نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال هفتم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹
صفحات ۷۹ – ۹۴

مدلسازی ریسک و فشار آتش با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در شهرستان‌های خلخال و کوثر

رقیه جهدی [۱]؛ استادیار علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
علی اصغر درویش صفت؛ استاد جنگلداری، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.
حسین بدری پور؛ عضو اصلی شورایعالی جنگل و مرتع، سازمان جنگلها، مراتع و آبخیزداری کشور، تهران، ایران.

دریافت مقاله : ۱۱/۰۳/۱۳۹۸ پذیرش نهایی:۱۲/۰۲/۱۳۹۹

چکیده

آتش‌سوزی‌ها منجر به آسیب قابل توجه به محیط زیست طبیعی اردبیل در سالهای گذشته شده، و شیوع بیشتر این حوادث در آینده قابل پیش‌بینی است. نقشه‌های ریسک و فشار آتش در مقیاس مناسب برای مدیران سیمای سرزمین و تصمیم‌گیران برای استراتژی‌های پیشگیری، کاهش و پایش آتش ضروری است. در این مقاله، شبکه‌های رستری متریک ریسک و فشار آتش با اندازه تفکیک ۱۰۰ متر برای شهرستان‌های حساس به آتش‌سوزی در جنوب استان اردبیل براساس مدل شبیه‌سازی آتش و تجزیه و تحلیل مکانی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی، همراه با داده تکمیلی احتراق و سطح آتش تاریخی (۱۳۹۷-۱۳۸۴) تهیه شد. پارامترهای ریسک آتش (احتمال سوختن (BP)، طول شعله شرطی (CFL) و اندازه آتش (FS)) با الگوریتم حداقل زمان حرکت (MTT) FlamMap با توجه به شرایط آب و هوایی ۱۴ فصل آتش‌سوزی گذشته تولید شد. علاوه بر این، شاخص پتانسیل آتش (FPI) برای تجزیه و تحلیل مکانی نقاطی که با احتمال بیشتری آتش‌سوزی‌های بزرگ از آنجا شروع می‌شوند، برآورد شد. متوسط BP، CFL و FS به ترتیب ۰/۰۰۲۵-۰/۰۰۰۰۷، ۱/۶-۰/۰۵ متر و ۳۶۰-۵۵ هکتار بدست آمد که بر تغییرات زیاد در فاکتورهای فشار آتش در منطقه مطالعه تاکید دارد. FPI محاسبه شده، دو ناحیه اصلی با بیشترین ارزشها را نشان داد که شامل مناطق با احتراق‌های تاریخی زیاد و نواحی وسیع با وجود مواد سوختنی با اشتعال سریعتر است. نتایج این مطالعه می‌تواند برای تجزیه و تحلیل ریسک و براورد اثرات بالقوه آتش، ارزیابی تغییرات تاریخی و روندهای آتی فشار آتش، و تعیین استراتژی‌های تیمار ماده سوختنی به منظور کاهش ریسک آتش سودمند باشد.

واژه های کلیدی: الگوریتم MTT، ریسک آتش، احتراق تاریخی، احتمال سوختن، سیمای سرزمین.

[۱]: نویسنده مسئول: Email: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]

مقدمه

به دلیل رشد جوامع انسانی و منابع با ارزش زیاد مانند ساختارهای مسکونی، صنعتی یا زیرساخت‌ها، آتش‌سوزی‌ها بویژه در حدفاصل مناطق انسانی (شهری/روستایی)- طبیعی در حال تبدیل به یک مشکل چالش‌زا برای مدیران اراضی برای مدیریت ریسک این حوادث هستند (Ager et al., ۲۰۱۱). آتش‌سوزی در اکوسیستم‌های طبیعی ایران نیز هر ساله هزاران هکتار از درختان، درختچه‌ها و گیاهان را طعمه خود می‌سازد (فرجزاده و همکاران، ۱۳۹۴). در استان اردبیل به دلیل وجود چشم‌اندازهای طبیعی و آب و هوای خنک در تابستان، فشار توریستی منجر به رشد سریع مناطق انسانی و گسترش سکونت‌گاه‌ها در اطراف اراضی طبیعی و نزدیک به نقاط توریستی شده است. این مورد منجر به گسترش تهدید آتش به دلایل اهداف توریستی بویژه در مناطق تفرجگاهی که هزاران توریست را در ماه‌های تابستان جذب می‌کند، می‌شود. علاوه بر این به دلیل تمرکز بالای فعالیت‌های کشاورزی در این استان، اثرات اقدامات مختلف مانند آتش زدن پس‌چر مزارع یکی دیگر از دلایل افزایش ریسک آتش‌سوزی است. اغلب آتش‌سوزی‌های رخ داده در جنگلها و مراتع این منطقه به مانند سایر مناطق ایران، ریشه در عوامل انسانی دارد.

آتش‌سوزی‌ها در حال تبدیل به یک موضوعی هستند که نیاز است به صورت گروهی توسط نهادهای مختلف مسئول برای اطفای آتش، و نیز ساکنان روستایی که در وضعیت پوشش گیاهی موجود دخالت دارند، و سازمانهای تصمیم‌گیر سیاست‌های اراضی با در نظر گرفتن آتش‌سوزی، مورد توجه قرار گیرد. ایجاد یک سیستم حکمرانی ریسک در سیماهای سرزمین حساس به آتش‌سوزی، جایی که جوامع انسانی، موزائیک‌های چند منظوره از چراگاه‌های وسیع با اراضی جنگلی و اراضی کشاورزی قطعه قطعه شده با بهره‌برداری شدید با هم آمیخته شده است، هنوز پیشرفتی نداشته، و اغلب توسعه و سرمایه‌گذاری‌ها تنها روی بخش اطفای حریق متمرکز است (Garrido et al., ۲۰۱۷). درصورتی که اقدام سریعی در این زمینه انجام نشود، جوامع محلی زیادی که برای معیشت خود وابسته به سیستم‌های جنگلی و مرتعی چندمنظوره هستند با حوادث آتش‌سوزی و خسارت‌های فاجعه‌باری مواجه خواهند شد.

ریسک آتش به عنوان ضرر و زیان مورد انتظار که ترکیبی از مولفه‌های احتمال، شدت و اثرات است (Thompson et al., ۲۰۱۱; Scott et al., ۲۰۱۵)، و تجزیه و تحلیل فشار آتش به صورت شناخت ارتباطات مکانی-زمانی و با مقیاس قابل پیش‌بینی از فاکتورهای ریسک (Fairbrother and Turnley, ۲۰۰۵)، تعریف می‌شود. تجزیه و تحلیل فشار آتش، مولفه‌ای در ارزیابی ریسک است و مجاورت مکانی منابع اکوسیستمی ارزشمند با آتش را به لحاظ احتمال و شدت آتش توصیف می‌کند، اما به روشنی اثرات آتش روی منابع ارزشمند را تشریح نمی‌کند (Miller and Ager, ۲۰۱۳).

ارزیابی ریسک و فشار آتش با استفاده از مدلسازی آتش در مقیاس‌های کوچک (Alcasena et al., ۲۰۱۶; Elia et al., ۲۰۱۶; Molina et al., ۲۰۱۷)، تا بزرگ (Salis et al., ۲۰۱۳; Oliveira et al., ۲۰۱۶; Palaiologou et al., ۲۰۱۸)، در تلاش‌ها به منظور ارائه راهنمای مناسب مدیریت آتش برای مدیران اراضی در مناطق حساس به آتش‌سوزی در جهان انجام شده است. در مطالعات متعددی نیز اثر شرایط آب و هوایی (Alcasena et al., ۲۰۱۵)، ماده سوختنی (Oliveira et al., ۲۰۱۶; Elia et al., ۲۰۱۶)، و طرح‌های احتراق (Curt et al., ۲۰۱۶) روی احتمال سوختن بررسی شده است. ارتباطات غیرخطی پیچیده بین محرک‌های اصلی مانند شرایط آب و هوا، مواد سوختنی، توپوگرافی، طرح‌های احتراق و فعالیت‌های اطفای حریق روی گسترش و رفتار آتش اثر می‌گذارد (Calkin et al., ۲۰۱۱; Salis et al., ۲۰۱۳) و اینکه چگونه تغییرات ترکیبی روی احتمال و شدت آتش‌سوزی‌ها در مقیاس سیمای سرزمین اثر می‌گذارد، به میزان کافی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]

شناخته نشده است. در این مطالعه، تمرکز روی تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی و کمی در فاکتورهای ریسک مخرب انتخاب شده شامل احتمال سوختن، طول شعله شرطی و اندازه آتش است.

