مجله علوم جغرافیایی(جغرافیای کاربردی)، دوره۱۶، شماره ۳۲، بهار و تابستان ۱۳۹۹، صفحه ۱۰۷-۱۱۷

مدل‌سازی نحوه گسترش آتش‌سوزی جنگل بر پایه GIS و اتوماسیون سلولی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بابلرود، مازندارن)

راحله اسلامی[۱]، محمدرضا آذرنوش[۲]، علی کیالاشکی[۳]، فرید کاظم نژاد[۳]

[۱]دانشجوی دکتری گروه مهندسی منابع طبیعی، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران
[۲]استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران
[۳]دانشیار گروه جنگلداری، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

نویسنده مسئول: reslami2013@gmail.com
تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۲۸/ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۴

چکیده

آتش‌سوزی جنگل به عنوان یک تهدید مهم برای امنیت زندگی بشری، زیرساخت‌ها و محیط زیست شناخته می‌شود. در سال‌های اخیر با وجود گرمایش جهانی میزان آتش‌سوزی‌های جنگل نیز افزایش پیدا کرده است. یکی از راه‌های مناسب برای شناخت رفتار آتش و در نتیجه مقابله مناسب با آن، شبیه‌سازی رفتار و نحوه گسترش آتش‌سوزی است؛ بنابراین در این مطالعه با استفاده ازروش اتوماسیون سلولی و بر مبنای مدل آلکساندریدیس اقدام به شبیه‌سازیآتش‌سوزی در قسمتی از جنگل‌های شهرستان سوادکوه شمالی در حوزه آبخیز بابلرود و استان مازندران نموده شد. بدین منظور با استفاده از متغیرهای توپوگرافی، پوشش گیاهی و همچنین سرعت و جهت باد نحوه گسترش آتش‌سوزیشبیه‌سازی شد و نتایج با آتش‌سوزی واقعی رخ داده مقایسه گشت. نتایج نشان داد که صحت مدل شبیه‌سازی شده برابر با ۸۴٪ است که نشان دهنده شبیه سازی مناسب توسط مدل مذکور است؛ بنابراین به نظر می‌رسد با توجه به شرایط خاص جنگل‌های ایران، اتوماسیون سلولی برای شبیه‌سازیآتش‌سوزی جنگل کارایی مناسبی دارد.

کلیدواژه: آتش‌سوزی جنگل، شبیه‌سازی، اتوماسیون سلولی، GIS

مقدمه

جنگل‌ها زیباترین منابع طبیعی پیرامون ما هستند و نقش مهمی را در سلامت جسمی و روانیموجودات زنده ایفا می‌کنند. سلامتی جنگل در هر محل شاخصی از شرایط اکولوژیکی متداول در آنناحیه است (Zhang & Chen, 2007). یکی از خطراتی که جنگل‌ها را تهدید می‌کند آتش‌سوزی می‌باشدکه با خسارات جبران‌ناپذیری که به آن‌ها وارد می‌کند، سبب تغییر اکولوژی منطقه می‌شود (Zhang & Chen, 2007). امروزه در خشکی‌های سطح زمین پس از فعالیت‌های شهری و کشاورزی انسانی، آتش‌سوزی فراگیرترین عامل تخریب اکوسیستم‌های طبیعی به شمار می‌رود (Yin et al., 2004). آتش‌سوزی جنگل به عنوان یک تهدید مهم برای امنیت زندگی بشری، زیرساخت‌ها و محیط زیست شناخته می‌شود (Liu et al., 2012; Hong et al., 2018). متأسفانه به علت تغییر اقلیم، افزایش دمای زمین، افزایش خشکسالی ها، تغییر کاربری اراضی و فعالیت‌های بشری انتظار می‌رود که آتش‌سوزی‌های جنگل در آینده نه تنها کاهش پیدا نکند بلکه حتی افزایش یابد (Eskandari & Chuvieco, 2015). این پدیده ناخوشایند برنامه ریزان و سازمان‌های مسئول را مجبور به مدیریت آتش‌سوزی تاو اتخاذ تدابیر و رویکردهای مناسب و به کارگیری ابزار مناسب برای مقابله با این پدیده درجهت حفظ اکوسیستم های ارزشمند طبیعی می‌کند (Ercanoglu et al., 2006). یکی از مهمترین ابزاری که می‌تواند جهت کنترل آتش‌سوزی جنگل بسیار مفید و کارا باشد، شبیه‌سازی نحوه گسترش آتش‌سوزی است. در واقع می‌توان با شبیه‌سازی مناسب وقوع آتش‌سوزی به تعیین رفتارآتش‌سوزی‌ها پرداخت و با پیش‌بینی رفتارآتش‌سوزی نسبت به اقدامات لازم برای مقابله با پیشروی آتش اقدام نمود (اسکندری، ۱۳۹۲). شبیه‌سازی یک پدیده عملیاتی است که سعی بر آن دارد که رفتار آن پدیده را در شرایط ایجاد شده توسط داده‌های مجازی، بازسازی و بررسی کند (حسینعلی و رجبی، ۱۳۸۴). شبیه‌سازی آتش‌سوزی جنگل از

