

شبیه‌سازی رفتار آتش با استفاده از مدل آتش FlamMap در برنامه Arcfuels (مطالعه موردی جنگل کاری‌های تخسّم در استان گیلان)

مسعود امین املشی^{۱*}، مهرداد قدس خواه^۲، امیر اسلام بنیاد^۳، حسن پوربابایی^۴، مصطفی جعفری^۴ و وحید غلامی^۲

*۱- نویسنده مسئول، استادیار، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گیلان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران، پست الکترونیک: msd_amin@yahoo.com

۲- استادیار، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران

۳- استاد، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران

۴- دانشیار، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۵/۲۷

چکیده

با شناسایی مدل‌های سوخت و به دنبال آن شناخت رفتار آتش می‌توان اسباب لازم را در مدیریت مهار و کنترل آتش فراهم کرد. هدف از این تحقیق، بررسی رفتار آتش در جنگل‌کاری‌های کاج تدا در روستای تخسّم در استان گیلان بود که به‌وسیله مدل آتش FlamMap از برنامه Arcfuels ارزیابی شد. مواد سوختنی از خط نمونه Brown و از روش FLM و با استفاده از نمونه‌هایی که به شکل تصادفی منظم انتخاب شدند، برآورد شد. فایل سیمای منظر با استفاده از نقشه‌های شیب، جهت، ارتفاع، مدل سوخت و تاج‌پوشش ساخته شد. سپس لایه رطوبت سوخت محاسبه شده و لایه‌های آب و هوا و باد تهیه شده از ایستگاه سینوپتیک شهرستان رشت به مدل آتش معرفی شدند. با انتخاب لکه آتش‌سوزی، گستره آتش و بعضی دیگر از نقشه‌های رفتار آتش توسط مدل آتش، شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که مدل FlamMap با بیش‌برآورد ۱/۳۵ هکتار و کم‌برآورد ۰/۵۴ هکتار و با ضریب کاپا ۰/۸۳ از اعتبار بالایی در ارزیابی آتش‌سوزی منطقه مورد پژوهش برخوردار بود.

واژه‌های کلیدی: رفتار آتش، گیلان، مدل آتش، مدل سوخت

مقدمه

گردد (Koustias & Karteris, 2000). Martinez و همکاران (۲۰۰۹) به نقل از FAO (۲۰۰۷) فعالیت‌های بشر را مسئول بسیاری از آتش‌سوزی‌ها در جنگل‌های سرتاسر جهان اعلام می‌کنند. بر اساس مدل‌سازی تغییرات آب‌وهوایی جهان، دانشمندان نشان داده‌اند که در دهه‌های آینده، وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های جهان افزایش خواهد یافت (Cannon & De Graff, 2009)، که خود توجه بیشتر

آتش می‌تواند آغازی بر تغییرات در ترکیب، ساختار و الگوی پراکنش پوشش گیاهی در چشم‌انداز مناظر باشد (Beyers et al., 2005). هر ساله تعداد زیادی آتش‌سوزی در مناطق جنگلی رخ می‌دهد که در نتیجه آن هزاران هکتار جنگل سوخته می‌شوند؛ از این رو آتش می‌تواند به‌منزله یکی از عوامل عمده تخریب اکوسیستم‌های جنگلی محسوب

شبیه‌سازی رفتار آتش با استفاده از مدل ...

بررسی امکان شرایط آتش به سایر نقاط از جمله مناطق شهری را مورد مطالعه قرار دادند.

Jahdi (۲۰۱۵) در شبیه‌سازی رفتار آتش، مساحت آتش‌سوزی در جنگل‌های یکه برماق و قرنگی جنگل را در استان گلستان با استفاده از دو مدل آتش Farsite و FlamMap مقایسه کرد؛ نتایج وی نشان داد که مدل FlamMap با اندکی اختلاف نسبت به مدل Farsite دقت بیشتری در شبیه‌سازی گسترش آتش دارد.

جنگل‌کاری‌های سوزنی‌برگ در سراوان و لاکان شهرستان رشت به دلیل سهولت دسترسی و حساسیت گونه‌های سوزنی‌برگ به آتش از جمله مهمترین مناطق آتش‌سوزی در استان گیلان است که برای کنترل آن لازم است در این مناطق، تحقیقات مناسبی برای شناخت رفتار آتش صورت گیرد. در این صورت، گسترش آتش و زمان رسیدن آتش به نقاط مختلف قابل پیش‌بینی بوده و برنامه‌ریزی در جهت ممانعت و کاهش گسترش آتش امکان‌پذیر خواهد بود. بنابراین هدف از این تحقیق ساخت نقشه شبیه‌سازی شده گسترش آتش و به دنبال آن دیگر نقشه‌های رفتار آتش توسط مدل آتش FlamMap در الحاقیه Arcfuels و کارایی این مدل در ارزیابی آتش است.

