Journal of Natural Environment Hazards
University of Sistan and Baluchestan
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol.12, Issue 37, September 2023

Effects of silvicultural thinning in planted stands on surface and crown wildfire behavior (Case study: Malekroud districts of Siahkal Forest)

Roghayeh Jahdi[1*], Mahdi Arabi[2]

1. *Corresponding Author*, Assistant Professor of Forest Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2. Associate Professor of Surveying, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, I.R. Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 22 April 2022
Revised: 20 May 2023
Accepted: 03 June 2023

Keywords:
Fuel, Modeling, Siahkal, Silviculture, Thinning

ABSTRACT

Under rapid climate change, desertification, and land degradation, a critical management issue in forests of northern Iran is how to increase forest resilience to wildfires. For decades, forest managers have been employing silvicultural treatments to restore the Hyrcanian forest stand's structure, composition, and diversity, but there is no scientific evidence to support that these treatments reduce the wildfire risk in the area. In this study, based on the wildfire behavior modeling approach using FlamMap MTT, we evaluated spatial relationships between silvicultural fuel reduction treatment (e.g., thinning) and surface and crown burn probabilities in the 6 and 7 Malekroud districts of Siahkal forest. We first analyzed fuel characteristics after the development of silvicultural treatments in the period 2007-2017 in the study area to evaluate low thinning and heavy thinning as restoration tools for similar fuel conditions. Furthermore, we conducted analyses of variance to determine the influence of the silvicultural thinning treatment on surface and canopy burn probabilities. Modeling results at the landscape scale confirm the important role of thinning in the mitigation of crown burn probability (almost 11%) in the study area. However, the effect of thinning on the surface burn probability was not statistically significant (P> 0.05). Comparing the two types of thinning in terms of intensity, heavy thinning had a greater effect on changing the surface and crown (i.e., 10% increase and 39% decrease, respectively, in conifer plantation) burn probability than the low thinning. The modeling approach in the study offers new insights to improve the spatial mapping of wildfire likelihood, include variables sensitive to thinning operation in the models, and provide useful information to prevent extreme wildfire behavior through effective silvicultural treatments.

Cite this article: Jahdi, R., & Arabi, M. (2023). Effects of silvicultural thinning in planted stands on surface and crown wildfire behavior (Case study: Malekroud districts of Siahkal Forest). Journal of Natural Environmental Hazards, 12(37), 1-16. DOI: 10.22111/jneh.2023.42189.1896

© Roghayeh Jahdi Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2023.42189.1896

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

مخاطرات محیط طبیعی
شاپا چاپی: ۲۶۷۶-۴۳۷۷ شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۳۸۵
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۲، شماره ۳۷، مهر ۱۴۰۲

ارزیابی اثر تنک‌کردن جنگل‌شناسی در توده‌های دست‌کاشت بر رفتار آتش‌سوزی-های سطحی و تاجی (مطالعه موردی: سری‌های ملکرود جنگل سیاهکل)

رقیه جهدی[1*]، مهدی عربی[2]

۱. استادیار علوم و مهندسی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل (نویسنده مسئول)
۲. دانشیار نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۲

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۲/۰۳/۱۳

واژه‌های کلیدی:
تنک‌کردن، جنگل‌شناسی، ماده‌سوختنی، مدل‌سازی، سیاهکل.

چکیده

در شرایط تغییرات اقلیمی، بیابان‌زایی و تخریب زمین، یک مسئله مدیریتی حیاتی در جنگل‌های شمال ایران این است که چگونه می-توان تاب‌آوری جنگل‌ها را در برابر آتش‌سوزی‌ها افزایش داد. طی دهه‌های گذشته، مدیران جنگل از تیمارهای جنگل‌شناسی به‌منظور بازسازی ساختار، ترکیب و تنوع توده‌های جنگلی هیرکانی استفاده کرده‌اند، اما شواهد علمی مبنی بر اثر این تیمارها بر کاهش خطر آتش در این منطقه وجود ندارد. در این مطالعه بر اساس رویکرد مدل‌سازی رفتار آتش با استفاده از فلم‌مپ ام‌تی‌تی، روابط مکانی بین تیمار جنگل‌شناسی کاهش ماده‌سوختنی (تنک‌کردن) و احتمال سوختن سطحی و تاجی در سری‌های ۶ و ۷ ملکرود جنگل سیاهکل ارزیابی شد. در ابتدا مشخصات ماده‌سوختنی بعد از توسعه تیمارهای جنگل‌شناسی در دوره زمانی ۱۳۸۵ الی ۱۳۹۵ در منطقه مطالعه برای ارزیابی تنک‌کردن سبک و تنک‌کردن سنگین به‌عنوان ابزارهای بازسازی برای شرایط ماده‌سوختنی مشابه تجزیه و تحلیل شد. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل واریانس برای تعیین اثر تیمار جنگل‌شناسی تنک‌کردن بر احتمال‌های سوختن سطحی و تاجی انجام شد. نتایج مدل‌سازی در سطح سیمای‌سرزمین نقش مهم تنک‌کردن را در کاهش احتمال سوختن تاجی (تقریبا ۱۱ درصد) در منطقه مورد مطالعه تایید می‌کند، با این وجود، اثر تنک‌کردن روی احتمال سوختن سطحی از نظر آماری معنی‌دار نبود ($P>0/05$). در مقایسه دو نوع تنک‌کردن از نظر شدت، تنک سنگین اثر بیشتری روی تغییر احتمال سوختن سطحی و تاجی (به‌ترتیب ۱۰ درصد افزایش و ۳۹ درصد کاهش در توده جنگل‌کاری سوزنی‌برگ) نسبت به تنک سبک داشته است. به رویکرد مدل‌سازی در این مطالعه بینش‌های جدیدی را برای بهبود تهیه نقشه مکانی احتمال سوختن جنگل، شامل وارد کردن متغیرهای حساس به عملیات تنک‌کردن به مدل‌ها و ارائه اطلاعات مفید برای جلوگیری از رفتار شدید آتش‌سوزی جنگل از طریق تیمارهای موثر جنگل‌شناسی ارائه می‌دهد.

استناد: جهدی، رقیه، عربی، مهدی. (۱۴۰۲). ارزیابی اثر تنک‌کردن جنگل‌شناسی در توده‌های دست‌کاشت بر رفتار آتش‌سوزی-های سطحی و تاجی (مطالعه موردی: سری‌های ملکرود جنگل سیاهکل). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۷)، ۱۶-۱. DOI: 10.22111/jneh.2023.42189.1896

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© رقیه جهدی*، مهدی عربی.

*- رقیه جهدی (نویسنده مسئول)
Email: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir

مقدمه

در دهه‌های گذشته، طیف وسیعی از مطالعات علمی در زمینه آتش‌سوزی جنگل، از تاریخچه آتش تا اکولوژی و رفتار آتش (چگونگی رخداد و پیشروی آتش درون جنگل)، انجام شده که می‌توان آنها را به چهار گروه کلی تقسیم کرد: مشاهدات، مطالعات موردی، مدل‌های ریاضی و مطالعات تجربی (کری و اس‌چون[۱]، ۲۰۰۳). مواردی که مشاهدات را بازگو می‌کنند، عموماً بر اساس تجربه شخصی نویسندگان است و معمولاً شامل داده‌هایی درباره شرایط آب و هوایی یا بارهای ماده‌سوختنی[۲] (وزن خشک توده یا اجزای ماده‌سوختنی در واحد سطح) نمی‌شود. مطالعات موردی داده-هایی را در مورد یک تیمار یا منطقه ارائه می‌دهند، اما تکرار نمی‌شوند و ماهیت تجربی ندارند. مواردی که مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی را توصیف می‌کند، از پیش‌بینی‌های نظری رفتار آتش گرفته تا مطالعاتی که کاربرد مدل‌ها را در زمینه داده‌های خاص آزمایش می‌کنند، متغیر است. در نهایت، مطالعات تجربی تحقیقاتی را توصیف می‌کنند که شامل یک فرضیه قابل‌آزمایش، تکرار و داده‌های پشتیبان است (کری و اس‌چومن، ۲۰۰۳؛ سانتونی[۳] و همکاران، ۲۰۱۱). مدل‌های ریاضی رفتار آتش (فیزیکی، نیمه‌فیزیکی، نیمه‌تجربی، تجربی) از اوایل دهه ۱۹۷۰ برای درک حوادث مشاهده‌شده، پیش‌بینی پیشروی آتش و آزمایش تأثیر شرایط محیطی متفاوت بر رفتار آتش، توسعه و به کار گرفته شده‌اند (کوئن[۴]، ۲۰۱۸). این مدل‌ها برای شبیه‌سازی رفتار و گسترش آتش به منظور ارزیابی فشار آتش (آلکاسنا[۵] و همکاران، ۲۰۱۶)، سنجش خطر آتش (پالایلوگوس[۶] و همکاران، ۲۰۲۰)، انتقال آتش‌سوزی[۷] در جنگل (سالیس[۸] و همکاران، ۲۰۲۱)، تعیین اثر تغییر اقلیم بر آتش‌سوزی (شوناگل[۹] و همکاران، ۲۰۱۷) و ارزیابی مدیریت ماده‌سوختنی و تیمارهای کاهش ماده‌سوختنی (کین[۱۰] و همکاران، ۲۰۱۹) استفاده شده‌اند. مدیریت ماده‌سوختنی می‌تواند شامل کاهش بار ماده‌سوختنی، تبدیل ماده‌سوختنی به انواع با اشتعال‌پذیری کمتر یا جداسازی ماده‌سوختنی باشد (پاین[۱۱] و همکاران، ۱۹۹۶). در واقع هدف از انجام هر سه این فعالیت‌ها، افزایش فاصله بین مولفه‌های ماده-سوختنی با اشتعال‌پذیری زیاد در یک واحد سطح مشخص است. تیمارهای ماده‌سوختنی مانند تنک‌کردن جنگل-شناسی از پایین و هرس و متعاقباً حذف موادسوختنی سطحی، به منظور کاهش شدت خط آتش[۱۲] (میزان انرژی گرمایی آزاد شده)، کاهش شروع آتش تاجی و پشتیبانی از عملیات اطفای آتش انجام می‌شود (ایجی و اسکینر[۱۳]، ۲۰۰۵).

