

## تحلیل عدم قطعیت ریسک مخاطره آتش‌سوزی جنگل مبتنی بر نظریه شهود دمپستر - شافر (مطالعه موردی: بخشی از جنگل‌های کرمانشاه)

زینب نیسانی سامانی

دانشجوی دکتری GIS، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛

تهران، ایران

علی اصغر آل شیخ\*

استاد دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ تهران، ایران

نجمه نیسانی سامانی

دانشیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران؛ تهران، ایران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۸/۵ - تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۱۰/۲۳)

### چکیده

آتش‌سوزی جنگل‌ها از مخاطرات مهمی است که ممکن است عامل انسانی یا غیرانسانی داشته باشد و موجب مشکلات زیادی در چرخه اکوسیستم، تخریب زیرساخت‌های جنگل، فرسایش خاک و از بین رفتن حیات بسیاری از موجودات زنده شود. یکی از راه‌های مدیریت آتش‌سوزی جنگل و کاهش تأثیرات مخرب آن، پیش‌بینی خطر در مناطق مستعد آتش‌سوزی است. به این منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های مستعد با تمرکز بیشتر بر مناطق پرخطر، ایجاد زیرساخت‌های مناسب برای آموزش آتش‌نشانان و در نهایت برنامه‌ریزی برای مبارزه با آتش‌سوزی با هدف کاهش آسیب و حفظ ایمنی ضرورت دارد. هدف این مقاله، مدل‌سازی پتانسیل آتش‌سوزی در مناطق جنگلی با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از وزن‌دهی معیارهای مؤثر مکانی است. نوآوری تحقیق حاضر، به کارگیری نظریه شهود دمپستر - شافر به منظور کاهش عدم قطعیت ناشی از وزن‌دهی معیارها توسط کارشناسان است. در این رویکرد با توجه به در نظر گرفتن توابع باور و موجه بودن و تجمیع توابع سطوح مختلف عدم قطعیت مدیریت می‌شود که با توجه به تعداد زیاد زیرمعیارها می‌تواند بسیار مؤثر باشد. ابتدا معیارهای توپوگرافی، اقلیمی، انسانی و پوشش گیاهی مدنظر قرار گرفت و زیرمعیارهای مربوط شناسایی شد. معیارها و زیرمعیارها در سه سطح تعریف شدند. در سطح اول چهار معیار، در سطح دوم ده زیرمعیار و در سطح سوم بیست‌وهفت زیرمعیار در نظر گرفته شد. همچنین به منظور وزن‌دهی معیارهای مؤثر از نظر سی کارشناس استفاده شد. با استفاده از پرسشنامه‌های تکمیل‌شده توسط متخصصان و وزن هر یک از معیارها و زیرمعیارهای مربوط، اوزان نهایی با استفاده از نظریه شهود دمپستر - شافر محاسبه شد. نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی با استفاده از روش‌های همپوشانی وزن‌دار و با تلفیق لایه‌ها در چهار طبقه گروه‌بندی شد. نتایج نشان داد که مؤثرترین شاخص‌ها در وقوع آتش‌سوزی به ترتیب معیار پوشش گیاهی و سپس معیار انسانی است. وزن معیار انسانی ۰/۳۰۱ و وزن پوشش گیاهی ۰/۲۵۹۵ محاسبه شد. مقایسه نقشه حاصل با آتش‌سوزی‌های رخ داده در منطقه پژوهش نشان می‌دهد که طبقات پرخطر و خطرناک همپوشانی زیادی با نقاط حاصل از این تحقیق دارند و مدل پیشنهادی می‌تواند با دقت زیاد وقوع آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع را پیش‌بینی کند. همچنین آزمون مدل توسط منحنی مشخصه عملکرد سیستم دقت زیاد مدل با مقدار ۹۲ درصد را نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** آتش‌سوزی، تحلیل، عدم قطعیت، نظریه دمپستر - شافر، همپوشانی وزن‌دار.

## مقدمه

هدف این مقاله، مدل سازی پتانسیل آتش سوزی در مناطق جنگلی با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از وزن دهی معیارهای مؤثر مکانی براساس نظریه شهود دمپستر- شافر است. تحقیقات پژوهشگران نشان می دهد که روش های متنوعی برای مدل سازی آتش سوزی و تهیه نقشه های پتانسیل یابی آن تدوین و ارائه شده که هر یک ویژگی های خاص خود را دارد. نادرپور و همکاران (۲۰۱۷) خطر آتش سوزی جنگل مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی را با ادغام داده های موجودی جنگل ملی و تجزیه و تحلیل تنوع مکانی و زمانی آن ارزیابی کردند. آنها ابتدا چارچوبی مفهومی برای نقشه برداری خطر آتش سوزی با ادغام پایگاه داده فهرست منابع جنگلی ملی ایجاد کردند. خطر آتش سوزی جنگلی بالقوه و نقشه مناطق خطر در چین با استفاده از GIS ارزیابی و در نهایت تغییرات مکانی- زمانی خطر آتش سوزی جنگل با روش تحلیل مکانی بررسی شد [۱۴]. نگوک-تاج و همکاران (۲۰۱۸) الگوی فضایی خطر آتش سوزی جنگل های گرمسیری را در منطقه توان چائو در ویتنام با استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین پیشرفته مبتنی بر GIS ارزیابی کردند. در این پژوهش، خطر آتش سوزی با به کارگیری ماشین های بردار پشتیبان، جنگل های تصادفی (RF)<sup>۱</sup> و پیش پردازش چندلایه شبکه عصبی<sup>۲</sup> تحلیل شد. مدل MLP-Net بهترین پیش بینی عملکرد را داشت و پس از آن مدل RF دقیق ترین مدل معرفی شد [۱۶]. بوی و همکاران (۲۰۱۹) تحلیل الگوی فضایی و پیش بینی آتش سوزی جنگل را با استفاده از روش های جدید یادگیری ماشین، Spline و الگوریتم بهینه سازی گرده افشانی گل ها<sup>۳</sup> در استان لئوسای ویتنام انجام دادند. هدف آنها معرفی نوعی روش جدید یادگیری ماشین برای تحلیل و پیش بینی الگوهای مکانی خطر آتش سوزی جنگل بود. نتایج نشان داد که عملکرد پیش بینی مدل مورد نظر مناسب است و کارایی بهتری از دیگر روش های عددی دارد [۳]. گونزالس- سانچیس و همکاران (۲۰۱۹)، تحقیقی درباره مدیریت جنگل های کم بازده در مقیاس حوضه آبریز با در نظر گرفتن خطر آب، زیست توده و آتش سوزی برای دستیابی به امکان سنجی اقتصادی انجام دادند. براساس این تحقیق، مدیریت سنتی جنگل برای جنگل های نیمه خشک بدون سود<sup>۴</sup> است. مدیریت جنگل برای تولید آب، آب را افزایش می دهد، اما به اندازه ای نیست که سود آور باشد. از جمله زیست توده و خطر آتش سوزی و کاهش انتشار نسبت سود به هزینه را افزایش می دهد. مدیریت باید چندمعیاره و در مقیاس حوضه باشد تا