مواد و روشها

برنامه Arcfuels

Arcfuels یکی از الحاقیه‌های ArcGis و یک برنامه کارا و توسعه یافته در مدیریت مواد سوختنی و سیستم‌های ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل است که از طریق یک نوار ابزار سفارشی در ArcMap اجرا می‌شود. این برنامه مدل‌های مختلف آتش را دربرمی‌گیرد و به علت توانایی آن در ارزیابی ضریب‌های تعدیل در سطوح مختلف آتش‌سوزی و تعیین مکان‌های مناسب در تیمارهای ماده سوختنی، نقش مهمی در برنامه مدیریت منابع طبیعی در جهت ممانعت و کاهش آتش‌سوزی دارد (Vaillant et al., 2013). FlamMap از جمله مدل‌های آتش است که توسط این برنامه

به مقوله آتش و شناخت درست از رفتار آتش را طلب می‌کند. نرم‌افزارهای مختلفی برای مدل‌سازی رفتار آتش ساخته شده که از جمله می‌توان به مدل آتش Farsite، FlamMap، BehavePlus و غیره اشاره کرد. الحاقیه Arcfuels که در این پژوهش به سیستم ArcGis معرفی شده است برای مدیریت مواد سوختنی و سیستم‌های ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل به‌کار گرفته می‌شود و این توانایی را دارد که بیشتر مدل‌های آتش را پشتیبانی کند. به گفته Green و همکاران (۱۹۹۵) سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) در طرح‌ریزی و اداره درست مدیریت اکوسیستم با به هم پیوستن اطلاعات و هماهنگ کردن شرایط مختلف، ارزیابی آینده را امکان‌پذیر می‌سازند.

Crouse (۲۰۰۵) با استفاده از مدل آتش FlamMap رفتار آتش را در بخش‌هایی از جنگل‌های شمال Arizona شبیه‌سازی کرد، نتایج وی نشان داد که در نتیجه افزایش سرعت باد شدت آتش‌سوزی‌ها زیاد می‌شود. Ager و همکاران (۲۰۰۷) در جنگل‌های مرکزی ایالت اورگان آمریکا در مساحتی برابر ۷۰۲۴۵ هکتار، که زیستگاه گونه‌های نادر و از جمله جغد خال‌خال است، به‌منظور از دست رفتن زیستگاه این پرندگان بر اثر آتش‌سوزی با استفاده از مدل آتش‌سوزی Flammap مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که زیستگاه جغد خالدار در اثر آتش‌سوزی در تیمارهای مختلف ماده سوختنی دستخوش تغییر می‌شود؛ اگر مقدار ماده سوختنی به میزان ۲۰ درصد کاهش یابد، احتمال تخریب زیستگاه این پرنده توسط آتش ۴۴ درصد کاهش می‌یابد.

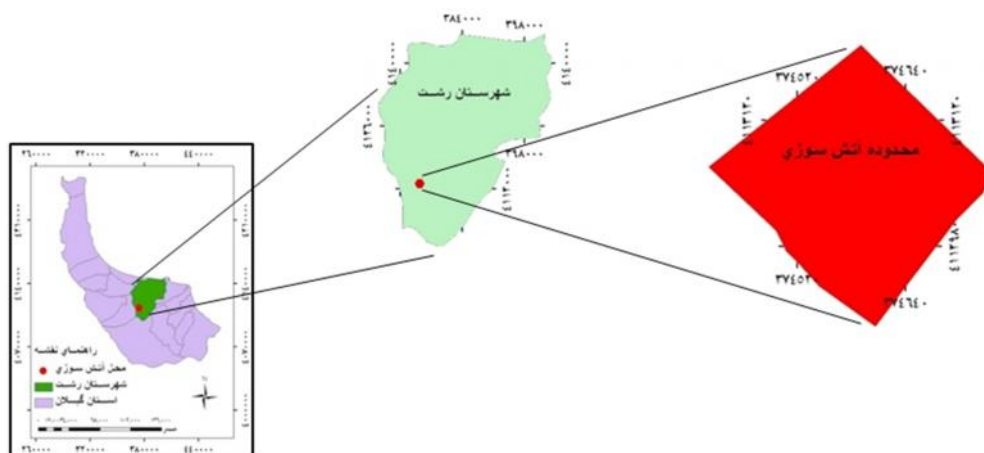
Parresol و همکاران (۲۰۱۲) از مدل‌های آتش FlamMap و Farsite برای تجزیه رفتار آتش در سواحل آتلانتیک استفاده کردند و رفتار آتش با ویژگی‌هایی مانند رطوبت سوخت و شدت باد در ساختار جنگل‌های این ناحیه شبیه‌سازی شد که نتایج آن پذیرفتنی بود. Platt و همکاران (۲۰۱۱) آتش بالقوه در اراضی طبیعی اطراف شهر کلورادو آمریکا را با استفاده از مدل آتش FlamMap برای

حدود پنج هکتار از این جنگل‌کاری‌ها در آتش سوخت (شکل ۱). در توده جنگل‌کاری کاج تدا نوارهایی به عرض تقریبی ۱۵ متر عاری از جنگل‌کاری به چشم می‌خورد که پوشش درختی آن احتمالاً برای زادآوری طبیعی و یا به‌عنوان آتش‌رُ قطع شده است؛ بنابراین علاوه بر توده‌های کاج تدا، پوشش‌هایی در سطوح نواری شکل از گونه‌های علفی متراکم سرخس عقابی (*Pteridium aquilinum*) و آقظی (*Sambucus ebulus*) و نیز گونه‌های علفی پراکنده بندواش (*Paspalum distichum*)، علف هفت‌بند (*Polygonum sp.*)، درمنه (*Artemisia annua*) و تمشک (*Rubus sp.*)، در منطقه به چشم می‌خورند. البته مناطق جنگلی مخروطه با گونه‌های بلوط (*Quercus castaneifolia*) و تمشک نیز در بخش‌های مختلفی از جنگل‌کاری این ناحیه وجود دارند.

پشتیبانی می‌شود، در این پژوهش از گزینه MTT (حداقل زمان حرکت) آن برای شبیه‌سازی رفتار آتش استفاده شد.