موضوعات مهم کنترل آتش‌سوزی در این محیط‌های طبیعی است. بـه طـوری کـه برنامه‌های شبیه سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل، در مرحله بعد از اطفای حریق، برای بازسازی وقـایع آتش‌سوزی گذشته و در هنگام فرونشانی آتش، برای شناخت شرایط محیطی، مؤثر واقع می‌شوند (Glasa & Halada, 2008).جهت شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل تاکنون مدل‌های مختلفی توسعه و پیشنهاد شده‌اند. این مدل‌ها را می‌توان در سه گروه دسته‌بندی نمود؛ الف) مدل‌های تجربی (یا آماری): این مدل‌هامعمولاً رفتار آتش‌سوزی را با دقتی بیش از حد متوسط می‌توانند پیش‌بینی کنند و بر اساس داده‌های حاصل از عملیات آزمایشگاهی یا عرصه‌ای و رفتار آتش‌سوزی‌های قبلی رخ داده شده رفتار آتش را پیش‌بینیمی‌کنند. از جمله مهمترین مدل‌های این دسته مدل شبیه‌سازی کانادایی و استرالیا هستند. ب) مدل‌های شبه تجربی (شبه فیزیکی یا آزمایشگاهی): این مدل‌ها بر پایه قوانین کلی جابجایی انرژی استوار هستند و با فرض اینکه انرژی همواره می‌تواند از مناطق در حال سوختن به مناطق سوخته نشده براساس میزان سوخت موجود، انتقال یابد به شبیه‌سازی گسترش آتش می‌پردازند. مدل‌های زیادی در این دسته توسعه داده شده‌اند. از جمله مدل‌های معروف این دسته می‌توان به مدل‌های اتوماسیون سلولی و راترمل اشاره کرد. ج) مدل‌های فیزیکی (نظری یا تحلیلی): مدل‌هایی بر مبنای مؤلفه‌های فیزیکی که توانایی برآورد دقیق میزان و دامنه اثرگذاری متغیرهای ورودی مدل را دارند از جمله این مدل‌هامی‌توان به مدل مدل‌سازی آتش‌سوزی تاج (Crown fire modelling) اشاره کرد (Bodrožić et al., 2006). باتوجه به شرایط جنگل‌های ایران و سرشت آتش‌سوزی در این جنگل‌ها که اغلب از نـوع سطحی می‌باشد،مدل‌های نظری،مدل‌های فیزیکی آتش سوزی سطحی و مدل های نیمه تجربی راترمل ، فارسایتو اتوماسیون سلولی می‌توانند بهترین گزینه بـرای مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی در این جنگل‌ها باشند. دراین میان،مدل اتوماسـیون سـلولی همراه با توانایی‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به دلیل ساختارپایدار، سادگی، سازگاری بـا داده‌های رستریو اجرای آن ازطریق اعمال یکسـری قـوانین ساده محلی بر روی پیکسل‌ها (سلول‌ها) می‌تواند درصورت در دسترس بودن داده‌های توپوگرافی،پوشـش گیاهی، سرعت وجهت باد، قابلیت زیادی برای مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی درجنگل‌های ایران داشـته باشد (اسکندری، ۱۳۹۴). اتوماسیون سلولی یک روش کارآمد برای مدل‌سازی سیستم‌های فیزیکی، پویا و پیچیده مانند آتش‌سوزی است (قائمی راد و کریمی، ۱۳۹۴). این روش قادر است سیستم‌های پیچیده را براساس مهمترین ویژگی‌های آن‌ها ساده‌سازی کند و مکانیزم های بسیار جزئی و کوچک موجود در این سیستم‌ها را که مربوط به رفتارتکاملی و قابل رؤیت آن‌ها است، نشان دهد، بنابراین استفاده از اتوماسیون سلولی برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده دردهه‌های اخیر مورد توجه خاصی قرار گرفته است (Yu et al., 2005). در این مدل‌ها، محیط جنگل به صورت یک فضای سلولی در نظر گرفته می‌شود که وضعیت هر سلول آن (هر قطعه از جنگل) به صورت تابعی از وضعیت خود سلول و سلول‌های همسایه در طی زمان تغییر می‌نماید. یک سلول آتش گرفته، آتش را به سمت سلول‌های سالم همسایه هدایت می‌کند که این امر می‌تواند برای مدل‌سازی فرآیند گسترش مفید باشد (Sakr et al., 2011). این روش درسال‌های اخیر برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی گسـترش آتش‌سوزی جنگل درتحقیقات مختلف محبوبیت پیداکرده است. تاکنون مطالعات مختلفی در دنیا به منظور شبیه‌سازی نحوه گسترش آتش‌سوزی جنگل رخ داده است. آلکساندریدیس و همکاران (۲۰۰۸) با توسعه مدل اتوماسیون سلولی و استفاده از پارامترهایی مانند نوع و تراکم پوشش گیاهی، سرعت و جهت باد و توپوگرافی به شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل پرداختند. مدل توسعه داده شده با توجه به کارایی آن پیشنهاد گردید. بعد از آن مطالعاتی با استفاده از مدل آلکساندریدیس و بر مبنای اتوماسیون سلولی صورت گرفته است که از جمله این تحقیقات می‌توان به مطالعات Freire و DaCamara (۲۰۱۹) در جنگل‌های مدیترانه‌ای کشور پرتغال اشاره کرد. در این مطالعه با استفاده از مدل توسعه داده شده توسط آلکساندریس بر مبنای اتوماسیون سلولی به شبیه‌سازی نحوه گسترش آتش‌سوزی پرداخته شد که نتایج نشان دهنده دقت مناسب شبیه‌سازی با استفاده از مدل مذکور بود. Paisو همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مدل Cell2Fire که نوعی مدل مبتنی بر اتوماسیون سلولی است به شبیه‌سازی آتش‌سوزی پرداختند که نتایج نشان دهنده کیفیت مناسب این ابزار طراحی شده برای شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل بود. در مطالعه دیگری Prieto Herráez و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از یک مدل تلفیقی از شرایط فیزیکی منطقه و توجه وِیژه به مؤلفه باد به شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های اسپانیا پرداختند. در ایران نیز مطالعات محدودی در رابطه با شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی صورت گرفته است که از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعات پهلوانی و همکاران (۱۳۹۷) در جنگل‌های گلستان، قائمی راد و کریمی (۱۳۹۵) در جنگل‌های گیلان و گزمه و همکاران (۱۳۹۲) در جنگل‌های گلستان با استفاده از مدل اتوماسیون سلولی اشاره کرد. با توجه به مطالب ذکر شده و وقوع آتش‌سوزی‌های مکرر در جنگل‌های استان مازندران و حوزه آبخیز بابلرود (با توجه به اطلاعات اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری) از یک طرف واهمیت سیاست‌های عملیاتی مقابله با حریق در اینجنگل‌ها 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 ازانجام این تحقیق، شبیه‌سازی نحوه گسترش آتش‌سوزی در قسمتی از جنگل‌های حوزه آبخیز بابلرود در استان مازندران با استفاده از مدل آلکساندریدیس و بر مبنای اتوماسیون سلولی و اعتبارسنجی آن است؛ به طوری که بتوان ازاین الگو به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی، اطفاء حریق،کنترل بهتر آتش‌سوزی و اختصاص بهینه نیروها وامکانات در مکان‌های مناسب در هنگام حریق استفاده نمود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق بخشی از جنگل‌های بخش مرکزی شهرستان سوادکوه شمالی در استان مازندران است. مطقه مورد مطالعه که در حوزه آبخیز رودخانه بابلرود واقع شده است و دارای پوشش جنگلی می‌باشد، در مختصاتی بین "۴۰ '۴۲ °۵۲ تا "۵۱ '۴۳ °۵۲ درجه طول شرقی و "۴۴ '۱۰ °۳۶ تا "۰۳ '۱۰ °۳۶ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). براساس آمار نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مورد مطالعه میانگین دمای متوسط سالیانه ۱۴/۱۴ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه برابر با ۷۸۲ میلی‌متر در سال است و براساس روش آمبرژه اقلیم منطقه از نوع نیمه مرطوب سرد می‌باشد. علت انتخاب این منطقه برای مطالعه حاضر، آتش‌سوزی رخ داده در آن در تاریخ ۱۳۹۳/۵/۱۰ است که باعث سوختن حدود ۲۹ هکتار از اراضی جنگلی گشته است. براساس اطلاعات و آمار حاصله از کارشناسان منابع طبیعی محلی آتش‌سوزی مذکور از حدود ساعت '۱۲:۳۰ ظهر شروع و تا حدود ساعت '۲۲:۴۵ به مدت بیش از ۱۰ ساعت ادامه داشته است. نقطه شروع آتش‌سوزی و همچنین محدوده گسترش آتش‌سوزی مذکور با کمک کارشناسان تعیین گردید و در ادامه اقدام به شبیه‌سازیآتش‌سوزی در این منطقه شد.

