شرقی و ۳۸،۲۵° شمالی)، با ارتفاع تقریباً ۱۳۴۱ متر بالاتر از سطح دریا، انجام شده است

1 Sandberg
2 Fernandes
3 Ottmar

(شکل ۱). اقلیم منطقه نیمه مرطوب سرد با زمستان‌های سرد و مرطوب و تابستان‌های گرم و خشک مشخص شده است (مددی و همکاران، ۱۳۹۷). متوسط درجه حرارت کمینه و بیشینه $-۴,۶$ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در ماه‌های بهمن و مرداد است. رطوبت نسبی در منطقه در حدود ۷۳ و ۴۸ درصد به ترتیب در ماه‌های دی و تیر است. متوسط بارش سالانه در حدود ۴۰۰ میلی‌متر و بیشتر در پاییز و زمستان توزیع شده است (شریفی و همکاران، ۱۳۹۸). سال ۱۳۹۴ در استان اردبیل سالی نسبتاً خشک بود، با مقادیر کم بارندگی در دوره فروردین-تیر و در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد تقریباً هیچ بارشی ثبت نشده است. بیشینه دما ۳۵ °C در منطقه مطالعه و نیز در کل استان مشاهده شد. آب‌وهوا در مردادماه سال ۱۳۹۴ با وضعیت بدون بارش، فشار اتمسفری زیاد و مقادیر حرارت زیاد بیش از متوسط ماهانه به‌صورت پیوسته بود (طاووسی و دل‌آرا، ۱۳۸۹).



آتش‌سوزی مراتع و جنگل‌ها در این شهرستان با توجه به خشکی هوا و کمبود بارش‌ها، مجاورت با اراضی کشاورزی و باغات و بی‌احتیاطی‌های صورت گرفته در حال گسترش است. با توجه به منحنی‌های آمبروترمیک ترسیم‌شده برای شهرستان مشگین‌شهر، از اواسط خرداد لغایت اواسط شهریور، دما بر بارندگی فزونی داشته و این دوره به‌عنوان «دوره‌ی خشک» (فصل بحرانی آتش‌سوزی) و بقیه سال نیز به‌عنوان «دوره‌ی مرطوب» محسوب می‌شود. جهت باد غالب سالانه در منطقه نیز جنوبی بوده و میانگین سرعت آن حدود $۴,۲$ متر بر ثانیه است.

در شکل ۱ پراکنش نقاط احتراق آتش‌سوزی‌های گذشته در سال ۱۳۹۴ از خرداد تا شهریور در استان اردبیل ارائه شده است (بر اساس آمار اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان اردبیل). بر اساس این شکل بخش جنوبی استان

اردبیل شامل شهرستان‌های خلخال و کوثر به همراه شهرستان مشگین‌شهر در بخش مرکزی این استان، از مناطق آسیب‌پذیر در برابر آتش‌سوزی بوده و هر سال شاهد وقوع آتش‌سوزی زیاد و سوختن مقداری از عرصه‌های طبیعی در این مناطق هستیم. در شکل ۱ منطقه مطالعه واقع در دهستان مشگین غربی در بخش مرکزی شهرستان مشگین-شهر، با انتخاب نقطه احتراق آتش ییلاق قصرداغ در تاریخ ۲۵ مرداد ۱۳۹۴، در منطقه‌ای با توپوگرافی پیچیده در ارتفاع ۲۵۰۰ متری، نشان داده شده است. این منطقه شامل محیط نهایی عرصه سوخته شده (۸۵,۳۶ هکتار) و محدوده اطراف آن با وسعت کلی ۱۲۸۳۵ هکتار، با پوشش مرتعی به‌عنوان کاربری اصلی اراضی منطقه و در نزدیکی دو روستای بالوقیه و نصیرکندی واقع شده است.

بر اساس فرم گزارش حریق و نیز اطلاعات اخذشده از نیروهای اطفای حریق حاضر در زمان وقوع حادثه، نقطه شروع آتش‌سوزی مورد مطالعه از نوع آتش سطحی (در ساعت ۹:۰۰ صبح در ۲۵ مرداد ۱۳۹۴) در بخش غربی منطقه کوهستانی ییلاق قصرداغ بود. در ارتباط با فعالیت‌های اطفای حریق انجام‌شده در این آتش‌سوزی، تیم‌های اطفای حریق موجود در منطقه در جهت پایین شیب به طرف آتش حرکت کردند، در سمتی که شدت آتش زیاد به نظر نمی‌آمد و با طول‌های شعله کم مشاهده شد، آب‌وهوا گرم و خشک اما شدت باد زیاد نبود. با توجه به شیب، رفتار آتش، نرخ گسترش و شدت آن تغییر کرد و آتش‌پاره‌های زیادی مشاهده شد. سرعت باد به‌صورت ناگهانی افزایش یافت که ممکن است آتش آن را تقویت کرده باشد. در این نقطه، شدت آتش زیاد بود که با آثار هم‌برداری (انتقال گرما) تشدید شد. در ابتدا که آتش در مناطق با پوشش علفی با تراکم کم و چراگاه‌های پراکنده پخش شد، نرخ گسترش آن کم بود. زمانی که جبهه آتش در بعدازظهر به منطقه علفزار متراکم رسید، نرخ گسترش آن افزایش یافت و داغ‌تر سوخت. توسعه روبه‌جلوی آتش با عوامل زمینی اطفای حریق همراه با تعدیل جزئی شرایط آب و هوایی (افزایش رطوبت نسبی، کاهش سرعت باد و درجه حرارت) متوقف شد. آتش به‌صورت کامل در ساعت ۱۹:۰۰ همان روز اطفاء شد، درحالی‌که تپه به‌طور کامل در چند ساعت نخست بعد از احتراق سوخت. محیط نهایی آتش نیز با استفاده از جی‌پی‌اس^۱ نقشه‌برداری شد.

الف- داده ورودی

پارامترهای ورودی مدل فارسایت به دو دسته داده رستری و اطلاعات تکمیلی گروه‌بندی می‌شود. داده رستری شامل نقشه‌های ارتفاع، شیب، جهت، تیپ ماده سوختنی و تاج پوشش گروه‌بندی شده به‌عنوان فایل سیمای سرزمین هستند. درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد، جهت باد و مشخصات تاج می‌تواند به‌عنوان اطلاعات تکمیلی دسته-بندی شود. به‌منظور تولید نقشه ارتفاع، مدل رقومی ارتفاع^۲ زمین از نقشه‌های توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱:۲۵,۰۰۰ به دست آمد. نقشه‌های شیب و جهت منطقه نیز از این مدل رقومی تهیه شد. نقشه خطوط تراز محدوده مورد مطالعه از منطقه سوخته شده به همراه جاده‌ها و آبراهه‌های موجود در شکل ۱ ارائه شده است. منطقه مطالعه در دامنه ارتفاعی ۱۴۰۰ تا ۳۰۵۰ متری از سطح دریا واقع شده است. از داده‌های هواشناسی نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مطالعه (ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مشگین‌شهر در ارتفاع ۱۵۶۱ متر از سطح دریا و در فاصله ۸

^۱ GPS

^۲ DEM

کیلومتری از منطقه مطالعه (شکل ۱)) به‌عنوان داده ورودی برای مدل استفاده شد. در این مطالعه، داده آب و هوا شامل بارندگی، درجه حرارت بیشینه و کمینه، سرعت باد (متر بر ثانیه)، جهت باد (درجه)، رطوبت نسبی (درصد) و میزان ابرناکی (درصد)، هشت بار ثبت‌شده در یک روز (در ساعت‌های ۰۰:۰۰، ۰۳:۰۰، ۰۶:۰۰، ۰۹:۰۰، ۱۲:۰۰، ۱۵:۰۰ و ۱۸:۰۰) از تاریخ ۱۳۹۴/۰۴/۲۵ تا ۱۳۹۴/۰۵/۳۱) از این ایستگاه اخذ شد. علاوه بر این، همه اطلاعات مرتبط با آتش‌سوزی واقع‌شده در تاریخ ۱۳۹۴/۰۵/۲۵ از اداره کل منابع طبیعی استان اردبیل جمع‌آوری شد.

پ- تهیه نقشه تیپ‌های ماده سوختنی

به‌منظور شبیه‌سازی گسترش آتش، توزیع و مشخصات پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای قبل از آتش و نقشه‌های پوشش اراضی موجود در محیط آتش و اطراف آن تهیه شد. پوشش گیاهی منطقه بیشتر علفی است که مراتع نیمه استپی شهرستان مشگین‌شهر را تشکیل می‌دهد. تیپ‌های علفی غالب در منطقه *Poa bulbosa*، *Artemisia fragrans*، *Artemisia austriaca*، و *Stipa hohenackeriana* است. بر اساس نقشه‌های موجود در مورد پراکنش پوشش گیاهی این منطقه کوهستانی، در ارتفاعات پایین، مراتع نیمه استپی معتدل تا سرد درجایی که فصل رویش در اواسط بهار و بارندگی‌ها بیشتر در فصول زمستان و اوایل بهار بوده و دامنه بارندگی نیز بین ۲۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر متغیر است، قرار دارد. در ارتفاعات میانی، جنگل‌های خشک درجایی که زمستان سرد و طولانی، بهار معتدل، تابستان خشک و خاک جوان می‌باشد و بارندگی سالیانه نیز بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر متغیر است. بخش‌های فوقانی نیز شامل کوه‌های به نسبت مرتفع است درجایی که دامنه بارندگی نیز بیش از ۵۰۰ و حتی ۶۰۰ میلی‌متر است.