منطقه مورد مطالعه

رشت با آب و هوای معتدل خزری با میانگین سالانه بارندگی ۱۳۵۹ میلی‌متر و با میانگین سالانه رطوبت نسبی ۸۲ درصد، با دمای میانگین بیشینه سالانه ۲۱ و کمینه ۱۱ درجه سانتی‌گراد، جنگل‌کاری‌های مختلفی از گونه‌های سوزنی‌برگ را در خود جای داده است. جنگل‌کاری تخسَم با گونه کاج تدا (*Pinus taeda*) در لاکان رشت در سال ۱۳۷۱ در موقعیت جغرافیایی ۱۸° ۰۹' ۳۷" طول شرقی و ۳۵° ۴۹' عرض شمالی و در ارتفاع ۷۰ متر از سطح دریا و در منطقه مسطح و بدون شیب با درختانی در فاصله‌های ۳×۳ متر انجام شد. در ابتدای مرداد ۱۳۹۲ مساحتی در



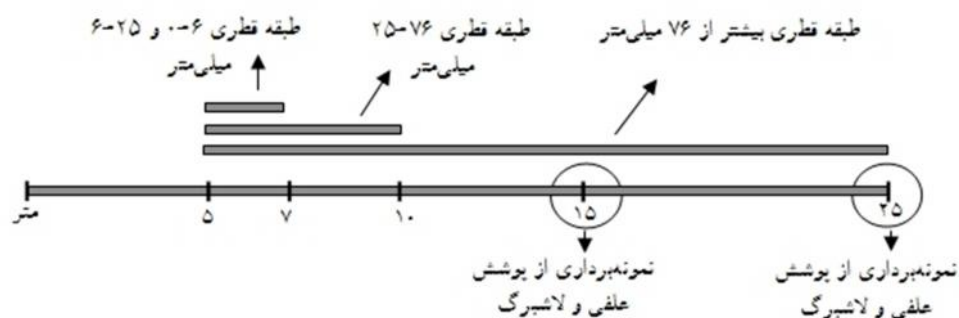
شکل ۱- محدوده آتش‌سوزی و منطقه مورد مطالعه در نقشه استان گیلان

سوختنی (FLM) که یکی از روش‌های متداول برآورد مقدار ماده سوختنی است (شکل ۳) انجام شد (Lutes & Keane, 2006).

روش تحقیق

آماربرداری برای تعیین مقدار ماده سوخت سطحی از طریق خط‌نمونه Brown (شکل ۲) و از روش مقدار ماده

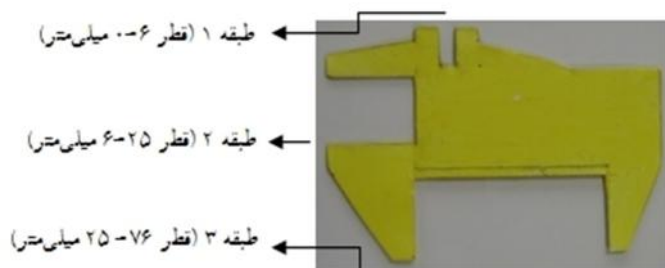
شبیه‌سازی رفتار آتش با استفاده از مدل ...



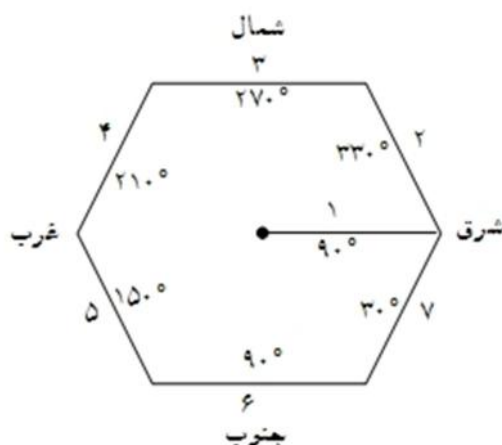
شکل ۲- خط‌نمونه Brown (Lutes & Keane, 2006)

چهار طبقه قطری شامل طبقه قطری یک (۰-۶ میلی‌متر)، طبقه قطری دو (۶-۲۵ میلی‌متر)، طبقه قطری سه (۲۵-۷۶ میلی‌متر) و طبقه قطری چهار (بیشتر از ۷۶ میلی‌متر) مشخص شده‌اند (Scott, 2012).

در روش FLM دو اصل برای اندازه‌گیری وجود دارد؛ اول اینکه سه خط‌نمونه از مجموع هفت خط‌نمونه حتماً باید برداشت شوند، دوم آنکه از هر قطعه نمونه‌برداری باید حداقل ۱۰۰ نمونه (قطعات چوبی افتاده روی زمین) اندازه‌گیری شود (Lutes & Keane, 2006).



شکل ۴- به سوخت‌سنج طراحی شده توسط مؤلف



شکل ۳- قطعه نمونه‌برداری

به روش FLM (Lutes & Keane, 2006)

بر روی هر خط‌نمونه در فاصله‌های ۱۵ و ۲۵ متری دو قطعه نمونه کوچک به ابعاد 1×1 متر برای جمع‌آوری پوشش علفی و لاشبرگ انتخاب شد (شکل ۲)؛ در پوشش علفی کم، تمام پوشش علفی برداشت و توسط ترازوی رقومی در محل اندازه‌گیری شد. در بعضی از قطعات نمونه با پوشش علفی متراکم معمولاً یک چهارم قطعه نمونه با فرض از قبل مشخص شده برای انتخاب قطعه نمونه (دومین قطعه نمونه در سمت راست مسیر حرکت خط‌نمونه)، انتخاب و پوشش علفی آن برداشت و وزن شد. همچنین از عمق لایه‌های بالایی و زیرین پوشش لاشبرگ با خط‌کش معمولی و در چهار گوشه هر قطعه نمونه اندازه‌گیری به عمل آمد.

