

موادسوختنی سطحی و تاجی و رفتار آتش در بوم‌سازگان جنگل‌های طبیعی و دست-کاشت حوضه آبخیز ۲۵ شنرود سیاهکل

رقیه جهدی^{۱*}، مهدی عربی^۲

*-دکترای تخصصی، استادیار، گروه علوم مهندسی جنگل، دانشگاه محقق اردبیلی

۲-دکترای تخصصی، استادیار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

*ایمیل نویسنده مسئول: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶

چکیده

جنگل‌های سیاهکل در شمال ایران در دهه‌های اخیر فصول آتش‌سوزی طولانی و شدیدی را تجربه کرده‌اند که در بیشتر موارد ناشی از هوای خشک، گرم و بادی بوده است. شناسایی ماده‌سوختنی جنگل و پویایی‌های خطر آتش برای استراتژی یکپارچه مدیریت آتش جنگل مهم است. برای درک اینکه چگونه ساختار جنگل بر این پویایی‌ها اثر می‌گذارد، موادسوختنی جنگل و رفتار آتش در تیپ‌های مختلف جنگل در منطقه مورد مطالعه کمی‌سازی شد. در این کار، نتایج تجزیه و تحلیل رفتار آتش از سوابق تاریخی آتش، مدل ماده‌سوختنی، آب و هوا و رطوبت ماده‌سوختنی ارائه شد. از یک رویکرد مدل-سازی برای تخمین پارامترهای فیزیکی رفتار آتش سطحی شامل طول شعله و اندازه آتش و همچنین احتمال وقوع آتش تاجی استفاده شد. حوزه آبخیز جنگلی وسیع در شهرستان سیاهکل در شمال ایران، با جنگل‌های پهن‌برگ معتدله و جنگلکاری‌های آمیخته با ترکیب متغیر انتخاب شد. برای اجرای مدل، داده ساختار و ترکیب جنگل و اطلاعات فیزیکی جمع‌آوری شد. بر اساس نتایج، سطوح متوسط تا زیاد اندازه آتش و طول شعله شناسایی شد که ناشی از در دسترس بودن زیاد زی‌توده ریز بسیار خشک بود. پتانسیل آتش تاجی در کل سیمای سرزمین مورد مطالعه بسیار متفاوت بود. توده‌های کوتاه بیشتر مستعد آتش تاجی بودند. نتایج نشان می‌دهد که پتانسیل آتش تاجی در توده‌های دست‌کاشت به‌ویژه سوزنی‌برگ در مقایسه با توده‌های طبیعی بیشتر است. بعلاوه، مراحل اولیه توده‌های دست‌کاشت به دلیل ارتفاع متوسط کم و ارتفاع پایه تاج کم، بیشتر در مواجهه با آتش تاجی هستند. این یافته‌ها می‌تواند در شناسایی مناطق اولویت‌دار که در آن ساختار جنگل نیاز به مدیریت دارد کمک کند.

کلمات کلیدی

"جنگل‌های سیاهکل"، "مدل‌های ماده‌سوختنی"، "رویکرد مدل‌سازی"، "خطر آتش"

۱- مقدمه

به عنوان پیشران‌های مهم وقوع، رفتار و گسترش آتش در جنگل‌ها در نظر گرفته می‌شود (Gómez-González et al., 2019; Castillo et al., 2020). افزایش جنگلکاری‌ها با انباشت زیاد ماده‌سوختنی و شرایط آب و هوایی گرم‌تر و خشک‌تر می‌تواند فراوانی و بزرگی آتش‌سوزی را افزایش دهد (McWethy et al., 2018). تغییر اقلیم با افزایش بار ماده‌سوختنی و پیوستگی ماده‌سوختنی در بیشتر مناطق مستعد آتش‌سوزی مستلزم کار بیشتر برای مقابله با آتش‌سوزی است. در چنین شرایطی نیاز به درک بهتر و پیش‌بینی رفتار آتش در شرایط محیط‌زیست مختلف است. اگرچه فعل و انفعالات پیچیده بین عوامل متعدد اثرگذار بر رفتار آتش، پیش‌بینی خطر آتش را چالش‌برانگیز می‌کند، به ویژه زمانی که سیمای سرزمین مورد مطالعه بزرگ است (به عنوان مثال، ۱۰۰۰-۱۰۰۰۰ هکتار)، چارچوب زمانی مطالعه طولانی است (به عنوان مثال، ۱۰۰-۱۰ سال) و پیش‌بینی‌های مشخص مکانی مورد نیاز است (Hilton et al., 2015). تلاش‌های اولیه برای پیش‌بینی مشخصات رفتار آتش جنگل بر آتش‌سوزی‌های سطحی، عمدتاً سرعت گسترش و شدت آنها متمرکز بود (Scott, 2006). در ادامه تلاش‌های تحقیق و توسعه، چندین مدل تحقیقاتی ریاضی و مدل‌های عملیاتی برای پیش‌بینی رخداد و نرخ گسترش آتش‌سوزی تاجی ارائه شد، مانند سیستم رتبه‌بندی خطر آتش جنگلداری کانادا. این مدل‌ها نیاز به داده مکانی دقیق مانند توپوگرافی، ساختار پوشش گیاهی (ماده‌سوختنی) جنگل، آب و هوا و

تاب‌آوری جنگل، ظرفیت این بوم‌سازگان برای بازیابی ساختار، عملکرد و بازخورد‌های خود پس از یک آشفستگی مانند آتش‌سوزی است (Hessburg et al., 2019). در حالی که مقاومت جنگل به عنوان بخش اصلی بوم‌سازگان‌های تاب‌آور است و به‌عنوان دشواری یا سهولت تغییر وضعیت، عملکرد و پیوندهای فرآیند-الگوی یک بوم-سازگان تعریف می‌شود (Holling, 1973). در مورد آتش‌سوزی‌ها، مقاومت جنگل به عنوان ظرفیت تک درخت یا گروهی از درختان برای مقاومت در برابر احتراق، سوختن و مرگ و میر ناشی از آتش‌سوزی است. آتش‌سوزی از غم‌انگیزترین، رایج‌ترین و از نظر مقیاس بزرگ-ترین آشفستگی‌ها در اغلب بوم‌سازگان‌های جنگلی است. آثار آتش‌سوزی روی این بوم‌سازگان‌ها وابسته به مقیاس زمانی است. آثار کوتاه‌مدت شامل از بین رفتن پوشش گیاهی، افزایش خطر فرسایش، آبگریزی خاک یا از بین رفتن ماده آلی و تغییر در زیستگاه حیات وحش است. در حالی که با گذشت زمان پس از آتش‌سوزی، احتمالاً بازسازی پوشش گیاهی، تثبیت خاک و بازیابی ویژگی‌های نگهداری آب و حرکت اکولوژی گیاهان و جانوران به سمت شرایط قبل از آتش رخ می‌دهد (Martin et al., 2016). عوامل فیزیکی، اقلیمی و زیستی متعددی مانند ارتفاع، شیب، نوع پوشش گیاهی و نیز عوامل انسانی مانند تراکم جمعیت، افزایش سکونت انسان در مناطق واسط زمین شهری-جنگلی (WUI) و گسترش جنگلکاری‌ها با گونه‌های غیربومی

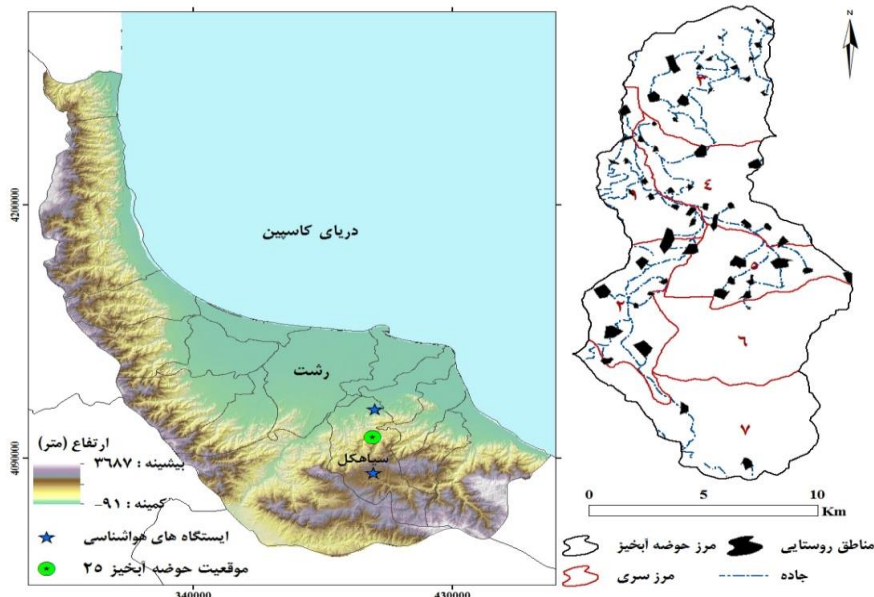
روشی که برای تهیه نقشه مدل‌های ماده‌سوختنی با استفاده از نقشه پوشش گیاهی که بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی توسعه یافته، ارائه می‌شود. سپس مدل‌سازی رفتار آتش‌سوزی‌های سطحی و تاجی با استفاده از شبیه‌سازی FlamMap MTT (Finney, 2006) و بر پایه مدل‌های ماده‌سوختنی محلی و اطلاعات تاریخی آتش‌سوزی در حوضه آبخیز جنگلی ۲۵ شنرود سیاهکل انجام می‌شود. نقشه‌های خروجی شبیه‌سازی در این مطالعه شامل برآوردهایی از مشخصه‌های اصلی آتش سطحی یعنی طول شعله و اندازه آتش، به علاوه احتمال رخداد آتش تاجی است که برای اطلاع مدیران زمین در مورد مکان‌های مناسب برای تیمارهای جنگل‌شناسی با هدف حذف و کاهش ماده‌سوختنی و در نهایت برای طراحی استراتژی‌هایی برای مدیریت خطر آتش‌سوزی استفاده می‌شود.

۲- روش انجام تحقیق

• محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبخیز جنگلی ۲۵ شنرود سیاهکل است که در بخش پائین‌بند و میان‌بند جنگل‌های شمال کشور در شهرستان سیاهکل واقع شده است. مساحت حوضه آبخیز مورد مطالعه ۱۹۰ کیلومترمربع است که در دامنه ارتفاعی ۲۳ تا ۲۰۹۲ متر از سطح دریا گسترش دارد (شکل ۱). میانگین دمای سالانه این حوضه ۱۸ درجه سانتی‌گراد است. میانگین بارندگی سالانه در حوضه عموماً با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد که به علت فاصله از دریا نسبت به ناحیه جلگه‌ای رطوبت کمتری داشته و در نتیجه میزان بارندگی از حدود ۱۲۰۰ میلی‌متر در نزدیکی رودخانه شمرد در لبه شمال شرقی حوضه تا حدود ۸۰۰ میلی‌متر در نزدیکی قله دیلمان در گوشه جنوب شرقی متغیر است.