تیپ‌های ماده سوختنی رفتار آتش (اسکات و بورگن^۱، ۲۰۰۵) منطقه مطالعه بر اساس نقشه پوشش گیاهی استان اردبیل، تهیه‌شده توسط سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور (۱۳۹۷) و نیز با استفاده از تصویر ماهواره لندست ۸^۲ قبل از آتش‌سوزی در تاریخ ۲۰۱۴/۰۸/۰۷، طبقه‌بندی شد. تصحیح هندسی این تصویر با استفاده از ۳۰ نقطه واقعیت زمینی (حاصل کار میدانی به روش نمونه‌برداری تصادفی) و فن نمونه‌گیری مجدد نزدیک‌ترین همسایه به سامانه مختصات جغرافیایی (جی سی اس^۳) انجام شد. خطای باقیمانده در حدود ۰٫۳± پیکسل بود. در ابتدا با استفاده از طبقه‌بندی نظارت‌نشده تفکیک منطقه مطالعه (شامل محیط سوخته شده و اطراف آن با وسعت ۱۲۸۳۵ هکتار) به مناطق با ماده سوختنی و بدون ماده سوختنی انجام شد. الگوریتم طبقه‌بندی حداکثر احتمال در طبقه بندی نظارت‌شده برای تفکیک مناطق با ماده سوختنی به ۴ تیپ ماده سوختنی علفی، علفی-درختچه‌ای، درختچه-ای و درختی استفاده شد. صحت این طبقه‌بندی (صحت کلی ۹۱٫۲) با استفاده از نقشه پوشش گیاهی موجود کنترل شد (شکل ۲). امکان تعیین بار ماده سوختنی در تیپ‌های مختلف ماده سوختنی با استفاده از طبقه‌بندی تصویر لندست وجود نداشت. مطابق با توصیف مدل‌های ماده سوختنی رفتار آتش (اسکات و بورگن، ۲۰۰۵)، با کمک

1 Scott & Burgan

2 Landsat

3 GCS (Geographic Coordinate System)

عکس‌هایی از مدل‌های ماده سوختنی، نقشه پوشش گیاهی و تجربیات و دانش کارشناسان جنگل و آتش و نیز تفسیر بصری تصویر ماهواره‌ای قبل از آتش‌سوزی، طبقه‌بندی تیپ‌های پوشش گیاهی موجود به مدل‌های ماده سوختنی رفتار آتش انجام شد. ارزش‌های ماده سوختنی که برای برآورد رفتار آتش استفاده شد، شامل بار ماده سوختنی کل، بار ماده سوختنی خشک، بار ماده سوختنی زنده و عمق بستر ماده سوختنی بر اساس روش روترمل (۱۹۹۳) به‌صورت تخمینی تعیین شد (جهدی و همکاران، ۲۰۱۴).

نقشه تاج پوشش که برای محاسبه فاکتورهای سایه‌اندازی و تعدیل باد برای همه مدل‌های ماده سوختنی ضروری است، شامل درصد افقی از سطح زمین است که با تاج گیاهان پوشیده شده است. واحدهای پوشش می‌تواند به طبقه‌های (۱-۴) یا ارزش‌های درصد (۰-۱۰۰) ارائه شود. این طبقه‌ها به‌عنوان طبقه ۱ (۱-۲۰٪)، ۲ (۲۱-۵۰٪)، ۳ (۵۰-۸۰٪) (۵۱) و ۴ (۸۱-۱۰۰٪) است. پوشش صفر به‌عنوان طبقه ۰ یا ۹۹ مشخص می‌شود (فینی، ۲۰۰۳). بر اساس پیمایش زمینی با حرکت روی نوارهایی و توقف در فواصل تقریباً برابر (۱ کیلومتر)، درصد تاج پوشش برآورد و ثبت شد و حاصل آن در محیط آرک جی‌آی‌اس^۱ به نقشه موضوعی تاج پوشش تبدیل شد (جهدی و همکاران، ۱۳۹۴).

ت-کالیبراسیون مدل

مدل نیمه تجربی گسترش آتش فارسایت (فینی، ۲۰۰۴) تلفیقی از مدل‌های مختلف و بر مبنای سامانه بی‌هیو^۲ است. فارسایت علاوه بر مدل‌های توسعه‌یافته برای آتش سطحی (روترمل، ۱۹۷۲) و آتش تاجی (ون واگنر^۳، ۱۹۹۳)، از مدل آتش نقطه‌ای (آلبینی^۴، ۱۹۷۶) و رطوبت ماده سوختنی (نلسون^۵، ۲۰۰۲) نیز در شبیه‌سازی‌های رفتار آتش استفاده می‌کند. این سامانه بر پایه استفاده از مدل‌های ماده سوختنی استاندارد (اندرسون^۶، ۱۹۸۲؛ اسکات و بورگن، ۲۰۵) برای توصیف مشخصات مواد سوختنی (از جمله بار ماده سوختنی، عمق بستر ماده سوختنی و ...) و رفتار آتش آنها است.

در این مطالعه، مدل فارسایت برای شبیه‌سازی پخش و رفتار آتش بیلاق قصرداغ استفاده شد. لایه‌های ورودی موردنیاز شبیه‌سازی در این مدل شامل توپوگرافی، شرایط آب و هوایی و ماده سوختنی تهیه‌شده به‌صورت فایل‌های اسکی^۷ است. از سامانه اطلاعات جغرافیایی^۸ برای مدیریت اطلاعات مکانی منطقه مطالعه و دستیابی به لایه‌های ورودی موردنیاز برای اجرای مدل استفاده شد. اندازه تفکیک مکانی همه لایه‌ها ۱۰ متر تعیین شد.

با استفاده از گزارش آتش‌سوزی تهیه‌شده توسط اداره منابع طبیعی شهرستان مشگین‌شهر و نیز بررسی میدانی، اطلاعات درباره سطوح سوخته شده، نقاط احتراق و موقعیت گسترش در زمان مشخص استخراج شد. با استفاده از این اطلاعات، موقعیت نقطه احتراق در بخش جنوب غربی منطقه سوخته شده در نزدیکی روستای بالوقیه تخمین زده شد.

1 ArcGIS
2 BEHAVE
3 van Wagner
4 Albini
5 Nelson
6 Anderson
7 ASCII
8 GIS, ArcGIS 10.4.1, ESRI Inc.

با انجام شبیه‌سازی، فایل وکتوری محیط آتش و فایل‌های رستری رفتار آتش شامل نقشه‌های زمان رسیدن آتش، شدت خط آتش، طول شعله و نرخ گسترش تولید شد. از آنجایی که تنها محیط آتش مشاهده شده و زمان رسیدن جبهه آتش به مرز شمالی محیط آتش (نقطه اطفای حریق در ساعت ۱۹) گزارش شده بود، خروجی‌های شبیه‌سازی آتش در گام زمانی ۳۰ دقیقه‌ای (خطوط کنتور آتش) و زمان رسیدن با موارد مشاهده شده مقایسه شد.

فینی (۲۰۰۳) کالیبراسیون را به صورت "فرآیند تشخیص مشکلات و ایجاد بهبودها برای شبیه‌سازی، به طور معمول در مقایسه با مشاهده‌های رفتار آتش واقعی" تعریف کرده است. در این مطالعه، کالیبراسیون مدل آتش از طریق تغییر فاکتورهای تعدیل^۱ برای مدل‌های ماده سوختنی انجام شد. شایان ذکر است که این فاکتورها گسترش هر مدل ماده سوختنی را تغییر می‌دهد و روی رفتار آتش اثر نمی‌گذارد (اکیروک و تاسل^۲، ۲۰۰۵). همچنین این فاکتورها به کاربر امکان استفاده از قضاوت کارشناسی یا داده محلی برای اعمال تنظیمات شبیه‌سازی نسبت به طرح‌های گسترش آتش مشاهده شده را می‌دهد. این پارامترها مختص مدل ماده سوختنی است و برای به دست آوردن تعدیل معین در نرخ گسترش ضرب می‌شود. برای مثال، نرخ گسترش برای تیپ‌های ماده سوختنی با پارامتر تعدیل ۰٫۵ و ۰٫۲۵، به ترتیب تا نصف و یک‌چهارم کاهش می‌یابد و با استفاده از پارامتر تعدیل ۲، دو برابر می‌شود. درحالی‌که با پارامتر تعدیل ۱، نرخ گسترش اصلی حفظ خواهد شد. از آنجاکه تعیین این پارامتر برای مدل‌های ماده سوختنی نیازمند اندازه‌گیری‌ها و مطالعه‌های گسترده‌ای است که هنوز در شرایط پوشش گیاهی ایران انجام نشده است؛ بنابراین مدل‌های ماده سوختنی استاندارد انتخاب شده در منطقه مطالعه بدون تغییر این عامل و معادل نرخ گسترش اصلی ۱، به کار برده شد. تنها در مورد مدل‌های ماده سوختنی تیپ علفی، به دلیل بیش برآورد زیاد مشاهده شده در شبیه‌سازی، فاکتور تعدیل به نصف کاهش داده شد.