برای اندازه‌گیری مقدار ماده سوخت چوبی مرده از وسیله‌ای به نام go/no go gauge که به علت راحتی در اندازه‌گیری سوخت از آن به‌عنوان به‌سوخت‌سنج یاد می‌کنیم، استفاده شد. مطابق شکل چهار تمام مقاطع چوبی در محل تقاطع با متر نواری یا طناب توسط به‌سوخت‌سنج اندازه‌گیری می‌شوند (Brown, 1974; Brown et al., 1982). باقی‌مانده چوب‌های افتاده و مرده در کف جنگل در

و ضخامت ماده سوختنی برای تعیین نسبت سطح به حجم (SAV) مواد سوختنی با استفاده از کولیس دیجیتال (رقومی) و نیز کاغذ شطرنجی به تفکیک برای مواد سوختنی چوبی و علفی انجام شد (Salis, 2007).

$$FMC = \frac{M_{wet} - M_{dry}}{M_{dry}} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در این رابطه M_{wet} و M_{dry} به ترتیب وزن ماده سوختنی قبل و بعد از خشک شدن است. برای تعیین مقدار سوخت چوبی (وزن باقی مانده چوبی افتاده)، از رابطه ۳ استفاده شد (Nalder et al., 1999):

$$W_j = \frac{\pi^2 \times s \times n \times d^2}{8 \times L} \quad \text{رابطه ۳}$$

که W_j وزن قطعات چوبی در خطنمونه j ، S وزن مخصوص چوب، L طول هر خطنمونه، d میانگین قطر قطعه چوبی و n تعداد قطعات چوبی است.

ساخت مدل سوخت

دو مجموعه جداگانه از مدل‌های سوخت استاندارد آتش برای استفاده در سیستم‌های مدل‌سازی رفتار آتش در دسترس هستند. ۱۳ مدل سوخت Anderson (۱۹۸۲) و ۴۰ مدل سوخت Scott و Burgan (۲۰۰۵)، که امروزه برای ساخت انواع مدل‌های سوخت معمولاً بصورت توصیفی و با توضیحات ماده سوختنی تهیه شده (مقدار ماده سوختنی، مقدار SAV و ...)، بیشتر از مدل‌های سوخت Scott و Burgan (۲۰۰۵) استفاده می‌شود. برای دقت در انتخاب درست مدل سوخت، می‌توان از رابطه ۴ (Noonan-Wright et al., 2013) نیز استفاده کرد.

برای تعیین تعداد قطعات نمونه برداری از کل منطقه ۲۵۳ هکتاری مورد پژوهش که محوطه آتش‌سوزی نیز در آن قرار دارد، ابتدا تعدادی خطنمونه بطور تصادفی انتخاب شده و پس از اندازه‌گیری از قطعات چوبی افتاده و مشخص کردن انحراف معیار نمونه‌های چوبی و با قبول اشتباه آماربرداری هشت درصد (Zobeiri, 2002)، تعداد ۳۱ قطعه نمونه برداری با مجموع ۱۴۲ خطنمونه با استفاده از رابطه ۱ مشخص گردید. قطعات نمونه سپس با شبکه آماری مناسب (۴۰۰×۲۰۰ متر) در ArcGis تهیه و مشخص شدند. با داشتن موقعیت جغرافیایی هر قطعه نمونه، با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) قطعات نمونه در عرصه مشخص و عملیات آماربرداری از آنها انجام شد.

$$n = \frac{t^2 s_x^2}{e^2} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن n تعداد خطنمونه، e مقدار خطا و t جدول استیودنت است.

عملیات آزمایشگاهی

از مجموع نمونه‌های مواد سوختنی حمل‌شده به آزمایشگاه از ماده سوختنی چوبی پس از جداسازی در طبقه‌های مختلف قطری، ۲۰ درصد و از ماده سوختنی علفی نیز با تفکیک پوشش گیاهی به همین میزان برداشت شد (Salis, 2007) و با ترازوی دیجیتال تا دقت یک هزارم وزن شد، سپس نمونه‌ها در داخل ظروف آلومینیوم در آون به مدت ۲۴ ساعت در ۸۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند (Zahn & Henson, 2011)؛ پس از خروج مواد سوختنی از آون مواد سوختنی دوباره وزن شده تا رطوبت ماده سوختنی برآورد شود (رابطه ۲) (Maffei & Menenti, 2012). اندازه‌گیری از طول، قطر، سطح، محیط

$$DI = 0.25 \left(\frac{SAV_{custom} SAV_{fd}}{405.2} \right)^2 + 0.25 \left(\frac{BD_{custom} BD_{fd}}{0.3992} \right)^2 + 0.5 \left(\frac{FFL_{custom} FFL_{fd}}{3051} \right)^2$$

اعتبارسنجی مدل

از ضریب کاپا برای اعتبارسنجی و صحت نقشه‌های شبیه‌سازی شده استفاده شد. ضریب کاپا آماره غیر پارامتریک است که برای اندازه‌گیری میزان هم‌پوشانی بین نقشه‌های شبیه‌سازی شده و نقشه واقعی استفاده می‌شود (Jenness & Wynne, 2005). برای برآورد ضریب کاپا، از ماتریس خطای حاصل بین پیکسل‌های منطقه آتش‌سوزی واقعی و شبیه‌سازی شده استفاده می‌شود. در ماتریس خطا داده‌های واقعی آتش‌سوزی (پیکسل‌ها) در سطر جدول و داده‌های شبیه‌سازی شده در ستون آن نمایش داده می‌شوند. ضریب کاپا دارای ارزش صفر تا یک است؛ که یک بیانگر هم‌خوانی کامل بین نقشه واقعی و نقشه شبیه‌سازی شده است (رابطه ۵).

