

ارزیابی عملکرد رویکردهای مدل سازی گسترش آتش سوزی جنگل با استفاده از اتوماتای سلولی (پژوهش موردی: جنگل های بخش لاگان شهرستان رشت)

طاهره قائمی راد^۱ و محمد کریمی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم های اطلاعات مکانی، دانشکده نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی سیستم های اطلاعات مکانی، دانشکده نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

پست الکترونیک: mkarimi@kntu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۰۹

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۴/۰۸

چکیده

پیش بینی صحیح گسترش آتش سوزی جنگلی موضوعی حیاتی در کاهش اثرات مخرب ناشی از آن است. آتش سوزی جنگل به عامل های متعددی از جمله توپوگرافی، پوشش گیاهی و اقلیم بستگی دارد. در حال حاضر یکی از چالش های موجود در مدل سازی آتش سوزی جنگلی نحوه ارتباط آن با مشخصه های ایستا و پویای مکانی و زمانی مؤثر بر گسترش آتش سوزی از جمله سرعت و جهت باد است. در این پژوهش، سه رویکرد مطرح در مدل سازی این پارامترها شامل کارافیلیدیس (Karafyllidis)، برجاک (Berjak) و پروجیاس (Progiias) بررسی و تحلیل شدند و اهمیت پارامترهای اندازه پیکسل و گام های زمانی تغییر وضعیت در اتوماتای سلولی مورد توجه قرار گرفت. منطقه مورد مطالعه، محدوده ای از جنگل های یخس لاگان شهرستان رشت بود. ابتدا داده های توپوگرافی، پوشش گیاهی، سرعت و جهت باد جمع آوری و در محیط GIS آماده سازی شدند. سپس سه رویکرد مطرح در منطقه مورد مطالعه پیاده سازی شدند و با انجام آنالیز حساسیت مربوط به پارامترهای اندازه پیکسل و بازه های زمانی، میزان کارایی هر یک از طریق مقایسه جبهه آتش شبیه سازی شده با واقعیت و از طریق محاسبه ضریب کاپا، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که روش برجاک با طول ضلع پیکسل سه تا هفت متر برای مدل سازی گسترش آتش در مناطق جنگلی استان گیلان مناسب است.

واژه های کلیدی: آتش سوزی جنگل، ابعاد پیکسل، اتوماتای سلولی، گام زمانی، مشخصه های پویای مکانی و زمانی.

مقدمه

آتش سوزی جنگل یکی از عوامل مخرب جنگل ها محسوب می شود که دارای پیامدهای اجتماعی و محیطی فراوانی است (Eskandari et al., 2013). کاهش منابع تولید اکسیژن بر روی زمین و تصاعد گازهای گلخانه ای در اثر آتش سوزی، منجر به تشدید اثرات گلخانه ای و پیرو آن افزایش میزان آتش سوزی های جنگل در سراسر جهان

به صورت هشدار دهنده ای شده است (Denham et al., 2012). پیش بینی صحیح گسترش آتش سوزی جنگل موضوعی حیاتی در حداقل نمودن اثرات مخرب ناشی از آن است (Artes et al., 2013).

در یک دیدگاه کلی می توان مدل های گسترش جبهه آتش را در دو گروه مدل های پیوسته و گسسته دسته بندی نمود. در مدل های پیوسته فرض بر این است که آتش بر

متغیر محیط آتش‌سوزی را مدل نمود. این درحالی است که در مدل‌های قطعی، رفتار جبهه آتش مستقیماً از قوانین حاکم بر سیستم و محیط پیرامون برآورد می‌شود و تحت هر شرایطی با توجه به ویژگی‌های حاکم بر منطقه، می‌توان برآورد منطقی از رفتار جبهه آتش داشت. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های Thanailakis و Karafyllidis (۱۹۹۷)، Berjak و Hearne (۲۰۰۲)، Hernandez Encinas و همکاران (۲۰۰۷) و Progiás و Ch.Sirakoulis (۲۰۱۳) اشاره نمود.

بررسی‌ها بیانگر آن است که مدل‌های قطعی - تجربی که در قالب رستر ارائه شده‌اند، به دلیل سادگی مدل‌سازی و توانایی در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده دارای مطلوبیت بیشتری هستند که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته‌اند (Quartieri *et al.*, 2011). از جمله مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده با سیستم‌های گسسته می‌توان به پژوهش‌های Karafyllidis و Thanailakis (۱۹۹۷)، Berjak و Hearne (۲۰۰۲)، Pastor و همکاران (۲۰۰۳)، Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) و Innocenti و همکاران (۲۰۰۹) اشاره نمود. از سوی دیگر از میان روش‌های گسسته موجود، تنها روشی که می‌تواند نقش سلول‌های همسایه را در زمان وارد کند، اتوماتای سلولی است و سایر روش‌ها از جمله روش غیرپارامتریک KNN در این زمینه و همچنین در زمینه تعریف قوانین محلی ناقص می‌باشند. اتوماتای سلولی یک روش کارآمد برای مدل‌سازی سیستم‌های فیزیکی، پویا و پیچیده مانند آتش‌سوزی است (Sarkar & Abbasi, 2006). این روش قادر است سیستم‌های پیچیده را براساس مهم‌ترین ویژگی‌های آنها ساده‌سازی کند و مکانیزم‌های بسیار جزئی و کوچک موجود در این سیستم‌ها را که مربوط به رفتار تکاملی و قابل رؤیت آنها است، نشان دهد، بنابراین استفاده از اتوماتای سلولی برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده در دهه‌های 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

