

## مدل سازی گسترش آتش سوزی جنگل با استفاده از اتوماسیون سلولی

سعیده اسکندری<sup>۱\*</sup>، جعفر اولادی قادیکلانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>استادیار پژوهش، بخش تحقیقات جنگل، مؤسسه تحقیقات جنگل ها و مراتع کشور،

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار، گروه جنگل داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۲۹

### چکیده

این تحقیق به منظور مدل سازی گسترش آتش سوزی با استفاده از مدل الکساندریدیس و روش اتوماسیون سلولی در بخشی از جنگل های بخش سه نکا-ظالم رود در شمال ایران انجام شد. پارامترهای تأثیرگذار بر گسترش آتش سوزی با توجه به مدل مورد استفاده شامل ارتفاع، شیب، سرعت و جهت باد، نوع و تراکم پوشش گیاهی بودند. به منظور مدل سازی گسترش آتش سوزی و ارزیابی صحت آن، اطلاعات مورد نیاز آتش سوزی واقعی از قبیل نقطه شروع آتش، وسعت حریق، سرعت و جهت باد در زمان آتش سوزی تهیه شدند؛ به علاوه کلیه پارامترهای تأثیرگذار برای محدوده آتش سوزی واقعی، در محیط GIS آماده سازی و کدبندی شدند. در نهایت مدل گسترش آتش سوزی با استفاده از روش همسایگی هشت تایی مور، برنامه نویسی مدل الکساندریدیس در محیط MATLAB و فراخوانی لایه های رقومی کلیه پارامترهای تأثیرگذار، برای محدوده آتش سوزی واقعی پیاده سازی شد. برای پیش بینی گسترش آتش سوزی جنگل بر اساس اتوماسیون سلولی، چندین حالت سلولی و قانون انتقال آتش سوزی در نظر گرفته شد. با انتخاب نقطه شروع آتش سوزی، نمایشی پویا از گسترش جبهه آتش سوزی ارائه شد و در پایان تعداد سلول های سوخته و سالم مشخص شد. به منظور ارزیابی کیفی صحت مدل مورد استفاده، نتایج خروجی مدل شامل جهت گسترش آتش و نحوه پیشروی جبهه گسترش با محدوده آتش سوزی واقعی مقایسه شد. به منظور ارزیابی کمی صحت مدل مورد استفاده از دقت کلی و شاخص کاپا استفاده گردید. دقت کلی و شاخص کاپا به دست آمده به ترتیب برابر ۰/۸۸ و ۰/۷۴ بود که بیانگر دقت پیش بینی مدل گسترش آتش سوزی و مطلوبیت روش اتوماسیون سلولی در مدل سازی گسترش آتش سوزی در این تحقیق می باشد.

**واژه های کلیدی:** مدل سازی گسترش آتش سوزی، اتوماسیون سلولی، سیستم اطلاعات مکانی

### مقدمه

شود (Janbaz Ghobadi و همکاران، ۲۰۱۲):  
۸۱۸؛ Roman و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۵۹). آتش سوزی علاوه بر خسارت های اقتصادی، آلودگی های محیط زیستی و تأثیر بر آب و هوای منطقه، در از بین بردن فون و فلور و چشم انداز جنگل نیز تأثیر بسزایی دارد و اثرات آن در هر سطحی از اکوسیستم احساس می شود (کاسظمی، ۱۳۸۴: ۴۷؛ Sowmya و Somashekar، ۲۰۱۰: ۹۷۰). همچنین حریق در صورت گستردگی، شدت و تکرار در یک جنگل، سبب تغییر ارزش کیفی گونه ها و استقرار گونه های نامرغوب و غیر تجاری که فاقد ارزش اقتصادی هستند، می شود (Podur و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۹۶).

امروزه افزایش آتش سوزی در عرصه های جنگلی به عنوان یکی از فاجعه های محیط زیستی تلقی می شود (Janbaz Ghobadi و همکاران، ۲۰۱۲: ۸۱۸؛ Adab و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۷۲۴)، زیرا با منشأ طبیعی یا انسانی اثرات زیان بار و ویرانگری به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر محیط زیست و جوامع انسانی می گذارد (Eskandari و همکاران، ۲۰۱۳a: ۱۱۴۷). اگر چه آتش سوزی های جنگلی جزء جدایی ناپذیر این بوم-سازگان ها هستند، اما عدم کنترل آنها ممکن است باعث خسارت های اقتصادی و محیط زیستی شدیدی

\*نویسنده مسئول: s.eskandari@rifr-ac.ir

کنترل و مهار آنها بسیار ضروری است تا حتی‌الامکان از بروز و گسترش آتش‌سوزی‌های مکرر جلوگیری شود و با ارائه راهکارهای مدیریتی صحیح، زمینه‌های کنترل و مهار آنها فراهم گردد (کازمی، ۱۳۸۴: ۴۷).

مسئله مهم در کنترل به موقع و اطفای حریق‌های متعدد جنگل‌ها به ویژه در جنگل‌های بخش سه نکا- ظالمرو، عدم اطلاع از چگونگی پیشروی و گسترش آتش پس از وقوع آن است. این امر یکی از عوامل اصلی تأخیر در حضور به موقع نیروهای اطفای حریق در محل وقوع و جلوگیری از پیشروی بیشتر آتش است که سبب می‌شود گروه‌های اطفای حریق قادر به جهت‌گیری مناسب برای مقابله با آن نباشند؛ لذا یکی از ابزارهای کارآمد و لازم برای پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های منطقه، استفاده از الگویی مکانی است که قادر به اطلاع‌رسانی به موقع در مورد پیشروی حریق، مطابق با شرایط توپوگرافی، پوشش گیاهی و اقلیمی باشد. در این زمینه، مدل‌سازی و شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های منطقه، ابزار کارآمدی برای پیش‌بینی حرکت و گسترش آن است که امکان تعیین پیشروی آتش‌سوزی پس از وقوع آن را می‌دهد. این الگو امکان پیش‌بینی جهت و گسترش آتش‌سوزی را در هنگام وقوع آن می‌دهد و در واقع فرآیند خودکاری است که قادر به اطلاع‌رسانی در مورد گسترش آتش‌سوزی بر اساس معیارهای اقلیمی، توپوگرافی و محیط زیستی است (Karafyllidis و Thanailakis، ۱۹۹۷: ۸۸؛ Saidi، ۱۹۹۹: ۲؛ Yassemi و همکاران، ۲۰۰۷: ۷۲؛ Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۹۲).

برای پیش‌بینی رفتار و گسترش آتش‌سوزی، مدل‌های عددی متعددی در مناطق مختلف دنیا ایجاد شده‌اند که می‌توانند با GIS ادغام شوند؛ دانشمندان متخصص مطالعات آتش‌سوزی در جنگل، مدل‌های ریاضی گسترش آتش‌سوزی را در چهار دسته مدل‌های نظری، فیزیکی، تجربی و نیمه‌تجربی تقسیم‌بندی می‌کنند. زیرمجموعه‌های این مدل‌ها بسیار متنوع هستند و هر کدام بر اساس در دسترس بودن داده‌های موردنیاز و شرایط منطقه مورد مطالعه،

به دلیل بروز بیش از پیش پدیده آتش‌سوزی و خسارت‌های ناشی از آن، طراحی و توسعه روش‌های مقابله با آن ضروری به نظر می‌رسد (Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۹۲). به دلیل سرشت ویرانگر آتش‌سوزی، مطالعات دربرگیرنده آتش‌سوزی‌های واقعی، غیرعملی است. به‌عنوان یک جایگزین، دانشمندان از مدل‌های شبیه‌سازی کامپیوتری بر اساس مطالعات میدانی، برای درک بهتر رفتار و اثرات آتش‌سوزی استفاده می‌کنند (Yassemi و همکاران، ۲۰۰۷: ۷۲). در صورت بروز آتش‌سوزی در جنگل‌ها، مدل‌های شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی می‌توانند به عنوان سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری به مدیران جنگل برای انتخاب بهترین روش اطفای و جلوگیری از پیشروی حریق کمک کنند. در واقع در هنگام وقوع آتش‌سوزی، به دلیل کمبود وقت، لزوم تصمیم‌گیری به موقع و واکنش سریع و همچنین افزایش فشار روحی مدیران، یک مدل شبیه‌سازی معتبر نقش مهمی را ایفا می‌کند. اجرای سیستم واکنش سریع به یک حادثه آتش‌سوزی، بر اساس تعداد زیادی پردازش به موقع و قابلیت دستیابی به داده‌های ثابت و همچنین داده‌های متغیر امکان‌پذیر است (Vakalis و همکاران، ۲۰۰۴: ۳۹۰)؛ بنابراین سیستم‌های شبیه‌سازی اعتبارسنجی شده در این مرحله می‌توانند در نحوه اجرای عملیات اطفای حریق مؤثر باشند.

