فصلنامه انسان و محیط زیست، شماره ۳۴ ، پاییز ۹۴

تحلیلی بر روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌ها

سعیده اسکندری[1]*

saeedeheskandari119@yahoo.com

چکیده

امروزه پدیده آتش‌سوزی در عرصه‌های جنگلی به‌عنوان یکی از بلایای طبیعی بخش وسیعی از جنگل‌های جهان را مورد تهدید قرار داده است. با توجه به اثرات مخرب آتش‌سوزی بر جنگل، انجام تحقیقاتی که با استفاده از روش‌های نوین بتوانند گسترش آتش‌سوزی را پیش‌بینی کنند، بسیار ارزش‌مند است. این مطالعه به منظور بررسی روش‌های مختلف مدل‌سازی و شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های جهان و ایران انجام شده است. مدل‌های ریاضی اساس برنامه‌های کامپیوتری شبیه‌سازی رفتار آتش می‌باشند. این مدل‌ها به چهار دسته مدل‌های نظری، سیستم فیزیکی، تجربی و نیمه‌تجربی تقسیم می‌شوند. مدل‌های نظری قابلیت تعمیم به اکوسیستم‌های مختلف را دارند، اما اعتبارسنجی آن‌ها مشکل است. مدل‌های فیزیکی (سطحی، تاجی، زمینی، لکه‌ای) با توجه به نوع آتش-سوزی‌های جنگلی توسعه یافته‌اند، اما این مدل‌ها گاهی دارای دقت کافی نیستند و اعتبارسنجی آن‌ها مشکل است. مدل‌های تجربی به دلیل سهولت استفاده، بسیار کاربردی می‌باشند، اما این مدل‌ها فقط برای اکوسیستم‌های با شرایط مشابه آن‌چه در فرمول‌بندی و آزمون مدل به کار رفته است، قابل اجرا می‌باشند. مدل‌های نیمه‌تجربی به دلیل اعتبارسنجی آسان‌تر، سادگی و سازگاری با داده‌های رستری بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما عدم قابلیت برای آتش‌سوزی‌های تاجی و لکه‌ای، برنامه‌نویسی دشوار و لزوم در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز برای همه پارامترهای مؤثر در مدل مربوطه، از معایب این مدل‌ها می‌باشد. با توجه به شرایط جنگل-های ایران مدل‌های نظری، مدل‌های فیزیکی آتش‌سوزی سطحی و مدل‌های نیمه‌تجربی راترمل (Rothermel)، فارسایت (FARSITE) و اتوماسیون سلولی (Cellular Automata) می‌توانند بهترین مدل‌ها برای گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران باشند.

کلمات کلیدی: گسترش آتش‌سوزی، مدل‌های نظری، مدل‌های فیزیکی، مدل‌های تجربی، مدل‌های نیمه‌تجربی.

۱- دانش‌آموخته دکترای جنگلداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران.

مقدمه

امروزه آتش‌سوزی جنگل‌ها به عنوان یکی از بحران‌های محیط‌زیستی تلقی می‌شود (۱، ۲) زیرا با منشأ طبیعی یا انسانی اثرات زیان‌بار و ویران‌گری به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر جوامع انسانی دارد و در صورت وقوع، تأثیر عظیمی بر محیط‌زیست، جنگل‌ها، روستاها و ساکنان آن‌ها به دلیل تمرکز جمعیت می‌گذارد (۳، ۴، ۵، ۶). اگرچه آتش‌سوزی‌های جنگلی جزء جدایی‌ناپذیر این بوم‌سازگان‌ها هستند، اما عدم‌کنترل آن‌ها ممکن است باعث خسارات اقتصادی و محیط-زیستی شدیدی شود (۱، ۷).

برای کاهش آسیب‌های ناشی از آتش‌سوزی جنگل (مانند از بین رفتن منابع طبیعی، محیط‌زیست و حیات جنگل‌نشینان) مدیران جنگل، مستلزم ارزیابی خطرات آتش‌سوزی می‌باشند (۸). به دلیل سرشت ویران‌گر آتش‌سوزی، پژوهش‌های در برگیرنده‌ی آتش‌سوزی‌های واقعی، غیرعملی است. به عنوان یک جایگزین، دانشمندان از مدل‌های شبیه‌سازی[1] کامپیوتری بر اساس مطالعات میدانی، برای درک بهتر رفتار و اثرات آتش-سوزی استفاده می‌کنند (۹).

سیاست‌های مقابله با حریق را می‌توان به دو دسته فعالیت‌های پیش‌گیرانه و عملیاتی تقسیم نمود. اهمیت فعالیت‌های پیش-گیرانه از حریق از آن جهت است که می‌توان با استفاده از آن‌ها قبل از وقوع حریق، اقدامات پیش‌گیرانه، تعدیلی و اطلاع‌رسانی-های لازم را برنامه‌ریزی نمود. از طرف دیگر در صورت بروز آتش‌سوزی در جنگل‌ها، فعالیت‌های عملیاتی اهمیت پیدا می-کنند و در اینجا روش‌های شناسایی به موقع آتش‌سوزی در این عرصه‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مناسب (مانند مادیس) و همچنین مدل‌های شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی می‌توانند به عنوان سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری به مدیران برای انتخاب بهترین روش اطفا و جلوگیری از پیش‌روی حریق کمک کنند. در اکثر موارد آتش‌سوزی هنگامی شناسایی می-شود که مهار آن نیاز به صرف هزینه و زمان زیادی دارد. اما از آنجایی‌که آثار سوء آتش‌سوزی قابل‌توجه بوده و ترمیم و بازسازی منابع کاری زمان‌بر و مشکل می‌باشد، ضروری است تا تلاش‌های گسترده‌ای برای شناسایی به موقع آتش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مناسبی مانند MODIS[2] صورت گیرد (۱۰). چنان‌چه آتش‌سوزی در ساعات اولیه شروع، شناسایی و مهار شود، می‌توان از نابودی بسیاری از جنگل‌ها و منابع طبیعی جلوگیری کرد. از این رو شناسایی آتش در ساعات اولیه شروع آن حیاتی است (۱۱). از طرف دیگر در هنگام وقوع آتش‌سوزی، به دلیل کمبود وقت، لزوم تصمیم‌گیری به موقع و واکنش سریع و همچنین افزایش فشار روحی مدیران، یک مدل شبیه-سازی معتبر بر اساس داده‌های موجود، در این مرحله نقش مهمی 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 امکان-پذیر است (۱۲). بنابراین سیستم‌های شبیه‌سازی اعتبارسنجی-شده در این مرحله می‌توانند در نحوه اجرای عملیات اطفای حریق مؤثر باشند.

در مورد شبیه‌سازی و مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل در جهان، پژوهش‌های مختلفی انجام شده و مدل‌های مختلفی توسعه یافته‌اند. در واقع برای پیش‌بینی رفتار و گسترش آتش-سوزی، 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، مدل-های فیزیکی، مدل‌های تجربی و مدل‌های نیمه‌تجربی تقسیم-بندی می‌کنند (شکل ۱). زیرمجموعه‌های این مدل‌ها بسیار متنوع هستند و هر کدام بر اساس در دسترس بودن داده‌های موردنیاز و شرایط منطقه موردمطالعه، کاربرد خاصی دارند. به عنوان مثال مدل BEHAVE (۱۳) به طور گسترده‌ای در آمریکا مورد استفاده قرار می‌گیرد، یا مدل CFFB که

1- Simulation

2- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

در کانادا و مدل IGNITE که در استرالیا (۱۴) به کار برده می‌شوند. توسعه آتش‌سوزی بر اساس اصل علمی Huggen توسط Andre در سال ۱۹۹۴ (۱۵) پیشنهاد شده که توسعه آتش‌سوزی را در مقیاس‌های مکانی- زمانی کوچک، ملی و جهانی توصیف می‌کند. مدل راترمل Rothermel (۱۳) برای گسترش آتش‌سوزی‌های سطحی تعریف شده و به طور وسیعی به کار برده شده است. این مدل پایه و اساس بسیاری از سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری آمریکای شمالی از قبیل FARSITE، BEHAVE و SPREAD و سیستم ملی تحلیل مدیریت آتش‌سوزی[1] برای برنامه‌ریزی اقتصادی بوده است. سرعت گسترش آتش‌سوزی با استفاده از ترکیبی از مدل Rothermel، شکل آتش و الگوریتمی برای شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی، در زمان واقعی تعیین می‌شود. شبیه‌ساز آتش‌سوزی FARSITE نیز یکی از پرکاربردترین شبیه-سازهای گسترش آتش‌سوزی از نظر زمانی و مکانی است و در آزمایشگاه علوم آتش‌سوزی Missoula از خدمات جنگلداری USDA توسعه یافته است. این مدل یک مدل نیمه‌تجربی است که بر اساس مدل گسترش آتش‌سوزی سطحی راترمل Rothermel (۱۳) کار می‌کند. از اواخر دهه ۹۰، شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل با استفاده از مدل اتوماسیون سلولی، تحت سناریوهای مختلف آب و هوایی و توپوگرافی و در نظر گرفتن پارامترهای پوشش گیاهی و شرایط باد، جایگاه ویژه‌ای در تحقیقات گسترش آتش‌سوزی پیدا کرده است. استفاده از این مدل برای گسترش آتش‌سوزی جنگل اگرچه برنامه‌نویسی نسبتاً پیچیده‌ای را می‌طلبد، اما ساختار پایدار و سادگی آن باعث محبوبیت و کاربرد فراوان آن در مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی در سال‌های اخیر شده است. این در حالی است که در مورد مدل‌سازی و شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران مطالعات محدودتری انجام شده است. با این حال طی سال‌های اخیر (دهه ۹۰ شمسی) برخی از پژوهش‌ها در خصوص مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی در ایران انجام شده‌اند که اغلب به صورت مطالعه موردی و محدود به جنگل‌های هیرکانی، استان گلستان و شرق مازندران بوده‌اند. این مطالعه به منظور معرفی و تحلیل مدل‌های مختلف گسترش آتش‌سوزی در جنگل و بررسی روش‌های مختلف مدل‌سازی و شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های جهان و ایران انجام شده است. ابتدا پژوهش‌های مربوط به شبیه‌سازی و مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های جهان و ایران به تفکیک موضوعی ارایه می‌گردند. سپس مهم-ترین مدل‌های گسترش آتش‌سوزی معرفی و تجزیه و تحلیل شده و کاربردهای آن بررسی می‌شود. درنهایت نتیجه-گیری در خصوص نقاط ضعف و قوت روش‌ها و مدل‌ها ارایه شده و مناسب‌ترین مدل‌ها با توجه به شرایط آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران معرفی می‌شوند.