روی یک سطح پیوسته گسترش می‌یابد، به همین دلیل برای اجرای چنین مدل‌هایی باید به حل مجموعه‌ای از معادلات مشتق جزئی پرداخت. از جمله مهم‌ترین این پژوهش‌ها می‌توان به Ivanilova (۱۹۸۵)، Beer (۱۹۸۹) و Lopes و همکاران (۱۹۹۵) اشاره نمود. مدل معروف ارائه شده توسط Rothermel که در سیستم شبیه‌سازی BEHAVE مورد استفاده قرار گرفته است نیز از جمله مدل‌هایی است که براساس معادلات مشتق جزئی کار می‌کند (Rothermel, 1983; Rothermel, 1972). عمدتاً از این ابزار به منظور محاسبه کمیت‌های فیزیکی در فضاها پیوسته استفاده می‌شود (Sirakoulis *et al.*, 2002). بنابراین با توجه به پیچیدگی محاسبات مشتق جزئی، اکثر مدل‌های گسترش آتش تولیدشده در دهه‌های اخیر بر مبنای صفحات گسسته توسعه یافته‌اند و استفاده از سیستم‌های گسسته شبیه‌سازی مورد توجه قرار گرفته است (Progiás & Ch.Sirakoulis, 2013).

سیستم‌های گسسته و گرید- مینا نیز دارای دو دسته مدل‌های احتمالاتی و قطعی می‌باشند. مدل‌های احتمالاتی به طور معمول با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های حاصل از آتش‌سوزی‌های آزمایشگاهی و واقعی برای یک منطقه خاص، تنظیم شده و متعاقباً تحت همین شرایط استاندارد و متوسط معرفی شده، قادرند شبیه‌سازی مناسبی از جبهه آتش ارائه دهند. مدل ارائه شده توسط Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) نمونه‌ای از همین مدل‌هاست. Gazme و همکاران (۲۰۱۳) چنین مدلی را برای مدل‌سازی جبهه آتش در جنگل‌های استان گلستان اجرا کردند. Chamani و همکاران (۲۰۱۳) نیز ابتدا با استفاده از رابطه احتمالاتی معرفی شده، گسترش جبهه آتش را مدل‌سازی کردند و سپس با استفاده از روش‌های عامل- مینا به مدل‌سازی عامل‌های آتش‌نشان برای مدیریت اطفاء حریق پرداختند. کارایی مدل‌های احتمالاتی به شرایط استاندارد تعریف شده برای هر یک از آنها بستگی دارد، به طوری که با تغییر شرایط نمی‌توان انتظار کارایی زیادی از این دسته از مدل‌ها داشت، بنابراین با استفاده از این دسته مدل‌ها عمدتاً نمی‌توان شرایط پویا و

Cheney (1997). ۲) رویکرد برجاک و هیرن: در این رویکرد دو پارامتر شیب و جهت باد با استفاده از روابط Cheney (۱۹۸۱) بر سرعت گسترش اعمال می‌شود. این در حالی است که پارامتر سرعت باد در این مدل بی‌تأثیر است (Berjak & Hearne, 2002) و ۳) رویکرد پروجیاس و سیراکولیس: در این رویکرد دو پارامتر شیب و سرعت باد با استفاده از روابط Rothermel (۱۹۷۲) و Trunfio (۲۰۰۴) بر سرعت گسترش اعمال می‌شود. این در حالی است که پارامتر جهت باد در این مدل بی‌تأثیر است (Progiass & Ch.Sirakoulis, 2013).

آتش‌سوزی‌ها در طول دهه گذشته در جنگل‌های شمال ایران به‌خصوص مناطق جنگلی استان گیلان رشد فزاینده‌ای داشته است (Sarkargar Ardakani et al., 2009; Jahdi et al., 2013). طبق آمار ارائه شده توسط اداره کل منابع طبیعی استان گیلان تنها در یک دهه گذشته در جنگل‌های این منطقه بیشتر از ۱۰۷ حریق جنگلی رخ داده است که بر اثر وقوع آنها بیشتر از ۳۴۰ هکتار از اراضی جنگلی دچار آتش‌سوزی شده‌اند. بنابراین توجه به محدودیت منابع طبیعی موجود در سطح کشور، اهمیت تلاش برای حفظ این منابع در برابر آتش‌سوزی‌های فزاینده دوچندان می‌شود. به همین دلیل در این پژوهش، سه رویکرد مطرح شده به‌منظور اعمال اثر مشخصه‌های ایستا و پویای مکانی و زمانی و مقایسه و ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده با در نظر گرفتن اهمیت اندازه پیکسل و بازه‌های زمانی شبیه‌سازی آتش‌سوزی، بر روی منطقه مورد مطالعه پیاده‌سازی شد. به‌عبارت دیگر در این پژوهش با انجام آنالیز حساسیت، نقش این پارامترها در دقت سه رویکرد مربوطه جهت تعیین بهینه‌ترین مدل از میان مدل‌های موجود در بهینه‌ترین مقیاس زمانی و مکانی، مورد توجه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، بخش لاکان شهرستان رشت واقع در استان گیلان است. وسعت این شهرستان ۱۴۲۷ کیلومتر مربع