طی سال‌های اخیر آتش‌سوزی در مناطق جنگلی و مرتعی شمال ایران (Eskandari و همکاران، ۲۰۱۳: ۷۷۰؛ Chuvieco، ۲۰۱۵: ۵۸؛ Janbaz و همکاران، ۲۰۱۲: ۸۱۸؛ Adab و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۷۲۳) و همچنین غرب ایران (محمدی و همکاران، ۱۳۸۹: ۵۷۰؛ Mahdavi و همکاران، ۲۰۱۲: ۴۴) افزایش روزافزونی یافته است. جنگل‌های منطقه نکا- ظالمرو در شمال ایران نیز از جمله مناطقی است که در سال‌های اخیر دچار آتش‌سوزی‌های مکرر و مداومی شده است (اداره کل منابع طبیعی استان مازندران، ۱۳۹۰: ۷)؛ لذا با توجه به وقوع آتش‌سوزی‌های مکرر در جنگل‌های این منطقه طی سال‌های گذشته، انجام پژوهش‌های جدید برای

به موارد زیر اشاره نمود. کارافیلیدیس<sup>۱</sup> و تانایلاکیس<sup>۲</sup> (۱۹۹۷) یک مدل مبتنی بر اتوماسیون سلولی را برای پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی توسعه دادند که تحت سناریوهای مختلف آب و هوایی و توپوگرافی قابل استفاده بود؛ اگر چه مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با انتظارات، مناسب به نظر می‌رسید، اما کاستی‌هایی نیز در مدل وجود داشت. برای مثال در حالی که شکل جبهه آتش، شبیه به جبهه موردانتظار از آتش‌سوزی بود، موقعیت جبهه آتش اشتباه محاسبه می‌شد. بودروژیک<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۶) گسترش آتش‌سوزی جنگل در جزیره براک را با استفاده از روش اتوماسیون سلولی و در نظر گرفتن پارامترهای پوشش گیاهی و شرایط باد مدل‌سازی و شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که این روش برای کاربردهای عملی سریع و رضایت‌بخش است. همچنین شکل پیشروی آتش در شبیه‌سازی مشابه شکل پیشروی آن در همان منطقه‌ای است که در گذشته آتش‌سوزی اتفاق افتاده است. در پایان اضافه کردن عوامل مختلف مانند درجه حرارت هوا، رطوبت هوا و رطوبت ماده قابل اشتعال به مدل شبیه‌سازی، برای دقت بیشتر پیشنهاد شد. انسیناس<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۷) از مدل اتوماسیون سلولی مبتنی بر انتقال منطقه سوخته کسری استفاده کردند. در واقع این مدل، بهبود یافته مدل پیشنهادی کارافیلیدیس و تانایلاکیس (۱۹۹۷) بود. در این مدل از اتوماسیون سلولی دو بعدی با سلول‌های شش ضلعی استفاده شد. معیارهای در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی آتش‌سوزی شامل توپوگرافی، باد و سرعت گسترش آتش‌سوزی بودند. در بیشتر مدل‌های ارائه شده، دو نوع سلول‌های همسایه برای سلول مرکزی در نظر گرفته می‌شود، اما در واقعیت، همه سلول‌ها به یک اندازه بر سلول مرکزی اثر دارند. در این تحقیق با ارائه سلول‌های شش ضلعی، ناهمگونی بین سلول‌های همسایه برطرف شد و برای هر سلول مرکزی، شش سلول در اطراف آن در نظر گرفته شد

کاربرد خاصی دارند و دارای معایب و مزایای خاص خود می‌باشند. مدل‌های نظری با وجود آن که قابلیت تعمیم به اکوسیستم‌های مختلف را دارند، اما اعتبارسنجی آنها مشکل است. مدل‌های سیستم فیزیکی (سطحی، تاجی، زمینی و لکه‌ای) نیز با توجه به انواع مختلف آتش‌سوزی‌های جنگلی توسعه یافته‌اند، اما این مدل‌ها گاهی دارای دقت کافی نیستند و اعتبارسنجی آنها نیز مانند مدل‌های نظری مشکل است. در این میان، مدل‌های تجربی به دلیل سهولت استفاده، بسیار کاربردی هستند، اما این مدل‌ها فقط برای سیستم‌هایی با شرایط مشابه آن چه در فرمول‌بندی و آزمون مدل به کار رفته است، قابل اجرا می‌باشند. مدل‌های نیمه‌تجربی به دلیل اعتبارسنجی آسان‌تر، سادگی، سازگاری با داده‌های رستری و قدرت ارائه خروجی مناسب، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما عدم قابلیت برخی از این مدل‌ها برای آتش‌سوزی‌های تاجی و لکه‌ای، برنامه‌نویسی دشوار و لزوم در دسترس بودن داده‌های موردنیاز برای همه پارامترهای مؤثر در مدل مربوطه، استفاده از آنها را محدود کرده است. با توجه به شرایط جنگل‌های ایران و سرشت آتش‌سوزی در این جنگل‌ها که اغلب از نوع سطحی می‌باشد، مدل‌های نظری، مدل‌های فیزیکی آتش‌سوزی سطحی و مدل‌های نیمه‌تجربی راترمل، فارسایت و اتوماسیون سلولی می‌توانند بهترین گزینه‌ها برای مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی در این جنگل‌ها باشند. در این میان، مدل اتوماسیون سلولی به دلیل ساختار پایدار، سادگی، سازگاری با داده‌های رستری و اجرای آن از طریق اعمال یک سری قوانین ساده محلی بر روی پیکسل‌ها (سلول‌ها) می‌تواند در صورت در دسترس بودن داده‌های توپوگرافی، پوشش گیاهی، سرعت و جهت باد، قابلیت زیادی برای مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران داشته باشد (اسکندری، ۱۳۹۴: ۱۴). این روش در سال‌های اخیر به کرات برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل در تحقیقات مختلف به کار گرفته شده است که از جمله مهم‌ترین این تحقیقات، می‌توان

1- Karafyllidis

2- Thanailakis

3- Bodrožić

4- Encinas

مشخصات زمین‌شناسی آنها بررسی گردید. مدل گسترش آتش‌سوزی بر اساس اتوماسیون سلولی ارائه شد و آنالیز عددی انجام شده، توافق مطلوبی از این مدل را با ابعاد و مقیاس واقعی داده‌های تجربی نشان داد. قیسو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۵) یک روش بهبود یافته اتوماسیون سلولی را بر اساس داده‌های وکتوری برای گسترش آتش‌سوزی جنگل ارائه دادند. در این روش، معادلات استفاده‌شده بر اساس روش‌های وکتورمبنا و از طریق تعداد زیادی عوامل اصلاحی تغییر یافتند. یک روش بهینه‌سازی عددی برای یافتن مقادیر بهینه فاکتورهای اصلاحی استفاده شد. نتایج با شبیه‌سازی اتوماسیون سلولی شناخته‌شده، مقایسه شدند. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی نتایج بهتری را از نظر محاسباتی ارائه می‌دهد. آلیدمات<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل دو بعدی اتوماسیون سلولی برای شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی ارائه دادند. این مدل شامل گسترش آتش‌سوزی دایره‌ای بر اساس تکنیک‌های گسترشی ماریپیچ بود. نتایج نشان داد که در صورت در دسترس بودن همه اطلاعات، این مدل نتایج خوبی را ارائه خواهد داد.

با توجه به وقوع آتش‌سوزی‌های مکرر در جنگل‌های بخش سه نکا-ظالمروود از یک طرف و اهمیت سیاست‌های عملیاتی مقابله با حریق در این جنگل‌ها از طرف دیگر، لزوم انجام تحقیقی که مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی را با استفاده از روشی کارآمد و استفاده مستقیم از داده‌های محیطی واقعی انجام دهد، ضروری به نظر می‌رسد؛ بنابراین هدف از انجام این تحقیق، مدل‌سازی و شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در بخشی از جنگل‌های بخش سه نکا-ظالمروود و اعتبارسنجی آن است؛ به طوری که بتوان از این الگو به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی، اطفاء حریق، کنترل بهتر آتش‌سوزی و اختصاص بهینه نیروها و امکانات در مکان‌های مناسب در هنگام حریق استفاده نمود.