رطوبت ماده‌سوختنی دارد (Alexander, 2013). در این بین ماده-سوختنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا تنها عنصری از سیمای-سرزمین است که می‌تواند به‌منظور تأثیرگذاری بر رفتار آتش‌سوزی‌های آتی اصلاح شوند (Duff et al., 2017). بنابراین شناسایی مشخصات ساختاری ماده‌سوختنی جنگل شامل توزیع افقی و عمودی، درصد ماده‌سوختنی زنده و مرده و فراوانی مولفه‌های رویشی در بالای سطح زمین از جمله بقایای چوبی، شاخه‌ها، پوست‌ها، شاخ و برگ و ساقه‌ها مهم است (Taneja et al., 2021). تیپ‌های ماده‌سوختنی در سیستم‌های پیش‌بینی رفتار آتش به‌صورت کمی با استفاده از ترکیب و ساختار جنگل، مواد سوختنی سطحی و تاجی و پوشش خاص کف جنگل و وجود لایه آلی (پوشش گیاهی پوسیده کف جنگل؛ Duff) تعریف می‌شوند (Arroyo et al., 2008). مدل ماده‌سوختنی سطحی شامل مولفه‌های تأخیر زمانی موادسوختنی بر اساس طبقات قطری موادسوختنی مرده (۱-ساعت، ۱۰-ساعت، ۱۰۰-ساعت و ۱۰۰۰-ساعت به ترتیب برابر با $0.16 < 2/5, 0.16 < 7/6 - 2/5$ و $7/6 > 1000$ سانتی‌متر)، علفی زنده و چوبی زنده (درختچه‌ای)، نسبت سطح به حجم، عمق بستر مواد سوختنی، محتوای گرما و رطوبت اطفای ماده سوختنی مرده می‌باشد. مدل ماده‌سوختنی تاجی نیز شامل مولفه‌های ارتفاع توده، ارتفاع پایه تاج و تراکم وزنی تاج است. این اطلاعات ماده-سوختنی از طریق نقشه‌برداری، داده‌های سنجش از راه دور مانند مقادیر بازتاب ماهواره‌ای و ویژگی‌های ماده‌سوختنی مورد استفاده در مدل‌های رفتار آتش‌سوزی تهیه می‌شوند. در جنگل‌های کهن هیرکانی در شمال ایران، توسعه اراضی کشاورزی، تصاحب زمین در مقیاس بزرگ، شیوه‌های بهره‌برداری در گذشته، چرای بیش از حد دام‌ها و تیمارهای جنگل‌شناسی ساختار جنگل را دگرگون کرده و رژیم آتش را از آتش با شدت کم تا آمیخته به آتش با شدت زیاد در ۳ دهه گذشته تغییر داده است. علاوه بر این، درختان سریع‌الرشد مانند صنوبر، افرا، توسکا و کاج در جنگلکاری‌های بزرگ-مقیاس تحت جنگلداری با چرخش کوتاه در این منطقه استفاده شده است. در این مقاله، در ابتدا،



شکل ۱- نقشه موقعیت حوضه آبخیز ۲۵ شنرود سیاهکل

• پوشش گیاهی

شرایط تاج در سطح توده را توصیف می‌کند. همه این داده‌ها باید به‌عنوان فایل‌های رستری با اندازه تفکیک، وسعت، سیستم تصویر و سیستم مختصات مرجع یکسان ثبت شوند و در یک فایل سیمای-سرزمین (LCP) به‌عنوان ورودی برای MTT، ترکیب شوند. علاوه بر این، داده‌های آب و هوا و رطوبت ماده‌سوختنی و نقشه رستری احتمال احتراق بر پایه داده تاریخی آب و هوا و آتش در منطقه مورد مطالعه مورد نیاز است. در این مطالعه داده‌های توپوگرافی از منابع موجود و داده‌های آب و هوا از مجموعه داده هواشناسی روزانه تاریخی از ایستگاه‌های هواشناسی دیلمان و ازبرم (شکل ۱) در دوره مورد مطالعه تهیه شد. در حالی که داده ساختار تاج و مواد سوختنی سطحی بر اساس اطلاعات موجود از پوشش گیاهی منطقه و نیز آماربرداری‌های میدانی تکمیلی تهیه شد.

اغلب این حوضه آبخیز، جنگلی (۶۵٪) است که با توده‌های جنگلی طبیعی راش (*Fagus orientalis Lipsky*) و پهن‌برگ آمیخته (مرمرز (*Carpinus betulus L.*))، انجیلی (*Parrotia persica*)، بلوط (*Quercus Castaneifolia C.A.Mey. (DC.)*)، توسکای بیلاقی (*Alnus subcordata C.A. Mey.*)، توسکای قشلاقی (*Alnus glutinosa L. C.A.Mey.*)، به ترتیب با ۳۸ درصد و ۱۸ درصد پوشش در بخش‌های جنوبی و شمالی این حوضه آبخیز غالب است. همچنین توزیع جنگلکاری‌های پهن‌برگ (افرا پلت (*Acer velutinum Boiss.*))، بلوط، ون (*Fraxinus excelsior L.*) و توسکا) و سوزنی‌برگ (کاج تدا (*Pinus taeda L.*))، زربین (*Cupressus sempervirens L.*) و نوئل (*Picea abies L. Karst.*) به-همراه صنوبرکاری‌ها (سفیدپلت (*Populus caspica Bornm.*)) با مجموع پوشش ۹ درصد عمدتاً در بخش شمالی متمرکز است. علاوه بر بخش جنگل، پوشش‌های درختچه‌ای (ولیک^۱، ازگیل^۲، گوجه وحشی^۳، انار^۴ و خاس^۵) و علفی (کوله‌خاس^۶، ازملک^۷، تمشک^۸، ممتامتی^۹، فرفیون^{۱۰} و پامچال^{۱۱}) نیز با کمتر از ۱۰ درصد به صورت پراکنده و محدود در این منطقه وجود دارد. ۱۵ درصد از اراضی این حوزه نیز تحت پوشش فعالیت‌های کشاورزی است. جنگل‌های این حوضه با سابقه تقریباً نیم قرن مدیریت جنگل دارای طرح‌های مختلف جنگلداری و اجرای دخالت‌های جنگلشناسی است (امیدی و همکاران، ۱۳۹۹). در مجموع ۷ سری جنگلداری در این حوضه وجود دارد که در شکل ۱ ارائه شده است. در این مطالعه داده‌های آماربرداری سری‌های جنگل در حوزه آبخیز مورد بررسی و معادلات وزن خشک زی توده درختان برای برآورد مشخصات ماده‌سوختنی تاجی مدل‌های ماده-سوختنی مورد استفاده قرار گرفت.

• داده‌های مدل‌سازی آتش

در این مطالعه شبیه‌سازی آتش سوزی‌های سطحی و تاجی با استفاده از الگوریتم گسترش آتش حداقل زمان حرکت (MTT): Finney, 2002) در مدل رفتار آتش 6.2 FlamMap (Finney, 2006) انجام می‌شود (شکل ۲). MTT به پشتیبانی از یک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای تولید، مدیریت و تامین داده‌های مکانی موضوعی شامل ماده‌سوختنی، پوشش گیاهی و توپوگرافی نیاز دارد. پنج داده موضوعی رستری برای اجرای مدل‌سازی رفتار آتش سطحی (ارتفاع، شیب، جهت، مدل ماده‌سوختنی و تاج پوشش) الزامی است. سه لایه اختیاری اضافی (ارتفاع توده، ارتفاع پایه تاج و تراکم وزنی تاج).