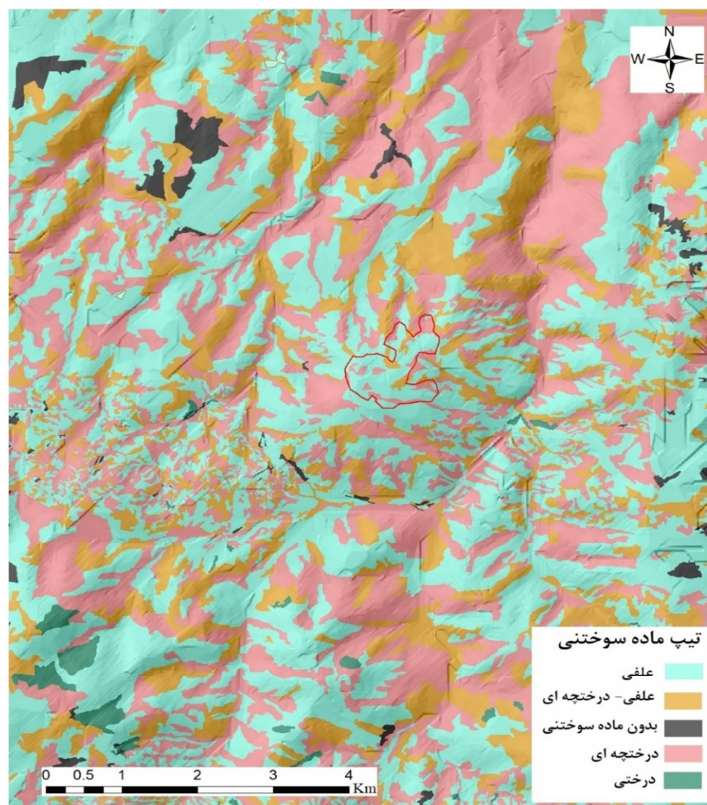
یافته‌های تحقیق

اساس کار در این پژوهش تهیه نقشه‌های مدل‌های ماده سوختنی متناسب با منطقه مطالعه و استفاده از آنها برای شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع است. با توجه به گزارش آتش و بازدید میدانی از ناحیه سوخته-شده و اطراف آن، پوشش گیاهی در محیط آتش، موزائیکی از پوشش علفی در مراتع با درختچه‌زار پراکنده فندق و تک درختان بلوط را ارائه می‌دهد (شکل ۲). بخش نخست گسترش آتش در چراگاه‌های علفی بود، درحالی‌که در ساعات‌های پایانی پخش آن در مناطق درختچه‌ای ادامه یافت. مشخصات پوشش گیاهی منطقه مطالعه در ۱۴ مدل ماده سوختنی با استفاده از مدل‌های ماده سوختنی رفتار آتش استاندارد (اسکات و بورگن، ۲۰۰۵) مدل‌سازی شد (جدول ۱؛ شکل ۳). در این مدل‌ها نام‌گذاری مدل‌های ماده سوختنی بر اساس تیپ ماده سوختنی حامل آتش مانند تیپ علفی است. نمای کلی از مدل‌های ماده سوختنی و تاج پوشش منطقه در شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ۱: توزیع مدل‌های ماده سوختنی رفتار آتش اسکات و بورگن (۲۰۰۵)، با جمع کلی برای تیپ‌های ماده سوختنی موجود در منطقه

مطالعه

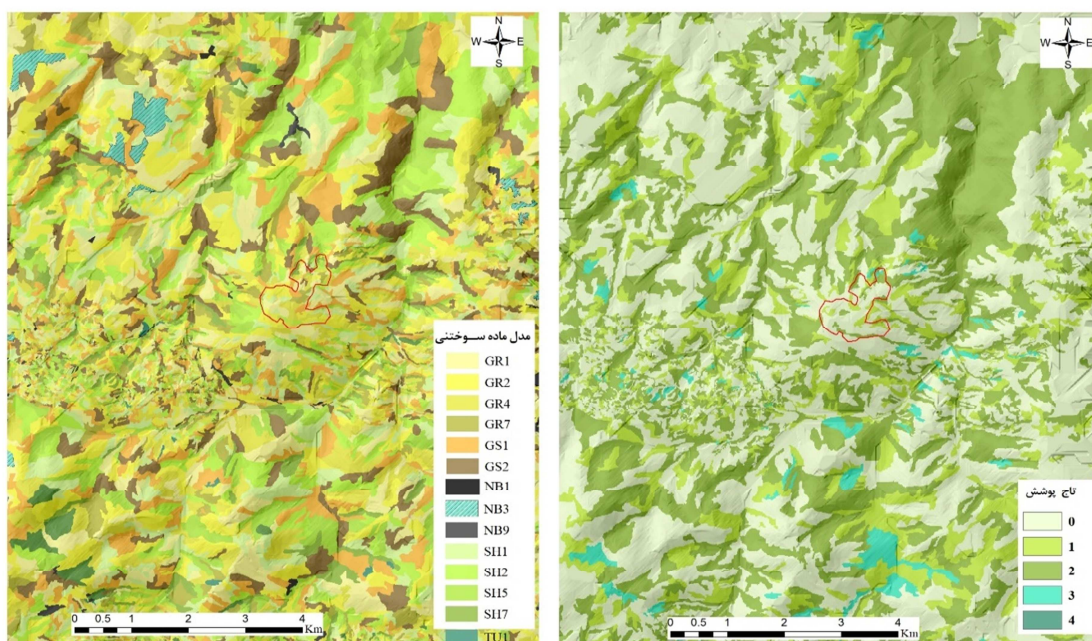
تیپ ماده سوختنی	نام ماده سوختنی رفتار آتش	مدل ماده سوختنی	سطح (هکتار)	درصد
بدون ماده سوختنی	اراضی شهری/توسعه‌یافته	NB1	۳,۹۲	۰,۰۳
	اراضی کشاورزی	NB3	۲۲۲,۰۲	۱,۷۳
	اراضی بایر/لخت	NB9	۹۱,۰۱	۰,۷۱
علفی	علف کوتاه و پراکنده اقلیم خشک	GR1	۱۸۱۹,۶۸	۱۴,۱۸
	علف با بار کم اقلیم خشک	GR2	۲۱۱۲,۲۳	۱۶,۴۶
	علف با بار متوسط اقلیم خشک	GR4	۱۳۵۲,۰۵	۱۰,۵۳
	علف با بار زیاد اقلیم خشک	GR7	۵۰۰,۵۶	۳,۸۹
علفی - درختچه‌ای	علف - درختچه با بار کم اقلیم خشک	GS1	۱۳۶۹,۰۲	۱۰,۶۷
	علف - درختچه با بار متوسط اقلیم خشک	GS2	۱۱۱۱,۹۷	۸,۶۶
درختچه‌ای	درختچه با بار کم اقلیم خشک	SH1	۱۳۹۵,۲۹	۱۰,۸۷
	درختچه با بار متوسط اقلیم خشک	SH2	۱۴۱۷,۰۷	۱۱,۰۴
	درختچه با بار زیاد اقلیم خشک	SH5	۸۹۹,۶۴	۷,۰۱
درختی	درختچه با بار بسیار زیاد اقلیم خشک	SH7	۴۰۹,۹	۳,۱۹
	درختی همراه با پوشش علفی - درختچه‌ای با بار کم اقلیم خشک	TU1	۱۳۱,۲۵	۱,۰۳
جمع			۱۲۸۳۵	۱۰۰
جمع طبقات				
علفی			۵۷۸۴,۵۲	۴۵,۰۷
علفی - درختچه‌ای			۲۴۸۰,۹۹	۱۹,۳۳
درختچه‌ای			۴۱۲۱,۲۹	۳۲,۱۱
درختی			۱۳۱,۲۵	۱,۰۳
بدون ماده سوختنی			۳۱۶,۹۵	۲,۴۷



شکل ۲: نقشه تیپ‌های ماده سوختنی حامل آتش در منطقه مطالعه

چهار تیپ ماده سوختنی کلاسه‌بندی شده (شکل ۲)، مطابق با مدل‌های ماده سوختنی انتخاب شده و وضعیت مشاهده‌شده مواد سوختنی دوباره در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی طبقه‌بندی و به‌صورت نقشه نهایی مدل‌های ماده سوختنی تهیه شد (جدول ۱؛ شکل ۳). بر اساس این جدول مدل‌های ماده سوختنی با تیپ ماده سوختنی حامل آتش مانند علفی (جی آر^۱)، علفی-درختچه‌ای (جی اس^۲)، درختچه‌ای (اس اچ^۳) و درختی (تی یو^۴) توصیف می‌شوند. مشخصات مشاهده‌شده مواد سوختنی در مناطق مورد مطالعه با مشخصات برخی از مدل‌های ماده سوختنی استاندارد انتخاب‌شده تشابه بسیار زیادی داشته است. این نکته سهولت زیادی در انتخاب مدل‌های ماده سوختنی ایجاد کرده است.

1 GR (Grass)
 2 GS (Grass-Shrub)
 3 SH (Shrub)
 4 TU (Timber-Understory)



شکل ۳: نقشه‌های مدل ماده سوختنی و تاج پوشش منطقه مطالعه

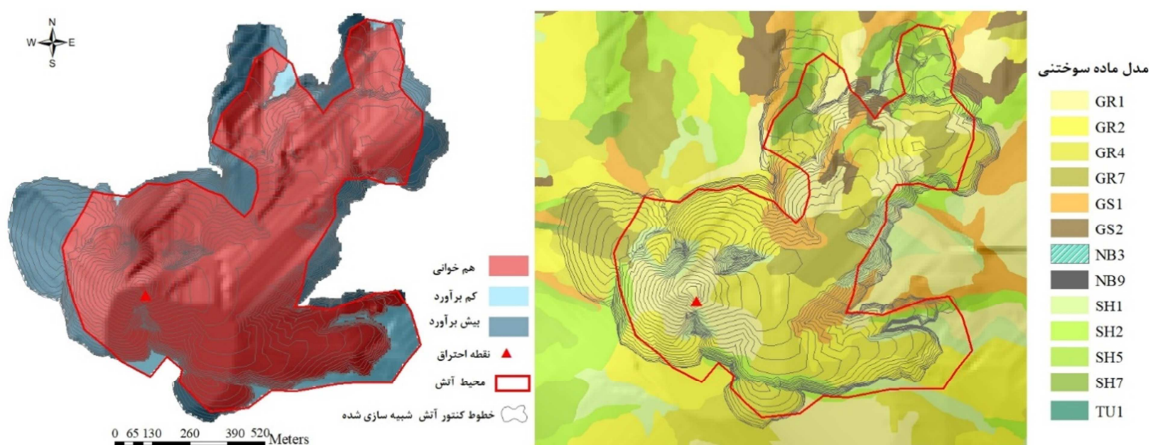
نتایج و بحث

مخاطرات طبیعی در جنگل‌ها و مراتع از جمله آتش‌سوزی‌ها، یکی از مهم‌ترین مسائل مدیریت منابع طبیعی است. از عوامل کلیدی مؤثر بر کاهش خطر آتش‌سوزی‌ها و مدیریت مؤثر اطفای حریق، تهیه نقشه‌های رفتار و گسترش آتش است که این پژوهش نیز به این منظور انجام شده است.