که اثری یکسان بر آن داشتند. مدل ارائه شده تحت چند سناریوی متفاوت، کارایی خود را در جنگل‌های فرضی نشان داد. خروجی سناریوها با مدل کارافیلیدیس و تانایلاکیس (۱۹۹۷) مقایسه شد که نشان‌دهنده سازگاری نسبی مدل ارائه شده با واقعیت بود. یاسمی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۷) رفتار آتش مبتنی بر اتوماسیون سلولی را با قوانین انتقال ساده و شهودی توسعه دادند. این تحقیق، مدل‌های قبلی اتوماسیون سلولی را با روشی واقع‌گرایانه و استفاده از قواعد انتقال خاص و منحصربه‌فردی که قادر به محاسبه دقیق گسترش آتش در داخل و بین سلول‌ها و همچنین هماهنگ‌سازی آتش با جهت باد و شیب بود، بهبود بخشید؛ علاوه بر این، در این تحقیق ابزار مدل‌سازی مبتنی بر سیستم اطلاعات مکانی، برای فراهم کردن محیطی انعطاف‌پذیر برای مدل‌سازی و تسهیل در نمایش نتایج شبیه‌سازی ارائه شد. در پایان، مقایسه‌ای بین روش اتوماسیون سلولی و رویکردهای گسترش آتش ارائه شد. الکساندریدیس و همکاران (۲۰۰۸) گسترش آتش‌سوزی جنگل در جزیره Spect یونان را با استفاده از روش اتوماسیون سلولی و بر اساس عوامل نوع و تراکم پوشش گیاهی، سرعت و جهت باد، توپوگرافی و پدیده لکه‌ای، شبیه‌سازی کردند. به منظور اعتبارسنجی روش اتوماسیون سلولی، نتایج این شبیه‌سازی با آتش‌سوزی مهیبی که در سال ۱۹۹۰ جزیره مذکور را سوزانده و بخش وسیعی از آن را نابود کرده بود، مقایسه شد و نتایج نشان داد که مدل پیشنهادشده مشخصات گسترش آتش را در زمان و مکان حادثه واقعی آتش‌سوزی به طور صحیحی پیش‌بینی می‌کند و اعتبار زیادی دارد. وانگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۴) گسترش آتش‌سوزی‌های مهیب در آمریکا را با استفاده از مدل اتوماسیون سلولی و ابعاد واقعی آتش‌سوزی بررسی کردند. داده‌های سری زمانی ۳۱ آتش‌سوزی مهیب اتفاق افتاده در آمریکا در سال ۲۰۱۲ جمع‌آوری شدند. ابعاد واقعی آتش‌سوزی‌های مهیب طی گسترش آتش‌سوزی مطالعه شدند و

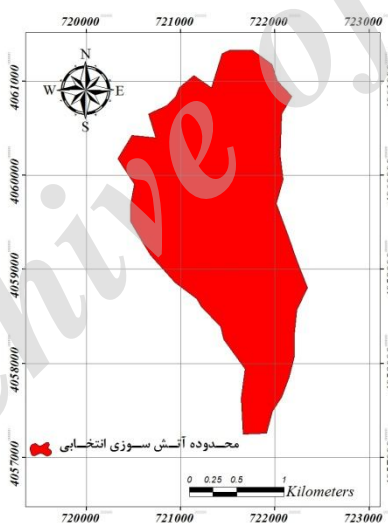
3- Ghisu  
4- Alidmat

1- Yassemi  
2- Wang

## مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** محدوده جغرافیایی این تحقیق، بخشی از جنگل‌های بخش سه نکا- ظالمروود است که در سال ۱۳۹۰ دچار آتش‌سوزی مهیبه شده بود (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه جزء مجتمع جنگلی نکا- ظالمروود و در حوضه رودخانه نکا به فاصله حدود ۱۵ کیلومتری شهرستان نکا و در امتداد جاده نکا- بهشهر قرار دارد. بخش سه طرح جنگلداری نکا- ظالمروود با وسعت حدود ۱۵۳۰۷/۲ هکتار در عرض شمالی ۳۰° ۳۶' تا ۳۶° ۴۰' و طول شرقی ۱۵' ۵۳° تا ۲۶' ۵۳° درجه قرار دارد. این منطقه از ارتفاعات کوتاه تا بلند با شیب توپوگرافی ملایم، عمق خاک به نسبت زیاد و پوشش جنگلی انبوه تشکیل شده است. کمینه ارتفاع آن از سطح دریای آزاد حدود ۱۱ متر و بیشینه ارتفاع آن ۸۷۴ متر است. جنگل‌های این

منطقه از نوع دانه‌زاد ناهمسال و آمیخته می‌باشد. گونه‌های گیاهی منطقه شامل انواع گونه‌های درختی از جمله راش، ممرز، بلوط، توسکا، افرا، نمدار، انجیلی، آزاد و غیره و درختچه‌ها مانند ازگیل، ولیک، شمشاد، گوجه وحشی و غیره و همچنین گونه‌های علفی و خشبی مانند آسپرولا، کارکس، کوله‌خاس، سیکلامن، بنفشه، پامچال، تمشک، سرخس و غیره است. این بخش به هفت سری تقسیم شده است که طی سال‌های گذشته سابقه حریق‌های شدید و وسیع را داشته‌اند. مهم‌ترین آتش‌سوزی اتفاق افتاده در جنگل‌های منطقه در سال ۱۳۹۰ به وقوع پیوست که مساحتی قریب به ۴۴۳/۶۹ هکتار از این جنگل‌ها را سوزاند (شکل ۱) (شرکت سهامی نکاچوب، ۱۳۸۹: ۱۰).



شکل ۱: آتش‌سوزی واقعی در جنگل‌های بخش سه نکا-ظالمروود

(منبع: شرکت سهامی نکاچوب، ۱۳۸۹)

## روش‌شناسی

**اتوماسیون سلولی:** اتوماسیون سلولی به واسطه ساختار پایدار، سادگی و قدرت خروجی مناسب در رابطه با پدیده‌های دینامیکی، تاکنون به کرات در مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل استفاده شده است (Sirakoulis و همکاران، ۲۰۰۵: ۷۳۳). اتوماسیون سلولی نوعی از مدل‌های نیمه‌تجربی

گسترش آتش‌سوزی است. در مدل اتوماسیون سلولی، منطقه به صورت یک شبکه سلولی در نظر گرفته می‌شود و آتش در این شبکه بر اساس یک مجموعه از قواعد معرف وضعیت سلول و با توجه به قابلیت اشتعال یا غیرقابل اشتعال بودن سلول، درجه پیشرفت متفاوتی خواهد داشت (Pastor و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۴۲). این قواعد بر اساس مدل‌های ریاضی تئوری و

اتوماسیون سلولی دو بعدی برای مدل سازی گسترش آتش سوزی جنگل استفاده می شود. پارامترهای مورد استفاده شامل نوع پوشش گیاهی، تراکم پوشش گیاهی، سرعت باد و جهت آن، ارتفاع زمین و جهت شیب است. برای هر سلول، احتمال سوخته شدن از طریق رابطه ۱ محاسبه می شود (Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۹۵).

$$P_{burn} = P_h(1 + P_{veg})(1 + P_{den})P_wP_s \quad (1)$$

در این رابطه  $P_{burn}$  احتمال سوخته شدن یک سلول و  $P_h$  نشان دهنده یک ضریب تجربی است و بیانگر احتمال گسترش آتش سوزی به یکی از سلول های همسایه می باشد (جدول ۱).  $P_{veg}$  نوع پوشش گیاهی،  $P_{den}$  تراکم پوشش گیاهی،  $P_w$  اثر سرعت و جهت باد و  $P_s$  اثر توپوگرافی بر گسترش آتش سوزی جنگل است. با توجه به رابطه ۱ و روابط دیگری که در ادامه تشریح می شوند، برای اعمال مدل، نیاز به چهار مقدار تجربی اولیه است. جدول ۱ مقادیر اولیه ارائه شده توسط الکساندریدیس و همکاران (۲۰۰۸) را برای این چهار مقدار تجربی نشان می دهد.

جدول ۱: مقادیر اولیه تجربی در نظر گرفته شده توسط الکساندریدیس و همکاران (۲۰۰۸)

a	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	P <sub>h</sub>
۰/۰۷۸	۰/۰۴۵	۰/۱۳۱	۰/۵۸

منبع: Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸

حریق (کد ۰/۴)، تقسیم بندی (کد گذاری) شد (جدول ۲). همچنین تراکم پوشش گیاهی به سه دسته تراکم کم (کد ۰/۴-)، تراکم متوسط (کد ۰) و تراکم زیاد یا انبوه (کد ۰/۳)، کد گذاری شد (جدول ۳). کدهای در نظر گرفته شده برای نوع و تراکم پوشش گیاهی بر اساس داده های تجربی ارائه شده توسط مدل الکساندریدیس بودند.

نیمه تجربی هستند. روش اتوماسیون سلولی از یک شبکه دوبعدی با ابعاد کوچک برای منطقه جنگلی استفاده می کند که به تعداد زیادی از سلول ها تقسیم می شود. در واقع هر سلول نشان دهنده قطعه کوچکی از زمین است و شکل آن معمولاً به صورت مربع انتخاب می شود. در نتیجه هشت جهت برای گسترش آتش سوزی وجود دارد. هر سلول معمولاً توسط چندین متغیر توصیف می شود. بر اساس مدل الکساندریدیس، مهم ترین عواملی که بر میزان گسترش و شکل جبهه آتش سوزی جنگل ها تأثیر می گذارند عبارتند از سوخت (نوع و تراکم پوشش گیاهی)، توپوگرافی (شیب و موانع طبیعی)، سرعت و جهت باد (Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۹۵). یانگ ژونگ و همکاران (۲۰۰۴) و ترونفیو (۲۰۰۴) سلول های شش ضلعی را به منظور کسب دقت بیشتر در مورد رفتار مکانی آتش سوزی به کار گرفتند.

