پیش‌بینی گسترش آتش جنگل با استفاده از مدل رفتار آتش (مطالعهٔ موردی: جنگل ملکرود- سیاهکل)

رقیه جهدی[۱]، علی اصغر درویش‌صفت[۲*] و وحید اعتماد[۳]

[۱] دانشجوی دکتری جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران
[۲] استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران
[۳] استادیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۴/۱۸)

چکیده

در سال‌های اخیر در جنگل‌های شمال ایران، آتش‌سوزی‌های زیادی رخ داده است. آگاهی و پیش‌بینی چگونگی رفتار و گسترش آتش جنگل، در مدیریت اطفای آن راهگشا خواهد بود. برای شبیه‌سازی و بررسی رفتار آتش جنگل که به وسعت ۲۴ هکتار در ناحیهٔ ملکرود از جنگل‌های سیاهکل در آذرماه ۱۳۸۹رخ داد و ۱۵ ساعت ادامه داشت، از شبیه‌ساز سطح آتش FARSITE استفاده شد. متغیرهای ورودی این مدل شامل سه گروه: مادهٔ سوختنی، توپوگرافی و شرایط آب‌وهوایی است. سطح و شدت آتش‌سوزی‌های جنگل تا حد زیادی به تغییرپذیری مکانی و تیپ مواد سوختنی وابسته است. در این تحقیق، نقشهٔ مؤلفه‌های اصلی مواد سوختنی جنگل شامل تیپ پوشش گیاهی، تاج پوشش، تراکم مادهٔ سوختنی و بار لاشبرگ به‌صورت کار میدانی در آبان ۱۳۹۱ تهیه شد. دادهٔ توپوگرافی ناحیه از نقشه‌های توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ به‌دست آمد. دادهٔ آب‌وهوا از گزارش‌های هواشناسی تهیه‌شده در نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی دریافت شد. نقشهٔ لکهٔ آتش مشاهده‌شده با استفاده از GPS برداشت و به عنوان نقشهٔ واقعیت زمینی برای ارزیابی قابلیت شبیه‌ساز استفاده شد. بر اساس نتایج، ۴۲ درصد از ناحیهٔ سوخته‌شده به درستی در طول زمان مربوط، شبیه‌سازی شد. انتظار می‌رود با در نظر گرفتن دادهٔ باد متغیر مکانی و مدل‌های مادهٔ سوختنی محلی مناسب، بتوان شبیه‌سازی را بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: آب‌وهوا، توپوگرافی، جنگل سیاهکل، شبیه‌ساز سطح آتش FARSITE، مادهٔ سوختنی.

* نویسنده مسئول تلفن: ۰۲۶۳۲۲۲۳۰۴۴ Email: adarvish@ut.ac.ir

مقدمه و هدف

آتش‌سوزی‌ها در طول دهۀ گذشته در جنگل‌های شمال ایران رشد فزاینده‌ای داشته است (سرکارگر اردکانی و همکاران، ۱۳۸۸). تعداد آتش‌سوزی‌ها به دلیل نبود راهبرد مناسب مدیریت آتش یکپارچه، گسترش یافته و اثرهای نامطلوبی بر اکوسیستم جنگل داشته است. آتش‌سوزی‌های شدید جنگل در مقیاس بزرگ، اثر زیادی بر ساختار پوشش گیاهی (Dwire & Kauffman, 2003; Laughlin *et al*., 2004)، حاصلخیزی جنگل (Keane *et al*., 1990)، ذخیرۀ کربن اکوسیستم (Law *et al*., 2003; Lynch & Wu, 2000)، افزایش احتمال فرسایش خاک (Pierce *et al*., 2004) و هجوم گونه‌های گیاهی خارجی (Fornwalt *et al*., 2003) می‌گذارد. یکی از جنبه‌های بسیار مهم انواع مختلف آتش‌سوزی جنگل (سطحی، تاجی و ...) رفتار آنها است. فهم رفتار آتش برای اعمال اقدامات مفید به‌منظور جلوگیری از گسترش آتش و مهار آن مهم است. رفتار آتش به بزرگی، جهت و شدت گسترش آن اشاره دارد و به شرایط محیطی شامل پوشش گیاهی (مادۀ سوختنی)، توپوگرافی و آب و هوا بسیار وابسته است (Salis, 2007). مدل‌های مکانی آتش مانند شبیه‌ساز سطح آتش[1]، FlamMap، و Fs Pro (Finney, 1998; McDaniel, 2007) می‌توانند آتش‌سوزی‌ها را به منظور ارزیابی و برنامه‌ریزی برای کاهش، اطفا یا حمایت از راهبردهای مدیریت آتش، شبیه‌سازی کنند (Gouma & Chronopoulou-Sereli, 1998; Keane *et al*., 2001). این مدل‌ها رفتار آتش را با استفاده از دادۀ مکانی خاص رویشگاه، مثل تیپ و شرایط مادۀ سوختنی، توپوگرافی و آب‌وهوا مدلسازی می‌کنند. تحقیقات زیادی در زمینۀ مدلسازی رفتار و گسترش آتش در شرایط رویشگاهی مختلف به‌ویژه در ایالات متحده، کانادا، استرالیا و اخیراً در کشورهای اروپایی انجام گرفته و نتایج متفاوتی به‌دست آمده است (Arca *et al*., 2006; Andrews *et al*., 2007; Carmel *et al*., 2009; Mbow *et al*., 2004, Mutlu *et al*., 2008; Sibanda, 2011 در) داخل کشور مطالعات، در زمینۀ آتش‌سوزی بسیار محدود و نوپا است (سلامتی و همکاران، ۱۳۹۰). بنابراین در شرایط جنگل‌های ایران، هنوز شناخت کاملی از پدیدۀ آتش، اثرهای آن و چگونگی مواجه شدن با این مشکل وجود ندارد. اطلاعات جامع دربارۀ جنبه‌های مختلف آتش، مانند رفتار آتش نیز وجود ندارد. در تحقیق حاضر این مسئله با مدلسازی رفتار آتش جنگل از طریق شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی واقعی رخداده در جنگل‌های سیاهکل در شرق استان گیلان بررسی می‌شود. FARSITE یک برنامۀ شبیه‌سازی رشد آتش GIS محور است که حرکت و رفتار آتش را در سرتاسر سیمای سرزمین محاسبه و گسترش جبهۀ آتش را در طول زمان و با در نظر گرفتن تغییرات شرایط آب‌وهوایی در زمان و مکان تعیین می‌کند. برای اجرای مدل‌های رفتار آتش، FARSITE به داده‌های مواد سوختنی (مدل مواد سوختنی و تاج پوشش جنگل)، توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت) و آب و هوا نیاز دارد (Finney, 1998). تیپ‌های مادۀ سوختنی برای توسعۀ راهبردهای مدیریت نیز ضروری است. برای مثال، در طول آتش‌سوزی تجویزی[2]، با استفاده از نقشه‌های تیپ مادۀ سوختنی دقیق که اطلاعاتی را دربارۀ شرایط خطر آتش عرضه می‌کند، برج‌های مراقبت می‌توانند به‌صورت مؤثرتر مکان‌یابی شوند (Chuvieco *et al*., 1999). علاوه بر این، نقشه‌های تیپ مادۀسوختنی دقیق، ورودی لازم در برنامه‌های شبیه‌سازی رفتار آتش هستند. در زمینۀ مادۀ سوختنی، مدل‌های گوناگونی به‌صورت استاندارد وجود دارند (Anderson, 1982; Scott & Burgan, 2005)، که در FARSITE نیز تعریف شده است. البته تغییر مدل‌های مادۀ سوختنی مطابق با شرایط محیط نیز امکان‌پذیر است. طبقه‌بندی مدل‌های مادۀ سوختنی بر اساس پوشش گیاهی متداول‌ترین روش و اجرای آن نیز آسان است، زیرا نقشه‌های پوشش گیاهی عمدتاً در دسترس‌اند یا می‌توانند تهیه شوند (برای مثال، از

