

ارزیابی و نقشه‌برداری خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع سیراچال با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و GIS

سعیده اسکندری*^۱ و مصطفی خوشنویس^۲

۱- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
(s.eskandari@rifr.ac.ir)

۲- مربی پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
(khoshnevis_mostafa@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۲/۰۲

چکیده

پژوهش پیش‌رو برای ارزیابی و نقشه‌برداری خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع سیراچال در استان البرز، با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی انجام شد. معیارهای مورد استفاده شامل چهار معیار اصلی فیزیوگرافی، زیست‌شناختی، اقلیمی و انسان‌ساخت و زیرمعیارهای مربوط به آنها هستند. نقشه‌های کلیه این عوامل، با استفاده از مدل رقومی ارتفاع منطقه، تصاویر ماهواره‌ای، نمونه‌برداری زمینی و اطلاعات موجود تهیه شدند. همچنین نقشه آتش‌سوزی‌های گذشته طی یک دهه گذشته با استفاده از اطلاعات موجود و نمونه‌برداری زمینی با GPS تهیه شد. سپس وزن معیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی محاسبه و با استفاده از ترکیب وزنی نقشه‌های معیارهای مؤثر، نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی تهیه شد. در پایان نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی با استفاده از آتش‌سوزی‌های گذشته اعتبارسنجی شده و دقت آن در شناسایی مناطق حساس به آتش‌سوزی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که از بین معیارهای اصلی، معیار انسان‌ساخت بیشترین تأثیر را در خطر وقوع آتش‌سوزی داشت. همچنین زیرمعیارهای شیب و فاصله از رودخانه، نوع و تراکم پوشش گیاهی و فاصله از جاده دارای بیشترین اهمیت (وزن) در خطر وقوع آتش‌سوزی بر اساس فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی محاسبه شدند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی، ۵۸/۵۵ درصد منطقه پتانسیل خطر زیاد داشت.

واژه‌های کلیدی: البرز جنوبی، معیار انسان‌ساخت، نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی، نمونه‌برداری زمینی.

مقدمه

یکی از زمینه‌های کنترل و پیش‌بینی آتش‌سوزی

در جنگل‌ها و مراتع، تعیین مهم‌ترین عوامل توپوگرافی، بیوفیزیکی و اقتصادی-اجتماعی تأثیرگذار در وقوع حریق برای شناسایی مناطق بحرانی (پرخاطر) آتش‌سوزی است. از این‌رو، تهیه نقشه پتانسیل خطر با استفاده از همه عوامل اثرگذار، اهمیت بسزایی در پیش‌بینی آتش‌سوزی و جلوگیری از تخریب جنگل‌ها و مراتع دارد و به مدیران جنگل قبل از وقوع حریق کمک می‌کند تا با انجام مراقبت‌های ویژه در مناطق بحرانی، از وقوع آتش‌سوزی‌های احتمالی در منطقه جلوگیری کنند.

عوامل مختلفی در خطر وقوع آتش‌سوزی تأثیر دارند. نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داده است که عوامل مختلف اکولوژیکی و اقلیمی منجر به تغییر وسعت و شدت آتش‌سوزی‌ها در جنگل‌های شمال ایران شده‌اند (Esmaeili Sharif *et al.*, 2018). پوشش گیاهی از مهم‌ترین عوامل زیست‌شناختی مؤثر در آتش‌سوزی جنگل محسوب می‌شود که از نظر نوع گونه و تراکم (Rollins *et al.*, Jaiswal *et al.*, 2002)، Sowmya and Vadrevu *et al.*, 2010، 2004، Somashekar, 2010، Satir *et al.*, 2016) و مقدار لاشبرگ و مقدار رطوبت سوخت (Jurdao and Valdez، Chuvieco *et al.*, 2014، Chuvieco, 2012، *et al.*, 2017) در وقوع آتش‌سوزی تأثیر دارد. توپوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع) عامل مهم دیگری در وقوع و گسترش آتش‌سوزی است. به طوری که احتمال وقوع و گسترش آتش‌سوزی در مناطق پرشیب، جهت‌های جنوبی و غربی و ارتفاعات پایین-تر بیشتر است (Dong *et al.*, Jaiswal *et al.*, 2002)، Sowmya and Vadrevu *et al.*, 2010، 2005، Santiago and Kheladze، Somashekar, 2010، 2011، Satir *et al.*, 2016). در برخی پژوهش‌ها

امروزه آتش‌سوزی بخش وسیعی از جنگل‌های جهان و ایران را نابود کرده است. آتش‌سوزی سالانه هزاران هکتار از درختان، درختچه‌ها و گونه‌های بومی ارزشمند را از بین می‌برد (Roman *et al.*, 2013). جنگل‌های ایران نیز از این امر مستثنا نبوده‌اند و طی سال‌های اخیر با وقوع آتش‌سوزی‌های مکرر و شدید، بخش وسیعی از آنها نابود شده است؛ به طوری که آتش‌سوزی یکی از عوامل اصلی تخریب جنگل‌های ایران در سال‌های اخیر محسوب می‌شود (Adab *et al.*, 2013، Eskandari and Chuvieco, 2015، Kazemi, 2005). آتش‌سوزی در جنگل‌ها، علاوه بر خسارت‌های اقتصادی، آلودگی‌های محیط زیستی و تأثیر بر آب‌وهوای منطقه، در از بین بردن فون و فلور و چشم‌انداز جنگل‌ها نیز تأثیر بسزایی داشته و اثرهای آن در هر سطحی از اکوسیستم احساس می‌شود (Kazemi, 2005). آتش در صورت گستردگی، شدت و تکرار در یک جنگل، سبب تغییر ارزش کیفی گونه‌ها شده و سبب استقرار گونه‌های نامرغوب و غیرتجاری که فاقد ارزش اقتصادی هستند، می‌شود (Podur *et al.*, 2002). آسیب به نیروی مولد جنگل، کاهش تنوع زیستی و ارزش حفاظتی، صدمه به خاک و فرسایش آن، آسیب به ارزش تفریحی و منظر جنگل، آسیب به جانوران و املاک و حیات انسانی مثال‌هایی از خسارت‌های ناشی از آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران هستند (Jazireyi, 2005). با این حال آتش‌سوزی در برخی جنگل‌ها می‌تواند اثرهای مفیدی نیز در پی داشته باشد. هرچند گفته می‌شود آتش‌سوزی در جنگل‌ها اجتناب‌ناپذیر است و مزایایی را نیز به همراه دارد، اما تنها مدیریت استراتژیک آتش می‌تواند مفید و یا مضر بودن آن را تعیین کند.

مصنوعی برای پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی استفاده کرده‌اند (Alonso- Vasconcelo *et al.*, 2001, Vakalis *et al.*, 2004, Betanzos *et al.*, 2002, Vasilakos *et al.*, 2009, Satir *et al.*, 2016). درحالی‌که برخی پژوهش‌های جدیدتر از روش جنگل تصادفی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی استفاده کرده‌اند (Guo *et al.*, Leuenberger *et al.*, 2013, Song *et al.*, 2017, *al.*, 2016).

با وجود پژوهش‌های زیاد انجام‌شده در جهان و ایران، تاکنون پژوهشی که خطر آتش‌سوزی را در جنگل‌های سوزنی‌برگ البرز جنوبی، با روشی دقیق و نوین ارزیابی کند، انجام نشده است. این درحالی است که جنگل‌های و مراتع سیراچال که به‌طور عمده ذخیره‌گاه ارزشمند سوزنی‌برگان هستند، در سال‌های اخیر دچار آتش‌سوزی وسیعی شده‌اند. به‌طوری‌که ۴۵/۱۶ هکتار از جنگل‌ها و مراتع این منطقه که به‌طور عمده با گونه ارس پوشیده شده بودند، طی یک دهه گذشته در اثر آتش‌سوزی سوختند. حساسیت بیشتر جنگل‌های سوزنی‌برگ به آتش‌سوزی نسبت به پهن‌برگان، موجب نابودی بخشی از جنگل‌های طبیعی این منطقه شد. محدودبودن سطح این جنگل‌های ارزشمند از یک‌طرف و نابودی این سطح محدود با آتش‌سوزی رخ‌داده از طرف دیگر، نشان از اهمیت ارائه راهکاری برای مدیریت و پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های آینده در جنگل‌ها و مراتع منطقه دارد. در این راستا، شناسایی مناطق حساس به آتش‌سوزی در سیراچال و ارائه راهکارهای فنی مناسب برای مدیریت این آتش‌سوزی‌ها، با استفاده از روشی نوین و دقیق ضروری است. با توجه به حساسیت جنگل‌های سیراچال به آتش‌سوزی و اهمیت مکان‌یابی مناطق پرخطر از نظر آتش‌سوزی، پژوهش پیش‌رو به ارزیابی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع منطقه سیراچال

وسعت مناطق سوخته با توپوگرافی منطقه ارتباط معنی‌داری نشان داده است (Vazquez and Moreno, 2001). گذشته از عوامل طبیعی، بسیاری از آتش‌سوزی‌های جنگلی در جهان منشأ انسانی دارند (Martinez *et al.*, FAO, 2007, Stolzenburg, 2001, Eskandari and Chuvieco, 2015, *al.*, 2009). عوامل انسان‌ساختی که سبب وقوع آتش‌سوزی در جنگل می‌شوند، شامل تراکم جاده‌ها، محوطه‌های کمپ، زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی در داخل یا اطراف جنگل هستند (Jaiswal *et al.*, 2002, Vadrevu *et al.*, 2010, Martinez *et al.*, 2009, Eskandari and Chuvieco, 2015). بسیاری از آتش‌سوزی‌ها به‌عنوان ابزاری برای پاک‌کردن زمین‌ها برای کشاورزی یا جنگلکاری ایجاد می‌شوند (Stolle *et al.*, 2003).