**مدل مورد استفاده:** مدل مورد استفاده برای مدل سازی گسترش آتش سوزی در این تحقیق، بر اساس مدل ارائه شده توسط الکساندریدیس (Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۹۵) و بر اساس قوانین اتوماسیون سلولی می باشد. در این روش، از یک

**مدل نوع و تراکم پوشش گیاهی:** در رابطه ۱، ضرایب  $P_{veg}$  و  $P_{den}$  به ترتیب نشان دهنده نوع و تراکم پوشش گیاهی می باشند و با استفاده از جدول های ۲ و ۳ قابل محاسبه هستند. جدول های مذکور کدهای در نظر گرفته شده را برای هر طبقه از نوع و تراکم پوشش گیاهی نشان می دهند. در این تحقیق، نوع پوشش گیاهی در محیط GIS به سه دسته مقاوم به حریق (کد ۰/۳-)، نیمه مقاوم به حریق (کد ۰) و حساس به

جدول ۲: تقسیم‌بندی نوع پوشش گیاهی

کدهای $P_{veg}$	نوع پوشش گیاهی	طبقات (تیپ پوشش گیاهی)	احتمال گسترش آتش‌سوزی
-۰/۳	مقاوم به حریق	کشاوری، بدون پوشش	کم
۰	نیمه‌مقاوم به حریق	بلوط، آزاد- بلوط	متوسط
۰/۴	حساس به حریق	حفاظتی، ممرز- راش، راش- ممرز، ممرز، ممرز- انجیلی، انجیلی- ممرز، بوت‌ه‌زار	زیاد

منبع: عادل‌ی و یخکشی، ۱۳۵۴: ۱۰۲؛ Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۹۹

جدول ۳: تقسیم‌بندی تراکم پوشش گیاهی

کدهای $P_{den}$	تراکم پوشش گیاهی	طبقات	احتمال گسترش آتش‌سوزی
-۰/۴	تراکم کم	کشاوری، جنگل کاری	کم
۰	تراکم متوسط	تراکم کمتر از $100 \text{ m}^3$ و $100 \text{ m}^3$ در هکتار	متوسط
۰/۳	تراکم زیاد (انبوه)	حفاظتی، تراکم $200-350 \text{ m}^3$ و بیشتر از $350 \text{ m}^3$ در هکتار	زیاد

منبع: Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۹۹

رابطه ۳ جهت باد می‌تواند هر مقدار پیوسته‌ای بین ۰ تا ۳۶۰ درجه را داشته باشد، در صورتی که در بسیاری از مدل‌های مورد استفاده در تحقیق‌های دیگر، جهت وزش باد می‌تواند تنها چند مقدار گسسته داشته باشد (Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۹۶).

**اثر ارتفاع زمین:** ارتفاع زمین نیز از عوامل بسیار مؤثر در جهت گسترش آتش‌سوزی جنگل است. همواره وقتی آتش، شیب رو به بالا را در حین آتش‌سوزی طی می‌کند، با توجه به این که فاصله شعله از مواد سوختی رو به جلو کاهش می‌یابد، این امر سبب افزایش دمای مواد سوختی و تسهیل آتش‌سوزی این مواد در زمان کمتری می‌شود. تحت این شرایط، سرعت گسترش در شیب رو به بالا به طور چشمگیری افزایش می‌یابد؛ اما در شیب رو به پائین، این مسئله برعکس است و شیب منفی سبب می‌شود تا زاویه شعله با مواد سوختی رو به جلو کاهش یابد و در نتیجه سبب کاهش چشم‌گیر سرعت گسترش آتش‌سوزی در شیب رو به پائین می‌شود. در این تحقیق، مدل مورد استفاده برای محاسبه اثر شیب از طریق رابطه ۴ بود که در آن  $\theta_s$  زاویه شیب قطعه زمین و  $a$  یک ضریب تجربی می‌باشد (جدول ۱) (Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۹۶).

**مدل سرعت و جهت باد:** مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل بر پایه اثر سرعت و جهت باد، از چالش‌های موجود می‌باشد. تاکنون مدلی که بتواند اثر باد را به خوبی مدل‌سازی نماید، ارائه نشده است؛ زیرا باد به عنوان یک سیال، رفتار بسیار پیچیده‌ای به خصوص در زمین‌های شیب‌دار دارد. نحوه اثر باد بر پستی و بلندی‌های سطح زمین، موضوعی است که هنوز جای تحقیق و بررسی دارد. در تحقیقات مختلف بسیاری از روابط تجربی برای مدل کردن اثر سرعت و جهت باد در سرعت و جهت گسترش آتش‌سوزی پیشنهاد شده است. در این تحقیق، از یک مدل با انعطاف‌پذیری بیشتر و نتایج شبیه‌سازی بهتر استفاده شد. رابطه ۲ مدل ارائه شده برای محاسبه اثر باد بر مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل را نشان می‌دهد (Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۹۵).

$$P_w = \exp(c_1 V) f_t \quad (2)$$

در این رابطه  $c_1$  ضریب تجربی (جدول ۱) و  $V$  سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه است.  $f_t$  نیز از طریق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$f_t = \exp(V c_2 (\cos(\theta) - 1)) \quad (3)$$

در این رابطه  $\theta$  زاویه بین جهت انتشار آتش و جهت باد و  $c_2$  ضریب تجربی است (جدول ۱). در

۲). اطلاعات مورد نیاز برای این آتش‌سوزی (شامل نقطه شروع آتش، وسعت حریق، سرعت و جهت باد در زمان آتش‌سوزی) از شرکت سهامی نکاچوب تهیه شد (جدول ۴). همچنین کلیه پارامترهای تأثیرگذار برای محدوده آتش‌سوزی، بر اساس مدل الکساندریدیس در محیط GIS آماده‌سازی و کدبندی شدند و مدل گسترش آتش‌سوزی با استفاده از همسایگی هشت‌تایی مور، برنامه‌نویسی مدل در محیط MATLAB و فراخوانی لایه‌های رقومی تمام پارامترهای تأثیرگذار برای محدوده همین حریق پیاده‌سازی شد. در نهایت با اخذ مختصات نقطه شروع آتش‌سوزی، اجرای مجازی حلقه اصلی آتش‌سوزی تا زمان پایان آتش‌سوزی در منطقه انجام شد و نحوه پیشرفت آتش‌سوزی نمایش داده شد. در پایان ارقام و اطلاعاتی درباره تعداد و درصد سلول‌های سوخته و سالم به‌دست آمد. در ادامه، این مراحل تشریح می‌شوند.

$$P_s = \exp(a\theta_s) \quad (۴)$$

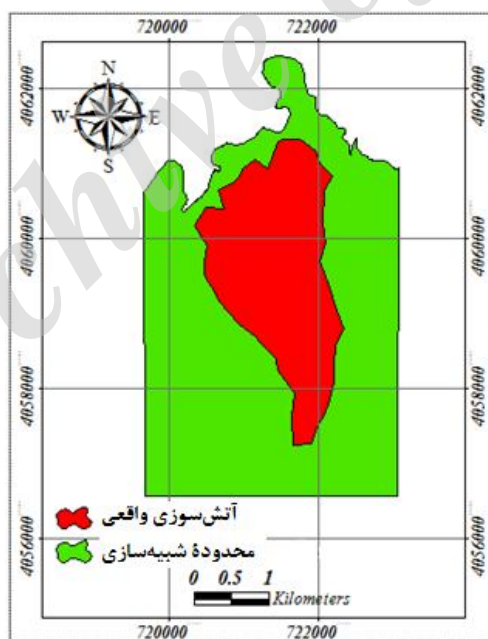
لازم به ذکر است که با توجه به شکل سلول‌ها که مربعی است، زاویه شیب از راه‌های مختلفی بسته به این که دو سلول همسایه مجاور و یا قطری باشند، محاسبه می‌شود. با این احتساب، زاویه شیب برای سلول‌های مجاور از طریق رابطه ۵ محاسبه شد.

$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{E_1 - E_2}{l}\right) \quad (۵)$$

در این رابطه  $E_1$  و  $E_2$  ارتفاع دو سلول و  $l$  طول سلول مربعی است. همچنین برای سلول‌های قطری زاویه شیب از طریق رابطه ۶ محاسبه شد (Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۹۶).