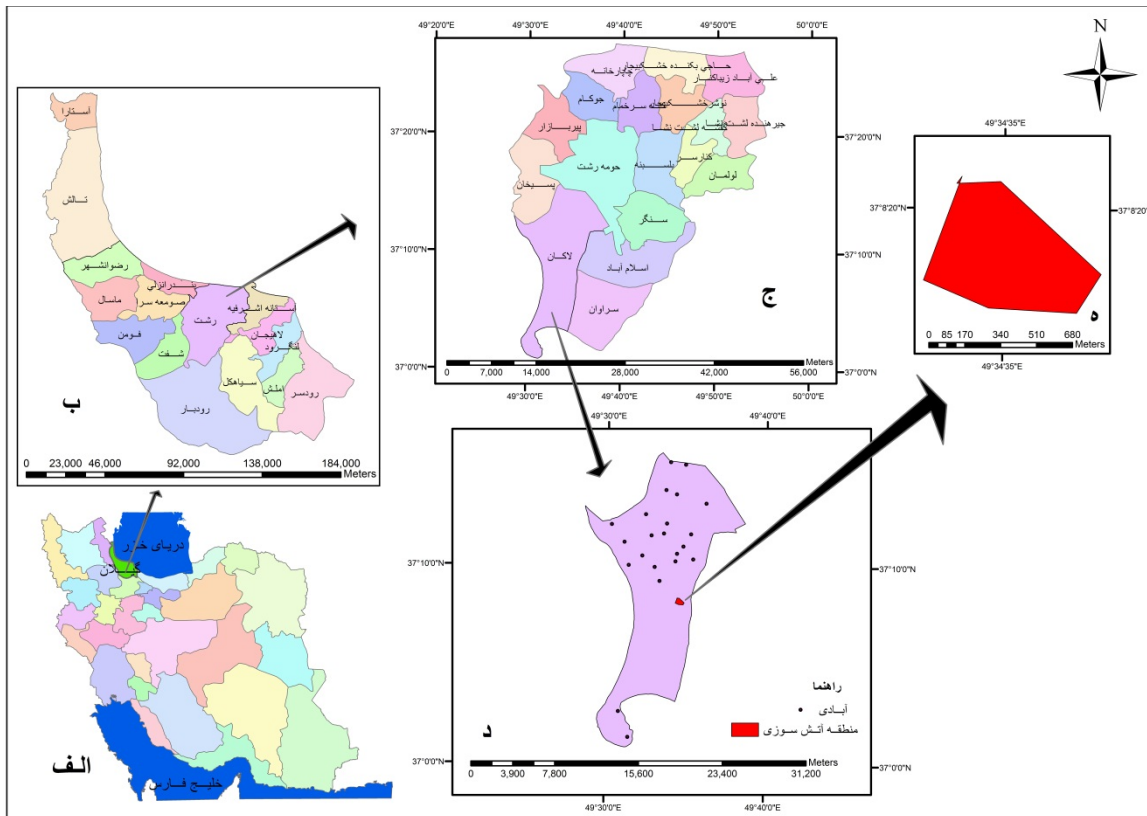
و سلول‌های همسایه در طی زمان تغییر می‌نماید. یک سلول آتش‌گرفته، آتش را به سمت سلول‌های سالم همسایه هدایت می‌کند که این امر می‌تواند برای مدل‌سازی فرآیند گسترش آتش مفید باشد (Sakr et al., 2011).

Karafyllidis و Thanailakis (۱۹۹۷) به‌منظور مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی، یک مدل ریاضی اولیه براساس اتوماتای سلولی ارائه کردند که در آن به‌صورت همزمان کلیه پارامترهای مؤثر بر گسترش آتش‌سوزی از جمله پارامترهای آب و هوایی مانند سرعت و جهت باد، شرایط توپوگرافی و پوشش گیاهی منطقه در نظر گرفته شدند. این مدل طی سال‌های بعدی توسط Berjak و Hearne (۲۰۰۲) و Hernandez Encinas و همکاران (۲۰۰۷) به‌منظور مطابقت بیشتر با واقعیت اصلاح و تکمیل شد. سایر پژوهش‌ها نیز سه عامل محیطی شامل اقلیم، پوشش گیاهی و توپوگرافی را به‌عنوان مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر رفتار آتش در نظر گرفته‌اند (Hernandez Encinas et al., 2007; Alexandridis et al., 2008; Brun et al., 2012).

در حال حاضر یکی از چالش‌های موجود در این مدل را می‌توان نحوه ارتباط آن با مشخصه‌های ایستا و پویای مکانی و زمانی مؤثر بر گسترش آتش‌سوزی از جمله شیب و سرعت و جهت باد دانست. در این راستا روابط ریاضی متعددی در تحقیقاتی همچون Berjak و Hearne (۲۰۰۲)، Hernandez Encinas و همکاران (۲۰۰۷)، Porterie و همکاران (۲۰۰۷)، Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸)، Yassemi و همکاران (۲۰۰۸)، Boboulos و Purvis و Mallet و همکاران (۲۰۰۹) و Progiass و Ch.Sirakoulis (۲۰۱۳) ارائه شده است. در بررسی دقیق این مشخصه‌های پویا می‌توان سه رویکرد را ملاحظه کرد: ۱) رویکرد کارافیلیدیس و تانیلاکیس: در این رویکرد پارامتر شیب به‌صورت مستقیم و به‌عنوان ضریب وارد رابطه می‌شود، این در حالی است که سرعت و جهت باد به‌صورت ضمنی، به‌ترتیب بر میزان ارزش و نحوه چیدمان ضرایب بادی اثرگذار می‌باشد (Karafyllidis & Thanailakis, 2013).