در این تحقیق بعد از تهیه داده ورودی برای مدل فارسایت، شبیه‌سازی آتش سطحی برای مقایسه با آتش واقعی اجرا شد. تیپ‌های اصلی ماده سوختنی در منطقه مطالعه علفی، علفی-درختچه‌ای، درختچه‌ای و درختی بود. به‌منظور رسیدن آتش به موقعیت مورد انتظار در زمان مشخص، مدل‌های ماده سوختنی علفی (با توجه به پوشش غالب آن در محیط آتش) با تغییر فاکتور تعدیل کالیبره شد. به‌طور کلی کالیبراسیون می‌تواند به سه دسته طبقه‌بندی شود: (۱) داده ورودی، پارامترها و تنظیمات، (۲) مدل‌های رفتار آتش و (۳) ماده سوختنی. هرچند که همواره باید مدل مناسب انتخاب شود اما حتی ممکن است این مدل‌های مناسب نیز واقعیت آتش را به‌خوبی ارائه نکنند. نرخ و جهت گسترش آتش وابسته به مدل ماده سوختنی، سرعت باد و جهت باد است. امکان تغییر سرعت و جهت باد وجود ندارد، زیرا این پارامترها در ایستگاه هواشناسی اندازه‌گیری شده است. تنها پارامتری که می‌تواند تغییر داده شود مشخصات مدل ماده سوختنی است. این تغییر مطابق با نتایج شبیه‌سازی و مدل‌های ماده سوختنی محلی منطقه مطالعه انجام شد.

خروجی‌های رفتار آتش، زمان رسیدن، نرخ گسترش، طول شعله، شدت خط آتش و خطوط زمانی گسترش آتش حاصل از شبیه‌سازی آتش گذشته با استفاده از مدل فارسایت به دست آمد (شکل‌های ۴ و ۵). با مقایسه نتایج اولیه شبیه‌سازی با اطلاعات به‌دست‌آمده آتش مشاهده شد که لازم است شبیه‌سازی رشد آتش بی‌یلاق قصرداغ بهبود یابد.

این بهبود از طریق تغییر فاکتورهای تعدیل نرخ گسترش برای مدل ماده سوختنی علفی (به دلیل بیش‌برآورد زیاد) انجام شد و نقشه محیط نهایی آتش شبیه‌سازی‌شده به دست آمد (شکل ۴).



شکل ۴: موقعیت نقطه احتراق، سطوح سوخته‌شده مشاهده شده و شبیه‌سازی‌شده، خطوط کنتر زمان گسترش آتش شبیه‌سازی‌شده (فاصله ۳۰ دقیقه‌ای) و مدل‌های ماده سوختنی.

صحت شبیه‌سازی برای منطقه سوخته‌شده با استفاده از ضریب سورنسون^۱ و نیز کاپا^۲ اندازه‌گیری شد که برای هر دو ۰/۸۴ به دست آمد. کل سطح سوخته‌شده شبیه‌سازی‌شده ۱۱۲/۳۴ هکتار به دست آمد. ۹۴٪ سطح سوخته‌شده واقعی به درستی در شبیه‌سازی هم‌به‌عنوان سطح سوخته‌شده برآورد شد (همخوانی؛ شکل ۴). اما تقریباً ۲۶/۹۱ هکتار از سطح سوخته‌شده شبیه‌سازی‌شده بیش‌برآورد شده است. ۵/۶۱ هکتار نیز کم‌برآورد به دست آمده است. با این‌وجود در انتهای شبیه‌سازی، جبهه آتش تقریباً به مرز شمالی و شرقی منطقه مطالعه رسیده است. در این پژوهش گسترش آتش تقریباً مشابه با آتش واقعی شبیه‌سازی شد. بنابراین می‌توان گفت که مطابقت مدل آتش استفاده‌شده در منطقه مطالعه قابل‌قبول و در مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده از سایر مطالعه‌های انجام‌شده در شرایط جنگل‌ها و مراتع کشور بیشتر بوده است (جهدی و همکاران، ۱۳۹۲؛ بازاری جامخانه و همکاران، ۱۳۹۲؛ امین املشی و همکاران، ۱۳۹۵). توجه به این نکته ضروری است که مدل‌های شبیه‌سازی آتش تنها می‌توانند تقریبی از واقعیت را ارائه کنند. خروجی شبیه‌سازی آتش نمی‌تواند جایگزین دانش و تجربه واقعی افراد درگیر در مدیریت و اطفای حریق در عرصه‌های طبیعی شود. اگرچه دستیابی به اطلاعات درباره گسترش و جهت آتش قبل از رشد آتش می‌تواند به مدیران و تیم‌های میدانی در توسعه فنون اطفای حریق کمک کند.

بر اساس نتایج، بخش‌هایی از سطح سوخته‌شده بیش‌برآورد و بخش‌های کوچکی هم کم‌برآورد شده است. بیش‌برآورد شبیه‌سازی در مناطق جناحی گسترش آتش مورد انتظار بود و مشاهده شد؛ زیرا فعالیت‌های اطفای حریق که از گسترش آتش در این مناطق جلوگیری کرده، در این مدل بررسی نشده است. این نتیجه با مطالعه‌های آلکاسانا^۳ و

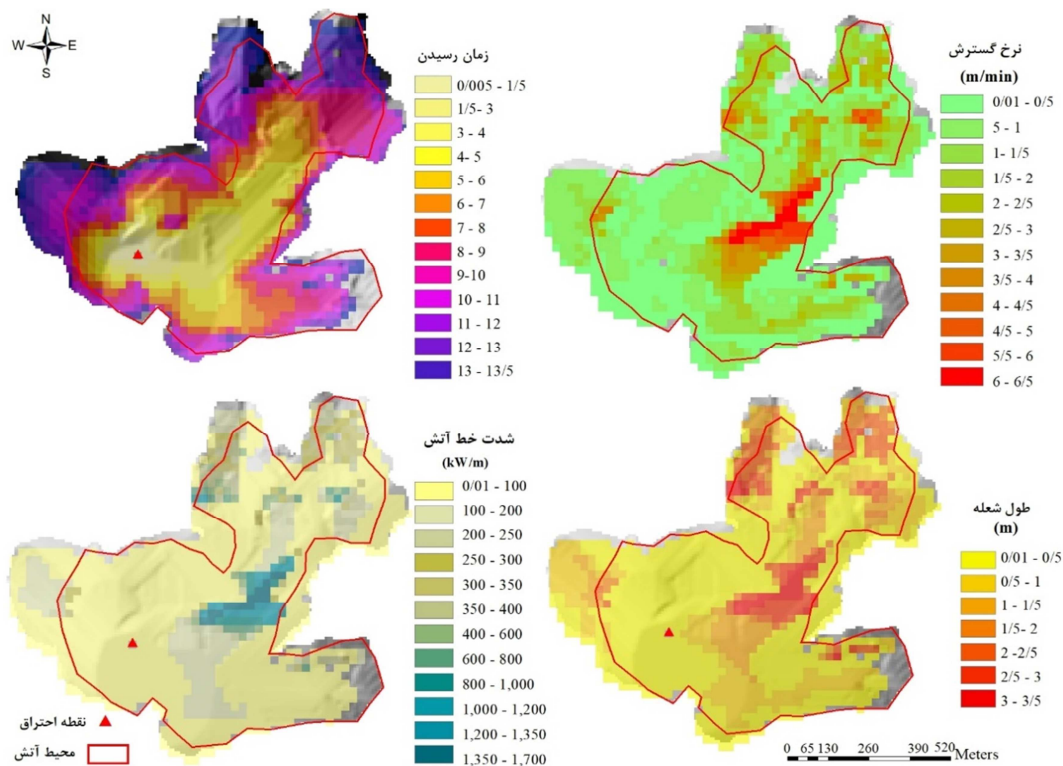
¹ Sorensen

² Kappa

³ Alcasena

همکاران (۲۰۱۵) و نیز سالیس و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد. بیش برآورد و کم برآورد آتش شبیه‌سازی شده در مقایسه با آتش واقعی می‌تواند به دلیل امکان دقیق نبودن اطلاعات در مورد رطوبت ماده سوختنی و مدل‌های ماده سوختنی منطقه، داده آب‌وهوا (به دلیل فاصله لکه آتش از ایستگاه هواشناسی) و اطلاعات ناکافی درباره اطفای حریق نیز باشد. فاکتورهای تعدیل/کاهش باد به‌خصوص در مناطق با پوشش گیاهی علفی و تغییرهای شدید توپوگرافی، روی نرخ گسترش آتش در بخش‌هایی از سیمای سرزمین اثر می‌گذارد. مدل‌های ماده سوختنی علفی نسبت به سایر مدل‌ها سریع‌تر می‌سوزد. این خروجی به‌خصوص برای مدیران آتش برای تعیین راه‌های مناسب برای مدیریت آتش-سوزی‌ها، مانند استفاده از پوشش گیاهی مناسب که ظرفیت کمتری برای سوختن دارند در بین مناطق جنگلی و مرتعی برای کاهش نرخ گسترش آتش، مهم است. علاوه بر این بر حساسیت پارامتر مدل ماده سوختنی در مدل‌سازی آتش تأکید می‌کند.