روش مطالعه

در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی نحوه گسترش آتش‌سوزی با استفاده از پارامترهای مختلف مربوط به شروع آتش‌سوزی و همچنین متغیرهای مربوط به پوشش گیاهی و توپوگرافی و سرعت و جهت باد اقدام به شبیه‌سازی رفتار آتش با استفاده از مدل آلکساندریدیس و بر پایه اتوماسیون سلولی شد (شکل ۲). اتوماسیون سلولی نوعی از مدل‌های نیمه تجربی 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 et al., 2003) این قواعد بر اساس مدل‌های ریاضی تئوری و نیمه تجربی هستند. روش اتوماسیون سلولی از یک شبکه دوبعدی با ابعاد کوچک برای منطقه جنگلی استفاده می‌کند که به تعداد زیادی از سلول‌ها تقسیم می‌شود. در واقع هر سلول نشان‌دهنده قطعه کوچکی از زمین است و شکل آن معمولاً به صورت مربع انتخاب می‌شود، در نتیجه هشت جهت برای گسترش آتش‌سوزی وجود دارد که به همسایگی Moore معروف است (شکل ۳). (Alexandridis et al., 2008)؛ بنابراین وضعیت هر سلول در زمان t+1 تابعی از وضعیت خود سلول و ۸ سلول مجاور آن در زمان t است. هر سلول معمولاً توسط چندین متغیر توصیف می‌شود. در شبیه‌سازی رفتار آتش با استفاده از مدل اتوماسیون سلولی که توسط آلکساندریدیس توسعه داده شده است هر سلول دارای یکی از چهار حالت ممکن شامل؛ در حال سوختن، فاقد مواد قابل اشتعال است و بنابراین دچار حریق نمی‌شود، دارای مواد قابل اشتعال اما هنوز دچار حریق نشده است و کاملاً سوخته است. برای اجرای اتوماسیون سلولی چهار شرط تعریف می‌گردد. در شرط اول بیان می‌شود که سلولی که به خاطر فقدان مواد سوختی قادر به سوختن نیست دیگر در ادامه نیز هرگز نخواهد سوخت، شرط دوم بیان می‌کند که سلولی که در زمان t در حال سوختن است در زمان t+1 کاملاًمی‌سوزد. شرط سوم بیان می‌کند که سلولی که کاملاً سوخته است قادر به سوختن مجدد نیست و در نهایت شرط چهارم بیان می‌کند سلولی که در حال حاضر در حال سوختن است می‌تواند حریق را با یک احتمالی که تابعی از متغیرهای مؤثر بر آتش‌سوزی است به سلول‌های مجاور انتقال دهد (Bodrožić et al., 2006). بر اساس مدل آلکساندریدیس، مهم‌ترین عواملی که بر میزان گسترش و شکل جبهه آتش‌سوزی جنگل‌ها تأثیر می‌گذارند عبارتند از سوخت (نوع و تراکم پوشش گیاهی)، توپوگرافی (شیب و موانع طبیعی)، سرعت و جهت باد (Alexandridis et al., 2008). برای هر سلول، احتمال سوخته شدن از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود (Alexandridis et al., 2008).

رابطه ۱

$$P_{burn} = P_h (1+P_{veg}) (1+P_{den}) P_w P_s$$

در این رابطه P_{burn} احتمال سوخته شدن یک سلول و P_h نشان‌دهنده یک ضریب تجربی است و بیانگر احتمال گسترش آتش‌سوزی به یکی از سلول‌های همسایه می‌باشد. P_{veg} نوع پوشش گیاهی، P_{den} تراکم پوشش گیاهی Ps اثر سرعت و جهت باد و P_w اثر توپوگرافی بر گسترش آتش‌سوزی جنگل است. برای اعمال مدل، نیاز به چهار مقدار تجربی اولیه است. مقادیر P_{veg} و P_{den} با توجه به مقادیر جدول۱ تعیین می‌شوند. در منطقه مورد مطالعه دو تیپ راش- افرا و راش- ممرز وجود دارند که مطابق با نظر کارشناسان

تیپ راش- افرا در دسته گیاهان نیمه مقاوم به حریق و تیپ راش- ممرز در دسته گیاهان حساس به حریق قرار می‌گیرند. رابطه ۲ مدل ارائه شده برای محاسبه اثر باد بر مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل را نشان می‌دهد (Alexandridiset al., 2008).

رابطه ۲

$$P_w = \exp(c_1 V)\, f_t$$

در این رابطه c_1 ضریب تجربی و V سرعت باد برحسب متر بر ثانیه است f_t نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

رابطه ۳

$$f_t = \exp\{Vc_2(\cos(\theta) - 1)\}$$

در این رابطه Θ زاویه بین جهت انتشار آتش و c_2 ضریب تجربی است. در رابطه بالا 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 (Freire & DaCamara, 2019). در این تحقیق، مدل مورداستفاده برای محاسبه اثر شیب از طریق رابطه زیر استفاده کرد که در آن Θs زاویه شیب قطعه زمین و a یک ضریب تجربی می‌باشد (Alexandridis et al., 2008).

رابطه ۴

$$P_s = \exp(a\,\theta_s)$$

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 زیر محاسبه می‌شود.