پیش‌بینی‌ها در مناطق مختلف جهان حاکی از افزایش تعداد و سطح آتش‌سوزی جنگل‌ها دارد. به عنوان مثال در اروپا، در دو سناریوی افزایش گرمای جهان به میزان ۱/۵ و ۳ درجه سانتی‌گراد (بر اساس میانگین‌های ۳۰ ساله دمای متوسط جهانی از سال ۱۸۵۰ تا سال ۲۱۰۰)، برآورد شده است که شاهده به ترتیب ۴۰ و ۱۰۰ درصد افزایش

1 Carey & Schumann
2 Fuel load
3 Santoni
4 Coen
5 Alcasena
6 Palaiologou
7 Wildfire transmission
8 Salis
9 Schoennagel
10 Keane
11 Pyne
12 Fireline intensity
13 Agee & Skinner

مناطق سوخته‌شده باشیم (تورکو[1] و همکاران، ۲۰۱۸). ترکیب جنگل و توزیع تیپ‌های ماده‌سوختنی موجود می‌تواند یکی از عوامل اصلی آتش‌سوزی‌ها باشد، به عنوان مثال جنگل‌کاری‌های اکالیپتوس و کاج در برابر آتش‌سوزی‌ها آسیب‌پذیرتر هستند (هیرشبرگر[2]، ۲۰۱۶). با توجه به رویکرد تغییر اقلیم، کاهش خطر آتش از طریق تیمارهای ماده‌سوختنی برای کاهش بار ماده‌سوختنی مانند آتش‌سوزی کنترل‌شده (اصطلاحاً تجویزی) و تنک‌کردن می‌تواند موثر باشد. در واقع مدیریت جنگل از طریق روش‌های جنگل‌شناسی می‌تواند بار ماده‌سوختنی موجود را کاهش دهد. ایجاد و حفظ نوارهای خالی از گیاهان (اصطلاحاً آتش‌برها) نیز می‌تواند به کاهش گسترش آتش کمک کند. سایر تلاش‌های جلوگیری از آتش شامل بهبود روش‌های کشف سریع آتش و افزایش ظرفیت اطفای آتش در مناطق با خطر زیاد آتش است.

طی سال‌های گذشته، جنگل‌های هیرکانی شمال ایران با چالش مهم آتش‌سوزی به‌ویژه در بوم‌سازگان‌های حساس به آتش مواجه بوده است. بنابراین چگونگی افزایش تاب‌آوری این جنگل‌ها در برابر آتش‌سوزی‌ها تبدیل به یک مسئله بحرانی مدیریت این بوم‌سازگان‌ها شده است. اثربخشی تیمارهای جنگل‌شناسی کاهش ماده‌سوختنی مانند تنک‌کردن روی رفتار آتش‌سوزی‌های سطحی و تاجی مدل‌سازی‌شده در بسیاری از بوم‌سازگان‌های جنگلی مانند جنگل‌های خشک غرب ایالات متحده (کالیس و یوکوم کنت[3]، ۲۰۱۶)، جنگل‌های سوزنی‌برگ مناطق سرد نیمکره شمالی (تامپسون[4] و همکاران، ۲۰۲۰) و جنگل‌های مدیترانه‌ای (سالیس و همکاران، ۲۰۱۸) تأیید شده است. این تیمارهای جنگل‌شناسی به‌منظور بازسازی جنگل‌ها به وضعیت‌های تاب‌آورتر در مقابل آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال ایران طراحی نشده است. تیمار تنک‌کردن در سطح توده در این جنگل‌ها با هدف بازسازی مشخصات ساختاری جنگل انجام شده که اثر آن بر رفتار آتش در این منطقه نامشخص است. در این مطالعه از مدل آتش فلم‌مپ امتی‌تی[5] برای شبیه‌سازی رفتار و گسترش آتش‌سوزی‌های سطحی و تاجی در توده‌های دست‌کاشت پهن‌برگ و سوزنی‌برگ تنک-شده و مقایسه آن با رفتار آتش در توده‌های تنک‌نشده استفاده شده است. هدف اصلی برآورد احتمال سوختن سطحی و تاجی و مقایسه بین توده‌های تنک‌نشده و تنک‌شده با استفاده از یک رویکرد مدل‌سازی و تحلیل آماری است. احتمال سوختن به‌عنوان یکی از مشخصه‌های اصلی رفتار آتش مربوط به اندازه آتش‌سوزی‌هایی است که در یک سیمای‌سرزمین مشخص رخ می‌دهد. آتش‌سوزی‌های بزرگ احتمال بیشتری نسبت به آتش‌سوزی‌های کوچک دارند. از آنجایی که اندازه آتش تابعی از نرخ گسترش[6] (سرعت حرکت جبهه آتش تحت تأثیر فرایند سوختن و درون ماده‌سوختنی آتش نگرفته) و مدت زمان آتش‌سوزی است، تیمارهای جنگل‌شناسی که نرخ گسترش را کم می‌کنند، احتمال سوختن را کاهش می‌دهند. بنابراین این مطالعه می‌تواند به درک نقش تیمارهای جنگل‌شناسی در تاب‌آوری توده‌های جنگل در برابر آتش‌سوزی‌ها کمک کند و رویکرد بهتری از مدل‌سازی برای بهبود تهیه نقشه پیش‌بینی و شبیه‌سازی مکانی احتمال آتش ارائه کند.

[1] Turco
[2] Hirschberger
[3] Kalies & Yocom Kent
[4] Thompson
[5] FlamMap MTT
[6] Rate of spread

مواد و روش‌ها

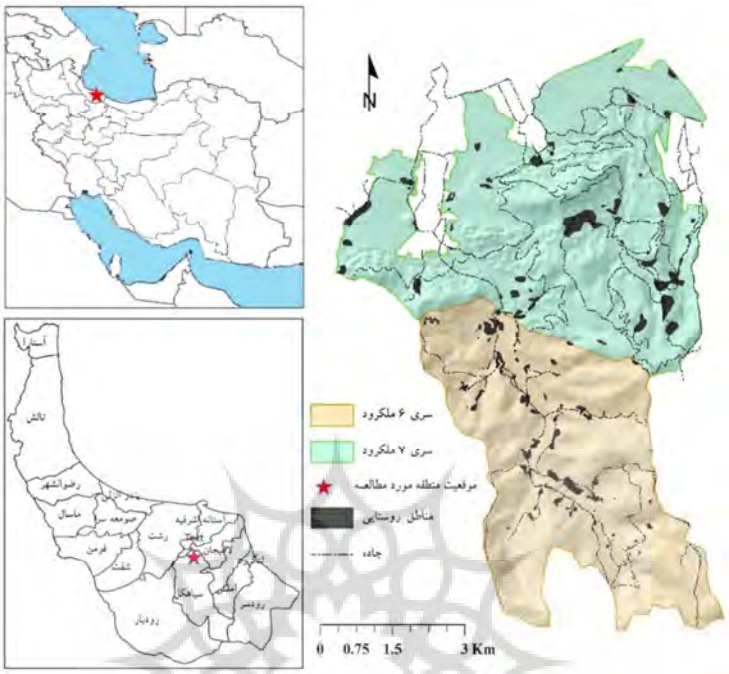
منطقه مورد مطالعه:

منطقه مورد مطالعه با وسعت ۵۳۲۶/۵ هکتار شامل سری‌های جنگلداری ۶ ملکرود (۲۳۰۵ هکتار) و ۷ ملکرود (۳۰۲۱/۵ هکتار) از حوضه آبخیز شماره ۲۴، در شهرستان سیاهکل و در فاصله یک کیلومتری از شهر سیاهکل واقع شده است (شکل ۱). این منطقه در عرض شمالی '۳۴ °۳۶ تا '۳۸°۲۷ و طول شرقی '۴۸°۵۳ تا '۵۰°۳۴، در حدود ارتفاعی ۱۷ تا ۹۰۳ متر از سطح دریا در حاشیه رودخانه ملکرود قرار دارد (شکل ۲). این منطقه شامل اراضی جلگه-ای، غیرسنگلاخی و کم شیب با پایداری نسبتا خوب است. این دو سری با قرار گرفتن در پهنه‌های جلگه‌ای و کوهپایه‌ای با نواحی اقلیمی معتدله مرطوب و نیمه‌مرطوب، با متوسط ارتفاع ۲۱۰ متر از سطح دریا، دارای میانگین بارش سالانه حدود ۱۴۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه برابر با ۱۶ درجه سانتی‌گراد (بر پایه آمار هواشناسی دوره زمانی ۲۰۱۵-۱۹۹۰) هستند (فروزش سوتگوابری[1] و همکاران، ۲۰۰۹؛ خوشدل[2] و همکاران، ۲۰۱۹). بادهای غربی در این منطقه غالب هستند و علاوه بر آنها پدیده فون یا گرم‌باد (گرمش) ناشی از استقرار مرکز کم‌فشار در سطح زمین در منطقه دریای سیاه و یا شمال عراق و یا در شرق ترکیه در فصول سرد، منجر به تغییر جهت وزش باد شده و بادهای گرم و خشک از جنوب و جنوب‌غربی به این منطقه می‌وزند (رحیمی و خادمی[3]، ۱۳۹۷؛ عابد[4] و همکاران، ۱۳۹۴؛ مفیدی[5] و همکاران، ۲۰۱۵).