مدلسازی آتش روش عملی برای شبیه‌سازی، تهیه نقشه و تجزیه و تحلیل رفتار و گسترش آتش و بررسی اثرات فاکتورهای مختلف روی طرح‌های مکانی- زمانی پخش، شدت، اندازه و جهت گسترش آتش است (Salis et al., ۲۰۱۵). شبیه‌سازی با الگوریتم‌های موثر گسترش آتش، مانند الگوریتم حداقل زمان حرکت (MTT) ترکیب شده در مدل‌هایی مانند FlamMap، Randing و FSim (Finney, ۲۰۰۶; Finney et al., ۲۰۰۹; ۲۰۱۱) امکان‌پذیر می‌شود، که امکان هزاران شبیه‌سازی آتش در سیماهای سرزمین و برآورد احتمال مشخص مکانی آتش و شدت‌های آتش‌سوزی را فراهم می‌کند (Scott et al., ۲۰۱۵). در این کار از شبیه‌سازی آتش برای ارزیابی احتمال مشخص مکانی و شدت‌های آتش در مقیاس سیمای سرزمین و تجزیه و تحلیل و تهیه نقشه فاکتورهای فشار و ریسک آتش برای منطقه مطالعه استفاده می‌شود. این شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن داده تاریخی از شرایط باد شامل فراوان‌ترین سرعت‌ها و جهت‌های باد در طول فصل‌های آتش‌سوزی گذشته و نیز طرح‌های احتراق تاریخی انجام می‌شود. سپس اطلاعات مشخص مکانی در مورد شدت آتش و احتمال سوختن در پوشش‌های اراضی موجود تفسیر شده، و ارزیابی ریسک آتش در منطقه مطالعه انجام می‌شود. نتایج این مطالعه شامل مجموعه‌ای از نقشه‌هایی است که می‌تواند برای اولویت‌بندی پروژه‌های مدیریت مواد سوختنی، برنامه-های پیشگیری از احتراق، موقعیت‌یابی منابع اطفای آتش، پروژه‌های اقدام اجتماعی یا سایر فعالیت‌های عمومی یا خصوصی کاهش ریسک در جنگلها و مراتع استفاده شود.

داده‌ها و روش کار

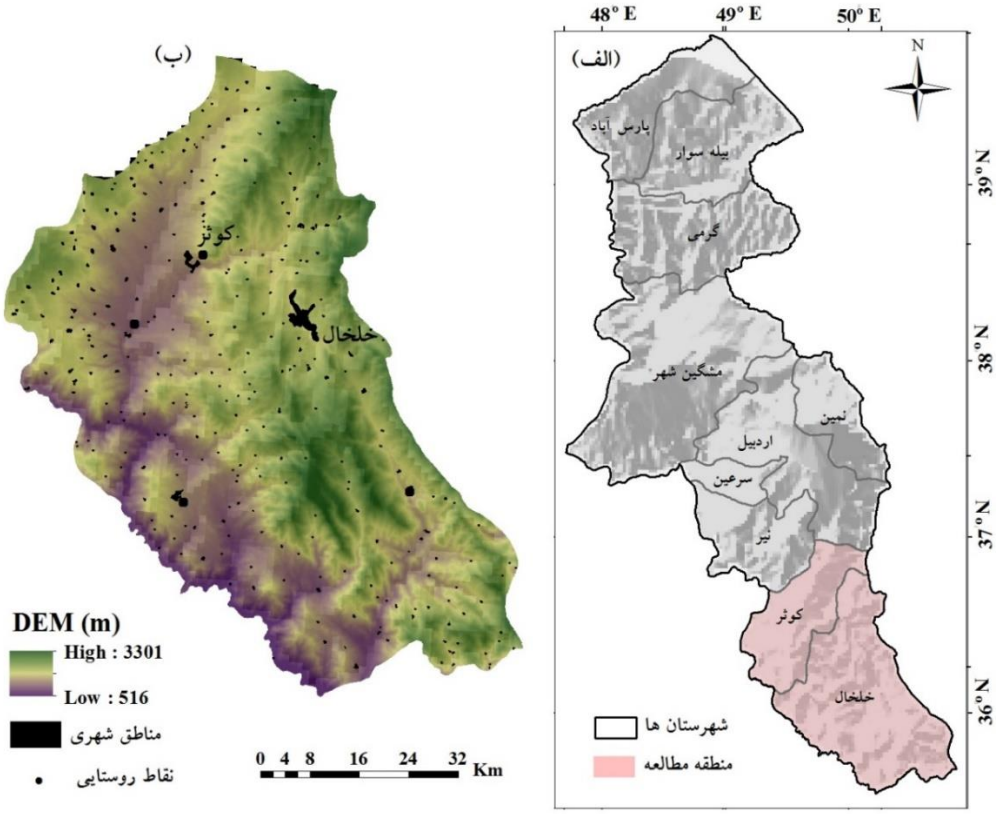
منطقه مورد مطالعه شامل دو شهرستان خلخال و کوثر با مجموع وسعت ۴۰۷۰ کیلومترمربع در بخش جنوبی استان اردبیل (عرض جغرافیایی ´۳۴ °۳۷ شمالی و طول جغرافیایی ´۳۱ °۴۸ شرقی (شکل ۱) واقع شده است. این منطقه با ارزش‌های طبیعی، توریستی، اجتماعی، صنعتی، و فرهنگی مشخص شده و شامل انواع کاربری‌های اراضی از جمله منابع محیط زیستی و فعالیت‌های تفرجی است. جمعیت انسانی دو شهرستان خلخال و کوثر به ترتیب در حدود ۹۲۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ نفر است که بیشتر به صورت متمرکز در دو شهر اصلی خلخال (۴۸۰۰۰ نفر) و کوثر (۷۱۰۰ نفر) و مابقی به صورت پراکنده در روستاهای بزرگ و کوچک و در خانه‌های مجزا در حومه شهر و ییلاقات توزیع شده است. ارتفاع متوسط منطقه مورد مطالعه ۱۶۰۰ متر و توپوگرافی با کوهستان‌ها و اراضی مرتفع و تپه‌ماهور، اغلب در جهت‌های شمال-غرب و جنوبی مشخص می‌شود. اقلیم کوهستانی، با زمستان‌های سرد و تابستان‌های خشک و گرم است. میانگین مجموع بارندگی سالانه خلخال و کوثر به ترتیب ۳۸۰ و ۳۴۰ میلیمتر است. فصل‌های بهار و زمستان پرباران‌ترین فصل‌ها و ماههای خرداد تا شهریور بدون بارندگی قابل توجه است. بیشترین درجه‌های حرارت در ماه‌های تیر و مرداد، با بیشینه درجه حرارت روزانه ۳۷°C در گرم‌ترین روزها ثبت شده است.

منطقه مطالعه به عنوان یکی از حساس‌ترین مناطق به آتش‌سوزی در استان اردبیل است و در سالهای گذشته تحت تاثیر آتش‌سوزی‌های نسبتا بزرگ و شدید قرار گرفته است (مانند آتش‌سوزی‌ها در مراتع منطقه آق بولاغ شهرستان خلخال (۷۵ هکتار) و نیز بخش مرکزی شهرستان کوثر (۷۵ هکتار) به ترتیب در تاریخ‌های ۱۳۹۵/۰۴/۳۱ و ۱۳۹۵/۰۶/۲۲). البته آتش‌سوزی‌ها در این منطقه به ندرت بیش از ۱۰ هکتار می‌سوزد و معمولا قبل از شب، زمانی که رطوبت نسبی هوا افزایش و درجه حرارت کاهش می‌یابد، اطفا می‌شود. به طور کلی در منطقه مطالعه آتش‌سوزی‌ها با وسعت بیش از ۱۰۰ هکتار کمتر از یک درصد از تعداد آتش‌سوزی‌های رخ داده را شامل می‌شوند، اما این آتش‌سوزی‌ها

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]

در حدود ۹ درصد را به لحاظ وسعت سوخته شده به خود اختصاص می‌دهند. اغلب آتش‌سوزی‌ها با بادهای شرقی به پیش می‌روند و در ماه‌های خرداد تا شهریور رخ می‌دهند.

۸۵ درصد مناطق جنگلی استان اردبیل در شهرستان خلخال واقع شده که عمدتا شامل توده‌های آمیخته و ناهمسال ارس (Juniperus polycarpus)، همراه با گونه‌های بنه (Pistacia atlantica Desf subsp. Mutica)، بادام کوهی (Amygdalus lyciodes Spach)، کیکم (Acer monspessulanum L.)، زرشک (Berberis integerrima L.) و سایر گونه‌ها است (رستمی‌کیا و ایمانی، ۱۳۸۸؛ رستمی‌کیا و زبیری، ۱۳۹۱). این گونه‌ها به عنوان شاخص‌ترین گونه‌های گیاهی جنگل‌های ایران تورانی هستند که در کوثر و خلخال قرار دارند. همچنین جنگلهای شاخه‌زاد بلوط با گونه غالب اوری (Quercus macranthera) همراه با گونه‌های افرا (Acer hyrcanum)، گیلاس وحشی (Prunus avium)، ممرز (Carpinus betulus)، گلابی وحشی (Pyrus communis)، فندق (Corylus avellana) و سایر گونه‌ها در شمال شرقی شهرستان خلخال وجود دارد.



شکل ۱: موقعیت شهرستان‌های استان اردبیل و منطقه مطالعه (الف). نقشه ارتفاع منطقه مطالعه با سکونت‌گاههای انسانی (ب).

