بسم الله الرحمن الرحیم

دستورالعمل شناسایی

مناطق پرخطر آتش‌سوزی

در

جنگل‌ها و مراتع البرز مرکزی

نویسندگان:

سعیده اسکندری و مصطفی خوشنویس

اعضای هیات علمی مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور

۱۴۰۰

عنوان طرح منتج به این دستورالعمل فنی	شماره مصوب
مدل‌سازی و ارزیابی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های شاخه کوهستانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران (ایستگاه سیراچال)	2-09-09-007-970029

عنوان دستورالعمل: دستورالعمل شناسایی مناطق پرخطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع البرز مرکزی

نگارش:

سعیده اسکندری – استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

مصطفی خوشنویس – مربی پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

مدیر داخلی: فاطمه عباسپور

ویرایش علمی: هادی بیگی حیدرلو و حمیدرضا پورقاسمی

ویرایش ادبی: اصغر احمدی

تهیه شده در: مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور/ اداره ترویج و انتقال یافته‌های تحقیقاتی

نشانی: بزرگراه تهران-کرج، خروجی پیکانشهر، شهرک سرو آزاد، خیابان شهید گودرزی، بلوار باغ گیاه‌شناسی ملی ایران، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور. صندوق پستی: ۱۱۶-۱۳۱۸۵.

تلفن: ۵-۴۴۷۸۷۲۸۲-۰۲۱ **وب‌سایت:** www.rifr-ac.ir

شمارگان: الکترونیکی

نوبت و سال انتشار: اول – ۱۴۰۰

این دستورالعمل به شماره ۶۰۶۴۲ در تاریخ ۱۴۰۰/۰۹/۰۲ در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است.

ISBN:978-964-473-476-2

مخاطبان

محققان منابع طبیعی، مدیران جنگل و کارشناسان بخش اجرا در یگان حفاظت سازمان جنگلها، مراتع و آبخیزداری کشور

شما با مطالعه این دستورالعمل با موارد زیر آشنا می‌شوید

- معیارهای مؤثر در خطر وقوع آتش‌سوزی در البرز مرکزی
- آماده‌سازی نقشه‌های معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در قابلیت خطر آتش‌سوزی
- اهمیت و ارزش‌گذاری معیارهای مؤثر در قابلیت خطر آتش‌سوزی
- تهیه نقشه قابلیت خطر وقوع آتش‌سوزی در البرز مرکزی و شناسایی مناطق پرخطر و بحرانی

فهرست مندرجات

خلاصه ۱

مقدمه ۲

معرفی ایستگاه تحقیقاتی سیراچال ۳

روش شناسایی مناطق پرخطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع البرز مرکزی ۷

۱- کشف و تعیین معیارهای مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی ۸

۲- جمع‌آوری داده‌ها و آماده‌سازی نقشه‌های معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در خطر آتش‌سوزی ۹

۳- تعیین وزن معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در خطر وقوع آتش‌سوزی (وزن برون‌لایه‌ای) ۱۵.

۴- اختصاص وزن به هریک از معیارها و زیرمعیارها (وزن درون‌لایه‌ای) ۱۹

۵- ادغام نقشه‌های زیرمعیارها و معیارها و تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی ۲۲

۶- اعتبارسنجی نقشه خطر آتش‌سوزی ۲۴

نتیجه‌گیری ۲۵

توصیه‌های تکمیلی ۲۹

توصیه‌های تحقیقاتی ۲۹

توصیه‌های اجرایی ۲۹

منابع مورد استفاده ۳۰

خلاصه

آتش‌سوزی یکی از عوامل مهم تخریب اکوسیستم‌های طبیعی در جهان و ایران است. در سال‌های اخیر، جنگل‌ها و مراتع البرز مرکزی به‌دلیل دخالت‌های انسانی در طبیعت و تغییرات اقلیمی در معرض خطر آتش‌سوزی‌های وسیعی قرار گرفته‌اند. ایستگاه تحقیقاتی سیراچال ازجمله مناطقی است که طی سال‌های اخیر دچار آتش‌سوزی‌های مهیبی شده است. با توجه به اهمیت این ایستگاه و وجود گونه‌های جنگلی و مرتعی ارزشمند در آن، دستورالعمل پیش‌رو راهنمایی برای شناسایی مناطق پرخطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع البرز مرکزی (ایستگاه تحقیقاتی سیراچال) است تا با استفاده از آن بتوان آتش‌سوزی‌های مکانی آینده را پیش‌بینی کرد.

معیارهای مؤثر در شناسایی مناطق پرخطر وقوع آتش‌سوزی در این منطقه، شامل چهار معیار اصلی فیزیوگرافی، زیست‌شناختی، اقلیمی و انسان‌ساخت و زیرمعیارهای مربوط به آنها هستند. در این دستورالعمل، ابتدا نحوه تهیه نقشه‌های معیارها و زیرمعیارها، با استفاده از مدل رقومی ارتفاع منطقه، تصاویر ماهواره‌ای، نمونه‌برداری زمینی و اطلاعات موجود ارائه می‌شود. همچنین، نحوه تهیه نقشه آتش‌سوزی‌های گذشته با استفاده از اطلاعات موجود و نمونه‌برداری زمینی بررسی می‌شود. سپس نحوه تعیین اهمیت معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی ارائه می‌گردد. روش تهیه نقشه قابلیت وقوع آتش‌سوزی نیز با استفاده از ترکیب خطی وزنی نقشه‌های همه زیرمعیارهای مؤثر در منطقه بررسی می‌شود. همچنین در این دستورالعمل، نحوه اعتبارسنجی نقشه قابلیت وقوع آتش‌سوزی با استفاده از آتش‌سوزی‌های گذشته بررسی می‌شود. براساس تحلیل‌های انجام‌شده در این دستورالعمل، از بین معیارهای اصلی، معیار انسان‌ساخت بیشترین اهمیت (تأثیر) را در وقوع آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع سیراچال داشته است. همچنین از بین زیرمعیارها، زیرمعیارهای شیب، فاصله از رودخانه، نوع و تراکم پوشش گیاهی و فاصله از جاده دارای بیشترین اهمیت (تأثیر) در وقوع آتش‌سوزی بوده‌اند. براساس تحلیل‌های انجام‌شده از نقشه قابلیت آتش‌سوزی، ۵۸/۵۵ درصد منطقه قابلیت خطر زیاد و بسیار زیاد برای وقوع حریق دارد. نتایج ارزیابی دقت نقشه قابلیت وقوع آتش‌سوزی با استفاده از آتش‌سوزی‌های گذشته نیز نشان می‌دهد که نقشه

قابلیت وقوع آتش‌سوزی دارای دقت ۸۹ درصد می‌باشد. این نقشه ابزار ارزشمندی برای پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های مکانی آینده در جنگل‌ها و مراتع منطقه است که برای محققان منابع طبیعی، مدیران جنگل و کارشناسان بخش اجرا در یگان حفاظت سازمان جنگلها، مراتع و آبخیزداری کشور بسیار مفید خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: وقوع آتش‌سوزی، ایستگاه تحقیقاتی سیراچال، منابع طبیعی، قابلیت‌سنجی، سامانه اطلاعات مکانی

مقدمه

آتش‌سوزی چه به‌صورت طبیعی و چه به‌صورت انسان‌ساخت، یکی از عوامل اصلی نابودی جنگل‌ها و مراتع محسوب می‌شود، به‌طوری‌که سالانه هزاران اصله از درختان، درختچه‌ها و گونه‌های بومی ارزشمند را از بین می‌برد (Roman et al., 2013). آتش‌سوزی پیامدهای منفی و زیان‌باری از نظر محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی دارد. آتش‌سوزی در جنگل‌ها، علاوه بر خسارت‌های محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی، در آلودگی آب و هوای منطقه و انتشار گازهای گلخانه‌ای، از بین بردن پوشش جنگل، فون و فلور جنگل، چشم‌انداز جنگل‌ها و کاهش ارزش زیبایی‌شناسی جنگل‌ها نیز تأثیرگذار است (Jolly et al., 2015). آتش‌سوزی سبب کاهش تنوع زیستی، تغییر ارزش کیفی گونه‌ها و استقرار گونه‌های نامرغوب و غیرتجاری که فاقد ارزش اقتصادی هستند، می‌شود (Podur et al., 2002; Eskandari et al., 2020).

یکی از راهکارهای پیش‌بینی آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع، تعیین مهمترین عوامل زیست‌شناختی، توپوگرافی، اقلیمی و انسان‌ساخت تأثیرگذار در قابلیت‌سنجی وقوع آتش‌سوزی در مناطق طبیعی است. تهیه نقشه قابلیت وقوع آتش‌سوزی با استفاده از همه عوامل تأثیرگذار، اهمیت به‌سزایی در پیش‌بینی مکانی آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع دارد (اسکندری و همکاران، ۱۳۹۲).

عوامل مختلفی در وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع تأثیرگذارند که به‌طورکلی به دو دسته عوامل طبیعی و عوامل انسان‌ساخت تقسیم می‌شوند. عوامل طبیعی شامل فاکتورهای اقلیمی، پوشش گیاهی و توپوگرافی هستند. مهمترین عوامل انسان‌ساخت نیز شامل فاصله از زمین‌های کشاورزی، تراکم جمعیت، فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از جاده‌های جنگلی و فاصله از مناطق تفرجگاهی است (اسکندری و همکاران، ۱۳۹۲).