نقشه‌های طول شعله و نرخ گسترش (شکل ۵) به‌دست‌آمده با فارسایت بر شرایط خطرناکی که تیم اطفای حریق با آن مواجه بود، به‌خصوص سه ساعت بعد از شروع آتش، در ساعت ۱۲ ظهر که گسترش آتش با شدت زیاد شد، تأکید دارد. زمانی که خطوط کنترل زمانی گسترش آتش شبیه‌سازی شده بررسی شد نتایج نشان داد که در ۶۰ دقیقه نخست گسترش آتش، آتش احتمالاً با شدت زیاد نبوده است و نرخ گسترش آن ملایم بود. این مورد می‌تواند به دلیل تیپ‌های ماده سوختنی و یکنواختی داده آب و هوایی موجود باشد. نقشه طول شعله نیز نشان می‌دهد که چگونه آتش در ابتدا با شدت کم مشخص شد، سپس به تدریج رشد کرده تا اینکه در ساعات بعدازظهر با تشدید گرما و کاهش رطوبت نسبی طول شعله‌ها بیشتر شد. ارزش‌های بیشتر طول شعله در مناطقی ثبت شد که پوشش گیاهی با علف‌ها و درختچه‌های انبوه مشخص شده که با متوسط ارتفاع بین ۳ تا ۳/۵ متر برآورد شده است. بیشترین ارزش‌های طول شعله در مناطقی رخ داده که جهت باد و شیب در یک ردیف قرار گرفته‌اند (همتراز بودند).



شکل ۵: نقشه‌های زمان رسیدن، نرخ گسترش، طول شعله و شدت خط آتش شبیه‌سازی شده آتش بیابان قصر داغ

از آنجایی که شرایط باد خیلی قوی نبود، نرخ گسترش زیاد نبود و بنابراین آتش در ابتدا به آهستگی رشد کرده است. نرخ گسترش به ارزش‌های $6/5 \text{ m min}^{-1}$ در مناطق پرشیب افزایش یافته است. به دلیل محدودیت‌های فارسایت در مدل‌سازی پخش آتش در شرایط توپوگرافی پرشیب، ارزش‌های نرخ گسترش می‌تواند کم‌برآورد شده باشد.

در کل این آتش با یک تغییر ناگهانی در رفتار آتش مشخص شده است. دلیل اصلی این تغییر رفتار به نظر توپوگرافی و کوهستانی بودن منطقه می‌باشد؛ اثر باد که با خود آتش تقویت شد، اثر شیب را تشدید کرد. اگرچه سرعت کلی باد نسبتاً ملایم بود، شدت باد محلی به‌مرور افزایش یافت. علاوه بر این، توجه به تفاوت‌های زیاد رفتار آتش بین اراضی مسطح و شیب‌دار مهم است. آتش مورد مطالعه دارای جهت‌های گسترش مختلفی مطابق با سطح سوخته شده واقعی بود. موقعیت، زمان واکنش‌ها به آتش و اطلاعات درباره تعداد تیم‌ها و وسایل نقلیه در گزارش آتش‌سوزی اشاره نشده بود؛ بنابراین شبیه‌سازی واکنش‌ها در عملیات اطفای حریق انجام نشد. فعالیت‌های اطفای روی نرخ گسترش آتش، شکل و رفتار آتش اثر می‌گذارد. به دلیل اینکه این پارامترها به‌عنوان ورودی برای شبیه‌سازی وارد نشد، بیش‌برآورد سطح سوخته شده به‌ویژه در محدوده غربی به‌دست آمد. بادهای با مقیاس زمانی و مکانی متوسط (ساعتی) و مواد سوختنی نسبتاً همگن در فایل‌های رستری برای انعکاس تغییرپذیری در مقیاس ریز در محیط آتش (زمانی یا مکانی)، بسیار درشت بود که عملاً از گسترش آتش در نرخ‌های متغیر جلوگیری می‌کند. این مورد موجب می‌شود که

نرخ متوسط گسترش آتش در مناطق وسیع و در مدت‌های زمانی طولانی، بیش‌برآورد شود. ارتباط غیرخطی بین سرعت باد، سرعت آتش و نرخ گسترش آتش، بیانگر این است که امکان پیش‌بینی نرخ گسترش متوسط از روی سرعت متوسط باد وجود ندارد. علاوه بر این، نوسان جهت‌های باد نیز موجب پیش‌بینی بیش‌ازحد گسترش در جهت مخالف شود، زیرا این مورد گریز از مرکز شکل آتش در مقایسه با شکل بیضی آتش را کاهش می‌دهد (اکیروک و تاسل، ۲۰۰۵). توصیف پویایی و رفتار آتش رخ داده در منطقه مطالعه با مقداری خطای باقیمانده انجام شد. این مورد به این دلیل است که بازسازی کامل و یکنواخت حادثه آتش گذشته امکان‌پذیر نبود. با وجود عدم قطعیت برخی داده ورودی و درجه تخمین آتش، این مطالعه منجر به یک بازسازی قریب به‌واقع حادثه آتش ییلاق قصرداغ شد. بر اساس نتایج این مطالعه و سایر مطالعه‌ها (اس‌چون ناگل^۱ و همکاران، ۲۰۰۴؛ کراوچوک و همکاران، ۲۰۰۶؛ سالیس و همکاران، ۲۰۱۲؛ لوزانو و همکاران، ۲۰۱۶، واکیانو و همکاران، ۲۰۱۸) مدل ماده سوختنی و پارامترهای آب و هوا مانند سرعت و جهت از پارامترهای بسیار حساس مدل‌های رفتار آتش هستند. با توجه به کمبود اطلاعات در زمینه تیپ‌های ماده سوختنی در جنگل‌ها و مراتع کشور، تعیین مدل‌های ماده سوختنی از تصاویر ماهواره‌ای در دسترس امکان‌پذیر است. همچنین استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با اندازه تفکیک مکانی مناسب برای تهیه نقشه‌های پوشش گیاهی، موجب تهیه داده دقیق‌تر ماده سوختنی می‌شود. از مدل‌های شبیه‌سازی آتش می‌توان در مدل‌سازی آتش-سوزی گذشته یا مطالعه آتش‌سوزی‌های تجویزی برای تعیین مدل‌های ماده سوختنی محلی برای جنگل‌ها و مراتع کشور استفاده کرد. در این مطالعه به اهمیت اطلاعات درباره آتش با توجه به گزارش‌های آتش‌سوزی ثبت شده، در طول شبیه‌سازی اشاره شد. در طول آتش‌سوزی‌های واقعی، اطلاعات درباره وضعیت خط آتش، نیروهای اطفای حریق و موقعیت‌های آن‌ها در یک زمان مشخص و نیز شرایط آب و هوایی در منطقه در طول آتش باید مشاهده، اندازه‌گیری و یادداشت شود. با استفاده از اطلاعات دقیق‌تر، مدل‌های رفتار آتش مطابق با وضعیت‌های واقعی می‌تواند کالیبره شود.

نتیجه‌گیری

مراتع نیمه استپی استان اردبیل با آب‌وهوای گرم و خشک در تابستان و در نتیجه وجود مواد سوختنی خشک، همراه با توپوگرافی پیچیده در این مناطق، به‌ویژه در مناطق همجوار علفزارها با درختچه‌زارها و جنگل‌ها، شرایط مطلوبی برای رشد آتش در این سیمای سرزمین است. مؤلفه‌های مثلث سوختن (ماده سوختنی، گرما و اکسیژن) در این شرایط به‌صورت بهینه درآمده که بستر ماده سوختنی پیوسته‌ای با بار سبک، مواد سوختنی نرم و ریز فراهم می‌کنند که در طول گسترش آتش به‌سرعت خشک شده و می‌سوزند. رطوبت‌های کمتر ماده سوختنی به دلیل وضعیت توپوگرافی منطقه و مسیرهای باد که خطوط تراز توپوگرافی را دنبال می‌کنند، از دیگر مشخصات آسیب‌پذیری این شرایط نسبت به آتش‌سوزی است.

تجزیه و تحلیل آتش‌سوزی‌های گذشته ممکن است مقدار خطای زیادی را به دلیل عدم قطعیت داده ورودی نشان دهد. بنابراین خروجی مدل‌ها باید با توجه به چنین محدودیت‌هایی تفسیر شود. کاربرد این مطالعه بر تجزیه و تحلیل

¹ Schoennagel

رفتار آتش و درک مکانیسم‌های پیچیده‌ای که مرتبط با آتش‌سوزی‌ها با شدت زیاد است، اشاره دارد. هدف این کار بررسی یک حادثه آتش‌سوزی گذشته بسیار مهم به‌منظور ارزیابی نقاط بحرانی و سخت آتش، برای تولید اطلاعات برای نیروهای اطفای حریق و بهبود درک آنها از پویایی‌های پخش آتش است.