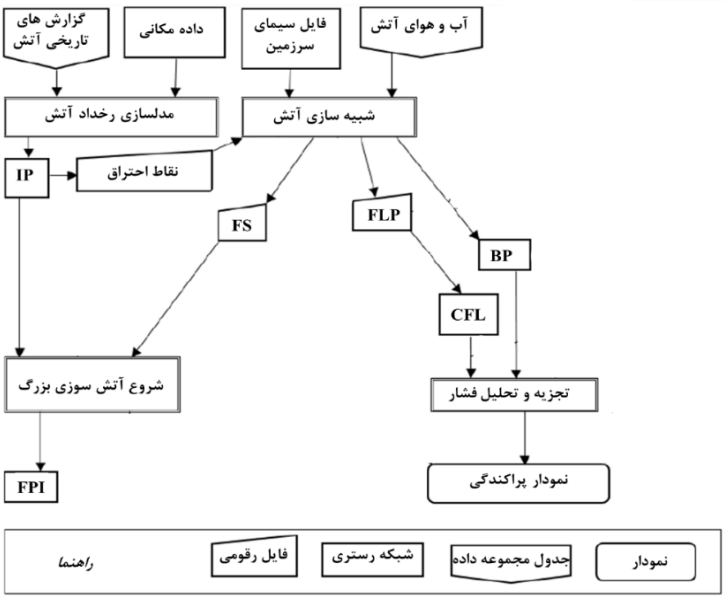
پوشش گیاهی منطقه مطالعه علاوه بر مناطق جنگلی اشاره شده، شامل مراتع و چراگاه‌های طبیعی علفی، علفی-درختچه‌ای، درختی و کوهستانی است. مناطق مرتعی شامل گیاهان با شکل رویشی بوته‌ای، فورب‌های چند ساله، گندمیان چندساله و گونه‌های یکساله در دو تیپ اصلی دیده می‌شود. تیپ اول به صورت چچم دائمی (Lolium perenne-) - شبدر سفید (Trifolium repense) همراه با گونه‌های علف باغ (Dactylis glomerata)، علف پشمکی (Bromus tomentellus)، یونجه زرد (Lotus corniculatus) و فستوکا (Festuca ovina) است. تیپ دوم نیز به صورت گون (Astragalus sp.)- کلاه میرحسن (Acantholimon sp.) همراه با گونه‌های همراه شنگ (Tragopogon colinus)، و علف گندمی (Agropyron cristatum) است (مددی و ملکی، ۱۳۹۷). تیپ گیاهی مرتع مشجر به‌صورت ارس (Juniperus

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]

communis)، تنگرس (Rhamnus pallasii Fisch. et. Mey)، و توت روباهی (Sanguisorba minor) نیز اغلب در پایین-دست مناطق جنگلی دیده می‌شود.

گون‌زارها (Astragalus sp.) در مناطق میان‌بند کوهپایه‌ها به همراه گونه‌های علف گندمی (Agropyron cristatum)، سیاه تنگرس (Rhamnus persica)، دم روباهی (Asparagus densiflorus)، و اسپرس خاردار (Onobrychis sativa) به صورت تیپ غالب مشاهده می‌شود. گندمیان دائمی (گراس‌ها) شامل علف گندمی، دم روباهی، جگن (Carex brunnra)، و چمن (Poa trivialis) در ارتفاعات مناطق شرقی و غربی این منطقه گسترده است و به عنوان گونه‌های شاخص منطقه محسوب می‌شوند. همچنین گیاه اسپرس خاردار (Onobrychis Cornuta) با گونه‌های مختلف مانند گون، علف گندمی، آویشن و فستوکا در برخی از بخش‌های این منطقه تیپ مستقلی را تشکیل می‌دهند (شریفی و همکاران، ۱۳۹۶، ۱۳۹۷). همچنین اراضی آبی، اراضی دیمزار کشاورزی و باغات سایر پوشش‌های طبیعی این منطقه را تشکیل می‌دهد.

به منظور کالیبراسیون مدل گسترش آتش FlamMap ۵.۰.۰ (Finney, ۲۰۰۶) در شرایط پوشش گیاهی منطقه مطالعه، شبیه‌سازی محیط یک آتش‌سوزی واقعی رخ داده در شهرستان خلخال با استفاده از این مدل انجام شد. در این مدل از الگوریتم حداقل زمان حرکت (MTT)، برای مدلسازی ریسک و فشار آتش استفاده شده است. این الگوریتم رشد آتش دوبعدی را با پیدا کردن مسیرها با حداقل زمان برای گسترش آتش از گوشه‌های سلول، در یک اندازه تفکیک انتخابی، محاسبه می‌کند. در شکل ۲ فلوچارت خلاصه‌ای از فرآیند شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل فشار آتش با استفاده از الگوریتم MTT و سیستم اطلاعات مکانی در منطقه مطالعه ارائه شده است. بر اساس این شکل شبیه‌سازی آتش نیاز به داده ورودی آب و هوای آتش، سیمای سرزمین و احتراق آتش دارد. در تجزیه و تحلیل شروع آتش، فشار و ریسک آتش از خروجی‌های مختلف مدلسازی آتش استفاده می‌شود. نتایج نیز در نقشه‌ها یا نمودارهایی ارائه می‌شود.



شکل ۲: فلوچارت خلاصه فرآیند شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل آتش: (IP) احتمال احتراق، (FS) اندازه آتش، (FLP) احتمال طول شعله، (BP) احتمال سوختن، (CFL) طول شعله شرطی، و (FPI) شاخص پتانسیل آتش.

از الگوریتم MTT در مدل FlamMap برای مدلسازی ریسک آتش و از سیستم اطلاعات جغرافیایی (ArcMap ۱۰،٤،۱) برای اجرای تحلیل‌های مکانی استفاده شد. از برنامه ۱،۲،۰۹ ArcFuels (Ager et al., ۲۰۱۱)، پیاده شده در ArcGIS ۱۰.۱ برای تهیه و جمع‌آوری داده رستری سیمای سرزمین برای مدلسازی آتش، و نیز آنالیز خروجی‌ها استفاده شد. فایل

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]

سیمای سرزمین یک شبکه منظم شامل داده مکانی با اندازه تفکیک ۱۰۰ متری برای زمین (نقشه‌های ارتفاع، شیب و جهت، تهیه شده از مدل رقومی ارتفاع زمین)، مواد سوختنی سطحی و مشخصات تاج پوشش (ارتفاع تاج، ارتفاع مبنای تاج، تراکم توده تاج و درصد تاج پوشش) است. تهیه شد. مدل ماده سوختنی سطحی نیز از مدل‌های ماده سوختنی استاندارد (Anderson, ۱۹۸۲; Scott and Burgan, ۲۰۰۵) متناسب با شرایط منطقه مطالعه و با در نظر گرفتن ترکیب گونه‌ها، درصد تاج پوشش، متوسط ارتفاع پوشش علفی، بوته‌ای و درختچه‌ای و موقعیت جغرافیایی گونه‌ها در منطقه بدست آمد (شکل ۳). مشخصات تاج پوشش نیز بر اساس نقشه‌های کاربری/ پوشش اراضی استان اردبیل با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و نظرات کارشناسان جنگل و مرتع مرتبط در منطقه مطالعه برآورد شد. مشخصات تاج پوشش تعیین شده برای اجرای شبیه‌سازی آتش مربوط به توده‌های بلوط اوری و نیز توده‌های آمیخته ارس بود که بیشتر پوشش جنگلی منطقه را در بر می‌گیرد و با استفاده از داده آماربرداری شده از جنگلهای منطقه برآورد شد.

داده ساعتی هواشناسی (سوابق ۱۳۸۴ الی ۱۳۹۷) از ایستگاه‌های هواشناسی خلخال و کوثر (جدول ۱) بدست آمد. به طور مشخص، شرایط آب و هوایی از نظر سرعت و جهت باد و محتوای رطوبت ماده سوختنی در طی فصل‌های آتش‌سوزی تاریخی در نظر گرفته شد. در منطقه مطالعه فصل آتش‌سوزی متمرکز بر ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور است. داده ساعتی رطوبت نسبی، درجه حرارت، سرعت باد، جهت باد، و بارندگی مربوط به دوره مطالعه از ایستگاه‌های هواشناسی مربوطه (جدول ۱) استخراج شد.