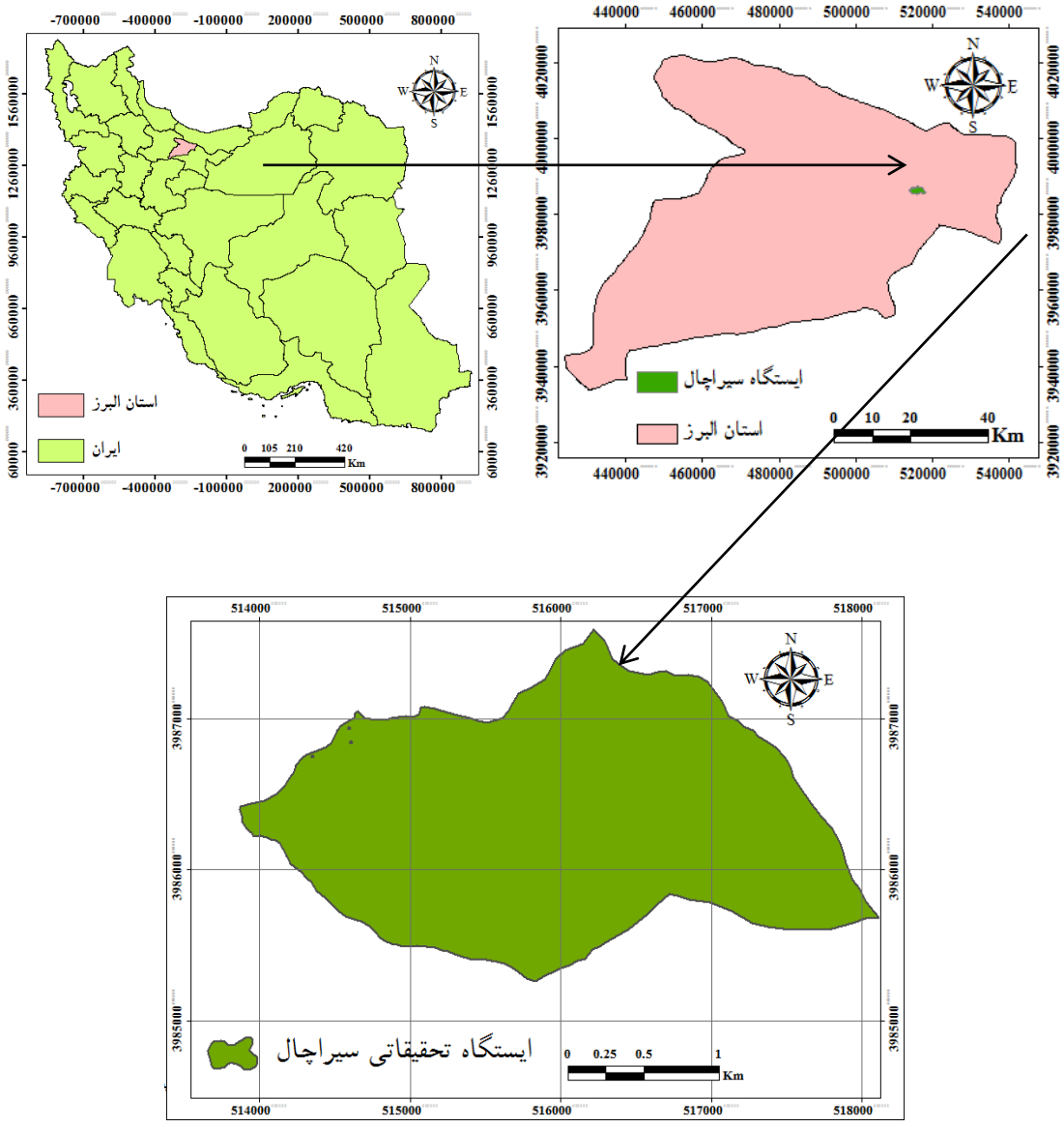
با توجه به وقوع آتش‌سوزی‌های مهیب در جنگل‌ها و مراتع سیراچال در سال‌های اخیر که حدود ۴۵ هکتار از منابع طبیعی این ذخیرگاه ارزشمند را سوزانده است، در این دستورالعمل، نحوه شناسایی مناطق پرخطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع منطقه با توجه به عوامل تأثیرگذار در وقوع آتش‌سوزی بررسی می‌شود. این دستورالعمل به مدیران جنگل و کارشناسان بخش اجرا در یگان حفاظت سازمان جنگلها، مراتع و آبخیزداری کشور کمک می‌کند که قبل از وقوع آتش‌سوزی، با انجام مراقبت‌های ویژه در مناطق بحرانی (پرخطر)، از وقوع آتش‌سوزی‌های احتمالی در منطقه سیراچال در آینده جلوگیری کنند.

معرفی ایستگاه تحقیقاتی سیراچال

ایستگاه تحقیقاتی سیراچال با وسعت حدود ۵۴۸/۴۲ هکتار در ۴۰ کیلومتری شمال کرج و در مسیر جاده کرج- چالوس در موقعیت جغرافیایی '۵۹ °۳۵ تا '۳ °۳۶ عرض شمالی و '۸ °۵۱ تا '۱۳ °۵۱ طول شرقی قرار گرفته است. منطقه مورد بررسی که ذخیرگاه ارس در البرز مرکزی محسوب می‌شود (شکل‌های ۱ و ۲)، دارای جنگل‌های طبیعی، جنگل‌کاری و مراتع است که تحت نظارت مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور اداره می‌شود. منطقه مورد بررسی کوهستانی است و کمترین و بیشترین ارتفاع آن از سطح دریای آزاد به‌ترتیب ۱۸۱۷ و ۲۸۸۴ متر است. جهت عمومی منطقه، شمالی- جنوبی است و جهت‌های جنوبی شیب تندتری از جهت‌های شمالی دارد. بیشتر منطقه شیب ۴۰ تا ۷۰ درصد دارد. رژیم بارندگی منطقه تحت تأثیر مراکز کم فشار و باران‌زای دریای مدیترانه به سمت شرق ایران و تاحدی نیز تحت تأثیر جبهه‌های حاصل از دریای مازندران قرار دارد. براساس آمار ایستگاه آسارا که نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مورد

بررسی است، متوسط بارندگی سالانه حدود ۵۳۱ میلی‌متر و طول فصل خشک سه تا پنج ماه است (اکبرزاده، ۱۳۷۳). اقلیم منطقه براساس روش گوسن، استپی سرد و براساس طبقه‌بندی آمبرژه، نیمه‌مرطوب است (اکبرزاده، ۱۳۷۳). گونه‌های درختی شامل ارس (*Juniperus excelsa*)، سرو نقره‌ای (*Cupressus Arizonica*)، دغدغک (*Colutea arborescens*)، داغداغان (*Celtis caucasica*)، بید (*Salix alba*)، عرعر (*Ailanthus altissima*)، اقاقیا (*Robinia Pseudoacacia*) و گونه‌های درختچه‌ای شامل شیرخشت (*Cotoneaster nummularioides*)، زرشک (*Berberis vulgaris*)، شن (*Lonicera nummulariifolia*)، بادام (*Amygdalus communis*)، آلبالو وحشی (*Cerasus microcarpa*) و زالزالک (*Crataegus pontica*) است. همچنین گونه‌های مرتعی متنوعی ازجمله گون (*Astragalus* sp.)، آویشن (*Thymus* sp.)، گل ماهور (*Verbascum* sp.)، کلاه میرحسن (*Acantholimon* sp.)، فرفیون (*Ephorbia* sp.)، مریم نخودی (*Teucrum* sp.)، میخک وحشی (*Diantus* sp.)، اگروپایرون (*Agropyron* sp.)، بومادران (*Achillea* sp.)، قدومه (*Alyssum* sp.)، علف چای (*Hypericum scabrum*)، کاروان‌کش (*Atraphaxis* sp.)، گل بی‌برگ (*Helichrysum* sp.)، ناز (*Sedum* sp.) و برموس (*Beromus* sp.) در ایستگاه تحقیقاتی سیراچال پراکنش دارند. بخشی از جنگل‌های طبیعی و مراتع ایستگاه سیراچال به وسعت حدود ۴۵/۱۶ هکتار در اثر آتش‌سوزی در سال ۱۳۹۳ از بین رفته است که خسارت‌های بسیار زیادی از نظر محیط‌زیستی بر جای گذاشته است (شکل ۳). ازجمله این خسارت‌ها، آسیب به شاخ و برگ درختان، خشک کردن ریشه و در نهایت خشک شدن درختان است (شکل ۳).

شکل ۱- نمایی از جنگل‌ها و مراتع ایستگاه تحقیقاتی سیراچال



شکل ۲- موقعیت منطقه مورد بررسی (ایستگاه سیراچال) در ایران و استان البرز

شکل ۳- خسارت آتش‌سوزی به درختان منطقه سیراچال (بهار ۱۳۹۶)

روش شناسایی مناطق پرخطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع البرز مرکزی

دستورالعمل شناسایی مناطق پرخطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع ایستگاه تحقیقاتی سیراچال به‌شرح زیر است:

۱- کشف و تعیین معیارهای مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی

۲- جمع‌آوری داده‌ها و آماده‌سازی نقشه‌های معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی

۳- تعیین وزن معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی (وزن برون‌لایه‌ای)

۴- اختصاص وزن به هریک از معیارها و زیرمعیارها (وزن درون‌لایه‌ای)

۵- ادغام نقشه‌های زیرمعیارها، معیارها و تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی

