



"مقاله پژوهشی"

مدل‌سازی رفتار آتش‌سوزی‌های کنترل‌شده و تصادفی در جنگل‌های زاگرس شمالی با تأکید بر حجم مواد سوختی

اسما کرامت میرشکارلو<sup>۱</sup>، عباس بانج شفیعی<sup>۲</sup> و هادی بیگی حیدرلو<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد جنگلداری، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران  
۲- استاد، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، (نویسنده مسول: a.banjshafiei@urmia.ac.ir)  
۳- دکتری جنگلداری، گروه مهندسی جنگل، برنامه‌ریزی مدیریت جنگل و اندازه‌گیری‌های زمینی، دانشکده جنگل‌شناسی و مهندسی جنگل، دانشگاه براشوف، براشوف، رومانی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۴  
صفحه: ۱۲۰ تا ۱۳۷

چکیده مبسوط

**مقدمه و هدف:** رفتار، گسترش و شدت آتش‌سوزی جنگل‌ها به‌اندازه زیادی به نوع و حجم مواد سوختی و تغییرپذیری مکانی آن در یک منطقه طبیعی و همچنین توپوگرافی و اقلیم وابسته است. ارزیابی حجم مواد سوختی در تاج پوشش‌های مختلف جنگلی برای مدیریت بحران و پیشگیری از آتش‌سوزی‌های احتمالی بسیار مهم است. هدف این پژوهش تعیین مقدار و نوع مواد سوختی و رفتار حریق جنگل‌های زاگرس شمالی در شهرستان سردشت در تراکم‌های مختلف جنگلی است.

**مواد و روش‌ها:** با توجه به آمار آتش‌سوزی‌های اخیر شهرستان سردشت نسبت به انتخاب مناطق موردبررسی (نلاس و شیومه) بر اساس درصد تاج پوشش مختلف جنگل (تنک، نسبتاً انبوه و انبوه) اقدام شد. در این پژوهش از قطعه‌نمونه‌های یک مترمربعی برای اندازه‌گیری خصوصیات مواد سوختی مانند متوسط ارتفاع پوشش گیاهی، حجم سوخت یک، ۱۰ و ۱۰۰ ساعته، حجم سوخت کل و حجم و عمق لاشبرگ استفاده شد. بررسی رفتار و گسترش آتش‌سوزی نیز در دو منطقه با استفاده از مدل‌های آتش FlamMap و FARSITE با استفاده از نقشه‌های شیب، جهت، ارتفاع، مدل سوخت و تاج پوشش انجام شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد حجم سوخت کل در اراضی جنگلی موردبررسی ۳/۹ کیلوگرم در مترمربع است. همچنین بیشترین حجم سوختی یک‌ساعته در اراضی جنگلی انبوه محاسبه شد. بیشترین حجم سوختی ۱۰ و ۱۰۰ ساعته نیز در اراضی جنگلی با تاج پوشش نسبتاً انبوه مشاهده شد. محاسبه درصد محتوای رطوبتی مواد سوختی نیز نشان داد اراضی جنگلی با تاج پوشش انبوه بیشترین مقدار محتوای رطوبتی را بین اراضی جنگلی با تاج پوشش نسبتاً انبوه و تنک دارد. همچنین، مقایسه لکه حریق واقعی و نقشه گسترش آتش شبیه‌سازی‌شده در منطقه نلاس با آتش‌سوزی غیر عمد (دارای تاج پوشش تنک) با ضریب کاپای ۰/۸۳ دارای همخوانی بالایی بوده و مدل توانست توافق قابل‌توجهی با محدوده گسترش واقعی حریق داشته باشد. ضریب توافق به‌دست‌آمده در منطقه شیومه با تاج پوشش انبوه و نسبتاً انبوه به‌دلیل وقوع حریق عمدی و کنترل‌شده توافق ۰/۰۵ درصدی را نشان داد.

**نتیجه‌گیری:** این یافته‌ها نشان داد علاوه بر ویژگی‌های مواد سوختی جنگل، علت وقوع آتش‌سوزی (عمدی و کنترل‌شده یا تصادفی و غیر عمد) نیز در شبیه‌سازی مناسب رفتار و گسترش آتش مؤثر است. این نتایج می‌تواند در مبارزه با آتش‌سوزی، مدیریت بحران و در بسیاری از پژوهش‌های مربوط به بررسی رفتار آتش‌سوزی و حفاظت و مدیریت عرصه‌های جنگلی مورداستفاده قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** آتش‌سوزی جنگل، شبیه‌سازی رفتار آتش، ماده سوختی، نرخ گسترش آتش

مقدمه

امروزه پدیده آتش‌سوزی به‌عنوان یکی از گسترده‌ترین خطرات در اراضی جنگلی در نظر گرفته می‌شود (۴۵) و با میانگین سالانه شش تا ۱۴ میلیون هکتار در جهان، تهدیدی جدی برای جنگل، گیاهان (فلور) و جانوران (فون) است (۱۷). آتش‌سوزی جنگل با منشأ طبیعی یا انسانی از مهم‌ترین عوامل تخریب بوم‌سامانه‌های طبیعی به‌شمار می‌رود و نقش بسزایی در تغییر و تبدیل منظر و جانشینی پوشش گیاهی دارد (۴۱). پژوهش‌های انجام شده نشان داده‌اند که فراوانی آتش‌سوزی در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری داشته است به‌طوری‌که میانگین و واریانس مساحت سالانه سوخته شده در طول زمان به‌طور قابل‌توجهی تغییر کرده و اخیراً افزایش یافته است (۴۹).

عوامل زیادی در آتش‌سوزی مؤثر هستند از جمله کاهش بارندگی و خشک شدن هوا (۳). ترسالی نیز به سبب افزایش پوشش علفی کف جنگل موجب بروز آتش‌سوزی می‌شود. از طرف دیگر علت وقوع آتش‌سوزی، سرایت آتش از دیگر مناطق و یا توسعه اراضی کشاورزی و بی‌احتیاطی ساکنین جنگل (کشاورزان، جنگل‌نشینان، دامداران و غیره) و یا مسافری، نوع جنگل، خالص و یا آمیخته بودن آن بوم‌سامانه،

امکان دستیابی به مناطق آتش‌گرفته و مدیریت آتش از عوامل دیگر وقوع و گسترش حریق هستند (۸). این وضعیت نشان می‌دهد در سطح راهبردی باید به علل اساسی اثر مدیریت اراضی بر بوم‌شناسی آتش، ریسک آتش، پویایی ماده سوختی و چگونگی کاهش احتمال آتش‌سوزی‌های بزرگ بیشتر توجه شود (۴۴). با وجود این، هنگامی که آتش‌سوزی در حال وقوع است یک سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری با شبیه‌سازی هم‌زمان برای پیش‌بینی سریع اینکه آتش به کجا و با چه سرعتی گسترش خواهد یافت در سطح عملیاتی موردنیاز است (۳۶). این عارضه در عرصه‌های طبیعی و جنگلی به‌دلیل پیچیدگی فرایندهای تعیین‌کننده رفتار آن، حجم فراوان اطلاعات موردنیاز و نیز دشواری تهیه و جمع‌آوری آنها به‌طور کافی بررسی نشده است. طی سالیان اخیر تعداد وقوع آتش‌سوزی در اراضی جنگلی به‌دلیل نبود راهبرد مناسب مدیریت یکپارچه حریق، گسترش‌یافته و اثرهای نامطلوبی بر بوم‌سامانه‌های جنگلی داشته است (۲۶). آتش آغازی بر تغییرات در الگوی پراکنش پوشش گیاهی، ساختار و ترکیب گیاهی جنگل‌ها است (۷).

در ایران بیشتر آتش‌سوزی‌ها در فصل‌های گرم و خشک رخ می‌دهد (۳). سالیانه در ایران بیش از صدها مورد

مستقل و بدون توجه به محیط مجاور در مقیاس واحد سیمای سرزمین انجام می‌دهد (۱۹). این مدل می‌تواند آتش‌سوزی‌ها را به‌منظور ارزیابی و برنامه‌ریزی برای کاهش، اطفاء یا حمایت از راهبردهای مدیریت آتش شبیه‌سازی کند (۳۸). خروجی‌های این سامانه شناخت خوبی برای مقایسه‌های سیمای سرزمین، مثلاً آثار قبل و بعد از تیمار ماده سوختنی و برای شناسایی ترکیب‌های خطرناک توپوگرافی و ماده سوختنی ارائه می‌کند. بنابراین، به ارزیابی خطر آتش و تولید اطلاعات مفید برای مدیریت آتش و اولویت‌بندی فازهای عملیاتی کمک می‌کند (۶۴).

تحقیق‌های زیادی در زمینه مدل‌سازی رفتار و گسترش آتش در شرایط رویشگاهی مختلف در سرتاسر دنیا انجام شده است (۱۶، ۲۸، ۳۳، ۳۶، ۳۶، ۳۶، ۴۵). به‌عنوان نمونه، در پژوهشی رفتار آتش با استفاده از مدل FlamMap شبیه‌سازی شد و انواع مدل سوخت موجود با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدوری و داده‌های میدانی تعیین شدند. برای شبیه‌سازی رفتار آتش در این مدل از نقشه‌های ارتفاع، شیب و جهت استفاده شد. ادغام خروجی‌های رفتار آتش‌سوزی و شاخص خطر آتش محاسبه‌شده در این پژوهش نشان داد که بخش بزرگی از ذخیره‌گاه جنگلی، از جمله مهم‌ترین زیست‌بوم‌های آن، در برابر آتش‌سوزی بسیار آسیب‌پذیر هستند (۶۳). در پژوهشی دیگر با استفاده از شبیه‌ساز FARSITE نقشه تیپ ماده سوختنی در جنگل توشی در سیاهکل تهیه شد و رفتار آتش‌سوزی‌های سطحی پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که تیپ ماده سوختنی برای درختچه‌زارها و جنگل‌های طبیعی بلندترین طول شعله، زیادترین شدت خط آتش و بیشترین انتشار گرما در واحد سطح ارائه کرد. تیپ ماده سوختنی برای علفزارها سریع‌ترین نرخ گسترش سطحی و مدل ماده سوختنی برای جنگل‌کاری شدت آتش کمتر را ارائه کرد (۳۳). در داخل کشور بررسی‌ها در زمینه شبیه‌ساز رفتار آتش و زیست‌توده و حجم مواد سوختنی به‌ویژه در منطقه جنگلی زاگرس بسیار محدود است؛ بنابراین در شرایط جنگل‌های زاگرس هنوز شناخت کاملی از رفتار آتش، اثرهای آن و چگونگی مواجهه‌شدن با این مشکل وجود ندارد. جنگل‌های شهرستان سردشت در زاگرس شمالی از مناطق مهم و درعین‌حال نسبتاً بحرانی از نظر وقوع آتش‌سوزی و تخریب عرصه‌های جنگلی به شمار می‌رود و با توجه به موارد ذکرشده تاکنون هیچ پژوهشی درباره بررسی مقدار مواد سوختنی و رفتار آتش‌سوزی جنگل‌های این منطقه انجام نشده است. این امر، ضرورت بررسی و برنامه‌ریزی مناسب را برای این منطقه از ایران دوچندان کرده است. از این‌رو، در تحقیق پیش‌رو سعی می‌شود این مسئله با مدل‌سازی رفتاری آتش جنگل از طریق شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی واقعی رخ‌داده (عمدی و کنترل‌شده یا تصادفی و غیر عمده) در جنگل‌های سردشت در زاگرس شمالی بررسی شود. به‌طور خاص، ما در این پژوهش سعی کردیم به دو سؤال تحقیق زیر پاسخ دهیم:

۱- آیا حجم مواد سوختنی در تاج پوشش‌های مختلف جنگل‌های زاگرس یکسان است؟

۲- آیا رفتار و گسترش آتش‌سوزی‌های عمده و تصادفی در

آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع اتفاق می‌افتد و هزاران هکتار از جنگل‌ها را تخریب می‌کند. بر اساس پایگاه داده‌ای دیده‌بان جهانی جنگل (GFW) تنها در سال ۲۰۲۱، ۳۶ هزار هکتار از اراضی جنگلی ایران طعمه حریق شده است (۲۷). آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران و به‌ویژه در منطقه رویشی زاگرس همراه با دیگر عوامل مخرب، همواره این منبع با ارزش کشور را تهدید می‌کند و باعث از بین رفتن آنها می‌شود. آتش‌سوزی در جنگل‌های زاگرس ویران‌کننده است (۱۲). بر اساس پژوهش بیگی حیدرلو و همکاران (۹) طی یک دوره زمانی ۱۰ ساله، ۵۵۰ هکتار از اراضی جنگلی زاگرس شمالی در شهرستان سردشت در اثر حریق سوختند.

برآوردهای زیست‌توده و حجم مواد سوختنی در اراضی جنگلی مختلف برای مدیران منابع طبیعی در مبارزه با وقوع و گسترش حریق مهم است. حجم سوخت مقدار بالقوه گرمایی را که می‌تواند در طی سوختن و آتش‌سوزی آزاد شود تعیین می‌کند، درحالی‌که نوع و توزیع عناصر و مواد سوختنی بر قابلیت احتراق آنها تأثیر می‌گذارد. مواد سوختنی کوچک/نرم با واکنش تأخیر زمانی (time-leg) یک‌ساعته (قطر کمتر از ۶ میلی‌متر) سریع‌تر از سوخت‌های با قطر و تأخیر زمانی زیاد (۱۰ و ۱۰۰ ساعته) می‌سوزند. محتوای رطوبتی مواد سوختنی نیز بر کامل بودن احتراق تأثیر می‌گذارد (۱۰، ۳۰). شاخ و برگ زنده نسبت به مواد سوختنی خشک رطوبت بیشتری دارند و به‌راحتی نمی‌سوزند (۲۴). سوخت‌های با قطر کم نسبت به تغییرات آب‌وهوایی سریع‌تر واکنش نشان می‌دهند، به‌ویژه اگر این سوخت‌ها خشک‌شده باشند، نقش مهمی در مراحل اولیه و شروع همه آتش‌سوزی‌ها بازی می‌کنند (۶).