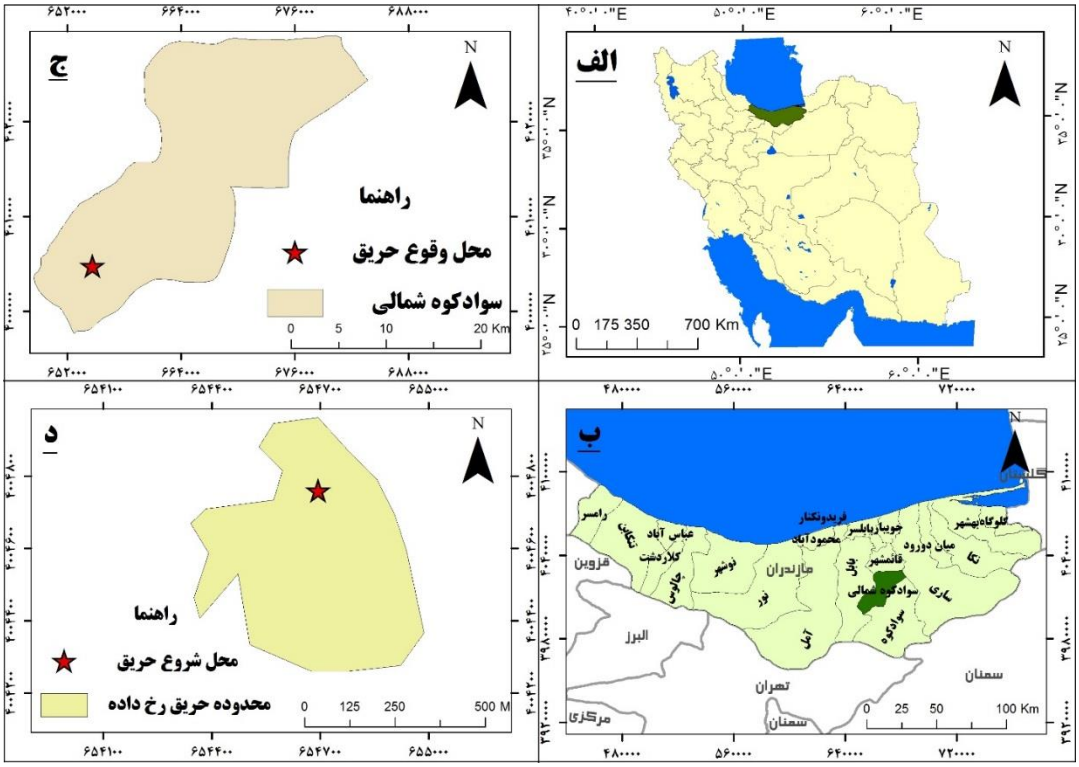
رابطه ۵

$$\theta_s = \tan^{-1}(E_1 - E_2 / l)$$

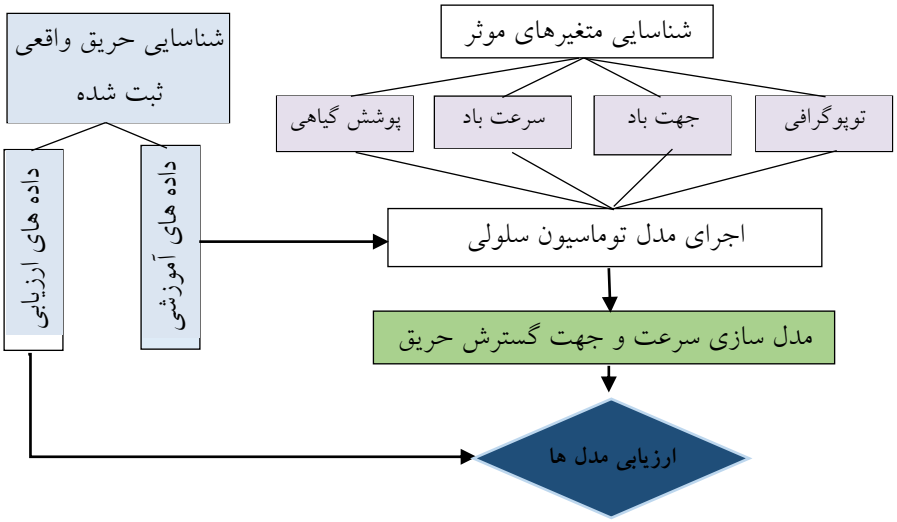
در این رابطه E_1 و E_2 ارتفاع دو سلول و l طول سلول مربعی است. همچنین برای محاسبهزاویه شیب سلول‌های قطری در مخرج رابطه ۵ به جای l از $\sqrt{2}l$ استفاده می‌شود. ضرایب تجربی مطابق با مدل آلکساندریدیس تعیین شدند به صورتی که P_h برابر ۰/۵۸، C_2 برابر ۰/۱۳۱، C_1 برابر با ۰/۰۴۵ و a برابر با ۰/۰۷۸ در نظر گرفته شد (Freire & DaCamara, 2019). جهت اجرای مدل مذکور نقشه‌های تراکم و تیپ جنگلی از مرکز مدیریت حوزه سد البرز تهیه و اصلاحات لازم بر روی آن صورت گرفت. نقشه‌های ارتفاع و شیب نیز از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ استفاده در محیط GIS استخراج شدند. اطلاعات هواشناسی مربوط به تاریخ وقوع حریق نیز از اداره کل هواشناسی استان مازندران تهیه شد که براساس آن در زمان وقوع حریق جهت وزش باد ۳۳۰ درجه یعنی تقریباً شمال غربی و سرعت وزش باد ۷/۵ متر بر ثانیه بوده است. در نهایت با توجه به اینکه حریق رخ داده در طی حدود ۱۰ ساعت کنترل شده است، بنابراین شبیه سازی رفتار حریق در این مطالعه در بازه ۱۰ ساعته و در ۵ گردش ۲ ساعته صورت گرفت. در پایان ارقام و اطلاعاتی درباره تعداد و درصد سلول‌های سوخته و سالم به دستآمده و به منظور ارزیابی صحت مدل گسترش آتش‌سوزی، نتایج خروجی مدل با آتش‌سوزی واقعی با استفاده از ضرایبی همانند صحت کلی و ضریب کاپا مورد مقایسه قرار گرفت (Freire & DaCamara, 2019).

نتایج

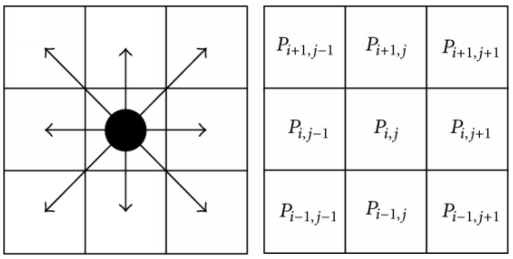
به منظور اجرای مدل اتوماسیون سلولی در ابتدا نقشه متغیرهای مختلف پوشش گیاهی، توپوگرافی، جاده ها و آبراهه ها تهیه شد (شکل ۴). براساس نتایج ارتفاع از سطح دریا در منطقه مورد مطالعه از حدود ۷۶۶ تا ۱۴۰۰ متر متغیر است و میزان شیب نیز از حدود ۷ درصد تا ۱۴۲ درصد متغیر است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است بیشترین سطح منطقه مورد مطالعه دارای پوشش گیاهی انبوه است و دو تیپ راش-افرا و راش- ممرز در منطقه حضور دارند. در نهایت نحوه گسترش آتش در ۵ دور تکرار مدل سلولی که در واقع نشان دهنده ۵ بازه زمانی از شروع آتش‌سوزی شبیه‌سازی شد (شکل ۵). در این شکل نشان داده شده است که در هر بازه زمانی نحوه و میزان گسترش آتش به چه شکلی است. براساس نتایج حاصله سطح حریق واقعی رخ داده حدود ۲۸/۸۸ هکتار است در حالی که مساحت حریق شبیه‌سازی شده ۳۷/۰۷ هکتار در بازه زمانی یکسان است که نشان می‌دهد حریق با مساحت بیشتری نسبت به حریق واقعی شبیه‌سازی شده است. شکل ۶ میزان افزایش سطح دچار حریق شده در بازه زمانی ۱۰ ساعت نشان داده شده است.همان‌طور که در این شکل مشخص است در بازه زمانی ۲-۴ ساعت شیب افزایش سطح حریق شدیدتر شده و سطح بیشتری به نسبت زمان دچار حریق گشته است. در نهایت جهت ارزیابی نقشه حاصل از شبیه‌سازیآتش‌سوزی در نقطه مورد نظر و محدوده آتش‌سوزی واقعی، با روی هم قرار دادن این دو محدوده و تشکیل ماتریس خطا و محاسبه ضریب کاپا و صحت کلی به ارزیابی نتایج شبیه‌سازی پرداخته شد. براساس نتایج حاصله مدل اتوماسیون سلولی با صحت کلی برابر با ۸۴٪ و ضریب کاپای برابر با ۰/۶۷ توانسته است نحوه گسترش آتش‌سوزی را شبیه سازی کند (جدول ۲).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه؛ الف: موقعیت استان مازندران در کشور، ب: موقعیت شهرستان سوادکوه شمالی در استان، ج: موقعیت حریق رخ داده در سطح شهرستان، د: محدوده حریق رخ داده و محل شروع این حریق