1. Random Forest
2. MLP-Net
3. differential flower pollination optimized
4. non-profitable

منافع را به حداکثر برساند [۱۰]. زی هنگ و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی یک مدل عملیاتی جدید با الگوریتم مورچه معدنچی<sup>۱</sup> برای پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها در مناطق غنی از ابر ارائه داده‌اند. در این پژوهش، مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی با مدل ملی پیش‌بینی ریسک چین و همچنین مقایسه مدل پیشنهادی با دیگر مدل‌های پیش‌بینی ریسک با دو الگوریتم یادگیری ماشین کلاسیک انجام گرفت. مدل مبتنی بر الگوریتم مورچه معدنی، مؤثرتر و قابل اعتمادتر بود [۲۹]. آنجلیکا مونجاراس-وگا و همکاران (۲۰۲۰) پیش‌بینی تراکم کرنل آتش‌سوزی جنگل در مقیاس‌های چندگانه با رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی در مکزیک را ارائه کرده‌اند. به این منظور وقوع آتش‌سوزی با GWR برای کرنل و تراکم شبکه منظم پیش‌بینی شد. عوامل انسانی و تراکم کربن پوشش گیاهی زیاد زمین بر وقوع آتش‌سوزی تأثیر گذاشت. دقت مدل GWR برای تراکم کرنل در مقایسه با شبکه معمولی بیشتر بود. بهترین سازش بین دقت مدل و جزئیات فضایی در ۲۰-۱۵ کیلومتر به‌دست آمد [۱۲].

عباس‌زاده طهرانی و همکاران (۱۴۰۰) به‌منظور پایش و شناسایی آتش‌سوزی جنگل‌ها براساس دسته‌بندی‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان عملکرد پردازش تک‌زمانه و چندزمانه را قبل و بعد و در زمان رویداد مخاطره تصاویر ماهواره لندست ۸ ارزیابی کردند. منطقه پژوهش جنگل‌های پارادایز در ایالت کالیفرنیا بود. نتایج نشان داد که روش طبقه‌بندی جنگل تصادفی نسبت به روش ماشین بردار پشتیبان توانایی بیشتری برای تفکیک آتش از غیرآتش دارد [۱].

سیوریکایا و کوچوک (۲۰۲۱) در تحقیقی، مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها را براساس فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی مبتنی بر GIS و تحلیل آماری در منطقه مدیترانه ارائه دادند. نقشه خطر آتش‌سوزی براساس روش AHP<sup>۲</sup> و شاخص آماری تهیه شد. نقشه خطر آتش‌سوزی پیش‌بینی‌شده توسط ۹۹۰ نقطه آتش‌سوزی تاریخی جنگل تأیید شد. دقت نقشه خطر آتش‌سوزی با توجه به منحنی ROC تأیید شد. نقشه خطر آتش‌سوزی پیش‌بینی‌شده فرصت شایان توجهی برای مبارزه مؤثر با آتش‌سوزی جنگل دارد [۲۴]. شو و همکاران (۲۰۲۱) تحقیقی با هدف ایجاد نقشه خطر آتش‌سوزی جنگلی برای پارک جنگلی ملی نانجینگ لائوشان انجام دادند. مدل خطر آتش‌سوزی جنگل توسط عواملی که تأثیر زیادی بر احتمال ایجاد آتش‌سوزی در لائوشان دارند ساخته شده است. نتیجه نشان می‌دهد که دقت نقشه ریسک

---

1. ant-miner  
2. Analytical Hierarchical Process

۷۶/۶۵ درصد است. از آنجا که اهمیت عوامل در حوزه‌های مختلف مطالعاتی ناهماهنگ است، باید حد اهمیت هر یک از عوامل لائوشان محاسبه شود [۲۸].

در هیچ‌یک از تحقیقات روشی برای مدل‌سازی عدم قطعیت ناشی از نظر کارشناسان درباره معیارها ارائه نشده است. بر این اساس، نوآوری تحقیق حاضر، به‌کارگیری نظریه شهود دمپستر- شافر به‌منظور کاهش عدم قطعیت ناشی از وزن‌دهی معیارها توسط کارشناسان است. ضرورت اجرای این تحقیق با توجه به تعداد زیاد زیرمعیارها مدیریت عدم قطعیت با استفاده از به‌کارگیری همزمان توابع باور و موجه بودن است که امکان مدیریت عدم قطعیت را با توجه به اهمیت بحث پیش‌بینی آتش‌سوزی فراهم می‌کند.

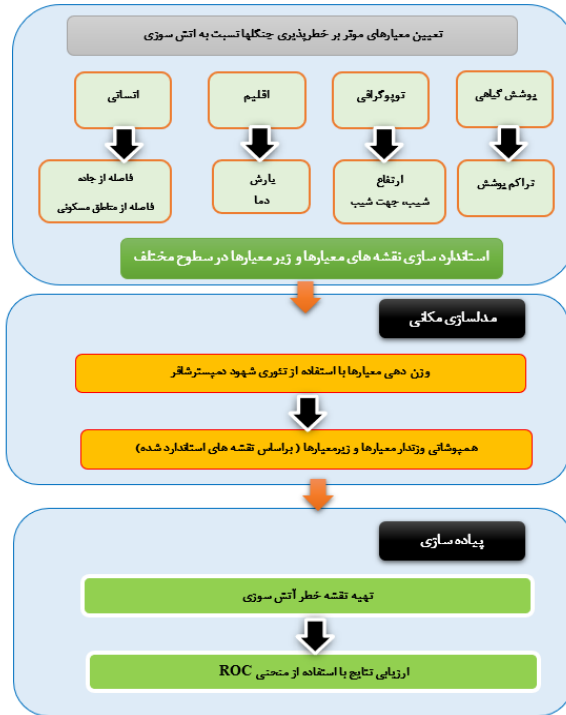
### روش تحقیق

در شکل ۱ روند این تحقیق نشان داده شده است. ابتدا معیارهای مؤثر به‌همراه زیرمعیارهای مرتبط با بررسی تحقیقات پیشین و همچنین نظر کارشناسان شناسایی شد؛ سپس با به‌کارگیری روش دمپستر شافر فرایند وزن‌دهی انجام گرفت. به‌منظور وزن‌دهی معیارهای مؤثر از نظر سی کارشناس استفاده شد. در نهایت همپوشانی وزن‌دار معیارها انجام گرفت و نقشه خطر آتش‌سوزی تهیه شد. نتایج با استفاده از منحنی ROC ارزیابی شد.