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \times X_{+i})}{N^2 \sum_{i=1}^r (X_{i+} \times X_{+i})} \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن، r تعداد سطرها، X_{ii} تعداد مشاهدات در سطر i و ستون i ، X_{i+} کل مشاهدات حاشیه‌ای سطر i ، X_{+i} کل مشاهدات حاشیه‌ای ستون i و N تعداد کل مشاهدات است.

که DI مقدار اختلاف مدل سوخت استاندارد و مدل سوخت منطقه، SAV_{custom} نسبت سطح به حجم تهیه شده، SAV_{fd} نسبت سطح به حجم استاندارد، BD_{custom} نسبت جرم به حجم تهیه شده، BD_{fd} نسبت جرم به حجم استاندارد، FFL_{custom} مقدار سوخت خوب (ریز) برآورد شده و FFL_{fd} مقدار سوخت خوب (ریز) استاندارد است.

شبیه‌سازی رفتار آتش در مدل

داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی رفتار آتش، فایل سیمای منظر (LCP) است که برای آتش‌سوزی‌های سطحی حداقل از پنج لایه شیب، جهت، ارتفاع، مدل سوخت و تاج پوشش ساخته می‌شود. تمام این لایه‌ها برای معرفی باید به فرمت ASCII تبدیل شوند. لایه‌های رطوبت ماده سوختنی، آب‌وهوا و باد نیز باید به فرمت متنی به مدل معرفی شوند. ساخت فایل (Shapfile) نقطه شروع آتش‌سوزی، دیگر لایه مورد نیاز برای شروع شبیه‌سازی رفتار آتش است.

جدول ۱- نتایج ماده سوختنی

مدل سوخت	عمق بستر ماده سوختنی (cm)	مقدار SAV (1/cm)			تیپ ماده سوختنی	مقدار ماده سوختنی زنده (t/ha)		مقدار ماده سوختنی مرده (t/ha)			پوشش منطقه
		چوبی	علفی	1hrD		چوبی	علفی	100hr	10hr	1hr	
TI4	۱/۹۵	۹۹	۹۹	۱۱	ثابت	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۴۸	۱/۳۰	۰/۲۱	جنگل‌کاری
GR3	۲۰	۹۹	۲۳	۱۵	پویا	۰/۰۰	۱/۸۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۵۰	پوشش علفی (تنک)
GR8	۱۰۷	۹۹	۲۵	۱۵	پویا	۰/۰۰	۱۵/۳۷	۰/۰۰	۰/۷۷	۰/۶۳	پوشش علفی (متراکم)
SH6	۹۰	۹۹	۱۹	۱۵	ثابت	۰/۰۰	۳/۱۰	۰/۰۰	۱/۶۰	۰/۵۲	جنگل مخروطی

D=ماده سوختنی مرده، ۹۹=اشاره به عدم وجود ماده سوختنی است. hr=واحد طبقه‌بندی ماده سوختنی مرده، TI=Timber Litter

SH=Shrubs, GR=Grass

جدول ۲- نتایج رطوبت ماده سوختنی

نوع پوشش	%1hrD	%10hrD	%100hrD	علفی %	چوبی %
جنگل کاری	۹	۱۰	۱۰	۰	۰
پوشش علفی (تنک)	۹	۰	۰	۹۸	۰
پوشش علفی (متراکم)	۸	۹	۰	۴۰	۰
جنگل مخروبه	۹	۱۰	۰	۹۸	۰

نتایج

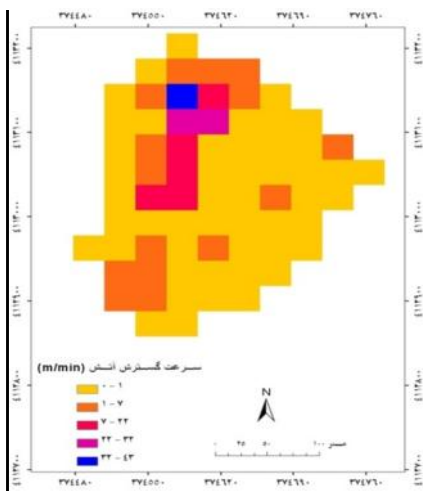
داده شده است که تطابق و هم‌پوشانی زیادی بین نقشه حاصل از مدل آتش FlamMap و آتش‌سوزی واقعی وجود دارد.

الف- خصوصیات ماده سوختنی و تهیه مدل سوخت استاندارد منطقه

تجزیه و تحلیل ماده سوختنی جمع‌آوری شده از عرصه و نیز نتایج حاصل از عملیات آزمایشگاهی در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

ب- تهیه نقشه سیمای سرزمین (لایه LCP)

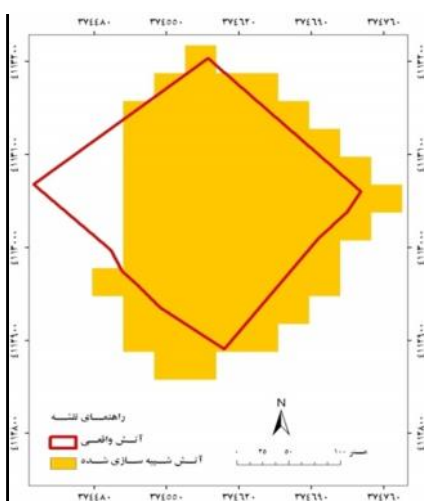
نتایج چهار مدل سوخت به نام TL4 (جنگل همراه با لاشیرگ)، GR3 و GR8 (پوشش‌های علفی)، SH6 (پوشش بوته‌ای) و سه مدل سوخت فاقد ماده سوختنی شامل NB1 (اراضی شهری)، NB3 (اراضی کشاورزی) و NB9 (اراضی بدون پوشش) را در این ناحیه جنگلی مشخص کرد.