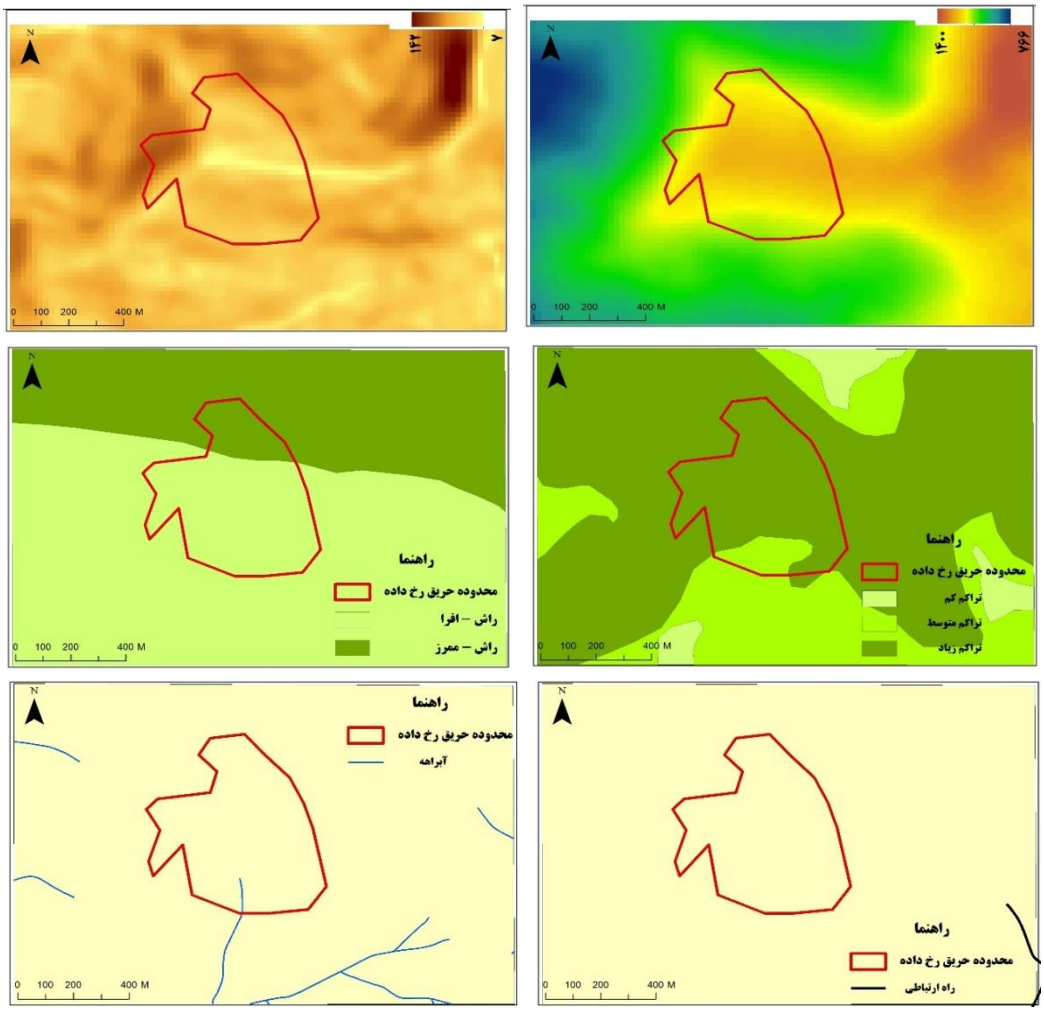
شکل ۲- مراحل شبیه سازی رفتار آتش در منطقه مورد مطالعه