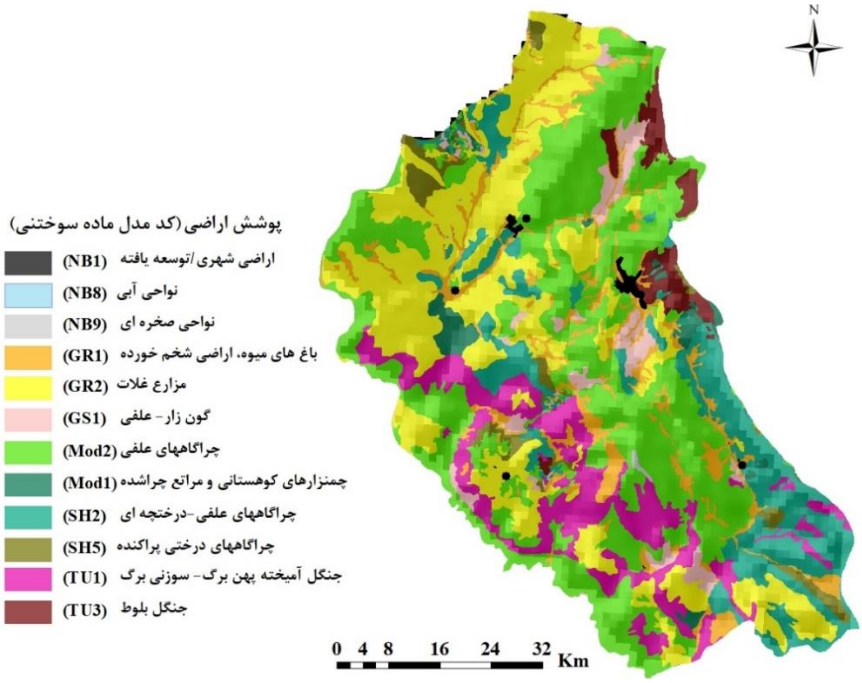
جدول ۱: ارزشهای متوسط و انحراف معیار مشخصات هواشناسی ماهانه (خرداد-شهریور؛ فصل بحرانی آتش) و سالانه مستخرج از ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک خلخال و کوثر (فیروزآباد) در جنوب اردبیل (۱۳۹۷-۱۳۸۴)

ایستگاه هواشناسی		ماه	متوسط درجه حرارت (°C)	کمینه درجه حرارت (°C)	بیشینه درجه حرارت (°C)	بارندگی (mm)
خلخال		خرداد	۱۷.۷۵±۱.۲۶	۴.۰۸±۱.۷۳	۳۱.۳۸±۲.۴۸	۱۷.۷۵±۱۸.۵۱
عرض جغرافیایی:	۳۷° ۱۷'	تیر	۲۰.۲۸±۱.۱۹	۸.۸۰±۲.۲۴	۳۳.۹۰±۲.۲۳	۹.۰۱±۱۰.۵۶
طول جغرافیایی:	۴۸° ۳۲'	مرداد	۲۰.۱۱±۱.۳۴	۶.۲۸±۲.۲۳	۳۳.۹۵±۱.۵۱	۸.۱۶±۸.۱۷
ارتفاع (m):	۱۷۹۶	شهریور	۱۶.۲۱±۰.۹۹	۱.۷۲±۱.۶۷	۳۰.۷۲±۱.۳۷	۱۰.۷۹±۱۲.۸۶
		متوسط سالانه	۹.۰۱±۸.۵۲	-۵.۲۵±۹.۹۳	۲۲.۳۷±۹.۲۵	۲۹.۸۲±۲۶.۵۱
کوثر (فیروزآباد)		خرداد	۲۴.۲۳±۲.۷۷	۷.۹۳±۲.۰۱	۳۷.۲۸±۲.۷۵	۷.۹۰±۸.۳۱
عرض جغرافیایی:	۳۸° ۳۵'	تیر	۲۶.۴۳±۲.۰۵	۱۱.۸۷±۱.۶۶	۳۹.۷۵±۲.۶۹	۷.۳۳±۹.۱۷
طول جغرافیایی:	۴۸° ۱۳'	مرداد	۲۶.۱۵±۲.۵۶	۱۰.۱۷±۲.۲۳	۳۹.۳۳±۲.۷۶	۵.۲۳±۶.۸۱
ارتفاع (m):	۱۱۸۵	شهریور	۲۱.۹۲±۲.۱۸	۵.۱۲±۱.۹۰	۳۵.۹۷±۲.۴۳	۹.۳۶±۹.۷۳
		متوسط سالانه	۱۳.۶۴±۹.۹۸	-۲.۱۸±۱۰.۴۵	۲۷.۲±۱۰.۱۶	۲۴.۶۳±۲۵.۳۷

هر ماده‌سوختنی با داشتن تاخیر زمانی معینی شناخته می‌شود. تاخیر زمانی، بصورت زمان مورد نیاز برای ماده سوختنی مرده برای از دست دادن تقریباً ۶۳٪ از اختلاف بین مقدار رطوبت اولیه و مقدار رطوبت تعادل، در شرایط ثابت رطوبت و درجه‌حرارت هوا تعریف و به ساعت بیان می‌شود. موادسوختنی مرده در رابطه با تاخیر زمانی آنها که متناسب با قطر اجزا ماده‌سوختنی است، به چهار دسته طبقه‌بندی می‌شوند: موادسوختنی hr-۱ (موادسوختنی ریز دارای قطر کمتر از ۰/۶۴ سانتی‌متر)؛ موادسوختنی hr-۱۰ (موادسوختنی با قطر ۰/۶۴ تا ۲/۵۴سانتی‌متر)؛ موادسوختنی hr-۱۰۰ (موادسوختنی با قطر ۲/۵۴ تا ۷/۶۲ سانتی‌متر)؛ و موادسوختنی hr-۱۰۰۰ (موادسوختنی ۷/۶۲ تا ۲۰/۳۲ سانتی‌متر) (Russell, ۲۰۰۵). در این مطالعه به دلیل عدم دسترسی به داده محتوای رطوبت ماده‌سوختنی زنده و مرده مربوط به منطقه مطالعه، محتوی رطوبت موادسوختنی مرده در طبقات hr-۱، hr-۱۰ و hr–۱۰۰ بر اساس پارامترهای محیط‌زیست

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]

آتش شامل عوامل آب و هوایی، توپوگرافی و پوشش‌گیاهی با استفاده از روش Rothermel (۱۹۸۳)، و محتوای رطوبت ماده‌سوختنی زنده با توجه به مراحل رویشی توده‌های جنگلی و بر اساس مشاهدات میدانی و نیز مرور منابع (Sağlam et al., ۲۰۰۸; Jahdi et al., ۲۰۱۶) برآورد شد (جدول ۲).

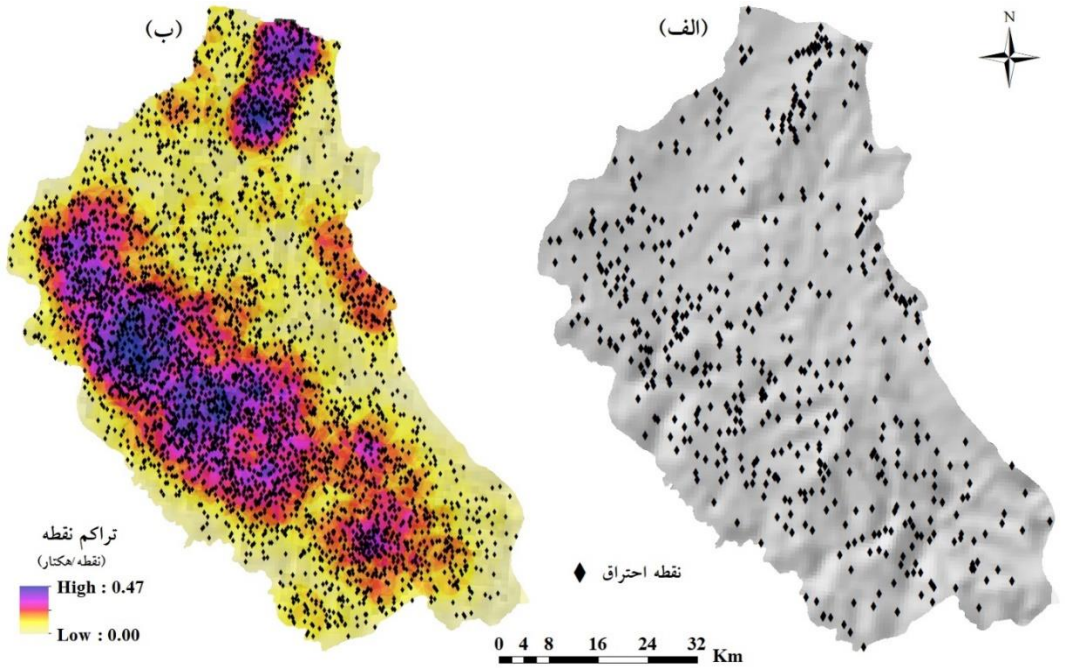


شکل ۳: نقشه پوشش اراضی و مدلهای ماده سوختنی اختصاص یافته (Anderson, ۱۹۸۲; Scott and Burgan, ۲۰۰۵) برای مدلسازی آتش.

مدل گسترش آتش سطحی (Rothermel, ۱۹۷۲) و مدل‌های ماده سوختنی استاندارد (Anderson, ۱۹۸۲; Scott and Burgan, ۲۰۰۵) در شرایط پوشش گیاهی شمال ایران در مطالعات متعددی کالیبره و اعتبارسنجی شده است (Jahdi et al., ۲۰۱۶: جهدی و همکاران، ۱۳۹۴). در این مطالعه قابلیت و تناسب الگوریتم MTT براساس شبیه‌سازی آتش‌سوزی رخ داده (در تاریخ ۲۳ خرداد ۱۳۹۵) در نزدیکی روستاهای گل گلاب و دمدل در دهستان خورش رستم شمالی واقع در بخش خورش رستم شهرستان خلخال ، با کاربری غالب مرتع، با فرض بر اینکه اقدامات اطفای حریق اثری روی رشد آتش در طول اوج گسترش آتش نداشته است، بررسی شد.