استحفاظی اداره کل منابع طبیعی استان گیلان، این آتش‌سوزی که از ساعت ۱۴:۳۰ اول مرداد آغاز و نهایتاً با تلاش مامورین جنگلبانی در ساعت دو بامداد سوم مرداد خاموش شد، منطقه‌ای با مساحت تقریبی ۸/۵ هکتار از جنگل‌های این ناحیه را دچار حریق نمود (شکل ۱)

است و بخش قابل‌توجهی از مساحت آن را پوشش جنگلی تشکیل داده است. موقعیت دقیق جغرافیایی شهرستان و منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. در مرداد ماه سال ۱۳۹۲ محدوده‌ای از جنگل‌های بخش لاکان شهرستان رشت به مدت ۳۶ ساعت دچار آتش‌سوزی شد. با توجه به گزارش نهایی حریق در جنگل‌ها و مراتع، حوزه



شکل ۱- موقعیت منطقه آتش‌سوزی، (الف) ایران، (ب) استان گیلان، (ج) شهرستان رشت، (د) بخش لاکان، (ه) منطقه آتش‌سوزی شده

می‌توان با استفاده از ویژگی‌های ساختاری از جمله توپولوژی شبکه، تعریف همسایگی، شرایط مرزی شبکه و ویژگی‌های تابعی شامل کلیه متغیرهای توصیف‌کننده وضعیت سلول‌ها، شرایط اولیه شبکه و قوانین انتقال حاکم بر رفتار شبکه معرفی نمود (Lett et al., 1999).

در اتوماتای سلولی و به منظور مدل‌سازی خط محدوده آتش که آن را جبهه آتش می‌نامند، باید احتمال وقوع در پیکسل‌های مختلف محاسبه شود. طبق رابطه ۱، این احتمال

مبانی اتوماتای سلولی در گسترش آتش‌سوزی اتوماتای سلولی از یک شبکه گسسته متشکل از اشکال هندسی همگن و یا ناهمگن ساخته شده است، به طوری که هر یک از این سلول‌ها می‌توانند مقدار منحصر به فردی را به خود اختصاص دهند. این مقادیر براساس قوانین تعریف‌شده در طی دوره‌های زمانی گسسته به صورت تابعی از وضعیت خود سلول و همسایگانش تکامل می‌یابند (Wolfram, 1984). در نگاهی دیگر، اتوماتای سلولی را

گام زمانی مدل‌سازی (T) نیز به‌عنوان پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. با در نظر گرفتن این دو پارامتر، تابع انتقال یک CA دویعدی را می‌توان به صورت رابطه ۲ نوشت:

رابطه ۲

$$S_{i,j}^{t+1} = S_{i,j}^t + S_{(\alpha \in N: 1 to 8)}^t (H, R, W, C, T)$$

بررسی نحوه تأثیر مشخصه‌های پویا در رویکردهای متداول از سال ۱۹۹۷ و همزمان با ارائه اولین مدل گسترش آتش، تا سال ۲۰۱۳ محققان متعددی طی مطالعاتشان رویکردهای گوناگونی را برای اعمال اثر مشخصه‌های ایستا و پویای مکانی و زمانی (شیب و سرعت و جهت باد) در مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی پیشنهاد دادند که از آن جمله می‌توان به Karafyllidis و Thanailakis (۱۹۹۷)، Berjak و Hearne (۲۰۰۲) و Progiاس و Ch.Sirakoulis (۲۰۱۳) اشاره نمود. در این پژوهش سه رویکرد اساسی مطرح‌شده با در نظر گرفتن اثر اندازه پیکسل و از طریق مقایسه جبهه آتش شبیه‌سازی‌شده با واقعیت، با استفاده از ضریب کاپا مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آنها با هم مقایسه شدند. شکل ۳ نحوه اعمال اثر مشخصه‌های پویای مکانی و زمانی در سه مدل فوق را به صورت خلاصه نشان می‌دهد:

بیانگر نسبت مساحت سوخته شده (A_b) به مساحت کل سلول (A_t) است.