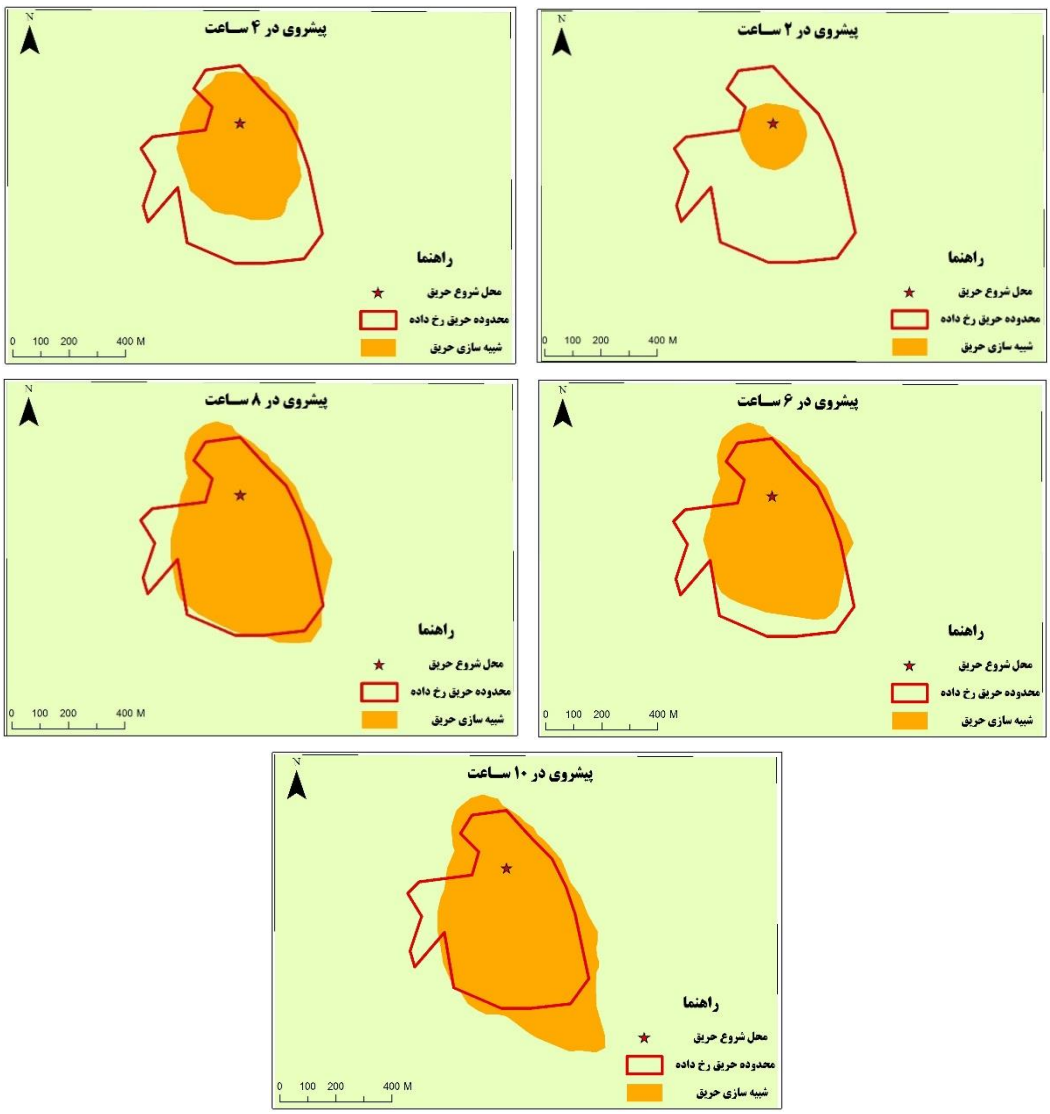
شکل ۳- ۸ همسایگی Moore

جدول ۱- طبقه‌بندی نوع و تراکم پوشش گیاهی (Alexandridiset al., 2008)

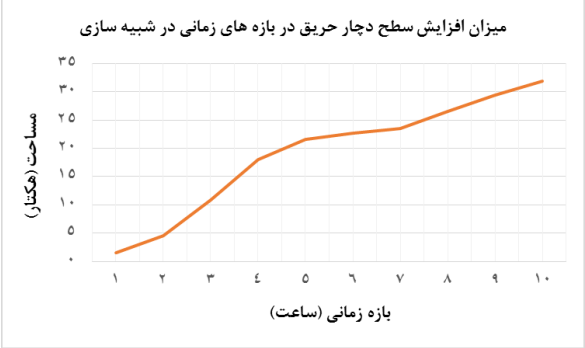
P_{veg}	نوع پوشش گیاهی	P_{den}	تراکم پوشش گیاهی
-۰/۳	مقاوم به حریق	-۰/۴	تراکم کم
۰	نیمه مقاوم به حریق	۰	تراکم متوسط
۰/۴	حساس به حریق	۰/۳	تراکم زیاد



شکل ۴- محدوده قرمز رنگ: محدوده آتش‌سوزی رخ داده، الف: ارتفاع از سطح دریا، ب: درصد شیب منطقه مورد مطالعه، ج: تراکم جنگل، د: نوع پوشش جنگلی، ه: راه‌های ارتباطی، و: آبراهه



شکل ۵- محدوده قرمز رنگ: محدوده حریق واقعی رخ داده، الف: نتیجه شبیه سازی حریق در بازه زمانی ۲ ساعت، ب: نتیجه شبیه سازی حریق در بازه زمانی ۴ ساعت، ج: نتیجه شبیه سازی حریق در بازه زمانی ۶ ساعت، د: نتیجه شبیه سازی حریق در بازه زمانی ۸ ساعت، ه: نتیجه شبیه سازی حریق در بازه زمانی ۱۰ ساعت



شکل ۶- میزان افزایش سطح حریق در بازه های زمانی در طی شبیه سازی

جدول ۲- ماتریس خطا و ارزیابی شبیه‌سازی نحوه گسترش آتش‌سوزی

	شبیه سازی آتش سوزی			
		سوخته	نسوخته	مجموع
آتش‌سوزی واقعی	سوخته	۲۹۵۲۶	۱۱۶۶۷	۴۱۱۹۳
	نسوخته	۲۵۶۹	۴۵۸۰۴	۴۸۳۷۳
	مجموع	۳۲۰۹۵	۵۷۴۷۱	۸۹۵۶۶
صحت کلی = ۸۴٪			ضریب کاپا = ۰/۶۷	