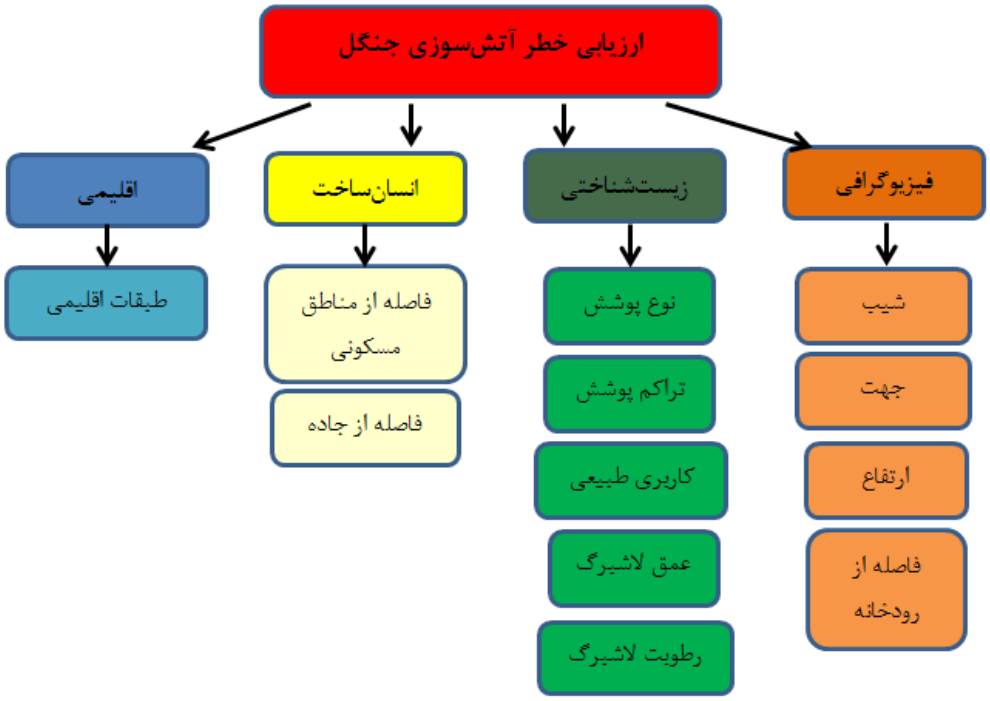
۶- اعتبارسنجی نقشه خطر آتش‌سوزی

۱- کشف و تعیین معیارهای مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی

در اولین مرحله، لازم است معیارها و زیرمعیارهای مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی تعیین و شناسایی شوند. در این دستورالعمل، معیارهای اصلی شامل چهار معیار اصلی فیزیوگرافی، زیست‌شناختی، اقلیمی و انسان‌ساخت و زیرمعیارهای آنها هستند (شکل ۴) که با توجه به شرایط منطقه مورد بررسی و مطالعات پیشین تعیین شده‌اند. معیار اصلی فیزیوگرافی شامل چهار زیرمعیار شیب، جهت، ارتفاع و فاصله از رودخانه است. از آنجایی که منطقه سیراچال کاملاً کوهستانی است و آبراهه‌های آن فراوان هستند، این زیرمعیارها به‌عنوان زیرمعیارهای فیزیوگرافی انتخاب و شناسایی شدند. معیار زیست‌شناختی نیز شامل پنج زیرمعیار نوع پوشش گیاهی، تراکم پوشش گیاهی، کاربری اراضی طبیعی، عمق لاشبرگ و رطوبت لاشبرگ است. علاوه بر نوع و تراکم پوشش گیاهی که زیرمعیارهای مؤثری در وقوع آتش‌سوزی هستند، عمق و رطوبت لاشبرگ نیز از زیرمعیارهای اصلی وقوع آتش‌سوزی در منطقه مورد بررسی هستند. معیار انسان‌ساخت در منطقه مورد پژوهش شامل دو زیرمعیار فاصله از مناطق مسکونی و فاصله از جاده‌ها هستند. اگرچه فاصله از زمین‌های کشاورزی، فعالیت‌های دامداری و مناطق تفرجی نیز زیرمعیارهای مؤثری در وقوع آتش‌سوزی هستند، اما از آنجایی که منطقه مورد بررسی تحت نظارت مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور اداره می‌شود، در آن فعالیت‌های دامداری و کشاورزی رواج ندارد. به‌علاوه اینکه منطقه مورد بررسی حفاظتی است و در آن فعالیت‌های تفرجی ممنوع است. ازاین‌رو، این سه زیرمعیار از زیرمعیارهای انسان‌ساخت حذف شدند. در مورد زیرمعیارهای اقلیمی، از آنجایی که در اطراف منطقه مورد مطالعه تنها یک ایستگاه هواشناسی (آسارا) وجود دارد و برای تهیه نقشه‌های زیرمعیارهای اقلیمی (مانند درجه‌حرارت و بارندگی) با روش‌های درون‌یابی حداقل نیاز به سه ایستگاه هواشناسی است، تنها یک زیرمعیار طبقات اقلیمی که اطلاعات آن در دسترس بود، در نظر گرفته شد.

۲- جمع‌آوری داده‌ها و آماده‌سازی نقشه‌های معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در خطر آتش‌سوزی

داده‌های مورد نیاز شامل چهار معیار اصلی و زیرمعیارهای آنها (شکل ۴) و همچنین داده‌های آتش‌سوزی‌های گذشته هستند.



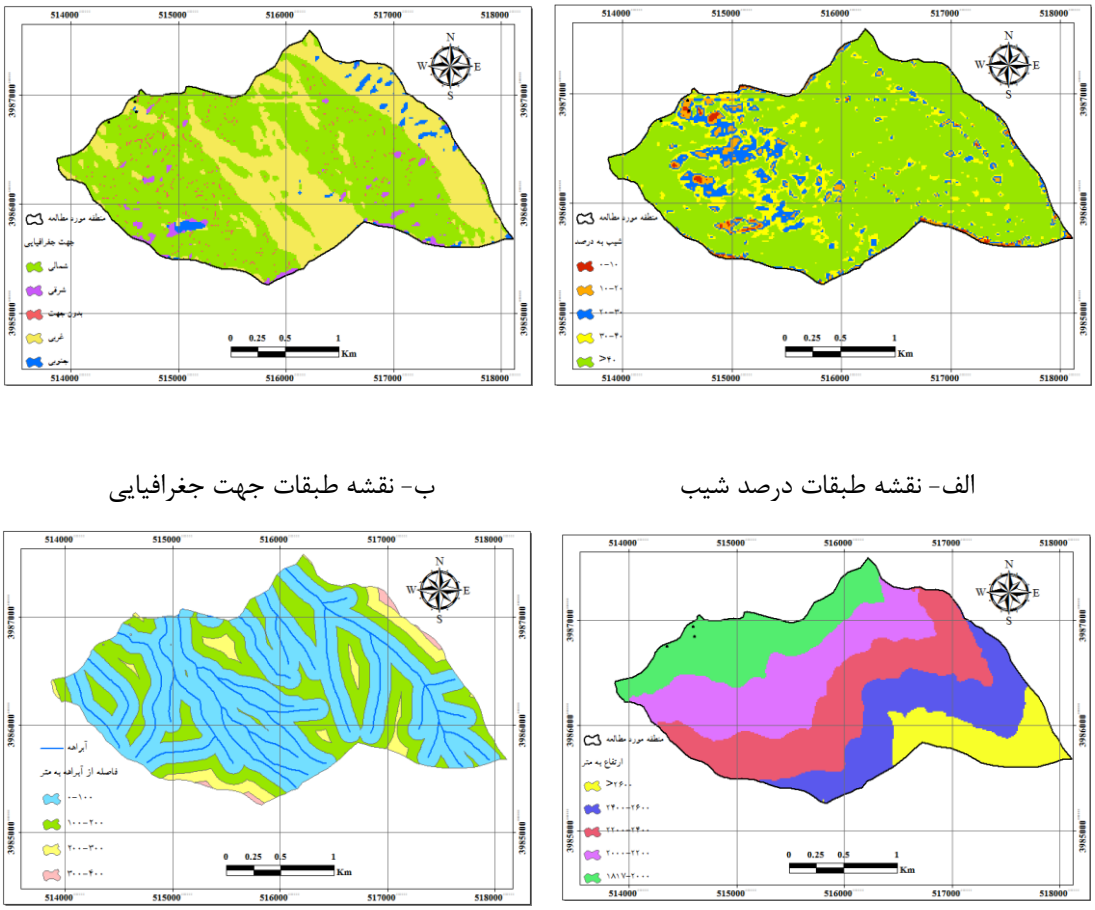
شکل ۴- معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در خطر وقوع آتش‌سوزی در منطقه سیراچال

تهیه نقشه‌های معیارها و زیرمعیارها طبق دستورالعمل زیر انجام می‌شود.

تهیه نقشه‌های زیرمعیارهای فیزیوگرافی:

- نقشه‌های شیب، جهت و ارتفاع: تهیه از مدل رقومی ارتفاع سنجنده ALOS PALSAR با اندازه پیکسل ۱۲/۵×۱۲/۵ متر (Alaska Satellite Facility: ASF, 2019) (شکل ۵- الف، ب، ج).

- نقشه فاصله از رودخانه: رقومی‌سازی از تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2، تهیه نقشه فاصله از رودخانه در سیستم اطلاعات مکانی (شکل ۵-د).



الف- نقشه طبقات درصد شیب

ب- نقشه طبقات جهت جغرافیایی

ج- نقشه طبقات ارتفاع از سطح دریا

د- نقشه طبقات فاصله از رودخانه

شکل ۵- نقشه‌های زیرمعیارهای فیزیوگرافی

تهیه نقشه‌های زیرمعیارهای زیست‌شناختی:

- نقشه نوع (تیپ) پوشش گیاهی: زمین‌مرجع کردن و رقومی‌سازی نقشه کاغذی تیپ پوشش گیاهی (اکبرزاده، ۱۳۷۳)؛

- نقشه تراکم پوشش گیاهی: تهیه از شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با استفاده از رابطه ۱:

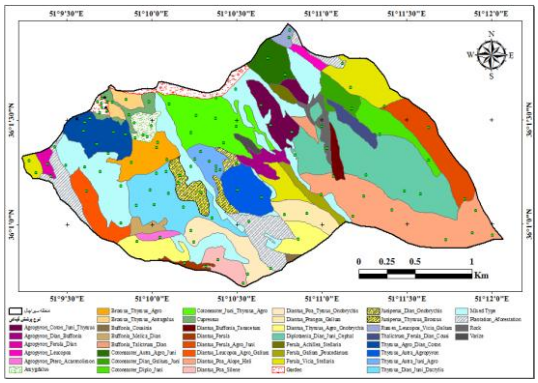
$$NDVI = NIR - Red / NIR + Red \quad [1]$$

NDVI: شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال‌شده

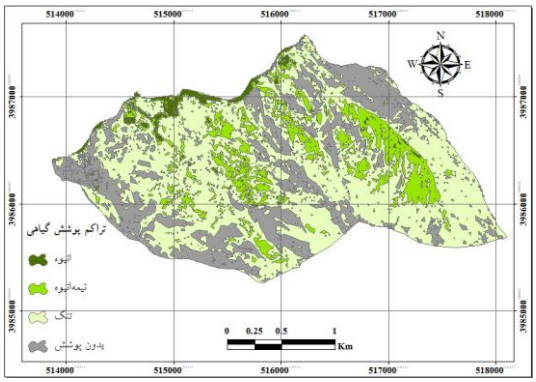
NIR: ارزش طیفی در باند مادون قرمز نزدیک

Red: ارزش طیفی در باند قرمز

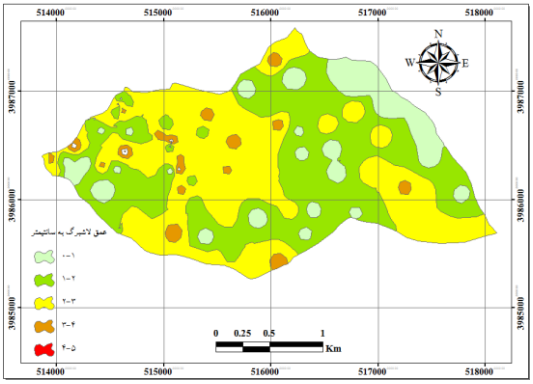
- نقشه کاربری‌ها و پوشش‌های اراضی طبیعی: ترکیب باندی تصویر Sentinel-2 مربوط به تاریخ ۲۵ سپتامبر ۲۰۱۸ (باندهای دارای تفکیک مکانی ۱۰ متر)، انتخاب نمونه‌های تعلیمی پیکسل‌پایه در کاربری‌های مورد انتظار منطقه (جنگل، مرتع، صخره و زمین بایر) و طبقه‌بندی تصویر با روش ماشین بردار پشتیبان (SVM)؛
- نقشه عمق لاشبرگ: نمونه‌برداری زمینی در فصل آتش‌سوزی، اندازه‌گیری عمق لاشبرگ با خط‌کش فلزی تا دقت سانتیمتر، تهیه نقشه در سیستم اطلاعات مکانی؛
- نقشه رطوبت لاشبرگ: نمونه‌برداری زمینی در فصل آتش‌سوزی، انتقال به آون و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی برای تعیین درصد رطوبت نمونه‌های لاشبرگ، تهیه نقشه در سیستم اطلاعات مکانی (شکل ۶).