سیمای‌سرزمین منطقه مورد مطالعه اغلب متشکل از جنگل‌کاری‌های دست‌کاشت و مابقی جنگل‌های طبیعی ممرز[6]، انجیلی[7]، راش[8]، بلندمازو[9]، توسکای ییلاقی[10] و توسکای قشلاقی[11] است (شکل ۲الف). در میان گیاهان علفی زیراشکوب جنگل، گونه‌های کوله‌خاس[12]، ازملک[13]، تمشک[14]، متامتی[15]، فرفیون[16] و پامچال[17] از فراوان‌ترین‌ها هستند. همچنین، درصد پوشش گونه‌های علفی در توده‌های پهن‌برگ (۱۰ الی ۳۰ درصد) بیشتر از توده‌های سوزنی‌برگ است. ضخامت لاشبرگ در توده‌های جنگل‌کاری سوزنی‌برگ ۲-۱ سانتی‌متر و در توده‌های طبیعی و جنگل‌کاری پهن‌برگ کمتر از ۱ سانتی‌متر است. زادآوری در توده‌های طبیعی به‌صورت پراکنده و بعضاً گروهی استقرار یافته است.

پرتال جامع علوم انسانی

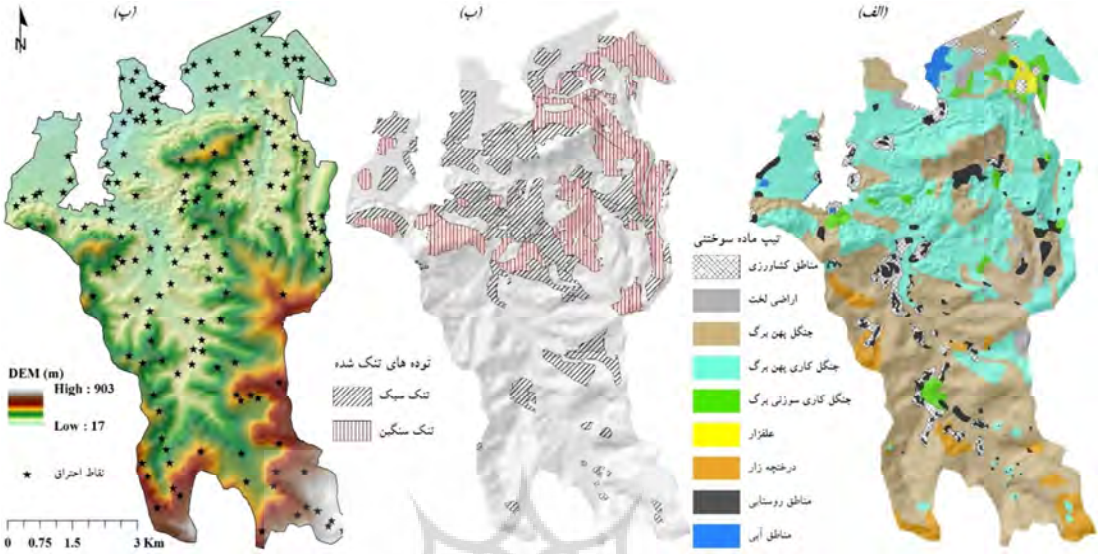
1 Forouzesh-Sotgavaberi
2 Khoshdel
3 Rahimi & Khademi
4 Abed
5 Mofidi
6 Carpinus betulus L.
7 Parrotia persica (DC.) C.A.Mey.
8 Fagus orientalis Lipsky
9 Quercus castaneifolia C.A. Mey.
10 Alnus subcordata C.A.Mey.
11 Alnus glutinosa (L.) Gaertn.
12 Ruscus hyrcanus
13 Smilax-excelsa
14 Rubus-hsp
15 Hypricum androsenum
16 Euphobia antiquorum L.
17 Primula-aculis



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه (سری‌های ۶ و ۷ ملکرود) واقع در شرق استان گیلان در شمال ایران

جنگل‌های این منطقه به‌ویژه سری ۷ ملکرود، در گذشته از طریق قطع یکسره وسیع و قطع نواری در دهه‌های ۷۰ و ۸۰ شمسی بهره‌برداری شده و سپس با گونه‌های پهن‌برگ بومی مانند افرا پلت[1]، بلوط، ون[2] و توسکا و گونه‌های سوزنی‌برگ مانند کاج تدا[3]، زربین[4] و نوئل[5] جنگل‌کاری شده است (اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان، ۱۳۷۹). در جنگل‌کاری‌های پهن‌برگ تجدیدحیات طبیعی مانند ممرز و بلوط استقرار یافته، ولی در جنگل-کاری تدا به دلیل تراکم درختی و فراوانی لاشبرگ سوزنی تجدیدحیات وجود ندارد. در جنگل‌های دست‌کاشت با ساختار تقریبا همسال، برش‌های تنک‌کردن در دهه‌های ۸۰ و ۹۰ شمسی، با تنظیم آمیختگی ساختار افقی و عمودی جنگل به‌منظور دستیابی به جنگل ناهمسال آمیخته و نامنظم در قالب طرح‌های جنگلداری اجرا شده است. تنک-کردن به دو روش ۱) تنک‌کردن سبک (هر سه سال یکبار (۱۳۸۵، ۱۳۸۸، ۱۳۹۱، ۱۳۹۴) با برداشت ۱۰ درصد از سطح مقطع برابر سینه) و ۲) تنک‌کردن سنگین (هر پنج سال یکبار (۱۳۸۵، ۱۳۹۰، ۱۳۹۵) با برداشت ۳۰ درصد از سطح مقطع برابر سینه)، با حد قطر برابر سینه بیش از ۱۵ سانتی‌متر انجام شده است (اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان، ۱۳۸۹). در شکل ۲ب موقعیت این توده‌های تنک‌شده که در توده‌های همسال پهن‌برگ و سوزنی‌برگ دست‌کاشت انجام شده، به تفکیک روش تنک سبک (۵۶ توده با متوسط مساحت ۱۲ هکتار) و تنک سنگین (۳۲ توده با متوسط مساحت ۲۰ هکتار) ارائه شده است.

1 Acer velutinum Boiss.
2 Fraxinus excelsior L.
3 Pinus taeda L.
4 Cupressus sempervirens L.
5 Picea abies L. Karst.



شکل ۲: نقشه‌های توزیع تیپ‌های ماده‌سوختنی اصلی (الف) به همراه موقعیت توده‌های تنک‌شده (ب) و توزیع نقاط احتراق تاریخی (۱۴۰۰-۱۳۸۰) به همراه مدل رقومی ارتفاع[1] (متر؛ پ) در منطقه مورد مطالعه

روش پژوهش:

رویکرد مدل‌سازی ارائه شده در این تحقیق بر اساس سیستم شبیه‌سازی گسترش آتش فلم‌مپ ام‌تی‌تی (فینی[2]، ۲۰۰۶) است. این سیستم احتمال رخداد آتش، پیش‌روی آتش و گریز از حمله اولیه و تبدیل شدن به آتش‌سوزی بزرگ را شبیه‌سازی می‌کند. مکان‌های احتراق به‌طور احتمالی بر اساس یک شبکه تراکم احتراق ساخته شده از الگوهای مکانی احتراق تاریخی (شکل ۲پ) ایجاد می‌شود. نقشه موقعیت نقاط احتراق تاریخی (۱۴۰۰-۱۳۸۰؛ در مجموع ۱۶۰ نقطه احتراق) با توجه به پیشینه آتش‌سوزی‌ها در منطقه مورد مطالعه و بر پایه بررسی‌های میدانی و گزارش‌های ثبت شده در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری گیلان تهیه شد.

مدل پیشروی آتش، رشد روزانه یک آتش‌سوزی تازه مشتعل شده یا در حال حرکت را از طریق گسترش طول شعله و آتش نقطه‌ای، به عنوان تابعی از ماده‌سوختنی، آب و هوا و توپوگرافی شبیه‌سازی می‌کند. این اطلاعات شامل نقشه‌های رستری ماده‌سوختنی و توپوگرافی در فایل سیمای سرزمین[3] برای مدل‌سازی آتش‌سوزی‌های سطحی و تاجی جمع‌آوری می‌شود. به منظور مدل‌سازی رفتار آتش از متغیرهای آب و هوایی در شرایط فصل آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه شامل سرعت و جهت باد و رطوبت ماده‌سوختنی استفاده شد. این متغیرها بر اساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی نزدیک به منطقه مورد مطالعه، ایستگاه ازبرم سیاهکل (واقع در ارتفاع ۷۷ متر؛ '۴۰°۴۰ عرض شمالی، '۴۱°۱۱ طول شرقی) تهیه شد (جدول ۱).

1 DEM
2 Finney
3 Landscape file; LCP

جدول ۱: متغیرهای آب و هوایی و ماده‌سوختنی استفاده شده برای شبیه‌سازی رفتار آتش در منطقه مورد مطالعه

سرعت باد ($km\ h^{-1}$)	جهت باد (°)	محتوای رطوبت ماده-سوختنی (٪)	طبقات ماده‌سوختنی				
			ماده‌سوختنی مرده (بر حسب قطر)			ماده‌سوختنی زنده	
			< ۰/۶ سانتی‌متر	۰/۶-۲/۵ سانتی‌متر	۲/۵-۷/۶ < سانتی-متر	علفی	چوبی
۱۰	۲۲۵		۱۱	۱۲	۱۳	۹۰	۱۱۰