نیاز به اطلاعات زیست‌توده و روش‌های برآورد نیز به‌طور مکرر در پژوهش‌ها و منابع مختلف موردبحث قرار گرفته است (۵۳، ۵۱). ارزیابی پتانسیل رفتار آتش‌سوزی نیز در اراضی جنگلی مستلزم برآوردهای کمی وزن و حجم سوخت موجود بر اساس شرایط موجود بر پوشش گیاهی (زنده یا مرده) و بر اساس طبقه‌بندی اندازه آنها است. تخمین زیست‌توده مواد سوختنی برای مناطق جنگلی پیش‌نیازی برای مدیریت موفق آتش‌سوزی است زیرا موجودی کامل مواد سوختنی منطقه را برآورد می‌کند و مواد قابل‌احتراق را مورداندازه‌گیری قرار می‌دهد تا به پیش‌بینی شدت و گسترش آتش و رفتار آتش‌سوزی در انواع پوشش‌های جنگلی کمک کند (۳۰). کمی‌سازی مواد سوختنی توده با پتانسیل رفتار آتش ارتباط دارد (۱۳). رفتار آتش به بزرگی، جهت، شدت گسترش آن اشاره دارد و به شرایط محیطی شامل پوشش گیاهی (ماده سوختنی)، توپوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع) و آب‌وهوا بسیار وابسته است (۵۴).

نرم‌افزارها و مدل‌های مختلفی مانند FlamMap برای مدل‌سازی رفتار و گسترش آتش طراحی شده‌اند. FlamMap (۱۹، ۲۰) یک شبیه‌ساز تهیه نقشه و تجزیه‌وتحلیل رفتار آتش برای محاسبه مشخصات بالقوه رفتار و گسترش آتش با استفاده از داده‌های مکانی خاص هر رویشگاه مثل تیپ و شرایط و ماده سوختنی، توپوگرافی و آب‌وهوا است. در واقع این شبیه‌ساز محاسبات رفتار آتش را برای هر نقطه به‌طور

مقایسه با حریق واقعی یکسان است؟

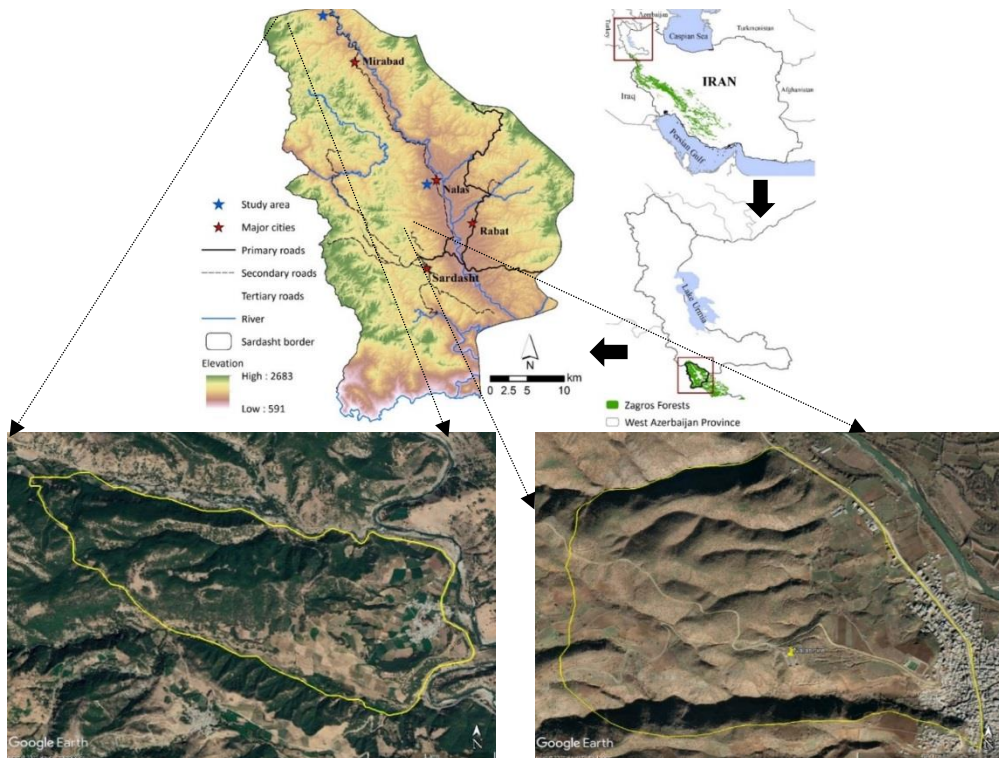
## مواد و روش ها

### مناطق مورد بررسی

برای اجرای این تحقیق و انتخاب مناطق مورد بررسی پس از استخراج آمار آتش سوزی سال های ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹ در شهرستان سردشت و با توجه به بررسی های میدانی مناطق سوخته شده و در نظر گرفتن اهداف این پژوهش، نسبت به انتخاب سه منطقه بر اساس درصد پوشش گیاهی (۱- تنک با تاج پوشش ۱۵-۱۰ درصد، ۲- نیمه انبوه با تاج پوشش ۵۰-۴۰ درصد و ۳- انبوه با تاج پوشش ۷۰-۶۰ درصد) اقدام شد تا بتوان برآوردهای زیست توده و حجم مواد سوختنی، رفتار و گسترش آتش سوزی در آنها را شبیه سازی کرد. از این رو دو منطقه "نلاس" (با طول جغرافیایی  $19^{\circ}41' 45''$  شرقی و عرض جغرافیایی  $36^{\circ}15' 47''$  شمالی) به عنوان منطقه با تاج پوشش کم با مساحت  $273/94$  هکتار و "شیومره" (با طول جغرافیایی  $38^{\circ}57' 45''$  شرقی و عرض جغرافیایی  $36^{\circ}28' 12''$  شمالی) به عنوان منطقه ای با دو تاج پوشش نسبتاً انبوه و انبوه با مساحت  $356/22$  هکتار به ترتیب با لکه های آتش سوزی  $15/5$  و یک

هکتاری انتخاب شدند (شکل ۱).

میانگین بارش سالانه منطقه  $724$  میلی متر است. میانگین حداکثر و حداقل دما در یک دوره  $30$  ساله ( $1362-92$ )، به ترتیب  $21$  و  $6$  درجه سانتی گراد است. اقلیم منطقه نیز نیمه مرطوب است (۹). بر اساس نمودار گلیاد و آمار  $35$  ساله ( $1400-1365$ ) اداره هواشناسی استان آذربایجان غربی،  $32/4$  درصد از بادها در شهرستان سردشت آرام و  $67/6$  درصد از بادها دارای سمت و سرعت هستند. باد غالب (۱۸ درصد از کل بادها) نیز شمالی است. وضعیت خاص جغرافیایی در شهرستان سردشت و به دنبال آن بارندگی های نسبتاً زیاد در این ناحیه باعث تنوع پوشش گیاهی آن شده است. به طور کلی این جنگل ها ارزش چوب دهی و صنعتی ندارند و ارزش پوشش گیاهی زیستگاهی و زیست بومی در آنها از اهمیت خاصی برخوردار است. مهم ترین گونه های جنگلی سه گونه بلوط مازودار (*Quercus infectoria*)، ویول (*Q. libani*) و برودار (*Q. brantii*) و سایر درختان از قبیل انگور، انجیر، آلبالو، گلابی، پسته وحشی، زالزالک، بادام کوهی، افرا و نارون هستند. پوشش و تراکم جنگل های این شهرستان در غرب و شمال غربی و شرقی به مراتب بیش تر از سایر مناطق است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه های مورد بررسی (تصاویر گوگل ارث سمت راست و چپ به ترتیب مربوط به منطقه های نلاس و شیومره هستند)

Figure 1. Geographical location of study areas (The photos on the right and left sides are from Google Earth and depict the Nalas and Shiomere areas, respectively)

سوختنی مناسب منطقه بر اساس مدل ماده سوختنی استاندارد اندرسون (۵) و اسکات و بورگن (۵۶) که بر پایه مدل گسترش آتش روترمال (۵۰) توسعه یافته اند انتخاب شدند. انتخاب مدل های سوخت با استفاده از تهیه نقشه کاربری و پوشش

### نمونه برداری سوخت جنگل

به منظور تعیین حجم سوخت جنگل تمام سطح مناطق مورد بررسی بر روی نقشه پوشش گیاهی بر اساس نوع پوشش گیاهی یا نوع کاربری اراضی نمونه بندی شد. مدل های ماده

محاسبه قطر تاج از رابطه یک استفاده شد (۵۹):

$$\text{رابطه ۱} \quad \text{قطر کوچک} \times \text{قطر بزرگ} = \text{قطر تاج}$$

پس از طبقه‌بندی تمام کلاسه‌های سوختی همه مواد سوختنی مرده و زنده در محل با استفاده از ترازوی الکترونیکی در سطح ۰/۱ گرم اندازه‌گیری شدند. سپس نمونه‌هایی از زی‌توده سوختی از تمامی طبقات برداشت و مجدداً وزن شده و برای محاسبه وزن خشک به آزمایشگاه انتقال داده شدند. تمامی این نمونه‌ها با استفاده از اُون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد طی مدت ۲۴ ساعت مجدداً خشک و سپس توزین شدند و در مرحله بعد با استفاده از رابطه ۲ محتوای رطوبتی سوخت (FMC) محاسبه شد.

$$\text{رابطه ۲} \quad \text{FMC} = \frac{Fw - Dw}{Dw} \times 100$$

در این رابطه، Fw: وزن تر و Dw: وزن خشک مواد سوختی است.

### تجزیه و تحلیل‌های آماری

برای تجزیه و تحلیل داده‌های کمی ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شد و برای تبدیل داده‌هایی که نرمال نبودند از دستورهایی Rank cases و Compute variables در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۷ برای نرمال‌سازی آنها استفاده شد (۶۱). سپس برای تجزیه و تحلیل آماری از آزمون ANOVA استفاده شد (۴۰). از آزمون دانکن برای مقایسه میانگین متغیرهای کمی بین مناطق مختلف با تاج پوشش‌های انبوه، نسبتاً انبوه و تنک استفاده شد. آزمون همبستگی پیرسون نیز برای تعیین رابطه بین خواص سوختی زی‌توده و پایه‌های درختی در مناطق مختلف (تاج پوشش انبوه، نسبتاً انبوه و تنک) انجام شد (۱۰).

### شبیه‌سازی رفتار و گسترش آتش‌سوزی

داده‌های ورودی: مواد سوختنی (مدل ماده سوختنی و تاج پوشش) و توپوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع) ورودی‌های مدل آتش هستند. داده‌های آب‌وهوا (درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد، جهت باد و بارندگی) مربوط به سال وقوع آتش‌سوزی (سال ۱۳۹۸) در مناطق مورد بررسی از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی (سردشت) جمع‌آوری شد. مدل رقومی ارتفاع<sup>۵</sup> سنجنده ALOS PALSAR با اندازه پیکسل ۱۲/۵ × ۱۲/۵ متر (۲) برای ایجاد نقشه‌های ارتفاع، شیب و جهت استفاده شد. نقشه‌های ماده سوختنی و تاج پوشش نیز از طریق کار میدانی تهیه شدند. نقشه پوشش گیاهی و کاربری اراضی مناطق مورد بررسی با استفاده از تصاویر با وضوح بالای گوگل<sup>۱</sup> تحت نرم‌افزار QGIS و بازدید میدانی تهیه شدند. سپس مدل‌های سوخت شناسایی شده به هر نوع طبقه پوشش گیاهی مربوطه بر اساس نوع رویشگاه جنگلی، گونه‌های اصلی و فرعی آشکوب بالا، مرحله توسعه‌ای رویشگاه و درصد تاج پوشش اختصاص یافتند. همچنین شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی یا NDVI<sup>۶</sup> شهرستان سردشت برای جداسازی اراضی بدون پوشش، علفزار، اراضی جنگلی و تاج پوشش‌های مختلف (تنک، نسبتاً انبوه و انبوه) و تهیه نقشه تاج پوشش منطقه‌های مورد بررسی استفاده شد. بر اساس اطلاعات پوشش گیاهی مناطق