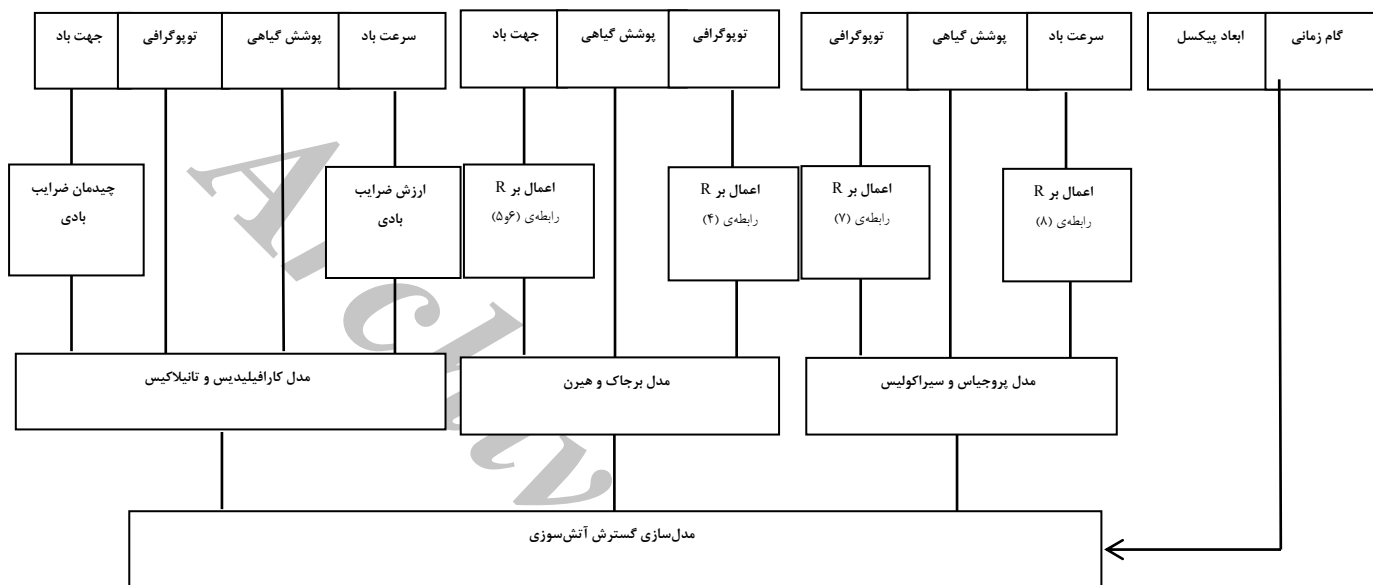
$$S_{i,j}^t = \frac{A_b}{A_t} \quad \text{رابطه ۱}$$

مقدار S برای یک سلول سالم برابر صفر، برای سلول سوخته شده برابر یک و برای سلول‌های در حال حریق مقادیری بین این دو عدد می‌باشد. در تحقیقات مرتبط با توجه به اینکه هشت جهت برای گسترش آتش وجود دارد، معمولاً برای تعریف همسایگی از هشت پیکسل مجاور پیکسل مرکزی استفاده شده است که به همسایگی Moore معروف است (شکل ۲).

$i-1,j-1$	$i-1,j$	$i-1,j+1$
$i,j-1$	i,j	$i,j+1$
$i+1,j-1$	$i+1,j$	$i+1,j+1$

شکل ۲- هشت همسایگی Moore

به این ترتیب، وضعیت هر سلول در لحظه $t+1$ تابعی از وضعیت خود سلول و هشت سلول همسایه آن در لحظه t می‌باشد. ملاک عمل برای محاسبه وضعیت سلول در لحظه $t+1$ ($S_{i,j}^{t+1}$)، وضعیت توپوگرافی (H)، سرعت گسترش آتش برگرفته از پوشش گیاهی منطقه (R) و سرعت و جهت باد (W) است. در این پژوهش، دو پارامتر ابعاد سلول (C) و



شکل ۳- نحوه اعمال اثر مشخصه‌های پویای مکانی و زمانی در سه مدل

با در نظر گرفتن انتشار دایره‌ای آتش از سلول‌های قطری به سلول مرکزی و انتشار خطی آن از سلول‌های مجاور به سلول مرکزی (Hernandez Encinas *et al.*, 2007) به صورت رابطه ۳ بیان کرد:

مدل کارافیلیدیس و تانیلاکیس Karafyllidis و Thanailakis (۱۹۹۷) به منظور مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی، یک مدل ریاضی اولیه براساس اتوماتای سلولی ارائه کردند. با توجه به همسایگی هشت‌تایی Moore برای هر سلول می‌توان مدل مربوطه را

رابطه ۳

$$S_{ij}^{t+1} = \frac{R_{ij}}{R_{\max}} S_{ij}^t + \left(a^t H_{i-1j} \frac{R_{i-1j}}{R_{\max}} S_{i-1j}^t + b^t H_{i+1j} \frac{R_{i-1j}}{R_{\max}} S_{i+1j}^t + c^t H_{i-1j} \frac{R_{i-1j}}{R_{\max}} S_{i-1j}^t + d^t H_{i+1j} \frac{R_{i-1j}}{R_{\max}} S_{i+1j}^t \right) + \left(e^t H_{i-1j-1} \frac{\pi R_{i-1j-1}^2}{4R_{\max}^2} S_{i-1j-1}^t + f^t H_{i-1j+1} \frac{\pi R_{i-1j+1}^2}{4R_{\max}^2} S_{i-1j+1}^t + g^t H_{i-1j-1} \frac{\pi R_{i-1j-1}^2}{4R_{\max}^2} S_{i-1j-1}^t + h^t H_{i-1j+1} \frac{\pi R_{i-1j+1}^2}{4R_{\max}^2} S_{i-1j+1}^t \right)$$

بادی معرفی شده‌اند. ارزش این ضرایب به صورت تابعی از سرعت باد تغییر کرده و نحوه چیدمان آنها در هشت سلول اطراف سلول مرکزی نیز با توجه به جهت وزش باد متغییر است. شکل ۴ نمونه‌ای از اثر سرعت و جهت وزش باد بر روی ضرایب بادی را نشان می‌دهد:

در این رابطه H شیب سلول مرکزی با سلول‌های همسایه را نشان می‌دهد و R معرف سرعت گسترش آتش‌سوزی است که با استفاده از رابطه معرفی شده توسط Rothermel (۱۹۷۲) قابل محاسبه است (Berjak & Hearne, 2002). ضرایب a, b, ..., h تحت عنوان ضرایب

۱.۰۴	۱	۱
۱.۱		۰.۹
۱.۰۴	۱	۱

باد ضعیف از غرب به شرق

۱.۱	۱	۱
۱.۳		۰.۸
۱.۱	۱	۱

باد قوی از غرب به شرق

۱	۰.۸	۱
۱		۱
۱.۱	۱.۳	۱.۱

باد از جنوب به شمال

شکل ۴- نمونه‌هایی از ضرایب بادی

رابطه تجربی ۶ استفاده کرد (Cheney, 1981; Yongzhong et al., 2004; Nofarasti & Tadayyone Tabrizi, 2009) که در این رابطه V جهت باد را نشان می‌دهد.