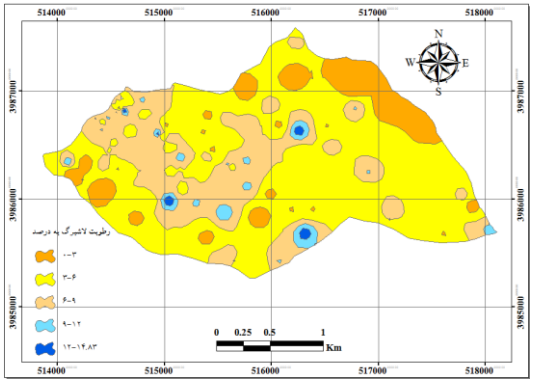
الف- نقشه نوع (تیپ) پوشش گیاهی



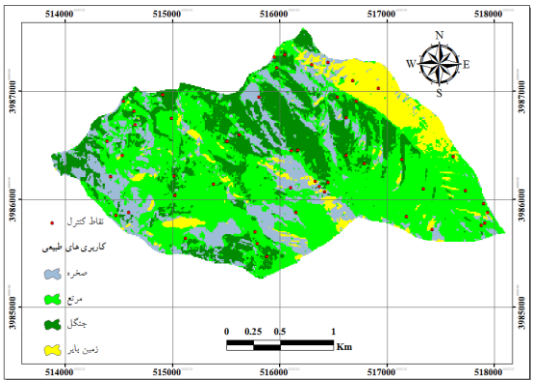
ب- نقشه تراکم پوشش گیاهی



ج- نقشه عمق لاشبرگ



د- نقشه رطوبت لاشبرگ

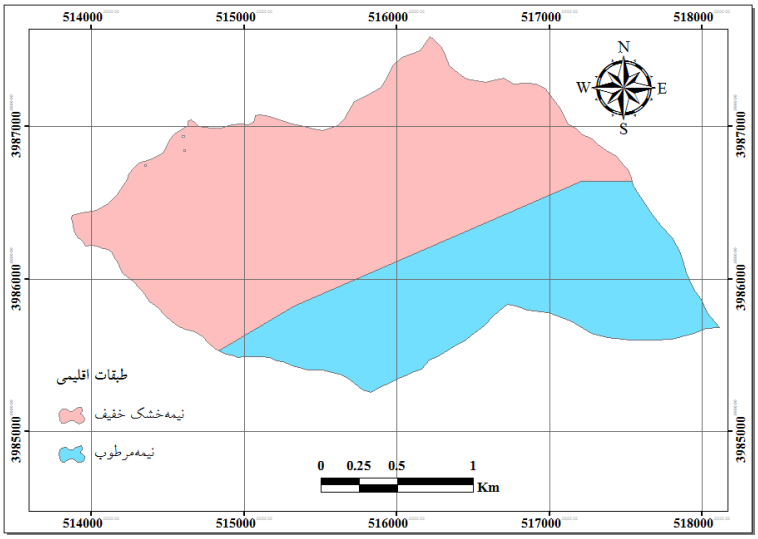


و- نقشه کاربری اراضی طبیعی

شکل ۶- نقشه‌های زیرمعیارهای زیست‌شناختی

تهیه نقشه معیار اقلیمی:

- نقشه طبقات اقلیمی: تهیه از سازمان هواشناسی کشور مربوطه به دوره آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ (شکل ۷).

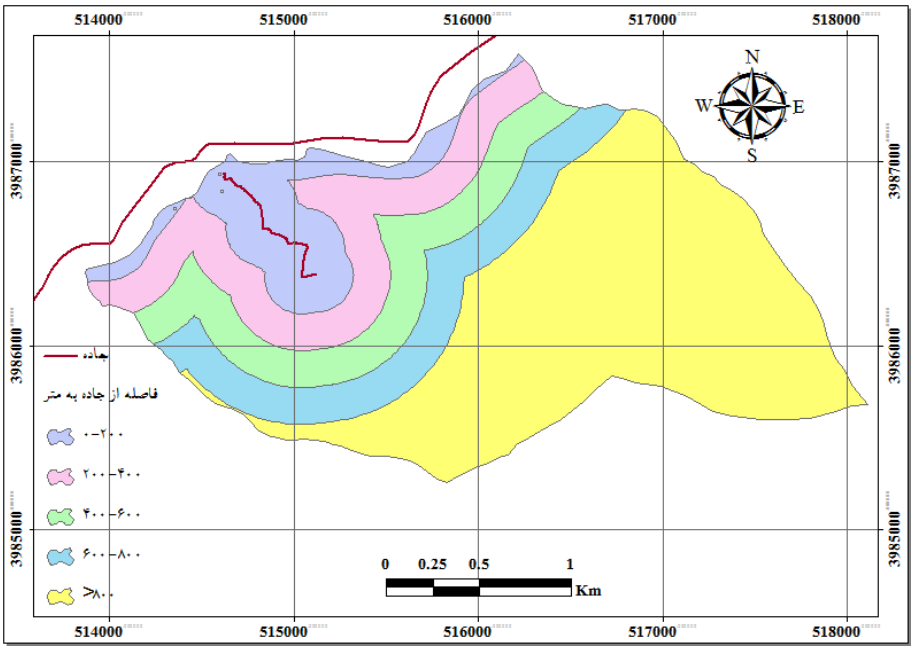


شکل ۷- نقشه طبقات اقلیمی

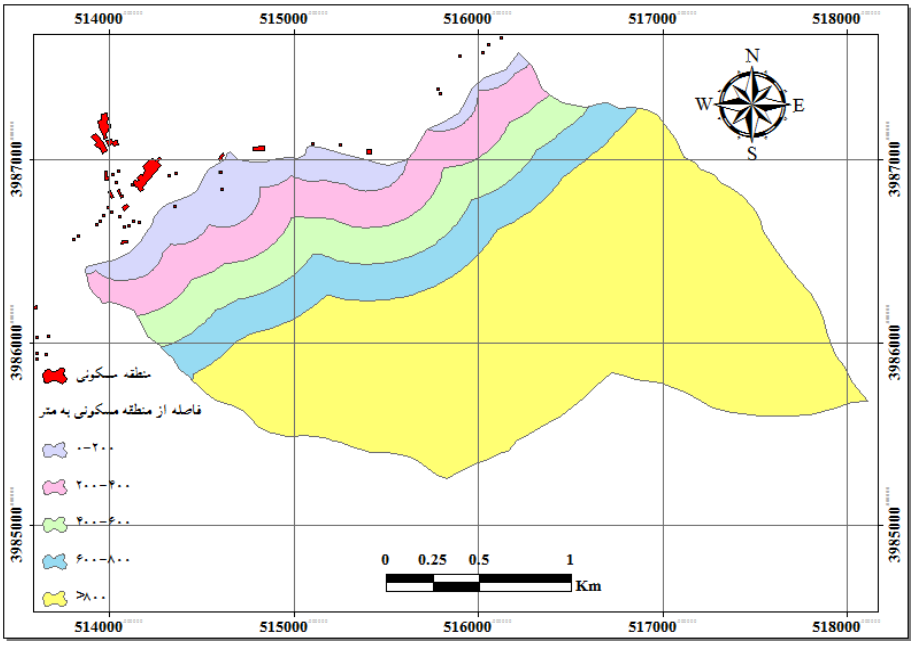
تهیه نقشه‌های زیرمعیارهای انسان‌ساخت*:

- نقشه فاصله از جاده‌ها: رقومی‌سازی جاده‌های آسفالته و خاکی از تصویر Sentinel-2، تهیه نقشه فاصله از جاده در سیستم اطلاعات مکانی (شکل ۸-الف)؛
- نقشه فاصله از مناطق مسکونی: رقومی‌سازی مناطق مسکونی از تصویر Sentinel-2، تهیه نقشه فاصله از مناطق مسکونی در سیستم اطلاعات مکانی (شکل ۸-ب).

* نکته: اگرچه زمین‌های کشاورزی عامل مهمی در وقوع آتش‌سوزی‌های انسان‌ساز هستند، اما به‌دلیل اشتغال ساکنان منطقه به شغل‌های آزاد (غیر از کشاورزی و دامداری) و عدم وجود زمین کشاورزی در منطقه سیراچال، این عامل از زیرمعیارهای انسان‌ساخت حذف شد. همچنین با توجه به اینکه منطقه تحت حفاظت است، تفرج عموم در ایستگاه تحقیقاتی سیراچال وجود ندارد، ازاین‌رو این عامل نیز از زیرمعیارهای انسان‌ساخت حذف شد.



الف- نقشه فاصله از جاده

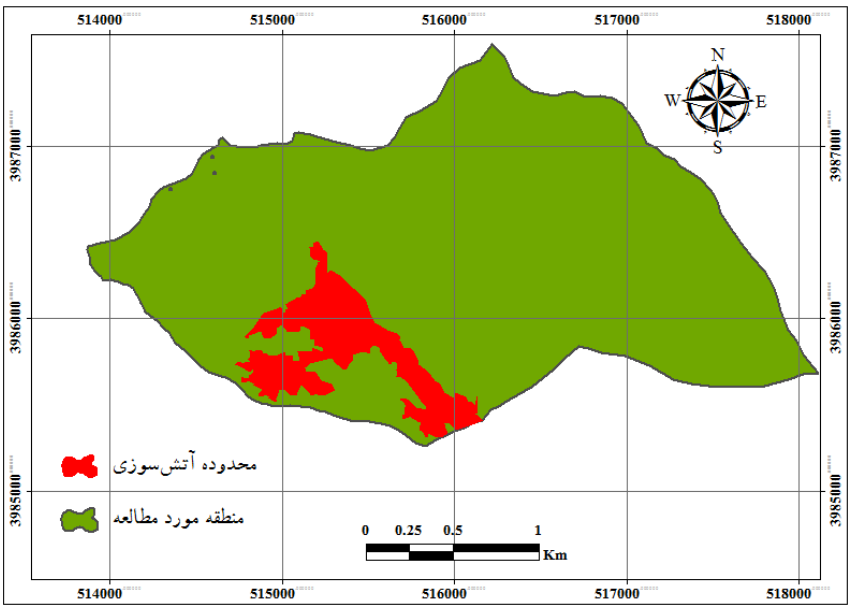


ب- نقشه فاصله از مناطق مسکونی

شکل ۸- نقشه‌های زیرمعیارهای انسان‌ساخت

تهیه نقشه آتش‌سوزی‌های گذشته:

- نمونه‌برداری زمینی با سامانه موقعیت‌یاب جهانی مدل GPS Map Garmin 64S، رقومی‌سازی در سیستم اطلاعات مکانی (شکل ۹).



شکل ۹- نقشه آتش‌سوزی‌های گذشته در منطقه سیراچال

۳- تعیین وزن معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در خطر وقوع آتش‌سوزی (وزن برون‌لایه‌ای)

- استفاده از روش مقایسه زوجی فازی: ترکیبی از روش مقایسه زوجی (Saaty, 1980) و منطق فازی است (Zadeh, 1965)؛
- توزیع پرسشنامه بین کارشناسان آتش‌سوزی در عرصه‌های منابع طبیعی، انجام مصاحبه حضوری و تکمیل ماتریس‌های مقایسات زوجی توسط ۳۰ کارشناس (پرسشنامه شامل یک جدول برای بیان مقیاس زبانی اهمیت معیارها و زیرمعیارها نسبت به هم (جدول ۱) و چهار ماتریس مقایسه زوجی (سه ماتریس مربوط به مقایسه زیرمعیارهای هر معیار و یک ماتریس مربوط به مقایسه معیارهای اصلی) (جدول‌های ۲ تا ۵) است)؛

- به‌دست آوردن پرسشنامه میانگین (میانگین هندسی ماتریس‌های مقایسه زوجی تکمیل‌شده توسط کارشناسان)؛
- تجزیه‌وتحلیل پرسشنامه میانگین با روش آنالیز توسعه‌ای فازی مثلثی چانگ (Chang, 1996)؛
- محاسبه جمع هر ردیف از ماتریس‌های مقایسه زوجی (S_k)؛
- نرمالیزه کردن جمع هر ردیف با عملگرهای فازی؛
- محاسبه درجه بزرگی (V) (درجه ارجحیت یا درجه امکان‌پذیری) معیارها نسبت به هم؛
- محاسبه بردار وزن معیارها در ماتریس مقایسه زوجی (وزن اولیه)؛
- نرمالیزه کردن وزن‌های به‌دست‌آمده؛
- ارزیابی صحت وزن معیارها و زیرمعیارها با آزمون پایندگی (محاسبه نسبت سازگاری (CR) ماتریس‌های مقایسه زوجی): محاسبه بزرگترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه زوجی (λ_{max})، محاسبه شاخص سازگاری (Consistency Index = CI)، محاسبه نسبت سازگاری (CR) ماتریس‌های مقایسه زوجی (Consistency Ratio= CR)، بررسی CR کمتر از ۰/۱ برای هر ماتریس مقایسه زوجی (Chang، ۱۹۹۶).