اراضی منطقه و حاصل کار میدانی و بر اساس شباهت انواع کاربری و پوشش اراضی موجود در منطقه و توصیف این مدل‌ها انجام گرفت (۶۴). فرآیند مدل‌سازی ماده سوختنی منطقه شامل طبقه‌بندی منطقه به طبقات مختلف بر اساس ویژگی‌های ماده سوختنی هر طبقه بود. سپس تمام نواحی نمونه‌بندی شده در منطقه، مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به دستورالعمل براون و همکاران (۱۴) از قطعه‌نمونه‌های ۱×۱ متر (در مجموع ۶۰ قطعه‌نمونه) برای اندازه‌گیری پارامترهای سوختی استفاده شد و در هر قطعه‌نمونه پارامترهای ارتفاع پوشش گیاهی به متر با دقت ۰/۱، حجم سوخت یک‌ساعته<sup>۷</sup> به کیلوگرم در کلاسه قطری ۰/۶-۰/۰ سانتی‌متر، حجم سوخت ۱۰۰ ساعته<sup>۸</sup> به کیلوگرم در کلاسه قطری ۲/۵-۰/۶ سانتی‌متر، ۲/۵ سانتی‌متر، شاخه و برگ زنده (سبز) به کیلوگرم با قطر کمتر از ۶ میلی‌متر، حجم سوخت کل (کیلوگرم)، حجم لاشبرگ به کیلوگرم و عمق لاشبرگ به سانتی‌متر مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (۱۴، ۵۲). حداقل، متوسط و حداکثر ارتفاع گیاهان (علفی/درختچه‌ای با ارتفاع تا ۲ متر) در یک فاصله عمودی از بالاترین قسمت گیاه تا سطح زمین اندازه‌گیری شد. عمق لاشبرگ، شاخ و برگ، پوشش علفی زنده و مرده، ارتفاع درختچه‌ها تا ۲ متر و حجم لاشبرگ در هر قطعه‌نمونه اندازه‌گیری شد. تمام حجم‌های سوختی (وزن سوخت در واحد سطح منطقه) بر اساس وزن خشک بیان می‌شوند. عمق لاشبرگ نیز با استفاده از خط‌کش در هر قطعه‌نمونه اندازه‌گیری شد. مواد سوختنی مرده با توجه به مقدار زمان واکنش آنها به تغییرات در رطوبت به طبقات ۱، ۱۰ و ۱۰۰ ساعته تقسیم شدند. این زمان واکنش، تأخیر زمانی<sup>۹</sup> نامیده می‌شود که متناسب با قطر ماده سوختنی است. قسمت‌های چوبی مرده و زنده با قطر کمتر از ۷/۵ سانتی‌متر به سه طبقه قطری تقسیم شدند (۰/۶-۰/۰، ۰/۶-۲/۵، ۲/۵-۷/۵ سانتی‌متر). کل حجم سوخت با استفاده از روش قطع و توزین اندازه‌گیری شد. از آنجایی که مدل گسترش آتش Rothermal در نرم‌افزار FlamMap برای مواد سوختی زنده با قطر بیش از ۶ میلی‌متر ( $\phi > 6 \text{ mm}$ ) اجرا نمی‌شود، در این پژوهش مواد گیاهی-چوبی زنده با قطر بیش از ۶ میلی‌متر اندازه‌گیری نشدند. مواد سوختنی علفی زنده شامل مواد سوختنی سالیانه و دائمی هستند. مواد سوختنی چوبی زنده نیز شامل برگ‌ها، شاخه‌ها و ساقه ریز درختان و درختچه‌ها است. در مناطق مورد بررسی اندازه‌گیری و شناسایی پارامترهای مواد سوختی با استفاده از خط‌نمونه با طول‌های مختلف (با توجه به شرایط توپوگرافی و پوشش گیاهی، چهار خط‌نمونه هر کدام با طول متوسط ۱۵۰۰ متر) انجام شد. همچنین، اندازه‌گیری ویژگی‌های سوختی تاج درختان (ارتفاع تاج) در سه تا پنج نقطه از خط‌نمونه عبوری از یک قطعه‌نمونه تا قطعه‌نمونه بعدی انجام شد. داده‌های برداشت‌شده در این پژوهش شامل ارتفاع کل (بن درخت تا نوک درخت)، قطر برابر سینه، ارتفاع تاج (شروع تاج تا نوک تاج)، ارتفاع تنه (بن درخت تا شروع تاج) و قطر تاج (در دو محور عمود برهم و به صورت قطر بزرگ و قطر کوچک تاج هر یک از پایه‌ها) بوده است. برای

موردبررسی، نقشه و مدل‌های مناسب ماده سوختنی با تفسیر اطلاعات پوشش گیاهی جمع‌آوری‌شده، مشخصات ماده سوختنی به شکل پوشش یکپارچه مواد سوختنی در GIS ایجاد و انتخاب شدند. بر اساس شباهت‌های مابین مشخصات پوشش گیاهی موجود و مؤلفه‌های برآورده شده مواد سوختنی موجود در عرصه و نیز با توجه به توصیف مدل‌های استاندارد،

انتخاب تیپ‌های ماده سوختنی حامل آتش و مدل‌های ماده سوختنی آن از بین تیپ‌های ماده سوختنی استاندارد اسکات و بورگن (۵۶) انجام شد. مدل‌های ماده سوختنی مناسب این پژوهش شامل: غیرقابل سوختن، علفی، درختی زیرآشکوب و لاشبرگ چوبی است. ویژگی‌های این مدل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مدل‌های ماده سوختنی استاندارد (۵۶) در مناطق مورد بررسی

Table 1. Standard forest fuel models (56) of study areas

کد نوع ماده سوختنی Fuel type code	ویژگی تیپ ماده سوختنی Characteristics of the type of fuel load	پوشش اراضی مشاهده‌شده Observed land cover
NB1	ماده سوختنی ناکافی برای حمل آتش Insufficient wildland fuel to carry wildland fire.	اراضی مسکونی Built-up areas
NB3	در شرایط غیرقابل سوختن نگهداری می‌شوند. Maintained in nonburnable condition.	اراضی کشاورزی Croplands
GR1	علفی کوتاه، تکه‌تکه و احتمالاً به شدت چرا شده است. نرخ گسترش متوسط، طول شعله کم Grass is short, patchy, and possibly heavily grazed. Spread rate moderate; flame length low.	علفی (منطقه شیومره) Grassland (Shiomere region)
TL4	بار متوسط، شامل تکه‌های چوبی افتاده با قطر کم است. نرخ انتشار پایین، طول شعله کم Moderate load, includes small diameter downed logs. Spread rate low; flame length low.	جنگل با لاشبرگ (منطقه شیومره) Forest with litter (Shiomere region)
GR4	علفی پیوسته نسبتاً متراکم، ارتفاع متوسط حدود ۰/۶ متر. نرخ انتشار بسیار بالا، طول شعله زیاد. Moderately coarse continuous grass, average depth about 0.6 m. Spread rate very high; flame length very high.	علفی (منطقه نلاس) Grassland (Nalas region)
TU1	بستر سوخت با بار کم علف یا بار لاشبرگ با درختچه است. نرخ انتشار پایین، طول شعله کم Fuelbed is low load of grass and/or shrub with litter. Spread rate low; flame length low.	جنگل با زیرآشکوب علفی (منطقه نلاس) Forest with grass understory (Nalas region)

### اعتبارسنجی مدل رفتار آتش‌سوزی

در این پژوهش از ضریب کاپا برای اعتبارسنجی و صحت نقشه‌های شبیه‌سازی‌شده استفاده شد. این ضریب دارای ارزش صفر تا یک است که بیانگر همخوانی کامل بین نقشه واقعی و نقشه شبیه‌سازی‌شده است (رابطه ۳).

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^n X_{ii} - \sum_{i=1}^n (X_{i+} \times X_{+i})}{N^2 \sum_{i=1}^n (X_{i+} \times X_{+i})} \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه،  $\Sigma$ : 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 (۶۰).

### نتایج و بحث

#### نتایج تحلیل واریانس (ANOVA)

نتایج تجزیه و تحلیل‌های آماری مربوط به تحلیل واریانس متغیرهای کمی و سوختی در تیپ‌های جنگلی مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس این نتایج تفاوت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد مابین میانگین ارتفاع پوشش گیاهی، حجم سوخت یک، ۱۰ و ۱۰۰ ساعته، حجم و عمق لاشبرگ، قطر برابرسینه، قطر تاج، ارتفاع درختان، ارتفاع تاج، وزن تر و خشک حجم سوخت یک‌ساعته و درصد محتوای رطوبتی لاشبرگ در سه تیپ جنگلی مختلف (انبوه، نسبتاً انبوه و تنک) وجود دارد. تفاوت معنی‌داری بین دیگر مشخصه‌های کمی و سوختی در تیپ‌های جنگلی مختلف منطقه‌های شیومره و نلاس مشاهده نشد.

### شبیه‌سازی گسترش آتش (FARSITE)

FARSITE بر اساس مدل نیمه‌تجربی پیش‌بینی آتش که (Rothermel 1972) آن را توسعه داد، شکل گرفته است و در آن سامانه مدل‌سازی ماده سوختنی و پیش‌بینی آتش (Fire Behave) ترکیب شده است. از آنجایی که این سامانه یک مدل مشخص زمانی و مکانی است می‌تواند تجزیه و تحلیل دقیقی از رفتار آتش، مانند جهت و مساحت گسترش آتش و آثار آن تولید کند. برای شبیه‌سازی گسترش آتش نقطه شروع آتش در مناطق موردبررسی انتخاب و شبیه‌سازی با دوره سوختن از ساعت شروع تا پایان آتش‌سوزی با ارائه شرایط رطوبت ماده سوختنی اجرا شد. این فرایند با همان نقطه شروع آتش‌سوزی برای استخراج تغییرات مساحت و مسیرهای گسترش آتش انجام شد و خروجی‌های حاصل به صورت نقشه‌های رستری و وکتوری به دست آمدند.

### محاسبه نرخ گسترش، طول شعله و شدت خط آتش (FlamMap)

با توجه به اینکه در نرم‌افزار FlamMap محاسبات رفتار آتش مانند شدت خط آتش ( $\text{kW min}^{-1}$ ) (انرژی گرمایی آزادشده در واحد زمان) و نرخ گسترش آتش ( $\text{m min}^{-1}$ ) (سرعت حرکت آتش در ماده سوختنی) و غیره برای هر سلول (پیکسل) به‌طور مستقل و بدون توجه به محیط مجاور انجام می‌شود، هیچ‌گونه پیش‌بینی حرکت آتش در واحد سیمای سرزمین ارائه نمی‌شود و اطلاعات در شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۲- تجزیه واریانس متغیرهای مختلف کمی و سوختی تیپ‌های مختلف جنگلی (انبوه، نسبتاً انبوه و تنک)

Table 2. Variance analysis of different quantitative and fuel variables in various forest types

ضریب تغییرات Coefficient of variation	F	میانگین مربعات Mean squared	درجه آزادی df	مشخصه Characteristic
0.72	23.12*	0.38	2	حداکثر ارتفاع پوشش گیاهی (متر) Maximum vegetation height (m)
0.41	18.58*	0.11	2	میانگین ارتفاع پوشش گیاهی (متر) Average vegetation height (m)
0.26	13.27*	0.04	2	حداقل ارتفاع پوشش گیاهی (متر) Minimum vegetation height (m)
0.15	22.76*	0.02	2	حجم سوخت یک‌ساعته (کیلوگرم) 1-hr fuel load (kg)
0.29	4.84*	0.02	2	حجم سوخت ۱۰ ساعته (کیلوگرم) 10-hr fuel load (kg)
0.49	10.61*	0.08	2	حجم سوخت ۱۰۰ ساعته (کیلوگرم) 100-hr fuel load (kg)
0.56	2.13 <sup>ns</sup>	0.04	2	حجم سوخت کل (کیلوگرم) Total fuel load (kg)
1.51	25.44*	1.75	2	حجم لاشبرگ (کیلوگرم) Litter load (kg)
12.66	56.92*	221.94	2	عمق لاشبرگ (سانتی‌متر) Litter depth (cm)
24.50	6.89*	153.78	2	قطر برابر سینه (سانتی‌متر) DBH (cm)
3.06	54.89*	13.59	2	قطر تاج (متر) Crown diameter (m)
5.29	9.76*	11.52	2	ارتفاع درخت (متر) Tree height (m)
5.10	11.32*	10.58	2	ارتفاع تاج (متر) Crown height (m)
2.17	2.28 <sup>ns</sup>	0.49	2	ارتفاع تنه (متر) Trunk height (m)
0.11	1.97 <sup>ns</sup>	0.001	2	وزن تر لاشبرگ (کیلوگرم) Litter fresh weight (kg)
0.02	3.64*	0.000	2	وزن تر حجم سوخت یک‌ساعته (کیلوگرم) 1-hr fuel load fresh weight (kg)
0.05	0.86 <sup>ns</sup>	0.000	2	وزن تر حجم سوخت ۱۰ ساعته (کیلوگرم) 10-hr fuel load fresh weight (kg)
0.11	2.10 <sup>ns</sup>	0.001	2	وزن خشک لاشبرگ (کیلوگرم) Litter dry weight (kg)
0.02	3.38*	0.000	2	وزن خشک حجم سوخت یک‌ساعته (کیلوگرم) 1-hr fuel load dry weight (kg)
0.05	0.56 <sup>ns</sup>	0.000	2	وزن خشک حجم سوخت ۱۰ ساعته (کیلوگرم) 10-hr fuel load dry weight (kg)
0.17	2.37 <sup>ns</sup>	0.002	2	وزن تر کل (کیلوگرم) Total fresh weight (kg)
0.16	2.46 <sup>ns</sup>	0.02	2	وزن خشک کل (کیلوگرم) Total dry weight (kg)
70.65	0.41 <sup>ns</sup>	39.07	2	درصد محتوای رطوبتی کل Total fuel moisture content (%)
41.18	4.17 <sup>ns</sup>	100.03	2	درصد محتوای رطوبتی لاشبرگ Litter fuel moisture content (%)
18.98	0.04 <sup>ns</sup>	0.29	2	درصد محتوای رطوبتی حجم سوخت یک‌ساعته 1-hr fuel moisture content (%)
13.46	1.80 <sup>ns</sup>	11.12	2	درصد محتوای رطوبتی حجم سوخت ۱۰ ساعته 10-hr fuel moisture content (%)