### - تعیین معیارهای مؤثر

به‌منظور شناسایی و تعیین معیارها و زیرمعیارهای مؤثر از نتایج تحقیقات پیشین و نظر کارشناسان استفاده شد [۱۳]. در نهایت چهار معیار توپوگرافی، اقلیمی، انسانی و پوشش گیاهی مدنظر قرار گرفت. زیرمعیارها مطابق جدول ۱ تعیین شد. برای نرمال‌سازی معیارهای کمی همچون بارش، دما و فاصله از مناطق مسکونی که تأثیر مستقیم بر خطر آتش‌سوزی دارند از رابطه ۱ استفاده شد. معیارها و زیرمعیارها در سه سطح تعریف شدند. در سطح اول چهار معیار، در سطح دوم ده زیرمعیار و در سطح سوم بیست‌وهفت زیرمعیار در نظر گرفته شد.

سپس با استفاده از نظر سی کارشناس متخصص، معیارها و زیرمعیارها در سطوح مختلف نسبت به یکدیگر و براساس درجه اهمیتشان در خطرپذیری آتش‌سوزی برپایه خصوصیات حوضه جنگل‌های واقع در شهرهای اسلام‌آباد غرب و حمیل رتبه‌بندی شدند. با توجه به اینکه عدم قطعیت در نظر کارشناسان متخصص وجود دارد، از نظریه شهود و قاعده دمپستر- شافر برای ادغام نظرها، رفع عدم قطعیت و محاسبه درجه اهمیت هر یک از زیرمعیارها و معیارها استفاده شد.



شکل ۱. فلوچارت روش تحقیق

جدول ۱. معیارها و زیرمعیارهای مؤثر بر آتش‌سوزی

توصیف	معیار
پوشش گیاهی همان ماده سوختنی قابل اشتغال است و محیط را برای آتش‌سوزی مساعد می‌کند.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• پوشش گیاهی</li> <li>○ جنگل انبوه</li> <li>○ جنگل تنک</li> <li>○ مراتع</li> </ul>
احتمال آتش‌سوزی در حوالی مناطق مسکونی بیشتر است، گرچه آتش‌سوزی در این مناطق سریع‌تر اطفاء می‌شود. در نزدیکی جاده‌ها فعالیت انسانی بیشتر است. در نتیجه در این مناطق احتمال آتش‌سوزی نیز زیاد است.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• انسانی</li> <li>○ فاصله از منطقه مسکونی</li> <li>○ فاصله از جاده</li> </ul>
با افزایش این دو متغیر احتمال آتش‌سوزی افزایش می‌یابد.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• اقلیم</li> <li>○ دما</li> <li>○ بارش</li> </ul>
جهت شیب بر میزان دریافت نور و در نتیجه میزان خشکی بر وقوع آتش‌سوزی تأثیرگذار است (جهت‌های جنوبی نور بیشتری دریافت می‌کنند و احتمال آتش‌سوزی در این جهت بیشتر است). در ارتفاعات پایین‌تر، به دلیل دسترسی انسان احتمال آتش‌سوزی بیشتر است.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• توپوگرافی</li> <li>○ جهت شیب</li> <li>○ شیب</li> <li>○ ارتفاع</li> </ul>

## - نظریه شهود و قاعده دمپستر - شافر

نظریه دمپستر - شافر (DST)<sup>۱</sup> یک نظریه ریاضی شواهد است که توسط دمپستر (۱۹۶۷) معرفی و توسط شافر (۱۹۷۶) بسط داده شد. در فضای گسسته محدود، این نظریه را می‌توان به صورت تعمیم نظریه احتمال تفسیر کرد که در آن احتمالات به مجموعه‌ها نسبت داده می‌شوند. در نظریه احتمال کلاسیک، شواهد تنها با یک رویداد ممکن مرتبط است. اما در DST شواهد را می‌توان با چند رویداد ممکن یا مجموعه‌ای از رویدادها مرتبط کرد. در جایی که شواهد به اندازه کافی برای تخصیص احتمالات به رویدادهای مجزا کافی باشد، این مدل به رابطه احتمالی کلاسیک مرتبط می‌شود. از مهم‌ترین ویژگی‌های نظریه مذکور طراحی مدل به گونه‌ای است که با سطوح مختلف دقت در مورد اطلاعات اجرا می‌شود و نیازی به فرضیه‌های بیشتری برای ارائه اطلاعات نیست. همچنین امکان نمایش مستقیم عدم قطعیت پاسخ‌های سیستم را فراهم می‌کند که در آن یک ورودی نادقیق را می‌توان با یک مجموعه یا یک بازه مشخص کرد و خروجی حاصل یک مجموعه یا یک بازه است [۲، ۶، ۲۲].

دلیل استفاده از نظریه دمپستر - شافر ویژگی‌های زیر است: ۱. کاربرد گسترده این نظریه در ده سال گذشته؛ ۲. توسعه زیاد این نظریه در میان نظریه‌های غیرکلاسیک برای توصیف عدم قطعیت؛ ۳. تطابق این نظریه برای ارائه و ترکیب انواع مختلف شواهد به‌دست‌آمده از منابع متعدد؛ ۴. ارتباط این نظریه با نظریه احتمال کلاسیک و نظریه مجموعه [۷، ۲۲]. از مفاهیم مقدماتی موجود در رابطه با شواهد، می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

## • چارچوب تشخیص

فرض کنید  $\Theta$  یک مجموعه متناهی از عناصر است (در این مقاله منظور از عناصر متناهی، معیارها و زیرمعیارهاست). یک عنصر می‌تواند یک فرضیه، یک هدف یا موردی از وضعیت یک سیستم باشد.  $\Theta$  چارچوب تشخیص است.  $2^\Theta$  نیز مجموعه همه زیرمجموعه‌های  $\Theta$  است. تابعی به فرم  $Bel: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  که در رابطه‌های ۱، ۲ و ۳ برقرار باشد، یک تابع باور روی  $\Theta$  نامیده می‌شود [۲۲، ۲۷].

$$Bel(\emptyset) = 0 \quad (1)$$

$$Bel(\Theta) = 1 \quad (2)$$

$$\text{Bel}(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) \geq \sum_i \text{Bel}(A_i) - \sum_{i < j} \text{Bel}(A_i \cap A_j) + \dots + (-1)^{n+1} \text{Bel}(A_1 \cap \dots \cap A_n) \quad (3)$$

رابطه ۵ به‌ازای هر  $n$  (یک عدد صحیح مثبت) و هر مجموعه از زیرمجموعه‌های  $\Theta$  صدق می‌کند. برای هر زیرمجموعه  $A$  از  $\Theta$  مقدار  $\text{Bel}(A)$  نشان‌دهنده میزان باور بر وجود واقعیت در مجموعه  $A$  است. قوانین بالا این درجات باور را مدیریت می‌کنند [۲۲، ۲۳].