راهبرد پیشنهادی مهم برای جلوگیری یا کاهش آسیب‌های ناشی از آتش‌سوزی به‌خصوص در مناطق با بار زیاد ماده سوختنی آماده اشتعال (مانند تیپ‌های علفی متراکم) در فصل خشک و بحرانی حریق می‌تواند شامل کاهش بار ماده سوختنی (از طریق آتش‌سوزی تجویزی و کنترل‌شده پیش از شروع حریق‌های احتمالی) با توجه به اصول حفاظت و حمایت از اکوسیستم‌های جنگل‌ها و مراتع باشد. این رویکرد نیاز به شناسایی مناطق مهم برای اولویت‌بندی مداخلات مدیریت آتش دارد. با توجه به این مسئله، خروجی‌های حاصل از مدل‌های رفتار و گسترش آتش می‌تواند برای حمایت از فرآیند تصمیم‌سازی، کمک به برنامه‌ریزی مدیریت آتش و فعالیت‌های کاهش ریسک استفاده شود. علاوه بر این، این خروجی‌ها می‌تواند برای اولویت‌بندی مناطق خاص با در نظر گرفتن ارزش‌های تحت تأثیر آتش در این اکوسیستم‌ها، رفتار بالقوه آتش یا احتمال سوختن، یا محدودیت‌های فیزیکی سیمای سرزمین مفید باشد. این کار با ترکیبی از تجزیه و تحلیل‌ها در سامانه اطلاعات جغرافیایی و نقشه‌های رفتار و گسترش آتش به‌عنوان اطلاعات کلیدی برای برنامه‌ریزی و ارزیابی فعالیت‌های مدیریت آتش و ماده سوختنی انجام می‌شود. افزایش آگاهی تیم‌های تصمیم‌گیر و به‌خصوص تیم‌های میدانی برای کنترل و مدیریت آتش از طریق مدل‌سازی آتش در شرایط محیط-زیستی مختلف، هم از دیگر نتایج اثربخش این مطالعه است. تهیه داده‌های ورودی دقیق به‌ویژه مربوط به پوشش گیاهی و آب‌وهوای منطقه، به همراه ثبت دقیق حوادث آتش‌سوزی و انواع فعالیت‌های اطفای حریق در دستیابی به نتایج بهتر مدل‌سازی آتش مؤثر خواهد بود. همچنین به‌کارگیری این نتایج به‌منظور کاهش رخداد آتش و نیز خسارت‌های آن به‌ویژه از طریق ارزیابی اثر فعالیت‌های کاهش بار ماده سوختنی آماده اشتعال قبل از فصل بحرانی حریق و نیز ارزیابی آثار تغییر شرایط آب و هوایی روی آتش پیشنهاد می‌شود.

تقدیر و تشکر

این طرح از محل اعتبارات طرح پژوهشی مصوب معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی با شماره ۲۲۵۵۸ با عنوان "تدوین برنامه مدیریت بحران آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع در استان اردبیل" تأمین شده است که بدین‌وسیله تشکر می‌شود.

منابع

امین املشی، مسعود، قدس خواه، مهرداد، اسلام بنیاد، امیر، پوربابایی، حسن، جعفری، مصطفی، وحید غلامی. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی رفتار آتش با استفاده از مدل آتش FlamMap در برنامه Arcfuels (مطالعه موردی جنگل‌کاری‌های تخسم در استان گیلان). تحقیقات حمایت و حفاظت جنگل‌ها و مراتع ایران، ۱۴ (۱)، ۱۱-۱.

بازاری جامخانه، محمد، میرباقری، بابک، شکیب، علیرضا، علی اکبر متکان. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در عرصه‌های طبیعی با استفاده از مدل FARSITE (مطالعه موردی: جنگل‌های شهرستان نکا). همایش ملی پژوهش‌های محیط‌زیست ایران، همدان، ایران.

- چهدی، رقیه، درویش صفت، علی اصغر، وحید اعتماد. ۱۳۹۲. پیش‌بینی گسترش آتش جنگل با استفاده از مدل رفتار آتش (مطالعه موردی: جنگل ملکرد-سیاهکل). *مجله جنگل ایران*، ۵ (۴)، ۴۳۰-۴۱۹.
- چهدی، رقیه، درویش صفت، علی اصغر، وحید اعتماد. ۱۳۹۴. تهیه نقشه تیپ ماده سوختنی در مقیاس محلی و پیش‌بینی رفتار آتش سطحی با استفاده از FARSITE (مطالعه موردی: جنگل توشی-سیاهکل). *فصلنامه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۲، ۲۲۵-۲۰۳.
- سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور. ۱۳۹۷. نقشه پوشش گیاهی ایران. دفتر مهندسی، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور. شریفی، جابر، فیاض، محمد، رستمی‌کیا، یونس، عظیمی، فرزانه، پروانه عشوری. ۱۳۹۷. تیپ‌های گیاهی عرصه‌های منابع طبیعی استان اردبیل. *طبیعت ایران*، ۴ (۱)، ۲۶-۲۱.
- طاووسی، تقی و قدیر دل‌آرا. ۱۳۸۹. پهنه‌بندی آب و هوایی استان اردبیل. *نیوار*، *مجله علمی-ترویجی سازمان هواشناسی کشور*، ۳۴، ۷۱-۷۰.
- محمدپور، مطهره و سولماز دشتی. ۱۳۹۸. پیش‌بینی شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در اکوسیستم جنگلی به کمک مدل FARSITE (مطالعه موردی: جنگل‌های استان ایلام). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۹ (۳۳)، <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.74556>.
- مددی، المیرا، محسن ملکی. ۱۳۹۷. ارزیابی اثرات اجتماعی - اقتصادی پروژه‌های منابع طبیعی اجراشده از دید دینفعان (مطالعه موردی: حوزه آبخیز اندبیل - شهرستان خلخال)، *نشریه علمی پژوهشی مرتع*، ۱۲ (۳)، ۲۸۰-۲۶۷.
- Ager, A.A., Barros, A.M.G., Day, M.A., Preisler, H.K., Spies, T.A., Bolte, J. (2018). Analyzing fine-scale spatiotemporal drivers of wildfire in a forest landscape model. *Ecological Modelling*, 384: 87-102
- Albini, F.A. (1976). Estimating wildfire behavior and effects. Gen. Tech. Rep. INT-30. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 92 p.
- Alcamo, J., Moreno, J.M., Novaky, B., Bindi, M., Corobov, R., Devoy, R.J.N., Giannakopoulos, C., Martin, E., Olesen, J.E., Shvidenko, A. (2007). Europe. In: *Climate Change, 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE, Cambridge University Press, Cambridge, 541-580.
- Alcasena, F.J., Salis, M., Ager, A.A., Arca, B., Molina, D., Spano, D. (2015). Assessing landscape scale wildfire exposure for highly valued resources in a Mediterranean area. *Environmental Management*. 55: 1200-1216.
- Akyürek, Z., Tasel, E. (2005). Wildfire simulation modeling using remote sensing and GIS integration for Marmaris-Çetibeli wildfire, Turkey. *New Strategies for European Remote Sensing*, Olui (ed.) © 2005 Millpress, Rotterdam, ISBN 90 5966 003 X.
- Alexander, M.E., Thomas, D.A. (2003). Wildland fire behavior case studies and analyses: other examples, methods, reporting standards, and some practical advice, *Fire Management Today*, 63, 4, 4-12.
- Arca, B., Duce, P., Laconi, M., Pellizzaro, G., Salis, M., Spano, D. (2007). Evaluation of FARSITE simulator in Mediterranean maquis. *International Journal of Wildland Fire*, 16: 563-572.
- Brown, J.T., Hall, L.B., Westerling, L.A. (2004). The impact of twenty-first century climate change on wildland fire danger in the Western United States: An application perspective. *Climate Change*, 62: 365-388.
- Butler, B.W., Bartlette, R.A., Bradshaw, L.S., Cohen, J.D., Andrews, P.L., Putnam, T., Mangan, R.J. (1998). Fire Behavior Associated with the 1994 South Canyon Fire on Storm King Mountain, Colorado, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Research Paper RMRS-RP-9, 82 p.
- Castellnou, M., Kraus, D., Miralles, M. (2010). Prescribed Burning and Suppression Fire Techniques: from Fuel to Landscape Management. In Montiel C and Kraus D (ed.), *Best Practices of Fire Use-Prescribed Burning and Suppression Fire Programs in Selected Case-Study Regions in Europe*.
- Coen, J.L., Schroeder, W. (2013). Use of spatially refined satellite remote sensing fire detection data to initialize and evaluate coupled weather-wildfire growth model simulations. *Geophysical Research Letters*, 40: 5536-5541.
- Deeming, J.E., Burgan, R.E., Cohen, J.D. (1977). The National Fire Danger Rating System. General Technical Report INT-39. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, International Forest and Range Experiment Station. 63 pp.
- Dimitrakopoulos, A.P. (2002). Mediterranean fuel models and potential fire behavior in Greece. *International Journal of Wildland Fire*, 11: 127-130.
- Dowdy, A.J., Ye, H., Pepler, A., Thatcher, M., Osbrough, S.L., Evans, J.P., Virgilio, G.D., McCarthy N. (2019). Future changes in extreme weather and pyroconvection risk factors for Australian wildfires. *Scientific Reports*, 9: 10073.