از شبکه تراکم احتراق (شکل ۴) ساخته شده از مجموعه داده تاریخی احتراق (۵۷۵ آتش‌سوزی ثبت شده، ۱۳۹۷-۱۳۸۴؛ شکل ۴، الف)، برای تعیین الگوی احتراق در منطقه مطالعه استفاده شد. شبکه احتمال احتراق (IP) بر اساس موقعیت‌های احتراق تاریخی با روش وزن‌دهی بر اساس فاصله معکوس (IDW؛ ArcMap Spatial Analyst) با شعاع جستجوی ۵۰۰۰ متری تهیه شد. این شعاع حداقل میزان فاصله‌ای است که نقشه تقریبا پیوسته‌ای از احتمالات احتراق برای مناطق قابل سوختن برای مدلسازی آتش، را تولید می‌کند. در مجموع ۴۵۰۰ نقطه احتراق در این شبیه‌سازی‌ها استفاده شده که از شبکه رستری IP نمونه‌گیری شده است (شکل ۴، ب). بنابراین، یک شبکه احتمال احتراق برای الگوریتم MTT استخراج شد، که توزیع اندازه آتش برای شبیه‌سازی مطابق با وقایع ثبت شده را تولید می‌کند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]



شکل ۴: توزیع مکانی نقاط احتراق تاریخی (رخ داده) در دوره زمانی مورد بررسی (۱۳۹۷-۱۳۸۴؛ از خرداد تا شهریور) در منطقه مورد مطالعه (الف). نقشه تراکم نقاط احتراق بدست آمده از آتش‌سوزی‌های تاریخی در دوره مورد مطالعه مورد استفاده برای مدلسازی آتش (ب).

در ادامه، شرایط آب و هوایی (سرعت و جهت باد، جدول ۲) با توجه به مشاهدات تاریخی آنها در فصل حریق برای مدلسازی ریسک آتش تعریف شد. مدلسازی آتش تحت شرایط آب و هوایی واقعی (۶ سناریو جهت باد و سرعت باد با توجه به غالبیت رخداد آن در فصل آتش‌سوزی)، و محتوای رطوبت ماده سوختنی انجام شد (جدول ۲). جهت باد سرعت و جهت باد برای مدلسازی آتش بر اساس داده آب و هوا ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی خلخال و کوثر، با تمرکز بر روزهای با حوادث آتش‌سوزی شدید در فصل حریق تعیین شد. شش جهت باد غالب (۴۰°، ۷۰°، ۱۰۰°، ۱۳۰°، ۱۶۰°، ۱۹۰°) با سرعت‌های باد مختلف تعیین شده اساسا مربوط به بزرگترین آتش‌سوزی‌ها در منطقه مطالعه است. در کل، ۴۵۰۰ آتش‌سوزی برپایه نقاط احتراق تاریخی (شکل ۴، ب) در محدوده مدلسازی آتش شبیه‌سازی شد، که تعداد مشابهی محیط آتش (پلی‌گون‌های رقومی) مرتبط با مختصات نقاط احتراق آتش تهیه شد. مدت مدلسازی آتش با توجه به متوسط زمان گسترش حوادث آتش‌سوزی تاریخی، ۵ ساعت تعیین شد.

در ادامه نقشه‌های احتمال سوختن (BP)، طول شعله شرطی (CFL) و اندازه آتش (FS) حاصل از خروجی‌های الگوریتم MTT در منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی ریسک و فشار آتش، شش مجموعه از خروجی‌های شبیه‌سازی آتش (BP، CFL و FS)، مرتبط با شش سناریو باد تعریف شده، با وزن‌دهی احتمال سناریو مربوطه (جدول ۲)، در یک نقشه واحد به کمک تابع Raster Calculator در محیط GIS ترکیب شد. این کار امکان بدست آوردن نقشه‌های مکانی شدت و احتمال آتش مرتبط با مهم‌ترین سناریوها برای منطقه مطالعه را فراهم می‌کند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]

جدول ۲: داده ورودی آب و هوایی مورد استفاده برای شبیه‌سازی‌های آتش. بیشترین جهت‌های باد تکرار شونده (فراوانی >۵٪) در طول ۱۴ فصل آتش‌سوزی گذشته (۱۳۹۷-۱۳۸۴)

سناریو باد				محتوای رطوبت ماده سوختنی						
جهت (°)	سرعت باد (km h⁻¹)	احتمال	طبقه بار ماده سوختنی		مدل ماده سوختنی (Anderson, ۱۹۸۲; Scott and Burgan, ۲۰۰۵)					
					NB۱, NB۸, NB۹	GR۱, GR۲, Mod۱, Mod۲	GS۱	SH۲, SH۵	TU۱, TU۳
۴۰	۱۳	۰.۱۸		۱-hr	n.a*	۸	۹	۱۱	۱۱
۷۰	۲۱	۰.۲۶	ماده سوختنی مرده (٪)	۱۰-hr	n.a	۹	۱۰	۱۲	۱۲
۱۰۰	۲۱	۰.۳۰		۱۰۰-hr	n.a	۱۱	۱۲	۱۴	۱۴
۱۳۰	۳۰	۰.۰۹							
۱۶۰	۱۳	۰.۱۱	ماده سوختنی زنده (٪)	علفی زنده	n.a	۰	۰	۰	۰
۱۹۰	۱۶	۰.۰۶		چوبی زنده	n.a	۴۰	۵۰	۷۰	۸۰

* غیرقابل بکارگیری/ دردسترس نیست

BP بیانگر میزان احتمال سوختن یک پیکسل در یک فاصله مکانی معین طول شعله، با در نظر گرفتن یک نقطه احتراق در کل منطقه مطالعه تحت شرایط آب و هوایی فرض شده، خواهد سوخت. BP به صورت تعداد دفعاتی که یک پیکسل به عنوان یک نسبتی از تعداد کل آتش‌سوزی‌ها، می‌سوزد نیز تعریف می‌شود (معادله ۱):

$$BP_{xy} = \left(\frac{F_{xy}}{n_{xy}}\right) \qquad (۱)$$

که F_{xy} تعداد دفعاتی است که پیکسل xy می‌سوزد و n_{xy} تعداد آتش‌سوزی‌های شبیه‌سازی شده (۴۵۰۰) است.

شدت آتش (fire intensity (kW m⁻¹)؛ Byram, ۱۹۵۹) توسط الگوریتم گسترش آتش MTT براورد می‌شود و وابسته به جهتی است که در آن آتش در یک پیکسل، با توجه به جهت اصلی گسترش (به عنوان مثال، آتش رو به جلو، جناحی یا رو به عقب) و نیز شیب و جهت زمین، رخ می‌دهد (Finney, ۲۰۱۱). MTT شدت خط آتش (FLI، kWm⁻¹) را به طول شعله (FL، m) بر اساس معادله Byram (۱۹۵۹) تبدیل می‌کند (معادله ۲):

$$FL = ۰,۰۷۷۵\ (FI)^{۰,٤٦} \qquad (۲)$$

توزیع مکانی طول شعله بدست آمده از آتش‌سوزی‌های متعدد که هر پیکسل را می‌سوزاند، برای محاسبه طول شعله شرطی (CFL) استفاده شد (معادله ۳):

$$CFL=\sum_{i=۱}^{۲۰} \left(\frac{BP_i}{BP}\right)(Fi) \qquad (۳)$$

که Fi طول شعله در نقطه میانی طبقه i ام است. CFL احتمال وزن‌دهی شده از طول شعله با توجه به یک رخداد آتش، و یک شاخص خطر آتش است (Ager et al., ۲۰۱۱). خروجی MTT بصورت فایل‌های متنی شامل اندازه آتش (FS، ha) و مختصات احتراق برای هر آتش شبیه‌سازی شده می‌باشد. این خروجی‌ها برای تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی در اندازه آتش‌سوزی‌های شبیه‌سازی شده استفاده می‌شود.

در این مطالعه از FS و موقعیت‌های احتراق تاریخی برای محاسبه شاخص پتانسیل آتش (FPI) استفاده شد (معادله ۴):

$$FPI = FS \times IP \qquad (٤)$$

که FS متوسط اندازه آتش همه آتش‌سوزی‌هایی است که از یک پیکسل مشخص شروع می‌شود و IP شبکه احتمال احتراق تعیین شده از نقشه نقاط احتراق تاریخی (توضیحات بالا) است. FPI، احتمال احتراق (IP) را با خروجی‌های شبیه‌سازی اندازه آتش (FS)، به منظور اندازه‌گیری سطح سوخته شده سالانه مورد انتظار برای یک پیکسل مشخص،

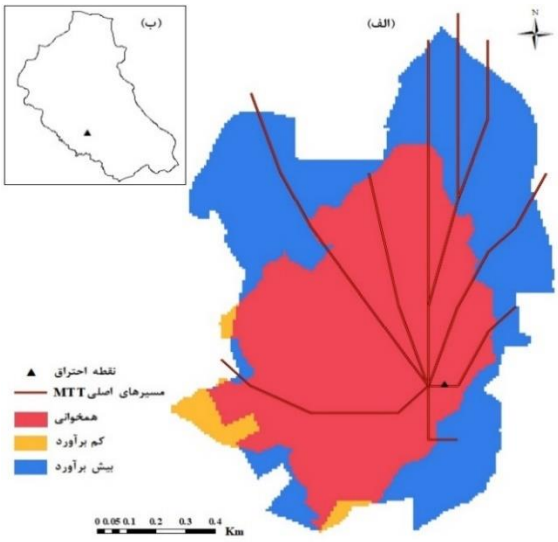
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]

ترکیب می‌کند. موقعیت‌هایی که با FPI زیاد مشخص می‌شود، احتراق با احتمال زیاد و در پی آن آتش‌سوزی بزرگی خواهند داشت (Alcasena et al., ۲۰۱۵). FPI اطلاعات مکانی ارزشمندی به منظور تعیین مناطق با اولویت پیشگیری احتراق‌های آتش، در سیماهای سرزمین حساس به آتش، نیز ارائه می‌کند (Alcasena et al., ۲۰۱۷).