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای شبیه سازی نحوه گسترش آتش‌سوزی جنگل از روش اتوماسیون سلولی بهره بردهشده است. این روش درعین سادگی، دارای قدرت بالائی در اعمال قوانین همسایگی بر سلول‌های همسایه است، برای این منظور و در روش اتوماسیون سلولی مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل براساس مدل آلکساندریدیس و با استفاده از همسایگی هشت تایی مور (Liu, 2009) انجام شد. آلکساندریدیس و همکاران (۲۰۰۸) با بکارگیری اتوماسیونسلولی دوبعدی و ارائه مدلی برپایه عواملی مانند نوع وتراکم پوشش گیاهی، سرعت و جهت باد و خصوصیات توپوگرافی، گسترش آتش‌سوزی را شبیه‌سازی نموده‌اند. این مدل از ساختار سلولی مربعی با همسایگیهشت تایی استفاده نموده است و اذعان داشته کهسلول‌هایشش‌ضلعی فقط حجم محاسبات را بالاتربرده و نمایش گرافیکی بهتری دارند. از یک رویکرد بهینه‌سازیغیرخطیبرای کالیبره کردن برخی از پارامترهای مدل بر اساس دیتاهای موجود ترکیب شده در سیستم اطلاعات جغرافیایی از آتش‌سوزی واقعیجنگل، استفاده نمودند. در مطالعات مختلفی که با استفاده از مدل مذکور صورت گرفته‌اند، در مقایسه بین شبیه‌سازی با آتش‌سوزی واقعی نشان داد که مدل پیش‌بینی، پیشنهادی را به شیوه‌ایکاملاً مناسب و با ویژگی مکانی و زمانی ازآتش‌سوزی واقعی، نمایش می‌دهد؛ بنابراین در این مطالعه نیز به علت شرایط خاص جنگل‌های ایران که دارای توپوگرافی خشن هستند و توجه ویژه این مدل به توپوگرافی و همچنین اثر باد در کنار نوع پوشش گیاهی که براساس تجربیات مهمترین عوامل تأثیرگذار بر نحوه گسترش آتش‌سوزی جنگل در جنگل‌های ایران هستند و نیز عدم دسترسی به داده‌های دقیق همانند رطوبت سوخت، میزان لاشبرگ کف و ...، به نظر می‌رسد که مدل مذکور برای شبیه‌سازی وقوع آتش‌سوزی در ایران بسیار مناسب باشد (اسکندری، ۱۳۹۲). در این مطالعه نیز از این مدل برای شبیه‌سازی وقوع آتش‌سوزی استفاده شد. در مطالعات اسکندری (۱۳۹۲) و Bodrozic و همکاران (۲۰۰۶) نیز اشاره شده است که این روش و مدل به دلیل انطباق زیاد با شرایط طبیعی و محیط زیست بسیار کارا می‌تواند باشد. به منظور شبیه‌سازی وقوع آتش‌سوزی جنگل در ابتدا محدوده یکی از آتش‌سوزی‌های واقعی و همچنین محل شروع آن با کمک کارشناسان و جنگلبانان محلی تعیین شد سپس با استفاده از مدل سلولی خودکار، شرط همسایگی هشت تایی و ورود عوامل تأثیرگذار بر نحوه گسترش آتش‌سوزی در منطقه به احتمال گسترش آتش‌سوزی در هر هشت جهت ممکن بررسی شد. در این میان چنانچه یک سلول در حال سوختن باشد تمامی هشت سلول مجاور آن نیز احتمال سوختن دارند که احتمال سوختن سلول‌هایمجاور براساس ورودی‌های مدل از ۰ تا ۱ متغیر بود و هر چه احتمال نزدیک‌تر به ۱ می‌بود سرعت و احتمال انتقال آتش‌سوزی به آن سلول نیز بیشتر بود. در این مطالعه در بعضی موارد مشاهده می‌شد که تمامی ۸ سلول مجاور دارای ارزش ۱ بودند که نشان دهنده انتقال حریق به هر ۸ سلول مجاور است. این امر در مناطق مسطح که بنابر شرایط توپوگرافی اثر باد نیز بسیار کم بوده است اتفاق می‌افتاد. نتایج این مطالعه نشان داد که نحوه گسترش آتش‌سوزی در حالت شبیه‌سازیتقریباً به شکل بیضی می‌باشد. جهت این بیضی از شمال غربی-جنوب شرقی می‌باشد. با توجه به اینکه نوع پوشش گیاهی و تراکم آن در این منطقه تنوع بسیار زیادی ندارند. به نظر می‌رسد که مهمترین عامل در شکل محدوده شبیه‌سازی شده در منطقه مورد مطالعه جهت باد و سپس توپوگرافی منطقه مورد مطالعه می‌باشد که به خوبی تعیین کننده شکل شبیه‌سازی گسترش آتش در منطقه بوده‌اند. ضمن این که وجود پوششگیاهی حساس به حریق با انبوهنیز زمینهٔ مناسبی را برای پیشرویآتش به طرف جنوب و جنوب شرقی محدوده فراهم کرده است. می‌توان گفت چنانچه اثر جهت باد در مدل حذف شود و یا اینکه شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در طی یک مدت طولانی صورت گیرد، نحوه گسترش به شکل دایره نزدیک‌تر شود. در مطالعات Boychuk و همکاران (۲۰۰۹) وBodrozich و همکاران (۲۰۰۶) نیز با توجه به جهت باد غالب بر منطقه و شکل نقشه شبیه‌سازی شده به نتایج مشابهی با این تحقیق دست یافته‌اند. به منظور ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی نحوه گسترش آتش‌سوزی در محدوده مورد بررسی با استفاده از محدوده آتش‌سوزی واقعی به

محاسبه شاخص کاپا و صحت کلی پرداخت. نتایج نشان داد که صحت کلی محدوده شبیه‌سازی شده برابر با ۸۴٪ و ضریب کاپا برابر با ۰/۶۷ است. با وجود اینکه نتایج شبیه‌سازی شده به صورت کامل با آتش‌سوزی واقعی مطابقت ندارد با این حال می‌توان گفت که مدل مذکور به خوبی توانسته است نحوه گسترش آتش‌سوزی را شبیه‌سازی نماید. عدم قطعیت مدل یا به عبارتی عدم تطابق کامل محدوده شبیه‌سازی شده با محدوده آتش‌سوزی واقعی را می‌توان در عواملی همانند وقوع تغییرات ناگهانی در سرعت و جهت باد و یا رطوبت هوا و یا عدم دقت صد درصدی داده‌های ورودی همانند نوع پوشش گیاهی و ... دانست. علاوه بر این مشاهده می‌شود که سطح آتش‌سوزیشبیه‌سازی شده نسبت به سطح آتش‌سوزی واقعی بیشتر است. علت آن را می‌توان در دخالت نیروهای منابع طبیعی و بومیان در کنترل آتش‌سوزی واقعی دانست. در حالی که در فرآیند شبیه‌سازی نقش نیروهای انسانی در کنترل آتش‌سوزی دخالت داده نشده است. در مطالعات پهلوانی و همکاران (۱۳۹۶)، گزمه و همکاران (۱۳۹۲)، اسکندری (۱۳۹۲)، Boychuk و همکاران (۲۰۰۹)، Bodrozich و همکاران (۲۰۰۶)، Encinas و همکاران (۲۰۰۷)، Li و همکاران (۲۰۱۷) و Freire و DaCamara (۲۰۱۹) نیز با استفاده از روش اتوماسیون سلولی به نتایج معتبری در شبیه‌سازی نحوه گسترش آتش‌سوزی دست یافته‌اند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به شبیه سازی نحوه گسترش آتش‌سوزی با استفاده از مدل اتوماسیون سلولی پرداخته شد. نتایج نشان داد که مدل مذکور با صحت کلی برابر با ۸۴٪ توانسته است نحوه گسترش آتش‌سوزی را در محدوده مورد بررسی شبیه‌سازی نماید. با اجرای چنین مدلی در هر بازه زمانی می‌توان مکان دقیق آتش‌سوزی و مدت زمان لازم برای رسیدن آتشبه آن نقطه را محاسبه نمود. با داشتن چنین اطلاعاتی می‌توان بهترین مسیر و مکان را برای اختصاص نیروها و امکانات اختیار نمود. در موارد عملیات پیشگیرانه، با تکیه بر اطلاعات خروجی مدل، می‌توان درجهتی که آتش در حال گسترش است و با داشتن زمان رسیدن به آن نقطه، از روش‌های قطع درختان یا دپوی خاک توسط ماشین‌آلات استفاده نمود. با این حال نمی‌توان بیان نمود که مدل‌های مذکور دارای سطح اطمینان کامل هستند و این مدل‌ها همواره دارای عدم قطعیت در برآوردها هستند.