• تابع باور و موجه بودن

باوری که به یک مجموعه اختصاص داده می‌شود به هر زیرمجموعه از آن نیز متعلق است. تعریف این نظریه به‌صورت زیر است. اگر  $\Theta$  مجموعه مرجع باشد، هرگاه دو رابطه  $m(\emptyset) = 0$  و  $\sum_{A \subset \emptyset} m(A) = 1$  برقرار باشد، تابع  $[0, 1]$   $\rightarrow \mathcal{P}(\Theta)$  سهم احتمال اصلی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود [۷، ۱۱]. کمیت  $m(A)$ ، عدد احتمال اصلی  $A$  نامیده می‌شود و نشان‌دهنده میزان باوری است که صرفاً به خود مجموعه  $A$  منتسب می‌شود. رابطه ۴ بیان می‌کند که هیچ باوری به  $\Theta$  اختصاص نمی‌یابد. رابطه ۵ نیز نشان می‌دهد که مجموع همه باورها برابر ۱ است. برای سنجش اندازه باور مطلق که به  $A$  تخصیص داده می‌شود، باید مقدار  $m(B)$  برای همه زیرمجموعه‌های  $A$  به  $m(A)$  اضافه شود (رابطه ۴). مقدار کل احتمال در میان عناصر  $A$  توسط تابع باور  $\text{Bel}(A)$  اندازه‌گیری می‌شود. معنای حتمیت و معنی‌داری از باور  $A$  و به‌منزله حد پایینی روی احتمال  $A$  است [۷، ۹، ۲۷]:

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subset A} m(B) \quad (4)$$

رابطه‌های ۵ و ۶ تابع موجه بودن را تعریف می‌کنند. حداکثر مقدار احتمال توزیع شده در میان عناصر  $A$  توسط تابع  $\text{Pl}(A)$  اندازه‌گیری می‌شود.  $\text{Pl}(A)$  تابع حد بالای روی احتمال  $A$  و توصیف‌کننده درجه باور کلی مربوط به  $A$  است [۷، ۱۱].

$$\text{Pl}(A) : \Omega(\Theta) [0, 1] \quad (5)$$

$$\text{Pl}(A) = 1 - \text{Bel}(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) \quad (6)$$

**بازۀ باور**

این فاصله، فاصله باور عدم قطعیت را نشان می‌دهد. تابع موجه بودن به واسطه تابعی به نام شک، به تابع باور مرتبط شده و برطبق رابطه‌های ۷ و ۸، به صورت تعریفی از باور بیان می‌شود [۲۷]:

$$Pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}) \quad (۷)$$

$$Pl(A) = 1 - Doubt(A) \quad (۸)$$

**• قوانین ترکیب شواهد**

فرض کنید  $m_1$  و  $m_2$  دو تابع جرم حاصل از دو منبع اطلاعاتی متفاوت، برپایه اطلاعات در دسترس باشد. چارچوب تشخیص  $\Theta$  برای هر دو منبع اطلاعاتی یکسان است. مطابق با قانون متعامد دمپستر، رابطه‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ بیان می‌شود [۲۶، ۲۷]:

$$m(\emptyset) = 0 \quad (۹)$$

$$m(A) = \frac{1}{1-k} \sum_{B \cap C \neq \emptyset} m(B)m(C) \quad (۱۰)$$

$$K = \sum_{B \cap C = A} m(B)m(C) \quad (۱۱)$$

$K$  جرم احتمال پایه مربوط ناسازگاری میان منابع شواهد را ارائه می‌کند. طبق رابطه ۱۵،  $K$  از مجموع ضرب توابع جرم همه زیرمجموعه‌هایی که اشتراک آنها تهی است، به دست می‌آید.  $K$  را به عنوان اندازه ناسازگاری بین منابع اطلاعاتی تفسیر می‌کنند. مقدار بزرگ‌تر  $K$  نشان‌دهنده ناسازگاری بیشتر منابع است. مخرج  $1 - K$  در رابطه ۱۲ فاکتور نرمال کردن است.  $m$  نیز تابع جرم در چارچوب تشخیص یکسان  $\Theta$  است. جمع متعامد  $m = m_1 \oplus m_2$ ، ترکیب  $m_1$  و  $m_2$  را نشان می‌دهد و اطلاعات مشترک از دو منبع را در بر دارد. در ترکیب شواهد رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ برقرار است [۲۶، ۲۷]:

$$m_1 \oplus m_2 = m_2 \oplus m_1 \quad (۱۲)$$

$$m_1 \oplus (m_2 \oplus m_3) = (m_1 \oplus m_2) \oplus m_3 \quad (۱۳)$$



به‌طور کلی برای  $n$  تابع جرم [Mass function]  $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$  اندازهٔ ناسازگاری  $k$  به‌صورت رابطهٔ ۱۴ محاسبه می‌شود [۷، ۲۶]:

$$K = \sum_{\bigcap_{i=1}^n E_i} m_1(E_1) \cdot m_2(E_2) \cdot \dots \cdot m(E_n) > 0 \quad (14)$$

در آخر ترکیب تابع جرم به‌صورت رابطهٔ ۱۵ محاسبه خواهد شد [۷، ۲۷]:

$$m(A) = (m_1 \oplus m_2 \dots \oplus m_n)(A) = \frac{1}{1-K} \sum_{\bigcap_{i=1}^n E_i} m_1(E_1) \cdot m_2(E_2) \cdot \dots \cdot m(E_n) \quad (15)$$