۲- مطالعات موردی مدل‌سازی و شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل

۲-۱- تحقیقاتی که از مدل‌های مبتنی بر GIS و RS برای گسترش آتش‌سوزی جنگل استفاده کرده‌اند

Saidi (۱۹۹۹) مدل‌های مختلف برای شبیه‌سازی آتش-سوزی در جنگل‌های Kounteidat الجزیره را در روی تصویر اسپات منطقه مورد آزمایش قرار داد. به همین منظور مدل‌های شبیه‌سازی متحدالمرکز (متأثر از قدرت باد)، شبه‌مخروطی (متأثر از قدرت و جهت باد) و مدل گسترش آتش پلی‌گونی (متأثر از سرعت و جهت باد، پوشش گیاهی و داده‌های توپوگرافی) با GIS مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مدل گسترش آتش‌سوزی با استفاده از GIS به شکل یک چندضلعی (پلی‌گون) است و نسبت به سایر مدل‌ها با شکل طبیعی گسترش آتش‌سوزی جنگل هم‌خوانی بیش‌تری دارد زیرا همه عوامل مؤثر در گسترش آتش‌سوزی جنگل در آن لحاظ شده است (۱۶).

Lopes و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از نرم‌افزار Fire Station نحوه گسترش آتش‌سوزی را در چند منطقه جنگلی

1 - National Fire Management Analysis System (NFMAS)

پرتغال شبیه‌سازی کردند و نتایج حاصله را با استفاده از واقعیت زمینی و عکس‌های هوایی اعتبارسنجی نمودند. بدین ترتیب بر اساس نقشه‌های آتش‌سوزی تهیه‌شده، مکان‌یابی آتش‌برها در سطح منطقه انجام شد. همچنین با تلفیق اطلاعات مربوط به نرخ خطر مناطق از نظر آتش‌سوزی و نقشه‌های حاصل از شبیه‌سازی، نقشه‌ای تهیه شد که در آن توزیع امکانات و نیروهای اطفای حریق بر اساس نیاز منطقه نمایش داده شده است (۱۷).

Thon و همکاران (۲۰۰۷) ابزاری را برای تصمیم‌سازی و نقش پاک کردن بوته‌های خشک و خاشاک باقیمانده در جنگل برای جلوگیری از گسترش آتش‌سوزی طراحی کردند. آن‌ها یک مدل سه‌بعدی برای گسترش آتش‌سوزی جنگل با استفاده از GIS طراحی کردند که امکان شبیه‌سازی گسترش آتش را در محیط‌های واقعی تحت شرایط مختلف پاک‌سازی بوته‌های خشک می‌دهد. این مدل با نمایش هندسی و با استفاده از تصاویر توسط کاربر نشان داده می‌شود. نتایج نشان داد که تحت شرایط مساوی، در صورت پاک‌سازی جنگل از بوته‌های خشک، شکل گسترش آتش تغییر پیدا کرده و مساحت مناطق متأثر از آتش‌سوزی به طور قابل‌توجهی کاهش خواهد یافت (۱۸).

Rytwinski و Crowe (۲۰۱۰) مدلی بهینه برای شبیه‌سازی انتخاب موقعیت آتش‌برها برای به حداقل رساندن خسارات آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال غربی Ontario کانادا با استفاده از GIS ارایه کردند. آن‌ها بیان داشتند که مشکل انتخاب موقعیت‌های بهینه برای آتش‌برها به دلیل عدم اطلاع از نقاط شروع آتش‌سوزی و چگونگی گسترش آن در آینده است. نتایج نشان داد که ارتباط مکانی بین آتش‌برهای انتخاب شده، فاکتور مهمی برای کاهش خطر آتش‌سوزی در آینده است. همچنین روش مذکور در صورت دقیق انجام دادن محاسبات، می‌تواند به عنوان مدل مناسبی برای تعیین بهترین مکان‌های آتش‌بر استفاده شود (۱۹).

حسینعلی و رجبی (۱۳۸۴) مدل شبکه‌ای نرمال را بر مبنای GIS با استفاده از پارامترهای مدل رقومی ارتفاع، خصوصیات احتراقی منطقه و باد، برای شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل ارایه کردند. نتایج تحقیق نشان داد که مدل پیشنهادی به دلیل دارا بودن پارامترهای قابل تنظیم بیش‌تر نسبت به سایر مدل‌های موجود، انعطاف‌پذیری بیش‌تری از خود نشان می‌دهد. برای تنظیم پارامترهای موجود در این مدل، از دانسته‌های فیزیکی درباره آتش و نتایج حاصل از آزمایشات استفاده شد. در نهایت، این مدل با توانایی انطباق با شرایط جوی گوناگون و انواع مختلف جنگل، از ویژگی‌های ارزنده‌ای نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار بود (۲۰).

آخوندزاده و همکاران (۱۳۸۵) در تحقیق دیگری مدل‌سازی و تشخیص گسترش آتش‌سوزی جنگل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در ایران را مورد بررسی قرار دادند. پس از بررسی الگوریتم‌های مختلف تشخیص آتش توسط تصاویر ماهواره‌ای و با کمک باندهای مادون قرمز حرارتی MODIS، نقشه آتش‌سوزی در تاریخ مشخصی برای ایران تهیه گردید. سپس با کمک لایه‌های اطلاعاتی دیگر مانند مدل رقومی ارتفاع، نقشه پوشش اراضی[1]، نقشه احتراق و اطلاعات جهت و سرعت باد، روند گسترش آتش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که در صورت فراهم بودن منابع اطلاعاتی مورد نیاز، سامانه ارایه شده می‌تواند به عنوان یک سامانه تصمیم-گیری در زمان بحران و وقوع آتش‌سوزی، جهت انتخاب بهترین راهکار در کم‌ترین زمان، مورد استفاده مهارکنندگان آتش قرار گیرد (۲۱).

۲-۲- تحقیقاتی که به مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی تاجی تأکید کرده‌اند

Van Wagner (۱۹۷۷) یک مدل نیمه‌تجربی برای بدست آوردن سرعت گسترش آتش تاجی فعال و غیرفعال در جنگل‌های سوزنی‌برگ کانادا ارایه داد. وی این نوع پوشش گیاهی را به دلیل طبقه‌بندی واضح آن و تنوع کم مواد سوختی در مقایسه با سایر مناطق طبیعی، انتخاب نمود. فاکتورهای مورد استفاده شامل نوع سوخت تاج، حجم تاج، تمایل تاج و باد بودند. نتایج اعتبارسنجی قابل قبول بود و بلافاصله مدل در

1- Land cover

سیستم‌های پیش‌بینی جهانی آمریکای شمالی استفاده گردید (۲۲).

Rothermel (۱۹۹۱) (۲۳) با استفاده از روش پیش‌بینی آتش سطحی اصلاح‌شده توسط Albini و Stocks (۱۹۸۶) (۲۴) و تجزیه و تحلیل گسترش هشت آتش‌سوزی مهیب در شمال کوه‌های راکی (غرب ایالات متحده) بین دهه ۶۰ و ۸۰، یک رابطه آماری برای سرعت گسترش آتش تاجی فعال پیشنهاد کرد. وی تخمین زد که سرعت گسترش آتش تاجی فعال ۳/۳۴ بار بیش‌تر از سرعت پیش‌بینی‌شده توسط مدل خودش و ویژگی‌های محیط زیستی واقعی است. علاوه بر این، متغیرهای مؤثر بر رفتار آتش تاجی نظیر ارتفاع تاج، تراکم و رطوبت برگ، در مدل بکار گرفته نشدند. با این تجزیه و تحلیل می‌توان نتیجه گرفت که این مدل بایستی تنها در آتش‌سوزی‌های مشابه مورد مطالعه استفاده گردد.

Perminove (۲۰۱۴) مدل‌سازی ریاضی گسترش آتش-سوزی‌های جنگلی تاجی را با استفاده از آتش‌برها (جاده‌ها و غیره) که مانعی برای گسترش آتش در جنگل هستند، مورد بررسی قرار داد. هدف از این مطالعه، شبیه‌سازی شرایط گسترش آتش‌سوزی‌های جنگلی تاجی بود. توزیع مؤلفه‌های اصلی در تاج پوشش جنگل (درجه‌حرارت، غلظت گازها، حجم شاخ و برگ‌ها و غیره) به صورت عددی در زمان-های مختلف بدست آمدند. با استفاده از این نتایج، رفتار آتش-سوزی‌های جنگلی تاجی در حضور موانعی با اندازه محدود توصیف شدند (۲۵).

Perminove (۲۰۱۵) راه‌حل عددی برای گسترش آتش‌سوزی‌های جنگلی تاجی در اطراف فضاهای خالی میان جنگل ارایه داد. گسترش آتش‌سوزی تاجی در یک جنگل کاج با استفاده از یک مدل ریاضی سه‌بعدی به صورت عددی شبیه-سازی شد. تنظیمات ریاضی مشکل‌های احتمالی موجود، از طریق انتگرال‌گیری سیستم‌های سه‌بعدی معادلات دیفرانسیلی و با توجه به مختصات عمودی بدست آمد، زیرا ابعاد افقی جنگل‌ها بسیار بزرگ‌تر از ارتفاع درختان هستند. در نهایت بررسی‌های نظری مشکل گسترش آتش‌سوزی‌های تاجی در اطراف فضاهای خالی انجام شد. نهایتاً مدل‌سازی ریاضی شرایط گسترش آتش‌سوزی تاجی برای دستیابی به تغییر درجه حرارت و غلظت اجزای اصلی در طول زمان و همچنین شرایط محدودکننده گسترش آتش‌سوزی در جنگل با استفاده از فضاهای خالی میان جنگل انجام شد (۲۶).

۲-۳- تحقیقاتی که به بررسی رابطه بین متغیرها و سرعت گسترش آتش‌سوزی جنگل پرداخته‌اند

Sow و همکاران (۲۰۱۳) رفتار آتش و سوخ (پوشش گیاهی) را برای آتش‌سوزی‌های از قبل برنامه‌ریزی‌شده در ساواناهای سودان و ساحل عاج آنالیز کردند. بدین منظور سه پارامتر کلیدی که باید هنگام آتش‌سوزی‌های برنامه‌ریزی‌شده در نظر گرفته شوند، شامل احتمال احتراق، سرعت گسترش و میزان سوخت مصرفی، بررسی شدند. بدین منظور ۲۳۱ آتش‌سوزی از قبل برنامه‌ریزی‌شده در سه بوم‌سازگان ساوانا در Senegal برای مشخص کردن این سه پارامتر کلیدی در نظر گرفته شد. آنالیزهای رگرسیون لجستیک نشان داد که میزان رطوبت سوخت و رطوبت نسبی، پیش‌بینی‌کننده‌های خوبی برای احتمال بروز آتش هستند. همچنین رگرسیون خطی چندگانه برایمشخص کردن ارتباط بین سرعت گسترش آتش، مصرف سوخت یا شدت آتش و سوخت (پوشش گیاهی) و شرایط آب و هوایی استفاده شد. درنهایت نمودارهای محاسباتی‌ای برای مدیران جنگل بر اساس روابط معنی‌دار، ایجاد شد. نتایج آزمون کروسکال- والیس برای مقایسه سرعت‌های مشاهده‌شده گسترش آتش‌سوزی و سرعت‌های پیش‌بینی‌شده گسترش آتش‌سوزی با استفاده از مدل BehavePlus تفاوت معنی-داری را بین آن‌ها نشان نداد (۲۷).