جهت اندازه‌گیری مشخصات ماده‌سوختنی جنگل از ۴۰ قطعه‌نمونه مربع شکل (۳۰×۳۰ مترمربعی) با روش نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده در تابستان و پائیز ۱۴۰۰ استفاده شد. در این قطعه‌نمونه‌ها اندازه‌گیری تعداد درختان، ارتفاع درخت (با استفاده از متر لیزری)، قطر برابرسینه درختان (با استفاده از نوار قطرسنج) و برآورد درصد تاج پوشش انجام شد. میانگین مشخصات اندازه‌گیری شده مواد سوختنی چوبی در تیپ‌های ماده‌سوختنی اصلی منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. در مرکز هر قطعه‌نمونه یک ریزقطعه‌نمونه (۱×۱ مترمربعی) برای جمع‌آوری اطلاعات پوشش علفی و لاشبرگ کف جنگل در نظر گرفته شد که در آن اندازه‌گیری قطر قطعات چوبی افتاده (با خط‌کش کولیس)، عمق متوسط لاشبرگ (با خط‌کش) و برآورد درصد پوشش علفی و لاشبرگ انجام شد (جهدی[1]، ۱۴۰۰). برآورد رطوبت ماده‌سوختنی بر اساس مطالعه جهدی و همکاران (۱۳۹۴ و ۱۳۹۹) و بر مبنای چهار طبقه قطری شامل < ۰/۶، ۰/۶-۲/۵، ۲/۵-۷/۶ < و ۷/۶ < سانتی‌متر (امین املشی[2] و همکاران، ۱۳۹۵) انجام شد. این طبقات مواد سوختنی بر مبنای انداه‌گیری قطر قطعات چوبی افتاده مشخص شد. لازم به ذکر است که طبقه قطری چهارم (۷/۶ < سانتی‌متر) در منطقه مورد مطالعه وجود نداشت. وزن تر موادسوختنی در این طبقات (جمع‌آوری شده در کیسه‌های پلاستیکی) با استفاده از ترازوی الکترونیکی با دقت ۰/۱ گرم، اندازه‌گیری شد. سپس با انتقال این طبقات ماده‌سوختنی به آزمایشگاه، به مدت ۷۲ ساعت در دستگاه آون با حرارت ۱۰۰ درجه سلسیوس خشک شده و دوباره با همان ترازو وزن شدند. مقدار رطوبت ماده‌سوختنی (درصد) با تفریق وزن خشک از وزن تر آن و تقسیم نتیجه بر وزن خشک محاسبه شد (جدول ۱). این اطلاعات اندازه‌گیری‌شده مرتبط با مواد سوختنی درختی، درختچه‌ای و علفی در منطقه مورد مطالعه در زمان شبیه‌سازی آتش‌سوزی‌ها به عنوان ورودی مدل‌های ماده‌سوختنی در هر تیپ ماده‌سوختنی اصلی (شکل ۲ الف) به نرم‌افزار شبیه‌ساز آتش معرفی شد.

جدول ۲: میانگین مشخصات مواد سوختنی چوبی اندازه‌گیری‌شده در تیپ‌های ماده‌سوختنی اصلی (شکل ۲ الف) منطقه مورد مطالعه

تیپ ماده‌سوختنی اصلی	سطح مقطع (مترمربع در هکتار)	تراکم (تعداد در هکتار)	قطر برابر سینه (سانتی‌متر)	ارتفاع درخت (متر)	حجم درخت (مترمکعب در هکتار)	تاج پوشش (درصد)
جنگل پهن‌برگ	۳۲/۲	۳۶۵	۲۸/۱	۱۹/۶	۴۱۷/۲	۸۰
جنگل‌کاری پهن‌برگ	۲۸	۱۰۵۶	۱۴/۶	۱۴/۱	۲۲۴/۱	۷۰
جنگل‌کاری سوزنی‌برگ	۲۳/۵	۱۱۸۷	۱۵/۲	۱۱/۶	۱۸۵/۴	۷۰
درختچه‌زار	۹/۴	۱۳۲	۵/۵	۶	۱۰۱/۵	۳۰

1 Jahdi
2 Amin Amlashi

به‌منظور ارزیابی اثر تنک‌کردن روی رفتار آتش، دو فایل سیمای‌سرزمین تیمارشده (با در نظر گرفتن توده‌های تنک‌شده) و بدون‌تیمار (بدون در نظر گرفتن توده‌های تنک‌شده) با اندازه تفکیک ۳۰ متری برای شبیه‌سازی رفتار آتش در مدت زمان ۶ ساعت (زمان تقریبی آتش‌سوزی‌های تاریخی در منطقه مورد مطالعه) تهیه شد. تفاوت اصلی این فایل‌ها در مشخصات ماده‌سوختنی جنگل (اندازه‌گیری‌شده مطابق توضیحات پاراگراف قبلی) در توده‌های تنک-شده و توده‌های تنک‌نشده، می‌باشد. احتمال سوختن سطحی و تاجی هر پیکسل از سیمای‌سرزمین با توجه به یک نقطه احتراق در منطقه مورد مطالعه، برای توده‌های تنک‌شده و تنک‌نشده محاسبه شد. اثر تنک‌کردن به‌صورت تغییر متناسب در احتمال سوختن از اختلاف این احتمالات بین دو سناریوی شبیه‌سازی‌شده برآورد شد. علاوه بر این، از آزمون‌های تی-استیودنت [1]برای مقایسه آماری تفاوت‌های معنی‌دار بین توده‌های تنک‌نشده (کنترل) و تنک‌شده ($P < ۰/۰۵$، دوطرفه[2]) و تحلیل واریانس[3] برای مقایسه تفاوت‌ها بین احتمالات آتش شبیه‌سازی‌شده در دو سناریو ($P < ۰/۰۵$، دوطرفه) استفاده شد. فرض نرمال‌بودن با استفاده از آزمون برازش توزیع نرمال شاپیرو ویلک[4] و فرض یکسان‌بودن واریانس با استفاده از آزمون لون[5] مورد آزمایش قرار گرفتند و در صورت لزوم، داده‌ها برای برآورده‌کردن این مفروضات به‌صورت لگاریتم یا ریشه‌مربع تبدیل شدند. در موارد متعددی که داده‌ها را نمی‌شد برای برآورده کردن مفروضات آزمون تی-زوجی تبدیل کرد، از آزمون ناپارامتری رتبه علامت‌دار ویلکاکسون[6] استفاده شد (سالیس و همکاران، ۲۰۱۸). انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری در این مطالعه به کمک نرم‌افزار آماری اکسل‌تت[7] در محیط اکسل[8] و سطح اطمینان ۹۵ درصد در مقایسه میانگین‌ها، استفاده شد.

یافته‌های تحقیق

در این مطالعه در ابتدا تجزیه و تحلیل داده‌ها در دو سناریو تنک‌شده (با در نظر گرفتن هر دو روش تنک سبک و تنک سنگین باهم) و سناریو تنک‌نشده در سطح سیمای‌سرزمین انجام و نتایج ارائه شد. در جدول ۳ نتایج شبیه-سازی احتمال سوختن سطحی و تاجی در دو سناریوی تنک‌نشده و تنک‌شده در سطح سیمای‌سرزمین مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به تحلیل آماری انجام شده اثر تنک‌کردن روی احتمال سوختن سطحی معنی‌دار نبود ($P> ۰/۰۵$). اثر تنک‌کردن روی احتمال سوختن تاجی متفاوت با احتمال سوختن سطحی بود. به‌طوری که برای سناریوی تنک‌شده، کاهش متوسط احتمال سوختن تاجی به مقدار تقریبا ۱۱ درصد نسبت به سناریوی تنک‌نشده مشاهده شد. این کاهش احتمال سوختن تاجی با توجه به تحلیل آماری انجام شده معنی‌دار است ($P< ۰/۰۵$).

نقشه‌های تغییر پیکسل به پیکسل احتمال‌های سوختن سطحی و تاجی مدل‌سازی شده بین دو سناریوی تنک‌شده و تنک‌نشده در سطح سیمای‌سرزمین مورد مطالعه در شکل ۳ ارائه شده است. در این شکل دو نقشه تغییر احتمال سوختن سطحی و تغییر احتمال سوختن تاجی با مقادیر ارزش‌های منفی (افزایش احتمال) و مثبت (کاهش

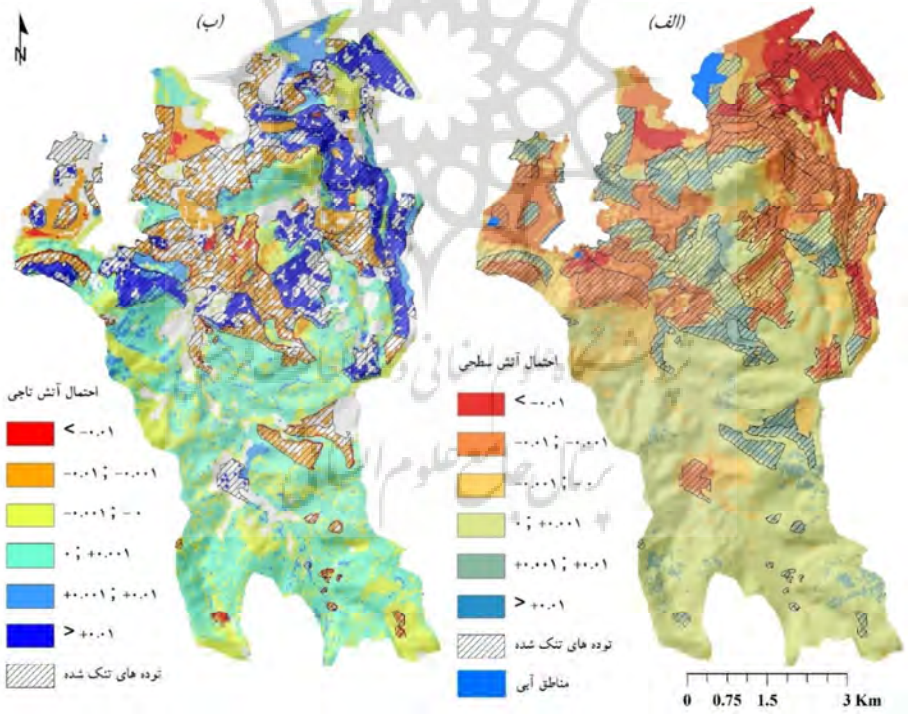
1 Paired t-tests
2 2-tailed
3 ANOVA
4 Shapiro-Wilk Test
5 Leven's Test
6 Wilcoxon Signed Rank test
7 XLSTAT
8 EXEL

احتمال) از اختلاف نقشه‌های مدل‌سازی شده در دو سناریوی تنک‌نشده و تنک‌شده بدست آمده است. افزایش (ارزش‌های منفی) و کاهش (ارزش‌های مثبت) قابل‌توجه در احتمال‌های سوختن سطحی و تاجی بیشتر در بخش شمالی منطقه مورد مطالعه (سری ۷ ملکرود) به دلیل تمرکز تنک‌کردن در جنگل‌کاری‌های این نواحی، مشاهده شد.