¹ Crategus-sp

² Mespilus germanica

³ Prunus-qvium

⁴ Punica-granatum

⁵ Ilex aguifolium

⁶ Ruscus hyrcanus

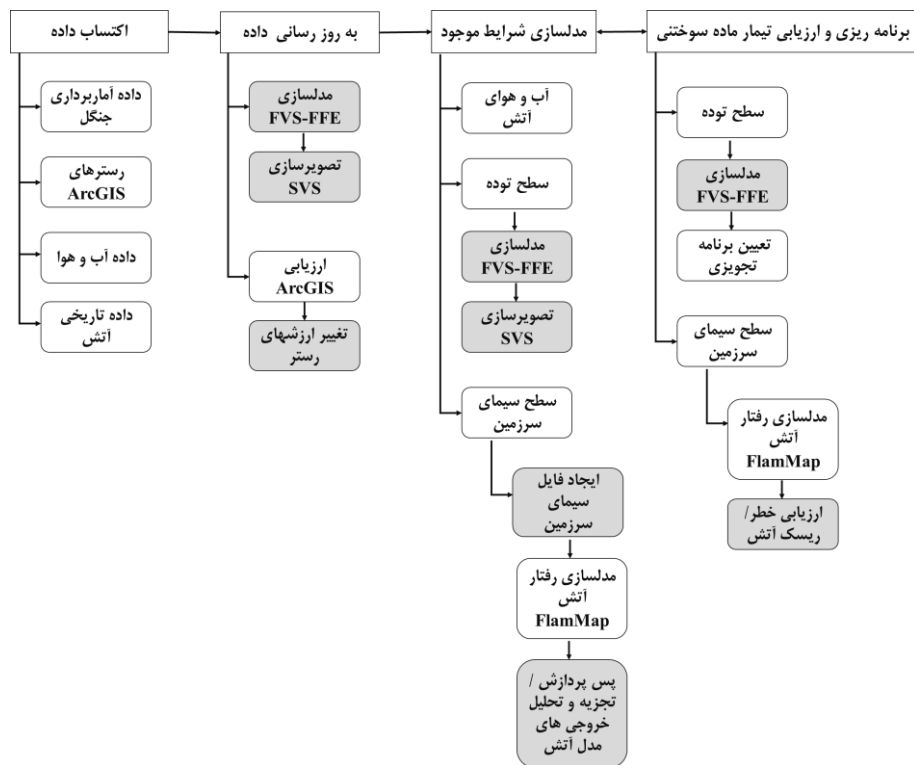
⁷ Smilax-excelsa

⁸ Rubus-hsp

⁹ Hypricum androsenum

¹⁰ Euphobia-angydello

¹¹ Primula-acoullis

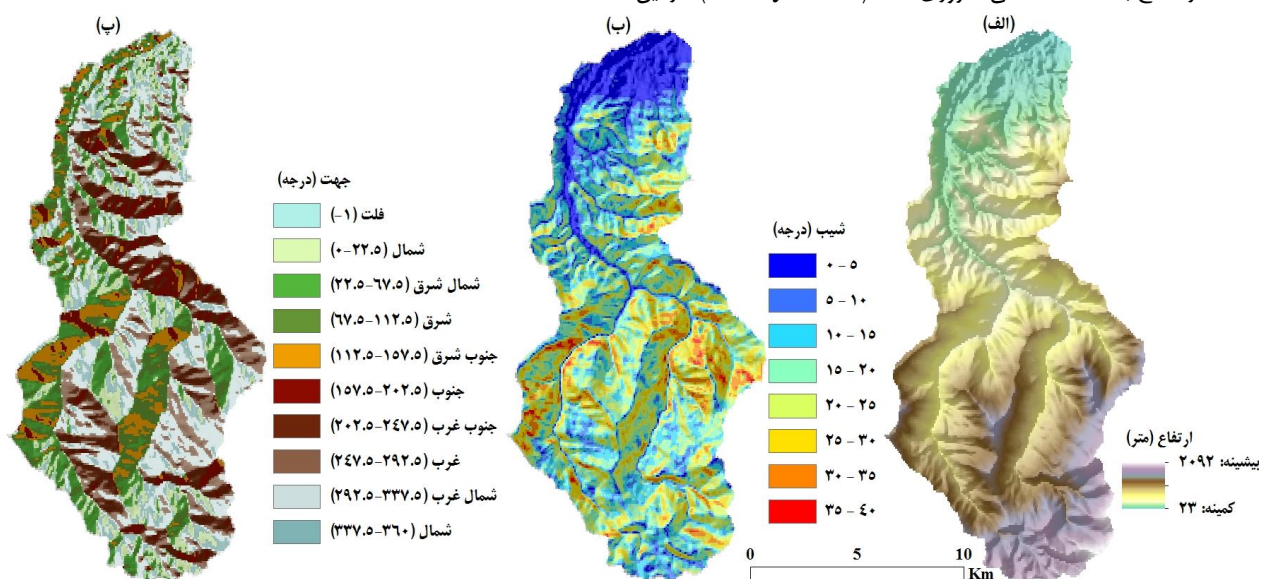


شکل ۲- نمایش شماتیک روش تحلیل خطر/ ریسک آتش اجرا شده (Vaillant et al., 2013). FVS-FFE: شبیه‌ساز پوشش گیاهی جنگل- افزونه آتش و مواد سوختنی، SVS: سیستم تصویرسازی توده، FlamMap: سیستم تهیه نقشه و تجزیه و تحلیل آتش)

مطالعه، با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی موجود، نقشه مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با اندازه تفکیک مکانی ۳۰ متری در محیط GIS تهیه شد. با استفاده از GIS، شیب بر حسب درجه و جهت بر حسب درجه از شمال محاسبه شد.

• توپوگرافی

داده‌های موضوعی توپوگرافی شامل ارتفاع، شیب و جهت است (شکل ۳). داده ارتفاع برای تنظیم فرآیند بی‌دررو (آدیاباتیک) دما و رطوبت ضروری است. داده شیب برای محاسبه آثار مستقیم بر گسترش آتش و همراه با جهت، برای تعیین زاویه تابش خورشیدی برخوردی برای تنظیم رطوبت ماده سوختنی و برای تبدیل نرخ‌ها و جهت‌های گسترش از سطح به مختصات افقی ضروری است (Finney, 1998). در این



شکل ۳- نقشه‌های ارتفاع به متر (الف)، شیب به درجه (ب) و جهت به درجه (ب) منطقه مورد مطالعه.

ضروری است. ارتفاع درخت، ارتفاع تاج و درصد تاج پوشش، برای تمامی قطعات نمونه‌هایی که درخت در آنها موجود بود اندازه‌گیری شد. ارتفاع توده بر اساس میانگین وزنی ارتفاع از داده‌های گونه‌های درختی اندازه‌گیری شده در قطعات نمونه‌برداری، محاسبه شد. اندازه‌گیری یا برآورد تراکم وزنی تاج در عرصه جنگل دشوار است. برآورد این متغیر با استفاده از افزونه آتش و مواد سوختنی در شبیه‌ساز پوشش گیاهی جنگل (FVS-FFE) در این مطالعه انجام شد (شکل ۲). این برآورد بر پایه داده اندازه‌گیری شده میدانی شامل قطر درخت، ارتفاع درخت و ارتفاع پایه تاج در قطعه‌های نمونه در هر توده جنگل، برای محاسبه توزیع زی‌توده تاج از طریق معادلات آلومتریک زی‌توده تاج (Keane et al., 2000) بدست آمد. در واقع پوشش گیاهی جنگل و مواد سوختنی با استفاده از شبیه‌ساز پوشش گیاهی جنگل (FVS; Dixon, 2003) و افزونه آتش و مواد سوختنی برای FVS (Reinhardt and Crookston, 2003; FVS-FFE) مدلسازی شد (شکل ۲). FVS یک مدل رشد و محصول تک-درخت، مستقل از فاصله است که به طور گسترده برای مدل‌سازی پوشش گیاهی و مواد سوختنی، تیمارهای جنگل‌شناسی و سایر فعالیت‌های مدیریت توده استفاده می‌شود. FVS-FFE به FVS برای مدل‌های رفتار آتش (Scott and Burgan, 2005) و آثار آتش (Reinhardt et al., 1997) مرتبط می‌شود. پردازش‌های قبل و بعد از شبیه‌سازی‌های FVS و خروجی‌های FVS-FFE با ArcFuels 10 (Ager et al., 2006) انجام شد.

• شبیه‌سازی رفتار آتش

شبیه‌سازی آتش یکی از اجزای کلیدی تجزیه و تحلیل خطر آتش است که برآوردهای لازم را از شدت، اندازه (محیط‌ها) و جهت گسترش آتش‌سوزی‌های پیش‌بینی شده در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌کند. در این مطالعه از الگوریتم گسترش آتش حداقل زمان حرکت (MTT; Finney, 2002) در مدل رفتار آتش FlamMap 6.2 (Finney, 2006) استفاده شده است (Kalabokidis et al., 2016; Palaiologou et al., 2018). همچنین در چند مطالعه موردی در جنگل‌های ایران نیز از این الگوریتم استفاده شده است (Jahdi et al., 2021; Alhaj-Khalaf et al., 2020). الگوریتم MTT رشد آتش را با استفاده از اصل Huygens تکرار می‌کند که در آن رشد و رفتار لبه آتش یک بردار یا جبهه موج است. این روش در مقایسه با تکنیک‌هایی که رشد آتش را از سلولی به سلول دیگر در یک سیمای سرزمین شبکه‌ای شبیه‌سازی می‌کند، منجر به اعوجاج کمتری در شکل آتش و پاسخ به شرایط زمانی متفاوت می‌شود (Finney, 2002). الگوریتم MTT اکنون روزانه برای مشکلات عملیاتی آتش-سوزی در سراسر ایالات متحده استفاده می‌شود (Ager et al., 2010). برخلاف FARSITE (Finney, 1998)، الگوریتم MTT آب و هوای ثابت را فرض می‌کند و برای مدل‌سازی دوره‌های سوختن جداگانه در یک آتش‌سوزی به‌جای گسترش مداوم آتش‌سوزی در طول روزها و سناریوهای آب و هوایی استفاده می‌شود. دوره‌های سوختن نسبتاً کمی بخش عمده‌ای از کل مساحت سوخته شده در

• **مدل‌های ماده سوختنی سطحی و مشخصات تاج جنگل**
یک "تیپ ماده سوختنی" رفتار مشخصه آتش را تحت شرایط سوختن معین، نشان می‌دهد که با سهولت احتراق، نرخ گسترش، شدت خط آتش و مصرف ماده سوختنی آشکار می‌شود (Varner et al., 2015). این تیپ‌های ماده سوختنی عمدتاً عبارتند از: (۱) تیپ‌های ماده سوختنی علفی که بسترهای ماده سوختنی توده‌ای سستی را تشکیل می‌دهند که به راحتی مشتعل شده و باعث گسترش سریع آتش می‌شود، (۲) تیپ‌های ماده سوختنی درختچه‌ای با اندازه و توزیع ذرات ماده سوختنی متنوع که بسته به ترکیب و فشردگی گونه‌ها می‌توانند در شدت‌های بالا بسوزند، (۳) تیپ‌های ماده سوختنی لاشبرگ که به سرعت خشک می‌شوند و به راحتی مشتعل می‌شوند، اما در شدت‌های کم می‌سوزند و (۴) تیپ‌های ماده سوختنی چوبی که ذرات ماده سوختنی چوبی مرده با سرعت‌های خشک شدن متفاوت بسته به اندازه ذرات غالب هستند، که می‌توانند آتش‌سوزی‌های سطحی شدید را موجب شوند (Keane, 2015). توصیف عددی دقیق از مشخصات فیزیکی تیپ ماده سوختنی به عنوان "مدل ماده سوختنی" نامبرده می‌شود که از ورودی‌های اصلی مدل‌های شبیه‌سازی رفتار آتش می‌باشد (Andrews, 2014). در این کار تیپ‌های ماده سوختنی از یک فرآیند تهیه نقشه ماده سوختنی با استفاده از داده‌های در محل جمع‌آوری شده از منطقه مورد مطالعه، توسعه داده شد. بدین منظور، از نقشه‌های پوشش زمین و تیپ جنگل تهیه شده توسط اداره کل منابع طبیعی استان گیلان در سال ۱۳۸۹ به عنوان مبنا استفاده شد. در هر تیپ جنگل، برای اندازه‌گیری مشخصات ماده سوختنی سطحی و تاجی از قطعه‌نمونه مربع شکل با ابعاد ۳۰×۳۰ متری (در مجموع ۱۳۰ قطعه-نمونه) با روش نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده در تابستان و پائیز ۱۳۹۹ استفاده شد. شمارش تعداد درختان در هر قطعه‌نمونه به همراه اندازه‌گیری ارتفاع و قطر برابر سینه درختان (به ترتیب با متر لیزری و نوار قطر سنج) و نیز برآورد درصد تاج پوشش انجام شد. به منظور برآورد درصد پوشش علفی و لاشبرگ کف جنگل در مرکز هر قطعه‌نمونه، یک ریزقطعه‌نمونه با ابعاد ۱×۱ متری پیاده شد. به علاوه، در این ریزقطعه‌نمونه‌ها قطر قطعات چوبی مرده و افتاده با خط‌کش کولیس و عمق متوسط لاشبرگ با خط‌کش معمولی اندازه‌گیری شد. به منظور برآورد رطوبت ماده سوختنی، با اندازه‌گیری قطر قطعات چوبی مرده و افتاده، سه طبقه مواد سوختنی چوبی افتاده مطابق با تاخیر زمانی برای خشک شدن شامل ۱-ساعت (قطر ۰/۶-۰/۶ سانتی‌متر)، ۱۰-ساعت (قطر ۲/۵-۲/۵ سانتی‌متر) و ۱۰۰-ساعت (قطر ۵/۵-۵/۵ سانتی‌متر) مطابق با طبقه‌بندی Bradshaw و همکاران (۱۹۸۳) مشخص شد. به تفکیک این طبقات، وزن تر در محل و وزن خشک در آزمایشگاه (بعد از ۷۲ ساعت خشک شدن در دستگاه آون با حرارت ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) اندازه‌گیری و با تفریق وزن خشک از وزن تر و تقسیم نتیجه بر وزن خشک، میزان رطوبت مواد سوختنی محاسبه شد (Jahdi et al., 2016). اندازه‌گیری و برآورد مولفه‌های اشاره شده در بالا برای تهیه نقشه ماده سوختنی سطحی در فایل سیمای سرزمین انجام شد. سه مولفه تکمیلی مرتبط با تاج در فایل سیمای سرزمین مورد نیاز است که شامل ارتفاع توده، ارتفاع پایه تاج و تراکم وزنی تاج است. این مولفه‌ها برای شبیه‌سازی رفتار و پتانسیل آتش تاجی