با توجه به اهمیت پیش‌بینی آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع، تاکنون پژوهش‌های مختلفی در خصوص پتانسیل‌یابی خطر آتش‌سوزی در مناطق مختلف جهان با روش‌ها و مدل‌های متعددی انجام شده است. در برخی از این پژوهش‌ها از روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده شده است (Chuvieco and Sowmya and Somashekar, Congolton, 1989, Beygi Heidarlou *et al.*, Atesoglu, 2014, 2010). برخی از پژوهشگران دیگر نیز از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی استفاده کرده‌اند (Zarekar *et al.*, Vadrevu *et al.*, 2010, Eskandari, 2017, *al.*, 2013). درحالی‌که برخی دیگر از رگرسیون لجستیک برای مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی استفاده کرده‌اند (Vasconcelo *et al.*, 2001, Martinez *et al.*, Rollins *et al.*, 2004, Eskandari and Jurdao *et al.*, 2012, 2009, Chuvieco, 2015). برخی دیگر نیز از شبکه عصبی

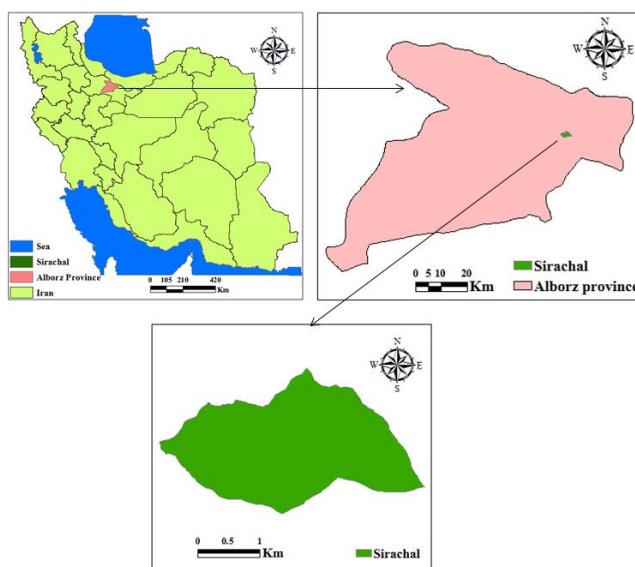
شیب ۴۰ تا ۷۰ درصد دارد. رژیم بارندگی منطقه تحت تأثیر مراکز کم فشار و باران زای دریای مدیترانه به سمت شرق ایران و تا حدی نیز تحت تأثیر جبهه های حاصل از دریای مازندران قرار دارد. بر اساس آمار ایستگاه آسارا که نزدیک ترین ایستگاه به منطقه مورد بررسی است، متوسط بارندگی سالانه حدود ۵۳۱ میلی متر و طول فصل خشک سه تا پنج ماه است. اقلیم منطقه بر اساس روش گوسن، استپی سرد و بر اساس طبقه بندی آمبرژه، نیمه مرطوب است (Akbarzadeh, 1994). منطقه مورد بررسی که ذخیره گاه ارس محسوب می شود، دارای جنگل های طبیعی، جنگلکاری و مراتع است که تحت نظارت مؤسسه تحقیقات جنگل ها و مراتع کشور اداره می شود. بخشی از جنگل های طبیعی و مراتع ایستگاه سیراچال به وسعت حدود ۴۵/۱۶ هکتار در اثر آتش سوزی در سال ۱۳۹۳ از بین رفته است.

با روش نوین تحلیل سلسله مراتبی فازی پرداخته است که تا پیش از این در البرز جنوبی انجام نشده است. شناسایی مناطق بحرانی آتش سوزی در این منطقه، راهکاری برای پیشگیری از وقوع و کاهش رخداد آتش سوزی در این جنگل ها و مراتع ارزشمند خواهد بود.

مواد و روش ها

منطقه مورد بررسی

منطقه سیراچال با وسعت حدود ۵۴۸/۴۲ هکتار در ۴۰ کیلومتری شمال کرج و در مسیر جاده کرج- چالوس در موقعیت جغرافیایی $35^{\circ}59'$ تا $36^{\circ}03'$ عرض شمالی و $51^{\circ}08'$ تا $51^{\circ}13'$ طول شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). منطقه مورد بررسی کوهستانی است و کمترین و بیشترین ارتفاع آن از سطح دریای آزاد به ترتیب ۱۸۱۷ و ۲۸۸۴ متر است. جهت عمومی منطقه، شمالی و جنوبی است و جهت های جنوبی شیب تندتری از جهت های شمالی دارد. بیشتر منطقه



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد بررسی (سیراچال) در ایران و استان البرز

Figure 1. The study area (Sirachal) location in Iran and Alborz province

زیرمعیارها و معیارها بر اساس وزن و اهمیت آنها در محیط GIS و تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی ۵- اعتبارسنجی نقشه خطر آتش‌سوزی با استفاده از آتش‌سوزی‌های گذشته. این مراحل در شکل ۲ به صورت فلوجارت نشان داده شده‌اند.

روش پژوهش

این پژوهش شامل چند مرحله اصلی است: ۱- جمع‌آوری داده‌ها و آماده‌سازی نقشه‌های معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در خطر آتش‌سوزی، ۲- تعیین وزن معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در خطر آتش‌سوزی با روش تحلیلی سلسله مراتبی فازی، ۳- اختصاص وزن به هر یک از معیارها و زیرمعیارها ۴- ادغام نقشه‌های

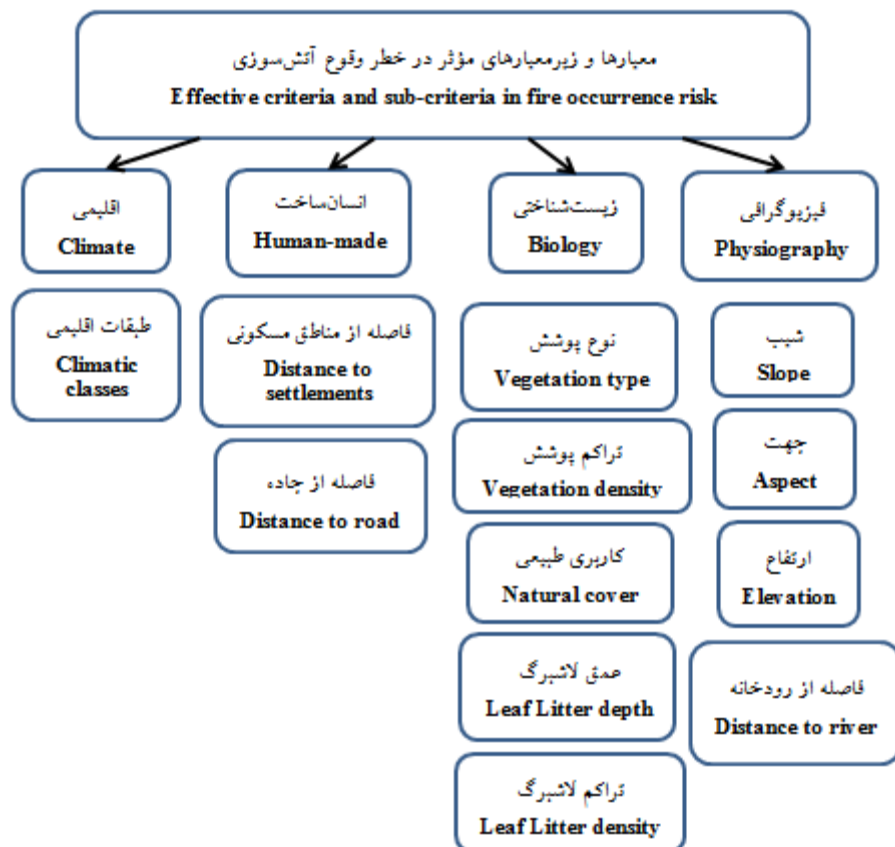


شکل ۲- مراحل ارزیابی و نقشه‌برداری خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع سیراچال

Figure 2. Steps of evaluating and mapping the fire risk in the forests and rangelands of Sirachal

و انسان‌ساخت و زیرمعیارهای آنها (شکل ۳) و همچنین داده‌های آتش‌سوزی‌های گذشته بودند که اطلاعات آنها به شرح زیر تهیه شد.

۱- جمع‌آوری داده‌ها و آماده‌سازی نقشه‌های معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در خطر آتش‌سوزی داده‌های مورد استفاده برای انجام این پژوهش شامل چهار معیار اصلی فیزیوگرافی، زیست‌شناختی، اقلیمی

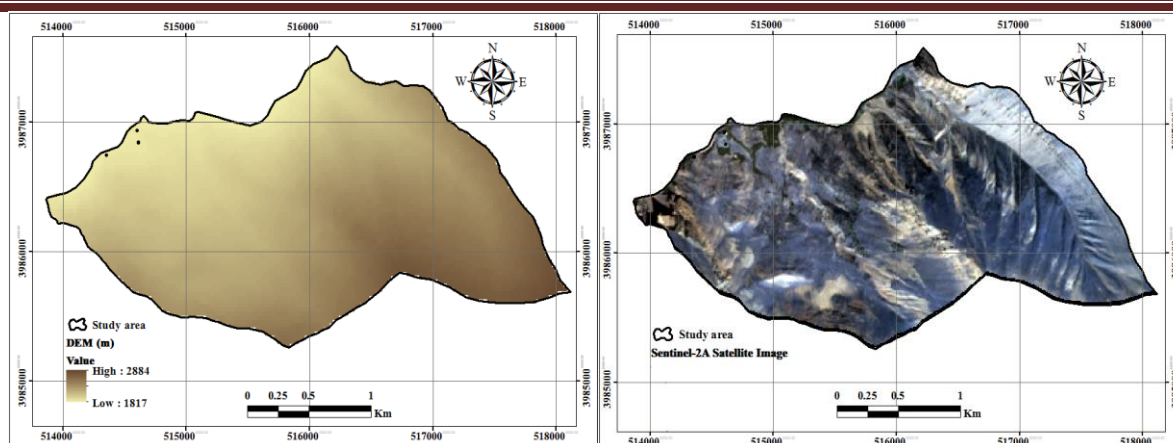


شکل ۳- معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در خطر وقوع آتش‌سوزی (Vadrevu *et al.*, 2010) (مطابق با شرایط منطقه)
Figure 3. The effective criteria and sub-criteria in fire occurrence risk (according to study area condition)

۲ (۱۰ متر)، در دسترس بودن (رایگان) و به‌روز بودن آن (تصویر ۲۰۱۸)، از این تصویر برای شناسایی آبراه‌های منطقه استفاده شد. لازم به ذکر است که آشنایی میدانی پژوهشگران این پژوهش با عرصه پژوهش و وجود نشانه‌های طبیعی، در شناسایی آبراه‌ها بر روی تصویر کمک شایانی کرد. سپس در اطراف آبراه‌ها بافر با شعاع ۱۰۰ متری در نظر گرفته شده و نقشه بافر رودخانه (آبراهه) بر اساس هدف تحقیق در GIS در پنج طبقه تهیه شد. این شعاع بافر (حریم) با توجه به وسعت منطقه و شعاع تحت تأثیر رودخانه‌ها از وقوع آتش‌سوزی بر اساس نظر کارشناسان آشنا به عرصه انتخاب شد.

۱-۱- نقشه‌های فیزیوگرافی
زیرمعیارهای فیزیوگرافی شامل شیب، جهت، ارتفاع و فاصله از رودخانه بود. ابتدا مدل رقومی ارتفاع سنجنده ALOS PALSAR با اندازه پیکسل ۱۲/۵×۱۲/۵ متر از سایت مربوطه (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>) دانلود شد و نقشه‌های شیب، جهت و ارتفاع از آن تهیه شد (شکل ۴-الف).

تصویر ماهواره‌ای Sentinel2 مربوط به تاریخ ۲۵ سپتامبر ۲۰۱۸ (۳ مهر ۱۳۹۷) منطقه سیراچال نیز از سایت مربوطه دانلود شد (شکل ۴-ب) و مسیر آبراه‌ها از روی تصویر رقومی شده و نقشه آن تهیه شد. با توجه به تفکیک مکانی مناسب تصاویر سنتینل -



شکل ۴- مدل رقومی ارتفاع (سمت راست) و تصویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ منطقه مورد بررسی (سمت چپ)

Figure 4. Digital elevation model (right) and Sentinel 2 satellite image of the study area (left)

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^j n_{ii}}{n} * 100 = \frac{91}{110} * 100 = 82\% \quad (1)$$

که در آن OA صحت کلی، n_{ii} تعداد پیکسل‌ها یا نقاط درست طبقه‌بندی شده و n تعداد کل پیکسل‌ها یا نقاط مورد بررسی است (Congalton and Green, 2008).