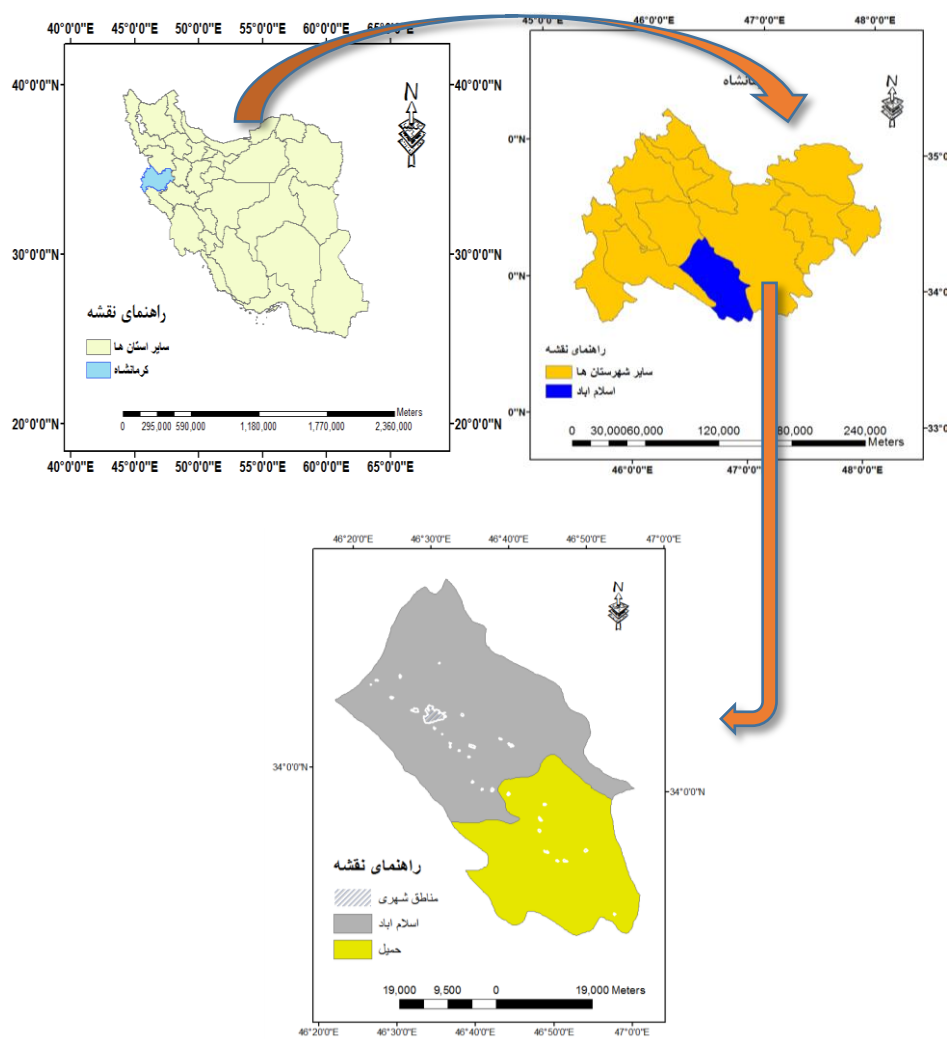
#### محدودهٔ تحقیق

منطقهٔ تحقیق، بخشی از جنگل‌های کرمانشاه متعلق به مناطق اسلام‌آباد غرب و حمیل است. این منطقه از شمال به شهرستان جوانرود، از شرق به شهرستان کرمانشاه، از جنوب به شهرستان سیروان و از غرب به شهرستان دالاهو و گیلان‌غرب محدود می‌شود و در طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۳۱ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۶ دقیقه، در بلندی ۱۳۳۵ متری از سطح دریا در ۶۵ کیلومتری جنوب باختری کرمانشاه در مسیر راه کرمانشاه- خسروی قرار دارد. آب‌وهوای این منطقه معتدل مدیترانه‌ای و بارندگی سالانه به‌طور متوسط ۴۷۸ میلی‌متر است. اسلام‌آباد غرب یکی از شهرهای استان کرمانشاه است که به لحاظ جمعیت و وسعت دومین شهر استان بعد از شهر کرمانشاه محسوب می‌شود (شکل ۲).

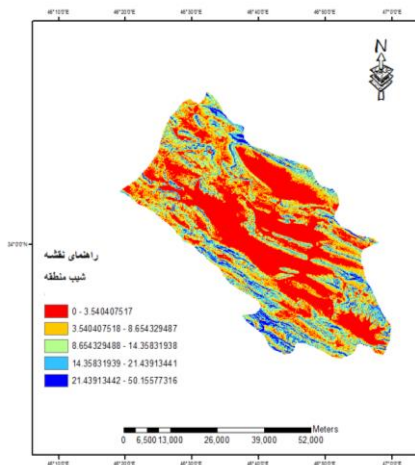
#### بحث و یافته‌ها

به‌منظور اجرای روش تحقیق پیشنهادی، ابتدا نقشه‌های معیارها تهیه شد و سپس نقشه‌ها به‌همراه پرسشنامه‌های مربوط به وزن‌دهی معیارها در اختیار کارشناسان قرار گرفت. در مورد بازه‌های مورد نظر زیرمعیارها نیز از نظر کارشناسان استفاده شد و در صورت نیاز اصلاح صورت گرفت. نقشهٔ مربوط به پوشش گیاهی براساس میانگین حداکثر پوشش گیاهی سالانه در منطقه برای مدت ۱۵ سال با استفاده از تصاویر لندست توسط نرم‌افزار ENVI به‌دست آمد. نقشهٔ ارتفاع براساس DEM ۳۰ متری ASTER تهیه شد و با استفاده از نرم‌افزار ARCGIS 10.3 نقشه‌های شیب و جهت شیب نیز تهیه شد. نقشه‌های اقلیم شامل دما و بارش نیز با درون‌یابی میانگین پانزده‌ساله بارش در منطقهٔ مورد نظر حاصل شد. نقشه‌های مربوط به فاصله

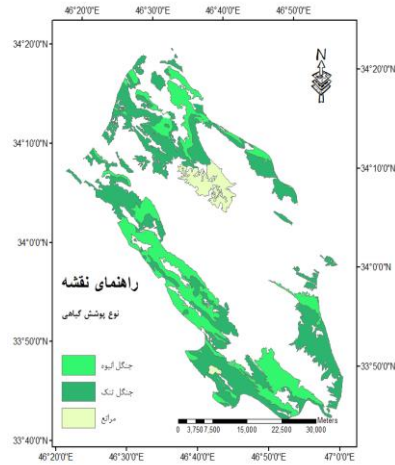
از مناطق مسکونی و جاده نیز با استفاده از تحلیل Euclidean distance در نرم‌افزار ARCGIS حاصل شد. شکل‌های ۳ تا ۷ نقشه زیرمعیارهای مؤثر بر خطر آتش‌سوزی را به تفکیک معیارها نشان می‌دهند.



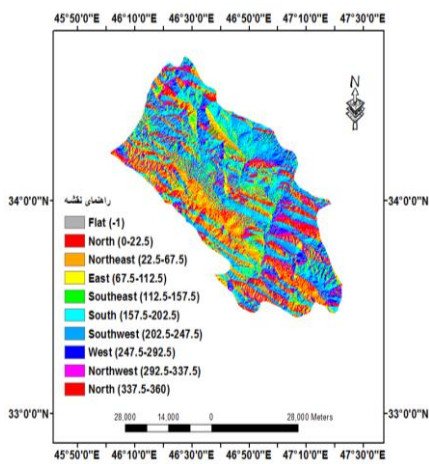
شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منطقه تحقیق