Mozer و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل قطعی- احتمالی برای گسترش آتش‌سوزی جنگل ارایه دادند. مدل‌سازی بر اساس گسترش آتش‌سوزی از اولین عامل احتراق آتش‌سوزی به سمت عوامل دیگری که اطراف عامل اولیه بودند، انجام شد. تعداد زیادی از پارامترهایی که در گسترش آتش‌سوزی تأثیر دارند، مانند شدت آتش‌سوزی، هندسه محیط و سوخت،

تعداد فضاها و منابع احتراق بررسی شدند. از آنجایی که شدت آتش‌سوزی و هندسه سوخت، نمونه‌هایی از واقعیت بودند، انتخاب شدند. برای ارزیابی پارامترهای مذکور، مدل-سازی کامپیوتری BRISK استفاده شد. برای هر کدام از متغیرها، مرزهایی که بیانگر فواصل زمانی متغیر بودند، در نظر گرفته شد و از نظر آماری تعداد زیادی تکرار در برنامه اجرا شد. در هر کدام از تکرارها، یکی از متغیرها به صورت تصادفی در داخل یکی از مرزهای فواصل زمانی موردنظر آن متغیر تغییر می‌کرد. بعد از تحلیل نتایج، احتمال گسترش آتش‌سوزی برای آرایش‌های فضایی خاص بدست آمد. مهم‌ترین نتیجه این تحقیق، احتمال گسترش آتش‌سوزی از اولین عامل احتراق و هدایت به سمت تمام فضای سیستم بود (۲۸).

Morales و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل گسترش آتش-سوزی متغیر را برای شمال پاتوگونیای آرژانتین بر اساس نقشه-های وقوع آتش‌سوزی طراحی کردند. فاکتورهای مورد استفاده شامل نقاط تقریبی وقوع آتش‌سوزی، توپوگرافی، میانگین جهت باد و پوشش‌گیاهی موجود بودند. داده‌های ۹ آتش‌سوزی که طی سال‌های خشک در شمال پاتوگونیا اتفاق افتاده بودند، در این مدل آتش‌سوزی استفاده شدند. نتایج نشان داد که آتش‌سوزی در درختچه‌زارها به سرعت گسترش می‌یابد، درحالی‌که در جنگل‌ها گاهی مانند آتش‌بر عمل می‌کند. پارامترهای نمونه‌برداری گسترش آتش‌سوزی شبیه‌سازی‌شده در آتش‌سوزی های منفرد، به طور کلی مشابه آن‌هایی بودند که در تناسب با مدل استفاده شده بودند. به علاوه مدل تناسب-سازی‌شده از نظر ابعاد آتش‌سوزی شبیه‌سازی‌شده، با پیشینه آتش‌سوزی‌های سال‌های خشک در پارک ملی ناهل‌هاپی (Nahuel Huapi) تطابق خوبی نشان داد. مدل ارایه شده می‌تواند برای مناطقی که هنوز مدل سوخت آن‌ها توسعه نیافته است، مورد استفاده قرار گیرد (۲۹).

نصیری و همکاران (۱۳۹۱) آتش‌سوزی سطحی در جنگل‌های آمیخته پهن‌برگ هیرکانی را برای بررسی سرعت گسترش آتش با توجه به عوامل مؤثر شبیه‌سازی کردند. سرعت گسترش آتش در شرایط مختلف از طریق شبیه‌سازی سرعت‌های مختلف باد، طبقات شیب، نوع لاشبرگ و ضخامت آن مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت باد و شیب، سرعت آتش‌سوزی سطحی به‌صورت تصاعدی افزایش یافته است. با افزایش ضخامت لاشبرگ نیز تا چهار سانتی‌متر سرعت آتش‌سوزی سطحی افزایش و از آن به بعد کاهش می‌یابد (۳۰).

۲-۴- تحقیقاتی که با استفاده از مدلFARSITE انجام شده‌اند

Carmel و همکاران (۲۰۰۹) در تحقیق مشابه دیگری خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های مدیترانه‌ای کارنال فلسطین اشغالی با استفاده از شبیه‌ساز Monte Carlo و مدل FARSITE در نرم‌افزار Arcview شبیه‌سازی کردند. بدین منظور مدل مذکور برای شرایط مدیترانه‌ای تغییر یافت و نتایج ۵۰۰ نقشه پراکنش آتش‌سوزی منطقه برای تولید یک نقشه هات‌اسپات (مناطق پرخطر) آتش‌سوزی روی‌هم‌گذاری شدند. نتایج نشان داد که در برخی موارد طرح کلی نقشه خطر آتش-سوزی با نقشه سوخت (پوشش گیاهی) منطقه هم‌خوانی دارد؛ به طوری که اغلب مناطق پرخطر با جنگل‌های کاج منطبق‌اند. همچنین نتایج نشان داد که اغلب مناطق با خطر زیاد آتش-سوزی همان مناطقی هستند که قبلاً در آن‌ها آتش‌سوزی اتفاق افتاده است که بیان‌گر اعتبار بالای مدل مورد استفاده است (۳۱).

Rwanga و Ndambuki (۲۰۱۴) گسترش آتش-سوزی جنگل در شمال آمریکا را با استفاده از شبیه ساز FARSITE و GIS مدل‌سازی کردند. در منطقه مورد مطالعه ۸۰ درصد آتش‌سوزی‌ها ناشی از صاعقه و ۲۰ درصد آن‌ها به-دلیل عوامل انسانی بودند. نقشه خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست (Landsat) و تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالای گوگل‌ارث (Google Earth) تهیه شد. شبیه‌ساز FARSITE برای پیش‌بینی شدت آتش‌سوزی در سطح چشم انداز استفاده شد. نتایج نشان داد که ترکیب FARSITE و GIS برای شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی

جنگل می‌تواند استراتژی مدیریتی قابل قبولی را برای کاهش خسارات ناشی از آتش‌سوزی بر محیط زیست، زندگی و دارایی-ها و املاک ارایه دهد (۳۲).

Jahdi و همکاران (۲۰۱۵) مدل گسترش آتش‌سوزی FARSITE را با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های آتش-سوزی‌های اتفاق‌افتاده در جنگل‌های شمال ایران کالیبره کردند. مدل‌های سوخت ویژه در منطقه جنگلی مورد مطالعه از طریق نمونه‌برداری انواع پوشش‌های گیاهی اصلی و اختصاص مدل-های سوخت استاندارد انتخاب شدند. آتش‌سوزی‌های شبیه-سازی‌شده، خروجی‌های دقیقی را ارایه دادند که به طور دقیقی بازتاب رفتار و محیط آتش‌سوزی‌های واقعی مشاهده‌شده بود. مدل سوخت استاندارد Scott و Burgan (۲۰۰۵) دقت بهتری را نسبت به مدل سوخت استاندارد Anderson (۱۹۸۲) در محیط آتش‌سوزی شبیه‌سازی‌شده نشان داد. بیش‌ترین تناسب بین آتش‌سوزی مشاهده‌شده و منطقه سوخته شبیه‌سازی‌شده در مدل سوخت گیاهان علفی مشاهده شد. مدل‌سازی آتش‌سوزی با استفاده از شبیه‌ساز FARSITE پتانسیل بالایی را برای برآورد قابلیت تغییر مکانی در رفتار و گسترش آتش‌سوزی منطقه مورد مطالعه نشان داد (۳۳).

۲-۵- تحقیقاتی که از روش اتوماسیون سلولی برای مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل استفاده کرده‌اند

Karafyllidis وThanailakis (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. اگرچه نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مقایسه با انتظارات مناسب به نظر می‌رسید، با این وجود کاستی‌هایی نیز در مدل وجود داشت. برای مثال درحالی که شکل جبهه آتش شبیه به جبهه مورد انتظار از آتش‌سوزی بود، موقعیت جبهه آتش اشتباه محاسبه می‌گردید (۳۴).

Ntaimo و همکاران (۲۰۰۴) شبیه‌سازی و گسترش آتش‌سوزی جنگل را با روش DEVS[1] مدل‌سازی کردند. این روش بر اساس تقسیم جنگل به مناطق کوچکی به نام سلول بود. گسترش آتش‌سوزی بر اساس فرآیند انتقال بین سلول‌ها که باعث پیش‌روی آتش می‌شود، مدل‌سازی شد. محاسبات هر سلول برای پتانسیل انتقال آتش‌سوزی بر اساس مدل ریاضی گسترش آتش‌سوزی Rothermel انجام شد. در این تحقیق یک طرح گسترش آتش‌سوزی دوبعدی برای مدل‌های DEVS سلولی بر اساس مدل گسترش آتش‌سوزی ریاضی Rothermel پیشنهاد شد. نتایج نشان داد که مدل ارایه شده، یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری را برای شبیه‌سازی و پیش-بینی گسترش آتش در زمان واقعی فراهم کرده و امکان اطفای حریق در زمان واقعی را می‌دهد (۳۵). Bodrožic و همکاران (۲۰۰۶) گسترش آتش‌سوزی جنگل در جزیره Brac 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 شبیه-سازی مشابه شکل پیش‌روی آن در همان منطقه‌ای است که در گذشته آتش‌سوزی اتفاق افتاده‌است. در پایان اضافه کردن فاکتورهای مختلف مانند درجه‌حرارت هوا، رطوبت هوا و رطوبت ماده قابل اشتعال به مدل شبیه‌سازی، برای دقت بیش‌تر پیشنهاد شد (۳۶).

Encinas و همکاران (۲۰۰۷) از مدل اتوماسیون سلولی مبتنی بر انتقال منطقه سوخته کسری استفاده کردند (۳۷). در واقع این مدل، بهبود یافته مدل پیشنهادی Karafyllidis وThanailakis (۱۹۹۷) (۲۹) بود. در این مدل از اتوماسیون سلولی دوبعدی با سلول‌های شش‌ضلعی استفاده شد. معیارهای در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی آتش‌سوزی شامل توپوگرافی، باد و سرعت گسترش آتش‌سوزی بود. در اکثر مدل‌های ارایه شده، دو نوع سلول‌های همسایه برای سلول

1- Discrete Event System Specification (DEVS)

مرکزی در نظر گرفته می‌شود، ولی در واقعیت همه سلول‌ها به یک اندازه بر سلول مرکزی اثر دارند. در این تحقیق با ارایه سلول‌های شش‌ضلعی، ناهمگونی بین سلول‌های همسایه از بین برده شد و برای هر سلول مرکزی، شش سلول در اطراف آن در نظر گرفته شد که اثری یکسان بر آن داشتند. مدل ارایه شده تحت چند سناریوی متفاوت، کارآیی خود را در جنگل‌های فرضی نشان داد. خروجی سناریوها با مدل Karafyllidis وThanailakis (۱۹۹۷) مقایسه شد که نشان‌دهنده سازگاری نسبی مدل ارایه شده با واقعیت بود (۳۴).

Yassemi 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 منحصر به فردی 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 ارایه شد. درنهایت مقایسه‌ای بین روش اتوماسیون سلولی و رویکردهای گسترش آتش ارایه گردید (۹).

Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) گسترش آتش-سوزی جنگل در جزیره اسپکت (Spect) یونان را با استفاده از روش اتوماسیون سلولی و بر اساس عواملی مانند 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، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این مقایسه نشان داد که مدل پیشنهادشده مشخصات گسترش آتش را در زمان و مکان حادثه واقعی آتش‌سوزی به طور صحیحی پیش‌بینی می-کند و اعتبار بالایی دارد (۳۸).

Moreno و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیق مشابه دیگری الگوریتمی را برای پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی در مناطق جنگلی و شهری بر اساس فاکتورهای شیب و باد ارایه دادند که هدف آن عکس‌العمل به موقع و سریع گروه‌های اطفای حریق بود. روش شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی بر اساس شبکه‌ای از سلول‌های خودکار بود و آزمایشات در یک قطعه زمین ۲/۲۵ هکتاری انجام شد. نتایج نشان داد که گسترش آتش‌سوزی بر اساس مدل شبیه‌سازی، با رفتار کلی آتش در شرایط مختلف هم‌خوانی دارد. همچنین آتش‌سوزی‌ها با بادهای محلی، رطوبت و درجه‌حرارت منطقه تغییر می‌کنند (۳۹).

Wang و همکاران (۲۰۱۴) گسترش آتش‌سوزی‌های مهیب در آمریکا را با استفاده از مدل اتوماسیون سلولی و ابعاد واقعی آتش‌سوزی مورد بررسی قرار دادند. داده‌های سری زمانی ۳۱ آتش‌سوزی مهیب اتفاق‌افتاده در آمریکا در سال ۲۰۱۲ جمع‌آوری شدند. ابعاد واقعی آتش‌سوزی‌های مهیب طی گسترش آتش‌سوزی مطالعه شدند و مشخصات زمین‌شناسی آن‌ها بررسی شد. مدل گسترش آتش‌سوزی براساس اتوماسیون سلولی ارایه شد و آنالیز عددی انجام‌شده توافق مطلوبی از این مدل را با ابعاد و مقیاس واقعی داده‌های تجربی نشان داد (۴۰).

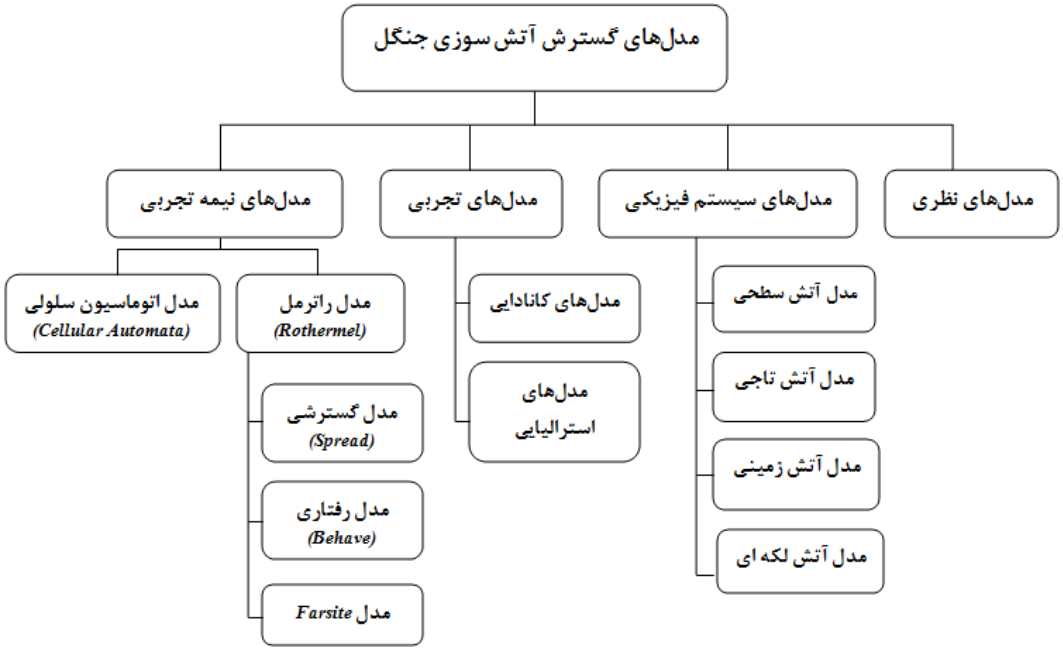
اسکندری (۱۳۹۲) گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های بخش سه نکا- ظالمرود با استفاده از مدل Alexandridis و روش اتوماسیون سلولی مدل‌سازی کرد. پارامترهای تأثیرگذار بر گسترش آتش‌سوزی پس از بومی‌سازی مدل Alexandridis، شامل توپوگرافی، شیب، سرعت و جهت باد، نوع و تراکم پوشش گیاهی بودند که در محیط GIS آماده‌سازی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نهایتاً مدل پیشنهادی گسترش آتش‌سوزی با استفاده از روش همسایگی هشت‌تایی Moore، برنامه‌نویسی مدل در محیط MATLAB و فراخوانی لایه‌های رقومی کلیه پارامترهای تأثیرگذار، برای محدوده آتش سوزی-ای که در گذشته در منطقه اتفاق افتاده بود، پیاده‌سازی شد. نتایج نشان داد که شکل جبهه گسترش آتش سوزی در مدل پیشنهادی شباهت زیادی به محدوده آتش‌سوزی واقعی دارد که قابلیت مدل پیشنهادی با اتوماسیون سلولی را در پیش‌روی جبهه گسترش آتش مشخص می‌کند. همچنین دقت کلی و شاخص کاپای بدست آمده به ترتیب برابر ۰/۸۸ و ۰/۷۴ بوده

که بیان‌گر دقت پیش‌بینی مدل گسترش آتش‌سوزی و مطلوبیت روش اتوماسیون سلولی در مدل‌سازی گسترش آتش-سوزی بود (۴۱).

۳- مدل‌های گسترش آتش‌سوزی جنگل[1]

مدل‌های آتش‌سوزی، طیفی وسیع از بخش‌های علمی از قبیل جنگلداری، بوم‌شناختی، شیمی اتمسفر (خارج شدن گازها)، مهندسی مکانیک (الگوهای انتشار آتش) و جغرافیا (تحلیل‌های مکانی وقوع آتش) را در برمی‌گیرد (۴۲). مدل‌های ریاضی رفتار آتش‌سوزی، مجموعه‌ای از معادلات هستند که ارزش‌های عددی برای یک یا چند متغیر از قبیل سرعت گسترش، ارتفاع شعله، خطر احتراق یا مصرف مواد سوختنی ارایه می‌دهند. این مدل‌ها پایه و اساس مدل‌ها و برنامه‌های کامپیوتری شبیه‌سازی رفتار آتش می‌باشند. مدل-های ریاضی آتش‌سوزی جنگل، بر اساس سرشت معادلات به چهار دسته مدل‌های نظری، سیستم فیزیکی، تجربی و نیمه-تجربی تقسیم می‌شوند (۴۳) (شکل ۱).

1- Fire spread



شکل ۱- مدل‌های گسترش آتش‌سوزی جنگل (۳۶)

۳-۱- مدل‌های نظری[1]

مدل‌های نظری بر اساس قوانین مکانیک سیالات، انتقال گرمایی و اشتعال ساخته شده‌اند. اعتبارسنجی این نوع مدل‌ها بسیار مشکل می‌باشد. با این وجود ممکن است برای انواع گسترده‌ای از وضعیت آتش‌سوزی تعمیم داده شوند (۴۳). مزیت مدل‌های تئوری، قابلیت تعمیم و سازگاری آنها برای بوم‌سازگان-های مختلف می‌باشد؛ البته در صورتی که همه جوانب علمی رفتار آتش‌سوزی توسط مدل در نظر گرفته شود. مدل‌های تئوری کنونی معمولاً چنین جامعیتی ندارند، بخصوص که بسیاری از آن‌ها درتشریح ترمودینامیکی رفتار آتش‌سوزی فاقد کارآیی لازم هستند. با وجود اینکه بسیاری از مدل‌های کاربردی کنونی مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی می‌باشند، ولی به دلیل دشواری تعمیم این مدل‌ها، برخی تحقیقات به سمت مدل‌های نظری گرایش پیدا کرده است. مهم‌ترین وجه یک مدل موفق آن است که ساخت آن بر اساس پژوهش‌های نظری و کاربردی پی‌ریزی شده باشد (۴۴).

۳-۲- مدل‌های سیستم فیزیکی[2]

سیستم فیزیکی از مواد سوختی با ارتفاع کمتر از دو متر تشکیل شده است که شامل درختان کوچک، بوته، پوشش گیاهی و تنه‌های افتاده درختان می‌باشد (۴۳). مدل‌های ریاضی‌ای که بر اساس مدل سیستم فیزیکی دسته‌بندی می‌شوند، شامل چهار گروه هستند که در ادامه تشریح می‌شوند.

۳-۲-۱- مدل آتش سطحی

مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی سطحی یکی از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در مراکز تحقیقاتی در سراسر جهان طی پنج دهه گذشته بوده است. چندین مدل، متشکل از یک سری از معادلات مرتبط با پارامترهای محیط‌زیستی در رفتار آتش‌سوزی، ارایه شده است. اهمیت این مدل‌ها در این واقعیت نهفته است که سیستم‌های محاسبه فعلی، بر اساس این مدل‌ها می‌باشند. با وجود تعداد زیاد مدل‌های ایجاد شده در این زمینه،

1- Theory

2- Physical system

تنها تعداد کمی از آنها در عمل موفق بوده‌اند. مدل گسترش آتش سطحی نمی‌تواند با راه‌حل‌های قطعی، مدل شود، اما یکی از زمینه‌هایی است که یکی از اساسی‌ترین مفاهیم آتش‌سوزی دینامیک را فراهم نموده است. اثرات شیب، توپوگرافی و باد در مکانیسم‌های انتقال حرارت در گسترش آتش‌سوزی و ویژگی‌های اصلی رفتار آتش، بخش بسیار قابل توجه از دانشی است که از مدل گسترش آتش سطحی به دست آمده است.

۳-۲-۲- مدل آتش تاجی

در این حالت، سیستم فیزیکی متشکل از سطح و وضعیت پوشش گیاهی از لحاظ ارتفاعی می‌باشد. در واقع پوشش گیاهی در راستای قائم طبقه‌بندی می‌شود. اگر جبهه آتش‌سوزی در یک زمان، پوشش گیاهی قائم را بسوزاند، آتش‌سوزی تاجی در حال وقوع است. آتش‌سوزی‌ای که همراه با احتراق تاج صورت پذیرد، بسیار خطرناک می‌باشد و مبارزه با آن نیز بسیار دشوار است. با توجه به معادلات نظری یا تجربی، مدل‌سازی و اعتبارسنجی این نوع از آتش‌سوزی‌ها بسیار پیچیده است، بنابراین به منظور مدیریت بهتر جنگل، باید دانش و اطلاعات در مورد این نوع آتش‌سوزی افزایش یابد. با توجه به پیچیدگی موضوع، تا به امروز تنها چند مدل آتش‌سوزی تاجی ارایه شده است که به طور کلی فقط یک راهنما می‌باشند و البته بسیار مهم است که جزییات، مورد تجزیه و تحلیل قرار داده شود (۴۳).