۱۰ هکتار (۶۷ درصد سطح سوخته شده) در این مدت رخ داده است و کل مساحت سوخته شده برای این آتش سوزی ها تقریباً ۱۵۲۴ هکتار است. در این مطالعه محاسبات رشد آتش با خروجی هایی با اندازه تفکیک ۳۰ متری انجام شد. مطابق با اطلاعات تاریخی آتش سوزی و نیز شرایط باد غالب در منطقه مورد مطالعه، مدت آتش سوزی ۶ ساعت با جهت باد غربی و سرعت باد ۱۰ کیلومتر بر ساعت شبیه سازی شد. خروجی های شبیه سازی آتش شامل احتمال سوختن (BP) برای هر پیکسل به صورت زیر بود:

$$BP = F/n$$

علف متراکم با ارتفاع های مختلف متغیر است. رفتار آتش نیز از نرخ گسترش متوسط و طول شعله کم در علفی تنک تا نرخ گسترش و طول شعله شدید در علفی متراکم بلند متغیر است. مدل ماده سوختنی علفی با تراکم متوسط و ارتفاع متوسط ۴۰-۶۰ سانتی متر در منطقه مورد مطالعه موجود است. این تیپ با آتش سوزی های سطحی و نرخ گسترش زیاد می سوزد (Scott and Burgan, 2005). مدل ماده سوختنی درختچه ای که حامل اصلی آتش در آن سرشاخه ها و شاخ و برگ های زنده و مرده در ترکیب با لاشبرگ درختچه ای خشک و افتاده می باشد با تراکم کم در منطقه مورد مطالعه موجود است. مقدار اندکی مواد سوختنی علفی در این مدل موجود است. علاوه بر این پوشش جنگلکاری صنوبر با تراکم متوسط در منطقه مورد مطالعه موجود است که جزء مدل ماده سوختنی درختچه ای لحاظ شده است. مدل ماده سوختنی لاشبرگ چوبی که حامل اصلی آتش در آن مواد سوختنی چوبی مرده و افتاده می باشد شامل جنگلکاری های موجود در منطقه مورد مطالعه است که در دو تیپ پهن برگ و سوزنی برگ به ترتیب با تراکم متوسط و زیاد توسعه یافته است. در نهایت مدل ماده سوختنی درختی-زیراشکوب که حامل اصلی آتش در آن لاشبرگ جنگل در ترکیب با مواد سوختنی علفی یا درختچه ای است و شامل دو تیپ جنگل طبیعی راش و جنگل طبیعی / آمیخته پهن برگ در منطقه مورد مطالعه است.

آتش سوزی های بزرگ را تشکیل می دهند و تلاش ها برای مهار آتش سوزی تأثیر کمی بر محیط های آتش سوزی در طول این رویدادهای شدید دارد (Podur and Martell, 2007). برای منطقه مورد مطالعه ۱۰،۰۰۰ آتش سوزی تصادفی بر مبنای نقاط احتراق آتش سوزی های تاریخی در دوره مورد مطالعه شبیه سازی شد. داده های تاریخچه آتش سوزی برای منطقه مورد مطالعه شامل ۱۷۶ آتش ثبت شده در طول دوره ۱۴۰۰-۱۳۸۰، تقریباً به طور کامل توسط آتش سوزی های با منشأ انسانی، است. ۱۵ درصد آتش سوزی ها با اندازه آتش کمتر از ۱ هکتار (۱ درصد سطح سوخته شده) و ۵۹ درصد آتش سوزی ها با اندازه آتش بین ۱ تا ۱۰ هکتار (۳۳ درصد سطح سوخته شده) بودند. همچنین، ۲۷ درصد آتش سوزی ها با اندازه آتش بزرگتر از که در آن F تعداد دفعاتی است که یک پیکسل می سوزد و n تعداد آتش سوزی های شبیه سازی شده است. در واقع BP برای یک پیکسل مشخص، برآوردی از احتمال سوختن یک پیکسل با احتراق تصادفی در منطقه مورد مطالعه و شرایط سوختن مشابه آتش سوزی های تاریخی است. همچنین طول شعله های مختلف توسط الگوریتم گسترش آتش MTT بسته به جهتی که آتش با یک پیکسل نسبت به جهت اصلی گسترش (یعنی آتش پیشانی، طرفین یا پشتی، Finney, 2002) مواجه می شود، پیش بینی می شود. در نهایت تجزیه و تحلیل خروجی های مدل آتش شامل طول شعله، اندازه آتش و احتمال آتش تاجی در مقیاس سیمای سرزمین و نیز تیپ های ماده سوختنی اصلی منطقه مورد مطالعه انجام شد.

۳- نتایج

• **مدل های ماده سوختنی سطحی و مشخصات تاج جنگل**
طبقه بندی مدل های ماده سوختنی سطحی بر اساس اطلاعات توده های جنگل انجام شد و سه مدل ماده سوختنی غیر قابل اشتعال (مسکونی، کشاورزی، اراضی لخت و صخره ای) فاقد بار ماده سوختنی بوده و آتش سوزی در آنها گسترش نخواهد یافت. همچنین، چهار مدل ماده سوختنی قابل اشتعال (علفی، درختچه ای، درختی-زیراشکوب و لاشبرگ چوبی) با آثار مختلف مورد انتظار بر رفتار آتش شناسایی شد (جدول ۱؛ شکل ۴). مدل ماده سوختنی علفی که حامل اصلی آتش در آن علف ها می باشد از پوشش علفی که به شدت چرا شده یا علف طبیعی تنک تا

جدول ۱- مدل های ماده سوختنی سطحی منطقه مورد مطالعه

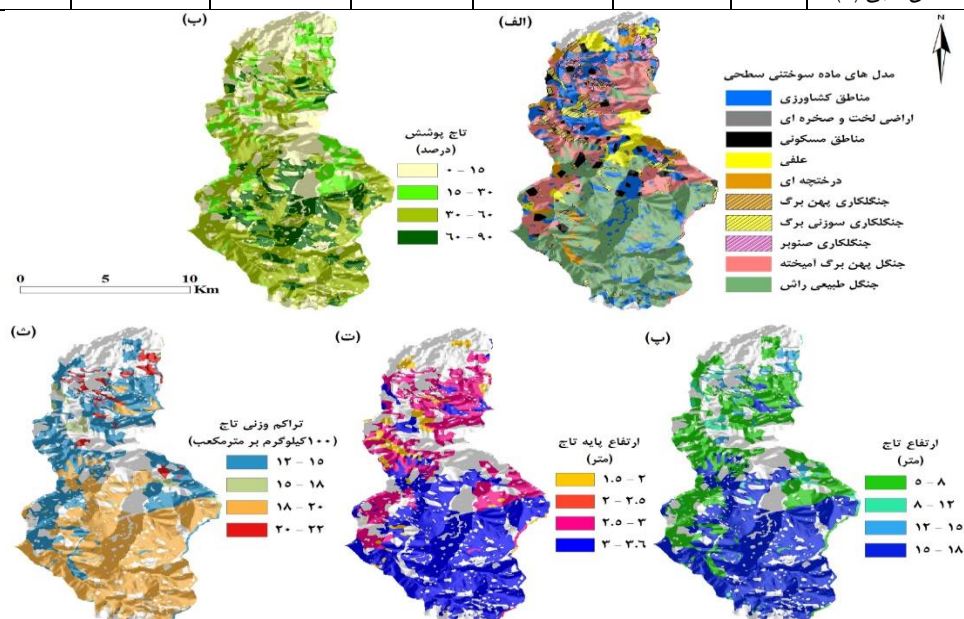
پوشش مشاهده شده	تیپ ماده سوختنی حامل آتش	مدل ماده سوختنی
مسکونی (مناطق توسعه شهری و برون شهری)	ماده سوختنی ناکافی برای حمل آتش	غیر قابل اشتعال
کشاورزی	ماده سوختنی ناکافی برای حمل آتش	غیر قابل اشتعال
اراضی لخت و بدون پوشش	ماده سوختنی ناکافی برای حمل آتش	غیر قابل اشتعال
علفی (تراکم متوسط)	علفی پیوسته اقلیم مرطوب	علفی
درختچه ای (تراکم کم)	بار کم درختچه اقلیم مرطوب	درختچه ای
جنگلکاری صنوبر (تراکم متوسط)	بار متوسط درختچه اقلیم مرطوب	درختچه ای
جنگلکاری پهن برگ (تراکم متوسط)	بار متوسط لاشبرگ پهن برگ	لاشبرگ چوبی
جنگلکاری سوزنی برگ (تراکم زیاد)	بار زیاد لاشبرگ سوزنی برگ با سوزن بلند	لاشبرگ چوبی
جنگل طبیعی راش (تراکم زیاد و درخت-درختچه)	بار لاشبرگ زیاد با ترکیب درختچه ای	درختی-زیراشکوب
جنگل طبیعی / آمیخته پهن برگ (تراکم متوسط و درختی-علفی-درختچه)	بار لاشبرگ متوسط با ترکیب علف و درختچه	درختی-زیراشکوب

درصد است. مطابق با مولفه تاج پوشش، بیشترین ارتفاع تاج به میزان ۱۸ متر به طور متوسط در جنگل طبیعی راش ثبت شد. تغییرپذیری مشاهده شده در ارزش‌های متوسط ارتفاع پایه تاج در مقایسه با سایر متغیرهای ماده سوختنی تاجی در بین مدل‌های ماده سوختنی موجود کمتر بود. ارزش‌های متوسط ارتفاع پایه تاج از ۲ متر در ماده سوختنی درختچه‌ای تا ۳/۴ متر در جنگل طبیعی راش متغیر بود. متوسط تراکم وزنی تاج در منطقه مورد مطالعه برابر با ۱۵ (۱۰۰ کیلوگرم بر مترمربع) است. ارزش‌های بالای تراکم وزنی تاج (> 20) ۱۰۰ کیلوگرم بر مترمربع) در مناطق شمالی حوزه مورد مطالعه و در تیپ‌های ماده سوختنی جنگلکاری بدست آمد. بیشترین متوسط تراکم وزنی تاج در مدل‌های ماده سوختنی موجود برابر با ۱۸ (۱۰۰ کیلوگرم بر مترمربع) در جنگلکاری سوزنی‌برگ بدست آمد. شاخه‌های ریز و متراکم کاج تدا و نوئل منجر به تراکم بیشتر ماده سوختنی تاجی در واحد سطح در جنگلکاری سوزنی‌برگ شده است. این مورد مطابق با نتیجه مطالعه Fernández-Alonso و همکاران (۲۰۱۳) است.