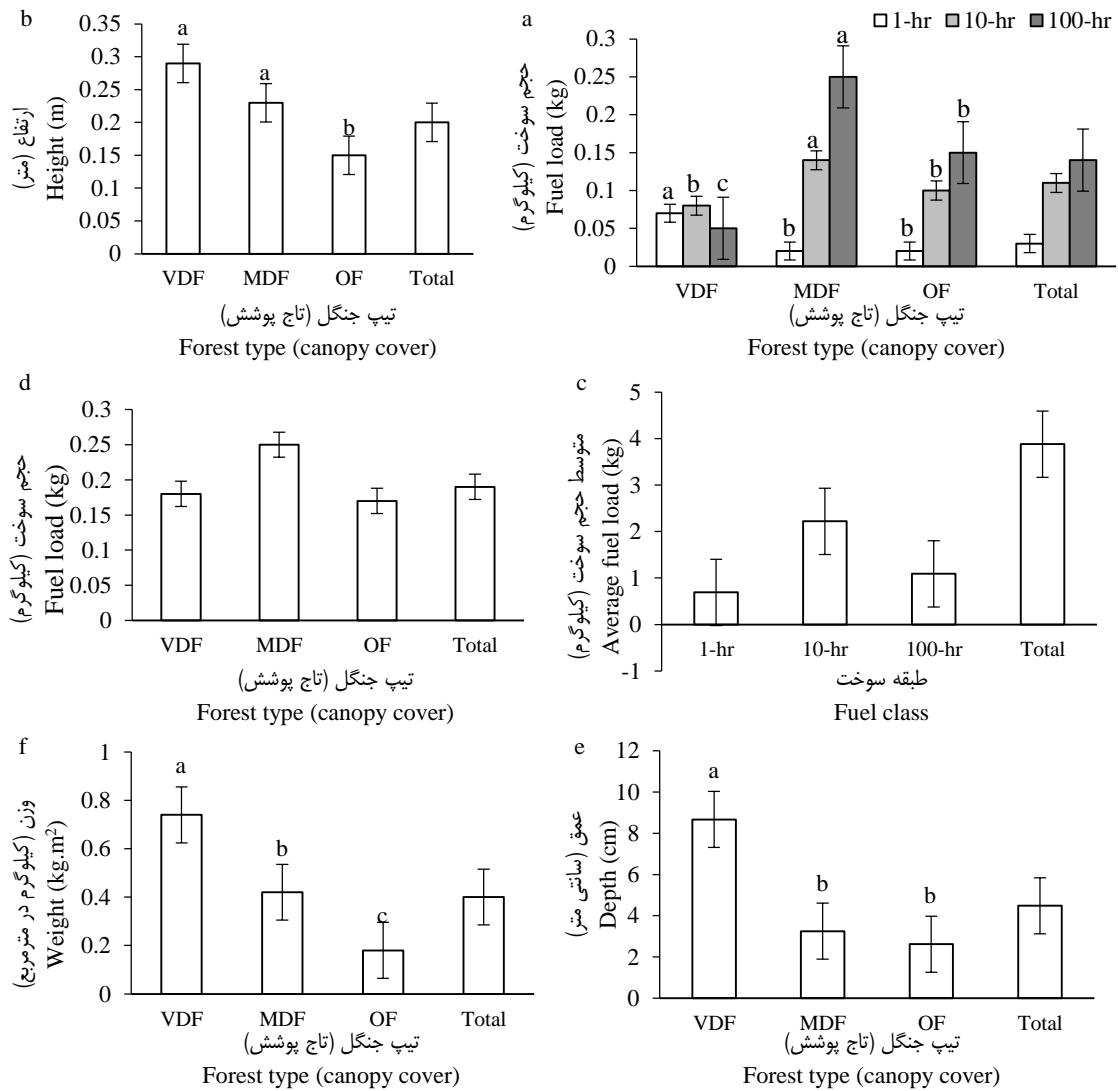
\* : تفاوت معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد، ns عدم معنی‌داری تفاوت

\*: Significant difference at 95% confidence level, ns: non significant difference

## آمار توصیفی مشخصه‌های کمی و کیفی

شکل ۲ و جدول ۳ میانگین مشخصه‌های کمی و کیفی توده‌های مورد بررسی با تاج پوشش‌های مختلف (انبوه (منطقه شیومره)، نسبتاً انبوه (منطقه شیومره) و تنک (منطقه نلاس)) را نشان می‌دهند. بر اساس این نتایج بیشترین میانگین ارتفاع

پوشش گیاهی، حجم سوخت یک‌ساعته، حجم و عمق لاشبرگ، قطر برابر سینه و قطر تاج در توده جنگلی انبوه به‌دست آمد. بیشترین مقدار حجم سوخت ۱۰ و ۱۰۰ ساعته، حجم کل سوخت، ارتفاع درختان، تاج و تنه نیز در توده جنگلی نسبتاً انبوه به‌دست آمد.



شکل ۲- میانگین پارامترهای کمی و کیفی در مناطق مورد بررسی با درصد های مختلف پوشش گیاهی (VDF: جنگل بسیار متراکم، MDF: جنگل با تراکم متوسط و OP: جنگل تنک) (a: میانگین حجم سوخت (کیلوگرم در مترمربع)، b: میانگین ارتفاع پوشش گیاهی (متر در مترمربع)، c: میانگین تأخیر زمانی سوخت (کیلوگرم در مترمربع)، d: میانگین حجم سوخت کل (کیلوگرم در مترمربع)، e: میانگین عمق لاشبرگ (سانتی متر در مترمربع)، f: میانگین حجم لاشبرگ (کیلوگرم در مترمربع))

Figure 2. Average quantitative and qualitative parameters in studied regions with varying percentages of vegetation (VDF: very dense forest, MDF: moderately dense forest, and OP: open Forest) (a: Average fuel load (kg.m<sup>2</sup>), b: Average vegetation height (m), c: Average fuel time lag (kg.m<sup>2</sup>), d: Average total fuel load (kg.m<sup>2</sup>), e: Average litter depth (cm.m<sup>2</sup>), f: Average litter load (kg.m<sup>2</sup>))

جدول ۳- میانگین (± اشتباه معیار) ویژگی های گیاهی درختان در مناطق مورد بررسی با درصد پوشش گیاهی مختلف

Table 3. Average (± Std. Error) vegetation features of trees in the studied areas with various vegetation percentages					
ارتفاع تنه (متر) Trunk height (m)	ارتفاع تاج (متر) Crown height (m)	ارتفاع درخت (متر) Tree height (m)	قطر تاج (متر) Crown diameter (m)	قطر برابر سینه (سانتی متر) DBH (cm)	نوع جنگل Forest type
1.47 ± 0.04	2.86 <sup>b</sup> ± 0.24	4.32 <sup>b</sup> ± 0.27	4.72 <sup>a</sup> ± 0.09	19.53 <sup>a</sup> ± 1.28	انبوه Dense
1.77 ± 0.16	3.7 <sup>a</sup> ± 0.33	5.47 <sup>a</sup> ± 0.38	3.76 <sup>b</sup> ± 0.15	16.34 <sup>b</sup> ± 1.30	نسبتاً انبوه Relatively dense
1.72 ± 0.08	2.28 <sup>b</sup> ± 0.12	4.00 <sup>b</sup> ± 0.13	3.17 <sup>c</sup> ± 0.09	14.3 <sup>b</sup> ± 0.72	تنک Sparse
1.66 ± 0.06	2.79 ± 0.14	4.46 ± 0.15	3.75 ± 0.20	16.28 ± 0.64	کل Total

Different letters show a significant difference at the 95% confidence level

حروف مختلف تفاوت معنی داری را در سطح احتمال ۹۵ درصد نشان می دهند

**محتوای رطوبتی سوخت (FMC)**

۶/۷۴ درصد) و تنک (۴/۰۲ درصد) بوده است. بیشترین میانگین محتوای رطوبتی لاشبرگ، حجم سوخت ۱، ۱۰ و ۱۰۰ ساعته نیز مربوط به توده جنگلی انبوه بوده است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده (جدول ۴) بیشترین و کمترین میانگین درصد محتوای رطوبتی به‌ترتیب مربوط به توده انبوه

جدول ۴- میانگین (± اشتباه معیار) درصد محتوای رطوبتی طبقات سوختی، لاشبرگ و کل مناطق مورد بررسی

Table 4. The average (± Std. Error) percentage of moisture content (MC) of fuel layers, litter and the entire study areas

محتوای رطوبتی کل (درصد) Total MC (%)	محتوای رطوبتی لاشبرگ (درصد) Litter MC (%)	محتوای رطوبتی یک ساعته (درصد) 1-hr MC (%)	محتوای رطوبتی ۱۰ ساعته (درصد) 10-hr MC (%)	محتوای رطوبتی ۱۰۰ ساعته (درصد) 100-hr MC (%)	نوع جنگل Forest type
6.74 ± 2.57	7.25 ± 2.06	4.37 ± 0.26	5.22 ± 1.62	5.10 ± 1.40	انبوه Dense
5.51 ± 0.58	3.69 ± 0.49	4.25 ± 0.31	4.73 ± 0.62	3.23 ± 0.28	نسبتاً انبوه Relatively dense
4.02 ± 0.33	3.16 ± 0.36	4.09 ± 1.35	3.16 ± 0.25	-	تنک Sparse
5.71 ± 1.21	4.44 ± 0.64	4.25 ± 0.43	4.25 ± 0.47	4.17 ± 0.52	کل Total

مثبت و معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد دارد. این عامل با حجم سوخت یک‌ساعته نیز رابطه مثبت و معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارد. عامل قطر تاج با حجم سوخت یک‌ساعته، حجم و عمق لاشبرگ رابطه مثبت و معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارد. ارتفاع درخت در سطوح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد به‌ترتیب با حجم سوخت ۱۰۰ ساعته و حجم شاخ و برگ زنده رابطه مثبت و معنی‌داری دارد. ارتفاع تاج نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد با شاخ و برگ زنده دارد. همچنین بین عامل ارتفاع تنه (از بن تا محل شروع تاج) با عوامل مذکور رابطه معنی‌داری مشاهده نشد.

**نتایج همبستگی پیرسون**

نتایج همبستگی پیرسون نشان داد (جدول ۵) عامل شیب (متغیر وابسته) با حجم سوخت یک‌ساعته، حجم لاشبرگ، عمق لاشبرگ و محتوای رطوبتی لاشبرگ رابطه مثبت و معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد دارد. همچنین این عامل با حجم سوخت ۱۰۰ ساعته رابطه معکوس و معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارد. عامل ارتفاع از سطح دریا با حجم سوخت یک‌ساعته، عمق لاشبرگ و محتوای رطوبتی حجم سوختی ۱۰ ساعته رابطه مثبت و معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارد. همچنین عامل ارتفاع با حجم لاشبرگ رابطه مثبت و معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد دارد. قطر برابرسینه با عمق و حجم لاشبرگ رابطه

جدول ۵- همبستگی پیرسون بین عوامل مورد بررسی

Table 5. Pearson correlation between the studied factors

متغیرهای وابسته Dependent variables						متغیرهای مستقل Independent variables					
10hrMC%	1hrMC%	LMC%	MC%	LD	LV	TFL	LF	FL100	FL10	FL1	
0.132 <sup>ns</sup>	0.171 <sup>ns</sup>	<b>0.326**</b>	-0.059 <sup>ns</sup>	<b>0.601**</b>	<b>0.463**</b>	0.075 <sup>ns</sup>	0.307 <sup>ns</sup>	<b>-0.420*</b>	-0.172 <sup>ns</sup>	<b>0.591**</b>	شیب Slope
<b>0.454*</b>	-0.019 <sup>ns</sup>	-0.067 <sup>ns</sup>	-0.075 <sup>ns</sup>	<b>0.315*</b>	<b>0.331**</b>	0.118 <sup>ns</sup>	-0.509 <sup>ns</sup>	0.079 <sup>ns</sup>	0.110 <sup>ns</sup>	<b>0.286**</b>	ارتفاع Elevation
<b>0.621*</b>	0.251 <sup>ns</sup>	0.132 <sup>ns</sup>	0.412 <sup>ns</sup>	<b>0.301*</b>	<b>0.411**</b>	0.214 <sup>ns</sup>	-0.412 <sup>ns</sup>	0.112 <sup>ns</sup>	0.074 <sup>ns</sup>	<b>0.241*</b>	قطر برابرسینه DBH
0.363 <sup>ns</sup>	-0.085 <sup>ns</sup>	0.153 <sup>ns</sup>	-0.122 <sup>ns</sup>	<b>0.510**</b>	<b>0.350**</b>	0.013 <sup>ns</sup>	0.223 <sup>ns</sup>	0.376 <sup>ns</sup>	-0.136 <sup>ns</sup>	<b>0.458**</b>	قطر تاج Crown diameter
0.069 <sup>ns</sup>	0.182 <sup>ns</sup>	0.192 <sup>ns</sup>	0.143 <sup>ns</sup>	0.202 <sup>ns</sup>	0.089 <sup>ns</sup>	0.139 <sup>ns</sup>	<b>0.836**</b>	<b>0.445*</b>	0.159 <sup>ns</sup>	-0.080 <sup>ns</sup>	ارتفاع درخت Tree height
0.219 <sup>ns</sup>	0.207 <sup>ns</sup>	0.202 <sup>ns</sup>	0.106 <sup>ns</sup>	0.222 <sup>ns</sup>	0.145 <sup>ns</sup>	0.183 <sup>ns</sup>	<b>0.883**</b>	0.370 <sup>ns</sup>	0.182 <sup>ns</sup>	0.007 <sup>ns</sup>	ارتفاع تاج Crown height
-0.268 <sup>ns</sup>	0.033 <sup>ns</sup>	-0.008 <sup>ns</sup>	0.038 <sup>ns</sup>	0.009 <sup>ns</sup>	0.109 <sup>ns</sup>	-0.016 <sup>ns</sup>	0.176 <sup>ns</sup>	0.027 <sup>ns</sup>	0.119 <sup>ns</sup>	-0.091 <sup>ns</sup>	ارتفاع تنه Trunk height

\*\* تفاوت معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد، \* تفاوت معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد، <sup>ns</sup> عدم معنی‌داری تفاوت.