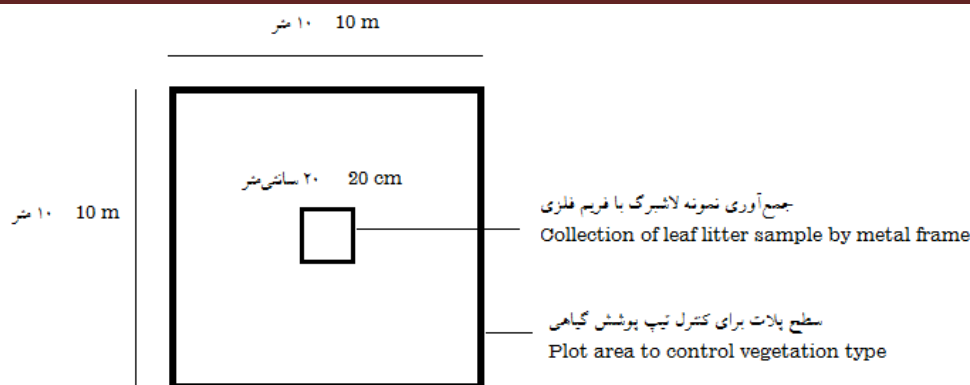
برای تهیه نقشه تراکم پوشش گیاهی نیز بعد از دانلود تصویر Sentinel2 مربوط به منطقه و ایجاد ترکیب باندی مناسب، نقشه تراکم پوشش گیاهی نیز با استفاده شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) تهیه شد. مشخصه NDVI از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (2)$$

که در آن، NDVI شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال‌شده، NIR ارزش طیفی در باند مادون قرمز نزدیک و Red ارزش طیفی در باند قرمز است. صحت نقشه تراکم پوشش گیاهی نیز با ۱۱۰ نقطه در عرصه در قطعه‌نمونه‌هایی به ابعاد ۱۰×۱۰ متر ارزیابی شد (شکل ۵).

۱-۲- نقشه‌های زیست‌شناختی

زیرمعیارهای زیست‌شناختی شامل نوع پوشش گیاهی، تراکم پوشش گیاهی، کاربری‌های طبیعی، عمق لاشبرگ و رطوبت لاشبرگ بود. نقشه تیپ پوشش گیاهی از پژوهش‌های انجام شده قبلی (Akbarzadeh, 1994) به صورت کاغذی تهیه شد. سپس این نقشه در محیط GIS زمین مرجع شده و تمام پلی‌گون‌های آن رقومی شد. با توجه به اینکه تیپ پوشش گیاهی عاملی طبیعی است و منطقه سیراچال تحت نظارت مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور اداره می‌شود، تغییر تیپ گیاهی در منطقه ممکن است محسوس نباشد. با این حال، به دلیل گذشت ۲۵ سال از تهیه این نقشه، به منظور اطمینان از صحت آن، پایش میدانی برای ارزیابی صحت کلی نقشه تیپ با ۱۱۰ نقطه انجام شد (شکل ۵). در مجموع، ۹۱ نقطه از ۱۱۰ نقطه، به درستی در تیپ مشخص شده بر اساس نقشه تیپ پوشش گیاهی قرار گرفتند. از این رو صحت کلی (Overall Accuracy: OA) نقشه تیپ ۸۲ درصد به دست آمد (رابطه ۱):



شکل ۵- قطعه نمونه جمع آوری نمونه لاشبرگ و کنترل تیپ پوشش گیاهی

Figure 5. Plot of leaf litter sample collection and vegetation type control

Goudarzi and Pulighe *et al.*, 2016, 2014
 Landry, 2017). به همین منظور، تعداد ۵۰ نقطه با پراکنش تصادفی با در نظر گرفتن مساحت تقریبی هر پوشش/کاربری، ایجاد شد (شکل ۸-و). بدین معنی که برای اطمینان از اختصاص تعداد نقطه کافی به هر طبقه پوشش/کاربری (مونه)، از روش مونه بندی تقسیم به نسبت با پراکنش تصادفی یا روش تصادفی مونه بندی شده (Stratified Random) استفاده شد (Zobeiri, 2008). در این روش، تعداد نقطه ای که به هر طبقه پوشش/کاربری اختصاص می یابد، به نسبت مساحت آن طبقه پوشش/کاربری است و پراکنش نقاط داخل هر پوشش/کاربری نیز به صورت تصادفی است. تعداد نقاط هر طبقه کاربری (مونه) از رابطه ۳ محاسبه شد (Zobeiri, 2008):

$$\text{تعداد کل نقاط} \times \text{مساحت هر مونه (طبقه)} = \text{تعداد نقاط اختصاص یافته به هر مونه (طبقه)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\text{مساحت کل منطقه}$$

صحت کلی و ضریب کاپا محاسبه شد. شاخص کاپا از رابطه ۴ محاسبه می شود (Maleki, 2010):

$$\hat{k} = \frac{n \sum_{i=1}^j n_{ii} - \sum_{i=1}^j n_{i+} n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^j n_{i+} n_{+i}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه، n تعداد کل پیکسل های واقعی زمینی، n_{i+} مجموع عناصر سطر i ام، n_{+i} مجموع

برای تهیه نقشه کاربری های طبیعی، ابتدا از ترکیب باندهای ۲، ۳، ۴ و ۸ تصویر Sentinel2 که دارای تفکیک مکانی ۱۰ متر بودند، تصویر رنگی کاذب تهیه شد. سپس با انتخاب نمونه های تعلیمی پیکسل پایه در کاربری های مورد انتظار منطقه (جنگل، مرتع، صخره و زمین بایر)، طبقه بندی تصویر با روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) که یکی از دقیق ترین روش های طبقه بندی در مناطق ناهمگن است (Huang *et al.*, 2010, Mustafa *et al.*, 2018)، در نرم افزار Envi 5.4 انجام شد. صحت این نقشه نیز با اختصاص تعداد نقاط کافی در تصاویر تفکیک مکانی بالای نرم افزار Google Earth Pro.7 ارزیابی شد. این تصاویر در تحقیقات پژوهشگران مختلف به دلیل دقت مکانی زیاد به عنوان واقعیت زمینی استفاده شده اند (Potere, 2008, Benker *et al.*, 2011, Farah *et al.*).

در نرم افزار Google Earth Pro.7 کاربری هر یک از نقاط در سطحی با ابعاد ۱۰×۱۰ متر که متناسب با ابعاد پیکسل در تصویر سنتینل ۲ بود، تعیین شد. به طوری که موقعیت هر نقطه کنترل در مرکز سطح بود. در نهایت صحت نقشه پوشش/کاربری با شاخص های

عناصر ستون i ام، n_{ii} مجموع عناصر روی قطر اصلی و j تعداد کاربری را نشان می‌دهد. شاخص کاپا مقدار عددی‌ای بین صفر تا یک خواهد بود، که عدد صفر بیان‌گر طبقه‌بندی کاملاً نامطلوب و مقدار یک نشان‌دهنده حالت مطلوب طبقه‌بندی است (Maleki, 2010).

در خصوص تهیه نقشه‌های عمق و رطوبت لاشبرگ، از نمونه‌برداری زمینی در فصل آتش‌سوزی (مهرماه ۱۳۹۷) استفاده شد. دلیل انتخاب این فصل، بر اساس سابقه آتش‌سوزی در منطقه بود که اغلب در اواخر تابستان و اوایل پاییز به وقوع می‌پیوندد. لازم به ذکر است که طبق نظر کارشناسان منطقه، خشکی محیط، کاهش رطوبت نسبی و تجمع لاشبرگ خشک (به دلیل شروع فصل خزان) زمینه مناسبی را برای وقوع آتش‌سوزی در این زمان در منطقه فراهم می‌کند. به همین دلیل نمونه‌برداری‌های عمق و رطوبت لاشبرگ در این زمان در منطقه انجام شد. بدین صورت که بعد از تعیین تعداد کل نمونه‌ها (۱۱۰ نمونه)، ابتدا نمونه‌های لاشبرگ به‌طور تصادفی در طبقات تیپ‌های پوشش گیاهی انتخاب شدند و روی نقشه علامت‌گذاری شدند. این نقاط در عملیات میدانی در عرصه شناسایی شدند. در هر نقطه نمونه‌برداری در فصل آتش‌سوزی، ابتدا عمق لاشبرگ تا دقت سانتی‌متر اندازه‌گیری شد و سپس نمونه لاشبرگ در یک فریم 20×20 سانتی‌متری برداشت شد (شکل‌های

۵ و ۶). بعد از انجام عملیات میدانی، نمونه‌های لاشبرگ به آزمایشگاه جنگل مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور منتقل شده و وزن تر آنها اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها به داخل آون انتقال یافته و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. سپس وزن خشک آنها اندازه‌گیری شد. از اختلاف وزن تر و خشک نمونه‌ها، مقدار رطوبت لاشبرگ به درصد با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد. بدین ترتیب در هر نقطه نمونه‌برداری، عمق لاشبرگ و رطوبت لاشبرگ برآورد شد. سپس نقشه‌های نهایی این مشخصه‌ها با استفاده از ۱۱۰ نمونه و با روش درون‌یابی IDW در نرم‌افزار ArcMap 10.3 تهیه شد. این روش درون‌یابی، در مواردی که تعداد نقاط یا داده‌های معلوم زیاد نباشد، قابل توصیه است (Smith et al., 2007). از آنجایی که در این پژوهش تعداد نقاط معلوم، ۱۱۰ نقطه بود، از این‌رو در این پژوهش از این روش استفاده شد. در روش وزن‌دهی معکوس (فاصله Inverse: IDW Distance Weighted)، مقادیر نامعلوم در یک نقشه رستری، با استفاده از وزن‌دهی به نقاط معلوم از طریق معکوس فاصله، درون‌یابی و محاسبه می‌شوند. در بیشتر موارد تغییرات با افزایش فاصله، افزایش می‌یابد؛ بنابراین هرچه فاصله از نقطه اندازه‌گیری شده بیشتر شود، تغییرات مشخصه بیشتر خواهد بود (Smith et al., 2007).

$$100 * (\text{وزن لاشبرگ خشک} - \text{وزن لاشبرگ مرطوب}) = \text{درصد رطوبت لاشبرگ}$$

وزن لاشبرگ خشک

رابطه (۵)



ب (ب)



الف (ا)

شکل ۶- اندازه‌گیری عمق لاشبرگ (الف) و جمع‌آوری نمونه لاشبرگ (ب)

Figure 6. Measurement of leaf litter depth (a) and collection of leaf litter sample (b)

آزاد (غیر از کشاورزی و دامداری) و عدم وجود زمین کشاورزی در منطقه سیراچال، این عامل از زیرمعیارهای انسان‌ساخت حذف شد. نقشه‌های جاده‌های آسفالتی و خاکی از تصویر Sentinel2 منطقه سیراچال رقومی شد. لازم به ذکر است که برای رقومی کردن مسیر خاکی (مالرو) منطقه، از آشنایی محققان این پژوهش با منطقه و همچنین تصویر تفکیک مکانی بالای Google Earth بهره‌گیری شد. نقشه‌های مناطق مسکونی نیز از تصویر Sentinel2 رقومی و استخراج شد. از آنجایی که مناطق مسکونی در شمال منطقه، سطح قابل‌توجهی را به خود اختصاص داده بودند و در تصویر با تفکیک مکانی ۱۰ متر به‌خوبی قابل تشخیص بودند، برای رقومی کردن آنها، توان تفکیک مکانی تصویر Sentinel2 کافی بود. پس از رقومی ساختن مناطق مسکونی و جاده‌ها، در اطراف آنها بافرهایی با شعاع ۲۰۰ متر در نظر گرفته شده و نقشه‌های بافر (حریم) این عوامل بر اساس هدف تحقیق در GIS در پنج طبقه تهیه شدند. علت انتخاب این شعاع بافر، بر اساس پژوهش‌های پیشین و از نظر حریم مؤثر جاده در وقوع حریق‌های انسان‌ساز (Dong et al., 2005, Eskandari, 2017).