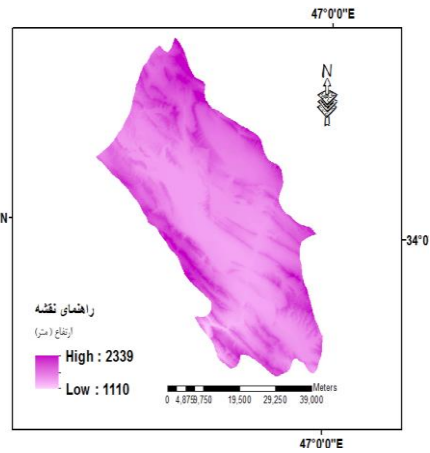
شکل ۴. نقشهٔ معیار توپوگرافی: شیب



شکل ۳. نقشهٔ مربوط به پوشش گیاهی با زیرمعیارهای جنگل انبوه، جنگل تنک و مراتع

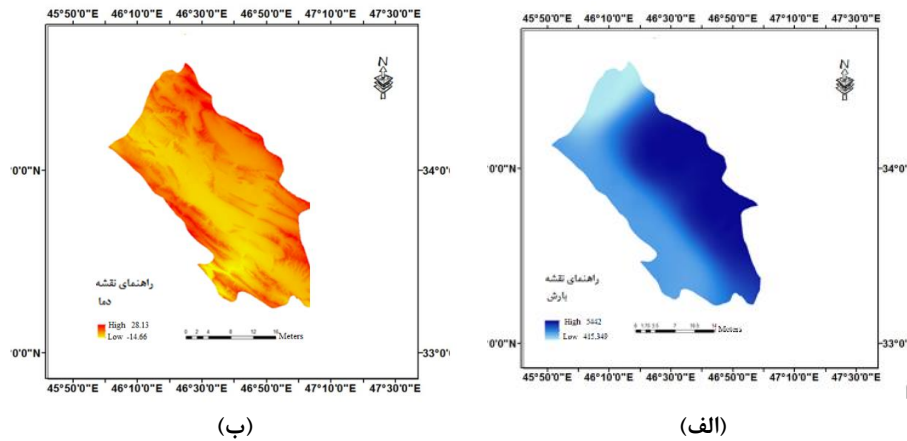


(ب)

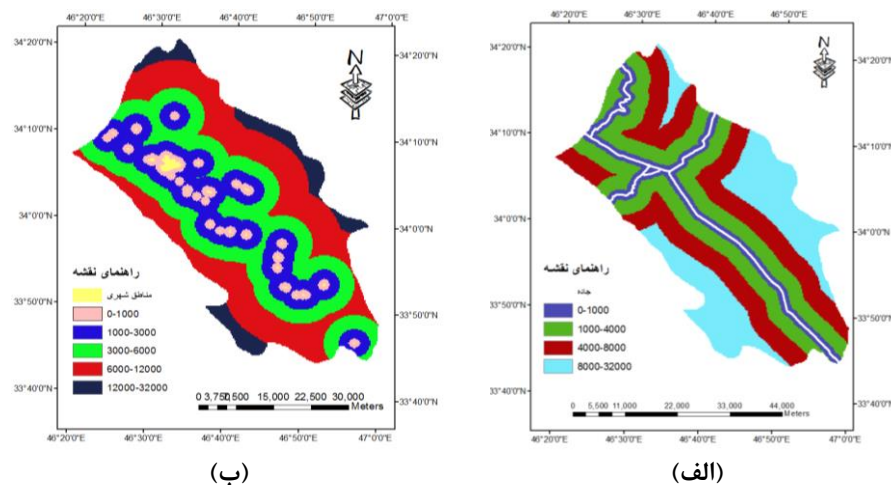


(الف)

شکل ۵. نقشه‌های مربوط به معیار توپوگرافی: (الف) DEM و (ب) جهت شیب



شکل ۶. نقشه‌های مربوط به معیار اقلیم: (الف) بارش و (ب) دما

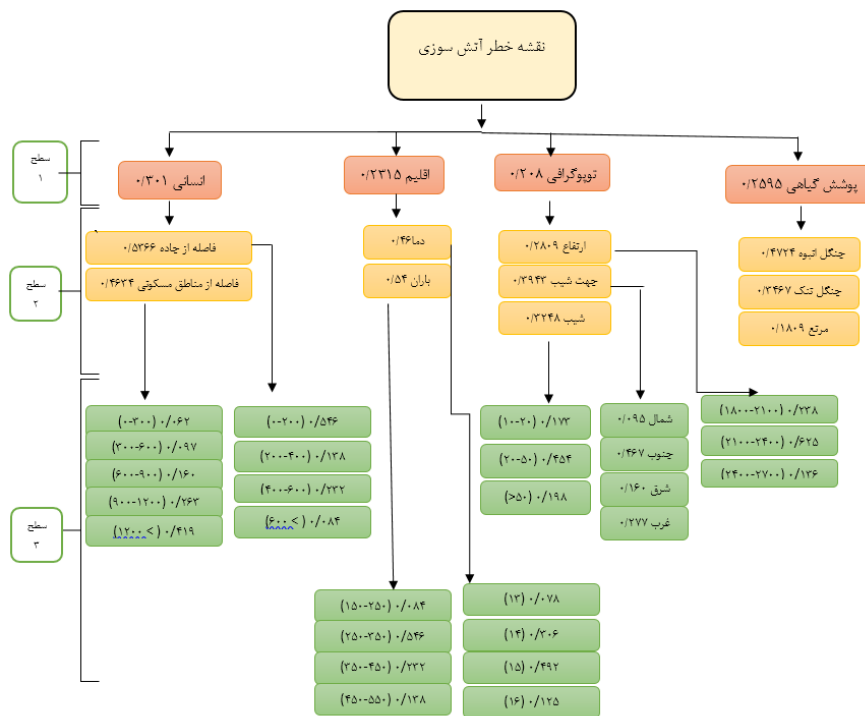


شکل ۷. نقشه‌های مربوط به معیار انسانی: (الف) فاصله از جاده؛ (ب) فاصله از مناطق مسکونی

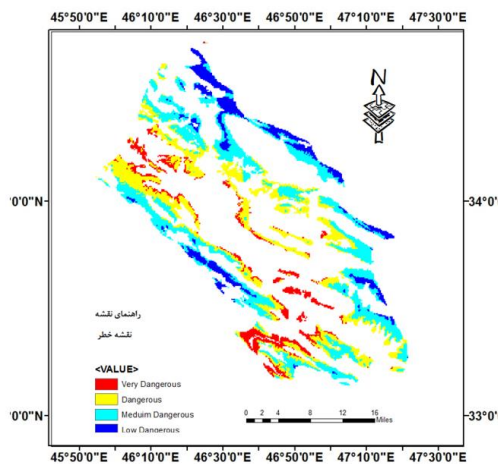
با توجه به نقشه‌های معیار و زیرمعیار در نظر گرفته‌شده، با بهره‌گیری از نظر سی کارشناس متخصص (شانزده کارشناس مخاطرات در مقطع کارشناسی ارشد، هشت کارشناس آتش‌سوزی جنگل و شش کارشناس داده‌های جغرافیایی) معیارها و زیرمعیارها در سطوح مختلف نسبت به یکدیگر و با توجه به درجه اهمیتشان در هر سطح تصمیم‌گیری رتبه‌بندی شدند. در نهایت با بهره‌گیری از مدل دمپستر- شافر وزن‌های نهایی برای معیارها و زیرمعیارها در هر سطح محاسبه شد (شکل ۸).