۳-۲-۳- مدل آتش زمینی

در این نوع مدل‌ها، سیستم فیزیکی را مواد آلی جنگل که در اثر تخمیر در زیر بستر شکل می‌گیرند، تشکیل می‌دهند. تأثیر آتش‌سوزی‌های زمینی همانند آتش‌سوزی سطحی و یا تاجی نیست و با سوختن بدون شعله و سرعت انتشار بسیار آرام مشخص می‌شود، با این حال مدل‌سازی این پدیده، در راستای حفاظت از بوم‌سازگان‌های جنگلی امری ضروری به نظر می‌رسد زیرا این نوع آتش‌سوزی‌ها، به نوبه خود خطرناک بوده و لایه مواد آلی خاک را به عنوان سوخت مصرف می‌کنند (۴۵). این اثرات در فعالیت‌های حیاتی جنگل بسیار مضر هستند و متأسفانه مدیران آتش‌سوزی نمی‌توانند آن‌ها را با دقت کافی پیش‌بینی کنند.

۳-۲-۴- مدل لکه‌ای

در این مدل‌ها، سیستم فیزیکی متشکل از تکه‌هایی از مواد سوختنی مانند میوه درخت کاج است که در اثر گرما یا به وسیله باد به محیطی دورتر از جبهه آتش‌سوزی منتقل می‌شوند و این امر سبب ایجاد نقاط احتراق جدید در منطقه می‌شود. به این پدیده اسپاتینگ[1] گفته می‌شود. متأسفانه، تعداد محدودی مدل برای پدیده آتش‌سوزی لکه‌ای وجود دارد، با این حال و با وجود تعداد کم مدل‌های موجود، این مدل‌ها اطلاعات لازم برای پیش‌بینی آتش‌سوزی را در اختیار قرار می‌دهند. مقادیر عددی فاصله‌هایی که در آنها پدیده آتش-سوزی لکه‌ای مشاهده شده و همچنین احتمالات مرتبط با احتراق، هدف اصلی مطالعات اثر آتش‌سوزی‌های لکه‌ای می‌باشد (۴۳).

۳-۳- مدل‌های تجربی[2]

مدل‌های تجربی از همبستگی‌های آماری استخراج شده از آزمایشات یا مطالعات آتش‌سوزی‌های گذشته ساخته می‌شوند (۴۳). این مدل‌ها فقط برای سیستم‌هایی با شرایط مشابه آنچه در فرمول‌بندی و آزمون مدل به کار رفته است، قابل اجرا می‌باشند و تعمیم آن‌ها برای سایر مناطق دشوار می باشد. مهم‌ترین مدل از این دسته مدل‌ها، مدل پیش‌بینی رفتار آتش کانادا[3] است که بعد از مشاهده بیش از ۵۰۰ آتش‌سوزی آزمایشی و با استفاده از اطلاعات آتش‌سوزی‌های گذشته در دهه ۸۰ میلادی طراحی گردید. این مدل پایه و اساس برنامه Prometheus (۴۶) و در پیوند با سیستم شاخص آب و هوای آتش‌سوزی کانادا[4] می-باشد. مدل‌های معروف دیگر از این دسته، مدل‌های McArthur

1- Spotting
2- Empirical
3- Fire Behave Prediction (FBP)
4 - Fire Weather Index (FWI)

(۴۷ و ۴۸) در استرالیا می‌باشند. McArthur براساس این مدل-ها و سنجنده‌های مورد استفاده در آمریکا در دهه ۱۹۵۰، دو سنجنده[1] برای برآورد خطر آتش‌سوزی در تیپ‌های رویشی جنگل و مرتع و تعیین پارامترهای اصلی آتش‌سوزی طراحی نمود که از همبستگی‌های آماری استخراج شده از حریق های آزمایشی، تهیه شده بودند.

سنجنده‌های جنگل و مرتع McArthur اولین ابزارهایی هستند که توسط مدیران آتش‌سوزی جنگل به کار رفته‌اند (۴۳). این سنجنده‌ها نوعی ابزار محاسبه متشکل از چهار صفحه هستند که در آنها متغیرهای گنجانده شده در پردازش‌های ریاضی ارایه شده‌اند. سرعت گسترش آتش در یک جنگل یا مرتع، بر اساس ارزش‌های واقعی متغیرها با چرخش صفحات برآورد می-شود. این سنجنده‌ها بر اساس مقادیر دما، رطوبت نسبی و سرعت باد، ارزش‌های عددی‌ای را د برای متغیرهای احتمال احتراق، سرعت گسترش و دشواری فرونشانی آتش ارایه می‌دهند. این ابزارها به دلیل سهولت استفاده و میزان دقت آن‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفتند. این سنجنده‌ها خطر نسبی وقوع آتش‌سوزی را به صورت روزانه و در یک سطح بزرگ تشریح می‌کنند. با اینکه شکل اولیه مدل‌های McArthur به صورت جدول یا سنجنده بوده، اما این مدل‌ها به معادلاتی تبدیل و به شکل قابل استفاده برای شبیه‌سازی کامپیوتری نرخ خطر و رفتار آتش‌سوزی درآمده‌اند (۴۹ و ۵۰).

۳-۴- مدل‌های نیمه‌تجربی[2]

مدل‌های نیمه‌تجربی به صورت عبارات تجربی، کلی و ساده ارایه شده و با آزمایشاتی تکمیل شده‌اند. تعمیم آن‌ها برای وضعیتی مشابه آنچه در ساخت آن‌ها استفاده شده، به منظور کسب داده‌های تجربی مناسب می‌باشد. دشواری اعتبارسنجی آن‌ها کم‌تر از مدل‌های تئوری می‌باشد (۴۳). مهم‌ترین این نوع مدل‌ها،مدل نیمه‌تجربی گسترش آتش‌سوزی سطحی Rothermel (۱۳) می‌باشد. مدل Rothermel (۱۳) یکی از فراگیرترین مدل‌های مورد استفاده می‌باشد، که گسترش آتش را در سوخت‌های سطحی شبیه‌سازی می‌نماید. این مدل پایه و اساس بسیاری از سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری آمریکای شمالی از قبیل FARSITE، BEHAVE و SPREAD و سیستم ملی تحلیل مدیریت آتش‌سوزی[3] برای برنامه‌ریزی اقتصادی می‌باشد (۵۱). مدل Rothermel (۱۳) به صورت نیمه-تجربی تهیه شد و از این رو بر شرایط تجربی (آزمایشی) متکی می‌باشد. این مدل در مناطق و برنامه‌های شبیه‌سازی بسیاری به کار گرفته شده است. به عنوان مثال نسخه اصلاحی این مدل، اساس برنامه شبیه‌سازی Fire Station (۱۷) محسوب می‌شود. مدل Rothermel (۱۳) مشخصه‌های محیطی آتش‌سوزی شامل مشخصه‌های سوخت، شیب و جهت باد را به عنوان ورودی در نظر می‌گیرد و خروجی آن، سرعت گسترش آتش‌سوزی سطحی در امتداد جهت اصلی گسترش می‌باشد. این مدل در مورد مکانیسم‌های انتقال حرارت محدودیت‌هایی دارد. از این رو نمی-تواند گسترش آتش‌سوزی را در مواردی که آتش‌سوزی لکه‌ای در اثر سوختن شاخه‌ها رخ می‌دهد، پیش‌بینی نماید. همچنین قادر به پیش‌بینی رفتار آتش‌سوزی‌های بزرگ و آتش‌سوزی‌های تاجی نمی‌باشد.

مدل گسترش آتش‌سوزی FARSITE نیز یکی از پرکاربردترین شبیه‌سازهای گسترش آتش‌سوزی از نظر زمانی و مکانی است که برای اولین بار در آزمایشگاه علوم آتش‌سوزی Missoula از خدمات جنگلداری USDA توسعه یافته است. این مدل نیز که یک مدل نیمه‌تجربی محسوب می‌شود، بر اساس مدل گسترش آتش‌سوزی سطحی Rothermel (۱۳) کار می‌کند و بر اساس اصل گسترش موجی و شدت آتش‌سوزی Huygens توسعه یافته است که معادله Byram (۵۲) را برای شبیه‌سازی گسترش آتش-سوزی به کار می‌برد. FARSITE طی سال‌های اخیر به کرات در آمریکا کالیبره شده و نه تنها برای تولید نقشه‌های مکانی گسترش و رفتار آتش‌سوزی، بلکه برای ارزیابی اثرات دستورالعمل‌های جنگل‌شناسی و موارد تیمارهای سوخت مختلف بر روی کاهش

1 -Meters
2- Semi-empirical

3 - National Fire Management Analysis System (NFMAS)

خطر آتش‌سوزی جنگل به کار گرفته شده است. استفاده از مدل FARSITE در مناطق متفاوت از مناطقی که این مدل برای اولین بار توسعه پیدا کرده است، نیازمند کالیبراسیون محلی و اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های آتش‌سوزی‌های گذشته می‌باشد و این اولین مرحله از کاربرد این شبیه‌ساز برای مقیاس‌های بزرگتر است.

اخیراً مدل دیگری به نام مدل FlamMap برای شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های اسپانیا و بسیاری از کشورهای اروپایی استفاده می‌شود (۵۳). برنامه FlamMap برای توسعه مطلوبیت مدل‌های مذکور در سطح لندسکیپی ایجاد شد که داده‌های ورودی مورد نیاز آن با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی نقشه‌برداری می‌شوند. داده‌های ورودی مورد نیاز در سیستم FlamMap، همان مجموعه داده‌های ورودی مکانی هستند که در مدل شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی FARSITE (۱۳) استفاده می‌شوند (۵۳) و محاسبات رفتار آتش، به صورت مستقل برای هر سلول در وضعیت شبکه‌ای[1] انجام می‌شود (۵۴).

نوع دیگر از مدل‌های نیمه‌تجربی، مدل اتوماسیون سلولی[2] می‌باشد. در مدل اتوماسیون سلولی، منطقه به صورت یک شبکه سلولی در نظر گرفته می‌شود و آتش در این شبکه بر پایه یک مجموعه از قواعد معرف وضعیت سلول و با توجه به قابلیت اشتعال یا غیرقابل اشتعال بودن سلول، درجه پیشرفت متفاوتی خواهد داشت (۴۳). این قواعد بر پایه مدل‌های ریاضی تئوری و نیمه‌تجربی 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 نشان دهنده قطعه کوچکی از زمین بوده و شکل آن معمولاً به صورت مربع انتخاب می‌شود، در نتیجه هشت جهت برای گسترش آتش‌سوزی وجود دارد. هر سلول معمولاً توسط چندین متغیر توصیف می‌شود. مهم‌ترین عواملی که بر میزان گسترش و شکل جبهه آتش‌سوزی جنگل‌ها تأثیر می‌گذارند عبارتند از سوخت (تراکم پوشش گیاهی)، توپوگرافی جنگل (شیب و موانع طبیعی)، سرعت و جهت باد (۳۸). Yongzhong و همکاران (۲۰۰۴) (۵۵) و Trunfio (۲۰۰۴) (۵۶) سلول‌های شش‌ضلعی را به منظور کسب دقت بیش‌تر در مورد رفتار مکانی آتش‌سوزی به کار گرفتند.نمایی کلی از اساس کار مدل‌های مختلف گسترش آتش‌سوزی جنگل، نقاط ضعف و قوت و کاربردهای آن‌ها که در این بخش مورد بحث قرار گرفتند در جدول ۱ نشان داده شده است.