جدول ۳: مقادیر میانگین و انحراف معیار احتمال آتش سطحی و احتمال آتش تاجی در سناریوهای تنک‌نشده و تنک‌شده در سطح سیمای‌سرزمین مورد مطالعه. ارزش‌های منفی و مثبت به ترتیب نشان‌دهنده افزایش و کاهش در مشخصات رفتار آتش شبیه‌سازی شده است.

سناریو	احتمال سوختن سطحی			احتمال سوختن تاجی		
	میانگین	انحراف معیار	تفاوت (٪)	میانگین	انحراف معیار	تفاوت (٪)
تنک‌نشده	۰/۰۰۶۵ a	۰/۰۰۶۱	-۱/۵۵	۰/۰۲۵۹ a	۰/۰۱۶۰	+۱۰/۸۶
تنک‌شده	۰/۰۰۶۶ a	۰/۰۰۴۳		۰/۰۲۳۱ b	۰/۰۱۶۳	

ab مقادیر دارای حروف متفاوت در هر ستون در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار براساس آزمون تحلیل واریانس یک طرفه است.

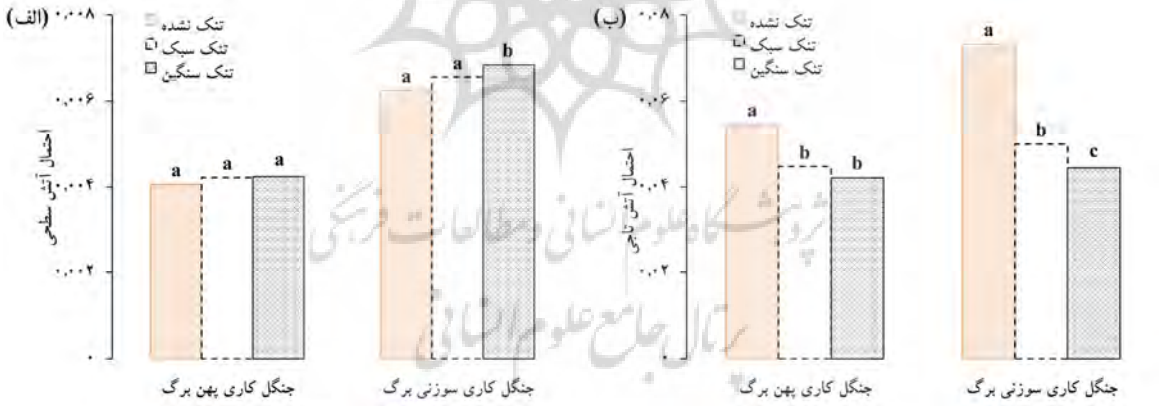


شکل ۳: نقشه تفاوت در احتمال آتش سطحی (الف) و احتمال آتش تاجی (ب) بین سناریوهای تنک‌نشده و تنک‌شده در سطح سیمای-سرزمین مورد مطالعه. ارزش‌های منفی و مثبت به ترتیب نشان‌دهنده افزایش و کاهش در مشخصات رفتار آتش شبیه‌سازی شده است.

در ادامه بررسی تفاوت احتمال سوختن سطحی و تاجی ناشی از دو نوع روش تنک‌کردن (سناریو تنک سبک و سناریو تنک سنگین) نسبت به سناریو تنک‌نشده در سطح توده‌ها مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در شکل ۴ ارائه

شده است. اثر تنک‌کردن روی احتمال آتش سطحی در هر دو سناریو تنک سبک و تنک سنگین نسبت به سناریو تنک‌نشده در جنگل‌کاری پهن‌برگ، معنی‌دار نیست. در حالی که سناریو تنک سنگین اثر معنی‌داری روی احتمال آتش سطحی (در حدود ۱۰ درصد افزایش) نسبت به سناریوهای تنک سبک (کمتر از ۵ درصد افزایش) و تنک‌نشده در جنگل‌کاری سوزنی‌برگ، داشته است. اثر هر دو سناریو تنک سنگین (۳۹ درصد کاهش) و سناریو تنک سبک (۳۲ درصد کاهش) روی احتمال آتش تاجی در جنگل‌کاری سوزنی‌برگ نسبت به سناریو تنک‌نشده معنی‌دار است. در جنگل‌کاری پهن‌برگ، تفاوت در احتمال آتش تاجی بین سناریوهای تنک‌شده و تنک‌نشده معنی‌دار است، اگرچه تفاوت مشاهده‌شده در دو نوع روش تنک‌کردن (تنک سبک و تنک سنگین) از نظر آماری معنی‌دار نیست.

با توجه به نتایج بدست آمده در سطح توده، افزایش اندک احتمال آتش سطحی و کاهش قابل‌توجه احتمال آتش تاجی در نتیجه تنک‌کردن در جنگل‌کاری سوزنی‌برگ در تیمار تنک سنگین مشاهده شد (شکل ۴). به استثنای سناریو تنک سنگین در جنگل‌کاری سوزنی‌برگ، اثر انواع تنک‌کردن در احتمال آتش سطحی در هر دو توده از نظر آماری معنی‌دار نبود ($p > ۰/۰۵$). در مورد احتمال آتش تاجی این روند برعکس است و هر دو توده تنک‌شده احتمال آتش تاجی کمتر و در نتیجه آسیب تاجی کمتری نسبت به توده‌های تنک‌نشده را دارند. کاهش معنی‌دار احتمال آتش تاجی به‌میزان ۲۱ و ۳۶ درصد (متوسط در دو سناریو تنک سبک و تنک سنگین) به ترتیب در جنگل‌کاری‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ بدست آمد (شکل ۴).



شکل ۴: مقایسه مقادیر میانگین احتمال آتش سطحی (الف) و احتمال آتش تاجی (ب) بین توده‌های تنک‌نشده و تنک‌شده. ab مقادیر دارای حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در میانگین ارزش‌های دو توده است ($p < ۰/۰۵$).

بحث

با توجه به نتایج مدل‌سازی رفتار آتش به‌طور کلی مقادیر شبیه‌سازی شده احتمال سوختن سطحی و تاجی در منطقه مورد مطالعه کم است (بر اساس جدول ۳ مقادیر میانگین این احتمالات کمتر از ۰/۰۳ است). از آنجایی که احتمال آتش تابع اندازه آتش در سیمای‌سرزمین است و نیز با توجه به سابقه آتش‌سوزی‌های تاریخی در منطقه مورد مطالعه با سطوح کوچک سوخته (به‌طور متوسط کمتر از ۱۰ هکتار) این احتمال آتش کم در سیمای‌سرزمین مورد مطالعه

مورد انتظار بود. علاوه بر این، احتمال آتش سطحی و تاجی در جنگل‌کاری سوزنی‌برگ بیشتر از جنگل‌کاری پهن‌برگ در هر سه سناریو تنک‌نشده، تنک سبک و تنک سنگین بود (شکل ۴). به‌طور کلی احتمال آتش‌سوزی درختان سوزنی‌برگ بیشتر از درختان پهن‌برگ است که دلیل اصلی آن وجود مواد رزینی در شاخ و برگ سوزنی‌برگان با قابلیت اشتعال بالا می‌باشد. همچنین، این مورد می‌تواند مرتبط با بارهای زیاد ماده‌سوختنی سطحی همراه با ارتفاع تنه نسبتاً کوتاه درختان سوزنی‌برگ نسبت به درختان پهن‌برگ در منطقه مورد مطالعه باشد که مشابه با مطالعه قبلی در این منطقه توسط جهدی و عربی (۱۴۰۲) می‌باشد. در مطالعه امین املشی و همکاران (۱۳۹۵) نیز با ارزیابی بار ماده‌سوختنی در طبقات قطری مختلف در جنگل‌کاری‌های کاج تدا در استان گیلان دریافتند پدیده آتش‌سوزی به‌طور کلی در این جنگل کم است و آتش‌سوزی زیاد مرتبط با پوشش‌های علفی با مقدار بار ماده‌سوختنی زیاد است. همچنین نتایج مشابه در مطالعات بورلی[1] و همکاران (۲۰۲۰) و آرلاندو-پرز[2] و همکاران (۲۰۲۰) مشاهده شد.

در مقایسه دو نوع تنک سبک و تنک سنگین از نظر شدت تنک‌کردن، با توجه به نتایج این مطالعه که در شکل ۴ ارائه شده، سناریو تنک سنگین اثر بیشتری روی کاهش احتمال سوختن سطحی و تاجی نسبت به سناریو تنک سبک داشته است که مطابق با نتایج مطالعه پیکه و دومنک[3] (۲۰۱۸) می‌باشد. این مورد می‌تواند در نتیجه تغییر بیشتر ساختار جنگل و کاهش قابل‌توجه رویه‌زمینی باقی‌مانده و در نتیجه کاهش بار ماده‌سوختنی جنگل در اثر تنک سنگین در مقایسه با تنک سبک باشد. در مقایسه نتایج مدل‌سازی برای دو سناریوی کاهش ماده‌سوختنی، تنک-کردن در توده‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ به طور کلی در تغییر رفتار آتش‌سوزی مدل‌سازی شده و مهار توسعه آتش‌سوزی تاجی و گسترش آن در شرایط آب و هوایی مورد مطالعه مؤثر بود. بر اساس نتایج این مطالعه افزایش احتمال آتش سطحی در نتیجه تنک‌کردن معنی‌دار نبود، به استثناء سناریو تنک سنگین در جنگل‌کاری‌های سوزنی‌برگ. این افزایش احتمال سوختن سطحی در توده‌های سوزنی‌برگ می‌تواند به‌علت بار ماده‌سوختنی بیشتر و خشکی ماده‌سوختنی سطحی در منطقه مورد مطالعه باشد. در واقع، تنک‌کردن به تنهایی می‌تواند با تجمع موادسوختنی ریز بیشتر روی زمین، گسترش آتش را افزایش دهد (گراهام و همکاران، ۲۰۰۴). علاوه بر این، افزایش گسترش آتش می‌تواند با بیشتر در معرض خورشید قرار گرفتن موادسوختنی کف جنگل و خشک شدن سریع‌تر آن و نفوذ بیشتر باد از میان توده‌های جنگلی بازشده در نتیجه تنک‌کردن، رخ دهد. همچنین، تنک‌کردن با از بین بردن رقابت بین درختان و بوته‌ها، اغلب رشد مجدد سریع پوشش گیاهی را افزایش می‌دهد (ایجی و اسکینر، ۲۰۰۵؛ مارشال و همکاران، ۲۰۲۰). مطابق با نتایج این مطالعه، در مطالعات سالیس و همکاران (۲۰۱۸) و آلکاسنا و همکاران (۲۰۱۹) نیز افزایش خطر آتش‌سوزی سطحی در مناطق جنگلی تیمارشده در نتیجه تغییر در نرخ گسترش آتش و نیز مسیرهای اصلی گسترش آتش، مشاهده شده است. با این وجود در مطالعه ریچارد[4] و همکاران (۲۰۲۰) و جانستون[5] و همکاران (۲۰۲۱) کاهش شدت آتش سطحی در نتیجه تنک‌کردن به دست آمده است.