<sup>1</sup> FL1: حجم سوخت یک ساعته، FL10: حجم سوخت ۱۰ ساعته، FL100: حجم سوخت ۱۰۰ ساعته، LF: شاخ و برگ زنده، TFL: حجم کل سوخت، LV: حجم لاشبرگ، LD: عمق لاشبرگ، MC%: درصد محتوای رطوبتی، LMC%: درصد محتوای رطوبتی لاشبرگ، درصد محتوای رطوبتی مواد سوختی یک ساعته و 10hrMC%: درصد محتوای رطوبتی مواد سوختی ۱۰ ساعته.

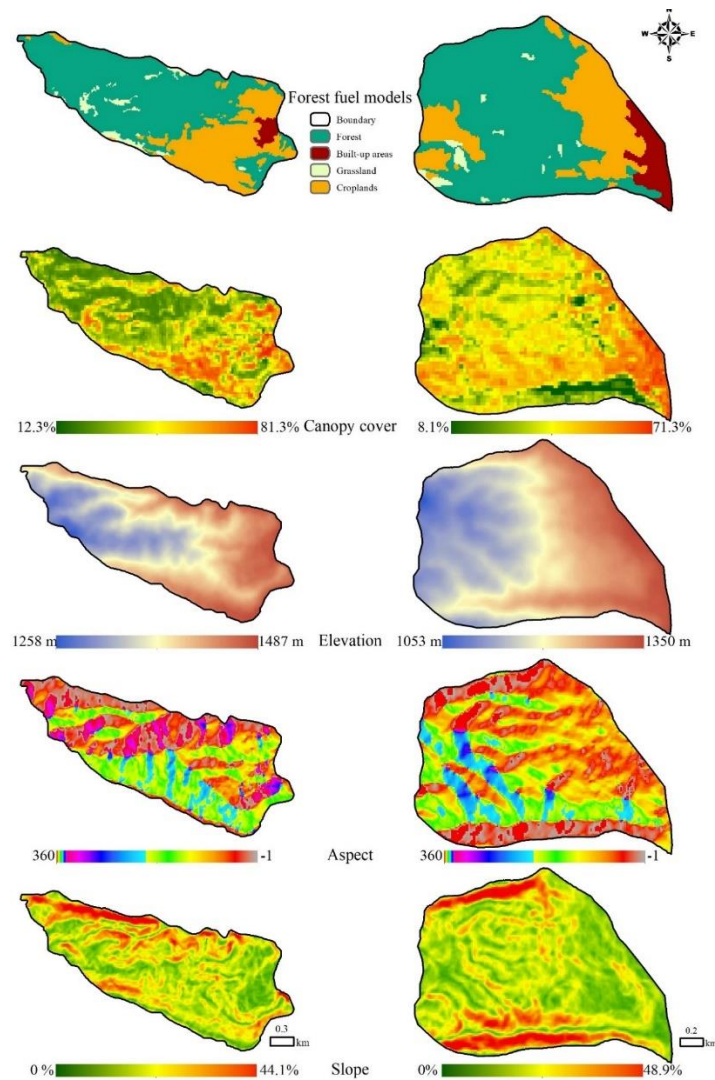
\*\* and \* Significant differences at 99% and 95% confidence levels, respectively, ns: non significant difference.

FL1: 1-hr fuel load, FL10: 10-hr fuel load, FL100: 100-hr fuel load, LF: Live foliage, TFL: Total fuel load, LV: Litter load, LD: Litter depth, MC%: Moisture Content (%), LMC%: Litter MC (%), 1hrMC%: 1-hr MC (%), 10hrMC%: 10-hr MC (%).

تاج پوشش (شکل ۳) مربوط به منطقه‌های مورد بررسی (شیومره و نلاس) در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.5 تهیه شدند.

**شبیه‌سازی رفتار و گسترش آتش**

به‌منظور تهیه پوشه LCP داده‌های آب‌وهوا، باد، رطوبت سوخت و نقشه‌های ارتفاع، شیب، جهت، مدل سوخت و درصد



شکل ۳- لایه‌های ورودی برای مدل‌سازی رفتار و گسترش آتش‌سوزی در مناطق مورد بررسی (راست: نلاس، چپ: شیومره)  
Figure 3. Input layers for modeling fire behavior and spread in the studied areas (Right: Nalas, Left: Shiomere)

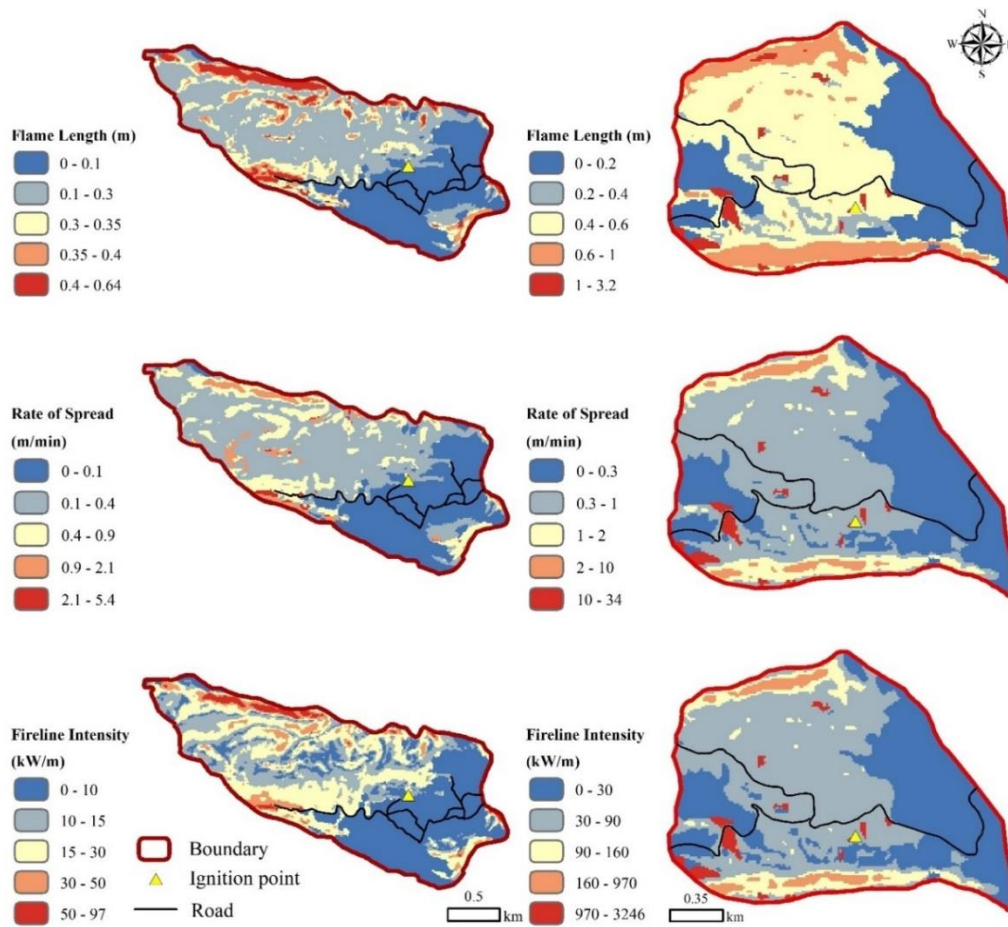
حداکثر آن ۳۴ متر بر دقیقه در نلاس و ۵/۴ متر بر دقیقه در شیومره در سطح محدودی از دو منطقه شبیه‌سازی شده است. نرخ گسترش آتش در بیشتر سطوح منطقه نلاس با سرعت ۱-۰/۳ متر بر دقیقه (۵۱/۷۹ درصد) و برای شیومره با سرعت ۱-۰/۴ متر بر دقیقه (۴۸/۲۴ درصد) گسترش می‌یابد. کمترین شدت خط آتش در منطقه نلاس بین صفر تا ۳۰ کیلووات بر متر (۳۵/۰۴ درصد) و بیشترین آن ۳۲۴۶ کیلووات بر متر است. حداقل این معیار برای منطقه شیومره در بازه ۰-۱۰ کیلووات بر متر (۳۹/۲۹ درصد) و حداکثر آن نیز ۹۷ کیلووات بر متر است.

### نقشه‌های شبیه‌سازی رفتار آتش

مشخصه‌های رفتار آتش (FlamMap): شکل ۴ و جدول ۶، نتایج مقادیر مساحت و نقشه‌های شبیه‌سازی شده طول شعله‌های آتش، نرخ گسترش آتش و شدت خط آتش را در دو منطقه نلاس و شیومره نشان می‌دهد. بیشترین طول آتش برای منطقه نلاس ۳/۲ متر و برای منطقه شیومره ۰/۶۴ متر در پوشش‌های درختان بلوط با زیرآشکوب گیاهان علفی و لاشبرگ درختان برآورد شد. حداقل نرخ گسترش آتش برای نلاس بین صفر تا ۰/۳ متر بر دقیقه (۳۴/۰۷ درصد) و برای شیومره بین صفر تا ۰/۱ متر بر دقیقه (۳۱/۳۱ درصد) و

جدول ۶- مقدار سطح (به هکتار و درصد) نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده شبیه‌سازی رفتار آتش با استفاده از مدل FlamMap  
 Table 6. The area (in hectare and percentage) of fire behavior simulation classified maps using the FlamMap model

نالاس Nalas			شیومره Shiomere			معیار Variable
مساحت (درصد) Area (%)	مساحت (هکتار) Area (ha)	طبقه Class	مساحت (درصد) Area (%)	مساحت (هکتار) Area (ha)	طبقه Class	
32.75	89.69	0-0.2	31.31	111.59	0-0.1	طول شعله (متر) Flame length (m)
4.11	11.27	0.2-0.4	92.43	156.53	0.1-0.3	
48.53	132.91	0.4-0.6	13.72	48.89	0.3-0.35	
12.20	33.41	0.6-1	5.93	21.14	0.35-0.4	
2.41	6.59	1-32	5.12	18.23	0.4-0.64	نرخ گسترش آتش (متر بر دقیقه) Rate of spread (m/min)
34.07	93.30	0-0.3	31.31	111.59	0-0.1	
51.79	141.84	0.3-1	48.24	171.91	0.1-0.4	
9.08	24.86	1-2	15.39	54.84	0.4-0.9	
2.89	7.91	2-10	4.35	15.52	0.9-2.1	شدت خط آتش (کیلووات بر متر) Fireline intensity (kW/m)
2.17	5.95	10-34	0.71	2.52	2.1-5.4	
34.04	95.97	0-30	39.29	140.03	0-10	
51.63	141.41	30-90	23.21	82.70	10-15	
7.79	21.33	90-160	29.57	105.38	15-30	
3.36	9.20	160-970	5.94	21.17	30-50	
2.17	5.95	970-3264	1.99	7.09	50-97	

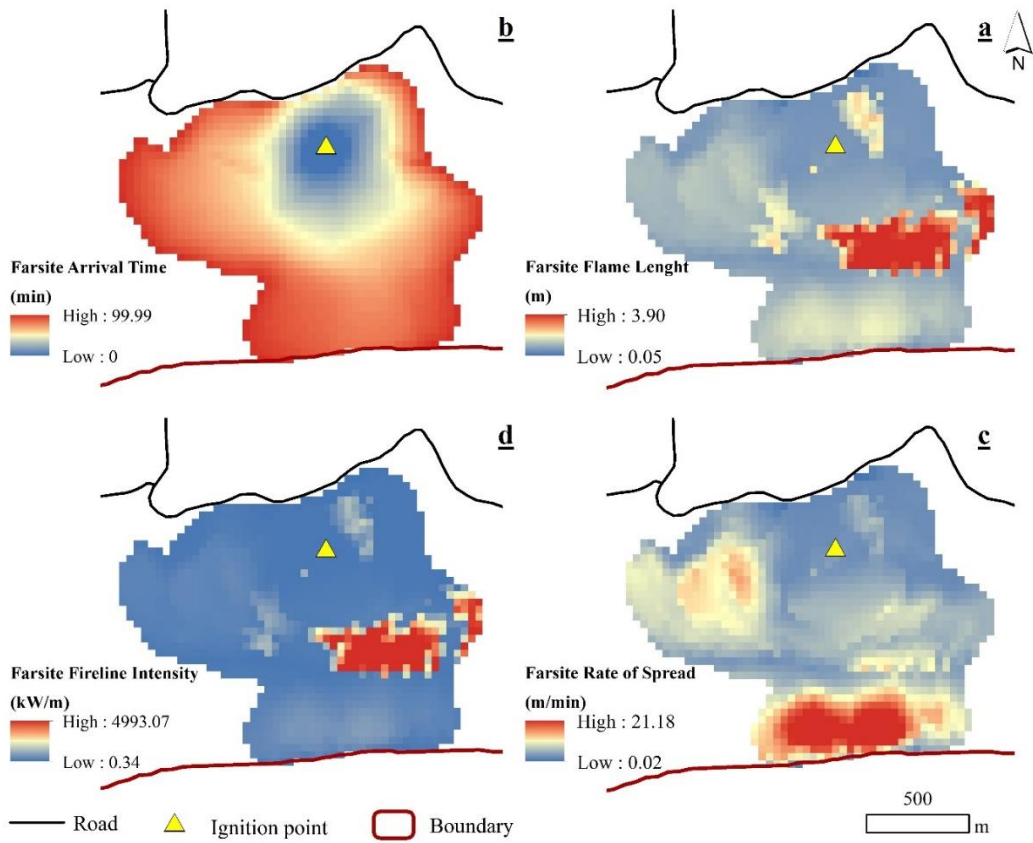


شکل ۴- نقشه مشخصه‌های رفتار آتش در منطقه نالاس (سمت راست) و شیومره (سمت چپ)  
 Figure 4. Fire behavior characteristics map in Nalas (right) and Shiomere (left)

می‌دهد که بیشترین مقدار آن ۳/۹۰ متر برآورد شده است. شکل b5، مدت زمان رسیدن شعله‌های آتش به نقاط مختلف منطقه مورد حریق را نشان می‌دهد که حدود ۱۰۰ دقیقه است. شکل c5، درجه گسترش آتش شبیه‌سازی شده است که حداکثر سرعت پخش آتش ۲۱/۱۸ متر در دقیقه است. بر اساس شکل d5، حداکثر شدت خط آتش شبیه‌سازی شده ۴۹۹۳/۰۷ کیلووات بر متر است.