$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{E_1 - E_2}{\sqrt{2}l}\right) \quad (۶)$$

پیاده‌سازی مدل گسترش آتش‌سوزی در منطقه با استفاده از روش اتوماسیون سلولی: به منظور اجرای مدل گسترش آتش‌سوزی با اتوماسیون سلولی و ارزیابی صحت آن، محدوده اطراف آتش‌سوزی‌ای که پیش‌تر در منطقه اتفاق افتاده بود، انتخاب شد (شکل



شکل ۲: محدوده شبیه‌سازی آتش‌سوزی واقعی برای اجرای مدل گسترش آتش‌سوزی با اتوماسیون سلولی (منبع: شرکت سهامی نکاچوب، ۱۳۸۹)



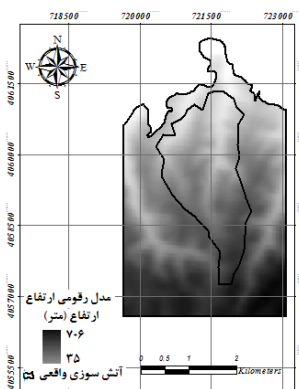
جدول ۴: اطلاعات آتش سوزی واقعی به وقوع پیوسته در منطقه مورد مطالعه

تعداد سلول های سوخته در محدوده در نظر گرفته شده برای شبیه سازی	تعداد سلول های سوخته در محدوده در نظر گرفته شده برای شبیه سازی	مساحت (هکتار)
۱۸۷۰۶	۷۱۰۰	۴۴۳/۶۹

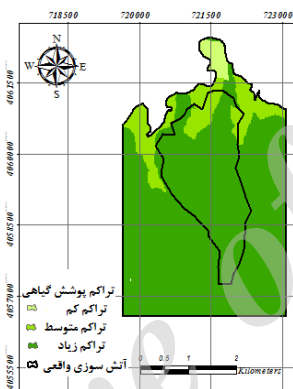
منبع: شرکت سهامی نکاچوب، ۱۳۸۹؛ یافته های تحقیق

آنها به اندازه محدوده آتش سوزی واقعی به وقوع پیوسته در محیط GIS جدا شدند (شکل های ۳ و ۴). لایه مدل رقمی ارتفاع نیز که از قبل برای منطقه مورد مطالعه تهیه شده بود، به اندازه محدوده آتش سوزی واقعی جدا شد (شکل ۵).

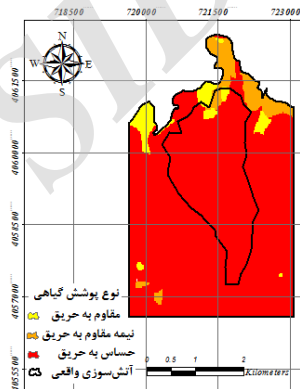
پارامترهای تأثیرگذار در GIS: در مدل الکساندریدیس، ضرایب  $P_{den}$  و  $P_{veg}$  که به ترتیب نشان دهنده نوع و تراکم پوشش گیاهی بودند، با توجه به انواع و تراکم پوشش گیاهی منطقه، به طبقاتی معین کدگذاری و طبقه بندی شدند (Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۹۹). سپس نقشه های مربوط به



شکل ۵: مدل رقمی ارتفاع



شکل ۴: تراکم پوشش گیاهی



شکل ۳: نوع پوشش گیاهی

استفاده گردید. جدول ۵ اطلاعات پارامتر باد را در زمان وقوع آتش سوزی در منطقه مورد مطالعه نشان می دهد.

در پایان، اطلاعات سرعت و جهت باد غالب منطقه که از اداره کل هواشناسی استان مازندران اخذ شده بود، جهت اعمال در مدل گسترش آتش سوزی،

جدول ۵: اطلاعات عامل باد در زمان وقوع آتش سوزی در منطقه مورد مطالعه

میانگین سرعت باد (متر/ثانیه)	جهت وزش باد
۹ متر بر ثانیه	جنوب شرقی

منبع: اداره کل هواشناسی استان مازندران

محیط MATLAB برنامه نویسی شد و سپس مدل گسترش آتش سوزی از طریق اتوماسیون سلولی پیاده سازی شد و به اجرا درآمد. شکل ۶ نمایی از همسایگی در نظر گرفته شده برای منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.

تعیین جهت گسترش آتش سوزی از طریق اتوماسیون سلولی: ادغام اتوماسیون سلولی و مدل ریاضی گسترش آتش سوزی، این امکان را فراهم می کند که بتوان گسترش حریق را لحظه به لحظه بررسی کرد. در این تحقیق، ابتدا مدل الکساندریدیس با استفاده از همسایگی هشت تایی مور، در

$(i-1, j-1)$	$(i-1, j)$	$(i-1, j+1)$
$(i, j-1)$	$(i, j)$	$(i, j+1)$
$(i+1, j-1)$	$(i+1, j)$	$(i+1, j+1)$

شکل ۶: سلول مرکزی و همسایگی آن به روش مور (منبع: Liu, ۲۰۰۹: ۲۰)

سلول سوخته محسوب می‌شود و کد ۴ را کسب می‌کند.

- قانون سوم: اگر حالت سلول  $(i, j)$  در زمان  $t$  برابر با چهار باشد (کد ۴)، حالت سلول در گام زمانی  $t+1$  نیز چهار خواهد بود. این قانون بیان می‌دارد که اگر سلول در مراحل قبل سوخته باشد، به دلیل نداشتن مواد سوختی جدید، همان سلول سوخته باقی خواهد ماند.

- قانون چهارم: اگر حالت سلول  $(i, j)$  در زمان  $t$  برابر با سه باشد (کد ۳)، حالت سلول‌های  $(i \mp 1, j \mp 1)$  (۱ در زمان  $t+1$  با احتمال  $P_{burn}$  برابر با سه خواهد بود. این قانون، مهم‌ترین قانون انتقال محلی و در واقع شالوده اصلی قوانین انتقال محلی اتوماسیون سلولی است که اصل گسترش را تعیین می‌کند. بر پایه این قانون، اگر یک سلول در مرحله  $t$  در حال سوختن باشد، آنگاه بر اساس همسایگی مور، هشت سلول همسایه نیز در معرض احتراق هستند. این که کدام سلول همسایه در مرحله بعد دچار احتراق می‌شود، بر اساس مدل الکساندریدیس (رابطه ۱) محاسبه می‌شود (Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۹۴).

بر اساس مدل مذکور، مقدار  $P_{burn}$  عدد پیوسته‌ای بین صفر تا یک خواهد بود. این رابطه برای هر یک از هشت همسایه سلول در حال سوختن، اعمال می‌شود. در نتیجه هر یک از سلول‌های همسایه، در صورت قابلیت احتراق (حالت ۲ یا کد ۲)، مقدار پیوسته‌ای بین صفر تا یک خواهند گرفت. عدد صفر بیانگر این است که سلول نمی‌تواند در این مرحله بسوزد؛ در حالی که عدد یک گویای این است که

برای پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی جنگل در هنگام برنامه‌نویسی مدل در محیط MATLAB چندین حالت سلولی و قانون انتقال آتش‌سوزی در نظر گرفته شد. حالت‌های سلولی عبارت بودند از:

- حالت اول (کد ۱): سلول حاوی مواد سوختی نیست. در این حالت سلول در هیچ گام زمانی نمی‌تواند بسوزد. مناطق مسکونی و رودخانه‌ها نمونه‌هایی از این حالت هستند.
- حالت دوم (کد ۲): سلول حاوی مواد سوختی است، اما هنوز نسوخته است.
- حالت سوم (کد ۳): سلول در حال سوختن است.
- حالت چهارم (کد ۴): سلول کاملاً سوخته است (Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۹۴).

حالت‌های مذکور، برای هر یک از سلول‌ها ممکن است رخ دهد. از این رو برای اعمال قوانین به سلول‌های همسایه سلول مرکزی، از قوانین محلی اتوماسیون سلولی استفاده شد. با توجه به شکل ۶، قوانین محلی شامل قوانین زیر بودند:

- قانون اول: اگر حالت سلول  $(i, j)$  در زمان  $t$  برابر با یک باشد (کد ۱)، حالت سلول در گام زمانی  $t+1$  نیز یک خواهد بود. این قانون بیانگر این مسئله می‌باشد که اگر یک سلول حاوی مواد سوختی نباشد، در هیچ مرحله‌ای نخواهد سوخت و همواره دارای مقدار ثابت یک است.
- قانون دوم: اگر حالت سلول  $(i, j)$  در زمان  $t$  برابر با سه باشد (کد ۳)، حالت سلول در گام زمانی  $t+1$ ، چهار خواهد بود. این قانون بیان می‌کند که اگر سلول حاوی مواد سوختی در این مرحله در حال سوختن باشد، در مرحله بعد کاملاً می‌سوزد و