1 Beverly
2 Arellano-Pérez
3 Piqué & Domènech
4 Prichard
5 Johnston

در این تحقیق، کاهش قابل‌توجه احتمال آتش‌سوزی تاجی در اثر تنک‌کردن، مطابق با نتایج سایر مطالعات قبلی مدل‌سازی رفتار آتش بود (پولت و اومی[1]، ۲۰۰۲؛ پیکه و دومنک، ۲۰۱۸؛ تیلور[2] و همکاران، ۲۰۲۱). با این وجود در مطالعه ریچارد و همکاران (۲۰۱۰) اشاره شده است که تنک‌کردن به‌تنهایی، بدون کاهش موادسوختنی سطحی (از طریق آتش‌سوزی تجویزی)، از درختان بزرگتر در برابر آتش‌سوزی‌های آتی حمایت نمی‌کند. از طرفی در مطالعات زیادی اشاره شده است که تنک‌کردن و به دنبال آن تیمار دارماند[3] (حذف آنچه از درخت پس از افکندن و شاخه‌زنی و پوست‌کنی و بهینه‌بُری یا پس از توفان، آتش و کت‌زنی در جنگل بر جای ماند) با هدف کم‌کردن مواد سوختنی سطحی، در کاهش شدت آتش‌سوزی موثرترین روش است (اومی، ۲۰۱۵؛ جانستون و همکاران، ۲۰۲۱؛ استفنز[4] و همکاران، ۲۰۲۰). در منطقه مورد مطالعه تیمار جنگل‌شناسی تنک‌کردن با هدف اصلاح اکولوژیکی و تغییر ساختار جنگل به‌عنوان مثال کاهش رقابت گونه‌ای انجام شده است، با این وجود نتایج مدل‌سازی رفتار آتش نشان می‌دهد که این تیمار تا حدی بر رفتار و گسترش آتش تاثیرگذار بوده است. اگرچه نیاز به انجام مطالعات بیشتر به‌منظور تعیین آثار تیمارهای مختلف جنگل‌شناسی بر تاب‌آوری توده‌ها و سیمای‌سرزمین جنگل در برابر آتش‌سوزی‌ها است. به‌طور کلی با توجه به پویایی متغیرهای محیط‌زیست آتش به‌ویژه آب و هوا و نیز تغییرپذیری ماده‌سوختنی، پیش-بینی دقیق رفتار و گسترش آتش و ضرورت اعمال اقدامات پیشگیرانه از طریق مدیریت ماده‌سوختنی مانند ایجاد آتش‌بر به‌منظور جلوگیری از گسترش آتش در شرایط جنگل‌های شمال ایران مورد تاکید است (نصیری[5] و همکاران، ۲۰۱۲). جهدی و همکاران (۱۳۹۲) از مدل فارسایت برای شبیه‌سازی گسترش آتش سطحی در جنگل ملکرود در سیاهکل بر مبنای مدل ماده‌سوختنی استاندارد (اسکات و بورگان[6]، ۲۰۰۵) استفاده کردند که علی‌رغم مشابه بودن جهت کلی گسترش آتش شبیه‌سازی شده با لکه سوخته‌شده واقعی، تنها ۴۲ درصد هم‌خوانی بین نتایج شبیه‌سازی و واقعیت مشاهده‌شده، بدست آمد. در حالی که در این تحقیق با توجه به استفاده از مدل‌های ماده‌سوختنی محلی در جنگل ملکرود، برآوردهای دقیق‌تری از احتمال‌های گسترش آتش تاجی و سطحی در منطقه مورد مطالعه بدست آمد. بنابراین، اگرچه کسب اطلاعات ماده‌سوختنی در عرصه با اندازه‌گیری تمامی متغیرهای مورد نیاز بسیار پر زحمت و زمان‌بر است، در دستیابی به نتایج قابل‌استناد از مدل‌های رفتار آتش و استفاده از آنها در فرآیند تصمیم‌گیری مدیریت آتش حائز اهمیت است.

نتیجه‌گیری

در بوم‌سازگان‌های جنگلی مستعد آتش‌سوزی، مدیران باید در یک رویکرد حفاظتی-حمایتی از طریق مدیریت آتش به ارزیابی خطر آتش و استفاده از روش‌های کاهش ماده‌سوختنی جنگل در مناطق پرخطر، بپردازند. با توجه به افزایش سطح و شدت آتش‌سوزی‌ها و روند تغییر اقلیم و تخریب سرزمین در جنگل‌های شمال ایران، تحقق این اهداف پیچیده و دشوار است. اجرای تیمارهای جنگل‌شناسی کاهش ماده‌سوختنی برای تغییر رفتار آتش، کاهش

1 Pollet & Omi
2 Taylor
3 Slash
4 Stephens
5 Nasiri
6 Scott & Burgan

شدت آتش و بازسازی بوم‌سازگان‌های تاب‌آور حائزاهمیت است. توسعه مدل‌های شبیه‌سازی رفتار آتش در سال‌های گذشته امکان تجزیه و تحلیل آثار این تیمارها را فراهم کرده است. این مطالعه قابلیت‌های این مدل‌ها را در ارزیابی رفتار آتش و بررسی تغییرات آثار آتش ناشی از تیمار جنگل‌شناسی تنک‌کردن را نشان می‌دهد. درحالی که نتایج مدل‌سازی تا حدی افزایش احتمال آتش در ارتباط با آتش‌سوزی‌های سطحی در توده‌های تنک‌شده را نشان داد، این نتایج در مورد آتش‌سوزی‌های تاجی متفاوت است. علاوه بر این، اثربخشی این تیمارها بر رفتار آتش به‌میزان قابل-توجهی تحت تاثیر شدت آن قرار گرفت و نیز در توده‌های جنگلی مختلف در منطقه مورد مطالعه، متفاوت ارزیابی شد. این نتایج متفاوت، بیانگر نیاز به مطالعات بیشتر و اصلاح ابزارهای پشتیبان تصمیم‌گیری برای مدیریت جنگل و آتش می‌باشد. در نهایت، گنجاندن اصول اکولوژیکی و معیارهای رفتار آتش‌سوزی بر پایه مطالعات تجربی و مدل-سازی در دستورالعمل‌های تیمارهای جنگل‌شناسی به منظور اجرای کارآمدتر روش‌های مدیریت جنگل در آینده مفید خواهد بود.

منابع

اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان. (۱۳۷۹). کتابچه طرح جنگلداری سری یک ملکرود.

اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان. (۱۳۸۹). کتابچه طرح‌های تجدیدنظر جنگلداری سری‌های ۶ و ۷ ملکرود.

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

جهدی، رقیه، عربی، مهدی. (۱۴۰۲). موادسوختنی سطحی و تاجی و رفتار آتش در بوم‌سازگان جنگل‌های طبیعی و دست-کاشت حوضه آبخیز ۲۵ شنرود سیاهکل. مطالعات علوم محیط زیست، ۸ (۲)، ۶۳۸۷-۶۳۷۳.

جهدی. رقیه. (۱۴۰۰). مدل‌های ماده‌سوختنی سطحی و خطر آتش در پارک ملی گلستان. اکوسیستم‌های طبیعی ایران، ۱۲ (۲)، ۹۹-۸۲.

جهدی، رقیه، قربانی، اردوان، کیومرث سفیدی. (۱۳۹۹). بررسی شبیه‌سازی آتش با استفاده از مدل فارسایت (مطالعه موردی: ییلاق قصرداغ، شهرستان مشگین‌شهر). مخاطرات محیط طبیعی، ۹ (۲۵)، ۱۹۰-۱۷۱.

جهدی، رقیه، درویش صفت، علی اصغر، وحید اعتماد. (۱۳۹۴). تهیه نقشه تیپ ماده‌سوختنی در مقیاس محلی و پیش بینی رفتار آتش سطحی با استفاده از FARSITE (مطالعه موردی: جنگل توشی- سیاهکل). پژوهشهای علوم و فناوری چوب و جنگل، ۲، ۲۲۵-۲۰۳.

جهدی، رقیه، درویش صفت، علی اصغر، وحید اعتماد. (۱۳۹۲). پیش‌بینی گسترش آتش جنگل با استفاده از مدل رفتار آتش (مطالعه موردی: جنگل ملکرود- سیاهکل). مجله جنگل ایران، ۵ (۴)، ۴۳۰-۴۱۹.

خوشدل، ناصر، رضایی، پرویز، متولی، صدرالدین، غلامرضا جانباز قبادی. (۱۳۹۹). تبیین اقلیم گردشگری شرق استان گیلان و طبقه‌بندی مکانی آن به روش آماری چند متغیره. مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی. ۱۵ (۵۳)، ۱۱۳۶-۱۱۱۹.