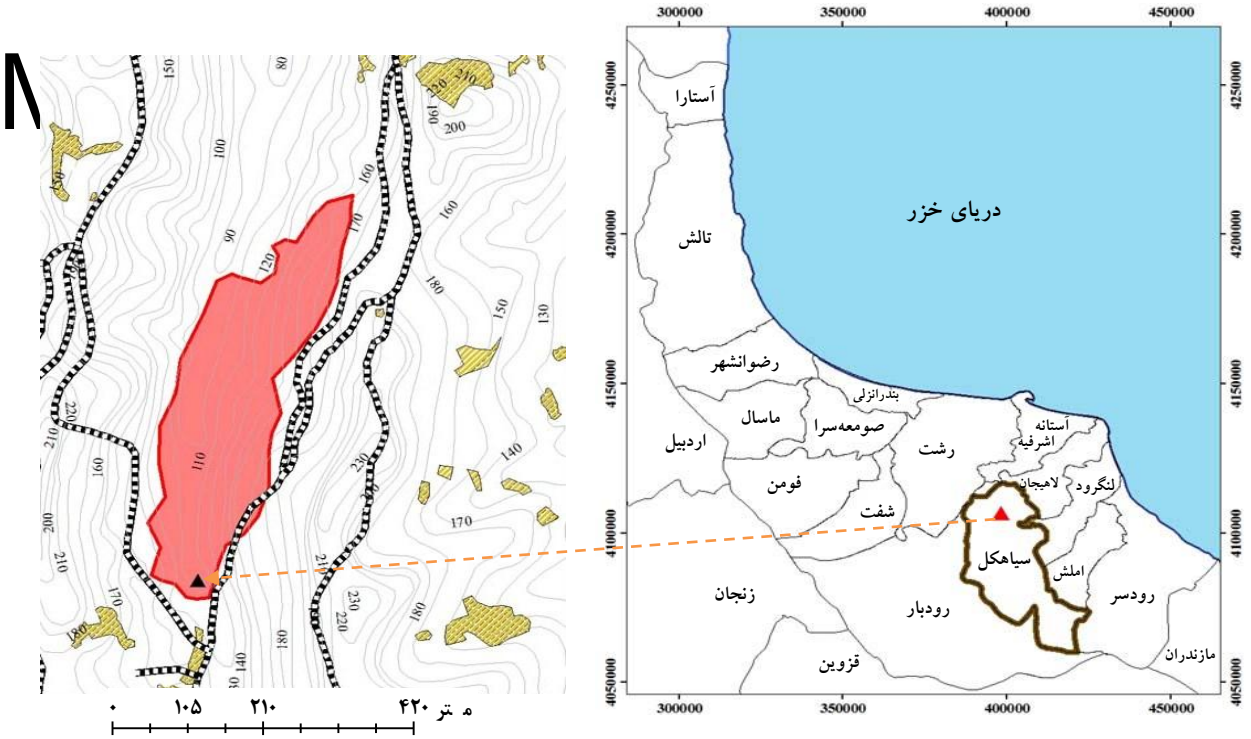
1 . FARSITE
2. Prescribed Fire

طریق دادهٔ سنجش از دور (Wu *et al.*, 2011). البته باید توجه داشت که تیپ‌های پوشش گیاهی مشابه با توجه به تغییرپذیری دیگر عوامل محیط ممکن است مشخصات مادهٔ سوختنی و رفتار آتش کاملاً متفاوتی را نشان دهند، ضمن اینکه مشخصات مادهٔ سوختنی در زمان و مکان نیز ممکن است تغییر کند (Deeming *et al.*, 1977). اهداف اصلی این تحقیق، ارزیابی قابلیت شبیه‌ساز سطح آتش FARSITE در مدلسازی دقیق رفتار و گسترش آتش در یک آتش‌سوزی تاریخی رخداده در جنگل‌های شمال ایران و تهیهٔ نقشهٔ تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی، و در نتیجه تهیهٔ نقشهٔ مدل‌های مادهٔ سوختنی این منطقه است. آتش جنگل ملکرود به منظور بررسی شایستگی مدل رفتار آتش FARSITE شبیه‌سازی شد و دربارهٔ مواردی که به بهبود شبیه‌سازی کمک می‌کند بحث شد.