شرح و تفسیر نتایج

آتش انتخاب شده برای کالیبراسیون با وسعت سوخته شده در حدود ۸۳.۵ هکتار در طی هشت ساعت (۲۰-۱۲) سوخته است. با استفاده از آب و هوای ثبت شده در طول آتش، همخوانی خوبی بین محیط آتش واقعی و شبیه‌سازی شده بدست آمد (شکل ۵). بیش‌برآورد بدست آمده در پهلوهای آتش قابل پیش‌بینی بود، زیرا تلاش‌های اطفای حریق در این مناطق متمرکز و موثرتر بوده است که در این شبیه‌سازی لحاظ نشده است. ضریب Sorensen، ضریب Cohen's kappa و صحت کلی به ترتیب ۰.۶۸، ۰.۶۶ و ۰.۹۵ بدست آمد.



شکل ۵: مقایسه محیط‌های نهایی آتش‌سوزی واقعی و شبیه‌سازی‌شده در بخش خورش رستم شهرستان خلخال (۲۳ خرداد ۱۳۹۵؛ ۸۳.۵ هکتار سوخته شده) ((الف)؛ با موقعیت نقطه احتراق (ب) و در نظر گرفتن محیط نهایی آتش واقعی (همخوانی).

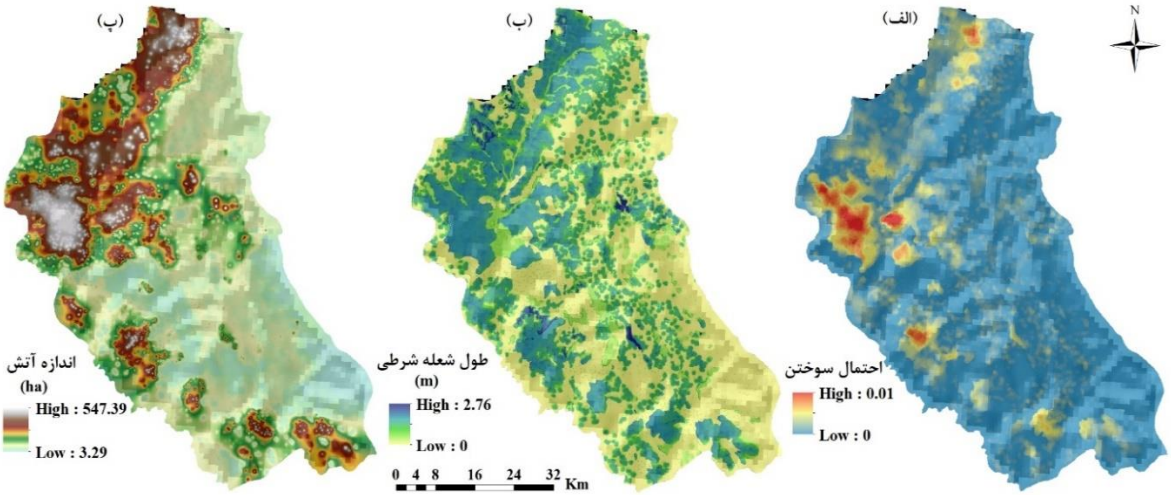
- **احتمال سوختن، طول شعله شرطی، اندازه آتش و شاخص پتانسیل آتش**

با صرفنظر کردن از مواد سوختنی غیرقابل اشتعال، ارزشهای احتمال سوختن (شکل ۶، الف) با توزیع مکانی گسترده در منطقه مطالعه از ۰ تا ۰.۰۱ بدست آمد. مطابق پیش‌بینی‌ها، نواحی با احتمال سوختن بالاتر در بخش‌های غربی دیده شد که شامل مناطق با مدل‌های ماده سوختنی با نرخ‌های گسترش خیلی زیاد مانند پوشش گیاهی علفی است.

نتایج شبیه‌سازی طول شعله شرطی (شکل ۶، ب) ارزشهای نسبتا زیادی را برای بخش‌های مختلف در منطقه مطالعه نشان می‌دهد که اغلب با مدل‌های ماده سوختنی با بار زیاد و ارتفاع بیشتر مانند پوشش‌های علفی و درختچه‌ای مشخص است. در نواحی محدودی شامل لکه‌های مرکزی و جنوبی توزیع ارزشهای احتمال سوختن و طول شعله شرطی متضاد بود، به نحوی که بیشترین ارزشهای طول شعله شرطی در نواحی با احتمال سوختن کم دیده شد. این مورد می‌تواند با ارزشهای کم نرخ گسترش آتش برای بارهای ماده سوختنی تجمع یافته و تمرکز کمتر احتراق‌های تاریخی در این ناحیه، توجیه شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]

نتایج اندازه آتش (شکل ۶، پ) احتراق‌ها با پتانسیل متفاوت برای تولید آتش‌سوزی در اندازه‌های مختلف، را نشان داد. اندازه آتش شبیه‌سازی شده از ۳.۲۹ هکتار تا حداکثر ۵۴۷.۳۹ هکتار بود. آتش‌سوزی‌های کوچک ناشی از احتراق‌هایی است که اغلب در نزدیکی نواحی با سیمای سرزمین قطعه قطعه شده با موزائیکی از پوشش گیاهی و مواد غیرقابل سوختن، و مناطق آبی رخ می‌دهد. در مقابل، آتش‌سوزی‌های بزرگ ناشی از احتراق‌هایی است که در محل موادسوختنی بزرگ با جهت وزش باد غالب رخ می‌دهد و امکان گسترش آتش در فواصل طولانی را فراهم می‌کند، بویژه در مناطق با ترکیبی از چراگاهها و درختچه‌زارهایی که دارای ماده سوختنی با نرخ گسترش آتش بالا بودند.

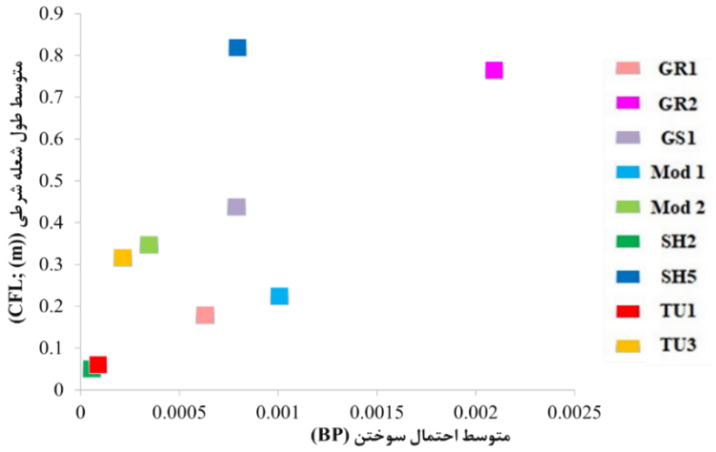


شکل ۶: نقشه‌های خروجی احتمال سوختن (الف)، طول شعله شرطی (ب) و اندازه آتش (پ) برای منطقه مطالعه.

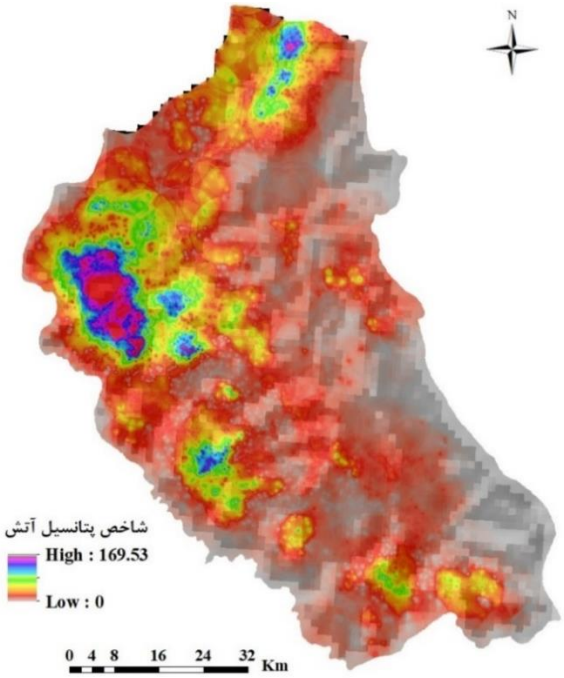
نمودار پراکندگی ارزشهای متوسط حاصل از شبیه‌سازی‌ها برای فاکتورهای فشار آتش در پوشش‌های اراضی مختلف برای تشریح الگوی تغییرات فشار آتش در هر منطقه استفاده می‌شود (شکل ۷). این نمودار به تعیین پدیده‌هایی که در معرض ریسک بیشتری از آتش هستند، کمک می‌کند. نمودار پراکندگی برای منطقه مطالعه در شکل ۷ نشان می‌دهد که کدام تیپ پوشش گیاهی دارای پتانسیل آتش‌سوزی‌های مکرر و بزرگتر است. مزارع غلات دارای احتمالات سوختن و طول شعله شرطی زیاد بودند، همراه با چراگاهها با پوشش درختی پراکنده، گون‌زارها و چمنزارهای کوهستانی، در حالی که کمترین ارزشها در پوشش‌های جنگلی پهن‌برگ این منطقه یافت شد.