رحیمی، داریوش، سمانه خادمی. (۱۳۹۷). تحلیل الگوهای همدید خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال ایران (استان گلستان). مخاطرات محیط طبیعی، ۷ (۱۷)، ۳۶-۱۹.

عابد، حسین، صحراییان، فاطمه، پرویز رضایی. (۱۳۹۴). اثرات باد گرمش بر وضعیت جوی ایستگاه همدیدی رشت. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۴ (۲)، ۷۶-۵۹.

فروزش سوتگوابری، رضا، احمدی، محمدتقی، اعتماد، وحید، حمیدرضا سعیدی. (۱۳۸۸). بررسی کمی و کیفی توده دست کاشت توسکای ییلاقی (Alnus subcordata) ۱۹ ساله در منطقه سیاهکل. جنگل ایران، ۱ (۲)، ۱۵۰-۱۳۷.

نصیری، مهران، حجتی، سیدمحمد، مهرسده تفضلی. (۱۳۹۱). شبیه‌سازی آتش‌سوزی سطحی به‌منظور بررسی سرعت گسترش آن در جنگل آمیخته پهن‌برگ. تحقیقات جنگل و صنوبر ایران. ۲۰ (۱)، ۶۱-۵۰.

Agee, J.K. and Skinner, C.N. (2005). Basic principles of forest fuel reduction treatments. Forest Ecology and Management, 211, pp 83–96.

Alcasena, F.J., Ager, A.A., Bailey, J.D., Pineda, N. and Vega-García, C. (2019). Towards a comprehensive wildfire management strategy for Mediterranean areas: Framework development and implementation in Catalonia, Spain. Journal of Environmental Management, 231, pp 303-320.

Alcasena, F.J., Salis, M. and Vega-García, C.A. (2016). A fire modeling approach to assess wildfire exposure of valued resources in central Navarra, Spain. European Journal of Forest Research, 135, pp 87–107.

Arellano-Pérez, S., Castedo-Dorado, F., Álvarez-González, J.G., Alonso-Rego, C., Vega, J.A. and Ruiz-González, A.D. (2020). Mid-term effects of a thin-only treatment on fuel complex, potential fire behavior and severity and post-fire soil erosion protection in fast-growing pine plantations. Forest Ecology and Management, 460, 117895.

Beverly, J.L., Leverkus, S.E.R., Cameron, H. and Schroeder, D. (2020). Stand-level fuel reduction treatments and fire behavior in Canadian Boreal Conifer Forests. Fire, 3(3), 35.

Carey, H. and Schumann, M. (2003). Modifying wildfire behavior—the effectiveness of fuel treatments. Santa Fe, NM: National Community Forestry Center Southwest Region Working Paper #2.

Coen, J. (2018). Some Requirements for Simulating Wildland Fire Behavior Using Insight from Coupled Weather—Wildland Fire Models Janice Coen. Fire, 1(6), pp 1-18.

Finney, M.A. (2006). An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In: Andrews, P.L., Butler, B.W. (Eds.), Fuels Management-How to Measure Success. US Department of Agriculture, Forest Service, Proceedings RMRS-P-41, p. 213-220.

Graham, R.T., McCaffrey, S. and Jain, T.B. (2004). Science basis for changing forest structure to modify wildfire behavior and severity. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-120. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 43 p. https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-120

Hirschberger, P. (2016). Forests ablaze: causes and effects of global forest fires." Winter, S., von Laer, Y., Köberich, T., Eds (2016). 108p.

Johnston, J.D., Olszewski, J.H., Miller, B.A., Schmidt, M.R., Vernon, M.J. and Ellsworth, L.M. (2021). Mechanical thinning without prescribed fire moderate's wildfire behavior in an Eastern Oregon, USA ponderosa pine forest. Forest Ecology and Management, 501, 119674.

Kalies, E.L. and Yocom Kent, L.L. (2016). Tamm Review: Are fuel treatments effective at achieving ecological and social objectives? A systematic review. Forest Ecology and Management, 375(2016), pp 84–95.

Keane R.E., Gray, K., Davis, B., Holsinger, L.M. and Loehman, R. (2019). Evaluating ecological resilience across wildfire suppression levels under climate and fuel treatment scenarios using landscape simulation modeling. International Journal of Wildland Fire, 28, pp 533-549.

Marshall, G., Thompson, D.K., Anderson, K., Simpson, B., Linn, R. and Schroeder, D. (2020). The Impact of Fuel Treatments on Wildfire Behavior 2 in North America Boreal Fuels: A Simulation Study 3 Using FIRETEC. Fire, 3, 18.

Mofidi, A., Soltanzadeh, I., Yousefi, Y., Zarrin, A., Soltani, M., Samakosh, J.M., Azizi, G., and Miller, S.T.K. (2015). Modeling the exceptional south Foehn event (Garmij) over the Alborz Mountains during the extreme forest fire of December 2005. Natural Hazards, 75, pp 2489–2518.

Omi, P.N. (2015). Theory and Practice of Wildland Fuels Management. Current Forestry Reports, 1, 100–117.

Palaiologou, P., Kalabokidis, K., Ager, A.A. and Day, M.A. (2020). Development of comprehensive fuel management strategies for reducing wildfire risk in Greece. Forests, 11, 789.

Piqué, M. and Domènech, R. (2018). Effectiveness of mechanical thinning and prescribed burning on fire behavior in Pinus nigra forests in NE Spain. The Science of the total environment, 618, pp 1539-1546.

Pollet, J. and Omi, P. (2002). Effect of thinning and prescribed burning on crown fire severity in ponderosa pine forests. International Journal of Wildland Fire, 11(1), pp 1-10.

Prichard, S.J., Povak, N.A., Kennedy, M.C. and Peterson, D.W. (2020). Fuel treatment effectiveness in the context of landform, vegetation, and large, wind-driven wildfires. Ecological Applications, 30(5), e02104.

Prichard, S.J., Peterson D.L. and Jacobson, K. (2010). Fuel treatments reduce the severity of wildfire effects in dry mixed conifer forest, Washington, USA. Canadian Journal of Forest Resources, 40, pp 1615–1626.

Pyne, S.J., Andrews, P.L. and Laven, R.D. (1996). Introduction to wildland fire. 2nd edition. New York, NY: John Wiley and Sons, Inc. 769 p.

Salis, M., Arca, B., Del Giudice, L., Palaiologou, P., Alcasena-Urdiroz, F., Ager, A.A., Fiori, M., Pellizzaro, G., Scarpa, C., Schirru, M., Ventura, A., Casula, M., Duce P. (2021). Application of simulation modeling for wildfire exposure and transmission assessment in Sardinia, Italy. International Journal of Disaster Risk Reduction (IJDRR), 58, 102189.

Salis, M., Del Giudice, L., Arca, B., Ager, A.A., Alcasena, F.J., Lozano, O., Bacciu, V., Spano, D. and Duce, P. (2018). Modeling the effects of different fuel treatment mosaics on wildfire spread and behavior in a Mediterranean agro-pastoral area. Journal of Environmental Management, 212, pp 490–505.

Santoni, P.A., Filippi, J.B., Balbi, J.H. and Bosseur, F. (2011). Wildland Fire Behaviour Case Studies and Fuel Models for Landscape-Scale Fire Modeling. Journal of Combustion, 2011(613424), pp 1-12.

Schoennagel, T., Balch, J. K., Brenkert-Smith, H., Dennison, P. E., Harvey, B. J., Krawchuk, M. A., Mietkiewicz, N., Morgan, P., Moritz M.A., Rasker, R., Turner, M.G. and Whitlock, C. (2017). Adapt to more wildfire in western North American forests as climate changes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 114, pp 4582–4590.

Stephens, S.L., Battaglia, M.A., Churchill, D.J., Collins, B.M., Coppoletta, M., Hoffman, C.M., Lydersen, J.M., North, M.P., Parsons R.A., Ritter, S.M., Stevens, J. (2021). Forest restoration and fuels reduction: convergent or divergent?. BioScience, 71, pp 85–101.

Thompson, D.K., Schroeder, D., Wilkinson, S.L., Barber, Q., Baxter, G., Cameron, H., Hsieh, R., Marshall, G., Moore, B., Refai, R., Rodell, C., Schiks, T., Verkaik, G.J., Zerb, J. (2020). Recent Crown Thinning in a Boreal Black Spruce Forest Does Not Reduce Spread Rate nor Total Fuel Consumption: Results from an Experimental Crown Fire in Alberta, Canada. Fire, 3, 28.

Turco, M., Rosa-Cánovas, J.J., Bedia, J., Jerez, S., Montávez, J.P., Llasat, M.C., Provenzale, A. (2018). Exacerbated fires in Mediterranean Europe due to anthropogenic warming projected with non-stationary climate-fire models. Nature Communications, 9(1), pp 1–9.