مواد و روش‌ها

- منطقهٔ مورد بررسی و داده‌های ورودی

منطقهٔ تحقیق، لکهٔ آتش‌سوزی با وسعت ۲۴ هکتار است که در جنگل ملکرود شهرستان سیاهکل واقع شده است. این آتش‌سوزی از نوع سطحی بوده و در تاریخ‌های ۲۶ و ۲۷ آذر ماه ۱۳۸۹ در نزدیکی روستای ملکرود بین عرض جغرافیایی ´۰۳ °۳۷ تا ´۰۸ °۳۷ شمالی و طول جغرافیایی ´۸۰ °۴۹ تا ´۸۴ °۴۹ شرقی رخ داده است. ناحیه‌ای با وسعت ۲۵۰ هکتار شامل لکه آتش‌سوزی و اطراف آن برای شبیه‌سازی گسترش آتش بررسی شد (شکل ۱). گونه‌های درختی اصلی منطقه شامل افرا پلت (*Acer insigne*)، بلوط بلندمازو (*Quercus castaneifolia*)، توسکا ییلاقی (*Alnus subcordata*)، و صنوبر (*Populus sp.*) است که بیشتر به‌صورت جنگل دست‌کاشت با تراکم پوشش مختلف است. آتش در ساعت ۱۷ روز ۲۶ آذر ۱۳۸۹ گزارش شد. نقطهٔ حریق در نزدیکی جاده در حاشیهٔ جنوبی منطقه واقع شده بود. با توجه به شیب ملایم و باد جنوبی، آتش به سمت شمال حرکت کرد و بعد از ۱۵ ساعت گسترش، در ساعت هشت صبح متوقف شد. شایان ذکر است که نزدیکی به جاده و دسترسی راحت مأمورهای آتش‌نشانی جنگل به منطقه، در توقف آتش مؤثر بود.



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ تحقیق (محدودهٔ آتش جنگل ملکرود با خطوط تراز ارتفاعی، جاده‌ها و نواحی مسکونی)

در شبیه‌ساز گسترش آتش FARSITE، داده‌های ارتفاع، شیب، جهت، تیپ‌های مادهٔ سوختنی و تاج‌پوشش، به‌عنوان داده‌های سیمای سرزمین، و داده‌های هواشناسی شامل درجهٔ حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد و جهت باد نیز به عنوان داده‌های تکمیلی مدل وارد می‌شوند. داده‌های آب‌وهوا از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقهٔ تحقیق، ایستگاه هواشناسی لاهیجان در ۱۵ کیلومتری منطقه و در ارتفاع ۳۰ متری از سطح دریا تهیه شد (جدول ۱). بر اساس اطلاعات این ایستگاه هواشناسی، شرایط آب‌وهوایی در طول حادثهٔ آتش‌سوزی تعیین شد (جدول ۲). در طول آذر ماه که آتش‌سوزی در آن رخ داد، هیچ بارندگی‌ای وجود نداشت که نشان‌دهندهٔ وجود دورهٔ خشکی در ناحیه بود. از نقشه‌های توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، مدل رقومی زمین با اندازهٔ سلول ۱۵ متر تهیه و نقشه‌های شیب و جهت از آن استخراج شد.

جدول ۱- متوسط ماهانهٔ عوامل اقلیمی برای ایستگاه لاهیجان در سال ۱۳۸۹

عوامل آب و هوایی	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
حداکثر درجه حرارت (°C)	۲۳	۳۱	۳۳	۳۶	۳۶	۳۳	۳۱	۲۵	۲۹	۱۹	۲۱	۲۷
حداقل رطوبت (درصد)	۴۱	۴۹	۳۵	۳۸	۲۷	۴۷	۴۸	۴۴	۲۰	۴۱	۲۶	۱۸
حداکثر سرعت (m/s) و جهت باد	۱۱ NE	۱۰ S	۱۰ NE	۱۰ NE	۱۱ NE	۹ NE	۱۱ NE	۸ NE	۱۴ S	۸ SW	۱۴ SW	۱۱ SW

جدول ۲- شرایط آب‌وهوایی در طول آتش‌سوزی ملکرود (به‌دست آمده از ایستگاه هواشناسی لاهیجان)

عوامل آب‌وهوایی	آتش‌سوزی ملکرود	
	حداقل	حداکثر
درجهٔ حرارت (°C)	۷	۲۵
رطوبت (درصد)	۳۱	۶۸
سرعت (m/s) و جهت باد	۴ (S)	۹ (S)

مدل‌های مادهٔ سوختنی مناسب منطقهٔ مورد تحقیق بر اساس توصیف ۵۳ مدل مادهٔ سوختنی استاندارد (Anderson, 1982; Scott & Burgan, 2005) که بر پایهٔ مدل گسترش آتش (Rothermel, 1972) توسعه یافته‌اند، انتخاب شد. این انتخاب با استفاده از نقشهٔ پوشش‌گیاهی حاصل از کار میدانی، و بر اساس شباهت مشخصات پوشش گیاهی موجود و توصیف این مدل‌ها انجام گرفت. فرایند مدلسازی مادهٔ سوختنی شامل کلاسه‌بندی منطقهٔ تحقیق به نواحی با ویژگی‌های مادهٔ سوختنی منحصربه‌فرد و تعیین شاخص‌های مادهٔ سوختنی برای هر کلاسه است. کسب داده‌های مادهٔ سوختنی در زمین با اندازه‌گیری تمام متغیرهای مورد نیاز آن پرزحمت و زمان‌بر است. در این تحقیق برای تهیهٔ نقشهٔ مدل مادهٔ سوختنی ابتدا از طریق کار میدانی منطقهٔ تحقیق بر اساس پوشش گیاهی غالب، کلاسه‌بندی شد. در هر یک از

این کلاسه‌های اولیه، با توجه به وسعت و توپوگرافی سعی شد در طول پیمایش زمینی با حرکت روی نوارهایی و توقف در فواصل تقریباً برابر (۱۰ متر) وضعیت تراکم جنگل، درصد پوشش تاج، عمق و فشردگی لاشبرگ جنگل، مقدار پوشش علفی کف جنگل برای تعیین بار مادهٔ سوختنی آماده برای اشتعال در هر کلاسه، برآورد و ثبت شود. حاصل این برداشت‌ها در محیط ArcGIS 9.3 به نقشه‌های موضوعی مربوط تبدیل شد.