۳-۱- نقشه‌های اقلیمی

متأسفانه در ایستگاه تحقیقاتی سیراچال و فاصله‌های دوردست از آن، هیچ ایستگاه هواشناسی وجود نداشت؛ تنها ایستگاه موجود، ایستگاه آسارا در شمال شرقی و خارج از محدوده منطقه مورد بررسی بود، اما امکان درون‌یابی داده‌های اقلیمی تنها با یک ایستگاه وجود نداشت. از این‌رو، برای دستیابی به اطلاعات اقلیمی، نقشه طبقات اقلیمی از سازمان هواشناسی کشور تهیه شده و برای انجام این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. نقشه طبقات اقلیمی با توجه به اقلیم‌های متفاوت کشور (با توجه به مقدار بارندگی و درجه حرارت) به شش طبقه اقلیمی مرطوب، نیمه مرطوب، نیمه‌خشک شدید، نیمه‌خشک میانی، نیمه‌خشک خفیف و خشک تقسیم‌بندی شده است که در مورد منطقه سیراچال شامل طبقات نیمه‌خشک خفیف و نیمه‌مرطوب بود.

۴-۱- نقشه‌های انسان‌ساخت

زیرمعیارهای انسان‌ساخت شامل فاصله از جاده‌ها و فاصله از مناطق مسکونی بود. اگرچه زمین‌های کشاورزی عامل مهمی در وقوع حریق‌های انسان‌ساز هستند، اما به دلیل اشتغال ساکنین منطقه به شغل‌های

۱-۵- نقشه آتش‌سوزی‌های گذشته

این وزن‌ها برای تلفیق نقشه‌های رقومی مربوط به معیارها و زیرمعیارها در محیط GIS، استفاده شدند. برای دستیابی به این وزن‌ها، ابتدا تعداد ۳۰ پرسشنامه بین کارشناسان آتش‌سوزی در عرصه‌های منابع طبیعی توزیع شد (جدول ۱). سعی بر آن بود که پرسش‌شوندگان هم شامل پژوهشگران و اعضای هیئت‌علمی آموزشی و پژوهشی و هم کارشناسان عرصه (محیط‌بانان) هستند. در آخر میانگین پرسشنامه-های تکمیل‌شده، به‌دست‌آمده و تجزیه و تحلیل شد. هر پرسشنامه شامل یک جدول برای بیان مقیاس زبانی اهمیت معیارها و زیرمعیارها نسبت به هم (جدول ۲) و چهار ماتریس مقایسه زوجی (سه ماتریس مربوط به مقایسه زیرمعیارهای هر معیار و یک ماتریس مربوط به مقایسه معیارهای اصلی) بود. مقیاس‌های زبانی برای بیان اهمیت معیارها و زیرمعیارها نسبت به هم در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در جدول ۲ آورده شده است.

داده‌های آتش‌سوزی‌های گذشته در منطقه سیراچال، از طریق نمونه‌برداری زمینی با موقعیت‌یاب مدل GPS Map Garmin 64S، بلافاصله بعد از آتش‌سوزی (در سال ۱۳۹۳) برداشت شد و نقشه رقومی آن در محیط ArcMap 10.3 تهیه شد. به این نقشه، نقشه آتش‌سوزی‌های دهه گذشته نیز اضافه شد و نقشه سابقه آتش‌سوزی‌های گذشته به‌دست آمد. از نقشه تاریخیچه آتش‌سوزی‌های گذشته برای اعتبارسنجی نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی استفاده شد.

۲- تعیین وزن معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در خطر آتش‌سوزی با فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی

وزن معیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی از طریق روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی محاسبه شد. بدین منظور از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (Saaty, 1980) همراه با مجموعه‌های فازی برای رتبه‌بندی و وزن‌دهی به عامل‌های مؤثر در آتش‌سوزی استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات کارشناسان آتش‌سوزی در عرصه‌های منابع طبیعی

Table 1. Characteristics of fire experts in natural resources

تعداد Number	مشخصات کارشناسان آتش‌سوزی Characteristics of fire experts
13	متخصصان آتش‌سوزی در منابع طبیعی (محققان و اعضای هیئت‌علمی دانشگاهی) Fire specialists in natural resources (researchers and scientific members of universities)
17	متخصصان آتش‌سوزی در منابع طبیعی (محققان و اعضای هیئت‌علمی مؤسسات تحقیقاتی) Fire specialists in natural resources (researchers and scientific members of research institutes)
5	کارشناسان محلی آتش‌سوزی در منابع طبیعی (جنگلبان، محیط‌بان) Fire local experts in natural resources (forester)

تکمیل می‌شود. مراحل آنالیز توسعه‌ای چانگ بعد از تکمیل ماتریس‌ها (پرسشنامه‌ها) به‌طور کامل در Chang (1996) تشریح شده است. بر این اساس، وزن نهایی هر معیار و زیرمعیار با استفاده از مقایسات زوجی بر اساس نظر کارشناسان و به کمک روش سلسله مراتبی فازی محاسبه شد.

در این پژوهش برای تجزیه و تحلیل‌های نتایج پرسشنامه‌های تکمیل‌شده کارشناسان در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، از روش آنالیز توسعه‌ای فازی مثلثی چانگ (Chang, 1996) استفاده شد. زمانی که کارشناسان قضاوت‌های خود را بر اساس اعداد فازی مثلثی بیان می‌کنند، ماتریس‌های مقایسات زوجی

جدول ۲- مقیاس‌های زبانی برای بیان درجه اهمیت در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (Chang, 1996)

Table 2. The vague scales for stating the importance degree in Fuzzy AHP method (Chang, 1996)

اعداد فازی مثلثی (l, m, u)	مقیاس زبانی برای درجه اهمیت	
Triangular fuzzy numbers	Lingual scale for importance degree	
(1, 1, 1)	ارجحیت با اهمیت دقیقاً برابر	Just equal (JE)
($\frac{1}{2}$, 1, $\frac{3}{2}$)	ارجحیت با اهمیت تقریباً برابر	Equally Important (EI)
(1, $\frac{3}{2}$, 2)	ارجحیت با اهمیت کم	Weakly more Important (WMI)
($\frac{3}{2}$, 2, $\frac{5}{2}$)	ارجحیت با اهمیت قوی‌تر	Strongly more Important (SMI)
(2, $\frac{5}{2}$, 3)	ارجحیت با اهمیت خیلی قوی‌تر	Very strongly more Important (VSMI)
($\frac{5}{2}$, 3, $\frac{7}{2}$)	ارجحیت با اهمیت کامل و مطلق	Absolutely more Important (AMI)

نسبت سازگاری (CR= Consistency Ratio) از رابطه ۹ به دست می‌آید.

$$CR = CI/RI \quad \text{رابطه (۹)}$$

در این رابطه، RI یا Random Index، شاخص تصادفی یک ماتریس با مقادیر تصادفی است. به‌طورکلی CR کمتر از ۰/۱ نشان‌دهنده سازگاری وزن معیارها در تصمیم‌گیری است (Saaty, 1980, Mehregan, 2018, Ghodsipour, 2011).

۳- اختصاص وزن به هر یک از معیارها و زیرمعیارها

ابتدا نقشه‌های زیرمعیارها و معیارها در محیط GIS به فرمت رستری تبدیل شده و بر اساس دستور Reclassify به پنج طبقه، طبقه‌بندی شدند. بعد از طبقه‌بندی نقشه‌های هر یک از زیرمعیارها، برای هر طبقه خاص بر اساس تأثیر و اهمیتی که در آتش‌سوزی داشت، یک مقدار استاندارد از ۰ تا ۱۰ در نظر گرفته شد؛ به‌طوری‌که که برای پرخطرترین طبقه هر زیرمعیار از نظر تأثیر در آتش‌سوزی، ارزش عددی ۱۰ و برای کم‌خطرترین طبقه، ارزش عددی صفر در نظر گرفته شد (Eskandari and Miesel, 2017). این ارزش عددی، به‌عنوان وزن درون لایه‌ای برای هر لایه (زیرمعیار) در نظر گرفته شد (جدول ۳). لازم به ذکر است که برای هر زیرمعیار، حساسیت هر طبقه به آتش‌سوزی بر اساس پژوهش‌های پیشین (Jaiswal et

۲-۱- آزمون پایداری وزن معیارها (نسبت سازگاری)

هدف از انجام آزمون پایداری این است که با استفاده از این آزمایش، صحت وزن‌های به‌دست‌آمده برای هر معیار و زیرمعیار تأیید شود. بدین منظور باید ماتریس بردار پایداری وزن نرمال معیارها تشکیل شود که بدین منظور، وزن نرمال میانگین هر معیار در ارزش‌های نسبت داده شده در سطرهای ماتریس مقایسه جفتی معیارها ضرب شد (رابطه ۶).

$$A \times W = \lambda_{\max} \times W \quad \text{رابطه (۶)}$$

که W بردار ویژه وزنی مربوط به ماتریس مقایسه زوجی A و λ_{\max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس A است. ارزش لاندا (λ_{\max}) به‌طور ساده شامل میانگین ارزش‌های بردار پایداری است. بر این اساس، مجموع بردارهای پایداری بر تعداد معیارها (n) تقسیم می‌شود (رابطه ۷). سپس شاخص سازگاری (Consistency Index = CI) ماتریس‌های مقایسه زوجی برای اطمینان از انسجام قضاوت‌ها در مقایسه زوجی، طبق رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$\lambda_{\max} = \frac{\lambda_{\max 1} + \lambda_{\max 2} + \dots + \lambda_{\max n}}{n} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad \text{رابطه (۸)}$$

در رابطه ۸، n بعد ماتریس و λ_{\max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه زوجی است. همچنین

حساس و نیمه‌حساس طبقه‌بندی شد (جدول ۴). وزن معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی نیز در مرحله قبلی پژوهش، با به‌کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، به‌دست‌آمده بود. این وزن‌ها به‌عنوان وزن برون لایه‌ای برای ادغام لایه‌های مختلف رقومی (زیرمعیارها و معیارهای اصلی) برای دست‌یابی به نقشه خطر آتش‌سوزی در نظر گرفته شد (جدول ۳).