دقت طبقه بندی، معمولاً براساس شاخص های آماری است که از ماتریس خطا استخراج می شوند. معیار دقت کلی، یکی از این شاخص ها می باشد که نسبت تعداد پیکسل های پیش بینی شده صحیح به تعداد کل پیکسل ها را نشان می دهد. با توجه به ماهیت این شاخص که تنها نسبت تعداد سلول های درست پیش بینی شده به تعداد کل سلول ها را در نظر می گیرد و سلول های نادرست موجود در ماتریس خطا را محاسبات وارد نمی کند، این شاخص معیار خوبی برای محاسبه دقت مدل نمی باشد. با این تفاسیر در این تحقیق از شاخص کاپا نیز استفاده شد. شاخص کاپا یکی از شاخص های آماری مهم قابل استخراج از ماتریس خطا است. مزیت این شاخص این است که برخلاف دقت کلی، پیکسل هایی که درست پیش بینی نشده اند را نیز مدنظر قرار داده و در محاسبات اعمال می کند؛ لذا این شاخص در واقع تأثیر شانس را در مدل سازی از بین می برد. در واقع ضریب کاپا، یک برآورد بدبینانه از مدل سازی است و همیشه دقت را کمتر از مقدار واقعی بیان می کند؛ بنابراین خروجی رابطه کاپا، عددی را نشان خواهد داد که به واقعیت نزدیک تر است. رابطه ۷ نحوه محاسبه شاخص کاپا را نشان می دهد (ملکی، ۱۳۸۹: ۴۶).

$$\hat{k} = \frac{n \sum_{i=1}^j n_{ii} - \sum_{i=1}^j n_{i+} n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^j n_{i+} n_{+i}} \quad (7)$$

در این رابطه،  $n$  تعداد کل پیکسل های واقعیت زمینی،  $n_{i+}$  مجموع عناصر سطر  $i$  ام،  $n_{+i}$  مجموع عناصر ستون  $i$  ام،  $n_{ii}$  مجموع عناصر روی قطر اصلی و  $j$  تعداد کاربری را نشان می دهد. شاخص کاپا مقدار عددی بین صفر تا یک خواهد بود که عدد صفر بیانگر طبقه بندی کاملاً تصادفی و مقدار یک حالت ایده آل مدل سازی است.

### نتایج

**مدل گسترش آتش سوزی در منطقه با استفاده از اتوماسیون سلولی:** به منظور اجرای مدل گسترش آتش سوزی با اتوماسیون سلولی و ارزیابی صحت آن، از محدوده آتش سوزی واقعی ای که پیش تر در منطقه اتفاق افتاده بود، استفاده شد. در نهایت، پس از اعمال

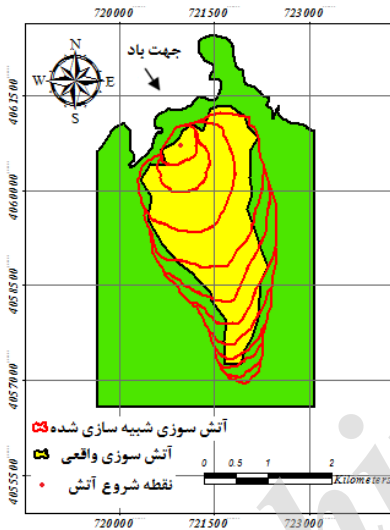
سلول در مرحله بعد به طور کامل دچار احتراق می شود و اگر سلول های همسایه عددی بین صفر تا یک بگیرند، بدین معنی است که سلول های مذکور در مرحله بعد به طور جزئی خواهند سوخت. در این تحقیق تمامی مراحل ذکر شده توسط اتوماسیون سلولی به طور همزمان انجام شد؛ به این صورت که در هر لحظه از زمان بندی اتوماسیون سلولی، سلول های در حال سوختن بررسی شدند و اثر آنها بر هشت سلول همسایه، مطابق با قوانین انتقال محلی بررسی شد. هر سلول بر اساس قانون چهارم، عددی بین صفر تا یک اتخاذ نمود که حالت سلول را در مرحله بعد نشان می داد؛ در همین زمان نمایشی از جبهه آتش سوزی قابل ارائه بود. در پایان، پس از اعمال مدل در نظر گرفته شده در منطقه مورد مطالعه، شکل گسترش جبهه آتش سوزی به دست آمد.

**اعتبارسنجی و ارزیابی نتایج مدل:** یکی از روش های رایج برای ارزیابی نتایج مدل اتوماسیون سلولی، مقایسه نحوه گسترش در شبیه سازی و واقعیت و همچنین مقایسه تعداد سلول های درست شبیه سازی شده و واقعی (درصد نمونه های صحیح و اشتباه مدل سازی شده) است. به منظور ارزیابی کیفی صحت مدل گسترش آتش سوزی، نتایج خروجی مدل (جهت گسترش آتش و نحوه پیشروی جبهه گسترش آتش) با محدوده آتش سوزی واقعی مقایسه گردید. به منظور ارزیابی کمی صحت مدل گسترش آتش سوزی نیز تعداد سلول های سوخته و سالم در مدل شبیه سازی شده و آتش سوزی واقعی (درصد نمونه های صحیح و اشتباه مدل سازی شده) مقایسه شدند. درصد نمونه های صحیح و اشتباه مدل سازی شده از طریق مقایسه مقادیر ثبت شده برای هر طبقه با مقادیر واقعی و تشکیل یک ماتریس خطا می باشد که بیانگر تعداد نمونه هایی است که برای هر طبقه، صحیح و یا اشتباه ثبت شده اند (ملکی، ۱۳۸۹: ۴۳). در ماتریس خطا، داده های واقعیت زمینی در سطرها و داده های مربوط به نتایج شبیه سازی در ستون ها جای می گیرند. در این ماتریس، عناصر غیر از قطر اصلی، در واقع خطاهای موجود در مدل سازی می باشند. ارزیابی خطا و برآورد

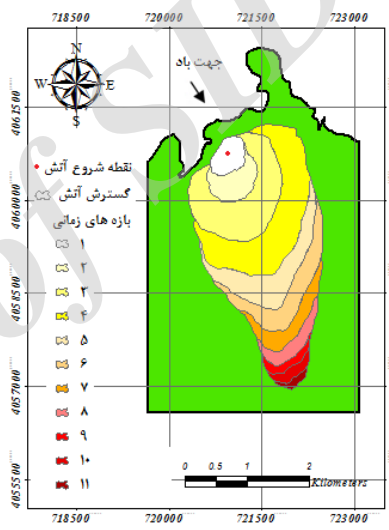
آتش‌سوزی، از دقت کلی و شاخص کاپا استفاده شد. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی با اطلاعات آتش‌سوزی واقعی، ماتریس خطای خروجی مطابق جدول ۶ به‌دست آمد. در این ماتریس، سطرها بیانگر واقعیت و ستون‌ها بیانگر خروجی شبیه‌سازی می‌باشند. همچنین اعداد روی قطر اصلی بیانگر هم‌خوانی تعداد پیکسل‌های سوخته و نسوخته در شبیه‌سازی و واقعیت است. جدول ۷ دقت کلی به‌دست آمده از مدل گسترش آتش‌سوزی و شاخص کاپای محاسبه شده را نشان می‌دهد.

مدل در نظر گرفته شده در منطقه مورد مطالعه، گسترش جبهه آتش‌سوزی مطابق شکل ۷ به‌دست آمد.

**اعتبارسنجی و ارزیابی نتایج مدل:** به منظور ارزیابی کیفی صحت مدل گسترش آتش‌سوزی، پلی‌گون گسترش آتش‌سوزی (خروجی مدل اتوماسیون سلولی) با پلی‌گون آتش‌سوزی واقعی مقایسه گردید. بدین منظور پلی‌گون گسترش آتش‌سوزی حاصل از اتوماسیون سلولی با پلی‌گون آتش‌سوزی واقعی روی هم‌گذاری شد (شکل ۸). همچنین به منظور ارزیابی کمی صحت مدل گسترش



شکل ۸: روی هم‌گذاری پلی‌گون گسترش آتش‌سوزی و آتش‌سوزی واقعی



شکل ۷: گسترش آتش‌سوزی با استفاده از اتوماسیون سلولی

جدول ۶: ماتریس خطای به‌دست‌آمده از مقایسه اطلاعات آتش‌سوزی واقعی و خروجی مدل

		شبیه‌سازی		
		سوخته	نسوخته	مجموع
واقعی	سوخته	۷۰۲۱	۷۹	۷۱۰۰
	نسوخته	۲۸۷۰	۱۵۸۳۶	۱۸۷۰۶
	مجموع	۹۸۹۱	۱۵۹۱۵	۲۵۸۰۶

جدول ۷: نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه اطلاعات آتش‌سوزی واقعی و خروجی مدل

دقت کلی	ضریب کاپا	مساحت منطقه سوخته واقعی (هکتار)	مساحت منطقه سوخته پیش‌بینی شده (هکتار)
۰/۸۸	۰/۷۴	۴۴۳/۶۹	۶۱۸/۲۳

## بحث

این تحقیق به منظور مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی در بخشی از جنگل‌های بخش سه نکا-ظالم‌رود بر اساس مدل الکساندریدیس و قوانین اتوماسیون سلولی انجام شد. هدف از انجام این تحقیق، ارائه یک الگوی مناسب برای پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های منطقه مورد مطالعه به عنوان یک سیستم حامی تصمیم‌گیری در اطفاء حریق بود.