در زمینهٔ مؤلفه‌های اصلی مادهٔ سوختنی، نقشه‌های تاج‌پوشش جنگل و تیپ پوشش (در قالب نقشهٔ مدل مادهٔ سوختنی) که ضرورت بیشتری داشته، آمده است و نقشهٔ پوشش علفی کف جنگل با توجه به ارتباط مستقیم آن با اندازهٔ تاج‌پوشش (هر چه تاج-پوشش زیادتر باشد مقدار پوشش علفی کمتر خواهد بود و برعکس) و نیز نقشهٔ بار لاشبرگ (منطقهٔ جنگلی، اغلب فاقد لاشبرگ است و تنها در تیپ‌های پوشش سوزنی‌برگ، ۲-۱ سانتی‌متر لاشبرگ وجود دارد) به‌دلیل ضرورت کمتر ارائه نشده است.

- شبیه‌سازی رفتار آتش جنگل و ارزیابی آن

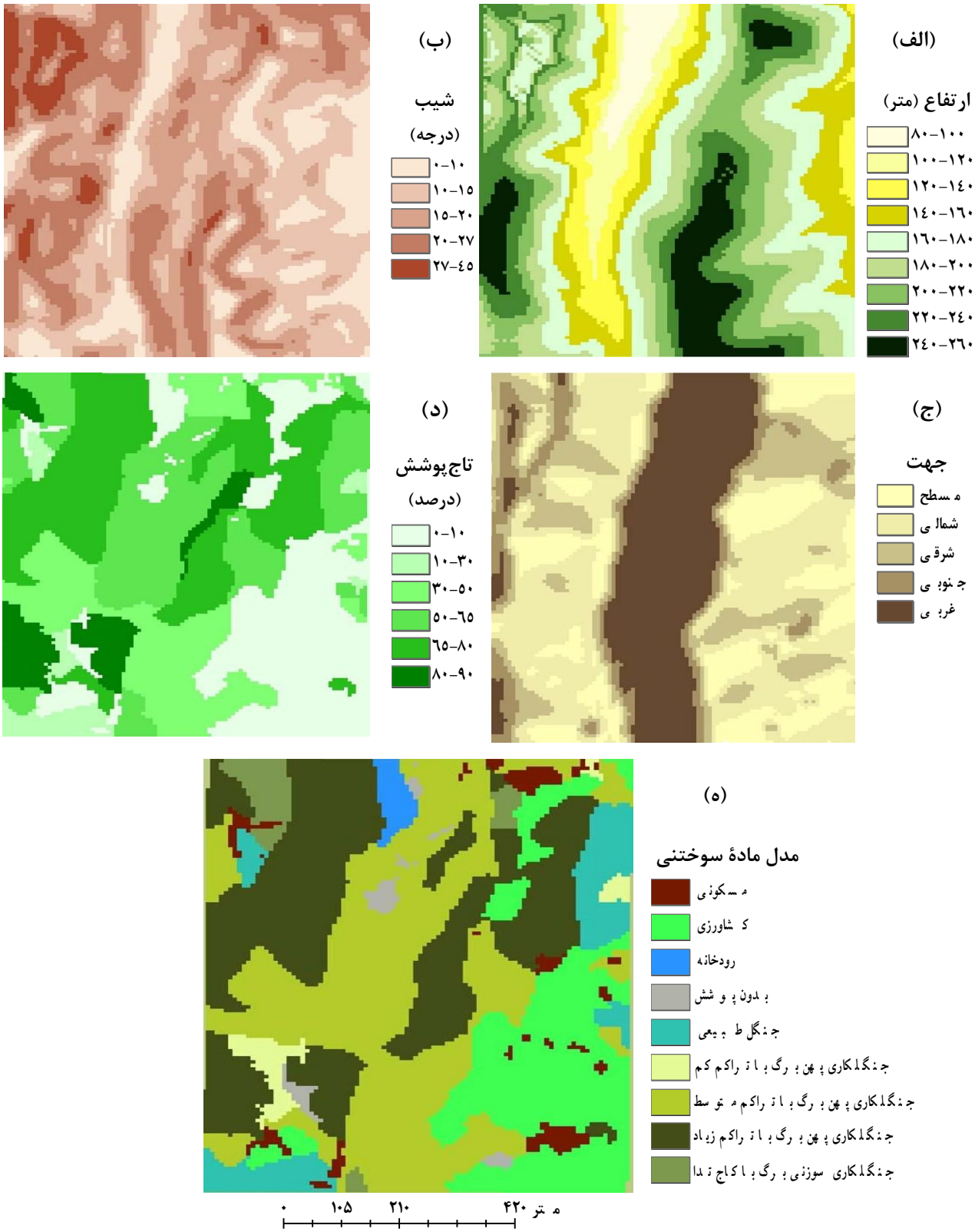
به‌منظور شبیه‌سازی رفتار آتش، علاوه بر نقشه‌های رستری سیمای سرزمین (شکل ۲)، داده-های متنی آب‌وهوا و باد، اطلاعات مربوط به نقطهٔ شروع حریق، مدت، تاریخ و زمان در شبیه‌ساز وارد شد. همچنین نقشهٔ وکتوری جاده به عنوان مانع گسترش آتش معرفی شد.