رابطه ۶

$$tg(\theta_f) = 0/4226V$$

مدل پروجیاس و سیراکولیس

در این روش نیز جبهه آتش با استفاده از رابطه ۳ مدل می‌شود، با این تفاوت که اثر پارامترهای شیب و سرعت باد مستقیماً با استفاده از رابطه‌های ارائه‌شده توسط Rothermel و Trunfio (رابطه‌های ۷ و ۸ و ۹) بر روی سرعت گسترش استخراج شده از جدول مدل سوخت با توجه به نوع پوشش گیاهی منطقه اعمال می‌شود (Rothermel, 1972; Trunfio, 2004; Progiadis & Ch.Sirakoulis, 2013).

رابطه ۷

$$\phi_s = 5.275 \tan \alpha^2$$

رابطه ۸

$$\phi_w = 0.276 P_{WT}$$

رابطه ۹

$$\phi = \phi_w + \phi_s$$

در رابطه ۷، a شیب زمین و در رابطه ۸، P_{WT} سرعت باد را نشان می‌دهد. با توجه به نوع پوشش گیاهی یک R_0 خاص تعیین شده و سپس برای اعمال اثر شیب و باد بر روی R_0 و تعیین مقدار نهایی آن از رابطه ۱۰ استفاده می‌شود:

$$R_{max} = R_0(1 + \phi) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

حال برای محاسبه سرعت گسترش در هر زاویه‌ای از سلول مرکزی می‌توان از رابطه‌های ۱۱ تا ۱۴ استفاده کرد.

رابطه ۱۱

$$V_e = \frac{\phi}{0.296}$$

نکته‌ای که در رابطه ۳ حائز اهمیت است، نحوه محاسبه سرعت گسترش آتش است که با توجه به پارامترهای ورودی متعدد مورد نیاز در رابطه اصلی ارائه‌شده توسط Rothermel به‌سادگی قابل محاسبه در همه مناطق جنگلی نیست، بنابراین به‌منظور تسهیل در امور پژوهشی، انواع پوشش‌های جنگلی توسط Rothermel و Albinی به دسته‌های مشابهی طبقه‌بندی شده و سرعت متوسط گسترش آتش برای هر یک از پوشش‌ها تحت عنوان جدول مدل سوخت به پژوهشگران ارائه شده است (Anderson, 1982).

مدل برجاک و هیرن

در این روش نیز جبهه آتش با استفاده از رابطه ۳ مدل می‌شود، با این تفاوت که اثر پارامترهای شیب و جهت باد مستقیماً بر روی سرعت گسترش استخراج شده از جدول مدل سوخت با توجه به نوع پوشش گیاهی منطقه اعمال می‌شود. اثر شیب با استفاده از رابطه‌ی نمایی ارائه‌شده توسط Cheney (1981) بر روی سرعت گسترش اعمال می‌شود (رابطه ۴).

رابطه ۴

$$R = R_0 \exp(\alpha \theta_s)$$

که در آن α ضریبی معادل ۰/۰۶۹۳ و θ_s شیب موجود میان سلول مرکزی و سلول‌های همسایه می‌باشد. از سوی دیگر با توجه به حجم زیاد اطلاعات موردنیاز در رابطه راترمل، به‌منظور محاسبه R_0 از ۱۳ مدل سوخت معرفی‌شده توسط راترمل و آلبنی با توجه به پوشش گیاهی جنگل استفاده شده است (Anderson, 1982). برای اعمال اثر باد با فرض در نظر گرفتن رابطه‌ای مشابه رابطه ۴، رابطه ۵ مورد استفاده قرار گرفت:

رابطه ۵

$$R = R_0 \exp(\beta \theta_f)$$

در این رابطه، θ_f زاویه قائم شعله آتش و β عدد ثابتی است که از داده‌های تجربی قابل استخراج است (Berjak & Hearne, 2002). برای محاسبه زاویه آتش نیز می‌توان از

رابطه ۱۲

$$l_w = 0.936e^{0.2566v_e} + 0.461e^{-0.1548v_e} - 0.397$$

رابطه ۱۳

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{l_w^2 - 1}{l_w}}$$

رابطه ۱۴

$$R_\theta = R_{\max} \times \frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon \times \cos \theta}$$

در این پژوهش جبهه آتش مورد نظر با استفاده از GPS برداشت شد و لایه منحنی میزان منطقه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ برای تولید اطلاعات توپوگرافی شامل شیب و جهت شیب از اداره کل منابع طبیعی اخذ شد. با توجه به یکدست بودن پوشش گیاهی، نوع پوشش به منظور تعیین سرعت گسترش آتش از طریق بازدید میدانی بررسی شد و سرعت گسترش با توجه به نوع پوشش از جدول مدل سوخت ارائه شده توسط Anderson, Rothermel و Albinی استخراج شد (Anderson, 1982). داده‌های مربوط به سرعت و جهت باد نیز در مدت زمان آتش‌سوزی از شش ایستگاه هواشناسی موجود در استان و از اداره کل هواشناسی استان اخذ شد. پس از آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز، برای اندازه‌گیری میزان صحت موجود میان نتایج مشاهده شده و پیش‌بینی شده از ضریب کاپا (Kappa Statistics) و رابطه ۱۵ استفاده شد:

رابطه ۱۵

$$KS = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)}$$

که در آن، $P(A)$ مجموع تعداد پیکسل‌هایی است که موقعیت آنها در شرایط واقعی و شبیه‌سازی شده یکسان هستند و از رابطه ۱۶ به دست می‌آید. $P(E)$ نیز حاصل ضرب تعداد پیکسل‌هایی است که موقعیت آنها در شرایط واقعی و شبیه‌سازی شده متفاوت است و از رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود.