جدول ۱- مقیاس‌های زبانی برای بیان درجه اهمیت در روش مقایسه زوجی فازی (Chang, 1996)

مقیاس زبانی برای درجه اهمیت	اعداد فازی مثلثی (l, m, u)
ارجحیت با اهمیت دقیقاً برابر	(1 ،1 ،1)
ارجحیت با اهمیت تقریباً برابر	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$
ارجحیت با اهمیت کم	$(1, \frac{3}{2}, 2)$
ارجحیت با اهمیت قوی‌تر	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$
ارجحیت با اهمیت خیلی قوی‌تر	$(2, \frac{5}{2}, 3)$
ارجحیت با اهمیت کامل و مطلق	$(\frac{5}{2}, 3, \frac{7}{2})$

جدول ۲- مقایسهٔ دوتایی بین معیارهای اصلی در تهیه نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی

مقایسه دوتایی بین معیارهای اصلی	عوامل انسان‌ساخت	عوامل زیست‌شناختی	عوامل فیزیوگرافی	عوامل اقلیمی
عوامل انسان‌ساخت	۱			
عوامل زیست‌شناختی	*	۱		
عوامل فیزیوگرافی	*	*	۱	
عوامل اقلیمی	*	*	*	۱

جدول ۳- مقایسهٔ دوتایی بین زیرمعیارهای فیزیوگرافی در تهیه نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی

مقایسه دوتایی بین زیرمعیارهای فیزیوگرافی	شیب	جهت	ارتفاع از سطح دریا	فاصله از رودخانه
شیب	۱			
جهت	*	۱		
ارتفاع از سطح دریا	*	*	۱	
فاصله از رودخانه	*	*	*	۱

جدول ۴- مقایسهٔ دوتایی بین زیرمعیارهای زیست‌شناختی در تهیه نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی

مقایسه دوتایی بین زیرمعیارهای زیست‌شناختی	نوع پوشش گیاهی	تراکم پوشش گیاهی	عمق لاشبرگ	رطوبت لاشبرگ	کاربری اراضی طبیعی
نوع پوشش گیاهی	۱				
تراکم پوشش گیاهی	*	۱			
عمق لاشبرگ	*	*	۱		
رطوبت لاشبرگ	*	*	*	۱	
کاربری اراضی طبیعی	*	*	*	*	۱

جدول ۵- مقایسهٔ دوتایی بین زیرمعیارهای انسان‌ساخت در تهیه نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی

مقایسه دوتایی بین زیرمعیارهای انسان‌ساخت	فاصله از مناطق مسکونی	فاصله از جاده
فاصله از مناطق مسکونی	۱	
فاصله از جاده	*	۱

نتایج تحلیلی محاسبه نسبت سازگاری ماتریس‌های مقایسه زوجی زیرمعیارها و معیارهای اصلی براساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در جدول ۶ آورده شده است. نتایج نشان‌دهنده این است که نسبت سازگاری (CR) ماتریس‌های مقایسه زوجی از ۰/۰۳۱ تا ۰/۰۹ متغیر است که مقادیر کمتر از ۰/۱ را به خود اختصاص داده‌اند و نشان‌دهنده سازگاری وزن معیارها و زیرمعیارهاست (Saaty, 1980). همچنین وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در جدول ۷ آورده شده است. بر اساس این جدول، وزن معیار انسان‌ساخت (۰/۴۶) بیشتر از سایر معیارهاست.

جدول ۶- نسبت سازگاری ماتریس‌های مقایسه زوجی زیرمعیارها و معیارهای اصلی براساس تحلیل سلسله مراتبی فازی

معیار	ابعاد ماتریس	λ_{max}	$CI= (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$	RI^*	$CR= CI/RI$
معیارهای اصلی	۴×۴	۴/۲۵	۰/۰۸۳	۰/۹	۰/۰۹
معیارهای فیزیوگرافی	۴×۴	۴/۰۸	۰/۰۲۸	۰/۹	۰/۰۳۱
معیارهای زیست‌شناختی	۵×۵	۵/۱۴	۰/۰۳۶	۱/۱۲	۰/۰۳۲
معیارهای انسان‌ساخت	۲×۲	۲/۰۵	۰/۰۵	۰/۷	۰/۰۷

λ_{max} : بزرگترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه زوجی

CI: شاخص سازگاری (Consistency Index = CI)

RI: شاخص تصادفی (Random Index)

CR: نسبت سازگاری (Consistency Ratio= CR)

n: بعد ماتریس

*: مقادیر RI برای ماتریس‌های n بعدی از منبع قدسی‌پور (۱۳۹۰) استخراج شده است.

جدول ۷- وزن معیارها و زیرمعیارها بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

معیار	وزن	زیرمعیار	وزن	معیار	وزن	زیرمعیار	وزن
فیزیوگرافی	۰/۱۹	شیب	۰/۴۶	زیست‌شناختی	۰/۲۴	نوع پوشش گیاهی	۰/۴۰
		جهت	۰/۱۹			تراکم پوشش گیاهی	۰/۱۸
		ارتفاع	۰/۱۱			عمق لاشبرگ	۰/۱۸
		فاصله از رودخانه	۰/۲۴			رطوبت لاشبرگ	۰/۱۴
انسان‌ساخت	۰/۴۶	فاصله از جاده	۰/۶۸			کاربری اراضی طبیعی	۰/۱۰
		فاصله از مناطق مسکونی	۰/۳۲	اقلیمی	۰/۱۱	طبقات اقلیمی	۰/۱۱

۴- اختصاص وزن به هریک از معیارها و زیرمعیارها (وزن درون‌لایه‌ای)

- تبدیل فرمت نقشه‌های زیرمعیارها و معیارها در محیط GIS به فرمت رستری و طبقه‌بندی به پنج طبقه براساس دستور Reclassify در GIS؛
- استانداردسازی طبقات نقشه‌های هر یک از زیرمعیارها: برای هر طبقه خاص، بر اساس تأثیر، اهمیت و حساسیتی* که در آتش‌سوزی دارد، یک مقدار استاندارد از ۰ تا ۱۰ در نظر گرفته می‌شود؛ به‌طوری‌که برای پرخطرترین طبقه هر زیرمعیار از نظر تأثیر در آتش‌سوزی، ارزش عددی ۱۰ و برای کم‌خطرترین طبقه، ارزش عددی صفر در نظر گرفته می‌شود (جدول ۸) (Eskandari and Miesel, 2017). یادآوری می‌شود که برای هر زیرمعیار، حساسیت هر طبقه به آتش‌سوزی (پرخطر، خطر متوسط و کم‌خطر) براساس مطالعات پیشین ارزیابی خطر آتش‌سوزی (Jaiswal *et al.*, 2002؛ Dong *et al.*, 2005؛ Vadrevu *et al.*, 2010؛ Eskandari, 2017) بررسی و تعیین شده است؛
- در نظر گرفتن مقدار استاندارد (ارزش عددی)، به‌عنوان وزن درون‌لایه‌ای برای هر لایه (زیرمعیار).

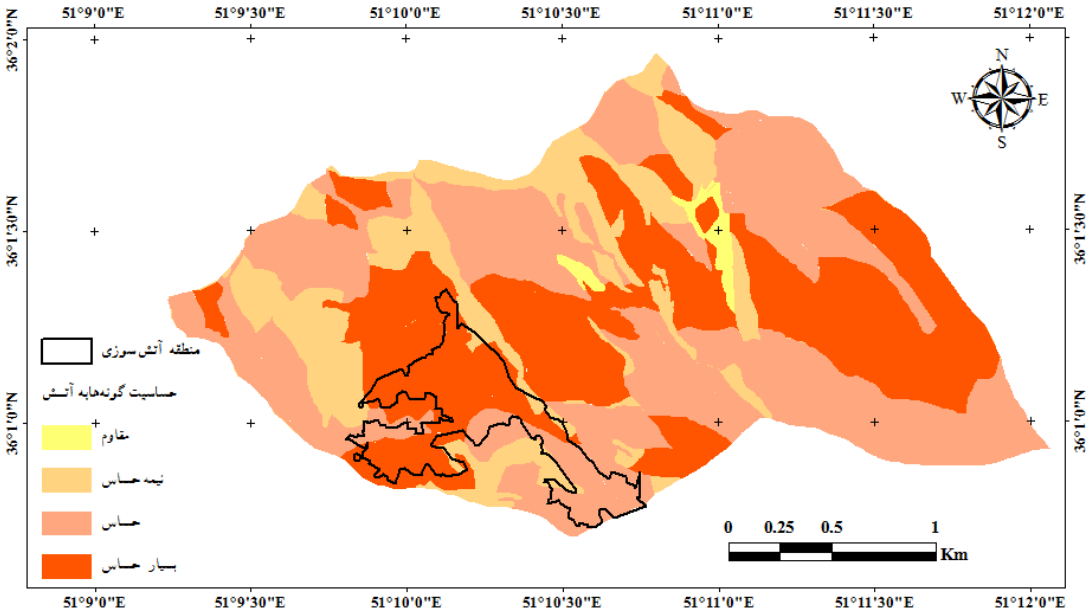
جدول ۸- طبقات حساسیت به آتش و وزن درون‌لایه‌ای زیرمعیارهای مؤثر در خطر وقوع آتش‌سوزی