به‌عنوان مشخصهٔ مدل، گام زمانی یک ساعت برای تجزیه‌وتحلیل زمانی و مشاهدهٔ تغییرات ساعتی در طول دورهٔ حریق انتخاب، و اندازهٔ تفکیک محیط[1] و اندازهٔ تفکیک فاصله[2] به‌ترتیب ۳۰ و ۶۰ متر تعیین شد. به‌عنوان گزینهٔ رفتار آتش، آتش سطحی انتخاب و برای دورهٔ سوختن با توجه به گزارش آتش‌سوزی، ساعت ۱۷ روز ۲۶ آذر تا ۸ صبح روز ۲۷ آذر ۱۳۸۹ وارد شد. موقعیت شروع حریق که بر اساس اطلاعات مأموران آتش‌نشانی جنگل حاضر در زمان وقوع آتش در منطقه، با استفاده از GPS ثبت شده بود، نیز وارد مدل شد. فرایند اجرای شبیه‌سازی گسترش آتش به‌صورت خلاصه در شکل ۳ ارائه شده است. در پایان، نقشهٔ نهایی حاصل از شبیه‌سازی با نقشهٔ لکه آتش مشاهده‌شده مقایسه، و مقدار همخوانی و صحت آن بر اساس معیار کاپا برآورد شد.

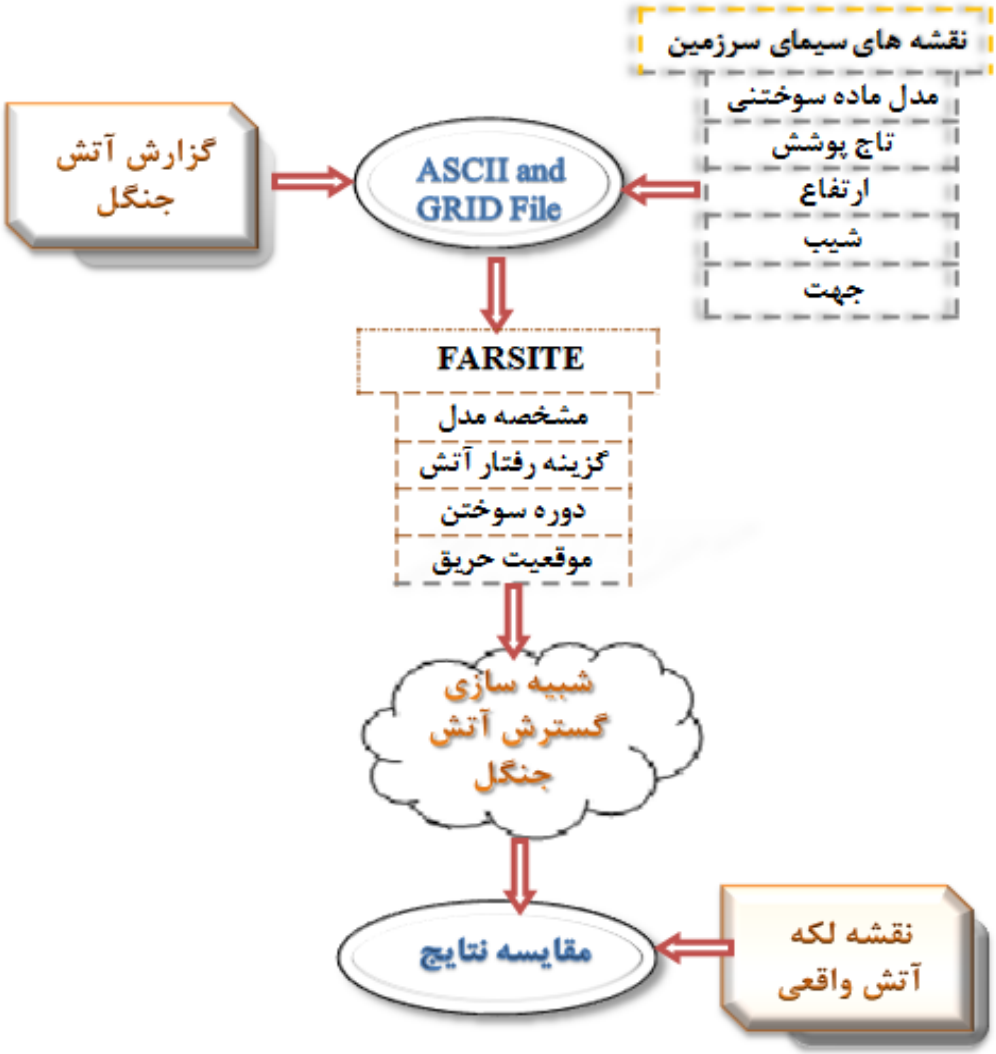
نتایج

خروجی‌های اصلی فرایند شبیه‌سازی، نقشهٔ گسترش آتش در گام‌های زمانی تعیین‌شده و نقشهٔ نهایی آن است. از آنجا که سطح آتش مشاهده‌شده و زمان رسیدن جبههٔ آتش[3] به مرز شمالی منطقه ثبت شده است، رفتار آتش شبیه‌سازی‌شده با موارد مشاهده‌شده مقایسه شد. مساحت طبقه‌های مختلف پوشش موجود در منطقهٔ تحقیق بر اساس کار میدانی، در جدول ۳ و نقشهٔ گسترش آتش شبیه‌سازی‌شده، در شکل ۴ ارائه شده است. درصد همخوانی و ضریب کاپا به عنوان معیارهای ارزیابی صحت استفاده شد. درصد همخوانی شامل بخشی از لکه آتش مشاهده-شده است که به عنوان ناحیهٔ سوخته‌شده، شبیه‌سازی شده است. ضریب کاپا نیز سطح شباهت لکه‌های آتش مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد و همچنین مقدار کم‌برآورد[4] و بیش‌برآورد[5] (یعنی برآورد کمتر و بیشتر از حد واقعی) را محاسبه می‌کند. نتایج ارزیابی همخوانی و صحت لکهٔ آتش شبیه‌سازی-شده در مقایسه با لکهٔ آتش مشاهده‌شده نیز در جدول ۴ ارائه شده است.