۴- مدل مناسب گسترش آتش‌سوزی برای جنگل‌های ایران

با توجه به شرایط جنگل‌های ایران و سرشت آتش‌سوزی در این جنگل‌ها که غالباً 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 جنگل‌های ایران باشند. دلیل مناسب بودن مدل‌های نظری، قابلیت تعمیم و سازگاری آن‌ها برای انواع گسترده‌ای از وضعیت آتش‌سوزی در بوم‌سازگان‌های مختلف است و به همین علت به نظر می‌رسد که برای شرایط گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران قابل استفاده باشند. مدل فیزیکی آتش‌سوزی سطحی و مدل نیمه‌تجربی راترمل به دلیل اینکه بیش‌تر آتش‌سوزی‌ها در جنگل‌های ایران از نوع سطحی می‌باشند، می‌توانند برای این جنگل‌ها کاربردی باشند. مدل فارسایت نیز به عنوان یکی از پرکاربردترین شبیه‌سازهای گسترش آتش‌سوزی از نظر زمانی و مکانی، در صورتی که مدل سوختی از جنگل‌های ایران در دسترس باشد و در صورت کالیبراسیون مناسب مدل می‌تواند نتایج مطلوبی برای جنگل‌های ایران در پی داشته باشد. ضمن اینکه کاربرد آسان و شفاف این شبیه‌ساز و قابلیت استفاده از آن برای انواع مختلف آتش‌سوزی جنگل، بر مطلوبیت آن می‌افزاید. مدل اتوماسیون سلولی نیز به دلیل ساختار پایدار، سادگی، سازگاری با داده‌های رستری و اجرای آن از طریق اعمال یک سری قوانین ساده محلی بر روی پیکسل‌ها (سلول‌ها)

1- Gridded landscape
2- Cellular Automata (CA)

می‌توانـد در صـورت در دسـترس بـودن داده‌هـای توپـوگرافی، پوشش گیاهی و سرعت و جهت باد، قابلیت زیادی برای مـدل-سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران داشته باشد.

جدول ۱- اساس مدل‌سازی، مزایا، معایب و کاربردهای مدل‌های مختلف گسترش آتش‌سوزی جنگل

مدل گسترش آتش سوزی	انواع	اساس مدل‌سازی	اهمیت و مزایا	معایب و محدودیت‌ها	کاربردها
مدل‌های نظری	-	براساس قوانین مکانیک سیالات، انتقال گرمایی و اشتعال	- قابلیت تعمیم و سازگاری آنها برای انواع گستره‌ای از وضعیت آتش‌سوزی در بوم‌سازگان‌های مختلف	- اعتبارسنجی بسیار مشکل - فاقد کارایی لازم در تشریح ترمودینامیکی رفتار آتش‌سوزی	کاربرد در انواع جنگل‌ها
مدل‌های فیزیکی	مدل آتش سطحی	براساس سیستم فیزیکی مواد سوختی با ارتفاع کمتر از دو متر (شامل درختان کوچک، بوته، پوشش گیاهی و تنه‌های افتاده درختان) و مدل‌های ریاضی	- زمینه یکی از اساسی‌ترین مفاهیم آتش‌سوزی دینامیک - یکی از مهم‌ترین مدل‌های استفاده شده در مراکز تحقیقاتی سراسر جهان طی پنج دهه گذشته	- مدل گسترش آتش سطحی نمی‌تواند با راه‌حل‌های قطعی، مدل شود	کاربرد در جنگل‌های دارای آتش سوزی سطحی
	مدل آتش تاجی		- توسعه‌یافته برای آتش‌سوزی‌های تاجی در حال وقوع و بسیار خطرناک	- مدل‌سازی و اعتبارسنجی بسیار پیچیده - محدودیت تعداد مدل‌های آتش‌سوزی تاجی ارائه شده با توجه به پیچیدگی موضوع	کاربرد در جنگل‌های دارای آتش سوزی تاجی
	مدل آتش زمینی		-اهمیت برای حفاظت از هوموس خاک و لایه مواد آلی خاک جنگل	- عدم امکان پیش‌بینی آنها با دقت کافی توسط مدیران آتش‌سوزی	قابل استفاده در جنگل‌هایی با آتش سوزی زمینی
	مدل آتش لکه ای		- در اختیار قرار دادن اطلاعات لازم برای پیش‌بینی آتش‌سوزی لکه‌ای	- تعداد محدود مدل‌های آتش‌سوزی لکه‌ای	قابل استفاده در جنگل‌های سوزنی‌برگ که امکان وقوع پدیده اسپاتینگ بیشتر است
مدل‌های تجربی	مدل کانادایی	براساس همبستگی‌های آماری استخراج‌شده از آزمایشات یا مطالعات آتش‌سوزی‌های گذشته	- سهولت استفاده	- این مدل‌ها فقط برای اکوسیستم‌هایی با شرایط مشابه آنچه در فرمول‌بندی و آزمون مدل به کار رفته است، قابل اجرا می‌باشند	در پیوند با سیستم شاخص آب و هوای آتش‌سوزی کانادا توسعه یافته‌اند و لذا فقط برای جنگل‌های کانادا قابل اجرا می‌باشند
	مدل استرالیایی مک آرتور		- سهولت استفاده و میزان دقت - قابلیت سنجنده‌های مک آرتور برای تشریح خطر نسبی وقوع آتش‌سوزی به صورت روزانه و در	- این مدل‌ها فقط برای اکوسیستم‌هایی با شرایط مشابه آنچه در فرمول‌بندی و آزمون مدل به کار رفته است، قابل اجرا می‌باشند	این مدل‌ها برای اکوسیستم‌هایی با شرایط مشابه استرالیا قابل استفاده می‌باشند

مدل‌های نیمه-تجربی	براساس عبارات تجربی، کلی و ساده ارائه شده و با آزمایشهای تکمیل شده‌اند			
مدل اتوماسیون سلولی	مدل فارسایت	مدل رانوعل	مقیاس بزرگ	
- ساختار پایدار، سادگی، سازگاری با داده‌های رستری و قدرت خروجی مناسب در رابطه با پدیده‌های دینامیکی -این مدل با اعمال یک سری قوانین ساده محلی در هر زمان، حالت کلی سیستم را در آن زمان بیان می کند. - دستیابی به ویژگی های کلی پدیده پویا و پیچیده آتش‌سوزی، از طریق محاسبات محلی اعمال‌شده بر روی سلول‌ها، از ویژگی‌های متمایز اتوماسیون سلولی می‌باشد	- کاربرد آسان و شفاف - علاوه بر مدل‌های سوخت سطحی، مدل‌هایی برای رفتار آتش‌سوزی تاجی دارد - در نسخه‌های جدید این شبیه‌ساز، تابعی برای پیش‌بینی آتش‌سوزی تاجی اضافه شده است	- تعمیم برای وضعیتی مشابه آنچه در ساخت آنها استفاده شده است -اعتبارسنجی آسان‌تر از مدل‌های تئوری	مقیاس بزرگ	
- برنامه‌نویسی تقریباً پیچیده -لزوم در دسترس بودن اطلاعات موردنیاز برای همه پارامترهای مؤثر در مدل مربوطه - نیازمند کالیبراسیون محلی و بومی‌سازی برای استفاده در مناطق مختلف - عملکرد تقریباً ضعیف اتوماسیون سلولی در همسایگی اطراف یک سلول در حال سوختن	-لزوم وجود مدل سوخت برای منطقه مورد مطالعه - سیستم بسیار پیچیده طبقه‌بندی تیپ های سوخت - استفاده از مدل فارسایت در مناطق متفاوت از مناطقی که این مدل برای اولین بار توسعه پیدا کرده است، نیازمند کالیبراسیون محلی و اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های آتش‌سوزی‌های گذشته می‌باشد	- محدودیت‌هایی در مورد مکانیسم‌های انتقال حرارت - عدم پیش‌بینی دقیق گسترش آتش‌سوزی لکه‌ای و رفتار آتش‌سوزی‌های بزرگ و تاجی		
تا حدی تابع شرایط، نوع پوشش و اقلیم منطقه مورد مطالعه می‌باشد، اما در صورت وجود داده‌های لازم می تواند در مناطق جنگلی مختلف مورد استفاده قرار گیرد	- شبیه‌سازی گسترش و رفتار آتش‌سوزی طبیعت - پرکاربردترین شبیه‌ساز گسترش آتش‌سوزی از نظر قابلیت زمانی و مکانی	- یکی از فراگیرترین مدل‌های مورداستفاده که گسترش آتش را در سوخت‌های سطحی شبیه‌سازی می‌نماید - پایه و اساس بسیاری از سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری آمریکای شمالی از قبیل SPREAD و BEHAVE ،FARSITE سیستم ملی تحلیل مدیریت آتش‌سوزی		

۴- بحث و نتیجه گیری

با توجه به روند روزافزون آتش‌سوزی در جنگل‌ها از یک طرف و محدود بودن سطح این منابع ارزشمند از طرف دیگر، توسعه روش‌های مقابله با گسترش آن ها در جنگل‌ها ضروری به نظر می‌رسد. از آنجایی‌که عوامل مختلفی در گسترش آتش‌سوزی جنگل‌ها تأثیرگذارند، مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی با توجه به کلیه فاکتورهای تأثیرگذار در رفتار آتش و با استفاده از یک مدل مناسب و دقیق، راهکار مناسبی برای پیش‌بینی جهت پیشروی و گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌ها است. از طرف دیگر با توجه به اینکه بیش‌تر عوامل تأثیرگذار بعد مکانی دارند، سیستم اطلاعات جغرافیایی نقش مؤثری را در مدل‌سازی مکانی گسترش آتش‌سوزی ایفا می‌کند. این مطالعه به منظور معرفی و تحلیل مدل‌های مختلف گسترش

آتش‌سوزی در جنگل و بررسی روش‌های مختلف مدل‌سازی و شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های جهان و ایران انجام شد.