زیرمعیار	طبقات	حساسیت به آتش	ارزش عددی (وزن درون‌لایه‌ای)	زیرمعیار	طبقات	حساسیت به آتش	ارزش عددی (وزن درون‌لایه‌ای)
شیب (درصد)	> ۴۰	بسیار زیاد	۱۰	نوع پوشش گیاهی*	بسیار حساس	بسیار زیاد	۱۰
	۳۰-۴۰	زیاد	۸		حساس	زیاد	۸
	۲۰-۳۰	متوسط	۶		نیمه‌حساس	متوسط	۶
	۱۰-۲۰	کم	۲		صخره	بسیار کم	۰
	۰-۱۰	بسیار کم	۰		واریزه‌ها	بسیار کم	۰
جهت	جنوبی	بسیار زیاد	۱۰	تراکم پوشش گیاهی	۰/۳-۰/۶۶	بسیار زیاد	۱۰
	غربی	زیاد	۸		۰/۲-۰/۳	زیاد	۸
	بدون جهت	متوسط	۶		۰/۱-۰/۲	متوسط	۶
	شرقی	کم	۲		۰-۰/۱	کم	۴
	شمالی	بسیار کم	۰		-۰/۰۸-۰	بسیار کم	۲
ارتفاع (متر)	-۲۰۰۰ ۱۸۱۷	بسیار زیاد	۱۰	عمق لاشبرگ (سانتی‌متر)	۴-۴/۴۶	بسیار زیاد	۱۰
	-۲۲۰۰ ۲۰۰۰	زیاد	۸		۳-۴	زیاد	۸
	-۲۴۰۰ ۲۲۰۰	متوسط	۶		۲-۳	متوسط	۶
	۲۴۰۰-۲۶۰۰	کم	۲		۱-۲	کم	۴
	۲۶۰۰-۲۸۸۴	بسیار کم	۰		۰-۱	بسیار کم	۲
فاصله از آبراهه (متر)	بیشتر از ۴۰۰	بسیار زیاد	۱۰	رطوبت لاشبرگ (درصد)	۰-۳	بسیار زیاد	۱۰
	۳۰۰-۴۰۰	زیاد	۸		۳-۶	زیاد	۸
	۲۰۰-۳۰۰	متوسط	۶		۶-۹	متوسط	۶
	۱۰۰-۲۰۰	کم	۲		۹-۱۲	کم	۴
	۰-۱۰۰	بسیار کم	۰		۱۲-۱۴/۸۳	بسیار کم	۲
فاصله از جاده‌ها (متر)	۰-۲۰۰	بسیار زیاد	۱۰	کاربری اراضی طبیعی	جنگل	بسیار زیاد	۱۰
	۲۰۰-۴۰۰	زیاد	۸		مرتع	زیاد	۸
	۴۰۰-۶۰۰	متوسط	۶		زمین بایر	کم	۲
	۶۰۰-۸۰۰	کم	۴		صخره	کم	۲
	بیشتر از ۸۰۰	بسیار کم	۲	طبقات اقلیمی	نیمه‌خشک خفیف	زیاد	۸
فاصله از مناطق مسکونی (متر)	۰-۲۰۰	بسیار زیاد	۱۰				
	۲۰۰-۴۰۰	زیاد	۸				
	۴۰۰-۶۰۰	متوسط	۶		نیمه‌مرطوب	کم	۴
	۶۰۰-۸۰۰	کم	۴				
	> ۸۰۰	بسیار کم	۲				

*: طبقات حساسیت نوع پوشش گیاهی به آتش‌سوزی به‌دلیل حجم زیاد در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹- حساسیت انواع پوشش گیاهی منطقه سیراچال به آتش‌سوزی (خوشنویس، ۱۳۹۸)

پوشش گیاهی بسیار حساس	پوشش گیاهی حساس	پوشش گیاهی نیمه‌حساس
Agropyron_Cotoneaster_Juniperus_Thymus	*Buffonia_Melica_Diantus*	*Amygdalus*
Agropyron_Diantus_Buffonia	*Buffonia_Talictrum_Diantus*	*Buffonia_Cousinia*
Agropyron_Ferula_Diantus	*Cotoneaster_Astragalus_ Agropyron _Juniperus*	*Diantus_Buffonia_Tanacetum*
Agropyron_Leucopoa	*Cotoneaster_Diantus_Galium_Juniperus*	*Diantus_Ferula*
Agropyron_Pterocephalus_Acantnolimon	*Cotoneaster_Diplotaenia_Juniperus*	*Ferula_Achillea_Stellaria*
Bromus_Thymus_ Agropyron	*Cotoneaster_Juniperus_Thymus_ Agropyron Cupressus*	*Rumex_Leucopoa_Vicia_Galium*
Bromus_Thymus_Astragalus	*Diantus_Leucopoa_ Agropyron _Galium*	Garden
Diantus_Ferula_ Agropyron _Juniperus	*Diantus_Poa_Alopecurus_Helichrysum*	Mixed type
Diantus_Thymus_ Agropyron _Onobrychis	*Diantus_Poa_Silene*	
Diplotaenia_Diantus_Juniperus_Cephalaria	*Diantus_Poa_Tymus_Onobrychis*	
Juniperus_Diantus_Onobrychis	*Diantus_Prangos_Galium*	
Juniperus_Thymus_Bromus	*Ferula_Galium_Peucedanum*	
Thymus_Astragalus_Agropyron	*Ferula_Vicia_Stellaria*	
Thymus_ Astragalus _Juniperus_ Agropyron	*Thalictrum_Ferula_Diantus_Cousinia*	
Thymus_Diantus_Juniperus_Dactylis	*Thymus_ Agropyron _Diantus_Cotoneaster*	
	Plantation_Aforestation	

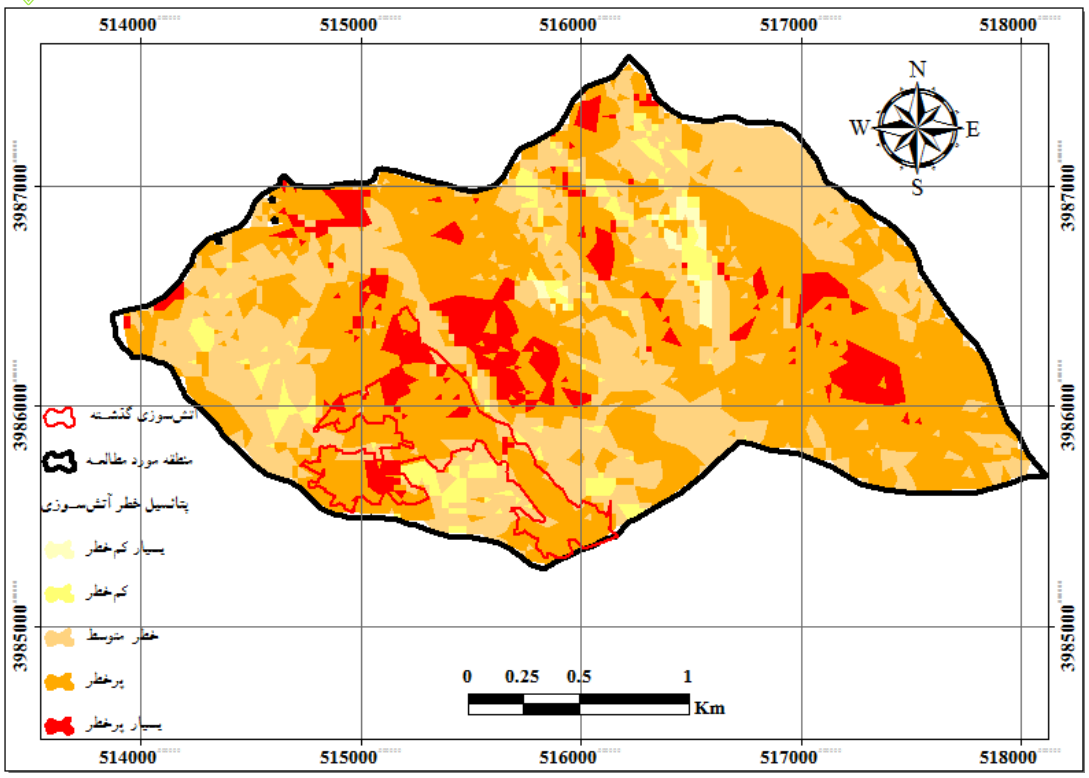


شکل ۱۰- نقشه حساسیت گونه‌های جنگلی و مرتعی سیراچال به آتش‌سوزی در مقایسه با آتش‌سوزی منطقه

۵- ادغام نقشه‌های زیرمعیارها و معیارها و تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی

نقشه‌های زیرمعیارهای هر معیار اصلی، براساس وزن آنها (به‌دست‌آمده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی) و براساس دستور Raster calculator در محیط سیستم اطلاعات مکانی (GIS) ترکیب خطی وزنی می‌شوند تا نقشه خطر آتش‌سوزی منطقه به دست آید. این نقشه بر اساس دستور Natural Break (Jenks) (Jenks 1967; Osaragi 2008; Lin 2013; Pappas 2013) و براساس ارزش‌های پیکسلی در پنج طبقه خطر آتش‌سوزی (بسیار پرخطر، پرخطر، خطر متوسط، کم‌خطر و بسیار کم‌خطر) طبقه‌بندی می‌شود (شکل ۱۱). روش طبقه‌بندی Natural Break (Jenks) به‌دنبال به حداقل رساندن انحراف میانگین از میانگین طبقه است، در حالی که انحراف از میانگین سایر گروه‌ها را به حداکثر می‌رساند. این روش واریانس درون طبقات را کاهش می‌دهد و واریانس بین طبقات را به حداکثر می‌رساند (Jenks, 1967).

مساحت طبقات خطر آتش‌سوزی در منطقه سیراچال بر اساس نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی در جدول ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی در منطقه سیراچال و موقعیت آتش‌سوزی گذشته در آن

جدول ۱۰- مساحت طبقات خطر آتش‌سوزی در نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی

طبقه خطر	مساحت طبقه خطر (هکتار)	درصد طبقه خطر
بسیار پرخطر	۴۷/۷۴	۸/۷۰
پرخطر	۲۷۳/۴۲	۴۹/۸۵
خطر متوسط	۲۰۱/۵۱	۳۶/۷۵
کم‌خطر	۲۱/۷۶	۳/۹۷
بسیار کم‌خطر	۳/۹۹	۰/۷۳
کل	۵۴۸/۴۲	۱۰۰

۶- اعتبارسنجی نقشه خطر آتش سوزی

در پایان، نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی با استفاده از آتش‌سوزی‌های گذشته اعتبارسنجی شده و دقت آن در شناسایی مناطق حساس به آتش‌سوزی ارزیابی گردید. بدین‌منظور مساحت طبقات بسیار پرخطر و پرخطر در آتش‌سوزی‌های گذشته محاسبه شده تا میزان هم‌پوشانی مناطق بسیار پرخطر و پرخطر در نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی با آتش‌سوزی‌های گذشته مشخص شود (Eskandari, 2017 ؛Vadrevu et al., 2010 ؛Dong et al., 2005 ؛Jaiswal et al., 2002). همچنین با در دست داشتن اطلاعات واقعیت زمینی (آتش‌سوزی‌های گذشته)، شاخص صحت کلی برای ارزیابی صحت نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$[2] \quad OA = \frac{\sum_{i=1}^{j} n_{ii}}{n} * 100$$

که در آن OA صحت کلی، n_{ii} تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی‌شده و n تعداد کل پیکسل‌های مورد بررسی است (Congalton and Green, 2008).

نتایج اعتبارسنجی کمی نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی منطقه سیراچال براساس آتش‌سوزی‌های گذشته و شاخص صحت کلی (OA) در جدول‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است.