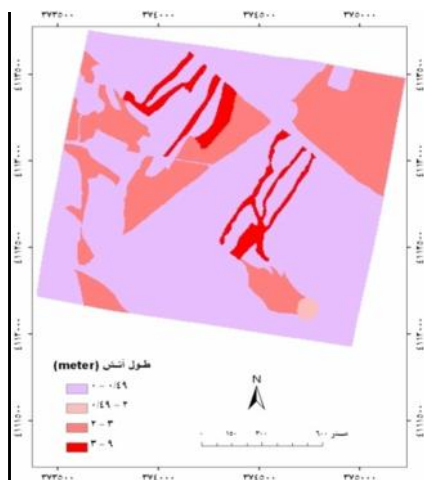
شکل ۵- شبیه‌سازی شده درجه گسترش آتش

پ- نقشه‌های شبیه‌سازی رفتار آتش

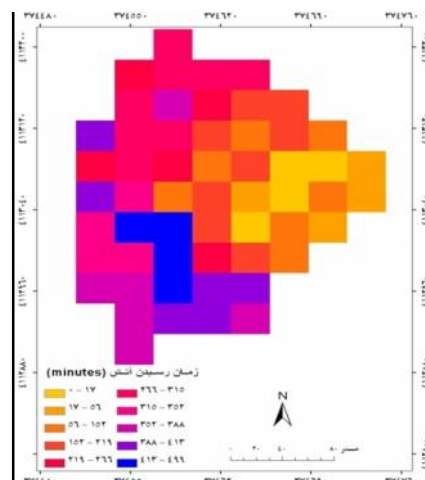
پس از تهیه فایل LCP، داده‌های آب‌وهوا، باد، رطوبت سوخت و داده‌های مربوط به آتش واقعی منطقه از جمله زمان و مدت آتش‌سوزی، سطح و موقعیت آتش‌سوزی که از یگان حفاظتی منابع طبیعی شهرستان رشت تهیه شده بود به مدل آتش معرفی و به دنبال آن نقشه سطح گسترش آتش و سایر نقشه‌های رفتار آتش تهیه شد. شکل ۵ درجه گسترش آتش را نشان می‌دهد که در آن سرعت پخش آتش در حداقل خود بین صفر تا یک متر است که در بیشتر سطوح منطقه با همین سرعت گسترده شده و حداکثر آن ۴۳ متر در سطح محدودی از منطقه دیده می‌شود. در شکل ۶ نقشه سطح گسترش آتش واقعی و شبیه‌سازی شده نشان



شکل ۶- مقایسه سطح آتش‌سوزی واقعی و شبیه‌سازی شده



شکل ۸- نقشه شبیه‌سازی شده طول آتش



شکل ۷- نقشه شبیه‌سازی شده زمان رسیدن آتش

در جدول ۳ ماتریس خطا و در جدول ۴ اعتبار نقشه شبیه‌سازی شده گستره آتش توسط مدل آتش FlamMap، با بیان مقدار ضریب کاپا و به همراه برآورد مقدار واقعی، بیش‌برآورد و کم‌برآورد بیان شده است.

شکل ۷ مدت زمان رسیدن آتش تا نقاط مختلف عرصه را مشخص می‌کند که حدود ۵۰۰ دقیقه است. شکل ۸ نقشه شبیه‌سازی شده طول شعله‌های آتش را نشان می‌دهد که بین صفر (اراضی مسکونی و بدون سوخت) تا ۰/۴۹ متر (مناطق با مقادیر سوخت کم) متغیر است و بیشترین طول آتش نیز (بین سه تا نه متر) در پوشش‌های سرخس عقابی دیده می‌شود.

جدول ۳- ماتریس خطا برای برآورد دقت ارزیابی

		مقدار واقعی	
		+	-
مقدار پیش‌بینی شده	+	۵۳	۱۵
	-	۶	۲۷۴۰

جدول ۴- صحت گسترش آتش شبیه‌سازی شده با آتش واقعی در تخسّم

K	(ha) c	(ha) b	(ha) a	آتش واقعی (هکتار)	آتش شبیه‌سازی شده (هکتار)
۰/۸۳	۰/۵۴	۱/۳۵	۴/۷۷	۵/۳	۶/۴۸

K= ضریب کاپا = c کم‌برآورد = b بیش‌برآورد = a برآورد واقعی

بحث

۲۲ درصد بیشتر از مساحت آتش‌سوزی واقعی بود. ۴/۷۷ هکتار از مساحت آتش شبیه‌سازی شده با آتش واقعی کاملاً هم‌پوشانی داشت و بیانگر مقدار آتش واقعی پیش‌بینی شده

مساحت آتش‌سوزی واقعی ۵/۳ هکتار بود که مدل آتش این مساحت را ۶/۴۸ هکتار پیش‌بینی کرد، که تقریباً

کرده‌اند. Parresol و همکاران (۲۰۱۲) مدل‌های آتش FlamMap و Farsite را در حال حاضر بیشتر از سایر مدل‌ها مانند Nexus، Behave، Fofem برای تجزیه و تحلیل رفتار آتش عنوان کرده‌اند. Platt و همکاران (۲۰۱۱) نیز کاربرد مدل آتش FlamMap را برای جنگل‌های مرکزی شمال کلرادو آمریکا مناسب می‌دانند.