به منظور اجرا و پیاده‌سازی مدل گسترش آتش‌سوزی با اتوماسیون سلولی، محدوده آتش‌سوزی واقعی‌ای که پیش‌تر در منطقه مورد مطالعه اتفاق افتاده بود و اطلاعات آن در زمان آتش‌سوزی موجود بود، انتخاب شد. مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل بر اساس مدل الکساندریدیس و با استفاده از همسایگی هشت‌تایی مور (Liu, 2009: 20) انجام شد. پیاده‌سازی تمامی مراحل گسترش آتش‌سوزی به وسیله اتوماسیون سلولی، به طور همزمان انجام شد. در نهایت با انتخاب نقطه شروع آتش‌سوزی (که طبق اظهار کارشناسان منابع طبیعی منطقه و جنگلبانان محلی در شمال محدوده آتش‌سوزی به وقوع پیوسته قرار گرفته بود)، نحوه گسترش آتش‌سوزی ارائه شد.

با توجه به این که نقطه شروع آتش‌سوزی واقعی در شمال محدوده آتش‌سوزی قرار گرفته بود، برای انجام شبیه‌سازی نیز، نقطه شروع آتش‌سوزی در همان محل در نظر گرفته شد و با توجه به این که جهت باد غالب منطقه در مدل شبیه‌سازی، همانند جهت واقعی باد غالب منطقه به طرف جنوب شرقی در نظر گرفته شده بود، مدل گسترش آتش‌سوزی پس از انتخاب نقطه شروع آتش‌سوزی، از شمال به جنوب محدوده آتش‌سوزی توسعه یافت (شکل ۷). ذکر این نکته ضروری است که افزایش شیب و ارتفاع به طرف جنوب محدوده (شکل ۵) که با وزش باد موافق همراه شده بود، پیشروی آتش به طرف شیب رو به بالا (به سمت جنوب منطقه) را قوت بخشید؛ زیرا در تمامی مدل‌های آتش‌سوزی، اگر باد غالب وجود داشته باشد، مسیر حرکت جبهه‌های آتش را باد مشخص می‌کند؛

در غیر این صورت، توپوگرافی عامل مهمی در تعیین جهت گسترش جبهه آتش‌سوزی می‌باشد (ذکر این نکته ضروری است که نوع و تراکم پوشش گیاهی نیز سهم خود را در ابقای آتش‌سوزی دارد). در شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در این تحقیق نیز باد و توپوگرافی با هم نقش مهمی در تعیین جهت گسترش آتش‌سوزی داشته‌اند. ضمن این که وجود پوشش گیاهی حساس به حریق با تراکم متوسط و انبوه (شکل‌های ۳ و ۴) نیز زمینه مناسبی را برای پیشروی آتش به طرف جنوب محدوده فراهم کرده است. با توجه به این که طبق اظهار جنگلبانان محلی منطقه، آتش‌سوزی واقعی اتفاق افتاده در زمان وقوع، از شمال منطقه شروع شده و با سوزاندن وسعتی قریب به ۴۴۳/۶۹ هکتار از جنگل‌های منطقه، به طرف جنوب گسترش یافته بود، نتایج حاصل از روش اتوماسیون سلولی برای شبیه‌سازی گسترش حریق در محدوده مورد مطالعه مطلوب به نظر می‌رسد. این نتیجه قابلیت روش اتوماسیون سلولی را در مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل تأیید می‌کند. قابلیت این روش پیش‌تر نیز در تحقیقات مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل اثبات شده است (Karafyllidis و Thanailakis, 1997: 95؛ Bodrožić و همکاران، 2006: 74؛ Encinas و همکاران، 2007: 1224؛ Yassemi و همکاران، 2007: 82؛ Alexandridis و همکاران، 2008: 200). ضمن این که این نتایج مطلوبیت مدل الکساندریدیس را نیز برای استفاده در جنگل‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

پس از اتمام اجرای مدل اتوماسیون سلولی برای شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در محدوده مورد مطالعه در نرم‌افزار MATLAB، شکل نهایی پلی‌گون گسترش آتش‌سوزی به دست آمد (شکل ۷). به منظور مقایسه نحوه گسترش آتش‌سوزی واقعی و شبیه‌سازی شده، پلی‌گون گسترش آتش‌سوزی (خروجی مدل اتوماسیون سلولی) با پلی‌گون آتش‌سوزی واقعی روی هم گذاری شد (شکل ۸). نتایج حاکی از شباهت پلی‌گون آتش‌سوزی شبیه‌سازی شده و آتش‌سوزی واقعی بود که بار دیگر قابلیت مدل

سلولی می‌باشد. همچنین شاخص کاپای محاسبه شده برای مدل گسترش آتش‌سوزی برابر با ۷۴ درصد می‌باشد. با توجه به این که این شاخص برخلاف دقت کلی، پیکسل‌هایی که درست پیش‌بینی نشده‌اند را نیز مدنظر قرار داده و در محاسبات اعمال می‌کند، یک حالت بدبینانه برای محاسبه دقت مدل ارائه می‌دهد. از طرف دیگر هر چه مقدار کاپا به یک نزدیک‌تر باشد، دقت شبیه‌سازی بیشتر می‌باشد؛ لذا عدد به‌دست آمده از شاخص کاپا، بیانگر دقت پیش‌بینی مدل گسترش آتش‌سوزی و مطلوبیت روش اتوماسیون سلولی در مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی در این تحقیق می‌باشد.

در پایان ذکر این نکته ضروری است که همانندی کامل و دقیق منطقه سوخته شبیه‌سازی شده به آتش‌سوزی واقعی، همیشه یک هدف نهایی و محض در مدل‌سازی‌های گسترش آتش‌سوزی نیست. عدم قطعیت در شبیه‌سازی ممکن است از طریق فاکتورهای مختلفی مانند عوامل هواشناسی (نبود اطلاعات دقیق در مورد سرعت و جهت دقیق باد، وجود غبارهای اتفاقی در باد، تغییرات درجه حرارت و رطوبت در زمان آتش‌سوزی)، عدم مدل‌سازی پدیده‌های معین (مانند تغییرات جریان‌های گردبادی و تلاطم هوا به دلیل شکل عوارض زمین) و نبود اطلاعات در مورد نتایج تلاش‌های اطفاء حریق و چگونگی خاموش شدن آتش اتفاق بیفتد (Alexandridis و همکاران، ۲۰۰۸: ۲۰۰). به هر حال نتایج این تحقیق می‌تواند راهگشایی برای شروع تحقیقاتی ارزشمند در زمینه مدل‌سازی گسترش پدیده پیچیده آتش‌سوزی، در جنگل‌های ایران باشد.

#### نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که روش اتوماسیون سلولی قابلیت زیادی برای پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های منطقه داشته است و به کمک آن می‌توان یک الگوی مناسب برای پیش‌بینی نحوه گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های منطقه ارائه داد؛ زیرا ادغام اتوماسیون سلولی و مدل ریاضی (که در

مورد استفاده را در پیش‌روی جبهه گسترش آتش مشخص می‌کند.

به منظور ارزیابی کمی صحت مدل مورد استفاده گسترش آتش‌سوزی، تعداد سلول‌های سوخته و سالم در مدل شبیه‌سازی شده و آتش‌سوزی واقعی (درصد نمونه‌های صحیح و اشتباه مدل‌سازی شده) مقایسه گردید و ماتریس خطا به‌دست آمد (جدول ۶). در ماتریس خطا (جدول ۶)، اعداد روی قطر اصلی بیانگر هم‌خوانی تعداد پیکسل‌های سوخته و نسوخته در شبیه‌سازی و واقعیت است. در ماتریس خطای حاصله، عدد اول روی قطر اصلی ماتریس (عدد ۷۰۲۱) بیانگر این است که این تعداد پیکسل، هم در مدل‌سازی و هم در واقعیت سوخته‌اند. به عبارت دیگر، مدل موردنظر تعداد ۷۰۲۱ عدد پیکسل را مطابق واقعیت پیش‌بینی کرده است. عدد دوم روی قطر اصلی ماتریس، ۱۵۸۳۶ می‌باشد و بدین مفهوم است که این تعداد پیکسل، هم در خروجی مدل گسترش آتش‌سوزی و هم در واقعیت نسوخته است. عدد ۷۹ بیان می‌دارد که مدل، تعداد ۷۹ پیکسل را از قلم انداخته است، بدین معنی که این ۷۹ پیکسل در واقعیت سوخته‌اند، اما در شبیه‌سازی نسوخته‌اند و مدل نتوانسته است آنها را پیش‌بینی کند. همچنین عدد ۲۸۷۰ که در سطر دوم از ستون اول قرار دارد، بیانگر تعداد پیکسل‌هایی می‌باشد که در واقعیت نسوخته‌اند، اما در شبیه‌سازی سوخته‌اند. بدین معنی که مدل این تعداد پیکسل را به اشتباه شبیه‌سازی کرده است.