1. Perimeter Resolution
2. Distance Resolution
3. Fire Front
4. Underestimation
5. Overestimation



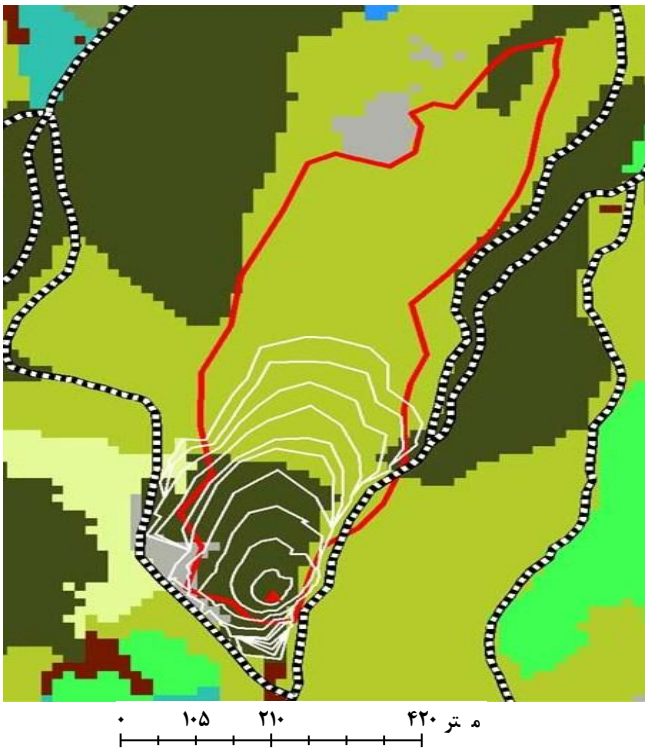
شکل ۲- پنج لایهٔ رستری مربوط به سیمای سرزمین به‌عنوان ورودی برای شبیه‌ساز سطح آتش FARSITE.
الف) ارتفاع، ب) شیب، ج) جهت، د) تاج پوشش و ه) مدل مادهٔ سوختنی



شکل ۳- فرایند شبیه‌سازی گسترش آتش جنگل با استفاده از FARSITE

جدول ۳- مساحت پوشش‌های زمین در منطقهٔ تحقیق

	نواحی مسکونی	کشاورزی	رودخانه	زمین لخت	جنگل طبیعی	جنگلکاری پهن‌برگ (افرا، صنوبر، بلوط، توسکا و ...)	جنگلکاری سوزنی‌برگ (کاج تدا)
ناحیهٔ تحقیق (ha)	۷/۴	۴۸	۳/۱	۳/۲	۱۷	۱۶۴/۲	۷/۱
ناحیهٔ سوخته شده (ha)	-	-	-	-	-	۲۴	-



شکل ۴- گستره‌های شبیه‌سازی‌شده آتش در گام‌های زمانی ۱ ساعت (خطوط سفید) و لکهٔ آتش واقعی (خط قرمز).

جدول ۴- ارزیابی همخوانی و صحت لکهٔ آتش شبیه‌سازی شده در مقایسه با لکهٔ آتش واقعی

معیارهای ارزیابی صحت	آتش ملکرود
همخوانی (درصد)	۴۲
کم‌برآورد (درصد)	۵۸
بیش‌برآورد (درصد)	۸
ضریب Kappa	۰/۵۳

بحث

زمان، مکان و چگونگی وقوع آتش‌سوزی جنگل نامشخص است. البته تحقیقات زیادی برای تهیهٔ نقشهٔ حساسیت و خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها به‌عنوان یکی از اطلاعات لازم برای مدیریت این مناطق انجام گرفته است (اکبری و همکاران، ۱۳۸۶؛ محمدی و همکاران، ۱۳۸۹؛ Ghobadi *et al*., 2012). هنگام آتش‌سوزی، پیش‌بینی جهت گسترش و رفتار آتش جنگل به‌منظور کنترل و مدیریت آن مهم است. آگاهی از چگونگی گسترش آتش در زمان، لازمهٔ مدیریت عملیات کنترل و اطفای حریق است. محققان در دو دههٔ گذشته تلاش‌های زیادی برای تهیهٔ ابزارهای شبیه‌سازی گسترش آتش آغاز کرده‌اند (Perry, 1998; Arca *et al*., 2006). بعضی از این ابزارها متناسب با شرایط مختلف اصلاح شده‌اند. در تحقیق حاضر، قابلیت شبیه‌ساز FARSITE در یکی از

آتش‌سوزی‌های جنگل‌های استان گیلان که اطلاعات آن در دست بود و امکان تهیهٔ دیگر اطلاعات مکانی و گسترهٔ آتش آن نیز وجود داشت، بررسی شد.