زمان آتش‌سوزی شبیه‌سازی شده (۴۹۹ دقیقه) در این پژوهش مناسب‌ترین زمان با مدت زمان واقعی آتش‌سوزی بود که از ساعت ۱۵ تا ۲۳ ادامه داشت. بیشترین درجه گسترش آتش در شعله‌هایی با سرعت کمتر از یک متر دیده می‌شود (شکل ۵) که بیانگر طولانی بودن مدت آتش در منطقه است. طول شعله‌های آتش‌سوزی با مدل‌های سوخت منطقه آتش‌سوزی کاملاً مطابقت دارد (شکل ۸). مدل سوختی که با سرخس عقابی معرفی شده است (GR8) در گروه سوخت‌های خوب (ریز) قرار دارد و طول شعله در این پوشش‌ها بسیار بلند است (Scott & Burgan, 2005)؛ و FlamMap آن را بین ۳ تا ۹ متر شبیه‌سازی کرده است. پوشش بوته‌ای تمشک (SH6) نیز شعله‌های نسبتاً بلندی دارد که مدل آتش حداکثر این شعله‌ها را تا سه متر پیش‌بینی و شبیه‌سازی کرده است که از این مدل سوخت در واقعیت انتظار می‌رود (Scott & Burgan, 2005). طول شعله آتش از جمله نقشه‌های شبیه‌سازی شده است که مدیران را برای مدیریت مبارزه و کنترل آتش راهنمایی می‌کند. مناطقی با پوشش سرخس عقابی که طول شعله‌های آن بسیار بلند است، به گفته Andrews (۲۰۰۹) می‌توانند سبب آتش‌سوزی تاجی شوند و مبارزه با این آتش‌سوزی‌ها از سر آتش بی‌نتیجه است.

منابع مورد استفاده

- Ager, A.A., Vaillant, N.M., Finney, M.A. and Preisler, H.K., 2012. Analyzing wildfire exposure and source-sink relationships on a fire prone forest landscape. *Forest Ecology and Management*, 267: 271-283.
- Ager, A.A., Finney, M.A., Kerns, B.K. and Maffei, H., 2007. Modeling wildfire risk to northern spotted owl (*Strix occidentalis Caurina*) habitat in central

توسط مدل بود. آتش پیش‌بینی شده توسط مدل ۱/۳۵ هکتار بیشتر از آتش واقعی بود که بیش برآورد مدل مشهور است و سطحی برابر ۰/۵۴ هکتار نیز از آتش‌سوزی واقعی پیش‌بینی نشد. کارایی مدل در این پیش‌بینی توسط ضریب کاپا مورد ارزیابی قرار گرفت که مقدار آن برابر ۰/۸۳ بود. با عنایت به اینکه حداکثر مقدار ضریب کاپا یک است، برآورد آماری مدل از آتش‌سوزی نزدیک به واقعیت است و به این ترتیب مدل توانسته است آتش را تقریباً به شکل واقعی آن شبیه‌سازی کند. در مورد دقت شبیه‌سازی آتش‌سوزی توسط مدل آتش FlamMap، می‌توان به پژوهش‌های Ager و همکاران (۲۰۱۲) اشاره کرد که سطوح آتش‌سوزی‌های بزرگ گذشته را که بین سالهای ۱۹۴۹ تا ۱۹۹۰ در جنگل‌های ایالت اورگان آمریکا اتفاق افتاده بود، با استفاده از مدل آتش Flammap شبیه‌سازی کردند؛ نتایج آنان نشان داد که مدل یادشده توانسته است این آتش‌سوزی‌ها را شبیه به آتش واقعی شبیه‌سازی کند؛ از جمله در یکی از آتش‌سوزی‌ها، ۳۷۷۹ هکتار جنگل در مدت زمان هشت ساعت سوخته بود که مدل آتش یادشده آن را ۳۲۹۵ هکتار برآورد و شبیه‌سازی کرده بود. Jahdi (۲۰۱۵) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی گسترش آتش را در پارک ملی جنگل گلستان مورد بررسی قرار داد؛ نتایج وی حکایت از آن داشت که مدل آتش FlamMap با ضریب کاپا ۰/۷۹ می‌تواند ابزار مناسبی برای پیش‌بینی رفتار آتش در این منطقه باشد. براساس تحقیقات Finney و همکاران (۲۰۱۱)، اشتباه در موقعیت لکه‌های آتش‌سوزی، مکان‌های مواد سوختنی، اطلاعات هواشناسی و غیره می‌توانند در صحت و اعتبار مدل‌های آتش نقش منفی داشته باشند و به گفته Taylor و همکاران (۲۰۱۳) شبیه‌سازی دقیق آتش‌سوزی‌های طبیعی به دلیل تأثیر عوامل متعدد زیست‌محیطی بر رفتار آتش و نیز عملیات مهار آتش مشکل است.