#### مشخصه‌های گسترش آتش (FARSITE)

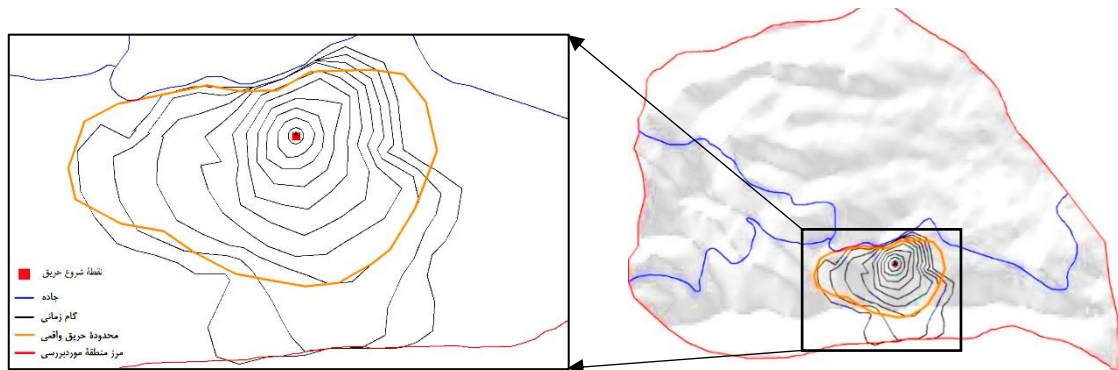
خروجی‌های اصلی فرایند شبیه‌سازی فارسایت، نقشه‌های شبیه‌سازی گسترش آتش (زمان رسیدن، طول شعله، شدت خط آتش و نرخ گسترش) و نقشه گسترش آتش در گام‌های زمانی تعیین شده و نقشه نهایی آن است. با توجه به سطح کم حریق در منطقه شیومره، در این قسمت خروجی‌های شبیه‌سازی فارسایت فقط برای منطقه نالاس ارائه شدند. شکل a5، طول شعله آتش شبیه‌سازی شده در منطقه نالاس را نشان



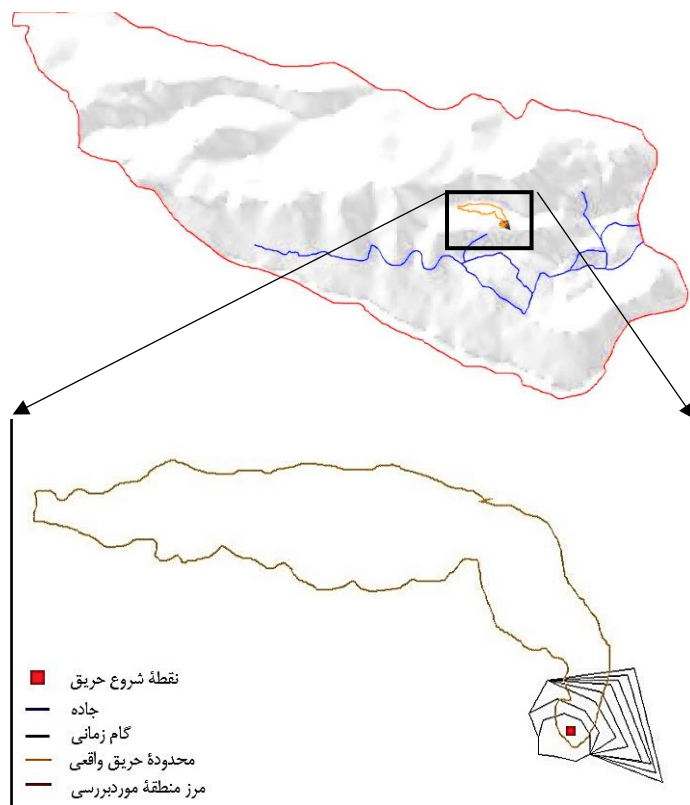
شکل ۵- نقشه مشخصه های گسترش آتش فارسایت در منطقه نالاس  
Figure 5. Characteristics maps of FARSITE fire spread in Nalas region

شکل ۷ نیز خروجی فرایند شبیه سازی گسترش آتش در منطقه شیومره با آتش سوزی عمدی و کنترل شده توسط روستاییان و کشاورزان منطقه را نشان می دهد. خروجی مدل FARSITE برای منطقه شیومره نشان دهنده گسترش آتش به سمت غرب و شمال غربی نقطه شروع آتش است و به دلیل وجود اراضی کشاورزی در قسمت شرقی این نقطه، گسترش حریق در آن جهت شبیه سازی نشده است.

از آنجایی که سطح آتش مشاهده شده و زمان رسیدن جبهه آتش (Fire Front) به مرز جنوبی منطقه نالاس ثبت شده است، رفتار آتش شبیه سازی شده (با مساحت ۲۱/۷ هکتار) با حریق رخ داده (با مساحت ۱۵/۵ هکتار) در منطقه مقایسه شد. نقشه گسترش آتش شبیه سازی شده در شکل ۶ ارائه شده است. آتش سوزی در منطقه نالاس به صورت تصادفی رخ داده و گسترش آن به دلیل وجود جاده در بالادست محل وقوع حریق محدود به قسمت جنوبی منطقه است.



شکل ۶- گستره های شبیه سازی آتش در گام های زمانی ۱۰ دقیقه ای و محدوده آتش سوزی واقعی منطقه نالاس  
Figure 6. Fire simulation extents in 10-minute time steps and actual fire extent of Nalas region.



شکل ۷- گستره‌های شبیه‌سازی آتش در گام‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای (خطوط مشکی رنگ) و محدوده آتش‌سوزی واقعی (خط نارنجی رنگ) منطقه شیومره

Figure 7. Fire simulation extents in 10-minute time steps (black lines) and actual fire extent (orange line) of Shiomere region

### ارزیابی صحت

نتایج ارزیابی همخوانی و صحت لکه آتش شبیه‌سازی شده در مقایسه با لکه آتش مشاهده‌شده نیز در جدول ۷ ارائه شده است. بر اساس این نتایج مقدار ضریب کاپا برای شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی نلاس ۰/۸۳ محاسبه شد که نشان‌دهنده

توافق قابل توجه آن با محدوده گسترش واقعی حریق در منطقه است. مقدار ضریب کاپا نیز برای منطقه شیومره ۰/۰۵ به دست آمد که نمایانگر توافق جزئی و خفیف سطح گسترش آتش شبیه‌سازی شده و واقعی است.

جدول ۷- ارزیابی همخوانی و صحت لکه آتش شبیه‌سازی شده در مقایسه با لکه آتش واقعی

Table 7. Comparison of the agreement and accuracy of the simulated fire spots to the real fire

آتش شیومره Shiomere fire	آتش نلاس Nalas fire	معیار Variable
0.05	14.25	همخوانی (هکتار) Agreement (ha)
0.92	1.20	کم برآورد (هکتار) Underestimation (ha)
0.13	6.70	بیش برآورد (هکتار) Overestimation (ha)
0.05	0.83	ضریب کاپا Kappa coefficient

### بررسی ویژگی‌های کمی و کیفی مواد سوختنی

مواد سوختنی موجود برای گسترش آتش و شدت آتش بسیار مهم هستند. در این پژوهش، میانگین کل حجم مواد سوختی در سه نوع تاج پوشش گیاهی انبوه، نسبتاً انبوه و تنک در جنگل‌های زاگرس (شهرستان سردشت) برآورد شد. میانگین زیست‌توده سوخت کل در اراضی جنگلی منطقه ۳/۹ کیلوگرم در مترمربع برآورد شد (شکل ۲). نتایج مشابهی در برخی از بوته‌زارهای مدیترانه‌ای یافت شده است (۱۵). دیمیتریکوپولوس مقدار کل زیست‌توده سوختی را برای

بوته‌زارهای بلوط کرمس (Kermes) ۳/۶ کیلوگرم در مترمربع گزارش کرد (۱۶). ایکونا و اسپچ در پژوهش‌های خود داده‌های مشابهی را برای بوته‌زارهای اسکروفیل همیشه‌سبز مدیترانه‌ای در اسپانیا (۲/۲ کیلوگرم در مترمربع) نشان دادند (۳۲، ۵۸). در پژوهش‌های دیگری گزارش شد که زیست‌توده کل در درختچه‌های سواحل اقیانوس اطلس بین ۲ تا ۶ کیلوگرم در مترمربع متغیر است (۵۷). در پژوهش حاضر زیست‌توده سوختی خشک‌شده (مرده) در کلاس قطری پایین (یک‌ساعته) با سهم حدود ۱۷ درصد از کل زیست‌توده سوختی

سوخت را ثابت کرده اند. اگرچه پژوهش ساغلام و همکاران (۵۲) نشان دادند که ارتفاع درخت با همه اجزای زیست توده سوختی رابطه معنی داری دارد اما پژوهش حاضر نشان داد در مناطق مورد بررسی، ارتفاع درختان تنها با حجم سوخت ۱۰۰ ساعته و شاخ و برگ زنده رابطه مثبت و معنی داری به ترتیب در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد دارد (جدول ۵). پیک (۴۷) و ویلیامز و مک کلنهل (۶۲) نیز در پژوهش خود ارتفاع درخت را پیش بینی کننده ضعیفی برای برآورد زیست توده سوختی معرفی کردند.

بر اساس نتایج به دست آمده ویژگی های تاج مانند قطر و ارتفاع تاج رابطه مثبت و معنی داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد به ترتیب با حجم سوخت یک ساعته، حجم و عمق لاشبرگ و شاخ و برگ زنده داشته است. کیم و همکاران (۳۹) در پژوهش خود نشان دادند با افزایش تراکم تاج توده های درختی کاج (ارتفاع تاج و قطر تاج)، مواد سوختی کف جنگل افزایش می یابد که به سبب آن این توده ها در معرض بالای آتش سوزی قرار می گیرند. آنها در پژوهش خود به انجام عملیات و تیمارهای مختلف تنک کردن تأکید کردند.

#### شبیه سازی رفتار و گسترش آتش سوزی

پژوهش های متعددی برای تهیه نقشه خطر آتش سوزی در جنگل ها به عنوان یکی از اطلاعات لازم برای پیشگیری و مبارزه با حریق انجام شده است (۳۶، ۳۷، ۳۸، ۳۹). با این حال هنگام وقوع حریق در منابع طبیعی و به ویژه اراضی جنگلی و علفزارها، پیش بینی رفتار و جهت گسترش آتش به منظور کنترل و مدیریت آن مهم است. آگاهی از چگونگی رفتار و گسترش آتش در بازه های زمانی مختلف بر اساس ویژگی های اقلیمی، مواد سوختی و توپوگرافی زمین، لازمه مدیریت صحیح عملیات مبارزه، کنترل و اطفای آتش است. در سال های گذشته پژوهش های متعددی برای شبیه سازی رفتار و گسترش آتش انجام شده است. در پژوهش حاضر قابلیت شبیه سازی های FlamMap و FARSITE در دو مورد آتش سوزی (عمدی و غیر عمدی) در جنگل های زاگرس شمالی و شهرستان سردشت (منطقه نلاس و شیومره) با تهیه اطلاعات مکانی و سطح حریق آنها بررسی شد.

مساحت آتش سوزی واقعی در منطقه نلاس با تاج پوشش تنک که به صورت تصادفی و غیر عمد رخ داده است ۱۵/۵ هکتار بود که با توجه به نزدیکی منطقه حریق به شهر نلاس و وجود جاده در بالادست منطقه و دسترسی مناسب برای ورود مأموران آتش نشانی جنگل، پخش آتش در سریع ترین زمان محدود شد. مدل گسترش آتش این مساحت را ۲۱/۷ هکتار پیش بینی کرد. این مقدار ۶/۲ هکتار بیشتر از سطح حریق واقعی در منطقه است. در این منطقه ۱۴/۲۵ هکتار از سطح حریق شبیه سازی شده با حریق واقعی کاملاً همخوانی داشت. همچنین مدل به ترتیب ۶/۷۰ و ۱/۲۰ هکتار از حریق رخ داده در منطقه را بیشتر و کمتر شبیه سازی کرد (جدول ۷). محاسبه ضریب کاپا برای ارزیابی کارایی مدل برای منطقه نلاس ۰/۸۳ درصد بود که با توجه به این مقدار برآورد به دست آمده توافق قابل توجهی را نشان داد (۲۳). نتایج پژوهش اگر و همکاران (۱) نیز نشان داده است FlamMap دقت بالایی در

(۰/۶۹ کیلوگرم در مترمربع) کمترین مقدار را داشته است که با نتایج پریرا (۴۸) و ساغلام و همکاران (۵۲) مشابه است.

علاوه بر حجم، محتوای رطوبتی و تغییرات رطوبت ماده سوختی نیز عامل مهم دیگری در گسترش آتش سوزی ها است. با توجه به بسته بودن تاج اراضی جنگلی انبوه و تراکم در منطقه شیومره، محتوای رطوبتی مواد سوختی کف این جنگل ها بیشترین رطوبت را نسبت به اراضی جنگلی باز (تنک) و نسبتاً انبوه داشت (جدول ۴). کاهش رطوبت ماده سوختی موجب رشد چشمگیر در گستره آتش و محیط آن می شود، به طوری که سطح سوخته شده در منطقه نلاس بیشتر از منطقه شیومره بود. زمانی که شرایط رطوبتی ماده سوختی رو به کاهش می گراید، احتمال افزایش سطح آتش سوزی وجود دارد (۳۳). فرناندز با تجزیه و تحلیل نرخ گسترش آتش سوزی های تجویزی در توده کاج دریایی پرتغال، علاوه بر سرعت باد و شیب، یکی از عامل های تأثیرگذار بر نرخ گسترش آتش را مقدار رطوبت مواد سوختی ریز (با قطر کم تا متوسط) مرده و خشک شده شناسایی نمود (۱۸). گولد و همکاران (۲۹) نیز در پژوهش مشابهی در جنگل های انبوه اکالیپتوس در استرالیا، نشان دادند مقدار رطوبت مواد سوختی مرده تأثیر بالایی بر نرخ گسترش آتش دارد.