در مورد مشخصات مواد سوختنی سطحی در منطقه مورد مطالعه، نتایج بدست آمده در جدول ۲ نشان می‌دهد که جنگلکاری سوزنی‌برگ دارای بار ماده سوختنی بیشتر در هر دو زی توده زنده و مرده است. در این مدل، متوسط بار ماده سوختنی زنده و مرده به ترتیب ۷/۳ و ۴ تن بر هکتار برآورد شد. به طور کلی بار ماده سوختنی زی توده زنده در جنگل پهن‌برگ اندک بوده که نقش ناچیزی در آتش‌سوزی‌های تاجی دارد. در حالی که مقدار بار ماده سوختنی زی توده مرده در مورد آتش‌سوزی‌های سطحی در هر دو جنگل سوزنی‌برگ و پهن‌برگ مهم است (Velizarova et al., 2014). در مورد عمق بستر ماده سوختنی نیز بیشترین مقدار در تیپ جنگلکاری سوزنی‌برگ با عمق ۶۰ سانتی-متر مشاهده شد. در مورد مشخصات تاج جنگل در شکل ۴ توزیع مکانی تاج پوشش، ارتفاع تاج، ارتفاع پایه تاج و تراکم وزنی تاج برای منطقه مورد مطالعه ارائه شده است. آمار کلی نیز در جدول ۲ ارائه شده است. در بین مدل‌های ماده سوختنی چوبی، جنگل طبیعی راش دارای تاج پوشش نسبتاً بسته با میانگین تاج پوشش ۸۰ درصد است و بعد از آن جنگل پهن‌برگ آمیخته دارای بیشترین تاج پوشش به میزان ۶۰

جدول ۲- خلاصه‌ای از میانگین مشخصات مواد سوختنی و آتش شبیه‌سازی شده برای مدل‌های ماده سوختنی در منطقه مورد مطالعه

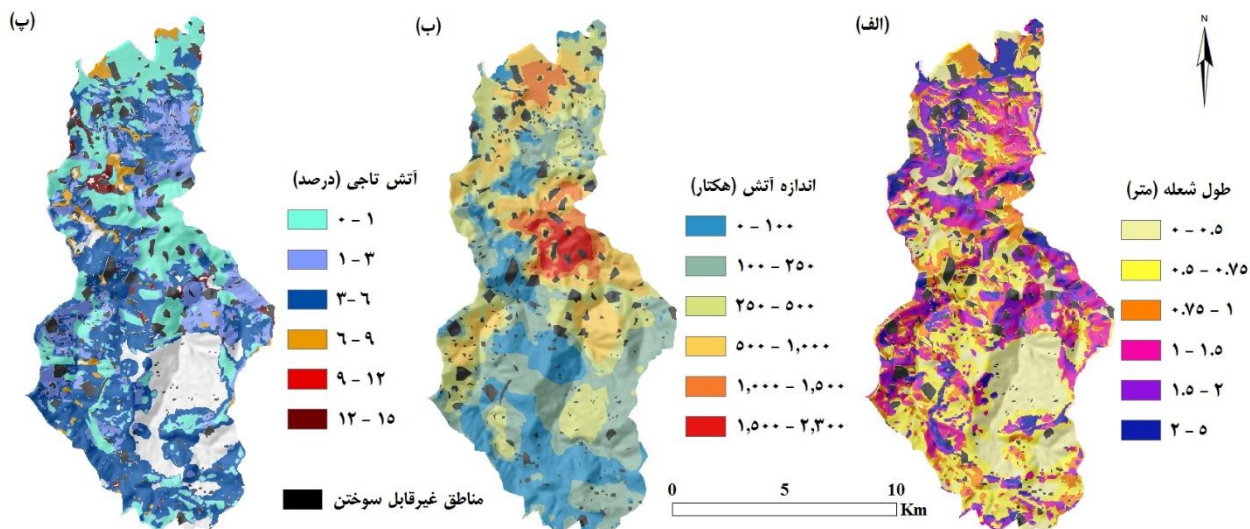
مدل ماده سوختنی	علفی	درختچه‌ای	جنگلکاری پهن‌برگ	جنگلکاری سوزنی‌برگ	جنگلکاری صنوبر	جنگل پهن-برگ آمیخته	جنگل طبیعی راش
بار ماده سوختنی مرده ($t ha^{-1}$)	۱	۴	۶	۷/۳	۴	۶/۲	۵/۸
بار ماده سوختنی زنده ($t ha^{-1}$)	۰	۲	۲	۴	۱	۱	۱
عمق بستر ماده سوختنی (cm)	۱۰	۴۰	۲۰	۶۰	۲۰	۳۰	۳۰
تاج پوشش (%)	۰	۴۰	۴۰	۵۰	۴۰	۶۰	۸۰
ارتفاع تاج (m)	۰	۵	۷	۱۰	۶	۸	۱۸
ارتفاع پایه تاج (m)	۰	۲	۲/۱	۲/۶	۲/۱	۳	۳/۴
تراکم وزنی تاج ($100kg m^{-3}$)	۰	۱۰	۱۴	۱۸	۱۲	۱۵	۱۶
طول شعله (m)	۰/۷	۰/۹	۲/۱	۲/۴	۱/۹	۱/۱	۰/۶
اندازه آتش (ha)	۱۱۲۰	۵۶۰	۳۴۴	۶۳۲	۳۶۰	۲۳۱	۱۶۹
احتمال رخداد آتش تاجی (%)	۰	۰/۴	۶/۷	۱۱/۱	۳/۵	۲/۷	۲/۹



• شبیه‌سازی رفتار آتش

نتایج توزیع مکانی طول شعله، اندازه آتش و احتمال رخداد آتش تاجی شبیه‌سازی شده در سیمای سرزمین مورد مطالعه در شکل ۵ ارائه شده است. در مورد مشخصات آتش سطحی (طول شعله و اندازه آتش)، سطوح متوسط تا زیاد این مولفه‌ها شناسایی شد که ناشی از در دسترس بودن زی‌توده ریز بسیار خشک (بار ماده‌سوختنی مرده) زیاد در منطقه مورد مطالعه بود. اندازه آتش‌سوزی‌ها بعد از یک شبیه‌سازی ۶ ساعته از ۰/۱ هکتار تا ۲،۳۰۰ هکتار متغیر بود، با میانگین ۴۳۰ هکتار. طول شعله نیز از ۰ متر تا ۵ متر متغیر بود، با میانگین تقریباً ۱ متر. در مورد پتانسیل آتش تاجی که تابعی از کمیت و ترتیب مواد سوختنی است، سطح کم این مولفه در منطقه مورد مطالعه شبیه‌سازی شد. بر اساس نتایج مدل، احتمال رخداد آتش تاجی از ۰ تا ۱۵ درصد در منطقه مورد مطالعه متغیر بود، با میانگین ۲ درصد. همچنین در جدول ۲ تفاوت‌ها در میانگین این مشخصات رفتار آتش شبیه‌سازی شده در مدل‌های ماده‌سوختنی مختلف ارائه شده است. به‌طور کلی، اشتعال‌پذیری، گسترش و شدت آتش تحت شرایط محیطی گرم‌تر، خشک‌تر و با باد بیشتر افزایش می‌یابد (Newberry et al., 2020). به‌نحوی که در شرایط خشکی شدید، حتی جنگل با تاج پوشش بسته می‌تواند قابل‌اشتعال باشد، در حالی که در شرایط مرطوب، سوختن علف نیز ناممکن می‌شود (Archibald, 2016). مطابق با این توضیحات در مدل ماده‌سوختنی علفی اشتعال‌پذیری، شدت آتش، طول شعله و نرخ گسترش آتش سطحی زیاد ناشی از زی‌توده گراس است که به‌میزان زیادی مرتبط با تراکم وزنی ماده‌سوختنی است (Newberry et al., 2020). گراس‌ها به شدت اشتعال‌پذیر هستند زیرا بستر ماده‌سوختنی با تراکم وزنی کم است که به دلیل ساختار عمودی و ظریف آنها می‌باشد. تراکم وزنی کم ماده‌سوختنی، سوختن را تسریع می‌کند زیرا امکان دسترسی بالای اکسیژن در طی احتراق و انتقال تابش حرارتی را فراتر از جلوی شعله برای پیش‌گرم کردن پوشش گیاهی سوخته‌نشده فراهم می‌کند (Rothermel, 1972). این نقش تراکم وزنی با نتایج ما سازگار است که نشان‌دهنده بیشترین اندازه آتش شبیه‌سازی شده (بیش از ۱۰،۰۰۰ هکتار) در ماده‌سوختنی علفی نسبت به سایر مدل‌های ماده‌سوختنی موجود در منطقه مورد مطالعه است (جدول ۲). افزایش سوختن و اندازه آتش در نتیجه تراکم وزنی کم مواد سوختنی علفی در مطالعات Scarff و Westoby (۲۰۰۶) و Varner و همکاران (۲۰۱۵) نیز تأیید شده است. در منطقه مورد مطالعه، با افزایش تراکم درخت از مدل ماده‌سوختنی علفی به مدل‌های ماده‌سوختنی چوبی، کاهش قابل ملاحظه‌ای در نرخ گسترش آتش، شدت آتش و در نتیجه اندازه آتش شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شود. پوشش درختی با ایجاد ریزاقلیم سردتر و مرطوب‌تر منجر به افزایش رطوبت ماده‌سوختنی شده و اشتعال‌پذیری را کاهش می‌دهد (Newberry et al., 2020). این مورد منجر به اشتعال‌پذیری کمتر مدل‌های ماده‌سوختنی چوبی به‌ویژه جنگل‌های طبیعی در منطقه مورد مطالعه شده است. این نتیجه مطابق با مطالعات Ray و همکاران (۲۰۱۰) و Dodonov و همکاران (۲۰۱۳) است.