Opperman و همکاران (۲۰۰۶) مدل‌های آتش FlamMap، Farsite و Prometheus را برای پیش‌بینی رفتار آتش در کشورهای استرالیا و نیوزلند مناسب معرفی

- Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. 162p.
- Jenness, J., 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. Flagstaff, AZ: U.S. geological survey, Southwest Biological Science Center. 86p.
 - Koutsias, N., and Karteris, M., 2000. Burned areas mapping using logistic regression modeling of a single post-fire Landsat-5 Thematic Mapper image. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 673-687.
 - Lutes, D.C. and Keane R.E., 2006. Fuel Load (FL) sampling method. Forest Service General Technology Report, 27p.
 - Maffei, C. and Menenti, M., 2012. The potential of remote sensing measurements of canopy reflectance for the evaluation of live fuel moisture content and fire hazard mapping: 9-14. In: Spano, D., Bacciu, V., Salis, M. and Sirca, C. (Eds.). *Modeling fire behavior and risk. Supported by proterina-C Project EU Italia- Francia Marittimo Programme Press*, 260p.
 - Martinez, J., Vega-Garcia C. and Chuvieco E., 2009. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management* 90: 1241-1252.
 - Nalder, I.A., Wein, R.W., Alexander, M.E., de Groot, W.J., 1999. Physical properties of dead and downed roundwood fuels in the boreal forests of western and northern Canada. *Int. J. Wildland Fire*, 9: 85-99.
 - Noonan-Wright, E.K., Vaillant N.M. and Reiner A.L., 2013. The Effectiveness and limitations of fuel modeling using the fire and fuels extension to the forest vegetation simulatore , *Forest Science*, 60(2): 231-240.
 - Opperman, T., Gould, J., Finney, M. and Tymstra, C., 2006. Applying fire spread simulators in New Zealand and Australia: Results from an international seminar. In: Andrews, P.L.; Butler, B.W. (comps). 2006. *Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings*. 28-30 March 2006, Portland, Oregon. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado. Proceedings RMRS-P-41. pp 201-212.
 - Parresol, B.R., Scott, J.H., Andreu, A., Prichard, S. and Kurth, L., 2012. Developing custom fire behaviore fuel models from ecologically complex fuel structures for upper Atlantic coastal plain forest. *Forest Ecology and Management*, 273: 50-57.
 - Platt, R.V., Schoennagel, T., Veblen, T.T. and Sherriff, R.L., 2011. Modeling wildfire potential in residential parcels: A case study of the North-Oregon, USA, *Forest Ecology and Management* 246: 45-56.
 - Anderson, H.E, 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, UT 84401 General Technical Report INT-122 28p.
 - Andrews, P.L., (2009), The Behaveplus fire modeling system, version 5.0: variables General Technical Report RMRS-GTR-213WWW Revised. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Related Record(s) on FRAMES, 111p.
 - Beyers, J.L., Brown, J.K., Busse, M.D., DeBano, L.F., Elliot, W.J., Folliott, P.F., Jacoby, G.R., Knoepp, J.D., Landsberg, J.D., Neary, D.G., Reardon, J.R., Rinne, J.N., Robichaud, P.R., Ryan, K.C., Tiedemann, A.R. and Zwolinski, M.J., 2005. Wild land fire in ecosystems effects of fire on soil and water. United States Department of Agriculture Forest Service Rocky Mountain Research Station General Technical, 250p.
 - Brown, J.K., 1974. Handbook for inventorying downed woody material. Intermoutian Forest and Range Experiment Station, Forest Service U.S. Department of Agriculture Ogden, Utah, 24p.
 - Brown, J.K., Oberheu, R.D. and Johnston, C.M., 1982. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior west. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, General Technical Report, 48p.
 - Cannon, S.H. and De Graff, J., 2009. The increasing wildfire and post-fire debris-flow threat in Western USA, and implications for consequences of climate change: 117-190. In: Sassa, K. and Canuti, P. (Eds.), *Landslides disaster risk reduction*. Springer Verlag Berlin Heidelberg Press, 650p.
 - Crouse, J.E., 2005. Fuels and fire behavior modeling using Remotely Sensed data in the San Francisco. Master of Since (Forestry). Northern Arizona University, 91p.
 - Green, K., Finney, M., Campbell, J., Weinstein D. and Landrum V., 1995. Using GIS to predict fire behavior. *Journal of Forestry*, 9: 21-25.
 - Finney, M.A., Grenfell, I.C., McHugh, C.W., Seli, R.C., Trethewey, D., Stratton, R.D., Brittain, S., 2011. A method for ensemble wild land fire simulation. *Environmental Modeling and Assessment*, 16: 153-167.
 - Jahdi, R., 2015. Fire spread simulation using Geographic Information System (Case study: Golestan National Park). Ph.D. thesis, Department of Forestry and Forest Economic, The Faculty of

- Taylor, S.W., Woolford D.G., Dean C.B. and Martell D.L., 2013. Wildfire prediction to inform fire management: statistical science challenges. *Statistical Science*, 28(4): 586–615.
- Vaillant, N.M., Ager, A.A., Anderson, J. and Miller, L., 2013. ArcFuels User Guide and Tutorial: for Use with ArcGIS 9. General Technology Report PNWGTR- 877. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 256P.
- Zahn, S. and Henson, C., 2011. A synthesis of fuel moisture collection methods and equipment-a desk guide. U.S. Department of Agriculture Forest Service National Technology and Development Program 5100-fire management, 31p.
- Zobeiri, M. 2002. Forest Biometry. ISBN: 964-03-4524-5, Tehran University Press 2561, 411p (In Persian).
- Central Colorado front range. *Landscape and Urban Planning*, 102: 117– 126.
- Salis, M., 2007. Fire behavior simulation in Mediterranean maquis using Farsite. PhD thesis, Sassari University, Sardinia, 166p.
- Scott, J.H. and Burgan R.E., 2005. Standard fire behavior and fuel models: A comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. United States Department of Agriculture Forest Service, Rocky Mountain Research Station General Technical Report, 72p.
- Scott, J.H. 2012. Introduction to fire behavior modeling. National Interagency Fuels, Fire, & Vegetation Technology Transfer, Integrating Science, Technology and Fire Management, Wildland Fire Management Rd & A., 149p.