جدول ۱۱- اعتبارسنجی نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی براساس آتش‌سوزی‌های گذشته

طبقه خطر	مساحت طبقه خطر در آتش‌سوزی گذشته (هکتار)	درصد تقریبی طبقه خطر در آتش‌سوزی گذشته
بسیار پرخطر (Very high risk)	۶/۶۱	۱۴/۸
پرخطر (High risk)	۳۳/۷۷	۷۴/۸۸
خطر متوسط (Medium risk)	۴/۶۹	۱۰/۴
کم‌خطر (Low risk)	۰/۰۸	۰/۰۰۱
بسیار کم‌خطر (Very low risk)	۰	۰
کل (Total)	۴۵/۱۶	۱۰۰

جدول ۱۲- اعتبارسنجی کمی نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی براساس شاخص صحت کلی (OA)

تعداد کل پیکسل‌ها	تعداد کل پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده	صحت کلی (٪)
۴۵۱۶	۴۰۳۸	۸۹/۴

نتیجه گیری

در این تحلیل، دستورالعملی برای شناسایی مناطق پرخطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع البرز مرکزی تهیه شده است که برای ارائه به مدیران جنگل، محققان منابع طبیعی و همکاران بخش اجرا در یگان حفاظت سازمان جنگلها، مراتع و آبخیزداری کشور سودمند خواهد بود.

براساس تحلیل‌های انجام‌شده در این دستورالعمل، اهمیت (تأثیر) معیارهای انسان‌ساخت، زیست‌شناختی، فیزیوگرافی و اقلیمی در قابلیت‌سنجی خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع منطقه، به‌ترتیب ۰/۴۶، ۰/۲۴، ۰/۱۹ و ۰/۱۱ بود. بنابراین معیارهای انسان‌ساخت دارای بیشترین تأثیر در خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع سیراچال بوده‌اند. نتایج مطالعات Vadrevu و همکاران (۲۰۱۰) و اسکندری و همکاران (۱۳۹۲) نیز نشان داد که شاخص‌های اقتصادی-اجتماعی (انسانی) بیشترین تأثیر را در خطر وقوع آتش‌سوزی بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی داشته‌اند. نتایج بسیاری از مطالعات دیگر نیز نقش عوامل انسان‌ساخت را در خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل‌ها تأیید کرده‌اند (Stolzenburg, 2001؛ Martinez et al., 2009؛ Eskandari and Chuvieco, 2015).

در مورد زیرمعیارهای فیزیوگرافی، زیرمعیار شیب با وزن ۰/۴۶ بیشترین اهمیت را داشته و پس از آن به‌ترتیب زیرمعیارهای فاصله از رودخانه (۰/۲۴)، جهت (۰/۱۹) و ارتفاع (۰/۱۱) بیشترین اهمیت را در خطر وقوع آتش‌سوزی داشته‌اند. نتایج تحلیل‌های دیگر نیز ثابت کرده است که شیب مهمترین عامل توپوگرافی مؤثر در وقوع آتش‌سوزی بوده است (Jaiswal et al., 2002؛ Vadrevu et al., 2010).

در مورد زیرمعیارهای زیست‌شناختی نیز زیرمعیار نوع پوشش گیاهی با وزن ۰/۴۰ بیشترین اهمیت را در خطر وقوع آتش‌سوزی داشته است، سپس تراکم پوشش گیاهی (۰/۱۸)، عمق

لاشبرگ (۰/۱۸) و رطوبت لاشبرگ (۰/۱۴) بیشترین وزن را نشان داده، بنابراین مهمترین عوامل زیست‌شناختی مؤثر در خطر وقوع آتش‌سوزی‌های منطقه هستند. درحالی‌که زیرمعیار کاربری اراضی طبیعی با وزن ۰/۱۰ کمترین اهمیت را در خطر وقوع آتش‌سوزی داشته است. نتایج بسیاری از تحقیقات دیگر نیز نشان داده که پوشش گیاهی از نظر نوع گونه و تراکم (Jaiswal et al., 2002؛ Rollins et al., 2004؛ Vadrevu et al., 2010؛ Sowmya and Somashekar, 2010؛ Satir et al., 2016) و میزان رطوبت سوخت (Jurdao and Chuvieco, 2012؛ Chuvieco et al., 2014؛ Valdez et al., 2017) در خطر وقوع آتش‌سوزی تأثیر مهمی داشته است.

نظر به اهمیت نوع گونه (تیپ پوشش گیاهی) به آتش‌سوزی، تحلیل حساسیت انواع پوشش گیاهی منطقه به آتش‌سوزی ضروریست. یادآوری می‌شود که در مورد حساسیت گونه‌های درختی پهن‌برگ ایران به آتش‌سوزی تحقیقات محدودی انجام شده است (امین‌املشی و همکاران، ۱۳۹۵؛ نصیری، ۱۳۹۱)؛ اما تاکنون تحقیقی در مورد اینکه مقاومت گونه‌های سوزنی‌برگ بومی ایران به آتش‌سوزی چقدر است، انجام نشده است. البته تحقیقاتی در مورد مقاومت گونه‌های مرتعی به آتش‌سوزی اخیراً آغاز شده است. طبق مطالعه‌ای که خوشنویس (۱۳۹۸) در مورد بررسی مقاومت گونه‌های مختلف چوبی (درختی، درختچه‌ای و بوته‌ای) بومی ایستگاه تحقیقاتی سیراچال در مقابل آتش‌سوزی انجام داد، حساسیت برخی گونه‌های مختلف منطقه به آتش‌سوزی تعیین شده است. جدول ۹ نشان می‌دهد که جنس‌های *Agropyron*، *Juniperus*، *Thymus*، *Diantus* و *Bromus* بسیار حساس به آتش‌سوزی هستند. براساس جدول ۹، تیپ‌هایی که گونه‌های غالب آنها را گونه‌های مذکور تشکیل می‌دهند، بسیار حساس به آتش‌سوزی می‌باشند؛ بدین معنی که بر اثر آتش‌سوزی، به‌سرعت سوخته‌اند و مقاومتی نشان نداده‌اند. برخی از مهمترین این تیپ‌ها شامل موارد زیر است.

Agropyron_Cotoneaster_Juniperus_Thymus
Agropyron_Diantus_Buffonia
Agropyron_Ferula_Diantus
Agropyron_Leucopoa
Agropyron_Pterocephalus_Acantnolimon

همچنین بسیاری از تیپ‌های دیگر در منطقه سیراچال وجود دارند که حساس به آتش‌سوزی هستند و مقاومت آنها به آتش‌سوزی از گروه قبلی بیشتر است. برخی از آنها شامل موارد زیر است (جدول ۹).

Buffonia_Melica_Diantus
Buffonia_Talictrum_Diantus
Cotoneaster_Astragalus_Agropyron_Juniperus
Cotoneaster_Diantus_Galium_Juniperus
Cotoneaster_Diplotaenia_Juniperus

بدین معنی که گونه‌های جنس‌هایی مانند *Buffonia*، *Cotoneaster* و *Ferula* حساس به آتش‌سوزی هستند.

در مقابل، گونه‌های جنس‌های *Amygdalus*، *Achillea* و *Rumex* مقاومت بیشتری به آتش‌سوزی داشته و جزء گونه‌های نیمه‌حساس طبقه‌بندی شده‌اند.

یادآوری می‌شود که هرچه گونه در برابر سوختن، از خود مقاومت بیشتری نشان دهد و بعد از آتش‌سوزی زنده‌مانی بهتری داشته باشد، مقاوم‌تر به آتش‌سوزی است (خوشنویس، ۱۳۹۸). براساس مطالعات گذشته، معمولاً حساسیت گونه‌ها به آتش‌سوزی به عواملی مانند نوع گونه، ضخامت برگ، قطر ساقه، رطوبت گیاه، انبوهی و بسیاری از عوامل دیگر وابسته است (امین‌املشی و همکاران، ۱۳۹۵). البته بسیاری از عوامل محیطی دیگر مانند درجه‌حرارت محیط، رطوبت نسبی هوا، شدت باد، شیب دامنه، جهت دامنه و بسیاری از موارد دیگر در سرعت سوختن یا مقاومت گونه‌ها در برابر آتش‌سوزی تأثیر مهمی دارند که این مهم نیاز به بررسی‌های پیچیده و تحلیل‌های بیشتر در تحقیقات آینده دارد.

در مورد زیرمعیارهای انسان‌ساخت، زیرمعیار فاصله از جاده با وزن ۰/۶۸ بیشترین اهمیت را در خطر وقوع آتش‌سوزی منطقه نشان داده است، در حالی‌که فاصله از مناطق مسکونی با وزن ۰/۳۲ اهمیت کمتری را در وقوع آتش‌سوزی داشته است. ازاین‌رو عامل جاده مهمترین فاکتور انسان‌ساخت در وقوع آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع منطقه محسوب می‌شود. البته اهمیت جاده‌ها در وقوع آتش‌سوزی جنگل توسط محققان دیگری نیز اثبات شده است (Jaiswal et al., 2002؛

Stolle et al., 2003؛ Lozano et al., 2008؛ Zumbrunnen et al., 2011؛ Eskandari, 2017؛ Valdez et al., 2017).

نتایج کلی این تحلیل نشان می‌دهد که زیرمعیارهای شیب و فاصله از رودخانه، نوع و تراکم پوشش گیاهی و فاصله از جاده دارای بیشترین اهمیت (وزن) در وقوع آتش‌سوزی بوده و از این‌رو بیشترین تأثیر را در خطر وقوع آتش‌سوزی منطقه دارند.

نتایج تحلیل نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی نشان می‌دهد که از مجموع مساحت حدود ۵۴۸/۴۲ هکتاری ایستگاه تحقیقاتی سیراچال، ۸/۷ درصد از منطقه قابلیت خطر بسیار زیاد و ۴۹/۸۵ درصد آن قابلیت خطر زیاد برای آتش‌سوزی دارد. همچنین ۳۶/۷۵ درصد از منطقه دارای قابلیت خطر متوسط، ۳/۹۷ درصد از منطقه دارای قابلیت کم (کم‌خطر) و ۰/۷۳ درصد از منطقه دارای قابلیت بسیار کم (بسیار کم‌خطر) برای آتش‌سوزی می‌باشد. بنابراین بیشتر منطقه (۵۸/۵۵ درصد) قابلیت زیاد (پرخطر و بسیار پرخطر) برای آتش‌سوزی دارد.