پارامترهای مؤثر سطح دوم با استفاده از زیرمعیارهای موجود در سطح سوم محاسبه شد. به این منظور با همپوشانی نقشه‌های هیدرواقليم، توپوگرافي، زمین‌شناختی و پوشش گیاهی به‌همراه وزن هر یک در سطح سوم، نقشه خطرپذیری آتش‌سوزی و با همپوشانی نقشه‌های تراکم جمعیت، تراکم تولید محصول و فاصله از شبکه راه به‌همراه وزن هر یک در سطح سوم نقشه خطرپذیری آتش‌سوزی برای منطقه تحقیق به‌دست آمد. نقشه خطر در شکل ۹ بیانگر این است که مناطق جنوبی و بخشی از مناطق شمال غربی و مرکزی منطقه تحقیق، دارای خطر بسیار زیاد در آتش‌سوزی است.

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که نواحی شمالی و شرقی منطقه تحقیق، خطر کمتری در برابر آتش‌سوزی دارند (مناطق سفید بخش‌هایی است که پوشش گیاهی خاصی ندارد). برای تحلیل دقیق‌تر وضعیت خطر در منطقه تحقیق، نقشه خطر آتش‌سوزی به‌دست‌آمده نرمال شده و مقدار میانگین و انحراف معیار نقشه خطرپذیری آتش‌سوزی نرمال شده محاسبه شد.



شکل ۸. وزن‌های نهایی برای معیارها و زیرمعیارها برای سطح‌های مختلف



شکل ۹. نقشه خطر آتش‌سوزی منطقه تحقیق

در نهایت خطر آتش‌سوزی برای منطقه تحقیق در چهار دسته مختلف طبقه‌بندی شد. جدول ۲ مقدار میانگین، انحراف معیار و بازه‌های طبقات مختلف خطر است.

جدول ۲. مقدار میانگین، انحراف معیار و بازه‌های طبقات مختلف خطر

خطر	پرخطر	خطرناک	خطر متوسط	کم خطر	انحراف معیار	میانگین
مقدار	۰/۸۴-۱	۰/۵۷-۰/۸۴	۰/۳-۰/۵۷	۰-۰/۳	۰/۲۲	۰/۴۲

رخدادهای آتش‌سوزی در منطقه پژوهش در طی ۱۵ سال با شدت‌های مختلف اخذ شد. مقایسه نقشه حاصل با آتش‌سوزی‌های رخ داده در منطقه تحقیق نشان می‌دهد که طبقات پرخطر و خطرناک، همپوشانی زیادی با نقاط دارند. همچنین به‌منظور ارزیابی نتایج از روش ROC استفاده شد. این روش نوعی عامل نسبی است که برای ارزیابی صحت مدل با استفاده از مقایسه آتش‌سوزی‌های رخ داده با نتایج حاصل، درست‌نمایی هر کلاس را نشان می‌دهد. آزمون مدل توسط منحنی ROC، دقت زیاد مدل با مقدار ۹۲ درصد را نشان می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

هرساله آتش‌سوزی بخش‌های وسیعی از جنگل‌ها را تهدید می‌کند و سبب کاهش مساحت جنگلی کشور می‌شود که از جمله می‌توان به آتش‌سوزی‌های مختلف در جنگل‌های کرمانشاه

اشاره کرد. در این میان جنگل‌های اسلام‌آباد غرب و حمیل در این استان به دلیل خصوصیات خاص محیطی، توپوگرافی و هیدرواقليمی مستعد رخداد آتش‌سوزی‌های متعدد و خطرناک‌اند. از این‌رو بررسی ابعاد مختلف خطر آتش‌سوزی این منطقه اهمیت زیادی دارد. تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و سیستم اطلاعات مکانی، امکان تحلیل مسائل تصمیم‌گیری پیچیده مانند پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی را که اغلب شامل داده‌ها و معیارهای مختلف و غیرقابل مقایسه هستند فراهم می‌کند. به همین منظور در تحقیق حاضر از نظریه استدلال شهودی دمپستر- شافر برای رفع عدم قطعیت موجود در نظر کارشناسان متخصص و تعیین وزن نهایی معیارها و زیرمعیارهای مؤثر بر خطر آتش‌سوزی استفاده شد. معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در ایجاد آتش‌سوزی تعیین و در سطوح مختلف دسته‌بندی شدند. آن‌گاه با استفاده از روش‌های همپوشانی وزن‌دار معیارها با توجه به وزن نهایی حاصل از تلفیق نظر کارشناسان متخصص، با استفاده از نظریه دمپستر- شافر نقشه خطرپذیری آتش‌سوزی جنگل‌های اسلام‌آباد غرب حاصل شد. در نهایت نقشه خطر به دست آمده نرمال شد و با توجه به مقادیر میانگین و انحراف معیار، نقشه خطر نرمال‌شده منطقه تحقیق از نظر خطرپذیری آتش‌سوزی به چهار دسته طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد که مؤثرترین شاخص در وقوع آتش‌سوزی به ترتیب معیار پوشش گیاهی و سپس انسانی است. مقایسه نقشه حاصل با آتش‌سوزی‌های رخ داده در منطقه تحقیق نشان می‌دهد که طبقات پرخطر و خطرناک همپوشانی زیادی با نقاط دارند. آزمون مدل توسط منحنی ROC نیز دقت زیاد مدل با مقدار ۹۲ درصد را نشان می‌دهد.