بررسی مطالعات انجام‌گرفته در خصوص مدل‌سازی و شبیه-سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل در سطح جهان نشان می‌دهد که تحقیقات اولیه از مدل‌های مبتنی بر GIS و RS برای گسترش آتش‌سوزی جنگل استفاده کرده‌اند. نتایج مطالعات اولیه در خصوص شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جهان نشان می‌دهد که مدل گسترش آتش‌سوزی با استفاده از GIS معمولاً به شکل یک چندضلعی (پلی‌گون) است و نسبت به سایر مدل‌ها با شکل طبیعی گسترش آتش‌سوزی جنگل هم-خوانی بیش‌تری دارد؛ زیرا همه عوامل مؤثر در گسترش آتش-سوزی جنگل در آن لحاظ شده است. برخی از تحقیقات نیز گسترش آتش‌سوزی تاجی را مدل‌سازی کرده و برخی دیگر به بررسی رابطه بین متغیرها و سرعت گسترش آتش‌سوزی جنگل پرداخته‌اند. در دهه ۸۰، مدل‌های نیمه‌تجربی برای مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل مطرح شدند که غالباً کاربرد محلی داشتند. نتایج برخی تحقیقات انجام گرفته با شبیه‌ساز فارسایت نشان داده که اغلب مناطق با خطر زیاد آتش‌سوزی همان مناطقی هستند که قبلاً در آنها آتش‌سوزی اتفاق افتاده است که بیان‌گر اعتبار بالای مدل مذکور است. همچنین نتایج استفاده از این شبیه‌ساز در مطالعات دیگر نشان داده که ترکیب FARSITE و GIS برای شبیه‌سازی گسترش آتش-سوزی جنگل می‌تواند استراتژی مدیریتی قابل قبولی را برای کاهش خسارات ناشی از آتش‌سوزی بر محیط زیست، زندگی و دارایی‌ها و املاک ارایه دهد. از اواخر دهه ۹۰، شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل با استفاده از روش اتوماسیون سلولی، تحت سناریوهای مختلف آب و هوایی و توپوگرافی و در نظر گرفتن پارامترهای پوشش گیاهی و شرایط باد، جایگاه ویژه‌ای در تحقیقات گسترش آتش‌سوزی پیدا کرده است. طی تحقیقات مختلف در دهه گذشته، این مدل متناسب با شرایط محلی جنگل‌های جهان توسعه یافته و تغییراتی در ارتباط با قوانین انتقال، شکل سلول‌ها و وضعیت سلول‌های همسایه در آن اعمال شده است. نتایج کلی حاصله حاکی از آن است که این روش برای کاربردهای عملی، رضایت‌بخش است. در تحقیقات اخیر، نتایج اعتبارسنجی روش اتوماسیون سلولی، از طریق مقایسه نحوه شبیه‌سازی گسترش آتش با آتش‌سوزی-های مهیب گذشته، نشان می‌دهد که در اغلب موارد نحوه پیش‌روی آتش در مدل شبیه‌سازی، مشابه نحوه پیش‌روی آن در همان منطقه‌ای است که در گذشته آتش‌سوزی اتفاق افتاده است که نشان‌دهنده دقت بالای روش مذکور است. بررسی مطالعات انجام‌گرفته در ایران نشان می‌دهد که تحقیقات مربوط به مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی در کشور ما محدود بوده است. با این حال طی سال‌های اخیر (دهه ۹۰ شمسی) برخی از پژوهش‌ها در خصوص مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی در ایران انجام شده‌اند که اغلب به صورت مطالعه موردی و محدود به جنگل‌های هیرکانی، استان گلستان و شرق مازندران بوده‌اند. در برخی از مطالعات انجام‌گرفته در جنگل‌های هیرکانی، سرعت گسترش آتش در شرایط مختلف از طریق شبیه‌سازی سرعت-های مختلف باد، طبقات شیب، نوع لاشبرگ و ضخامت آن مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و نتایج نشان داده که با افزایش سرعت باد و شیب، سرعت آتش‌سوزی سطحی به‌صورت تصاعدی افزایش یافته است (۳۰). نتایج تنها مطالعه موجود در خصوص کالیبراسیون مدل فارسایت برای جنگل‌های شمال ایران نشان داده که آتش‌سوزی‌های شبیه‌سازی‌شده با این مدل، خروجی‌های دقیقی را ارایه داده که به طور دقیقی بازتاب رفتار و محیط آتش‌سوزی‌های واقعی بوده است. بیش‌ترین تناسب بین آتش‌سوزی مشاهده‌شده و منطقه سوخته شبیه‌سازی‌شده در مدل سوخت گیاهان علفی مشاهده شده و در نهایت مدل-سازی آتش‌سوزی با استفاده از شبیه‌ساز FARSITE کالیبره شده، پتانسیل بالایی را برای برآورد قابلیت تغییر مکانی در رفتار و گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال ایران نشان داده است (۳۳). همچنین نتایج تنها مطالعه موجود با روش اتوماسیون سلولی نیز نشان داده که شکل جبهه گسترش آتش-سوزی در مدل پیشنهادشده با اتوماسیون سلولی شباهت زیادی به محدوده آتش‌سوزی واقعی دارد که قابلیت مدل پیشنهادی با

اتوماسیون سلولی را در پیش‌روی جبهه گسترش آتش مشخص می‌کند. همچنین دقت کلی و شاخص کاپای بدست‌آمده بیان‌گر دقت پیش‌بینی مدل گسترش آتش‌سوزی و مطلوبیت روش اتوماسیون سلولی در مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی بوده است (۴۱).

درنهایت با توجه به تحلیل‌هایی که در این مطالعه انجام گرفت، مشخص شد که هر کدام از مدل‌های ریاضی گسترش آتش-سوزی جنگل (مدل‌های نظری، فیزیکی، تجربی و نیمه‌تجربی) دارای معایب و مزایای خاص خود می‌باشند. مدل‌های نظری با وجود آنکه قابلیت تعمیم به اکوسیستم های مختلف را دارند، اما اعتبارسنجی آن‌ها مشکل است. مدل‌های سیستم فیزیکی (سطحی، تاجی، زمینی و لکه ای) نیز با توجه به انواع مختلف آتش‌سوزی‌های جنگلی توسعه یافته‌اند، اما این مدل‌ها گاهی دارای دقت کافی نیستند و اعتبارسنجی آن‌ها نیز مانند مدل-های نظری مشکل است. در این میان مدل‌های تجربی به دلیل سهولت استفاده، بسیار کاربردی می‌باشند اما این مدل‌ها فقط برای سیستم‌هایی با شرایط مشابه آنچه در فرمول‌بندی و آزمون مدل به کار رفته است، قابل اجرا می‌باشند. مدل‌های نیمه-تجربی به دلیل اعتبارسنجی آسان‌تر، سادگی، سازگاری با داده‌های رستری و قدرت ارایه 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 مورد نیاز برای همه پارامترهای مؤثر در مدل مربوطه، در برخی موارد استفاده از آن‌ها را محدود کرده است. همچنین با توجه به ماهیت نیمه‌تجربی این مدل‌ها و وابستگی نسبی آن ها به داده‌های تجربی، معمولاً برای مناطق مشابه مناطقی که این مدل‌ها برای اولین بار اجرا شده‌اند، کارایی بالای دارند و استفاده از آن‌ها برای مناطق متفاوت از مناطقی که این مدل‌ها توسعه پیدا کرده‌اند، نیازمند کالیبراسیون محلی و اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های آتش-سوزی‌های گذشته می‌باشد.

با توجه به شرایط جنگل‌های ایران و سرشت آتش‌سوزی در این جنگل‌ها که غالباً از نوع سطحی می‌باشد، مدل‌های نظری، مدل‌های فیزیکی آتش‌سوزی سطحی و مدل‌های نیمه-تجربی راترمل، فارسایت و اتوماسیون سلولی می‌توانند بهترین گزینه‌ها برای مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران باشند. دلیل مناسب بودن مدل‌های نظری، قابلیت تعمیم و سازگاری آن‌ها برای انواع گسترده‌ای از وضعیت آتش‌سوزی در بوم‌سازگان‌های مختلف است و به همین علت به نظر می‌رسد که برای شرایط گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران قابل استفاده باشند. مدل فیزیکی آتش‌سوزی سطحی و مدل نیمه-تجربی راترمل به دلیل اینکه بیشتر آتش‌سوزی‌ها در جنگل‌های ایران از نوع سطحی می‌باشند، می‌توانند برای این جنگل‌ها کاربردی باشند. مدل فارسایت نیز به عنوان یکی از پرکاربردترین شبیه‌سازهای گسترش آتش‌سوزی از نظر زمانی و مکانی، در صورتی که مدل سوختی از جنگل‌های ایران در دسترس باشد و در صورت کالیبراسیون مناسب مدل می‌تواند نتایج مطلوبی برای جنگل‌های ایران در پی داشته باشد. ضمن اینکه کاربرد آسان و شفاف این شبیه‌ساز و قابلیت استفاده از آن برای انواع مختلف آتش‌سوزی جنگل، بر مطلوبیت آن می-افزاید. مدل اتوماسیون سلولی نیز 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 و سرعت و جهت باد، قابلیت زیادی برای مدل-سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران داشته باشد.

منابع

1. Janbaz Ghobadi, Gh., Gholizadeh, B., 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, Vol. 4 (12), pp. 818-824.
2. Adab, H., Kanniah, K.D., Solaimani, K., 2013. Modeling forest fire risk in

the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. Natural Hazards, Vol. 65, pp. 1723-1743.

۳. پناهی، پ.، «کاربرد سنجش از دور در مدیریت آتش‌سوزی جنگل». سمینار دوره دکتری علوم جنگل، دانشگاه مازندران، دانشکده منابع طبیعی، ۱۳۸۶؛ ۲۰ صفحه.

۴. کاظمی، س. م.، ۱۳۸۴. «آتش و اکوسیستم‌های جنگلی». ماهنامه دام و کشت و صنعت، جلد ۷۰، صفحات ۴۶-۵۶.

5. Podur, J., Martell, D.L., Knight, K., 2002. Statistical quality control analysis of forest fire activity in Canada. Canadian Journal of Forest Research, Vol. 32, pp. 195-205
6. Wenliang, L., Shixin, W., Yi, Z., Litao, W. and Shujie, Z. 2010. Analysis of forest potential fire environment based on GIS and RS. Proceedings of 18th International conference on geo-informatics, pp. 1-6.
7. Roman, M.V., Azqueta, D., Rodrigues, M., 2013. Methodological approach to assess the socio-economic vulnerability to wildfires in Spain. Forest Ecology and Management, Vol. 294, pp. 158-165.
8. Mutlu, M., Popescu, S.C., Zhao, K., 2008. Sensitivity analysis of fire behavior modeling with LIDAR-derived surface fuel maps. Forest Ecology and Management, Vol. 256, pp. 289-294.
9. Yassemi, S., Dragicevic, S., Schmidt, M., 2007. Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behavior. Ecological Modeling, Vol. 201, pp. 71-84.

۱۰. پورشکوری اله‌ده، ف.، درویش‌صفت، ع. ا.، صمدزادگان، ف.، سلیاری، ج.، «بررسی امکان کشف آتش فعال به کمک تصاویر سنجنده MODIS (مطالعه موردی پارک ملی گلستان)». مجموعه مقالات نخستین همایش بین‌المللی آتش‌سوزی در عرصه‌های منابع طبیعی، ۱۳۹۰، گرگان، ایران. ۱۱.

۱۱. زهری، م.، رحیم‌زادگان، م.، طایفی فیجانی، م.، تقی-زاده، ن.، صابری، ن.، علی‌محمدی سراب، ع.، توکلی، ا.، اکبریان، م.، «صحت‌سنجی محصولات آتش MODIS با استفاده از داده‌های زمینی (مطالعه موردی گلستان)». مجموعه مقالات نخستین همایش بین‌المللی آتش‌سوزی در عرصه‌های منابع طبیعی، ۱۳۹۰، گرگان، ایران، ۹.