رابطه ۱۶

$$P(A) = \sum_{i=1}^c P_{ii}$$

رابطه ۱۷

$$P(E) = \sum_{i=1}^c P_{it} \cdot P_{ti}$$

بدیهی است هرچه ضریب کاپا به یک نزدیک‌تر باشد، صحت بیشتری از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

نتایج

بررسی پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که برای مدل‌سازی پدیده‌های پویا با استفاده از اتوماتای سلولی، به‌طور عمده از سلول‌هایی با ابعاد ثابت در شبکه اتوماتای سلولی استفاده شده است، بنابراین در این پژوهش، نقش ابعاد مختلف سلول بر روی دقت مدل‌سازی با سه رویکرد مربوطه بررسی شده است. براساس گزارش اداره کل منابع طبیعی استان گیلان، آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه در طی ۳۶ ساعت حدود ۸/۵ هکتار از اراضی جنگلی را از بین برده است. لذا می‌توان برای هر یک از ابعاد در نظر گرفته شده، برای ضلع سلول‌های تشکیل‌دهنده شبکه (سه تا ۱۵ متر)، با در نظر گرفتن هشت همسایگی Moore، مدت‌زمان لازم برای آتش‌سوزی را تخمین زد. برای مثال چنانچه شبکه با استفاده از سلول‌هایی به ضلع ۱۵ متر پوشش داده شود، آنگاه، سوختن یک مربع ۴۵×۴۵ متری (هشت همسایگی Moore) حدود ۴۵ دقیقه زمان می‌برد. مدت زمان آتش‌سوزی (۳۶ ساعت)، شامل ۴۸ گام ۴۵ دقیقه‌ای است، بنابراین این انتظار می‌رود که مدل مربوطه پس از ۴۸ اجرا، گسترشی معادل واقعیت را مدل‌سازی نماید. این در حالی است که برنامه به دلیل وارد کردن قید در مدل، پس از رسیدن به تعداد سلول‌های سوخته شده در واقعیت، متوقف می‌شود، بنابراین تعداد اجراها (Runs) پس از اجرای برنامه با تعداد استاندارد آن متفاوت است. به عبارت دیگر، در صورت استفاده از سلول‌های ۱۵ متری لزوماً پس از ۴۸ اجرا، تعداد سلول‌های سوخته شده شبیه‌سازی شده با تعداد سلول‌های سوخته شده در واقعیت برابر نخواهد بود و تعداد اجراها می‌تواند کمتر و یا بیشتر از تعداد استاندارد باشد، بنابراین برای برطرف کردن این تمایز پارامتر زمان در گام دوم مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

است (رابطه ۷)، اما به دلیل رویکرد این روش مبنی بر در نظر گرفتن کلیه زوایای پوشش دهنده یک سلول در تعیین سرعت گسترش نهایی (رابطه ۱۴)، تا حد زیادی تأثیرات افزایش ابعاد پیکسل خنثی شده است، بنابراین شاهد یک روند تقریباً یکنواخت در نتایج حاصل از شبیه‌سازی هستیم.

دلیل رفتار افزایشی مدل کارافیلیدیس با افزایش ابعاد پیکسل: در این روش به دلیل در نظر نگرفتن بسیاری از اطلاعات جزئی و شبیه‌سازی گسترش آتش با اطلاعات کلی موجود از منطقه با افزایش ابعاد پیکسل و از بین رفتن بخشی از اطلاعات جزئی موجود، دقت شبیه‌سازی کلی کاهش نمی‌یابد. از سوی دیگر به دلیل کاهش تعداد اجراها خطای تجمعی شبیه‌سازی کاهش یافته و دقت افزایش می‌یابد.

نقطه عطف تفاوت میان نتایج این سه الگوریتم در نحوه اعمال اثر مشخصه‌های ایستا و پویای مکانی و زمانی (شیب و سرعت و جهت باد) بر سرعت گسترش آتش می‌باشد. در الگوریتم کارافیلیدیس اثر پارامترهای سرعت و جهت باد و شیب بر سرعت گسترش در نظر گرفته نمی‌شود و از سرعت گسترش خام استخراج شده از جدول مدل سوخت استفاده می‌شود. این در حالی است که در مدل پروجیاس دو پارامتر سرعت باد و شیب و در مدل برجاک هر سه پارامتر شیب و سرعت و جهت باد بر سرعت گسترش اعمال می‌شوند، بنابراین این دو مدل نسبت به مدل کارافیلیدیس دقت بیشتری را نشان می‌دهند.