- Duguay, B., Alloza, J.A., Roder, A., Vallejo, R., Pastor, F. (2007). Modelling the effects of landscape fuel treatments on fire growth and behaviour in a Mediterranean landscape (eastern Spain). *International Journal of Wildland Fire*, 16: 619–632.
- Fernandes, P., Luz, A., Loureiro, C., Godinho-Ferreira, P., Botelho, H. (2006). Fuel modelling and fire hazard assessment based on data from the Portuguese National Forest Inventory. V International Conference on Forest Fire Research D. X. Viegas (Ed.).
- Finney, M.A. (2003). Calculation of fire spread rates across random landscapes. *International Journal of Wildland Fire*, 12: 167–174.
- Finney, M.A. (2004). FARSITE: Fire Area Simulator—model development and evaluation. Research Paper RMRS-RP-4 Revised. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 pp
- Flannigan, M.D. (2011). Weather, climate and wildland fires. International Conference on Fire Behaviour and Risk, Alghero, Italy, 4-6 October 2011
- Flannigan, M.D., Wotton, B.M. (2001). Climate, weather and area burned. In: Johnson EA, Miyanishi K (ed) *Forest Fires - Behaviour and Ecological Effects*. Academic Press, San Diego, CA, pp 335-357
- Jahdi, R., Salis, M., Darvishsefat, A.A., Alcasena, F., Etemad, V., Mostafavi, M.A., Munoz Lozano, O., Spano, D. (2015a). Calibration of FARSITE simulator in northern Iranian forests. *Natural Hazards and Earth System Science*, 15: 443-459.
- Keane, R.E., Burgan, R., van Wagendonk, J. (2001). Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. *International Journal of Wildland Fire*, 10: 301–319.
- Krawchuk, M.A., Cumming, S.G., Flannigan, M.D., Wein, R.W. (2006). Biotic and abiotic regulation of lightning fire initiation in the mixedwood boreal forest, *Ecology*, 87: 458–468.
- Legendre, P., Legendre, L. (1998). *Numerical Ecology*. 2nd edn. (Elsevier: Amsterdam),
- Lozano, O.M., Salis, M., Ager, A.A., Arca, B., Alcasena, F.J., Monteiro, A.T., Finney, M.A., Giudice, L.D., Scoccimarro, E. Spano, D. (2016). Assessing Climate Change Impacts on Wildfire Exposure in Mediterranean Areas. *Risk analysis* 37 (10): 1898-1916.
- Mccaffrey, S.M. (2004). Thinking of Wildfire as a Natural Hazard. *Society and Natural Resources*, 17(6): 509-516.
- Mouillot, F., Rambal, S., Joffre, R. (2002). Simulating climate change impacts on fire frequency and vegetation dynamics in a Mediterranean-type ecosystem. *Global Change Biology*, 8: 423-437.
- Nelson, R.M. (2000). Prediction of diurnal change in 10-h fuel sticks moisture content. *Canadian Journal of Forest Research*, 30, 1071-1087.
- Ottmar, R.D., Sandberg, D.V., Riccardi, C.L., Prichard, S.J. (2007). An overview of the fuel characteristic classification system—quantifying, classifying, and creating fuel beds for resource planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 37: 2383–2393.
- Pausas, J.G. (2004). Changes in fire and climate in the Eastern Iberian Peninsula (Mediterranean Basin). *Climate Change*, 63: 337-350.
- Pyne, S.J., Andrews, P.L., Laven, R.D. (1996). *Introduction to Wildland Fire*. 2nd Ed. John Wiley and Sons, New York.
- Riano, D., Moreno-Ruiz, J.A., Isidoro, D., Ustin, S.L. (2007). Global spatial patterns and temporal trends of the burned area between 1981 and 2000 using NOAA-NASA Pathfinder. *Global Change Biology*, 13: 40–50.
- Richards, G.D. (1990). An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 30: 1163-1179.
- Rothermel, R.C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA For. Serv. Res. Paper INT-115.40 pp
- Rothermel, R.C. (1993). Mann Gulch fire: a race that couldn't be won, Gen. Tech. Rep. INT-142. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest, and Range Experiment Station.
- Salis, M., Ager, A.A., Alcasena, F., Arca, B., Finney, M., Pellizzaro, G., Spano, D. (2015). Analyzing seasonal patterns of wildfire exposure factors in Sardinia, Italy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187:4175.
- Salis, M., Arca, B., Ager, A.A., Fois, C., Bacciu, V., Duce, P., Spano, D. (2012). Extreme wildfire spread and behavior: case studies from North Sardinia, Italy. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 14, 10052 p. ISSN 1607–7962.
- Sandberg, D.V., Ottmar, R.D., Cushon, G.H. (2001). Characterizing fuels in the 21st Century. *International Journal of Wildland Fire*, 10: 381-387.
- Sá, A.C.L., Benali, A., Fernandes, P.M., Pinto, R.M.S., Trigo, R.M. Salis, M., Russo, R., Jerez, S., Soares, P.M.M., Schroeder, W., Pereira, J.M.C. (2017). Evaluating fire growth simulations using satellite active fire data. *Remote Sensing of Environment*, 190: 302–317.

- Schoennagel, T., Veblen, T.T., Romme, W.H. (2004). The interaction of fire, fuels, and climate across Rocky mountain forests, *Bioscience*, 54: 661–676.
- Tavosi, T., Delara, G. (2010). Climate Classification of Ardabil Province. *Nivar, Journal of Meteorological Organization*, 12, 34, 47-52.
- Tian, H., Liu, M., Zhang, C., Ren, W., Chen, G., Xu, X., Lu, C. (2005). DLEM-The Dynamic Land Ecosystem Model, User Manual. The EDGE Laboratory, Auburn University, Auburn, AL.
- Trigo, R.M., Sousa, P.M., Pereira, M.G., Rasilla, D., Gouveia, C.M. (2013). Modeling wildfire activity in Iberia with different atmospheric circulation weather types. *International Journal of Climatology*, 36 (7): 2761-2778.
- Vacchiano, V., Foderi, C., Berretti, R., Marchi, E., Motta, E. (2018). Modeling anthropogenic and natural fire ignitions in an inner-alpine valley. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18: 935–948.
- van Wagner, C.E. (1993). Prediction of crown fire behavior in two stands of jack pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 442-449.
- Viegas, D.X. (2009). Recent forest fire-related accidents in Europe, JRC-IES European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability.
- Viegas, D.X., Abrantes, T., Palheiro, P., Santo, F.E., Viegas, M.T., Silva, J., Pessanha, L. (2006). Fire weather during the 2003, 2004, and 2005 fire seasons in Portugal. V International Conference on Forest Fire Research, Coimbra, Portugal, November 2006.
- Viegas, D.X., Ribeiro, L.M., Viegas, M.T., Pita, L.P., Rossa, C. (2009). Impacts of fire on society: Extreme fire propagation issues, Pages 97-110 in *Earth observation of wildland fires in the Mediterranean ecosystem*, Chuvieco E. (Ed.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, German.

Research Article

Survey of wildfire simulation using FARSITE model (case study: Yeylagh Gasre Dagh, Meshgin Shahr Municipality)

Roghayeh Jahdi^{1*}, Ardavan Ghorbani², Kiomars Sefidi³

1*. Assistant Professor of Forest Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2. Associate Professor of Rangeland Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

3. Associate Professor of Forest Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Received: 03-10-2019

Final Revised: 10-03-2020

Accepted: 05-05-2020

Abstract

Wildfire as a natural hazard is a major problem for forest and rangeland ecosystems of the world. In the Semi-Steppe Rangelands of Ardabil Province, severe wildfires can account for the adverse impacts on the ecosystems. These fires are the result of the combination of weather conditions, dry fuels, and topography effects. The Ghasre Dagh Yeylagh fire is an example of a severe wildfire that occurred with extreme environmental conditions, which was ignited on August 16, 2015, in the Meshgin Shahr municipality. In this study, weather conditions, fuels, and topography factors that strongly affected the fire will be accurately analyzed. The fire spread and behavior data including the observed final fire perimeter and fire arrival to the northern border of the fire perimeter (firefighting point) collected during the event will be also compared with the results of fire simulation obtained by FARSITE model. The average simulation accuracy for the burned area, as measured by the Sorensen coefficient and Cohen Kappa Coefficient was 0.84. Simulation overestimation of flanking fire spread areas was expected and observed, since suppression activities that contained the fire spread were not considered in the model, due to the lack of this information. The main goal of this paper is to thoroughly study the behavior of a recent fire, to learn from it, and lessen the potential mistakes or hazardous fire-fighting operations in similar environmental conditions. Furthermore, a crucial point is to teach the fire crews not to be threatened by severe or abrupt fire behavior under extreme environmental conditions.

Keywords: Rangelands, Semi-Steppe, Wildfire, Behavior, Analysis.

* Corresponding Author Email: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir

References

References (in Persian)

- Amlashi, M.A., Ghodskha, M., Islam Bonyad, A., Porbabaee, H., Jafari, M., Gholami, V. (2016). Fire behavior simulation using the FlamMapfire modeling in the ArcFuels program (Case study: Pinustaeda forestation in Takhsam, Gilan province). *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 14 (1): 1-11. [In Persian]
- Bazari Jamkhane, M., Mirbagheri, B., Shaakiba, A.R., Matkan, A.A. (2014). Simulation of fire spread in natural resources using the FARSITE model (case study: Neka forest). The first national conference on environmental research. Hamedan, Iran. [In Persian]
- Forests, Range, and Watershed Management Organization. (2018). Vegetation map of Iran. Office of Engineering, Forests, Range, and Watershed Management Organization. [In Persian]
- Jahdi, R., Darvishsefat, A.A., Etemad, V. (2014). Predicting forest fire spread using fire behavior model (Case study: Malekroud Forest-Siahkal). *Iranian Journal of Forest*, 5 (4), 419-430. [In Persian]
- Jahdi, R., Darvishsefat, A.A., Etemad, V. (2015b). Local Scale Fuel Type Mapping and Surface Fire Behavior Prediction Using FARSITE (Case study: Toshi Forest-Siahkal). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 22, 2, 207-225. [In Persian]
- Madadi, E., Maleki, M. (2018). Socio-economic impact assessment of the implemented natural resource projects from the Stakeholder perspectives (Case Study: Watershed Andabil- Khalkhal City). *Rangeland*, 12(3): 267-280. [In Persian]
- Mohammad pour, M., Dashti, S. (2019). Forecast of Fire Expansion Simulation in Forest Ecosystem Using FARSITE Model (Case Study: Ilam Province Forests). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9 (33), <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.74556>. [In Persian]
- Sharifi, J., Fayaz, M., Rostami Kia, Y., Azimi, F., Ashouri, P. (2019). Vegetation types of Natural Resources Areas of Ardabil Province. *Journal of Iran Nature*, 4: 21-26. [In Persian]
- Tavosi, T., Delara, G. (2011). Climate classification of Ardabil Province. *Nivar*, 34, 70-71. [In Persian]

References (in English)