بر اساس نتایج احتمال رخداد آتش تاجی (شکل ۵پ)، توده‌های جنگلی کوتاه بیشتر مستعد آتش تاجی هستند، به‌نحوی که مدل‌های ماده‌سوختنی با ارتفاع پایه تاج بیشتر (۳ متر و بیشتر در جنگل‌های طبیعی) دارای شدت آتش کمتری هستند که مطابق با نتیجه Jain و Graham (۲۰۰۷) است. این مورد ناشی از این حقیقت است که مواد سوختنی سطحی نقش مهمی در توسعه آتش‌سوزی‌های تاجی به‌ویژه در توده‌های کوتاه ایفا می‌کنند (Van Wagner, 1968). می‌توان نتیجه گرفت که آتش‌سوزی‌های تاجی در جنگل‌های طبیعی راش و پهن‌برگ آمیخته بسیار بعید است مگر اینکه توسط آتش‌سوزی‌ها در اشکوب پایین‌تر پشتیبانی شوند. همچنین دخالت‌های جنگل‌شناسی گذشته در توده‌های مدیریت شده در این جنگل‌های طبیعی مانند تنک‌کردن و قطع‌گزینشی باعث بازشدن گسترده این توده‌ها و در نتیجه از بین رفتن پیوستگی افقی مواد سوختنی و عمل به شکل آتش‌بر شده است. بنابراین فعالیت‌های مدیریت اخیر در این توده‌ها تاحدی پتانسیل آتش تاجی را در برخی مناطق کاهش داده است. این نتیجه مشابه با اثر فعالیت‌های جنگل‌شناسی در کاهش پتانسیل آتش تاجی در مطالعه منتشر شده توسط USDA Forest Service (۲۰۰۳) است. نتایج نشان می‌دهد که پتانسیل آتش تاجی در توده‌های دست‌کاشت به‌ویژه سوزنی‌برگ در مقایسه با توده‌های طبیعی بیشتر است. این مورد ناشی از اثر تپ‌های ماده‌سوختنی سوزنی‌برگ با مشخصات فیزیکی یا شیمیایی خاص است که مستقل از آتش‌سوزی‌های سطحی، از آتش‌سوزی‌های تاجی تحت شرایط محیط-زیستی شدید به‌ویژه بادهای قوی حمایت می‌کنند (Kilgore and Sando, 1975). بعلاوه، مراحل اولیه این توده‌های دست‌کاشت به دلیل ارتفاع متوسط کم و ارتفاع پایه تاج کم، بیشتر در مواجهه با آتش تاجی هستند. همچنین، توده‌های جنگل با تراکم وزنی تاج بیشتر دارای پتانسیل گسترش آتش تاجی بیشتری هستند (USDA Forest Service, 2005) که مطابق با نتایج این مطالعه نیز می‌باشد. به‌نحوی که جنگلکاری سوزنی‌برگ با بیشترین تراکم وزنی تاج (به‌طور متوسط ۱۸ صدکیلوگرم بر مترمکعب) دارای بیشترین احتمال رخداد آتش تاجی (به‌طور متوسط ۱۱ درصد) است. علاوه بر بالا بودن احتمال رخداد آتش تاجی در جنگلکاری‌های سوزنی‌برگ، لازم به ذکر است که آتش‌سوزی‌ها تهاجم گونه‌های سوزنی‌برگ غیربومی مانند کاج و سرو نقره‌ای به مناطق جنگل‌های طبیعی به شدت سوخته‌شده را در این منطقه تقویت می‌کند. در مطالعات قبلی بر نقش بالقوه جنگلکاری‌ها با گونه‌های سوزنی‌برگ غیربومی در گسترش آتش به دلیل مصرف بالای آب و پیوستگی مکانی آنها، تشدید خشکی محیط و در نتیجه رخداد آتش‌سوزی‌های مکرر با شدت کم تا زیاد تأکید شده است (Agee, 1993; Allen, 2019; Uribe et al., 2020). این وقایع به دلیل گرمایش زمین می‌تواند تشدید شده که فشار اضافی بر جنگل‌های بومی ناشی از تهاجم (و جایگزینی نهایی) گونه‌های غیربومی مقاوم به آتش تحمیل خواهد کرد. به دلیل مورد اخیر، بررسی‌های بیشتری در انتخاب گونه‌ها برای جنگلکاری‌ها در مناطق حساس به آتش‌سوزی و در نتیجه توجه بیشتر به گونه‌های بومی باید انجام شود.



شکل ۵- نقشه‌های مشخصات رفتار آتش بدست آمده از شبیه‌سازی FlamMap برای یک سناریو آب و هوای آتش خشک در منطقه مورد مطالعه: طول شعله (الف)، اندازه آتش (ب) و احتمال رخداد آتش تاجی (پ)

۴- نتیجه‌گیری

به بررسی بیشتر انتخاب‌ها در جنگلکاری‌ها به‌ویژه در انتخاب گونه‌های غیربومی می‌باشد. در این مطالعه، مدل‌های ماده‌سوختنی بر اساس نمونه‌برداری‌های میدانی در مقیاس سیمای سرزمین شناسایی شد. با این وجود نیاز به مدل‌های ماده‌سوختنی محلی و مختص هر رویشگاه برای ارائه پیش‌بینی‌های دقیق‌تر از رفتار آتش به‌ویژه در سیمای سرزمین ناهمگون و قطعه قطعه شده جنگل‌های هیرکانی است. در نتیجه‌گیری کلی، این مطالعه نیاز به نقشه‌های ماده‌سوختنی محلی به‌روز در دسترس را در زمان واقعی برای پیش‌بینی دقیق رفتار و گسترش آتش‌سوزی نشان می‌دهد. تهیه این نقشه‌ها و نیز کمی‌سازی متغیرهای ماده‌سوختنی برای انتخاب مناسب تیمارهای جنگلشناسی با هدف کاهش خطر آتش‌سوزی و تاجی مورد نیاز است. روش ارائه شده در این مطالعه ادغام تهیه نقشه ماده‌سوختنی و شبیه‌سازی رفتار آتش را برای برنامه‌ریزی مدیریت آتش در سیمای سرزمین نشان می‌دهد. نقشه‌های خروجی مدل‌های شبیه‌سازی رفتار آتش محصول نهایی است که برای اهداف عملیاتی توسط مسئولان و تصمیم‌گیرندگان زمین و آتش بدون نیاز به پردازش تکمیلی، قابل استفاده است.

ارزیابی دقیق رفتار و گسترش آتش برای تجزیه و تحلیل اثر و خطر بالقوه آن ضروری است که این ارزیابی عمدتاً با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رفتار آتش انجام می‌شود. نتایج این مدل‌ها برای تسریع تصمیم‌گیری‌ها برای مدیریت کنترل و اطفای آتش بر مبنای ارزیابی ریسک آتش حائز اهمیت است. همانطور که انتظار می‌رفت رفتار آتش در مدل‌های ماده‌سوختنی قابل‌اشتعال موجود در منطقه مطالعه (علفی، درختچه‌ای، درختی-زیراشکوب و لاشبرگ چوبی) متفاوت بود. حتی در یک مدل ماده‌سوختنی مشخص مانند مدل ماده‌سوختنی لاشبرگ چوبی که شامل جنگلکاری‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ در منطقه مورد مطالعه بود نیز تفاوت‌هایی در رفتار آتش مشاهده شد. در مقایسه آتش-سوزی سطحی و تاجی، وقوع آتش تاجی و متعاقب آن رفتار آتش تاجی به شدت به مشخصات ماده‌سوختنی تاجی، به ویژه تراکم وزنی تاج و ارتفاع پایه تاج وابسته است. بر اساس نتایج، مدل‌های ماده‌سوختنی با ارتفاع پایه تاج بیشتر و تراکم وزنی تاج کمتر دارای پتانسیل گسترش آتش تاجی کمتری هستند. در کل پتانسیل آتش تاجی در توده‌های طبیعی و دست‌کاشت در منطقه مورد مطالعه بسیار متفاوت بود که نیاز

منابع

- امید، ع، حسن‌زاد ناوردی، ا، فجر، ا، یوسف‌پور، ر، ۱۳۹۹. تعیین استراتژی‌های مناسب برای مدیریت جنگل‌های هیرکانی با استفاده از تحلیل SWOT و QSPM (بررسی موردی: جنگل‌های حوزه سیاهکل)، فصلنامه علمی پژوهش و توسعه جنگل، جلد ۶، شماره ۲، ص ۳۲۹-۳۴۵.
- Allen, I.C. 2019. Evaluating Post-Fire Plantation Restoration in a Mixed Conifer Forest in the Sierra Nevada. Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports. 4091. <https://researchrepository.wvu.edu/etd/4091>
- Agee, J.K. 1993. Fire Ecology of Pacific Northwest Forests. Washington, D.C.: Island Publisher.
- Ager, A.A., Vaillant, N., Finney, M.A. 2010. A comparison of landscape fuel treatment strategies to mitigate wildland fire risk in the urban interface and preserve old forest structure, Forest Ecol. Manag., 259, 1556-1570.
- Ager, A.A., Finney, M.A., Bahro, B. 2006. Automating fireshed assessments and analyzing wildfire risk with ArcFuels, Forest Ecol. Manag., 234S, p. 215.