نقشه شاخص پتانسیل آتش (شکل ۸) نیز موقعیت‌های احتمالی برای آتش‌سوزی‌های بزرگ را نشان می‌دهد. این شاخص برپایه احتمال احتراق و متوسط اندازه آتش برای هر پیکسل محاسبه شده، و سطح سوخته شده بالقوه در نتیجه احتراق‌ها در هر پیکسل را بیان می‌کند. در این شکل شاخص پتانسیل آتش بیشتر در مناطقی دیده می‌شود که احتراق-های تاریخی زیاد بود و همچنین در مناطقی که مواد سوختنی با امکان اشتعال سریع‌تر موجود بود. این موارد شامل مناطق اطراف جاده‌ها که آتش‌سوزی‌های بزرگ در چراگاهها و اراضی کشاورزی رخ می‌دهد، نیز می‌شود. موقعیت شروع آتش‌سوزی‌های بزرگ تعیین شده با شاخص پتانسیل آتش، در اطراف بخش‌های غربی و شمال-غربی منطقه مطالعه متمرکز بود (شکل ۸). احتراق‌ها در این بخش‌ها منجر به اندازه آتش بزرگتر، و بنابراین ارزشهای بالاتر شاخص پتانسیل آتش نسبت به بخش‌های شرقی و جنوب-شرقی شده است. در چمنزارهای کوهستانی و چراگاه‌های علفی-درختچه‌ای بخش‌های جنوب-شرقی، احتمال احتراق و گسترش آتش خیلی کم و در نتیجه ارزشهای این شاخص در مقایسه با سایر مناطق کمتر بود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]



شکل ۷: نمودار پراکندگی احتمال سوختن در برابر طول شعله شرطی (ریسک آتش) برای انواع مدلهای ماده سوختنی در منطقه مطالعه



شکل ۸: شاخص پتانسیل آتش (FPI) محاسبه شده بر پایه نقشه‌های اندازه آتش و احتمال احتراق، این نقشه نشان دهنده توزیع احتراق‌های احتمالی با گسترش آتش‌سوزی‌ها در اندازه‌های متفاوت است.

نتیجه‌گیری

انجام مطالعات متعددی در ارزیابی ریسک و فشار آتش برای مناطق حساس به آتش‌سوزی در ایالات متحده، مناطق مدیترانه‌ای اروپا، استرالیا و نیوزلند گزارش شده است (Carmel et al. ۲۰۰۹; Salis et al., ۲۰۱۳, ۲۰۱۵; Ager et al., ۲۰۱۷, ۲۰۱۸). نتایج این مطالعات برای بررسی الگوهای فشار آتش در مناطق مورد مطالعه کاربردی و مناسب تشخیص داده شده است. در این مطالعه اولین کاربرد مدلسازی احتمال سوختن برای تولید نقشه فاکتورهای ریسک و فشار آتش (احتمال سوختن، طول شعله شرطی، اندازه آتش و شاخص پتانسیل آتش) در مقیاس سیمای سرزمین در ایران ارائه شده است. ارزشهای نسبی این فاکتورها می‌تواند راهنمای خوبی برای توسعه استراتژی‌های خاص مدیریت ریسک باشد. در این مطالعه از شرایط آب و هوایی واقعی در فصل آتش‌سوزی برای شبیه‌سازی حوادث آتش‌سوزی گذشته، بدون در نظر گرفتن فعالیت‌های اطفای حریق در طی این حوادث و نیز اقدامات مدیریت پوشش گیاهی به دلیل عدم دسترسی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]

به اطلاعات دقیق در این زمینه‌ها، استفاده شد. فعالیت‌های اطفای حریق کمترین اثر را روی رشد آتش در طول این حوادث دارند (Salis et al., ۲۰۱۳).

فاکتورهای اشاره شده برای نمایش توزیع مکانی فشار آتش در ارتباط با شرایط محیط زیست منطقه مطالعه در اندازه تفکیک ۱۰۰ متری محاسبه شد. در بین اراضی مختلف، مطابق با شکل‌های ۶ و ۷، اراضی کشاورزی و مزارع غلات بیشترین ارزشهای احتمال سوختن و طول شعله شرطی را داشتند. این اراضی به دلیل شدت انجام فعالیت‌های کشاورزی در منطقه و سوزاندن پس‌چر مزارع بیشترین ریسک آتش را دارا می‌باشند. بر اساس نقشه اندازه آتش شبیه‌سازی شده، مناطقی که در آن آتش‌سوزی‌های بزرگ پیش‌بینی شده اغلب مطابق با نواحی با آتش‌سوزی‌های تاریخی بزرگ رخ داده در گذشته، است که نشانه تناسب و قابلیت مدل برای این منطقه می‌باشد. محقیقن زیادی از جمله Salis و همکاران (۲۰۱۳,۲۰۱۵)، و Alcasena و همکاران (۲۰۱۹,۲۰۱۷) نیز بر قابلیت مدل تاکید کرده‌اند. با توجه به نقشه شاخص پتانسیل آتش، فشار آتش برای پوشش گیاهی موجود در آتش‌سوزی‌هایی که در بخش‌های غربی و شمال غربی منطقه مطالعه رخ می‌دهند به دلیل قابلیت اشتعال زیاد مواد سوختنی موجود، بیشتر خواهد بود.

برآورد خطر آتش از طریق شبیه‌سازی هزاران آتش‌سوزی با استفاده از الگوریتم MTT، طرح کلی این پدیده را برای منطقه مطالعه نمایان کرد. خطرناک‌ترین بخش این منطقه از نظر احتمالات سوختن و اندازه آتش در بخش غربی واقع شده است، علاوه بر این شدیدترین حوادث آتش‌سوزی که در آینده می‌تواند در این منطقه رخ دهد نیز در بخش‌های غربی و شمال غربی است. نتایج ارائه شده در رابطه با ارزیابی ریسک و فشار آتش می‌تواند برای اثربخشی برنامه‌ریزی کاهش ریسک استفاده شود. با این وجود، مطالعات موردی بیشتری ضمن اصلاح نقشه‌های پوشش گیاهی موجود و توسعه روشهای جدید برای تهیه مدلهای ماده سوختنی دقیق، و نیز طرح‌های احتراق تاریخی به منظور گسترش کاربرد مدلسازی ریسک و فشار آتش، مورد نیاز است.

سپاسگزاری

این طرح از محل اعتبارات طرح پژوهشی مصوب معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی با شماره ۲۲۵۵۸ با عنوان "تدوین برنامه مدیریت بحران آتش‌سوزی جنگلها و مراتع در استان اردبیل" تأمین شده است که بدین وسیله تشکر می‌شود.

منابع

جهدی، رقیه؛ علی اصغر درویش صفت و وحید اعتماد. ۱۳۹۴. ارزیابی اثر شرایط رطوبت ماده سوختنی روی گسترش و رفتار آتش در پارک ملی گلستان. جنگل و فرآورده‌های چوب، مجله منابع طبیعی ایران، **۶۸ (۴)**، ۸۱۳-۷۹۹.

رستمی‌کیا (نوکی)، یونس و علی اکبر ایمانی. ۱۳۸۸. فنولوژی بنه Pistacia atlantica Desf subsp. mutica (F. &M.) Rech. در جنگلهای خلخال. فصلنامهٔ علمی - پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، **۱۷ (۳)**، ۳۵۸-۳۴۸.

رستمی‌کیا (نوکی)، یونس و محمود زبیری. ۱۳۹۱. بررسی ساختار توده های ارس (Juniperus excelsa Beib.) در جنگل کندیرق خلخال. علوم و فناوری چوب و جنگل (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، **۱۹ (۴)**، ۱۶۲-۱۵۱.

شریفی، جابر؛ امرعلی شاهمرادی، اللهویردی نوری و دولت محمدی. ۱۳۹۶. پایش پوشش گیاهی مراتع نیمه استپی استان اردبیل (مطالعه موردی: مراتع آقداغ منطقه خلخال). نشریهٔ علمی پژوهشی مرتع، **۱۱ (۳)**، ۲۸۳-۲۸۳.

شریفی، جابر؛ محمد فیاض، یونس رستمی‌کیا، فرزانه عظیمی و پروانه عشوری. ۱۳۹۷. تیپ‌های گیاهی عرصه‌های منابع طبیعی استان اردبیل. طبیعت ایران، **۴ (۱)**، ۲۶-۲۱.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]

فرجزاده، منوچهر؛ یوسف قویدل رحیمی و ساحل مکری. ۱۳۹۴. تجزیه و تحلیل آتش‌سوزی جنگل با منشاء آب و هوایی با داده‌های ماهواره‌ای در منطقه البرز. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات طبیعی، **۴**، ۱۰۴-۸۳.