دربارهٔ آتش رخ داده، با توجه به وجود جادهٔ مناسب در دو طرف ناحیهٔ حریق و دسترسی مناسب برای ورود مأموران آتش‌نشانی جنگل و وسایل اطفای حریق، پخش آتش از دو جبههٔ شرقی و غربی محدود شد و در جهت شمالی گسترش یافت. البته وزش باد جنوبی نیز این مسئله را تسریع کرد. فعالیت‌های اطفای حریق، بر شدت گسترش، شکل و رفتار آتش تأثیرگذار بود. جهت گسترش آتش شبیه‌سازی‌شده نیز مشابه لکهٔ سوخته-شدهٔ واقعی است. اگرچه مقایسهٔ سطح آتش پیش‌بینی-شده با مساحت آتش رخ‌داده نشان داد که تنها ۴۲ درصد از لکهٔ آتش واقعی در طول زمان حقیقی آتش، به عنوان ناحیهٔ سوخته‌شده شبیه‌سازی‌شده است. البته در مقابل ۵۸ درصد کم برآورد، تنها هشت درصد بیش‌برآورد وجود داشته است که می‌توان آن را نکتهٔ مثبت در این شبیه‌سازی محسوب کرد. با افزایش طول دورهٔ شبیه‌سازی از ۱۵ ساعت به ۴۱ ساعت، همخوانی به ۹۸ درصد با کمترین مقدار کم‌برآورد و البته بیشترین مقدار بیش‌برآورد (۱۰۲/۶۵درصد)، افزایش یافت. مقدار همخوانی کسب‌شدهٔ دیگر محققان (Salis, 2007; Nyatondo, 2010; Sibanda, 2011; Parresol *et al*., 2012)، را با توجه به تفاوت مناطق، شاید نتوان به سادگی با نتیجهٔ تحقیق حاضر مقایسه کرد. از جمله عوامل اصلی قابلیت به‌نسبت کم، می-توان به نامناسب بودن مدل شبیه‌سازی، مدل‌های مادهٔ سوختنی و داده‌های آب‌وهوایی اشاره کرد (Salis, 2007). هرچند نقشهٔ پوشش گیاهی منطقه بعد از آتش‌سوزی تهیه شده، با توجه به وسعت به نسبت کم آن، امکان بهره‌گیری از نواحی مجاور وجود داشته است. در ضمن به منظور اطمینان از درستی نقشهٔ پوشش تهیه‌شده از تجربهٔ کارشناس آشنا به منطقه و کار میدانی فشردهٔ افراد خبره، استفاده شد. مسافت به‌نسبت زیاد ایستگاه هواشناسی سبب کاهش درجهٔ تناسب آن برای منطقهٔ تحقیق می‌شود. بسیاری از محققان بر این عقیده‌اند که شرایط متغیر محیط، مانند توپوگرافی و پوشش زمین نیز بر جریان باد اثرگذار است و نباید آن را ثابت در نظرگرفت (Forthofer, 2007).

امید است در تحقیقات بعدی با اصلاح مدل‌های رفتار آتش و در نظر گرفتن تغییرات باد در مقیاس محلی، بتوان شبیه‌سازی‌ها را تا حد ممکن نزدیک به واقعیت انجام داد. علاوه‌براین، تهیهٔ مدل‌های مادهٔ سوختنی و تاج‌پوشش دقیق‌تر با توجه به تغییرات فصلی نیز باید مدنظر قرار گیرد. در این صورت، می-توان استفاده از این فناوری را به‌عنوان یکی از ابزارهای مدیریت مناطق حفاظت‌شده و تحت مدیریت توصیه کرد. استفاده از یک شبیه‌ساز به‌عنوان مؤلفه‌ای از یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی عملیات مدیریت آتش به تأیید اعتبار نتایج شبیه-سازی در شرایط محیط زیستی و پوشش گیاهی مختلف نیاز دارد. از این رو اگر بتوان چگونگی رفتار و گسترش حریق در جنگل‌های شمال ایران را از طریق تهیهٔ نقشهٔ مناسب مدل مادهٔ سوختنی و دیگر ورودی‌های مدل آتش، به درستی شبیه‌سازی کرد، می‌توان انتظار داشت که دست‌کم در مناطق جنگلی با اهمیت ویژه و بحرانی مانند پارک ملی گلستان، جنگل‌های آموزشی و پژوهشی مانند جنگل خیرود، ذخیره‌گاه‌ها و... سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری برای مدیریت اطفای حریق تهیه کرد و به‌کار گرفت.

سپاسگزاری

از معاونت‌های فنی، حفاظت و امور اراضی ادارهٔ کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان، ریاست ادارهٔ منابع طبیعی شهرستان سیاهکل و جنگلبانان منطقه به دلیل مساعدت در اجرای طرح سپاسگزاری می‌شود. این تحقیق در قالب طرح پژوهشی مصوب دانشگاه تهران به شمارهٔ ۷۲۰۲۰۰۲/۱/۶ اجرا شده است.

منابع

اکبری، داود، جلال امینی و محمد سعادت سرشت، ۱۳۸۶. ارائه مدلی ساده و سریع برای تهیه نقشه ریسک آتش سوزی در نواحی جنگلی، دومین همایش مقابله با سوانح طبیعی. قطب علمی مهندسی نقشه برداری و مقابله با سوانح طبیعی، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۴ تا ۵ دی، ۵۲-۵۹.

سلامتی، حمید، حمید مصطفی‌لو، علی مستوری و فرهاد هنردوست، ۱۳۹۰. ارزیابی و تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از GIS در جنگل‌های استان گلستان، نخستین همایش بین‌المللی آتش‌سوزی در عرصه‌های منابع طبیعی. گرگان، ۴ تا ۶ آبان، ۱۹۱-۱۸۱.

سرکارگر اردکانی، علی، محمدجواد ولدان زوج و علی منصوریان، ۱۳۸۸. تحلیل فضایی نیروی آتش‌سوزی مناطق مختلف کشور با استفاده از RS و GIS، محیط-شناسی (۵۲)، ۴۳-۲۵.

محمدی، فریده، نقی شعبانیان، مهدی پورهاشمی و پرویز فاتحی، ۱۳۸۹. تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی با استفاده از GIS و AHP در بخشی از جنگل‌های پاوه، تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۸(۴): ۵۸۶-۵۶۹.

Anderson, H.E, 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior, In: General Technical Report, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah, 28pp.

Andrews, P.L., M. Finney & M. Fischetti, 2007. Predicting Wildfires, *Scientific American*, 46-55.

Arca, B., P. Duce, G. Pellizzaro, M. Laconi, M. Salis & D. Spano, 2006. Evaluation of FARSITE simulator in Mediterranean shrub land, *Forest Ecology and Management*, 234: 110-110.

Carmel, Y., S. Paz, F. Jahashan & M. Shoshany, 2009. Assessing fire risk using Monte Carlo simulations of fire spread, *Forest Ecology and Management*, 257: 370–377.

Chuvieco, E., 1999. Measuring changes in landscape pattern from satellite images: short-term effects of fire on spatial diversity, *International Journal of Remote Sensing*, 20: 2331-2346.

Deeming, J.E., R.E. Burgan & J.D. Cohen, 1977. The National Fire Danger Rating System, General Technical Report, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experimental Station, 63 pp.