- Alhaj-Khalaf, M.W., Shataee-Jouibary, S., Jahdi, R., Bacciu, V. 2021. Improved forest fire spread mapping by developing custom fire fuel models in replanted forests in Hyrcanian forests, Iran. *Forest Systems*, Volume 30, Issue 2, e008. <https://doi.org/10.5424/fs/2021302-17980>
- Alexander, M.E. 2013. Fire management applications of wildland fire behaviour knowledge. In 'Fire on Earth: An Introduction'. (Eds AC Scott, DMJS Bowman, WJ Bond, SJ Pyne, ME Alexander) pp. 373-391. (Wiley-Blackwell)
- Andrews, P.L. 2014. Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. *International Journal of Wildland Fire*. 23: 21-33.
- Archibald, S. 2016. Managing the human component of fire regimes: lessons from Africa *Phil. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 371 20150346
- Arroyo, L.A., Pascual, C., Manzanera, J.A. 2008. Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing. *Forest Ecology and Management*. Vol. 256 (6), P. 1239-1252.
- Bradshaw, L.S., Deeming, J.E., Burgan, R.E., Cohen, J.D. 1983. The 1978 national fire-danger rating system: technical documentation. USDA Forest Service General Technical Report INT169:1-49.
- Castillo, M., Baeza, A., Garfías, R. 2020. A recent review of fire behavior and fire effects on native vegetation in Central Chile. *Global Ecology and Conservation*, Vol. 24, e01210.
- Dixon, G. E. Compiler. 2003. Essential FVS: A User's Guide to the Forest Vegetation Simulator. Internal Rep. Fort 15 Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Management Service Center. 193p.
- Dodonov P, Harper KA, Silva-Matos DM. 2013. The role of edge contrast and forest structure in edge influence: vegetation and microclimate at edges in the Brazilian cerrado. *Plant Ecology* 214: 1345-1359.
- Duff, T.J., Keane, R.E., Penman, T.D., Tolhurst, K.G. 2017. Revisiting Wildland Fire Fuel Quantification Methods: The Challenge of Understanding a Dynamic, Biotic Entity. *Forests* 8(9), 351. doi:10.3390/F8090351
- Fernández-Alonso JM, Alberdi I, Álvarez-González JG, Vega JA, Cañellas I, Ruiz-González AD (2013) Canopy fuel characteristics in relation to crown fire potential in pine stands: analysis, modelling and classification. *Eur J For Res* 132:363-377. <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0680-z>
- Finney, M.A. 2006. An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In *Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings, Proceedings of the RMRS-P-41, Portland, OR, USA, 28-30 March 2006*; Andrews, P.L., Butler, B.W., Eds.; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: Fort Collins, CO, USA; pp. 213-220.
- Finney, M. 2002. Fire Spread Probability (FSPro); USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory: Missoula, MT, USA.
- Finney, M.A. 1998. FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation; RMRS-RP-4; USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station: Ogden, UT, USA, p. 47.
- Gómez-González, S., González, M.E., Paula, S., Díaz-Hormazábal, I., Lara, A., Delgado-Baquerizo, M. 2019. Temperature and agriculture are largely associated with fire activity in Central Chile across different temporal periods. *Forest Ecology and Management*, 433, pp. 535-543, 10.1016/j.foreco.2018.11.041
- Hessburg, P.F., Miller, C.L., Parks, S.A., Povak, N.A., Taylor, A.H., Higuera, P.E., Prichard, S.J., North, M.P., Collins, B.M., Hurteau, M.D., Larson, A.J., Allen, C.D., Stephens, S.L., Rivera-Huerta, H., Stevens-Rumann, C.S., Daniels, L.D., Gedalof, Z., Gray, R.W., Kane, V.R., Churchill, D.J., Hagmann, R.K., Spies, T.A., Cansler, C.A., Belote, R.T., Veblen, T.T., Battaglia, M.A., Hoffman, C., Skinner, C.N., Safford, H.D., Salter, R.B. 2019. Climate, environment, and disturbance history govern resilience of Western North American forests. *Frontiers in Ecology and Evolution*. Vol. 7, P. 239: 11770. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00239>
- Hilton, J.E., Miller, C., Sullivan, A.L., Rucinski, C. 2015. Effects of spatial and temporal variation in environmental conditions on simulation of wildfire spread. *Environmental Modelling & Software* 67, 118-127.
- Holling, C. S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4:1-23.
- Jain T.B., Graham, R.T. 2007. The relation between tree burn severity and forest structure in the Rocky Mountains. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-203. P. 213-250.

- Jahdi, R., Salis, M., Alcasena, F.J., Arabi, M., Arca, B., Duce, P. 2020. Evaluating landscape-scale wildfire exposure in northwestern Iran. *Nat Hazards* 1-22. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03901-4>
- Jahdi, R., Salis, M., Darvishsefat, A.A., Alcasena, F., Mostafavi, M.A., Etemad, V., Lozano, O.M., Spano, D. 2016. Evaluating fire modelling systems in recent wildfires of the Golestan National Park, Iran. *Forestry*, 89: 136-149. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpv045>
- Kalabokidis, K, Ager, A.A., Finney, M.A., Athanasis, N., Palaiologou, P., Vasilakos, C. 2016. AEGIS: a wildfire prevention and management information system. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16, 643–661. doi:10.5194/NHESS-16-643-2016
- Keane, R. E., Mckenzie, D., Falk, D. A., EaH, S., Miller, C., Kellogg, L.K.B. 2015. Representing climate, disturbance, and vegetation interactions in landscape models. *Ecological Modelling*, 309–310, 33–47.
- Keane, R.E., Mincemoyer, S.A., Schmidt, K.A., Long, D.G., Garner, J.L. 2000. Mapping vegetation and fuels for fire management on the Gila National Forest Complex, New Mexico. USDA Forest Service General Technical Report RMRS-GTR-46-CD.
- Kilgore, B.M., Sando, R.W. 1975. Crown-fire potential in a sequoia forest after prescribed burning. *Forest Science*. 21(1): 83-87.
- Martin, D., Tomida, M., Meacham, B. 2016. Environmental impact of fire. *Fire Sci Rev* 5, 5. <https://doi.org/10.1186/s40038-016-0014-1>
- McWethy, D.B., Pauchard, A., Garcia, R.A., Holz, A., Gonzalez, M.E., Veblen, T.T., et al. 2018. Landscape drivers of recent fire activity (2001-2017) in south-central Chile. *PloS One*, Vol.13 (8), 10.1371/journal.e0201195, pone.0201195
- Newberry, B.M., Power, C.R., Abreu, R.C.R., Durigan, G., Rossatto, D., Hoffmann, W.A. 2020. Flammability thresholds or flammability gradients? Determinants of fire across savanna-forest transitions. *The New Phytologist*. 228(3), 910-921. DOI: 10.1111/nph.16742. PMID: 33410161.
- Palaiologou, P., Ager, A.A., Nielsen-Pincus, M., Evers, C.R., Kalabokidis, K. 2018. Using transboundary wildfire exposure assessments to improve fire management programs: a case study in Greece. *International Journal of Wildland Fire* 2018, 27, 501–513. <https://doi.org/10.1071/WF17119>
- Podur J.J., Martell, D.L. 2009. The influence of weather and fuel type on the fuel composition of the area burned by forest fires in Ontario, 1996–2006. *Ecological Applications*, Volume 19 (5), 1246-1252.
- Ray D, Nepstad D, Brando P. 2010. Predicting moisture dynamics of fine understory fuels in a moist tropical rainforest system: results of a pilot study undertaken to identify proxy variables useful for rating fire danger. *New Phytologist* 187: 720–732.
- Reinhardt, E., Crookston, N.L. (Technical Editors). 2003. The Fire and Fuels Extension to the Forest Vegetation Simulator. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR116. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 209p.
- Reinhardt, E.D., Keane, R.E. Brown, J.K. 1997. First Order Fire Effects Model: FOFEM 4.0, User's Guide. USDA Forest Service General Technical Report INT-GTR-344. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah, USA.
- Rothermel, R.C. 1972. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels, US Department of Agriculture, Forest Service. INT-115
- Scarff, F.R., Westoby, M. 2006. Leaf litter flammability in some semi-arid Australian woodlands. *Functional Ecology* 20: 745–752.
- Scott, J.H. 2006. Comparison of crown fire modeling systems used in three fire management applications. Res. Pap. RMRS-RP-58. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 25 p.
- Scott, J.H., Burgan, R.E. 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 p.
- Taneja, R., Hilton, J., Wallace, L., Reinke, K., Jones, S. 2021. Effect of fuel spatial resolution on predictive wildfire models. *International Journal of Wildland Fire*, 30, 776–789.
- Uribe SV, Estades CF, Radeloff VC. 2020. Pine plantations and five decades of land use change in central Chile. *PLoS ONE* 15(3): e0230193. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230193>
- USDA Forest Service. 2005. Deerfield project area final environmental impact statement. Black Hills National Forests, Mystic Ranger District. Rapid City, South Dakota. 112 pp.

- USDA Forest Service. 2003. Prairie Project Area (Lower Rapid Creek Area), Final Environmental Impact Statement, Pennington County, South Dakota. 45 pp.
- Vaillant, N.M., Ager, A.A., Anderson, J. 2013. ArcFuels10 system overview. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-875. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 65 p.
- Van Wagner, C.E. 1968. Fire behavior mechanism in a red pine plantation: field and laboratory evidence. Van Wagner, C.E. Government of Canada, Department of Forestry and Rural Development, Petawawa Forest Experiment Station, Chalk River, Ontario. Departmental publication 1229. 34 p.
- Varner JM, Kane JM, Kreye JK, Engber E. 2015. The flammability of forest and woodland litter: a synthesis. Current Forestry Reports, Vol. 1, P. 91-99.
- Velizarova, E., Stankova, T., Glushkova, M., Xanthopoulos, G., Konstantinov, V.I., Dimitrov, D.N. (2014). Fuel types identification for forest fire risk assessment in Bulgaria. Advances in Forest Fire Research, Chapter 4 - Fire Risk Assessment and Climate Change, P. 1159-1164. http://dx.doi.org/10.14195/978-989-26-0884-6_126

Surface and Crown Fuels and Wildfire Behavior in Natural and Planted Forests Ecosystem of the Watershed of 25 (Shenroud, Siahkal)

Jahdi, Roghayeh^{1*}, Arabi, Mahdi²

^{1*} - Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

² - Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran

*Email Address: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir

Abstract

Siahkal forests in northern Iran experienced extended and devastating fire seasons in recent decades, in most cases, driven by dry, warm/hot, windy weather. Identifying forest fuel and wildfire risk dynamics is important for an integrated fire-forest management strategy. To understand how forest structure controls these dynamics, we quantified forest fuels and fire behaviour across different forest types in the study area. In this work, we present the results of an analysis of wildfire behaviour from historical fire records, vegetation type, weather, and fuel moisture. We used a modelling approach to estimate the physical parameters of surface fire behaviour: flame length and fire size; as well as the potential crown fire occurrence. We selected a large forest watershed area in Siahkal County of north Iran, under temperate broadleaf forests and mixed plantations with variable compositions. To run the model, we gathered data on forest structure and composition, and physical information. We detected moderate to high levels of fire size and flame length, ascribed to the high availability of very dry fine biomass. The crown fire potential varied greatly throughout the landscape. Low stands were more prone to crowning. The results show that crown fire potential in plantation stands especially conifers are higher compared to natural stands. In addition, the early stages of planted stands are more likely to experience crown fire due to their low mean height and low CBH. The findings can assist in the identification of priority areas where forest structure needs to be managed.