- Ager, A.A., Barros, A.M.G., Day, M.A., Preisler, H.K., Spies, T.A., Bolte, J. (2018). Analyzing fine-scale spatiotemporal drivers of wildfire in a forest landscape model. *Ecological Modelling*, 384: 87–102
- Albini, F.A. (1976). Estimating wildfire behavior and effects. Gen. Tech. Rep. INT-30. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 92 p.
- Alcamo, J., Moreno, J.M., Novaky, B., Bindi, M., Corobov, R., Devoy, R.J.N., Giannakopoulos, C., Martin, E., Olesen, J.E., Shvidenko, A. (2007). Europe. In: *Climate Change, 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE, Cambridge University Press, Cambridge, 541–580.
- Alcasena, F.J., Salis, M., Ager, A.A., Arca, B., Molina, D., Spano, D. (2015). Assessing landscape scale wildfire exposure for highly valued resources in a Mediterranean area. *Environmental Management*. 55: 1200–1216.
- Akyurek, Z., Tasel, E. (2005). Wildfire simulation modeling using remote sensing and GIS integration for Marmaris-Çetibeli wildfire, Turkey. *New Strategies for European Remote Sensing*, Olui (ed.) © 2005 Millpress, Rotterdam, ISBN 90 5966 003 X.
- Alexander, M.E., Thomas, D.A. (2003). Wildland fire behavior case studies and analyses: other examples, methods, reporting standards, and some practical advice, *Fire Management Today*, 63, 4, 4-12.
- Arca, B., Duce, P., Laconi, M., Pellizzaro, G., Salis, M., Spano, D. (2007). Evaluation of FARSITE simulator in Mediterranean maquis. *International Journal of Wildland Fire*, 16: 563–572.
- Brown, J.T., Hall, L.B., Westerling, L.A. (2004). The impact of twenty-first century climate change on wildland fire danger in the Western United States: An application perspective. *Climate Change*, 62: 365-388.
- Butler, B.W., Bartlette, R.A., Bradshaw, L.S., Cohen, J.D., Andrews, P.L., Putnam, T., Mangan, R.J. (1998). Fire Behavior Associated with the 1994 South Canyon Fire on Storm King Mountain, Colorado, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Research Paper RMRS-RP-9, 82 p.
- Castellnou, M., Kraus, D., Miralles, M. (2010). Prescribed Burning and Suppression Fire Techniques: from Fuel to Landscape Management. In Montiel C and Kraus D (ed.), *Best Practices of Fire Use-Prescribed Burning and Suppression Fire Programs in Selected Case-Study Regions in Europe*.
- Coen, J.L., Schroeder, W. (2013). Use of spatially refined satellite remote sensing fire detection data to initialize and evaluate coupled weather-wildfire growth model simulations. *Geophysical Research Letters*, 40: 5536–5541.
- Deeming, J.E., Burgan, R.E., Cohen, J.D. (1977). The National Fire Danger Rating System. General Technical Report INT-39. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, International Forest and Range Experiment Station. 63 pp.
- Dimitrakopoulos, A.P. (2002). Mediterranean fuel models and potential fire behavior in Greece. *International Journal of Wildland Fire*, 11: 127–130.
- Dowdy, A.J., Ye, H., Pepler, A., Thatcher, M., Osbrough, S.L., Evans, J.P., Virgilio, G.D., McCarthy N. (2019). Future changes in extreme weather and pyroconvection risk factors for Australian wildfires. *Scientific Reports*, 9: 10073.

- Duguy, B., Alloza, J.A., Roder, A., Vallejo, R., Pastor, F. (2007). Modelling the effects of landscape fuel treatments on fire growth and behaviour in a Mediterranean landscape (eastern Spain). *International Journal of Wildland Fire*, 16: 619–632.
- Fernandes, P., Luz, A., Loureiro, C., Godinho-Ferreira, P., Botelho, H. (2006). Fuel modelling and fire hazard assessment based on data from the Portuguese National Forest Inventory. V International Conference on Forest Fire Research D. X. Viegas (Ed.).
- Finney, M.A. (2003). Calculation of fire spread rates across random landscapes. *International Journal of Wildland Fire*, 12: 167–174.
- Finney, M.A. (2004). FARSITE: Fire Area Simulator—model development and evaluation. Research Paper RMRS-RP-4 Revised. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 pp
- Flannigan, M.D. (2011). Weather, climate and wildland fires. International Conference on Fire Behaviour and Risk, Alghero, Italy, 4-6 October 2011
- Flannigan, M.D., Wotton, B.M. (2001). Climate, weather and area burned. In: Johnson EA, Miyanishi K (ed) *Forest Fires - Behaviour and Ecological Effects*. Academic Press, San Diego, CA, pp 335-357
- Jahdi, R., Salis, M., Darvishsefat, A.A., Alcasena, F., Etemad, V., Mostafavi, M.A., Munoz Lozano, O., Spano, D. (2015a). Calibration of FARSITE simulator in northern Iranian forests. *Natural Hazards and Earth System Science*, 15: 443-459.
- Keane, R.E., Burgan, R., van Wagendonk, J. (2001). Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. *International Journal of Wildland Fire*, 10: 301–319.
- Krawchuk, M.A., Cumming, S.G., Flannigan, M.D., Wein, R.W. (2006). Biotic and abiotic regulation of lightning fire initiation in the mixedwood boreal forest, *Ecology*, 87: 458–468.
- Legendre, P., Legendre, L. (1998). *Numerical Ecology*. 2nd edn. (Elsevier: Amsterdam),
- Lozano, O.M., Salis, M., Ager, A.A., Arca, B., Alcasena, F.J., Monteiro, A.T., Finney, M.A., Giudice, L.D., Scoccimarro, E. Spano, D. (2016). Assessing Climate Change Impacts on Wildfire Exposure in Mediterranean Areas. *Risk analysis* 37 (10): 1898-1916.
- Mccaffrey, S.M. (2004). Thinking of Wildfire as a Natural Hazard. *Society and Natural Resources*, 17(6): 509-516.
- Mouillot, F., Rambal, S., Joffre, R. (2002). Simulating climate change impacts on fire frequency and vegetation dynamics in a Mediterranean-type ecosystem. *Global Change Biology*, 8: 423-437.
- Nelson, R.M. (2000). Prediction of diurnal change in 10-h fuel sticks moisture content. *Canadian Journal of Forest Research*, 30, 1071-1087.
- Ottmar, R.D., Sandberg, D.V., Riccardi, C.L., Prichard, S.J. (2007). An overview of the fuel characteristic classification system—quantifying, classifying, and creating fuel beds for resource planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 37: 2383–2393.
- Pausas, J.G. (2004). Changes in fire and climate in the Eastern Iberian Peninsula (Mediterranean Basin). *Climate Change*, 63: 337-350.
- Pyne, S.J., Andrews, P.L., Laven, R.D. (1996). *Introduction to Wildland Fire*. 2nd Ed. John Wiley and Sons, New York.
- Riano, D., Moreno-Ruiz, J.A., Isidoro, D., Ustin, S.L. (2007). Global spatial patterns and temporal trends of the burned area between 1981 and 2000 using NOAA-NASA Pathfinder. *Global Change Biology*, 13: 40–50.
- Richards, G.D. (1990). An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 30: 1163-1179.
- Rothermel, R.C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA For. Serv. Res. Paper INT-115.40 pp
- Rothermel, R.C. (1993). Mann Gulch fire: a race that couldn't be won, Gen. Tech. Rep. INT–142. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest, and Range Experiment Station.
- Salis, M., Ager, A.A., Alcasena, F., Arca, B., Finney, M., Pellizzaro, G., Spano, D. (2015). Analyzing seasonal patterns of wildfire exposure factors in Sardinia, Italy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187:4175.
- Salis, M., Arca, B., Ager, A.A., Fois, C., Bacciu, V., Duce, P., Spano, D. (2012). Extreme wildfire spread and behavior: case studies from North Sardinia, Italy. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 14, 10052 p. ISSN 1607–7962.
- Sandberg, D.V., Ottmar, R.D., Cushon, G.H. (2001). Characterizing fuels in the 21st Century. *International Journal of Wildland Fire*, 10: 381-387.
- Sá, A.C.L., Benali, A., Fernandes, P.M., Pinto, R.M.S., Trigo, R.M. Salis, M., Russo, R., Jerez, S., Soares, P.M.M., Schroeder, W., Pereira, J.M.C. (2017). Evaluating fire growth simulations using satellite active fire data. *Remote Sensing of Environment*, 190: 302–317.
- Schoennagel, T., Veblen, T.T., Romme, W.H. (2004). The interaction of fire, fuels, and climate across Rocky mountain forests, *Bioscience*, 54: 661–676.
- Tavosi, T., Delara, G. (2010). Climate Classification of Ardabil Province. *Nivar, Journal of Meteorological Organization*, 12, 34, 47-52.

- Tian, H., Liu, M., Zhang, C., Ren, W., Chen, G., Xu, X., Lu, C. (2005). DLEM-The Dynamic Land Ecosystem Model, User Manual. The EDGE Laboratory, Auburn University, Auburn, AL.
- Trigo, R.M., Sousa, P.M., Pereira, M.G., Rasilla, D., Gouveia, C.M. (2013). Modeling wildfire activity in Iberia with different atmospheric circulation weather types. *International Journal of Climatology*, 36 (7): 2761-2778.
- Vacchiano, V., Foderi, C., Berretti, R., Marchi, E., Motta, E. (2018). Modeling anthropogenic and natural fire ignitions in an inner-alpine valley. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18: 935–948.
- van Wagner, C.E. (1993). Prediction of crown fire behavior in two stands of jack pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 442-449.
- Viegas, D.X. (2009). Recent forest fire-related accidents in Europe, JRC-IES European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability.
- Viegas, D.X., Abrantes, T., Palheiro, P., Santo, F.E., Viegas, M.T., Silva, J., Pessanha, L. (2006). Fire weather during the 2003, 2004, and 2005 fire seasons in Portugal. V International Conference on Forest Fire Research, Coimbra, Portugal, November 2006.
- Viegas, D.X., Ribeiro, L.M., Viegas, M.T., Pita, L.P., Rossa, C. (2009). Impacts of fire on society: Extreme fire propagation issues, Pages 97-110 in *Earth observation of wildland fires in the Mediterranean ecosystem*, Chuvieco E. (Ed.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, German.