منابع

اسکندری، س. ۱۳۹۲. ارائه الگوی پتانسیل آتش‌سوزی جنگل وگسترش آن با استفاده از RS و GIS، مطالعه موردی: جنگل‌های بخش سه نکا-ظالمرود. رساله جهت اخذ درجه دکتری رشته مهندسی منابع طبیعی گرایش جنگلداری. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ۱۷۶ ص.

اسکندری، س. ۱۳۹۴. ارزیابی پتانسیل خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از مدلDong، مطالعه موردی: جنگل‌های بخش سه نکا-ظالمرود. مجله آمایش جغرافیایی فضا، ۱۵: ۱۹۵-۲۰۹.

پهلوانی، پ.، صحرائیان، ح.ر؛ و راعی، ا. ۱۳۹۶. مدلسازی گسترش آتش‌سوزی جنگل بر مبنای اتوماتای سلولس با به کارگیری زنجیره مارکوف و تخصیص چند هدفه زمین با فیلتر همسایگی. نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۵ (۳): ۱۲۲-۹۹.

حسینعلی،ف؛ ورجبی،م. ع. ۱۳۸۴.

شبیه‌سازی آتش‌سوزی جنگل با استفاده از سامانه اطلاعات مکانی. مجموعه مقالات همایش ژئوماتیک،ایران،تهران، ۱۱ ص.

قائمیراد، ط؛ وکریمی، م. ۱۳۹۴. ارزیابی عملکرد رویکردهای مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل با استفاده از اتوماتای سلولی (پژوهش موردی: جنگل‌های بخش لاکان شهرستان رشت). تحقیقات جنگل وصنوبر ایران، ۲۳(۱): ۶۴-۷۸.

گزمه، ح.، چهرقان، ع.، آل شیخ، ع.ا؛ و کریمی، م. ۱۳۹۲. مدل سازی گسترش جبهه آتش‌سوزی جنگل با استفاده از اتوماتای سلولی، سیستم اطلاعات مکانی الگوریتم پرندگان. نشریه علمی- ترویجی مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، ۴ (۳): ۸۶-۷۱.

Alexandridis, A., Vakalis, D., Siettos, C.I. & 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.

Bodrožic, L., Stipanicev, D. & Šeric, M. 2006. Forest fires spread modeling using cellular automata approach. M.S. Thesis. University of Split. Split, Croatia. 80 p.

Boychuk, D., Braun, W.J., Kulperger, R.J., Krougly, Z.L. & Stanford, D.A., 2009. A stochastic forest fire growth model. Environmental and Ecological Statistics, 16(2): 133-151.

Encinas, A.H., Encinas, L.H., White, S.H., del Rey, A.M. & Sánchez, G.R., 2007. Simulation of forest fire fronts using cellular automata. Advances in Engineering Software, 38(6): 372-378.

Ercanoglu, M., Weber, K.T., Langille, J. & Neves, R. 2006. Modeling wildland fire susceptibility using fuzzy systems. GISci. Remote. Sens. 43 (3): 268–282.

Eskandari, S. & Chuvieco, E. 2015. Fire danger assessment in Iran based on geospatial information. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 42: 57–64.

Freire, J.G. & DaCamara, C.C. 2019. Using cellular automata to simulate wildfire propagation and to assist in fire management. Natural Hazards & Earth System Sciences, 19(1): 169–179.

Glasa, J. & Halada, L. 2008. On elliptical model for forest fire spread modeling and simulation. Mathematics and Computers in Simulation, 78: 76-88.

Hong, H., Tsangaratos, P., Ilia, I., Liu, J., Zhu, A.X. & Xu, C. 2018. Applying genetic algorithms to set the optimal combination of forest fire related variables and model forest fire susceptibility based on data mining models. The case of Dayu County, China. Science of the Total Environment, 630: 1044-1056.

Prieto Herráez, D., Asensio Sevilla, M.I., Ferragut Canals, L., Cascón Barbero, J.M. & Morillo Rodríguez, A. 2017. A GIS-based fire spread simulator integrating a simplified physical wildland fire model and a wind field model. International Journal of Geographical Information Science, 31(11): 2142-2163.

Sakr, G.E., Elhajj, I.H. & Mitri, G. 2011. Efficient forest fire occurrence prediction for developing countries using two weather parameters. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 24: 888-894.

Yin, H.W., Kong, F.H. & Li, X.Z. 2004. RS and GIS-based forest fire risk zone mapping in da hinggan mountains. Chinese Geographical Science, 14 (3): 251-257.

Yu, N., Li, M. & Ruan, X., 2005. Applications ofcellular automata in complex system study.International Journal of Information and SystemsSciences, 1(3-4): 302-310.

Zhang, Q.F. & Chen, W.J. 2007. Fire cycle of the Canada's boreal region and its potential response to global change. Journal of forestry research, 18 (1): 55-61.

Li, Z., Wang, F., Zheng, X., Jiang, W., Meng, Q. & Liu, B. 2017, November. GIS Based Dynamic Modeling of Fire Spread with Heterogeneous Cellular Automation Model and Standardized Emergency Management Protocol. In Proceedings of the 3rd ACM SIGSPATIAL Workshop on Emergency Management using (pp. 1-7).

Liu, Z.H., Yang, J., Chang, Y., Weisberg, P.J. & He, H.S. 2012. Spatial patterns and drivers offire occurrence and its future trend under climate change in a boreal forest of Northeast China. Glob. Chang. Biol. 18: 2041–2056.

Pais, C., Carrasco, J., Martell, D.L., Weintraub, A. & Woodruff, D.L. 2019. Cell2Fire: A Cell Based Forest Fire Growth Model. arXiv preprint arXiv:1905.09317.

Pastor, E., Zárate, L., Planas, E. & Arnaldos, J. 2003. Mathematical models and calculation systems for the study of wild land fire behaviour. Prog. Energy Combust. Sci. 29 (2): 139–153.

Modeling of the spread behavior of forest fires based on GIS and cellular automation (Case Study: Babolrood basin, Mazandaran)

Abstract

Forest fires are recognized as a major threat to the safety of human life, infrastructure and the environment. In recent years, despite global warming, forest fires have increased. One of the best ways to understand fire behavior and thus to deal with it is to simulate fire behavior and how to spread fire. Therefore, in this study, using cellular automation method based on Alexandridis model, fire simulation was carried out in some forests of northern Savadkouh county in Mazandaran province. For this purpose, using the topography, vegetation as well as wind speed and direction, the fire spread behavior was simulated, and the result was compared with actual fire. The results showed that the accuracy of the simulated model is 0.84% which indicates that the model is suitable. Therefore, considering the specific conditions of Iranian forests, cellular automation is useful for simulating forest fires.

Keywords: Forest fire, Simulation, Cellular Automation, GIS.