قابل ذکر است بر اساس مشاهدات میدانی یکی دیگر از مهم ترین عوامل افزایش سطح آتش سوزی در منطقه نلاس می تواند به دلیل نوع پوشش گیاهی و علفی کف جنگل در این منطقه باشد که ترکیبی از لاشبرگ، شاخه ها، سوخت نرم و سنگین و گیاهان مرتعی و علفی متراکم یک ساله (عمدتاً گندمیان) است (شکل ۲). گیاهان خشک شامل شاخه ها و ترکه ها، لاشبرگ، علف و بوته های سبک سوخت نرم یا سبک را تشکیل می دهند. سوخت های سبک موجود در جنگل اگرچه حجم کمی دارند، ولی به نسبت این حجم کم، سطحی وسیعی را می پوشانند. این ویژگی باعث می شود به سادگی مشتعل شده و به سرعت بسوزند. در بیشتر موارد سوخت های نرم و سبک سوخت اصلی آتش سوزی جنگلی را تشکیل می دهند. سوخت های نرم و سبک به نسبت سوخت های سنگین سریع تر شعله ور شده و با سرعت بیشتری گسترش می یابند. در حالی که سوخت های سنگین به نسبت سوخت های نرم یا سبک حجم بیشتری دارند. سرعت گسترش آتش ناشی از سوخت های سنگین از سوخت های سبک کمتر است، اما سوخت های سنگین با شدت زیادتری می سوزند (۲۲، ۴۳). این در حالی است که در منطقه جنگلی انبوه (شیومره) درصد بسیار بالایی از کف جنگل توسط لاشبرگ درختان پوشیده بود. نتایج تحلیل تجزیه واریانس (جدول ۲) نیز نشان داد تفاوت معنی داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد مابین حداکثر، میانگین و حداقل ارتفاع پوشش گیاهی، حجم سوخت یک، ۱۰ و ۱۰۰ ساعته، حجم و عمق لاشبرگ بین مناطق مورد بررسی وجود دارد.

تحلیل همبستگی نیز برای بررسی روابط بین ویژگی های توده ها و زیست توده سوختی انجام شد. پژوهش های متعددی در سایر مناطق جنگلی دنیا بر روی جوامع گیاهی مستعد آتش سوزی، رابطه بین ساختار پوشش گیاهی و زیست توده

(۵۶) که در این پژوهش مدل فارسیات حداکثر مقدار ۳/۹۰ متر را برای منطقه نلاس پیش‌بینی کرد. طول شعله آتش از جمله نقشه‌های شبیه‌سازی شده است که مدیران را برای مدیریت مبارزه و کنترل آتش راهنمایی می‌کند.

### نتیجه‌گیری کلی

کمی‌سازی حجم سوخت سطحی به دلیل اهمیت آن در پیش‌بینی رفتار آتش‌سوزی و ارزیابی خطرات احتمالی آتش‌سوزی، یک نیاز ضروری برای یگان حفاظت منابع طبیعی و سازمان‌های مدیریت آتش‌نشانی در ایران است. اگرچه حجم مواد سوختنی کسری از کل زیست‌توده موجود در آتش‌سوزی‌های جنگلی را نشان می‌دهند، یافته‌های این تحقیق نشان داد این داده‌ها در تاج پوشش‌های مختلف و در ارتباط با متغیرهای مختلف مواد سوختی، ناهمگن و متفاوت هستند. این مطالعه متغیرهای مختلف کمی و کیفی مواد سوختنی و روابط موجود بین آنها را بررسی کرد و دریافت که تغییرات مکانی در حجم مواد سوخت سطحی به ویژگی‌های مختلف ساختار پوشش گیاهی و عوامل توپوگرافیکی و اقلیمی مرتبط است. این پژوهش به‌طور کلی با توجه به جمع‌آوری طیف وسیعی از داده‌های مواد سوختی در هر منطقه، می‌تواند کمک ارزشمندی به تحقیقات تخمین زیست‌توده سوختی اراضی جنگلی زاگرس ارائه دهد.

با در نظر گرفتن گسترش مکانی مدل‌های سوختی، ویژگی‌های آب‌وهوا و توپوگرافی، شبیه‌سازی‌ها و محاسبات رفتار و گسترش حریق‌های رخ داده، پیش‌بینی‌کننده‌های رفتار و گسترش آتش‌سوزی‌های بالقوه (شدت آتش، سرعت گسترش آتش و طول شعله) برای دو مورد آتش‌سوزی عمودی و غیر عمد (تصادفی) برآورد شدند. نتایج نشان داد که مناطق در معرض آتش‌سوزی‌های تصادفی، توده‌های درختی بلوط با شیب زیاد هستند و بایستی هنگام تصمیم‌گیری در مورد عملیات مبارزه با حریق، اقدامات لازم برای جلوگیری از گسترش حریق و کاهش سوخت‌های قابل احتراق موجود در این مناطق توجه ویژه‌ای کرد تا طول شعله، نرخ گسترش و شدت خط آتش به‌طور چشمگیری کاهش یابد. این محاسبات و استفاده از مدل‌های رفتار آتش به قابلیت فهم و پیش‌بینی رفتار و گسترش آتش برای مدیریت کارآمد حریق کمک می‌کند. خروجی این مدل‌ها به مقدار قابل توجهی وابسته به داده‌های ورودی (مدل‌های سوخت، محتوای رطوبتی و داده‌های آب‌وهوایی) است. در این پژوهش، رفتار و گسترش حریق در دو منطقه با ویژگی‌های سوختی، تاج پوشش و نوع حریق رخ داده ارزیابی شد. نتایج همخوانی سطح حریق شبیه‌سازی شده با حریق واقعی در منطقه با آتش‌سوزی عمودی نشان‌دهنده توافقی بالا بین آنها بوده است و مشخص شد که علاوه بر ویژگی‌های داده‌های ورودی ذکر شده، علت وقوع آتش‌سوزی (عمدی و کنترل شده یا تصادفی و غیر عمد) نیز در توافقی بالا و شبیه‌سازی مناسب رفتار و گسترش آتش می‌تواند یکی از عوامل مؤثر باشد.

شبیه‌سازی رفتار و گسترش آتش‌سوزی‌های جنگلی دارد. جهدی و همکاران (۳۳) نیز در پژوهش خود نشان دادند مدل آتش FlamMap (با ضریب کاپای ۰/۷۹) ابزار مناسبی برای پیش‌بینی رفتار و گسترش حریق‌های پارک جنگلی گلستان است. مقدار همخوانی به‌دست‌آمده در این پژوهش را نمی‌توان به‌سادگی با نتایج سایر پژوهش‌ها با توجه به تفاوت مناطق مورد بررسی مقایسه کرد، زیرا مدل‌های سوخت مختلف، داده‌های هواشناسی و شرایط توپوگرافی هر منطقه می‌تواند منجر به نتایج متفاوتی شود (۵۴).

سطح حریق در منطقه شیومره یک هکتار بوده است که مدل گسترش آتش این مساحت را ۰/۱۸ هکتار پیش‌بینی کرد. ۰/۰۵ هکتار از سطح حریق شبیه‌سازی شده با حریق واقعی همخوانی داشت. مدل به‌ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۱۳ هکتار از حریق رخ داده در منطقه را بیشتر و کمتر شبیه‌سازی کرده است (جدول ۶). نتایج ارزیابی کارایی مدل شبیه‌سازی گسترش آتش در منطقه شیومره نشانگر توافق جزئی و خفیف سطح گسترش آتش شبیه‌سازی شده و حریق واقعی بود که دلیل آن می‌تواند به علت نوع حریق رخ داده در منطقه باشد. با توجه به شواهد موجود در منطقه و همچنین مصاحبه با جنگل‌نشینان روستای شیومره، نوع حریق رخ داده عمودی و در سطحی کنترل شده (با استفاده از نفت) و برای توسعه و ایجاد اراضی کشاورزی جدید در محل وقوع حریق بوده است. بسیاری از آتش‌سوزی‌های جنگل در اثر عوامل انسانی مانند آتش‌سوزی عمدی، سیگارهای دور انداخته شده، جرقه ابزار و وسایل، همچنین قوس‌های الکتریکی خطوط انتقال نیرو و غیره پدید می‌آیند (۲۵). آتش زدن جنگل به دلیل توسعه و ایجاد اراضی کشاورزی یکی دیگر از عوامل انسانی است (۴۲). تحقیق آندلا و ون درورف (۴) در شمال آفریقا نشان داده است تغییرات سریع جمعیتی و اجتماعی-اقتصادی موجب استفاده از آتش برای تبدیل ساوان‌ها به زمین زراعی شده است چراکه این روش ارزان‌ترین راه برای آماده‌سازی زمین برای کشت است. بر اساس پژوهش فینی و همکاران (۲۱) نوع و علت وقوع حریق، اشتباه در تعیین موقعیت مکانی و زمانی آتش، اندازه‌گیری مواد سوختی، رطوبت و اطلاعات هواشناسی و غیره در کاهش اعتبار مدل‌های رفتار و گسترش آتش نقش دارد.

زمان آتش‌سوزی شبیه‌سازی شده برای منطقه نلاس ۱۰۰ دقیقه بود که مناسب‌ترین زمان با مدت‌زمان واقعی آتش‌سوزی بود که بر اساس اطلاعات اداره کل منابع طبیعی شهرستان سردشت از ساعت ۱۳ تا ۱۴/۳۰ ادامه داشت. بیشترین درجه گسترش آتش‌سوزی شبیه‌سازی شده نیز با سرعت ۲۱/۱۸ متر در دقیقه در قسمت‌های جنوبی جبهه آتش و منطقه نلاس دیده شد که بر اساس نقشه‌های توپوگرافی و مدل سوخت در پوشش‌های درختی بلوط با زیراشکوب گیاهان مرتعی با شیب زیاد رخ داده است. مدل‌های سوخت موجود در این منطقه GR4 و TU1 در گروه سوخت‌های خوب (ریز) قرار دارند و طول شعله در این پوشش‌ها بلند است

## منابع

1. Ager, A.A., N.M. Vaillant, M.A. Finney and H.K. Preisler. 2012. Analyzing wildfire exposure and source sink relationships on a fire prone forest landscape. *Forest Ecology and Management*, 267: 271-283.
2. Alaska Satellite Facility (ASF). 2021. <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>
3. Amiri, T., A. Banj Shafiei, M. Erfanian, O. Hosseinzadeh and H. Beygi Heidarlou. 2017. Determining of effective criteria in locating firefighting station in forest. *Forest Research and Development*, 2(4): 379-393 (In Persian).
4. Andela, N. and G.R. Van Der Werf. 2014. Recent trends in African fires driven by cropland expansion and El Niño to La Niña transition. *Nature Climate Change*, 4(9): 791-795.
5. Anderson, H.E. 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior [Grass, shrub, timber, and slash, photographic examples, danger ratings]. USDA Forest Service general technical report INT-Intermountain Forest and Range Experiment Station (USA).
6. Baeza, M.J., M. De Luis, J. Raventós and A. Escarré. 2002. Factors influencing fire behaviour in shrublands of different stand ages and the implications for using prescribed burning to reduce wildfire risk. *Journal of Environmental Management*, 65(2): 199-208.
7. Beyers, J.L., J.K. Brown, M.D. Busse, L.F. DeBano, W.J. Elliot P.F. Folliott, G.R. Jacoby, J.D. Knoepp, J.D. Landsberg, D.G. Neary, J.R. Reardon, J.N. Rinne, P.R. Robichaud, K.C. Ryan, A.R. Tiedemann and M.J. Zwolinski. 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, 250 p.
8. Beygi Heidarlou, H., A. Banj Shafiei and M. Erfanian. 2015. Evaluating the Fuzzy Weighted Linear Combination Method in Forest Fire Risk Mapping (Case study: Sardasht Forests, West Azerbaijan Province, IRAN). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 22(3): 29-52 (In Persian).
9. Beygi Heidarlou, H., A. Banj Shafiei and M. Erfanian. 2015. Forest fire risk mapping using analytical hierarchy process technique and frequency ratio method (Case study: Sardasht Forests, NW Iran). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 22(4): 559-573 (In Persian).
10. Bihanta, M.R. and M.A. Zare Chahouki. 2010. Principles of statistics for the natural resources science. 1<sup>st</sup> edn., University of Tehran Press, Tehran, Iran. 300 pp.
11. Bilgili, E. and B. Saglam. 2003. Fire behavior in maquis fuels in Turkey. *Forest Ecology and Management*, 184(1-3): 201-207.
12. Biranvand, A., S. Babaei Kafaki and H. Kiadaliri. 2011. Investigation the Ecological Factors Affecting Fire Spread in Forest Ecosystems (Case Study: Kakareza-Lorestan). *Journal of Renewable Natural Resources Research*, 2(2): 1-13 (In Persian).
13. Bond-Lamberty, B., C. Wang, S.T. Gower and J. Norman. 2002. Leaf area dynamics of a boreal black spruce fire chronosequence. *Tree physiology*, 22(14): 993-1001.
14. Brown, J.K., R.D. Oberheu and C.M. Johnston. 1982. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior West. General technical report (No. PB-83-118125). Forest Service, Ogden, UT (USA). Intermountain Forest and Range Experiment Station, 52 pp.
15. De Luis, M., M.J. Baeza, J. Raventós and J.C. González-Hidalgo. 2004. Fuel characteristics and fire behaviour in mature Mediterranean gorse shrublands. *International Journal of Wildland Fire*, 13(1): 79-87.
16. Dimitrakopoulos, A.P. 2002. Mediterranean fuel models and potential fire behaviour in Greece. *International Journal of Wildland Fire*, 11(2): 127-130.
17. Encinas, A.H., L.H. Encinas, S.H. White, A.M. del Rey and G.R. Sánchez. 2007. Simulation of forest fire fronts using cellular automata. *Advances in Engineering Software*, 38(6): 372-378.
18. Fernandes, P.M. 2009. Examining fuel treatment longevity through experimental and simulated surface fire behaviour: a maritime pine case study. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(12): 2529-2535.
19. Finney, M.A. 2006. An overview of FlamMap modeling capabilities. In Proc. of Conf. on fuels management - How to measure success, Andrews P.L., and Butler B.W. (eds.). 213-220 pp. USDA Forest Service, RMRS-P41.
20. Finney, M.A., I.C. Grenfell, C.W. McHugh, R.C. Seli, D. Trethewey, R.D. Stratton and S. Brittain. 2011. A method for ensemble wildland fire simulation. *Environmental Modeling & Assessment*, 16(2): 153-167.
21. Finney, M.A., S. Britten and R. Seli. 2003. FlamMap2 Beta Version 3.0.1. Fire Sciences Lab and Systems for Environmental Management, Missoula, Montana.
22. Fitzgerald, S.A., C.A. Berger and D.M. Leavell. 2019. Fire FAQs: What is Forest Fuel, and what are Fuel Treatments? Oregon State University Extension Service.
23. Foody, G.M. 2020. Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. *Remote Sensing of Environment*, 239: 111630.