Vadrevu et al., Dong et al., 2005 al., 2002 (Eskandari, 2017, 2010) و نظرات کارشناسان تعیین شد. از آنجایی‌که تیپ پوشش گیاهی منطقه منحصر به فرد بود، در خصوص حساسیت طبقات تیپ پوشش گیاهی از نظر کارشناسان و افراد محلی آشنا به منطقه که در زمان آتش‌سوزی سال ۹۳ در عرصه حضور داشتند، بهره‌گیری شد و بر اساس قابلیت اشتعال پوشش گیاهی، در سه طبقه بسیار حساس،

جدول ۳- طبقات، حساسیت به آتش و وزن درون لایه‌ای زیرمعیارهای مؤثر در خطر وقوع آتش‌سوزی

Table 3. The classes, sensitivity to fire and inter-layer weight of effective sub-criteria in fire risk (Eskandari, 2017؛ Vadrevu et al., 2010؛ Dong et al., 2005؛ Jaiswal et al., 2002)

ارزش عددی (وزن درون لایه‌ای) Number value (in-layer weight)	حساسیت به آتش Sensitivity to fire	طبقات Classes	زیرمعیار Sub-criterion	ارزش عددی (وزن درون لایه‌ای) Number value (in-layer weight)	حساسیت به آتش Sensitivity to fire	طبقات Classes	زیرمعیار Sub-criterion
10	بسیار زیاد Very high	بسیار حساس Very sensitive	نوع پوشش گیاهی Vegetation type	10	بسیار زیاد Very high	>40	شیب (درصد) Slope (percent)
8	زیاد High	حساس sensitive		8	زیاد High	30-40	
6	متوسط Medium	نیمه حساس Semi sensitive		6	متوسط Medium	20-30	
0	بسیار کم Very low	صخره Rock		2	کم Low	10-20	
0	بسیار کم Very low	واریزه‌ها Varizeh		0	بسیار کم Very low	0-10	
10	بسیار زیاد Very high	0.3-0.66	تراکم پوشش گیاهی Vegetation density	10	بسیار زیاد Very high	جنوبی South	جهت Aspect
8	زیاد High	0.2-0.3		8	زیاد High	غربی West	
6	متوسط Medium	0.1-0.2		6	متوسط Medium	بدون جهت Flat	
4	کم Low	0-0.1		2	کم Low	شرقی East	
2	بسیار کم Very low	-0.08-0		0	بسیار کم Very low	شمالی North	

ادامه جدول ۳.

Continued table 3.

ارزش عددی (وزن درون لایه‌ای) Number value (in-layer weight)	حساسیت به آتش Sensitivity to fire	طبقات Classes	زیرمعیار Sub-criterion	ارزش عددی (وزن درون لایه‌ای) Number value (in-layer weight)	حساسیت به آتش Sensitivity to fire	طبقات Classes	زیرمعیار Sub-criterion
10	بسیار زیاد Very high	4-4.46	عمق لاشبرگ (سانتی متر) Leaf litter depth (cm)	10	بسیار زیاد Very high	1817-2000	ارتفاع (متر) Elevation (m)
8	زیاد High	3-4		8	زیاد High	2000-2200	
6	متوسط Medium	2-3		6	متوسط Medium	2200-2400	
4	کم Low	1-2		2	کم Low	2400-2600	
2	بسیار کم Very low	0-1		0	بسیار کم Very low	2600-2884	
10	بسیار زیاد Very high	0-3	رطوبت لاشبرگ (درصد) Leaf litter moisture (%)	10	بسیار زیاد Very high	> 400	فاصله از آبراهه (متر) Distance to river (m)
8	زیاد High	3-6		8	زیاد High	300-400	
6	متوسط Medium	6-9		6	متوسط Medium	200-300	
4	کم Low	9-12		2	کم Low	100-200	
2	بسیار کم Very low	12-14.83		0	بسیار کم Very low	0-100	
10	بسیار زیاد Very high	جنگل Forest	کاربری‌های طبیعی Natural covers	10	بسیار زیاد Very high	0-200	فاصله از جاده‌ها (متر) Distance to road (m)
8	زیاد High	مرتع Rangeland		8	زیاد High	200-400	
2	کم Low	زمین بایر Bare soil		6	متوسط Medium	400-600	
2	کم Low	صخره Rock		4	کم Low	600-800	
				2	بسیار کم Very low	> 800	
8	زیاد High	نیمه خشک خفیف Low semi-arid	طبقات اقلیمی Climatic classes	10	بسیار زیاد Very high	0-200	فاصله از مناطق مسکونی (متر) Distance to settlement (m)
				8	زیاد High	200-400	
				6	متوسط Medium	400-600	
4	کم Low	نیمه مرطوب Semi-humid		4	کم Low	600-800	
				5	بسیار کم Very low	> 800	

جدول ۴- حساسیت انواع پوشش گیاهی منطقه سیراچال به آتش‌سوزی (نظر کارشناسان آشنا به تیپ پوشش گیاهی عرصه)

Table 4. The sensitivity of vegetation type of Sirachal area to fire

پوشش گیاهی بسیار حساس Very sensitive vegetation	پوشش گیاهی حساس Sensitive vegetation	پوشش گیاهی نیمه حساس Semi-sensitive vegetation
<i>Agropyron_Cotoneaster_Juniperus_Thymus</i>	<i>Buffonia_Melica_Diantus</i>	<i>Amygdalus</i>
<i>Agropyron_Diantus_Buffonia</i>	<i>Buffonia_Talictum_Diantus</i>	<i>Buffonia_Cousinia</i>
<i>Agropyron_Ferula_Diantus</i>	<i>Cotoneaster_Astragalus_Agropyron</i>	<i>Diantus_Buffonia_Tanacetum</i>
<i>Agropyron_Leucopoa</i>	<i>_Juniperus</i>	<i>Diantus_Ferula</i>
<i>Agropyron_Pteroccephalus_Acantnolimon</i>	<i>Cotoneaster_Diantus_Galium_Juniperus</i>	<i>Ferula_Achillea_Stellaria</i>
<i>Bromus_Thymus_Agropyron</i>	<i>Cotoneaster_Diplotaenia_Juniperus</i>	<i>Rumex_Leucopoa_Vicia_Galium</i>
<i>Bromus_Thymus_Astragalus</i>	<i>Cotoneaster_Juniperus_Thymus_</i>	Garden
<i>Diantus_Ferula_Agropyron_Juniperus</i>	<i>Agropyron_Cupressus</i>	Mixed type
<i>Diantus_Thymus_Agropyron_Onobrychis</i>	<i>Diantus_Leucopoa_Agropyron_Galium</i>	
<i>Diplotaenia_Diantus_Juniperus_Cephalaria</i>	<i>Diantus_Poa_Alopecurus_Helichrysum</i>	
<i>Juniperus_Diantus_Onobrychis</i>	<i>Diantus_Poa_Silene</i>	
<i>Juniperus_Thymus_Bromus</i>	<i>Diantus_Poa_Tymus_Onobrychis</i>	
<i>Thymus_Astragalus_Agropyron</i>	<i>Diantus_Prangos_Galium</i>	
<i>Thymus_Astragalus_Juniperus_</i>	<i>Ferula_Galium_Peucedanum</i>	
<i>Agropyron</i>	<i>Ferula_Vicia_Stellaria</i>	
<i>Thymus_Diantus_Juniperus_Dactylis</i>	<i>Thalictum_Ferula_Diantus_Cousinia</i>	
	<i>Thymus_Agropyron</i>	
	<i>_Diantus_Cotoneaster</i>	
	<i>Plantation_Aforestation</i>	

۵- اعتبارسنجی نقشه خطر آتش‌سوزی با استفاده از آتش‌سوزی‌های گذشته

در پایان نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی با استفاده از آتش‌سوزی‌های گذشته اعتبارسنجی شده و دقت آن در شناسایی مناطق حساس به آتش‌سوزی ارزیابی شد. بدین منظور مساحت طبقات بسیار پرخطر و پرخطر در آتش‌سوزی‌های گذشته محاسبه شد تا مقدار هم‌پوشانی مناطق بسیار پرخطر و پرخطر در نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی با آتش‌سوزی‌های گذشته مشخص شود (Dong et al., Jaiswal et al., 2002, 2005, Vadrevu et al., 2010, Eskandari, 2017). بر این اساس هر چه بخش بیشتری از آتش‌سوزی‌های گذشته توسط مناطق حساس به حریق پوشانده شده باشد، دقت نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی بیشتر خواهد بود.

نتایج

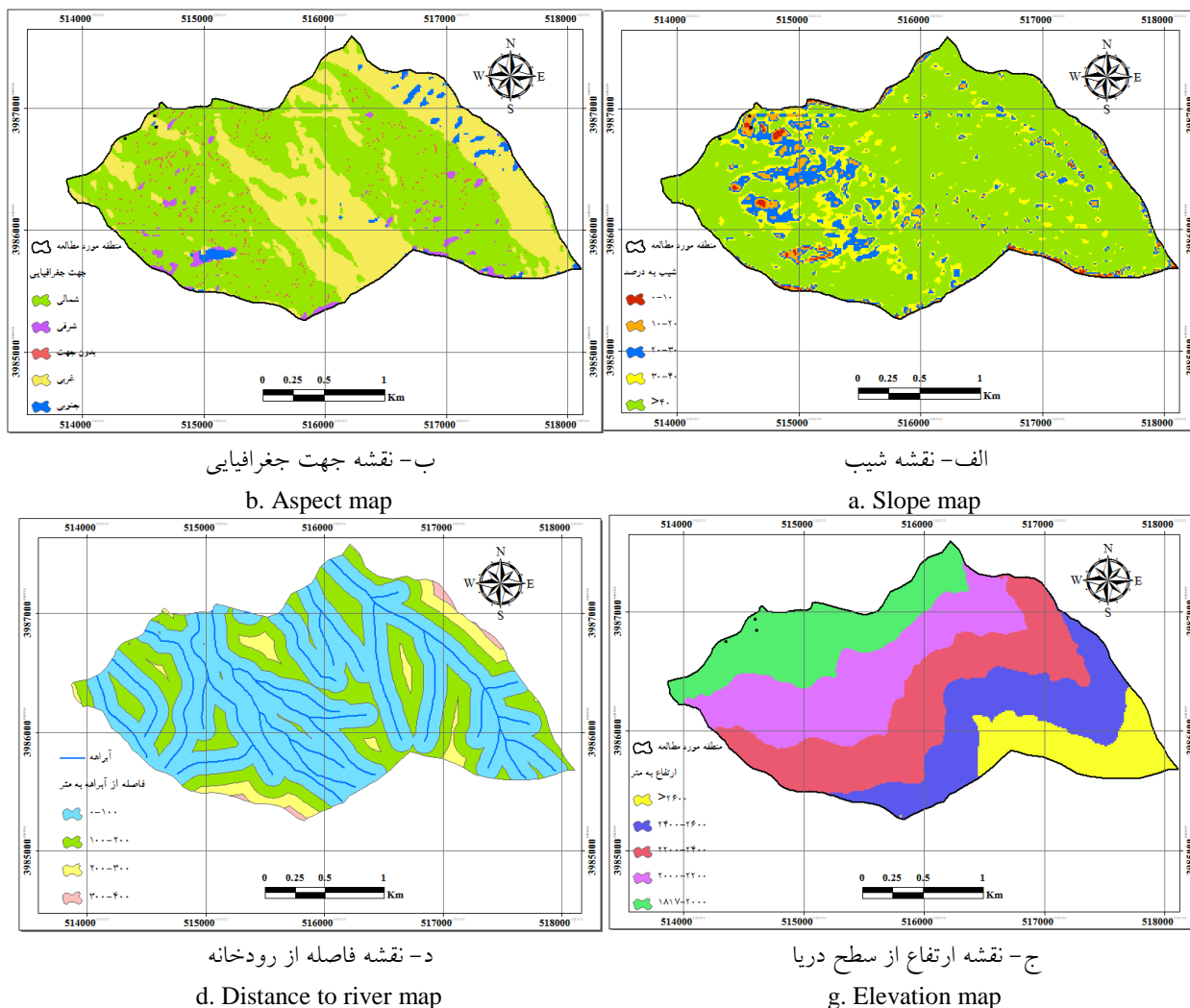
۱- نقشه‌های زیرمعیارها

۴- ادغام نقشه‌های زیرمعیارها و معیارها بر اساس وزن و اهمیت آنها در محیط GIS و تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی

نقشه‌های زیرمعیارهای هر معیار اصلی که هرکدام شامل پنج طبقه رستری بودند، بر اساس وزن و اهمیت به‌دست‌آمده آنها از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و بر اساس دستور Raster calculator در محیط GIS ترکیب وزنی شدند. با ترکیب وزنی نقشه‌های زیرمعیارهای هر معیار اصلی، نقشه آن معیار تهیه شد. به‌عنوان مثال نقشه معیار فیزیوگرافی از ترکیب وزنی نقشه‌های زیرمعیارهای شیب، جهت، ارتفاع و فاصله از رودخانه حاصل شد. نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی نیز از ترکیب وزنی نقشه‌های معیارهای اصلی (فیزیوگرافی، زیست‌شناختی، انسان‌ساخت و اقلیمی) تهیه شد. سپس این نقشه بر اساس دستور Defined Interval و بر اساس ارزش‌های پیکسلی در پنج طبقه خطر (بسیار پرخطر، پرخطر، خطر متوسط، کم‌خطر و بسیار کم‌خطر) طبقه‌بندی شد.

نقشه‌های زیرمعیارهای فیزیوگرافی در شکل ۷ آورده شده است.

نقشه‌های زیرمعیارهای هر یک از معیارهای اصلی در زیر آورده شده است.
نقشه‌های فیزیوگرافی



شکل ۷- نقشه‌های زیرمعیارهای فیزیوگرافی

Figure 7. The physiographic sub-criteria maps

صحت کلی و ضریب کاپا در جدول ۶ آورده شده است.

نقشه‌های زیرمعیارهای زیست‌شناختی در شکل ۸ آورده شده است.

نقشه‌های زیست‌شناختی نقشه کاربری‌های طبیعی در شکل ۸- و نشان داده شده است. تعداد نمونه‌ها برای تعیین صحت کاربری با روش مونه‌بندی تصادفی در جدول ۵ و ارزیابی صحت نقشه کاربری‌های طبیعی با شاخص‌های

جدول ۵- مساحت طبقات کاربری‌های طبیعی و اختصاص نقاط تصادفی نمونه‌بندی‌شده

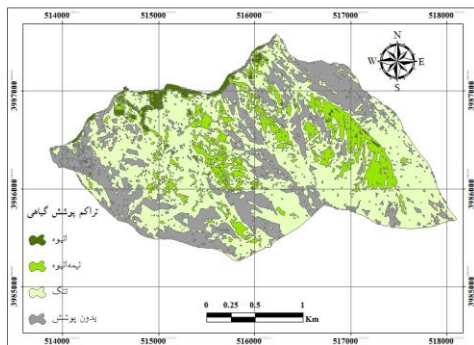
Table 5. The area of natural land covers and allocation of stratified random points

تعداد نقاط اختصاص‌یافته به هر طبقه (مونه)	مساحت (هکتار)	کاربری زمین
Number of points assigned to each class (Strata)	Area (ha)	Land cover
11	121.95	جنگل Forest
24	265.12	مرتع Rangeland
5	56.2	زمین بایر Bare soil
10	105.15	صخره Rock
50	548.42	کل Total

جدول ۶- نتایج ارزیابی صحت نقشه کاربری‌های طبیعی

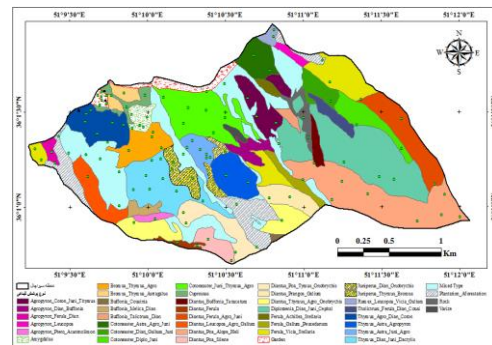
Table 6. The results of accuracy assessment of natural land covers map

ضریب کاپا	صحت کلی	معیار ارزیابی صحت
Kappa Index	Overall Accuracy	Accuracy assessment criterion
0.78	86	نقشه کاربری‌های طبیعی Natural Land covers map



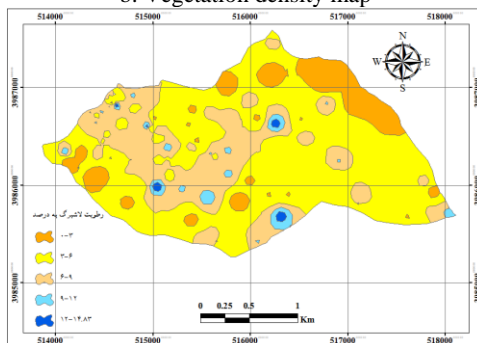
ب- نقشه تراکم پوشش گیاهی

b. Vegetation density map



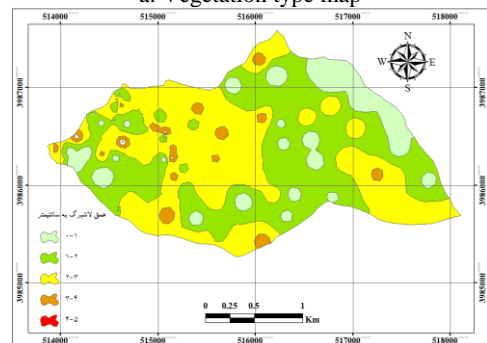
الف- نقشه نوع (تیپ) پوشش گیاهی

a. Vegetation type map



د- نقشه رطوبت لایه برگ

d. Leaf litter moisture map

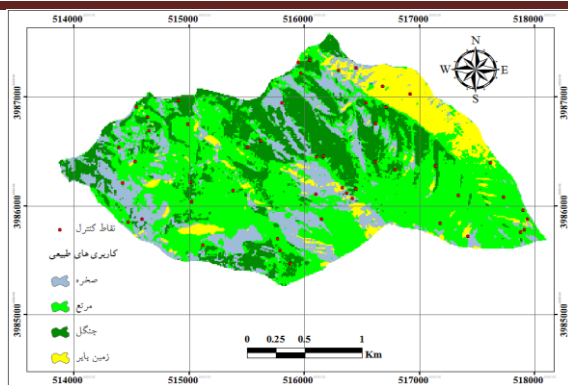


ج- نقشه عمق لایه برگ

g. Leaf litter depth map

شکل ۸- نقشه‌های زیرمعیارهای زیست‌شناختی

Figure 8. The biologic sub-criteria maps



و- نقشه کاربری‌های طبیعی و موقعیت نقاط تصادفی مونه‌بندی‌شده بر روی آن

v. Natural land covers map and location of the stratified random points on it

ادامه شکل ۸.

Continued figure 8.

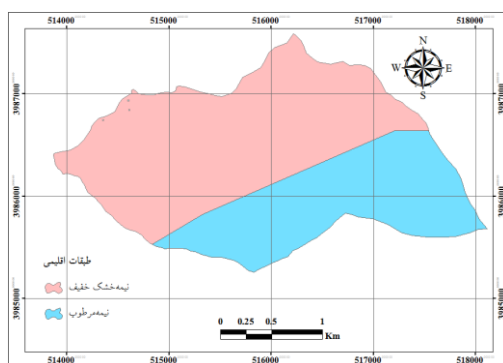
نقشه زیرمعیارهای انسان‌ساخت در شکل ۱۰ ارائه شده

نقشه طبقات اقلیمی

است.

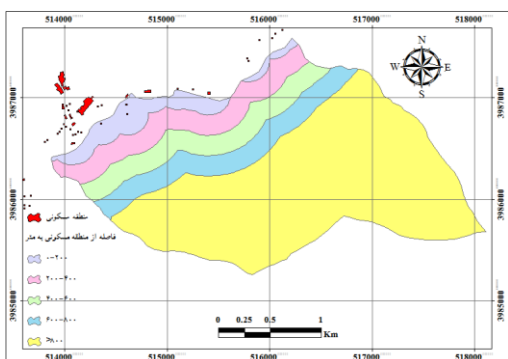
نقشه طبقات اقلیمی در شکل ۹ آورده شده است.

نقشه‌های انسان‌ساخت



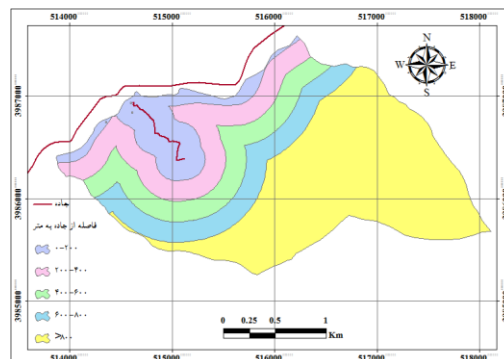
شکل ۹- نقشه طبقات اقلیمی

Figure 9. The climatic classes map



ب- نقشه فاصله از مناطق مسکونی

b. Distance to settlements map



الف- نقشه فاصله از جاده

a. Distance to road map

شکل ۱۰- نقشه‌های زیرمعیارهای انسان‌ساخت

Figure 10. The human-made sub-criteria maps

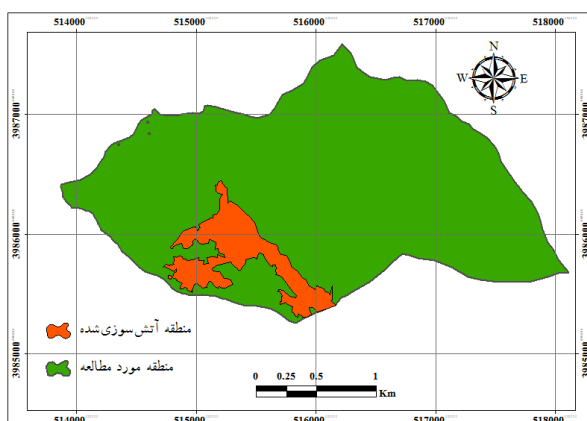
نقشه آتش‌سوزی‌های گذشته

نقشه آتش‌سوزی‌های گذشته در منطقه سیراچال در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

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

نتایج محاسبه نسبت سازگاری ماتریس‌های مقایسه زوجی زیرمعیارها و معیارهای اصلی بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی در جدول ۷ آورده شده است. نتایج نشان‌دهنده این است که نسبت سازگاری (CR)

ماتریس‌های مقایسه زوجی از ۰/۳۱ تا ۰/۰۹ است که مقادیر کمتر از ۰/۱ را به خود اختصاص داده‌اند که نشان‌دهنده سازگاری وزن معیارها است. همچنین وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در جدول ۸ آورده شده است. بر اساس این جدول، وزن معیار انسان‌ساخت (۰/۴۶) بیشتر از دیگر معیارها است.