در نهایت از ماتریس خطا، دو نوع دقت قابل استنتاج بود: دقت کلی و شاخص کاپا. دقت کلی با توجه به این که با نسبت تعداد پیکسل‌های پیش‌بینی شده صحیح به تعداد کل پیکسل‌ها محاسبه می‌شود، حالت بسیار خوش‌بینانه می‌باشد؛ زیرا تعداد پیکسل‌هایی که به اشتباه پیش‌بینی شده‌اند را لحاظ نمی‌کند. مطابق جدول ۷ دقت کلی به‌دست آمده از مدل گسترش آتش‌سوزی در این تحقیق برابر با ۸۸ درصد می‌باشد که قابل قبول است و بازتاب مطلوبیت مدل گسترش آتش‌سوزی بر مبنای روش اتوماسیون

- این تحقیق به کار برده شد، این امکان را فراهم می‌کند که بتوان گسترش آتش‌سوزی را لحظه به لحظه بررسی کرد؛ بنابراین از مدل ارائه‌شده می‌توان به عنوان یک سیستم حامی تصمیم‌گیری در اطفاء حریق، کنترل بهتر آتش‌سوزی و اختصاص بهینه نیروها و امکانات در مکان‌های مناسب در هنگام حریق استفاده نمود. زیرا یک سیستم حامی تصمیم‌گیری برای مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل‌ها، بخش لاینفک واحدهای مدیریتی محیط زیست می‌باشد. در این راستا، وجود سیستمی که بتواند گسترش آتش‌سوزی جنگل را هم از نظر مکانی و هم از نظر زمانی به خوبی پیش‌بینی کند، مدیریت آتش‌سوزی جنگل را به طور چشمگیری تسهیل خواهد نمود. وجود چنین سیستمی قدرت تصمیم‌گیری مدیران را در راستای تخصیص امکانات و نیروها در زمان و مکان مناسب افزایش خواهد داد.
- در پایان پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده تأثیر عوامل دیگری مانند درجه‌حرارت هوا و میزان رطوبت سوخت نیز بر گسترش آتش‌سوزی جنگل بررسی شود و در صورت مؤثر بودن آنها، این پارامترها نیز به مدل گسترش آتش‌سوزی اضافه شوند. همچنین در روش اتوماسیون سلولی، تأثیر اندازه و شکل سلول (شش‌ضلعی و غیره) نیز بر نحوه و زمان گسترش آتش‌سوزی بررسی شود. تهیه پایگاه داده‌های زمان‌مند از نحوه گسترش آتش‌سوزی در هنگام وقوع حریق‌ها، به‌منظور استفاده در اعتبارسنجی مدل‌های گسترش آتش‌سوزی در تحقیقات آینده موضوعی است که اهمیت زیادی دارد. به علاوه پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل با مدل‌های نیمه‌تجربی دیگر گسترش آتش‌سوزی مانند FARSITE نیز انجام شود و نتایج آن با نتایج این تحقیق مقایسه شود.
- منابع**
۱. اداره کل منابع طبیعی استان مازندران. ۱۳۹۰. آمار و اطلاعات آتش‌سوزی در استان مازندران.
  - یگان حفاظت اداره کل منابع طبیعی استان مازندران، ساری، ۱۲۰ صفحه.
  ۲. اسکندری، سعیده. ۱۳۹۴. تحلیلی بر روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌ها. فصلنامه انسان و محیط زیست، ۱۳(۳): ۶۷-۸۸.
  ۳. شرکت سهامی نکاچوب. ۱۳۸۹. طرح جنگلداری جنگل‌های بخش سه نکا- ظالمروود. سازمان جنگل‌ها مراتع و آبخیزداری کشور، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مازندران، ساری، ۱۰۹ صفحه.
  ۴. عادل، ابراهیم و علی یخکشی. ۱۳۵۴. حمایت جنگل. مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، ۲۷۹ صفحه.
  ۵. کاظمی، سیدمحمد. ۱۳۸۴. آتش و اکوسیستم‌های جنگلی. دام، کشت، صنعت، ۴۶، ۵۶-۷۰.
  ۶. محمدی، فریده. نقی شعبانیان و مهدی پورهاشمی و پرویز فاتحی. ۱۳۸۹. تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از AHP و GIS. فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۸(۴)، ۵۶۹-۵۸۶.
  ۷. ملکی، داوود. ۱۳۸۹. مدل‌سازی توسعه شهری با استفاده از روش اتوماتای سلولی. رساله کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر علی‌اصغر آل شیخ. دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، ۱۲۲ صفحه.
  8. Adab, H., Kanniah, K.D., and Solaimani, K. 2013. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Natural Hazards*, 65, 1723-1743.
  9. Alexandridis, A., Vakalis, D., Siettos, C.I., and Bafas, G.V. 2008. A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990. *Applied Mathematics and Computation*, 204, 191-201.
  10. Alidmat, O.Kh.A., Hassan, F.H., and Khader, A.T. 2015. cellular automata model for pedestrian evacuation in fire spreading conditions. *Proceedings of the*

20. Mahdavi, A., Fallah Shamsi, S.R., and Nazari, R. 2012. Forests and rangeland's wildfire risk zoning using GIS and AHP techniques. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 10(1), 43-52.
21. Pastor, E., Zarate, L., Planas, E., and Analdos, J. 2003. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behavior. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29, 139-153.
22. Podur, J., Martell, D.L., and Knight, K. 2002. Statistical quality control analysis of forest fire activity in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 32, 195-205.
23. Roman, M.V., Azqueta, D., and Rodrigues, M. 2013. Methodological approach to assess the socio-economic vulnerability to wildfires in Spain. *Forest Ecology and Management*, 294, 158-165.
24. Saidi, A.A. 1999. The use of the GIS into the forest fire prediction, the simulation model. Available in: <http://www.cs.wright.edu/~bwang/courses/ceg434634/pa1.pdf>
25. Sirakoulis, G.C., Karafyllidis, I., and Thanailakis, A. 2005. A cellular automaton for the propagation of circular fronts and its applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 18(6), 731-744.
26. Sowmya, S.V., and Somashekar, R.K. 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.
27. Trunfio, G.A. 2004. Predicting wildfire spreading through a hexagonal cellular automata model. In: Sloot., P.M.A., Chopard., B., Hoekstra, A.G. (Eds.). *Cellular Automata*. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, Germany, 385-394.
28. Vakalis, D., Sarimveis, H., Kiranoudis, C.T., Alexandridis, A. and Bafas, G.V. 2004. A GIS based operational system for wildland fire crisis management, I. Mathematical modelling and simulation. *Applied Mathematical Modelling*, 28(4), 389-410.
- 5th International Conference on Computing and Informatics, ICOCI 2015, Istanbul, Turkey, 293-299.
11. Bodrožić, L., Stipanicev, D., and Šeric, M. 2006. Forest fires spread modeling using cellular automata approach. M.Sc. Thesis, University of Split, Split, Croatia, 80p.
12. Encinas, L.H., White, S.H., Rey, A.M., and Sánchez, G.R. 2007. Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata. *Applied Mathematical Modelling*, 31(6), 1213-1227.
13. Eskandari, S., and Chuvieco, E. 2015. Fire danger assessment in Iran based on geospatial information. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42, 57-64.
14. Eskandari, S., Oladi, J., Jalilvand, H., and Saradjian, M.R. 2013a. Role of human factors on fire occurrence in District Three of Neka Zalemroud forests- Iran. *World Applied Sciences Journal*, 27(9), 1146-1150.
15. Eskandari, S., Oladi, J., Jalilvand, H., and Saradjian, M.R. 2013b. Detection of fire high-risk areas in Northern forests of Iran using Dong model. *World Applied Sciences Journal*, 27(6), 770-773.
16. Ghisu, T., Arca, B., Pellizzaro, G., and Duce, P. 2015. An improved cellular automata for wildfire spread. *Proceedings of International Conference on Computational Science, ICCS 2015*, 51, 2287-2296.
17. Janbaz Ghobadi, Gh., Gholizadeh, B., and Majidi Dashliburun, O. 2012. Forest fire risk zone mapping from Geographic Information System in northern forests of Iran (Case study, Golestan province). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4(12), 818-824.
18. Karafyllidis, I., and Thanailakis, A. 1997. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*, 99(1), 87-97.
19. Liu, Y. 2009. Modelling urban development with Geographical Information Systems and cellular automata. CRC Press, Taylor and Francis Group, 204p.



31. Yongzhong, Z., Feng, D., Tao, H., Liyu, W., Kegong, L. and Xin, D. 2004. Simulating wildfire spreading processes in spatially heterogeneous landscape using an improved cellular automaton model. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 04), 5, 3371-3374.
29. Wang, S.L., Lee, H.I. and Li, S.P. 2014. Fractal dimensions of wildfire spreading. Nonlinear Processes in Geophysics, 21, 815-823.
30. Yassemi, S., Dragicevic, S. and Schmidt, M. 2007. Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behavior. Ecological Modeling, 201, 71-84.

Archive of SID