نتایج اعتبارسنجی نقشه قابلیت خطر وقوع آتش‌سوزی با استفاده از آتش‌سوزی‌های گذشته نشان می‌دهد که مناطقی که قبلاً در منطقه دچار آتش‌سوزی شده‌اند، با مناطق پرخطر و بسیار پرخطر از نظر آتش‌سوزی تا حد بسیار زیادی هم‌خوانی دارند و ۸۹/۶ درصد از مساحت مناطق سوخته در محدوده دو طبقه مذکور قرار گرفته‌اند. در حالی که تنها ۱۰/۴ درصد از مناطق سوخته در محدوده خطر متوسط برای آتش‌سوزی قرار دارند و مساحت محدوده‌های کم‌خطر و بسیار کم‌خطر در مناطق آتش‌سوزی‌های گذشته بسیار محدودتر است (۰/۰۰۱ و صفر درصد). ارزیابی صحت نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی با استفاده از نقشه آتش‌سوزی گذشته (واقعیت زمینی) و بر اساس شاخص صحت کلی نشان می‌دهد که صحت کلی نقشه مذکور، ۸۹ درصد است. این نتیجه نشان‌دهنده اعتبار زیاد روش مورد استفاده در ارزیابی خطر وقوع آتش‌سوزی و صحت زیاد نقشه قابلیت خطر آتش‌سوزی تهیه‌شده بر اساس آن است. نتایج مطالعات دیگر نیز اعتبار مطلوب روش تحلیل سلسله مراتبی فازی را در ارزیابی خطر آتش‌سوزی در مناطق جنگلی نشان داده است (Vadrevu et al., 2010؛ Eskandari, 2017؛ زرع‌کار و همکاران، ۱۳۹۲). با توجه به اعتبار مطلوب نقشه قابلیت تهیه‌شده در این دستورالعمل، پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های آینده در جنگل‌ها

و مراتع منطقه سیراچال با استفاده از نقشه قابلیت تهیه‌شده امکان‌پذیر خواهد بود. بنابراین، این نقشه ابزار ارزشمندی برای پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های مکانی آینده در جنگل‌ها و مراتع منطقه است که برای محققان منابع طبیعی، مدیران جنگل و کارشناسان بخش اجرا در یگان حفاظت سازمان جنگلها، مراتع و آبخیزداری کشور کمک‌کننده خواهد بود.

توصیه های تکمیلی

براساس این دستورالعمل، توصیه‌های تحقیقاتی و اجرایی زیر پیشنهاد می‌شود.

توصیه های تحقیقاتی

- طراحی مدل‌های پیش‌بینی‌کننده مکانی آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع کشور و تهیه نقشه‌های قابلیت خطر وقوع آتش‌سوزی با تفکیک مناسب در سطح ملی؛
- تهیه مدل سوخت در جنگل‌ها و مراتع در سطح ملی؛
- تهیه پایگاه داده‌های متشکل از آتش‌سوزی‌های به‌وقوع‌پیوسته در جنگل‌ها و مراتع ایران برای اعتبارسنجی بهتر مدل‌های خطر وقوع آتش‌سوزی.

توصیه های اجرایی

- احداث برج‌های دیده‌بانی، ایستگاه‌های اطفای حریق و آتش‌بر در نزدیکی مناطق پرخطر آتش‌سوزی؛
- ایجاد واحدهای مدیریت بحران با امکانات بالگردهای مجهز به امکانات اطفای حریق؛
- افزایش نیروهای حفاظتی برای نظارت در جنگل‌ها و مراتع به‌ویژه در فصل آتش‌سوزی؛
- منع آتش‌افروزی در فصول گرم سال توسط جنگل‌نشینان، کشاورزان و گردشگران؛
- برگزاری کلاس‌های آموزشی در مورد افزایش آگاهی در زمینه آتش‌سوزی و خطرات و پیامدهای آن در جنگل‌ها و مراتع برای عموم و به‌ویژه جنگل‌نشینان و افراد محلی؛
- مشارکت افراد محلی در مدیریت آتش‌سوزی جنگل، شناسایی مناطق پرخطر آتش‌سوزی و راهکارهای کنترل و اطفای حریق.

منابع مورد استفاده

- اسکندری، س.، اولادی، ج.، جلیلوند، ح.، سراجیان، م.ر.، ۱۳۹۲. مدل‌سازی و پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های بخش سه نکا-ظالمرود با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی. فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۱(۲): ۲۰۳-۲۱۷.

- اکبرزاده، م.، ۱۳۷۳. تهیه نقشه پوشش گیاهی منطقه سیراچال به روش فلورستیک و فیزیونومیک. انتشارات مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، تهران، ۷۱ ص.

- امین‌املشی، م.، جعفری، م.، قدس‌خواه، م.، صالحی، م. و علیدوست، م.، ۱۳۹۵. بررسی مقدماتی درختان مقاوم به آتش در استان گیلان (مطالعه موردی جنگل نقله‌بر، حوضه ۱۸ رشته‌رود). فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۴(۳): ۴۶۳-۴۷۳.

- بیرانوند، ع.، بابایی کفاکی، س. و کیادلیری، ه.، ۱۳۹۰. بررسی تأثیر عوامل اکولوژیک بر توسعه آتش‌سوزی در اکوسیستم‌های جنگلی (مطالعه موردی: کاکارضا-لرستان). مجله تحقیقات منابع طبیعی تجدیدشونده، ۲(۲): ۱-۱۳.

- خوشنویس، م.، ۱۳۹۸. بررسی مقاومت گونه‌های مختلف چوبی (درختی، درختچه‌ای و بوته‌ای) بومی ایستگاه سیراچال در مقابل آتش‌سوزی. انتشارات مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، ۵۰ ص.

- زرع‌کار، ا.، کاظمی زمانی، ب.، قربانی، س.، عاشق‌معلا، م.، جعفری، ح.، ۱۳۹۲. تهیه نقشه پراکندگی فضایی خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: سه حوضه در استان گیلان). فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۱(۲): ۲۱۸-۲۳۰.

- قدسی‌پور، س.ح.، ۱۳۹۰. فرایند تحلیل سلسله مراتبی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۲۲۴ ص.

- نصیری، م.، ۱۳۹۱. بررسی مقاومت در برابر آتش‌سوزی چوب گونه‌های مختلف درختی جنگل‌های شمال (مطالعه موردی در حریم جاده‌های جنگلی). فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۰(۳): ۵۰۵-۵۱۳.

- Alaska Satellite Facility (ASF), 2019. https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/
- Chang, D.Y., 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. European Journal of Operational Research, 95: 649-655.
- Chuvieco, E., I. Aguado, S. Jurdao, M.L. Pettinari, M. Yebra, J. Salas, S. Hantson, J. de la Riva, P. Ibarra, M. Rodrigues, M. Echeverria, D. Azqueta, M.V. Roman, A. Bastarrika, S. Martinez, C. Recondo, E. Zapico & F.J. Martinez-Vega, 2014. Integrating geospatial information into fire risk assessment. International Journal of Wildland Fire, 23(5): 606-619.
- Congalton, R.G. & K. Green, 2008. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices (Second Edition). CRC Press, Boca Raton, 184 p.
- Dong, X.U., D. Li-min, Sh. Guo-fan, T. Lei & W. Hui, 2005. Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe Forestry Bureau, Jilin, China. Journal of Forestry Research, 16(3): 169-174.
- Eskandari S., Pourghasemi H.R. & J.R. Miesel, 2020. The temporal and spatial relationships between climatic parameters and fire occurrence in northeastern Iran. Ecological Indicators, 118: 106720.
- Eskandari, S. & E. Chuvieco, 2015. Fire danger assessment in Iran based on geospatial information. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 42: 57-64.
- Eskandari, S. & J.R. Miesel, 2017. Comparison of the fuzzy AHP method, the spatial correlation method, and the Dong model to predict the fire high-risk areas in Hyrcanian forests of Iran. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8: 1-17.
- Eskandari, S., 2017. A new approach for forest fire risk modeling using fuzzy AHP and GIS in Hyrcanian forests of Iran. Arabian Journal of Geosciences, 10 (8): 1-13.
- Jaiswal, R.K., S. Mukherjee, D.K. Raju & R. Saxena, 2002. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 4: 1-10.
- Jenks, G.F. 1967. The data model concept in statistical mapping. Int. Yrbook. Carto. 7: 186-190.
- Jolly, W.M., Cochrane, M.A., Freeborn, P.H., Holden, Z.A., Brown, T.J., Williamson, G.J. & D.M.J.S. Bowman, 2015. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. Nature Communication, 6(7537): 1-11.
- Jurdao, S., E. Chuvieco & J.M. Arevalillo, **2012.** Modelling fire ignition probability from satellite estimates of live fuel moisture content. Fire Ecology, 8(1): 77-97.

- Lin, Y. 2013. A comparison study on natural and head/tail breaks involving digital elevation models. Bachelor thesis, Hogskolian I Gavle Universty, Departmnt of Indestrial Development, Gavle, Sweden.
- Lozano, F.J., S. Suárez-Seoane, M. Kelly & E.Luis, 2008. A multi-scale approach for modeling fire occurrence probability using satellite data and classification trees: A case study in a mountainous Mediterranean region. Remote Sensing of Environment, 112: 708-719.
- Martinez, J., C. Vega-Garcia & E. Chuvieco, 2009. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. Journal of Environmental Management, 90: 1241-1252.
- Osaragi, T. 2008. Classification methods for spatial data representation. Research paper, University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis, 20p.
- Pappas, V. 2013. Data classification methods in GIS, the most common methods. Research paper, University of Thessaly, Department of Planning and Regional Development, 10p.
- Podur, J., D.L. Martell & K. Knight, 2002. Statistical quality control analysis of forest fire activity in Canada. Canadian Journal of Forest Research, 32: 195-205.
- Rollins, M.G., R.E. Keane & R.A. Parsons, 2004. Mapping fuels and fire regimes using remote sensing, ecosystem simulation and gradient modeling. Ecological Applications, 14(1): 75-95.
- Roman, M.V., D. Azqueta, & M. Rodrigues, 2013. Methodological approach to assess the socio-economic vulnerability to wildfires in Spain. Forest Ecology and Management, 294: 158-165.
- Saaty, T.L. 1980. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill, New York, USA, 287 p.
- Satir, O., S. Berberoglu & C. Donmez, 2016. Mapping regional forest fire probability using artificial neural network model in a Mediterranean forest ecosystem. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 7(5): 1645-1658.
- Sowmya, S.V. & R.K. Somashekar, 2010. Application of remote sensing and geographical information system in mapping forest fire risk zone at Bhadra wildlife sanctuary, India. Journal of Environmental Biology, 31(6): 969-974.
- Stolle, F., K.M. Chomitz, E.F. Lambin & T.P. Tomich, 2003. Human ecological intervention and the role of forest fires in human ecology. Forest Ecology and Management, 179: 277-292.
- Stolzenburg, W., 2001. Fire in the rain forest. Nature Conservancy, 31: 22-27.
- Vadrevu, K.P., A. Eaturu & K.V.S. Badarinath, 2010. Fire risk evaluation using multicriteria analysis, a case study. Environmental Monitoring and Assessment, 166(1): 223-239.

- Valdez, M.C., K.T. Chang, Ch.F. Chen, Sh.H. Chiang & J.L. Santos, 2017. Modelling the spatial variability of wildfire susceptibility in Honduras using remote sensing and geographical information systems. Geomatics, Natural Hazards and Risk, DOI: 10.1080/19475705.2016.1278404.

- Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy sets. Information and Control, 8(3): 338-353.

- Zumbrunnen, T., G.B. Pezzattic, P. Menéndezd, H. Bugmann, M. Bürgia & M. Conederac, 2011. Weather and human impacts on forest fires: 100 years of fire history in two climatic regions of Switzerland. Forest Ecology and Management, 261: 2188-2199.