مددی، المیرا؛ و محسن ملکی. ۱۳۹۷. ارزیابی اثرات اجتماعی - اقتصادی پروژه‌های منابع طبیعی اجرا شده از دید ذینفعان (مطالعه موردی: حوزه آبخیز اندبیل -شهرستان خلخال)، نشریهٔ علمی پژوهشی مرتع، **۱۲** (**۳**)، ۲۶۷-۲۸۰.

Ager, A.A.; N.M. Vaillant, and M.A. Finney. ۲۰۱۱. Integrating fire behavior models and geospatial analysis for wildland fire risk assessment and fuel management planning. Journal of Combustion. doi:۱۰,۱۱۵۵/۲۰۱۱/۵۷۲٤۵۲.

Ager, A.A.; C.R. Evers, M.A. Day, H.K. Preisler, A.M. Barros, and M. Nielsen-Pincus. ۲۰۱۷. Network analysis of wildfire transmission and implications for risk governance. PLoS ONE, **۱۲(۳)**, e۰۱۷۲۸٦۷

Ager, A.A.; P. Palaiologou, C.R. Evers, M.A. Day, and A.M.G. Barros. ۲۰۱۸. Assessing transboundary wildfire exposure in the southwestern United States. Risk Analysis, **۳۸** (**۱۰**): ۲۰۱۸ DOI: ۱۰,۱۱۱۱/risa.۱۲۹۹۹

Alcasena, F.J.; M. Salis, A.A. Ager, B. Arca, D. Molina, and D. Spano. ۲۰۱۵. Assessing landscape scale wildfire exposure for highly valued resources in a Mediterranean area. Environmental Management. **۵۵**: ۱۲۰۰–۱۲۱٦.

Alcasena, F.J.; M. Salis, and C. Vega-García. ۲۰۱٦. A fire modeling approach to assess wildfire exposure of valued resources in central Navarra, Spain. Euruprsan Journal of Forest Research, **۱۳۵**: ۸۷–۱۰۷.

Alcasena, F.J.; M. Salis, A.A. Ager, R. Castell, and C.Vega-García. ۲۰۱۷. Assessing wildland fire risk transmission to communities in Northern Spain. Forests, ۸, **۳۰**; doi:۱۰,۳۳۹۰/f۸۰۲۰۰۳۰

Alcasena, F.J.; Ager, A.A., Pineda, N., and Vega-García, C. ۲۰۱۹. Towards a comprehensive wildfire management strategy for Mediterranean areas: framework development and implementation in Catalonia, Spain. Journal of Environmental Management, **۲۳۱**, ۳۰۳-۳۲۰.

Anderson, H.E. ۱۹۸۲. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-GTR-۱۲۲. (Ogden, UT)

Byram, G.M. ۱۹۵۹. Combustion of forest fuels. In: DAVIS, K. P. (ed.) Forest Fire Control and Use. McGraw-Hill Book Company, New York, ۱۹۵۹. p. ٦۱ - ۸۹.

Calkin, D.C.; M.A. Finney, A.A. Ager, M.P. Thompson, and K.G. Gebert. ۲۰۱۱. Progress towards and barriers to implementation of a risk framework for us federal wildland fire policy and decision-making. Forest Policy and Economic, **۱۳**: ۳۷۸–۳۸۹.

Carmel, Y.; S. Paz, F. Jahashan, and M. Shoshany. ۲۰۰۹. Assessing fire risk using Monte Carlo simulations of fire spread. Forest Ecology and Management, **۲۵۷**: ۳۷۰–۳۷۷. doi:۱۰,۱۰۱٦/J.FORECO.۲۰۰۸,۰۹,۰۳۹

Curt, T.; T. Fréjaville, and S. Lahaye, ۲۰۱٦. Modelling the spatial patterns of ignition causes and fire regime features in Southern France: Implications for fire prevention policy. International Journal of Wildland Fire, **۲۵**: ۷۸۵–۷۹٦.

Elia, M.; R. Lovreglio, N. Ranieri, G. Sanesi, and R. Lafortezza. ۲۰۱٦. Cost-effectiveness of fuel removals in Mediterranean wildland-urban interfaces threatened by wildfires. Forests, ۷, ۱٤۹.

Fairbrother, A.; and J.G. Turnley. ۲۰۰۵. Predicting risks of uncharacteristic wildfires: application of the risk assessment process. Forest Ecology and Management, **۲۱۱**: ۲۸–۳۵.

Finney, M.A. ۲۰۰٦. An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In: Andrews, P.L., Butler, B.W. (Eds.), Fuels Management – How to Measure Success, Conference proceedings, ۲۸–۳۰ March ۲۰۰٦, Portland, OR, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station Proceedings RMRS-P-٤۱. Fort Collins, Colorado, pp. ۲۱۳–۲۲۰.

Finney, M.A.; I.C. Grenfell, and C.W. McHugh. ۲۰۰۹. Modeling large fire containment using generalized linear mixed model analysis. Forest Science, **۵۵**: ۲٤۹–۲۵۵.

Finney, M.A.; C.W. McHugh, I.C. Grenfell, K.L. Riley, and K.C. Short, ۲۰۱۱. A simulation of probabilistic wildfire risk components for the continental United States. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, **۲۵**: ۹۷۳–۱۰۰۰.

Garrido, P.; M. Elbakidze, P. Angelstam, T. Plieninger, F. Pulido, and G. Moreno, ۲۰۱۷. Stakeholder perspectives of wood-pasture ecosystem services: a case study from Iberian dehesas. Land Use Pol, **٦۰**: ۳۲٤–۳۳۳.

Jahdi, R.; M. Salis, A.A. Darvishsefat, F. Alcasena, M.A. Mostafavi, V. Etemad, O. Lozano, and D. Spano. ۲۰۱٦. Evaluating fire modelling systems in recent wildfires of the Golestan National Park, Iran. Forestry: An International Journal of Forest Research, **۸۹** (**۲**): ۱۳٦–۱٤۹.

Miller, C.; and A.A. Ager. ۲۰۱۳. A review of recent advances in risk analysis for wildfire management. International Journal of Wildland Fire, **۲۲**: ۱–۱٤.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]

Molina, J.R.; F. Rodriguez, y Silva, and M.A. Herrera. ۲۰۱۷. Economic vulnerability of fire-prone landscapes in protected natural areas: application in a Mediterranean Natural Park. European Journal of Forest Research, **۱۳٦ (٤)**: ٦۰۹-٦۲٤.

Oliveira, T.M.; A.M.G. Barros, A.A. Ager, and P.M. Fernandes. ۲۰۱٦. Assessing the effect of a fuel break network to reduce burnt area and wildfire risk transmission. International Journal of Wildland Fire, **۲۵**: ۶۱۹–۶۳۲.

Palaiologou, P.; A.A. Ager, M. Nielsen-Pincus, C. Evers, and K. Kalabokidis, ۲۰۱۸. Using transboundary wildfire exposure assessments to improve fire management programs: a case study in Greece. International Journal of Wildland Fire, **۲۷ (۸)**: ۵۰۱

Rothermel, R.C. ۱۹۷۲. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. General Technical Report INT ۱۱۵, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

Rothermel, R.C. ۱۹۸۳. How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires. National Wildlife Coordinating Group. Boise, ID.

Russell, S. ۲۰۰۵. Fuel Loading, Fuel Moisture Are Important Components of Prescribed Fire. Rangelands, ۲۷ (۵), ۲۰ pp.

Sağlam, B.; E. Bilgili, O. Küçük, and B.D. Durmaz. ۲۰۰۸. Fire behavior in Mediterranean shrub species (Maquis). African Journal of Biotechnology, ۷: ٤۱۲۲-٤۱۲۹.

Salis, M.; A.A. Ager, B. Arca, M.A. Finney, V. Bacciu, P. Duce, and D. Spano. ۲۰۱۳. Assessing exposure of human and ecological values to wildfire in Sardinia, Italy. International Journal of Wildland Fire, **۲۲**: ۵۴۹–۵۶۵.

Salis, M.; A.A. Ager, F. Alcasena, B. Arca, M. Finney, G. Pellizzaro, and D. Spano, ۲۰۱۵. Analyzing seasonal patterns of wildfire exposure factors in Sardinia, Italy. Environmental Monitoring and Assessment, **۱۸۷**:۴۱۷۵.

Scott, J.H.; M.P. Thompson, and J.W. Gilbertson-Day. ۲۰۱۵. Exploring how alternative mapping approaches influence fireshed assessment and human community exposure to wildfire. GeoJournal, ۱–۱۵.

Scott, J.H.; and R. Burgan. ۲۰۰۵. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's Surface Fire Spread Model. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-۱۵۳. (Fort Collins, CO)

Thompson, M.P.; D.E. Calkin, J.W. Gilbertson-Day, and A.A. Ager. ۲۰۱۱. Advancing effects analysis for integrated, large-scale wildfire risk assessment. Environmental Monitoring and Assessment, **۱۷۹**: ۲۱۷–۲۳۹.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.79]