شکل ۱۱- نقشه آتش‌سوزی‌های گذشته در منطقه سیراچال

Figure 11. The past fire map in Sirachal area

جدول ۷- نسبت سازگاری ماتریس‌های مقایسه زوجی زیرمعیارها و معیارهای اصلی بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی

Table 7. Consistency ratio of paired comparative matrices of criteria and sub-criteria based on Fuzzy AHP

CR= CI/RI	CI= $(\lambda_{max} - n)/(n - 1)$	λ_{max}	معیار Criterion
0.09	0.083	4.25	معیارهای اصلی Main criteria
0.031	0.028	4.08	معیارهای فیزیوگرافی Physiographic criteria
0.032	0.036	5.14	معیارهای زیست‌شناختی Biologic criteria
0.07	0.05	2.05	معیارهای انسانی Human-made criteria

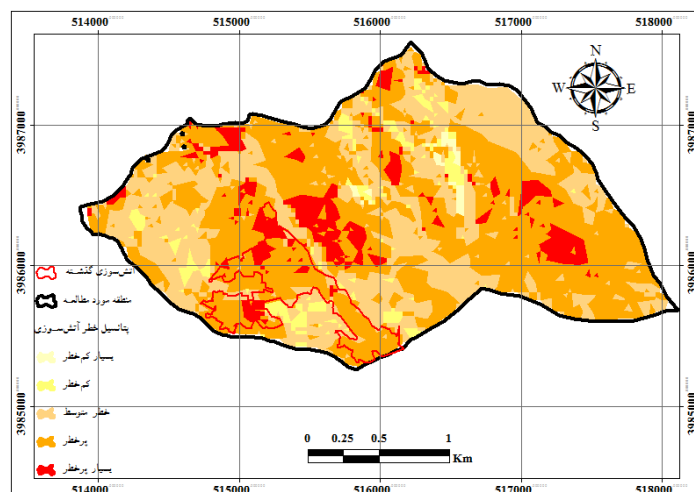
جدول ۸- وزن معیارها و زیرمعیارها بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

Table 8. The weights of criteria and sub-criteria based on Fuzzy AHP

وزن Weight	زیرمعیار Sub-criterion	وزن Weight	معیار Criterion	وزن Weight	زیرمعیار Sub-criterion	وزن Weight	معیار Criterion
0.4	نوع پوشش گیاهی Vegetation type			0.46	شیب Slope		
0.18	تراکم پوشش گیاهی Vegetation density			0.19	جهت Aspect	0.19	فیزیوگرافی Physiography
0.18	عمق لاشبرگ Leaf litter depth	0.24	زیست‌شناختی Biology	0.11	ارتفاع Elevation		
0.14	رطوبت لاشبرگ Leaf litter moisture			0.24	فاصله از رودخانه Distance to river		
0.10	کاربره‌های طبیعی Natural covers			0.68	فاصله از جاده Distance to road		
0.11	طبقات اقلیمی Climatic classes	0.11	اقلیمی Climate	0.32	فاصله از مناطق مسکونی Distance to settlement	0.46	انسان‌ساخت Human-made

پتانسیل خطر نیز در جدول ۹ نشان داده شده است. همچنین نتایج اعتبارسنجی کمی نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی بر اساس آتش‌سوزی‌های گذشته در جدول ۱۰ آورده شده است.

۳- نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی و اعتبارسنجی آن
نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی در منطقه سیراچال و اعتبارسنجی کیفی آن بر اساس آتش‌سوزی‌های گذشته در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مساحت طبقات خطر آتش‌سوزی در منطقه سیراچال بر اساس نقشه



شکل ۱۲- نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی در منطقه سیراچال و اعتبارسنجی آن

Figure 12. The fire risk potential map in Sirachal area and its validation

جدول ۹- مساحت طبقات خطر آتش‌سوزی در نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی

Table 9. The area of fire risk classes in the fire risk potential map

درصد طبقه خطر Percent of risk class	مساحت طبقه خطر (هکتار) Area of risk class (ha)	طبقه خطر Risk class
8.70	47.74	بسیار پرخطر Very high risk
49.85	273.42	پرخطر High risk
36.75	201.51	خطر متوسط Medium risk
3.97	21.76	کم خطر Low risk
0.73	3.99	بسیار کم خطر Very low risk
100	548.42	کل Total

جدول ۱۰- اعتبارسنجی نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی بر اساس آتش‌سوزی‌های گذشته

Table 10. Validation of fire risk potential map based on the past fires

درصد تقریبی طبقه خطر در آتش‌سوزی گذشته Approximate percent of risk class in the past fire	مساحت طبقه خطر در آتش‌سوزی گذشته (هکتار) Area of risk class in the past fire (ha)	طبقه خطر Risk class
14.8	6.61	بسیار پرخطر Very high risk
74.88	33.77	پرخطر High risk
10.4	4.69	خطر متوسط Medium risk
0.001	0.08	کم خطر Low risk
0	0	بسیار کم خطر Very low risk
100	45.16	کل Total

بحث

اقلیمی به ترتیب ۰/۴۶، ۰/۲۴، ۰/۱۹ و ۰/۱۱ بود. بنابراین معیارهای انسان‌ساخت دارای بیشترین تأثیر در خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع منطقه بودند. نتایج پژوهش Vadrevu و همکاران (2010) نیز نشان داد که معیارهای اقتصادی اجتماعی (انسانی) بیشترین تأثیر را در خطر وقوع آتش‌سوزی بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی داشته‌اند. نتایج بسیاری از

پژوهش پیش‌رو برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع سیراچال در استان البرز با استفاده از متغیرهای مختلف و بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، وزن معیارهای انسان‌ساخت، زیست‌شناختی، فیزیوگرافی و

وقوع آتش‌سوزی تأثیر دارد که با نتایج پژوهش پیش‌رو مطابقت دارد.

در مورد زیرمعیارهای انسان‌ساخت، زیرمعیار فاصله از جاده با وزن ۰/۶۸ بیشترین اهمیت را در خطر وقوع آتش‌سوزی داشت، درحالی‌که فاصله از مناطق مسکونی با وزن ۰/۳۲ اهمیت کمتری را در وقوع آتش‌سوزی نشان داد. از این‌رو عامل جاده مهم‌ترین عامل انسان‌ساخت در وقوع آتش‌سوزی جنگل‌های منطقه محسوب می‌شود. اهمیت جاده‌ها در وقوع آتش‌سوزی جنگل توسط پژوهشگران دیگری نیز اثبات شده است (Stolle et al., Jaiswal et al., 2002, Zumbrennen et al., Lozano et al., 2008, al., 2003, Eskandari, 2017, Zarekar et al., 2014, al., 2011, Valdez et al., 2017).

نتایج کلی این پژوهش نشان داد که زیرمعیارهای شیب و فاصله از رودخانه، نوع و تراکم پوشش گیاهی و فاصله از جاده دارای بیشترین اهمیت (وزن) در خطر وقوع آتش‌سوزی بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی بوده و از این‌رو بیشترین تأثیر را در خطر وقوع آتش‌سوزی داشته‌اند.

نتایج آنالیز نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی نشان داد که از مجموع مساحت حدود ۵۴۸,۴۲ هکتاری منطقه سیراچال، ۸/۷ درصد از منطقه پتانسیل خطر بسیار زیاد و ۴۹/۸۵ درصد آن پتانسیل خطر زیاد برای آتش‌سوزی دارد. همچنین ۳۶/۷۵ درصد از منطقه دارای پتانسیل خطر متوسط، ۳/۹۷ درصد از منطقه دارای پتانسیل کم (کم‌خطر) و ۰/۷۳ درصد از منطقه دارای پتانسیل بسیار کم (بسیار کم‌خطر) برای آتش‌سوزی است؛ بنابراین بیشتر منطقه (۵۸/۵۵ درصد) پتانسیل زیاد (پرخطر و بسیار پرخطر) برای آتش‌سوزی دارد.

پژوهش‌های دیگر نیز نقش عوامل انسان‌ساخت را در خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل‌ها تأیید کرده‌اند (Stolzenburg, 2001, Martinez et al., 2009, Eskandari and Chuvieco, 2015) که با نتایج پژوهش پیش‌رو هم‌خوانی دارد.

در مورد زیرمعیارهای فیزیوگرافی، زیرمعیار شیب با وزن ۰/۴۶ بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است و پس از آن به ترتیب زیرمعیارهای فاصله از رودخانه (۰/۲۴)، جهت (۰/۱۹) و ارتفاع (۰/۱۱) بیشترین وزن را داشتند. نتایج پژوهش‌های دیگر نیز نشان داد که شیب مهم‌ترین عامل توپوگرافی مؤثر در وقوع آتش‌سوزی بوده است (Jaiswal et al., 2002, Jaafari and Mafi Gholami, Vadrevu et al., 2010, 2017). عامل فاصله از رودخانه نیز عامل مؤثری در ارزیابی خطر وقوع آتش‌سوزی در برخی از پژوهش‌ها بوده است (Almedia, 1994, Eskandari and Miesel, 2017).

در مورد زیرمعیارهای زیست‌شناختی نیز زیرمعیار نوع پوشش گیاهی با وزن ۰/۴۰ بیشترین اهمیت را داشته است، سپس تراکم پوشش گیاهی (۰/۱۸)، عمق لاشبرگ (۰/۱۸) و رطوبت لاشبرگ (۰/۱۴) بیشترین وزن را نشان داده و بنابراین مهم‌ترین عوامل زیست‌شناختی مؤثر در خطر وقوع آتش‌سوزی بوده‌اند. درحالی‌که زیرمعیار کاربری طبیعی با وزن ۰/۱۰ کمترین اهمیت را در خطر وقوع آتش‌سوزی داشته است. نتایج بسیاری از پژوهش‌های دیگر نیز نشان داده که پوشش گیاهی از نظر نوع گونه و تراکم (Rollins et al., 2004, Jaiswal et al., 2002, Sowmya and Vadrevu et al., 2010, Somashekar, 2010, Satir et al., 2016) و مقدار رطوبت سوخت (Jurdao and Chuvieco, 2012, Chuvieco et al., 2014, Valdez et al., 2017) در

چالش‌های پژوهش پیش‌رو بود. با این حال در شرایط فعلی از داده‌های آتش‌سوزی موجود، برای اعتبارسنجی نقشه خطر آتش‌سوزی استفاده شد. از آنجایی که تکمیل پایگاه داده‌های آتش‌سوزی، روش‌های اعتبارسنجی را بهبود می‌بخشد، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، پایگاهی از داده‌های آتش‌سوزی‌های گذشته در مناطق البرز جنوبی تهیه شود که برای پژوهش‌های پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع این مناطق بسیار سودمند خواهد بود.