Taylor, C., Blanchard, W., Lindenmayer, D.B. (2021). Does forest thinning reduce fire severity in Australian eucalypt forests? Conservation Letters, 14 (2), 14:e12766.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Journal of Natural Environment Hazards
University of Sistan and Baluchestan
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

References

References (in Persian)

Abed, H., Sahraeyan, F. and Rezaei, P. (2016). The Effects of Garmesh Wind on Weather Conditions of Rasht Synoptic Weather Station. Geography and Environmental Hazards, 4 (2), pp 59-76. [In Persian]
Amin Amlashi M., Ghodskhah, M., Bonyad, A.I., Pourbabaei, H., Jafari, M., and Gholami, V. (2015). Evaluation of fuel load following a fire in Loblolly Pine (Pinus taeda L.) plantations using line sampling and of FLM method (Case study: Takhsam plantations in Guilan Province). Iranian Journal of Forest and Popular Research, 23 (3), pp 562-572. [In Persian]
Forouzesh-Sotgavaberi, R., Ahmadi M.T., Etemad, V. and Saeidi, H.R. (2009). Investigation on quantitative and qualitative characteristics of 19-years old plantation of Caucasian alder (Alnus subcordata) in Siahkal region. Iranian Journal of Forest, 1(2), pp 137-150. [In Persian]
General Office of Natural Resources and Watershed of Guilan Province. (2000). Forest Management Plan of District 1 of Malekroud, Guilan. [In Persian]
General Office of Natural Resources and Watershed of Guilan Province. (2010). Forest Management Plan of Districts 6 and 7 of Malekroud, Guilan. [In Persian]
Jahdi, R., Arabi, M. (2023). Surface and Crown Fuels and Wildfire Behavior in Natural and Planted Forests Ecosystem of the Watershed of 25 (Shenroud, Siahkal). Journal of Environmental Sciences Studies, 8 (2), 6373-6387. [In Persian]
Jahdi, R. (2021). Surface Fuel Models and Fire Hazard in Golestan National Park. Journal of Natural Ecosystems of Iran, 12(2), pp 82-99. [In Persian]
Jahdi, R., Ghorbani, A., Sefidi, K. (2020). Survey of wildfire simulation using FARSITE model (case study: Yeylagh Gasre Dagh, Meshgin Shahr Municipality). Journal of Natural Environmental Hazards, 9 (25), pp 171-190. [In Persian]
Jahdi, R., Darvishsefat, A.A. and Etemad, V. (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), pp 799-813. [In Persian]
Jahdi, R., Darvishsefat, A.A. and Etemad, V. (2014). Predicting forest fire spread using fire behavior model (Case study: Malekroud Forest-Siahkal). Iranian Journal of Forest, 5 (4), pp 419-430. [In Persian]
Khoshdel, N., Rezaei, P., Motevali, S. and Janbaz Ghobadi, G.H. (2019). Explaining the tourism climate of the east of Guilan province using the physiological equivalent temperature. Journal of Studies of Human Settlements Planning, 15(4), pp 1119-1136. [In Persian]
Nasiri, M., Hojjati, S.M. and Tafazoli, M. (2012). Simulation of surface fire to study the spread rate of it`s distribution in mixed hardwood. Iranian Journal of Forest and Popular Research, 20 (1), pp 50-61. [In Persian]
Rahimi, D., Khademi, S. (2018). Analysis synoptic patterns for forest fires risk in northern of Iran. Journal of Natural Environmental Hazards, 7 (17), pp 19-36. [In Persian]

References (in English)

Agee, J.K. and Skinner, C.N. (2005). Basic principles of forest fuel reduction treatments. Forest Ecology and Management, 211, pp 83–96.
Alcasena, F.J., Ager, A.A., Bailey, J.D., Pineda, N. and Vega-García, C. (2019). Towards a comprehensive wildfire management strategy for Mediterranean areas: Framework development and implementation in Catalonia, Spain. Journal of Environmental Management, 231, pp 303-320.
Alcasena, F.J., Salis, M. and Vega-García, C.A. (2016). A fire modeling approach to assess wildfire exposure of valued resources in central Navarra, Spain. European Journal of Forest Research, 135, pp 87–107.
Arellano-Pérez, S., Castedo-Dorado, F., Álvarez-González, J.G., Alonso-Rego, C., Vega, J.A. and Ruiz-González, A.D. (2020). Mid-term effects of a thin-only treatment on fuel complex, potential fire behavior and severity and post-fire soil erosion protection in fast-growing pine plantations. Forest Ecology and Management, 460, 117895.
Beverly, J.L., Leverkus, S.E.R., Cameron, H. and Schroeder, D. (2020). Stand-level fuel reduction treatments and fire behavior in Canadian Boreal Conifer Forests. Fire, 3(3), 35.
Carey, H. and Schumann, M. (2003). Modifying wildfire behavior—the effectiveness of fuel treatments. Santa Fe, NM: National Community Forestry Center Southwest Region Working Paper #2.
Coen, J. (2018). Some Requirements for Simulating Wildland Fire Behavior Using Insight from Coupled Weather—Wildland Fire Models Janice Coen. Fire, 1(6), pp 1-18.
Finney, M.A. (2006). An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In: Andrews, P.L., Butler, B.W. (Eds.), Fuels Management-How to Measure Success. US Department of Agriculture, Forest Service, Proceedings RMRS-P-41, p. 213-220.
Graham, R.T., McCaffrey, S. and Jain, T.B. (2004). Science basis for changing forest structure to modify wildfire behavior and severity. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-120. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 43 p. https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-120
Hirschberger, P. (2016). Forests ablaze: causes and effects of global forest fires." Winter, S., von Laer, Y., Köberich, T., Eds (2016). 108p.
Johnston, J.D., Olszewski, J.H., Miller, B.A., Schmidt, M.R., Vernon, M.J. and Ellsworth, L.M. (2021). Mechanical thinning without prescribed fire moderate's wildfire behavior in an Eastern Oregon, USA ponderosa pine forest. Forest Ecology and Management, 501, 119674.

Kalies, E.L. and Yocom Kent, L.L. (2016). Tamm Review: Are fuel treatments effective at achieving ecological and social objectives? A systematic review. Forest Ecology and Management, 375(2016), pp 84–95.
Keane R.E., Gray, K., Davis, B., Holsinger, L.M. and Loehman, R. (2019). Evaluating ecological resilience across wildfire suppression levels under climate and fuel treatment scenarios using landscape simulation modeling. International Journal of Wildland Fire, 28, pp 533-549.
Marshall, G., Thompson, D.K., Anderson, K., Simpson, B., Linn, R. and Schroeder, D. (2020). The Impact of Fuel Treatments on Wildfire Behavior 2 in North America Boreal Fuels: A Simulation Study 3 Using FIRETEC. Fire, 3, 18.
Mofidi, A., Soltanzadeh, I., Yousefi, Y., Zarrin, A., Soltani, M., Samakosh, J.M., Azizi, G., and Miller, S.T.K. (2015). Modeling the exceptional south Foehn event (Garmij) over the Alborz Mountains during the extreme forest fire of December 2005. Natural Hazards, 75, pp 2489–2518.
Omi, P.N. (2015). Theory and Practice of Wildland Fuels Management. Current Forestry Reports, 1, 100–117.
Palaiologou, P., Kalabokidis, K., Ager, A.A. and Day, M.A. (2020). Development of comprehensive fuel management strategies for reducing wildfire risk in Greece. Forests, 11, 789.
Piqué, M. and Domènech, R. (2018). Effectiveness of mechanical thinning and prescribed burning on fire behavior in Pinus nigra forests in NE Spain. The Science of the total environment, 618, pp 1539-1546.
Pollet, J. and Omi, P. (2002). Effect of thinning and prescribed burning on crown fire severity in ponderosa pine forests. International Journal of Wildland Fire, 11(1), pp 1-10.
Prichard, S.J., Povak, N.A., Kennedy, M.C. and Peterson, D.W. (2020). Fuel treatment effectiveness in the context of landform, vegetation, and large, wind-driven wildfires. Ecological Applications, 30(5), e02104.
Prichard, S.J., Peterson D.L. and Jacobson, K. (2010). Fuel treatments reduce the severity of wildfire effects in dry mixed conifer forest, Washington, USA. Canadian Journal of Forest Resources, 40, pp 1615–1626.
Pyne, S.J., Andrews, P.L. and Laven, R.D. (1996). Introduction to wildland fire. 2nd edition. New York, NY: John Wiley and Sons, Inc. 769 p.
Salis, M., Arca, B., Del Giudice, L., Palaiologou, P., Alcasena-Urdiroz, F., Ager, A.A., Fiori, M., Pellizzaro, G., Scarpa, C., Schirru, M., Ventura, A., Casula, M., Duce P. (2021). Application of simulation modeling for wildfire exposure and transmission assessment in Sardinia, Italy. International Journal of Disaster Risk Reduction (IJDRR), 58, 102189.
Salis, M., Del Giudice, L., Arca, B., Ager, A.A., Alcasena, F.J., Lozano, O., Bacciu, V., Spano, D. and Duce, P. (2018). Modeling the effects of different fuel treatment mosaics on wildfire spread and behavior in a Mediterranean agro-pastoral area. Journal of Environmental Management, 212, pp 490–505.
Santoni, P.A., Filippi, J.B., Balbi, J.H. and Bosseur, F. (2011). Wildland Fire Behaviour Case Studies and Fuel Models for Landscape-Scale Fire Modeling. Journal of Combustion, 2011(613424), pp 1-12.
Schoennagel, T., Balch, J. K., Brenkert-Smith, H., Dennison, P. E., Harvey, B. J., Krawchuk, M. A., Mietkiewicz, N., Morgan, P., Moritz M.A., Rasker, R., Turner, M.G. and Whitlock, C. (2017). Adapt to more wildfire in western North American forests as climate changes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 114, pp 4582–4590.
Stephens, S.L., Battaglia, M.A., Churchill, D.J., Collins, B.M., Coppoletta, M., Hoffman, C.M., Lydersen, J.M., North, M.P., Parsons R.A., Ritter, S.M., Stevens, J. (2021). Forest restoration and fuels reduction: convergent or divergent?. BioScience, 71, pp 85–101.
Thompson, D.K., Schroeder, D., Wilkinson, S.L., Barber, Q., Baxter, G., Cameron, H., Hsieh, R., Marshall, G., Moore, B., Refai, R., Rodell, C., Schiks, T., Verkaik, G.J., Zerb, J. (2020). Recent Crown Thinning in a Boreal Black Spruce Forest Does Not Reduce Spread Rate nor Total Fuel Consumption: Results from an Experimental Crown Fire in Alberta, Canada. Fire, 3, 28.
Turco, M., Rosa-Cánovas, J.J., Bedia, J., Jerez, S., Montávez, J.P., Llasat, M.C., Provenzale, A. (2018). Exacerbated fires in Mediterranean Europe due to anthropogenic warming projected with non-stationary climate-fire models. Nature Communications, 9(1), pp 1–9.
Taylor, C., Blanchard, W., Lindenmayer, D.B. (2021). Does forest thinning reduce fire severity in Australian eucalypt forests? Conservation Letters, 14 (2), 14:e12766.