## منابع

- [۱]. عباسزاده تهرانی، نادیا؛ مروتی، آذر؛ خانبانی، سارا؛ و جانعلی پور، میلاد (۱۴۰۰). «ارزیابی عملکرد پردازش تک‌زمانه و چندزمانه تصاویر ماهواره لندست ۸ مبتنی بر طبقه‌بندی‌کننده‌های ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی در پایش آتش‌سوزی جنگل‌ها»، *مدیریت مخاطرات محیطی*، دوره ۸، شماره ۲، صفحه ۱۳۵-۱۱۹.
- [2]. Beynon, M.; Curry, B.; & Morgan, P. (2000). The Dempster-Shafer theory of evidence: An alternative approach to multicriteria decision modelling, *Omega*, 28, pp: 37-50. 10.1016/S0305-0483(99)00033-X.
- [3]. Bui, D.; Hoang, N-D.; & Samui, P. (2019). "Spatial Pattern Analysis and Prediction of Forest Fire Using New Machine Learning Approach of Multivariate Adaptive Regression Splines and Differential Flower Pollination Optimization: A case study at La Cai province (Vietnam)", *Journal of Environmental Management*, 10.1016/j.jenvman.2019.01.108.
- [4]. Bukhori, S. (2018). *Forest Fire Model*, 10.5772/intechopen.72591.
- [5]. Castillo Soto, M. (2012). "The identification and assessment of areas at risk of forest fire using fuzzy methodology," *Applied Geography*, 35, pp: 199-207. 10.1016/j.apgeog.2012.07.001.
- [6]. Castillo Soto, M.; & Silva, F. (2015). "Quantitative analysis of forest fire extinction efficiency", *Forest Systems*, 24. 2171-9845. 10.5424/fs/2015242-06644.
- [7]. Dempster, A. (2008). *Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping*, 10.1007/978-3-540-44792-4\_3.
- [8]. Finney, M. (2005). "The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire", *Forest Ecology and Management*, 211, pp: 97-108. 10.1016/j.foreco.2005.02.010.
- [9]. González, C.; Castillo Soto, M.; Chevesich, P.; & Barrios, J. (2017). "Dempster-Shafer theory of evidence: A new approach to spatially model wildfire risk potential in central Chile", *The Science of the total environment*, pp: 613-614. 1024-1030. 10.1016/j.scitotenv.2017.09.105.
- [10]. González-Sanchis, M.; Ruiz-Pérez, G.; Del Campo, A.; García-Prats, A.; Francés, F.; & Lull, C. (2019). "Managing low productive forests at catchment scale: Considering water, biomass and fire risk to achieve economic feasibility", *Journal of Environmental Management*, 231. pp: 653-665. 10.1016/j.jenvman.2018.10.078.
- [11]. Khan, M.; & Anwar, S. (2019). "Paradox Elimination in Dempster-Shafer Combination Rule with Novel Entropy Function: Application in Decision-Level Multi-Sensor Fusion", *Sensors*, 19. 4810. 10.3390/s19214810.
- [12]. Monjarás-Vega, N.; Briones-Herrera, C.; Vega-Nieva, D.; Calleros-Flores, E.; Corral-Rivas, J. J.; López Serrano, P.; Pompa-García, M.; Rodríguez-Trejo, D.; Carrillo-pzrra, A.; González-Cabán, A.; Alvarado, E.; & Jolly, W. (2020). "Predicting forest fire kernel density at multiple scales with geographically



- weighted regression in Mexico”, *Science of The Total Environment*, 718. 137313. 10.1016/j.scitotenv.2020.137313.
- [13]. Murthy, K.; Sinha, S.; Kaul, R., & Vaidyanathan, S. (2019). “A fine-scale state-space model to understand drivers of forest fires in the Himalayan foothills”, *Forest Ecology and Management*, 432. pp: 902–911. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.009>
- [14]. Naderpour, Mohsen; Rizeei, Hossein; Khakzad, Nima; & Pradhan, Biswajeet. (2019). “Forest Fire Induced Natech Risk Assessment: A Survey of Geospatial Technologies”, *Reliability Engineering & System Safety*, 191. 106558. 10.1016/j.ress.2019.106558.
- [15]. Novković, Ivan; Goran, B.; Markovic, Goran; Lukic, Djordje; Dragicevic, Slavoljub; Milosevic, Marko; Djurdjic, Snezana; Samardžić, Ivan; Lezaic, Tijana; & Tadic, Marija. (2021). “GIS-Based Forest Fire Susceptibility Zonation with IoT Sensor Network Support: Case Study-Nature Park Golija”, *Serbia. Sensors* (Basel, Switzerland). 21. 10.3390/s21196520.
- [16]. Ngoc-Thach, N.; Dang Ngo, T.; Pham, X-C.; Nguyen, H-Th.; Bui, H.; Hoang, N-D.; & Bui, D. (2018). “Spatial Pattern Assessment of Tropical Forest Fire Danger at Thuan Chau area (Vietnam) using GIS-Based Advanced Machine Learning Algorithms: A comparative study”, *Ecological Informatics*, 46. 10.1016/j.ecoinf.2018.05.009.
- [17]. Pique, M.; Olabarria, J.; & Reynolds, K. (2019). Strategic and tactical planning to improve suppression efforts against large forest fires in the Catalonia region of Spain, *Forest Ecology and Management*, 432. 612-622. 10.1016/j.foreco.2018.09.0.
- [18]. Pourghasemi, Hamid (2015). “GIS-based forest fire susceptibility mapping in Iran: A comparison between evidential belief function and binary logistic regression models”, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 31. 10.1080/02827581.2015.1052750.
- [19]. Preisler, H.; & Ager, A. (2013). Forest-fire models. *Encyclopedia of Environmetrics*. 3.
- [20]. Rathman, J.; Yang, Ch.; & Zhou, H. (2018). “Dempster-Shafer theory for combining in silico evidence and estimating uncertainty in chemical risk assessment”, *Computational Toxicology*, 6. 10.1016/j.comtox.2018.03.001.
- [21]. Razavi-Termeh, Seyed Vahid; Sadeghi-Niaraki, Abolghasem; & Choi, Soo-Mi (2020). “Ubiquitous GIS-Based Forest Fire Susceptibility Mapping Using Artificial Intelligence Methods”, *Remote Sensing*, 12. 1689. 10.3390/rs12101689.
- [22]. Sentz, K.; & Ferson, S. (2002). *Combination of Evidence in Dempster-Shafer Theory*. 10.2172/800792.
- [23]. Srivastava, R.; Mock, Th.; & Gao, L. (2011). “The Dempster-Shafer Theory: An Introduction and Fraud Risk Assessment Illustration”, *Australian Accounting Review*, 21. 282 - 291. 10.1111/j.1835-2561.2011.00135.x.

- [24]. Sivrikaya, Fatih; & Kucuk, Omer (2021). "Modeling forest fire risk based on GIS-based analytical hierarchy process and statistical analysis in Mediterranean region", *Ecological Informatics*, 68. 101537. 10.1016/j.ecoinf.2021.101537.
- [25]. Valizadeh kamran, K.; Omrani, K.; & Khosroshahi, S. (2014). "Forest Fire Risk Assessment Using MultiCriteria Analysis: A Case Study Kaleybar Forest".
- [26]. Wang, J.; Qiao, K.; Zhang, Zh.; & Xiang, F. (2017). "A new conflict management method in Dempster-Shafer theory", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 13. 155014771769650. 10.1177/1550147717696506.
- [27]. Zadeh, Lotfi; & Ralescu, Anca (2013). *On the Combinality of Evidence in the Dempster-Shafer Theory*.
- [28]. Zhao, Pengcheng; Zhang, Fuquan; Lin, Haifeng; & xu, Shuwen. (2021). "GIS-Based Forest Fire Risk Model: A Case Study in Laoshan National Forest Park", *Nanjing. Remote Sensing*, 13. 3704. 10.3390/rs13183704.
- [29]. Zheng, Zhong; Gao, Yanghua; Yang, Qingyuan; Zou, Bin; Xu, Yongjin; Chen, Yanying; Yang, Shiqi; Wang, Yongqian; & Wang, Zengwu (2020). "Predicting forest fire risk based on mining rules with ant-miner algorithm in cloud-rich areas", *Ecological Indicators*, 118. 106772. 10.1016/j.ecolind.2020.106772.