12. Vakalis, D., Sarimveis, H., Kiranoudis, C.T., Alexandridis, A., Bafas, G.V., 2004. A GIS based operational system for wildland fire crisis management, I. Mathematical modelling and simulation. Applied Mathematical Modelling, Vol. 28 (4), pp. 389-410.
13. Rothermel, R.C. 1972. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fires. USDA Forest Service Research, Paper INT-115, Ogden Utah, USA, 43 p.
14. Lymberopoulos, N., Papadopoulos, C., Stefanakis, E., Pantalos, N., Lockwood, F. 1996. A GIS -Based Forest Fire Management Information System, 14 p.
15. Andre, J.C.S., Viegas D.X., 1994. A strategy to Model the Average Fireline Movement of a Light to Medium Intensity Surface Forest Fire. Proceedings of the second International Conference on forest fire research, Coimbra, Portugal, pp. 221-242.

16. Saidi, A.A., 1999. The use of the GIS into the Forest Fire prediction The Simulation Model. See information in: http://www.cs.wright.edu/~bwang/course/ceg434634/pa1.pdf
17. Lopes, A.M.G., Cruz, M.G., Viegas, D.X., 2002. Fire station–an integrated system for the simulation of wind flow and fire spread over complex topography. Environmental Modelling & Software, Vol. 17, pp. 269-285.
18. Thon, S., Remy, E., Raffin, R., Gesquière, G., 2007. Combining GIS and forest fire simulation in a virtual reality environment for environmental management. Agriculture, city and environment, Vol. 2 (4), pp. 741-748.
19. Rytwinski, A., Crowe, K.A., 2010. A simulation-optimization model for selecting the location of fuel-breaks to minimize expected losses from forest fires. Forest Ecology and Management, Vol. 260, pp. 1-11.
۲۰. حسینعلی، ف.، رجبی، م. ع.، «شبیه‌سازی آتش-سوزی جنگل با استفاده از سامانه اطلاعات مکانی». مجموعه مقالات همایش ژئوماتیک، ۱۳۸۴، تهران، ایران، ۱۱.
۲۱. آخوندزاده، م.، سراجیان، م. ر.، رجبی، م. ع.، «تشخیص و مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل با کمک تصاویر ماهواره‌ای MODIS». مجموعه مقالات اولین همایش مقابله با سوانح طبیعی، ۱۳۸۵، تهران، ایران، ۹.
22. Van Wagner, C.E., 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. *7*, pp. 23-34.
23. Rothermel, R.C. 1991. Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. USDA Forest Service Research, Paper INT-438, Ogden Utah, USA, 67 p.
24. Albini, F.A. 1976. Estimating wildfire behavior and effects. USDA Forest Service, Technical Report INT-30, 40 p.
25. Perminove, V., 2014. Mathematical Modeling of Crown Forest Fires Spread With Firebreaks. Recent Advances in Applied Mathematics, Modelling and Simulation. Proceedings of the 8th International Conference on Applied Mathematics, Simulation, Modelling (ASM '14), November 22-24, Florence, Italy.
26. Perminove, V., 2015. Numerical Solution of Crown Forest Fire Spread around the Forest Glade. Advances in Information Science and Computer Engineering. Proceedings of the 9th International Conference on Computer Engineering and Applications (CEA '15), February 22-24, Dubai, United Arab Emirates.
27. Sow, M., Hély, C., Mbow, C., Sambou, B., 2013. Fuel and fire behavior analysis for early-season prescribed fire planning in Sudanian and Sahelian savannas. Journal of Arid Environments, Vol. 89, pp. 84-93.
28. Mozer, V., Wilkinson, P., Smolka, M., Tofilo, P., 2014. Probabilistic-deterministic modelling of fire spread. European Journal of Environmental and Safety Sciences, Vol. 2(2), pp. 79-83.
29. Morales, J.M., Mermoz, M., Gowda, J.H., Kitzberger, T., 2015. A stochastic fire spread model for north Patagonia based on fire occurrence maps. Ecological Modelling, Vol. 300, pp. 73-80.

۳۰. نصیری، م.، حجتی، س.م.، تفضلی، م.، ۱۳۹۱. «شبیه‌سازی آتش‌سوزی سطحی به‌منظور بررسی سرعت گسترش آن در جنگل آمیخته پهن‌برگ». فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، جلد ۲۰، شماره ۱، صفحات ۵۰-۶۱.

31. Carmel, Y., Paz, Sh., Jahashan, F., Shoshany, M., 2009. Assessing fire risk using Monte Carlo simulations of fire spread. Forest Ecology and Management, Vol. 257, pp. 370-377.
32. Rwanga, S.S., Ndambuki, J.M., 2014. Application of geographical information systems and FARSITE in fire spread modeling. International Journal of Environment and Sustainable Development, Vol. 13 (2), pp. 185-203.
33. Jahdi, R., Salis, M., Darvishsefat, A.A., Mostafavi, M.A., Alcasena, F., Etemad, V., Lozano, O., Spano, D., 2015. Calibration of FARSITE simulator in northern Iranian forests. Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 15, pp. 443-459.
34. Karafyllidis, I., Thanailakis, A., 1997. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. Ecological Modelling. Vol. 99 (1), pp. 87-97.
35. Ntaimo, L. Khargharia, B. Zeigler, B.P., Vasconcelos, M.J. 2004. Forest Fire Spread and Suppression in DEVS. Arizona Center for Integrative Modeling and Simulation, University of Arizona, 40 p.
36. 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.
37. Encinas, L.H., White, S.H., Rey, A.M., *Sánchez, G.R.*, 2007. b. Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 31(6), pp. 1213-1227.
38. 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, Vol. 204, pp. 191-201.
39. Moreno, A., Segura, A., Korchi, A., Posada, J., Otaegui, O. 2011. Interactive Urban and Forest Fire Simulation with Extinguishment Support. Advances in 3D Jeo-Information Sciences. Springer Heidelberg Dordrecht London, New York, 294 p.
40. Wang, S.L., Lee, H.I., Li, S.P., 2014. Fractal dimensions of wildfire spreading. Nonlinear Processes in Geophysics, Vol. 21, pp. 815-823.

۴۱. اسکندری، س.، «ارائه الگوی پتانسیل آتش‌سوزی جنگل و گسترش آن با استفاده از RS و GIS، مطالعه موردی جنگل‌های بخش سه نکا-ظالمرود». پایان‌نامه دکتری علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده منابع طبیعی، ۱۳۹۲؛ ۱۵۹ صفحه.

42. Arroyo, A.L., PascuaL, C., Manzanera, J.A., 2008. Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing. Forest Ecology and Management, Vol. 256, pp. 1239-1252.
43. Pastor, E., Zarate, L., Planas, E., Analdos, J., 2003. Mathematical models and calculation systems for the

study of wildland fire behavior. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 29, pp. 139-153.

۴۴. مخدوم، م.، درویش صفت، ع. ا.، جعفرزاده، ه.، مخدوم، ع.، «ارزیابی و برنامه‌ریزی محیط‌زیست با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی». چاپ سوم، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، ۱۳۸۶، ۳۰۴ صفحه.

45. Hartford, R.A. and Frandsen, W.H. 1992. When it's hot, it's hot etc. or maybe it's not! (Surface flaming may not portend extensive soil heating). *International Journal Wildland Fire.* 2: 139-44 pp.
46. Prometheus, 2004. The Canadian wildland Fire Growth Model (CWFGM). see information in: http://www.firegrowthmodel.ca/
47. McArthur, A.G., 1966. Weather and grassland fire behaviour. Forestry and Timber Bureau Leaflet 100. Commonwealth Department of National Development, Canberra, Australia, 87 p.
48. McArthur, A.G., 1967. Fire behaviour in Eucaliptus forests. Forestry and Timber Bureau Leaflet 107. Commonwealth Department of National Development, Canberra, Australia, 89 p.
49. Noble, I.R., Bary, G.A.V., Gill, A.M., 1980. McArthur's fire-danger meters expressed as equations. Australian Journal of Ecology, Vol. 5, pp. 201-203.
50. Sirakoff, C., 1985. A correction to the equations describing the McArthur forest fire danger meter. Australian Journal of Ecology, Vol. 10 (4), pp. 481- 491.
51. Lundgren, S., Mitchell, W., Wallace, M., 1995. A status report on NFMAS an interagency system update project. Fire Management Notes, Vol. 55, pp. 11-12.
52. Byram, G.M., 1959. Combustion of forest fuels. In: Davis, K.P., (Eds.). Forest Fire Control and Use. McGraw-Hill Book Company, New York, USA, pp. 61-89.
53. Finney, M.A., 1998. *FARSITE*: Fire Area Simulator – model development and evaluation. USDA For. Serv. Res. Pap. RMRS-RP-4. 47 p.
54. Finney, M.A., 2006. An Overview of FlamMap, Fire Modeling Capabilities. USDA Forest Service Proceedings, pp. 213-220.
55. Yongzhong, Z., Feng, D., Tao, H., Liyu, W., Kegong, L., Xin, D., 2004. Heterogeneous landscape using an improved cellular automaton model. Simulating wildfire spreading processes in spatially Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 04), Proceedings of 2004 IEEE International, pp. 3371-3374.
56. Trunfio, G.A., 2004. Predicting wildfire spreading through a hexagonal cellular automata model. In: Sloot, P.M.A., Chopad, B., Hoekstra, A.G. (Eds.). Springer Verlag. Heidelberg, Berlin, Germany, pp. 385-394.

Analysis on Modeling and Simulation Methods of Fire Spread in the Forests

Saeedeh Eskandari[1]

saeedeheskandari119@yahoo.com

Abstract

Nowadays, the phenomenon of forest fires as a natural disaster threatens a large part of the world's forests. Due to the devastating effects of fire on forest, Research conducted by using new methods to predict the spread of fire, is very valuable.This study has been done to investigate the different methods of fire spread modeling and fire simulation in the forests of the world and Iran. Computer programs are based on mathematical models in order to simulate fire behavior. These models are divided to four categories of theoretical models, physical systems, experimental models and semi-experimental models. Theoretical models have the ability for universalization to the different ecosystems, but their validation is difficult. Physical model (surface, crown, ground, spot) have been developed regarding to the type of forest fires, but these models often don't have the enough accurate and their validation is difficult. The experimental models are very practical due to the ease of use, but they are applicable just for ecosystems which they have the similar conditions with that used in formulation and test of model. The semi-experimental models are taken into consideration because of easier validation, simplicity and compatibility with the raster data, but lack of ability for crown and spot fires, difficult programming and necessity of availability of the required data for all effective parameters are deficiencies of these models. The theoretical models, physical models of surface fire, semi-experimental models of Rothermel, FARSITE and cellular automata can be the best models for fire spread of Iranian forests regarding to conditions of these forests.

Keywords: Fire spread, Theoretical models, Physical models, Experimental models, Semi -Experimental Models

[1] Ph.D in Forest Science, Department of Forestry, Agricultural Science and Natural Resources University, Sari, Iran.