24. Gambiza, J., B.M. Campbell, S.R. Moe and P.G. Frost. 2005. Fire behaviour in a semi-arid *Baikiaea plurijuga* savanna woodland on Kalahari sands in western Zimbabwe. *South African Journal of Science*, 101(5): 239-244.
25. Gillett, N.P., A.J. Weaver, F.W. Zwiers and M.D. Flannigan. 2004. Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires. *Geophysical Research Letters*, 31(18): L18211.
26. Glasa, J. and L. Halada. 2008. On elliptical model for forest fire spread modeling and simulation. *Mathematics and Computers in Simulation*, 78(1): 76-88.
27. (GFW) Watch Forest Global <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/IR>
28. Gomes, L., H.S. Miranda, D.V. Silvério and M.M. Bustamante. 2020. Effects and behaviour of experimental fires in grasslands, savannas, and forests of the Brazilian Cerrado. *Forest Ecology and Management*, 458: 117804.
29. Gould, J.S., W.L. McCaw, N.P. Cheney, P.F. Ellis, I.K. Knight and A.L. Sullivan (Eds.). 2008. *Project Vesta: fire in dry eucalypt forest: fuel structure, fuel dynamics and fire behaviour*. Csiro Publishing. Perth, WA, 218 p.
30. Gray, K.L. and E. Reinhardt. 2003. Analysis of algorithms for predicting canopy fuel. In *Second international wildland fire ecology and fire management congress and fifth symposium on fire and forest meteorology; 2003 November 16-20; Orlando, FL. Boston, MA: American Meteorological Society. P5. 8. 11 p.*
31. Hély, C., S. Alleaume, R.J. Swap, H.H. Shugart and C.O. Justice. 2003. SAFARI-2000 characterization of fuels, fire behavior, combustion completeness, and emissions from experimental burns in infertile grass savannas in western Zambia. *Journal of Arid Environments*, 54(2): 381-394.
32. ICONA. 1993. *Manual de Operaciones Contra Incendios Forestales*, Instituto Nacional Para la Conservacion de la Naturaleza (Spain), Madrid, 283 pp.
33. Jahdi, R., A.A. Darvishsefat and V. Etemad. 2016. Assessing the impact of fuel moisture conditions on fire spread and behavior in Golestan National Park. *Journal of Forest and Wood Products*, 68(4): 799-813 (In Persian).
34. Jahdi, R., A.A. Darvishsefat and V. Etemad. 2015. Local scale fuel type mapping and surface fire behavior prediction using FARSITE (case study: Toshi Forest-Siahkal). *Journal of Forest and Wood Products*, 22(2): 207-225 (In Persian).
35. Jahdi, R., M. Salis, A.A. Darvishsefat, M.A. Mostafavi, F.J. Alcasena Urdíroz, V. Etemad, O.M. Lozano and D. Spano. 2015. Calibration of FARSITE simulator in northern Iranian forests. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, núm. 15: 443-459.
36. Jahdi, R., M. Salis, M. Arabi and B. Arca. 2019. Fire modelling to assess spatial patterns of wildfire exposure in Ardabil, NW Iran. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42: 577-581.
37. Jaiswal, R.K., S. Mukherjee, K.D. Raju and R. Saxena. 2002. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 4(1): 1-10.
38. Keane, R.E., R. Burgan and J. van Wagtenonk. 2001. Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. *International Journal of Wildland Fire*, 10(4): 301-319.
39. Kim, D.W., W. Chung and B. Lee. 2016. Exploring tree crown spacing and slope interaction effects on fire behavior with a physics-based fire model. *Forest Science and Technology*, 12(4): 167-175.
40. Larson, M.G. 2008. Analysis of variance. *Circulation*, 117(1): 115-121.
41. Liu, W., S. Wang, Y. Zhou, L. Wang and S. Zhang. 2010. Analysis of forest potential fire environment based on GIS and RS. In *2010 18th International Conference on Geoinformatics (1-6 pp)*. Ieee.
42. Morton, D.C., R.S. DeFries, Y.F. Shimabukuro, L.O. Anderson, E. Arai, F. del Bon Espirito-Santo, R. Freitas and J. Morissette. 2006. Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(39): 14637-14641.
43. Nolan, R.H., O.F. Price, S.A. Samson, M.E. Jenkins, S. Rahmani and M.M. Boer. 2022. Framework for assessing live fine fuel loads and biomass consumption during fire. *Forest Ecology and Management*, 504: 119830.
44. Ntaimo, L. and B.P. Zeigler. 2005. Integrating Fire Suppression into a DEVS Cellular Forest Fire Spread Model. *Proc. of the 2005 Spring Simulation Multi Conference, San Diego, CA, USA, April 3-7, 48-54 pp.*
45. Okafor, V.N., M.C. Obiadi and J.N. Obiefuna. 2020. Correlations of major flame characteristics of some fire tolerant trees in South-East Nigeria by coefficient of determination (R<sup>2</sup>). *Journal of Scientific Research and Reports*, 26(4): 81-98.

46. Ozenen Kavlak, M., S.N. Cabuk and M. Cetin. 2021. Development of forest fire risk map using geographical information systems and remote sensing capabilities: Ören case. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(25): 33265-33291.
47. Peek, J.M. 1970. Relation of canopy area and volume to production of three woody species. *Ecology*, 51(6): 1098-1101.
48. Pierce, J.L., G.A. Meyer and A.T. Jull. 2004. Fire-induced erosion and millennial-scale climate change in northern ponderosa pine forests. *Nature*, 432(7013): 87-90.
49. Podur, J., D.L. Martell and K. Knight. 2002. Statistical quality control analysis of forest fire activity in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(2): 195-205.
50. Rothermel, R.C. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station Research Paper, INT-115, Ogden, UT, 49 pp.
51. Roussopoulos, P.J. and R.M. Loomis. 1979. Weights and Dimensional Properties of Shrubs and Small Trees of the Great Lakes Conifer Forest (Vol. 178). Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station.
52. Sağlam, B., O. Küçük, E. Bilgili, B.D. Durmaz and I. Baysal. 2008. Estimating fuel biomass of some shrub species (Maquis) in Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32(4): 349-356.
53. Sah, J.P., M.S. Ross, S. Koptur and J.R. Snyder. 2004. Estimating aboveground biomass of broadleaved woody plants in the understory of Florida Keys pine forests. *Forest Ecology and Management*, 203(1-3): 319-329.
54. Salis, M. 2007. Fire Behavior simulation in Mediterranean Maquis using FARSITE (Fire Area Simulator), PhD Doctoral Thesis, Università Degli Studi Di Sassari, 166 pp.
55. Salis, M., B. Arca, L. Del Giudice, P. Palaiologou, F. Alcasena-Urdiroz, A. Ager, M. Fiori, G. Pellizzaro, C. Scarpa, M. Schirru, A. Ventura and P. Duce. 2021. Application of simulation modeling for wildfire exposure and transmission assessment in Sardinia, Italy. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 58: 102189.
56. Scott, J.H. and R.E. Burgan. 2005. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station; 72 pp.
57. Soto, B., R. Basanta and F. Diaz-Fierros. 1997. Effects of burning on nutrient balance in a area of gorse (*Ulex europaeus* L.) scrub. *Science of the Total Environment*, 204(3): 271-281.
58. Specht, R.L. 1969. A comparison of the sclerophyllous vegetation characteristic of Mediterranean type climates in France, California, and Southern Australia. I. Structure, morphology, and succession. *Australian Journal of Botany*, 17(2): 277-292.
59. Van Laar, A. and A. Akca. 2007. *Forest mensuration*, Springer, The Netherlands.
60. Wan, T.A.N.G., H.U. Jun, H. Zhang, W.U. Pan and H.E. Hua. 2015. Kappa coefficient: a popular measure rater agreement. *Shanghai Archives of Psychiatry*, 27(1): 62.
61. Wagner III, W.E. 2019. *Using IBM® SPSS® statistics for research methods and social science statistics*. 208 pp., Sage Publications, California, USA.
62. Williams, R.A. and J.R. McClenahan. 1984. Biomass prediction equations for seedlings, sprouts, and saplings of ten central hardwood species. *Forest Science*, 30(2): 523-527.
63. Xofis, P., G. Tsiourlis and P. Konstantinidis. 2020. A Fire Danger Index for the early detection of areas vulnerable to wildfires in the Eastern Mediterranean region. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 5(2): 1-13.
64. Yassemi, S., S. Dragičević and M. Schmidt. 2008. Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behaviour. *ecological modelling*, 210(1-2): 71-84.
65. Yavuz, M., B. Sağlam, O. Kucuk and A. Tufekcioglu. 2018. Assessing forest fire behavior simulation using FlamMap software and remote sensing techniques in Western Black Sea Region, Turkey. *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 18(2): 171-188.
66. Zigner, K., L. Carvalho, S. Peterson, F. Fujioka, G.J. Duine, C. Jones, D. Roberts and M. Moritz. 2020. Evaluating the ability of FARSITE to simulate wildfires influenced by extreme, downslope winds in Santa Barbara, California. *Fire*, 3(3): 29.

## Modeling Forest Fire Behaviour in Controlled and Accidental Ignitions in Iranian Northern Zagros Forests, with an Emphasis on Fuel Load

Asma Karamat Mirsheklou<sup>1</sup>, Abbas Banj Shafiei<sup>2</sup> and Hadi Beygi Heidarlou<sup>3</sup>

1- Master of Forestry, Forestry Department, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

2- Professor, Forestry department, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran,

(Corresponding author: a.banjshafiei@urmia.ac.ir)

3- Ph.D. of Forestry, Department of Forest Engineering, Forest Management Planning and Terrestrial Measurements, Faculty of Silviculture and Forest Engineering, Transilvania University of Brasov, Brasov, Romania

Received: 4 November, 2022

Accepted: 5 February, 2023

### Extended Abstract

**Introduction and Objective:** The behavior, spread, and intensity of forest fires are heavily influenced by the type and volume of fuels in a natural region, as well as topography and climate. Assessing the volume of fuels in different forest canopies is very important for crisis management and the prevention of possible fires. The purpose of this study is to determine the amount and type of fuels and fire behavior of Iranian Northern Zagros forests in Sardasht County in different forest densities.

**Material and Methods:** Therefore, according to the statistics of recent fires in Sardasht, the study areas (Nalas and Shiomereh) were selected based on the percentage of forest vegetation cover (open, relatively dense, and dense). In this study, one square meter samples were used to measure the properties of fuels such as average vegetation height, 1-, 10-, and 100-hr time-lag fuels, total fuel volume, and litter volume and depth. Study of fire behavior and spread in two areas was performed using FlamMap and FARSITE fire models using slope, aspect, elevation, fuel model, and canopy cover maps.

**Results:** The results showed that the total fuel volume in the studied forest areas is 3.9 kg/m<sup>2</sup>. Also, the maximum 1-hr fuel volume was calculated in dense forest (Shiomereh). The highest fuel volumes of 10-, and 100-hr time-lag fuels were observed in forest areas with relatively dense canopy (Shiomereh). The calculation of the fuel moisture content percentage (FMC%) also showed that forest areas with dense canopy have the highest amount of FMC% among forest lands with relatively dense (Shiomereh) and open (Nalas) canopy. Also, comparison of the real fire spot and the simulated fire spread map in the Nalas region with unintentional fire (with open canopy) with a kappa coefficient of 0.83 was highly consistent and the model was able to have a significant agreement with the actual extent of fire spread. The agreement coefficient in the Shiomereh region with a dense and relatively dense canopy cover due to a deliberate and controlled fire showed a 0.05 agreement.

**Conclusion:** These findings showed that in addition to the characteristics of the forest fuels, the cause of the fire (intentional and controlled or accidental and unintentional) is also effective in simulating the behavior and spread of fire. The results of this study can be used in firefighting, crisis management, and many studies related to the study of fire behavior and management of forest areas.

**Keywords:** Forest fire, Fire behaviour simulation, Fuel load, Fire spread rate