Dwire, K.A. & J.R. Kauffman, 2003. Fire and riparian ecosystem in landscapes of the western USA, *Forest Ecology and Management*, 178(1-2): 61-74.

Finney, M., 1998. FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation, Research Paper, Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, 47 pp.

Fornwalt, P.J., M.R. Kaufmann, L.S. Huckaby, J.M. Stoker & T.J. Stohlgren, 2003. Non-native plant invasions in managed and protected ponderosa pine/Douglas-fir forests of the Colorado Front Range, *Forest Ecology and Management*, 177(1-3): 515-527.

Forthofer, J.M., 2007. Modeling wind in complex terrain for use in fire spread prediction, Master of Science, Colorado State University, 123 pp.

Ghobadi, G.J., B. Gholizadeh & O.M. Dashliburun, 2012. Forest fire risk zone mapping from geographic information system in Northern Forests of Iran (Case study, Golestan Province), *International Journal of Agricultural Crop Science*, 4(12): 818-824.

Gouma, V. & A. Chronopoulou-Sereli, 1998. Wild land fire danger zoning-a methodology, *International Journal of Wildland Fire*, 8(1): 37–43.

Keane, R.E., R. Burgan & J. van Wagtendonk, 2001. Mapping wild land fuels for fire management across multiple scales: integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling, *International Journal of Wildland Fire*, 10: 301–319.

Keane, R.E., S.F. Arno & J.K. Brown, 1990. Simulating cumulative fire effects in ponderosa pine/Douglas-fir forests, *Ecology*, 71(1): 189-202.

Laughlin, D.C., J.D. Bakker, M.T. Stoddard, M.L. Daniels, J.D. Springer & C.N. Gildar, 2004. Toward reference conditions: Wildfire effects on flora in an old-growth ponderosa pine forest, *Forest Ecology and Management*, 199(1): 137-152.

Law, B.E., O.J. Sun, J. Campbell, S. van Tuyl & P.E. Thornton, 2003. Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of ponderosa pine, *Global Change Biology*, 9(4): 510-524.

Lynch, A.H. & W. Wu, 2000. Impacts of fire and warming on ecosystem uptake in the boreal forest, *Journal of Climate*, 13(13): 2334-2338.

Mbow, C., K. Goita & G.B. Benie, 2004. Spatial indices and fire behavior simulation for fire risk assessment in savannah ecosystems, *Remote Sensing of Environment*, 91: 1-13.

McDaniel, J., 2007. Calculated risk, *Wildfire*, 16(2): 18–25.

Mutlu, M., S.C. Popescu & K. Zhao, 2008. Sensitivity analysis of fire behavior modelling with LIDAR-derived surface fuel maps, *Forest Ecology and Management*, 256(3): 289-294.

Nyatondo, U.N., 2010. Fire spread modeling in Majella National Parks, Italy. Master of Science, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, 91 pp.

Parresol, B.R., J.H. Scott, A. Andreu, S. Prichard & L. Kurth, 2012. Developing custom fire behavior fuel models from ecologically complex fuel structures for upper Atlantic Coastal Plain forests, *Forest Ecology and Management*, v. 273, p. 50-57. 10.1016/j.foreco.2012.01.024.

Perry, G.L.W., 1998. Current approaches to modeling the spread of wildland fire: A review, *Progress in Physical Geography*, 22: 222-245.

Pierce, J.L., G.A. Meyer & A.J. Timothy Jull, 2004. Fire-induced erosion and millennial-scale climate change in northern ponderosa pine forests, *Nature*, 432(7013): 87-90.

Rothermel, R.C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah. Research Paper, INT-115.

Salis, M., 2007. Fire Behavior simulation in Mediterranean Maquis using FARSITE (Fire Area Simulator), PhD Doctoral Thesis, Universita' Degli Studi Di Sassari, 166 pp.

Scott, J. & R. Burgan, 2005. Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO. 80 pp.

Sibanda, C., 2011. Modeling forest fire behavior and carbon emission in the Ludikhola Watershed, Gorkha District, Nepal, Master of Science (Geo-information Science and Earth Observation, Specialization: Natural Resource Management), Faculty of Geo-information Science and Earth Observation of the University of Twente, Enschede, The Netherlands, 70 pp.

Wu, Z.W., H.S. He, Y. Chang, Z.H. Liu & H.W. Chen, 2011. Development of customized fire behavior fuel models for boreal forests of northeastern China, *Environmental Management*, 48: 1148–1157.

Predicting forest fire spread using fire behavior model (Case study: Malekroud Forest-Siahkal)

R. Jahdi[1], A. A. Darvishsefat[2*], and V. Etemad[3]

[1] Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran
[2] Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran
[3] Assistant Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran

(Received: 10 March 2013; Accepted: 9 July 2013)

Abstract

In recent years there have been many fires in Iranian Northern forests. Knowledge and prediction of forest fire behavior and spread will help effectively fire control management. FARSITE Fire Area Simulator is used to simulate and study the forest fire behavior that occurred in Malekroud in Siahkal Forests with an area of 24 hectare, in December 2010 that lasted 15 hours. Input variables of the model consist of three groups: fuel, topography, and weather conditions. The area and intensity of wildfires is strongly dependent upon the spatial variability and type of fuels. In this study, map of major components of surface fuels such as vegetation type, canopy cover, fuel density and litter load was prepared during fieldwork in November 2012. Topographic data of the area were derived from the 1: 25,000 scale topographic digital maps. The weather data were received from the meteorological reports collected at the closest weather station. The observed fire scar map was GPS-surveyed a year after wildfires occurred and was used as the ground truth map (geo-based) to assess the capability of the simulator. Based on the results, 42% of the burnt area is correctly simulated during the relevant time. It is expected that by considering spatially varying wind data and appropriate custom fuel models could improve the simulations.

Keywords: FARSITE Fire Area Simulator, Fuel, Siahkal Forest, Topography, Weather.

[*]Corresponding author Tel: +982632223044 Email: adarvish@ut.ac.ir