با توجه به اعتبار مطلوب روش مورد استفاده و نقشه پتانسیل تهیه‌شده در این پژوهش، پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های آینده در جنگل‌ها و مراتع منطقه سیراچال با استفاده از نقشه پتانسیل تهیه‌شده امکان‌پذیر خواهد بود. بدین ترتیب، همان‌طور که در گذشته ۸۹/۶ درصد از آتش‌سوزی‌های به وقوع پیوسته در مناطق با خطر بسیار زیاد و زیاد آتش‌سوزی (در نقشه پتانسیل تهیه‌شده) اتفاق افتاده است، در آینده نیز به احتمال زیاد، آتش‌سوزی‌ها در مناطق با خطر زیاد رخ خواهد داد. بنابراین اقدامات کنترلی برای پیشگیری از وقوع آتش‌سوزی‌های آینده در مناطق پرخطر آتش‌سوزی باید با حساسیت بیشتری انجام گیرد.

References

- Adab, H., K.D. Kanniah & K. Solaimani, 2013. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Natural Hazards*, 65: 1723-1743.
- Akbarzadeh, M. 1994. Provision of vegetation cover map of Sirachal area using floristic and physiognomic method. Research Institute of Forests and Rangelands Press, Tehran, 71 p. (In Persian)
- Almedia, R. 1994. Forest fire risk areas and definition of the prevention priority planning actions using GIS. Proceedings of the Fifth European Conference and Exhibition on

نتایج اعتبارسنجی نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی با استفاده از آتش‌سوزی‌های گذشته نشان داد که مناطقی که قبلاً در منطقه دچار حریق 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. درحالی‌که 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). این نتیجه نشان‌دهنده اعتبار زیاد روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در ارزیابی خطر وقوع آتش‌سوزی و صحت زیاد نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی تهیه‌شده بر اساس آن است. نتایج پژوهش‌های دیگری نیز اعتبار مطلوب روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در ارزیابی خطر آتش‌سوزی در مناطق جنگلی را نشان داده است (Vadrevu *et al.*, 2010, 2013, Zarekar *et al.*, 2017, Eskandari) که با نتایج پژوهش پیش‌رو هم‌خوانی دارد. البته لازم به ذکر است که عدم وجود داده‌های کافی آتش‌سوزی‌های گذشته، همانند پژوهش‌های مشابه، از

- Geographic Information Systems, EGIS 94, Utrecht, Netherlands. pp. 1700-1706.
- Alonso-Betanzos, A., O. Fontenla-Romero, B. Guijarro-Berdinas, E., Hernandez- Pereira, E. Canda, J. Jimenez, J. Luis Legido, S. Muniz, C. Paz-Andrade & M.I. Paz-Andrade, 2002. A neural network approach for forest fire risk estimation. Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence, Lyon, France. pp. 643-647.
- Atesoglu, A. 2014. Forest hazard identifying, mapping using satellite imagery-geographic information system and analytic hierarchy process: Bartin-Turkey. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 15: 715-725.

- Benker, S.Ch., R.P. Langford & T.L. Pavlis, 2011. Positional accuracy of the Google Earth terrain model derived from stratigraphic unconformities in the Big Bend region, Texas, USA. *Geocarto International*, 26(4): 291-303.
- Beygi Heidarlou, H., A. Banj Shafiei & M. Erfanian, 2014. Forest fire risk mapping using analytical hierarchy process technique and frequency ratio method (Case study: Sardasht Forests, NW Iran). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 22(4): 559-573. (In Persian)
- Chang, D.Y. 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95: 649-655.
- Chuvieco, E. & R.G. Congalton, 1989. Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote Sensing of Environment*, 29: 147-159.
- 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. & 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.
- Esmaeili Sharif, M., H. Jalilvand, M. Amoozad, A.A. Jafari & S.M. Moslemi SayedMahale, 2018. The effect of ecological factors on fire in Hyrcanian forests (Case study: forest areas of Neka, Mazandaran, Iran). *Journal of Forest Research and Development*, 4 (1): 113-129.
- FAO, 2007. Fire Management-Global Assessment 2006, A Thematic Study Prepared in the Framework of the Global Forest Resources Assessment 2005. FAO Press, Rome.
- Farah, A. & D. Algarni, 2014. Positional accuracy assessment of GoogleEarth in Riyadh. *Artificial Satellites*, 49(2): 101-106.
- Ghodspour, S.M. 2011. Analytical Hierarchy Process (Ninth Edition). Amirkabir University Press, Tehran, 220 p. (In Persian)
- Goudarzi, M.A. & R.J. Landry, 2017. Assessing horizontal positional accuracy of GoogleEarth imagery in the city of Monteral, Canada. *Geodesy and Cartography*, 43(2): 56-65.
- Guo F., L. Zhang, S. Jin, M. Tigabu, Zh. Su & W. Wang, 2016. Modeling Anthropogenic Fire Occurrence in the Boreal Forest of China Using Logistic Regression and Random Forests. *Forests*, 7: 250, DOI: 10.3390/f7110250
- Huang, B., C. Xie & R. Tay, 2010. Support vector machines for urban growth modeling. *GeoInformatica*, 14: 83-99.
- Jaafari A. & D. Mafi Gholami, 2017. Wildfire hazard mapping using an ensemble method of frequency ratio with Shannon's entropy. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 25(2): 232-243. (In Persian)
- 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.
- Jazireyi, M.H. 2005. Forest Protection. Press Institute of Tehran University, Tehran, 231 p. (In Persian)
- 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.
- Kazemi, S.M. 2005. Fire and forest ecosystems. *Livestock, Agriculture and Industry*, 70: 46-56. (In Persian)
- Leuenberger, M., M. Kanevski & C.D. Vega Orozco, 2013. Forest Fires in a Random Forest. *Geophysical Research Abstracts*,

- EGU General Assembly, Vienna, Austria. pp. 32-38.
- 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.
 - Maleki, D. 2010. Urban development modeling using cellular automata method. M.Sc. thesis, Khajeh Nasir University of Technology, Tehran, 122 p. (In Persian)
 - 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.
 - Mehregan, M.R. 2018. Operational research: linear programming and its applications. Academic Books Publishing, Tehran, 524 p.
 - Mustafa, A., A. Rienow, I. Saadi, M. Cools & J. Teller, 2018. Comparing support vector machines with logistic regression for calibrating cellular automata land use change models. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1): 391-401.
 - 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.
 - Potere, D. 2008. Horizontal Positional Accuracy of Google Earth's High-Resolution Imagery Archive. *Sensors*, 8: 7973-7981.
 - Pulighe, G., V. Baiocchi & F. Lupia, 2015. Horizontal accuracy assessment of very high resolution Google Earth images in the city of Rome, Italy. *International Journal of Digital Earth*, 9(4): 342-362.
 - 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.
 - Santiago, I.T.F. & N. Kheladze, 2011. GIS wildland fire hazard modeling in Georgia. MATRA project report, Caucasus Environmental NGO Network, 98 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.
 - Smith, M.J., M.F. Goodchild & P.A. Longley, 2007. Geospatial analysis- a comprehensive guide to principles, techniques and software tools. Troubador Publishing Ltd, Leicester, 516 p.
 - Song, Ch., M.P. Kwan, W. Song & J. Zhu, 2017. A Comparison between Spatial Econometric Models and Random Forest for Modeling Fire Occurrence. *Sustainability*, 9: 819, DOI: 10.3390/su9050819
 - 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.
 - Vakalis, D., H. Sarimveis, C.T. Kiranoudis, A. Alexandridis & G.V. Bafas, 2004. A GIS based operational system for wildland fire crisis management, I. Mathematical modelling and simulation. *Applied Mathematical Modelling*, 28(4): 389-410.
 - 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.
 - Vasconcelo, M.J., S. Silva, M. Tome, M. Alvim & J.M.C. Perelra, 2001. Spatial prediction of fire ignition probabilities: comparing logistic regression and neural networks. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(1): 73-81.

- Vasilakos, C., K. Kalabokidis, J. Hatzopoulos & I. Matsinos, 2009. Identifying wildland fire ignition factors through sensitivity analysis of a neural network. *Natural Hazards*, 50(1): 125-143.
- Vazquez, A. & J.M. Moreno, 2001. Spatial distribution of forest fires in Sierra de Gredos (central Spain). *Forest Ecology and Management*, 147(1): 55-65.
- Zarekar, A., B. Kazemi Zamani, S. Ghorbani, M. Ashegh Moalla & H. Jafari, 2013. Mapping spatial distribution of forest fire using MCDM and GIS (Case study: three forest zones in Guilan province). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 21 (2): 218-230. (In Persian)
- Zobeiri, M. 2008. Forest Biometry. Tehran University Press, Tehran, 411 p. (In Persian)
- Zumbrunnen, T., G.B. Pezzatic, 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.

Evaluating and mapping the fire risk in the forests and rangelands of Sirachal using fuzzy analytic hierarchy process and GIS

S. Eskandari^{*1} and M. Khoshnevis²

1- Assistant Professor, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, I. R. Iran. (s.eskandari@rifr.ac.ir)

2- Senior Research Expert, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, I. R. Iran. (khoshnevis_mostafa@yahoo.com)

Received: 22.04.2019

Accepted: 20.06.2019

Abstract

The current research was performed to evaluate and to map the fire risk occurrence in the forests and rangelands of Sirachal in Alborz province using fuzzy analytic hierarchy process. The used criteria included four main criteria (physiographic, biologic, climatic and human-made) and their sub-criteria. The maps of all these factors were provided using digital elevation model, satellite images, ground sampling and available data. Also, the map of past fires during past decade was prepared by existence data and GPS sampling. Then, the weight of the effective criteria in fire occurrence was calculated using fuzzy analytic hierarchy process. The fire risk potential map was prepared using the weighted combination of the effective criteria maps. Finally, the fire risk potential map was validated using the past fires and its accuracy was evaluated in identifying the fire high-risk areas. The results showed that among the main criteria, human-made criterion had the most impact (weight) on the fire occurrence risk in the area. Also, the sub-criteria slope and distance from river, type and density of vegetation and distance from the road had the highest importance (weight) in the fire occurrence risk based on fuzzy analytic hierarchy process. According to the results of the fire risk potential map, 58.55 percent of the study area has the high-risk potential for fire.

Keywords: Fire risk potential map, Ground sampling, Human-made criterion, Southern Alborz.

* Corresponding author

Tel: +989198923256