Introduction

Numerous physical, climatic and biological factors have been considered significant drivers of wildfire occurrence, behavior, and spread. These include altitude, slope, vegetation type, and human factors such as population density, increased human settlement in the urban-rural interface (WUI), and expansion of plantations with non-native species (Gómez-González et al., 2019; Castillo et al., 2020). Increased plantation with high fuel accumulations and warmer and drier climates can increase the frequency and magnitude of wildfires (McWethy et al., 2018). In such situations, it is necessary to better understand and predict wildfire behavior in different environmental conditions. However, complex interactions between multiple factors influencing fire behavior make predicting fire risk challenging, especially when the landscape is large (e.g., 1,000- 10,000 ha.), the study time frame is long (e.g., 10-100 years), and specific spatial predictions are required (Hilton et al., 2015). Early attempts to predict the characteristics of wildfire behavior focused on surface fires, mainly the rate of spread and their intensity (Scott, 2006). Research and development efforts were followed by several mathematical research models and operational models to predict the crown fires occurrence and their rate of spread (e.g., the Canadian Forestry Fire Risk Rating System). Spatial data of wildland fuels, canopy characteristics, and their distribution are a prerequisite for these wildfire behavior models. Agricultural land development, large-scale land acquisitions, past logging practices, excessive grazing by livestock, and silvicultural treatments have altered forest structure and changed the fire regime from low to mixed-severity to a high severity wildfire in the old-growth Hyrcanian forests of northern Iran in the past 3 decades. Furthermore, fast-growing tree species such as poplars, maples, *Alnus*, and *Pinus* in large-scale plantations were used under short-rotation forestry in the area. In this work, we described the fuel complexes created by the variable forest structure and used a fire simulation system to test for differences in surface and crown fire behaviour among the forest types. Surface and crown fires are modeled using FlamMap MTT simulation (Finney, 2006) and based on local fuel models and historical fire information in the study area. The simulation output maps in this study include estimates of the main characteristics of surface fire, i.e., flame length and fire size, as well as the crown fire probability, which is used to inform land managers about suitable places for silvicultural treatments to remove and reduce combustible fuels, and finally, it is used to design strategies for fire risk management.

Methodology

Study area

The study was conducted in the watershed of 25 (Shenroud), which is located in the lowland and sub-mountain zones of the Hyrcanian forests of northern Iran. This forest watershed comprised 190 km² and extends from the Shenrud River in the north to the Dorfak Peak in the south. The study area is representative of N Iran Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) forests, including its mix with hornbeam (*Carpinus betulus* L.), Chestnut-Leaved Oak (*Quercus Castaneifolia* C.A. Mey.) and Persian ironwood (*Parrotia persica* (DC.) C.A.Mey.), (Fig. 1); small areas of mixed broadleaf (*Acer velutinum* Boiss., *Quercus Castaneifolia* CA Mey., *Populus caspica* Bornm.), conifer (*Picea abies* L. Karst., Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.), *Pinus* sp.), and *Populus* spp. planted stands also occur. The area had various forestry plans designed to address multiple ecosystem services, which focused on wood production, and implementation of silvicultural interventions. The climate is humid and temperate with an oceanic influence, characterized by warm summers and moderate winters, and mean annual temperature and precipitation of 18°C and 1200 mm respectively. The maximum temperature (35°C) is reached in June and July (2000–2020; I.R. of Iran Meteorological Organization (IRIMO)). Elevation ranges from 23 to 2092 m above sea level, and the average slope is 20%. Between 2000 and 2021, 8% of the area burned.

Field Sampling

Field data were obtained from the forest inventory carried out in the framework of forestry plans in the study area. To measure surface and crown fuel characteristics, square samples with dimensions of 30 x 30 meters (130 samples in total) were used by stratified random sampling method in the summer and fall of 2020. All trees with a diameter at breast height (DBH) of 7.5 cm were measured in each plot. Tree height, the height of the live crown base (CBH), and crown width (in two directions at right angles to each other) were measured in a subsample of three trees per plot (the northernmost, southernmost, and one dominant tree). The individual tree measurements were used to estimate the following canopy fuel variables in each plot: canopy height (CH, m), canopy basal height (CBH, m), and canopy bulk density (CBD, 100kg m⁻³). In order to estimate the percentage of grass cover and litter on the forest floor in the center of each sample plot, a microplot with dimensions of 1 x 1 meter was taken. In addition, in these microplots, the diameter of dead and fallen wood pieces was measured. In order to estimate the fuel moisture, by measuring the diameter of dead and fallen wood pieces, three layers of fallen woody fuels according to the timelag for drying including 1-hr (diameter 0-0.6 cm), 10-hr (diameter 0.6-2.5 cm) and 100-hr (diameter 2.5-5.5 cm) were determined according to the classification of Bradshaw et al. (1983). According to these classes, the wet weight in the field and the dry weight in the laboratory (after 72 hours of drying in the oven at 100°C) are measured and the dry weight is subtracted from the wet weight and the result is divided by the dry weight, the fuel moisture content was calculated (Jahdi et al., 2016).

Fire simulation

For the study area, using FlamMap MTT (Finnet, 2006) 10,000 random fires were simulated based on ignition points of historical fires in the studied period. Fire history data for the study area showed 176 recorded fires during the period 2000-2020, almost entirely caused by human-caused fires. The total burned area for these fires is approximately 1524 ha. Fire growth calculations were performed with outputs with a resolution of 30 meters. According to the historical information about the fire and the prevailing wind conditions in the study area, the duration of the fire was simulated for 6 hours with the direction of the west wind and the wind speed of 10 km/h. Finally, the analysis of the fire model outputs including flame length, fire size, and the crown fire probability was done on the scale of the landscape and also the main fuel types in the study area.

Results

The results obtained in Table 1 show that conifer plantation has more fuel load in both live and dead biomass. In this model, the average load of live and dead fuel was estimated at 7.3 and 4 tons per hectare, respectively. In general, the fuel load of live biomass in the broadleaf forest is small, which plays an insignificant role in crown fires. While the amount of dead biomass fuel load is important in the case of surface fires in both conifer and broadleaf forests (Velizarova et al., 2014). Regarding the characteristics of the forest canopy, Figure 1 presents the spatial distribution of the canopy cover, canopy height, canopy base height, and canopy bulk density for the study area. General statistics are

also presented in Table 1. Among the woody fuel models, the natural beech forest has a relatively closed canopy with an average canopy cover of 80%, and after that, the mixed broadleaf forest has the highest canopy cover of 60%. According to the canopy cover, the highest canopy height (18 m) was recorded in the natural beech forest. The variability observed in the average values of the crown base height was lower compared to other crown fuel variables among the available fuel models. The average values of crown base height ranged from 2 m in the shrub fuel to 3.4 m in the natural beech forest. The average crown bulk density in the study area is equal to 15 (100 kg/m²). High crown bulk density values (>20 100 kg/m²) were obtained in the northern areas of the study area and in plantation fuel types. The highest average crown bulk density in the available fuel models was equal to 18 (100 kg/m²) in conifer plantation. The small and dense branches of the Loblolly pine and the Norway spruce have led to a higher density of crown fuel per unit area in conifer plantation. This result is in accordance with the result of the study by Fernández-Alonso et al. (2013). The results of the spatial distribution of the flame length, fire size, and the crown fire probability in the landscape are presented in Figure 1. Regarding surface fire characteristics (flame length and fire size), medium to high levels of these components was detected, which was due to the high availability of very dry fine biomass in the study area. The size of the fires after a 6-hour simulation ranged from 0.1 ha to 2,300 ha, with an average of 430 ha. The flame length also varied from 0 m to 5 m, with an average of about 1 m. Regarding the crown fire potential, which is a function of the quantity and order of combustible fuels, the low level of this component was simulated in the study area. Based on the model results, the crown fire probability varied from 0 to 15% in the study area, with an average of 2%. Also, in Table 2, the differences in the average of these simulated fire behavior characteristics in different fuel models are presented. The results show the largest size of the simulated fire (more than 1,000 hectares) in the grass fuel relative to other fuel models in the study area (Table 2). The increase in burning and fire size as a result of the low weight density of grassy combustible materials has also been confirmed in the studies of Scarff and Westoby (2006) and Varner et al. (2015). In the study area, with the increase in tree density from the grass-fuel model to the wood-fuel model, a significant decrease in fire spread rate and fire intensity and as a result, the simulated fire size is observed. By creating a colder and wetter microclimate, tree cover increases the moisture content of fuel and reduces flammability (Newberry et al., 2020). This case has led to less flammability of wood-fuel models, especially in natural forests in the studied area. This result is in accordance with the studies of Ray et al. (2010) and Dodonov et al. (2013). Based on the results of the probability of crown fire occurrence, short forest stands are more prone to crown fire, so fuel models with a higher height of the crown base (3 meters and more in natural forests) have lower fire intensity which is in accordance with the result of Jain and Graham (2007). This is due to the fact that surface combustible materials play an important role in the development of crown fires, especially in short piles (Van Wagner, 1968). The results show that the crown fire potential in hand-planted stands, especially conifers, is higher compared to natural stands. This case is caused by the effect of coniferous fuel types with special physical or chemical characteristics, which independently of surface fires, support crown fires under extreme environmental conditions, especially strong winds. (Kilgore and Sando, 1975).

Conclusion

As expected, fire behavior was different in the models of flammable fuel in the study area (grassy, shrubby, tree-shrub, and wood litter). Even in a specific fuel model, such as the wood litter fuel model, which included broadleaf and coniferous forestry in the study area, differences in fire behavior were observed. In the comparison of surface and crown fire, the occurrence of crown fire and the subsequent behavior of crown fire are highly dependent on the characteristics of crown fuel, especially crown weight density and crown base height. Based on the results, fuel models with higher crown base height and lower crown weight density have less crown fire spread potential. In general, the crown fire potential in natural stands and hand-planted in the study area was very different, which requires further investigation of choices in afforestation, especially in the selection of non-native species. In this study, combustible material models were identified based on field sampling at the scale of the landscape. However, there is a need for local fuel models specific to each habitat to provide more accurate predictions of fire behavior, especially in the landscape of heterogeneous and fragmented Hyrcanian forests.

Keywords

Fuel models; Modelling approach; Siakhkhal forests; Wildfire risk