نتایج به دست آمده از کالیبراسیون گام زمانی همان‌طور که پیش از این اشاره شد به دلیل وارد کردن قید در مدل، تعداد اجراها پس از اجرای برنامه با تعداد استاندارد آن متفاوت است، بنابراین برای برطرف کردن این تمایز پارامتر زمان با استفاده از روش سعی و خطا کالیبره شد که نتایج به دست آمده از آن در جدول ۲ ارائه شده است.

این پارامتر در نتایج پیشین با در نظر گرفتن انتشار آتش با سرعت ثابت محاسبه شده است، حال آنکه در واقعیت سرعت انتشار ثابت نیست و به ازای هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان به زمان کالیبره شده مربوط به آن دست یافت. به این ترتیب به منظور مطالعه اثر این پارامتر در سه مدل معرفی شده به کالیبره نمودن آن با استفاده از روش سعی و خطا پرداخته شد.

تحلیل نتایج به دست آمده از اثر ابعاد پیکسل

در این پژوهش و در اولین گام، با در نظر گرفتن سرعت ثابت برای انتشار آتش در زمان، دقت مدل‌سازی سه مدل معرفی شده برای پنج نوع پیکسل با ابعاد گوناگون محاسبه شده است. نتایج به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است: همان‌طور که از نتایج مندرج در جدول ۱ برمی‌آید با توجه به ضرایب کاپای به دست آمده، سه الگوریتم مربوطه سه رفتار متفاوت (افزایشی، کاهش‌ی و یکنواخت) را نشان می‌دهند. رفتار هر یک از این مدل‌ها را می‌توان به شرح زیر توجیه نمود:

دلیل رفتار کاهش‌ی مدل برجاک با افزایش ابعاد پیکسل: در معادلات مربوط به این الگوریتم، تنها عامل وابسته به اندازه پیکسل، رابطه ۴ است که در آن اثر پارامتر شیب بر روی سرعت گسترش اعمال می‌شود، بنابراین می‌توان ادعا کرد که با افزایش ابعاد پیکسل، بخشی از اطلاعات توپوگرافی منطقه (شیب میان سلول‌ها) از میان رفته است. از این رو دقت اطلاعات توپوگرافی و پیرو آن دقت محاسبه θ_s (زاویه‌ی شیب میان سلول‌ها) کاهش یافته و فاصله آن با واقعیت افزایش می‌یابد. به این ترتیب شاهد کاهش دقت شبیه‌سازی این الگوریتم با افزایش اندازه پیکسل هستیم.

دلیل رفتار یکنواخت مدل پروجیاس با افزایش ابعاد پیکسل: در معادلات مربوط به این الگوریتم مانند روش برجاک تنها عامل وابسته به اندازه پیکسل، پارامتر شیب

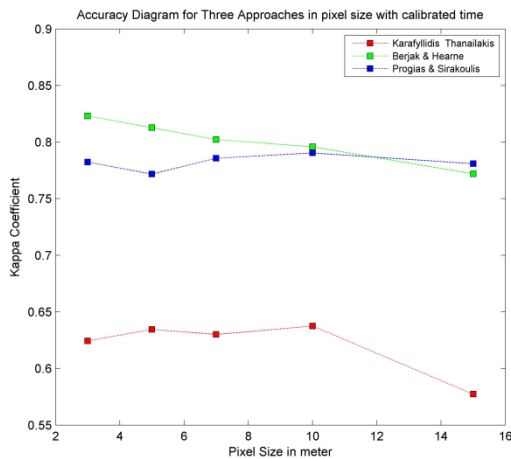
جدول ۱- ضریب کاپای حاصل از سه مدل با در نظر گرفتن پنج نوع اندازه پیکسل و زمان استخراج شده از اطلاعات آتش سوزی

ابعاد سلول	۱۵ متر (۴۵ دقیقه)			۱۰ متر (۳۰ دقیقه)			۷ متر (۲۰ دقیقه)			۵ متر (۱۵ دقیقه)			۳ متر (۱۰ دقیقه)		
	تعداد اجراها در واقعیت	تعداد اجراها در برنامه	ضریب کاپا	تعداد اجراها در واقعیت	تعداد اجراها در برنامه	ضریب کاپا	تعداد اجراها در واقعیت	تعداد اجراها در برنامه	ضریب کاپا	تعداد اجراها در واقعیت	تعداد اجراها در برنامه	ضریب کاپا	تعداد اجراها در واقعیت	تعداد اجراها در برنامه	ضریب کاپا
کارافیلیدیس	۴۸	۴۸	۰/۷۱۲۵	۷۲	۳۸	۰/۷۰۶۰	۱۰۸	۱۰۸	۰/۶۴۹۸	۱۴۴	۱۴۴	۰/۶۵۳۰	۲۷۰	۲۴۰	۰/۶۲۴۴
برجاک	۴۸	۱۵	۰/۷۴۲۷	۷۲	۲۲	۰/۷۷۹۱	۱۰۸	۲۹	۰/۷۹۳۶	۱۴۴	۳۹	۰/۸۰۷۶	۲۷۰	۶۱	۰/۸۲۳۱
پروجیاس	۴۸	۱۱	۰/۷۸۰۹	۷۲	۱۷	۰/۷۷۵۹	۱۰۸	۲۳	۰/۷۸۵۷	۱۴۴	۳۲	۰/۷۷۱۷	۲۷۰	۵۲	۰/۷۸۲۴

جدول ۲- ضریب کاپای به دست آمده از سه مدل با در نظر گرفتن پنج نوع اندازه پیکسل و زمان کالیبره شده برای هر الگوریتم

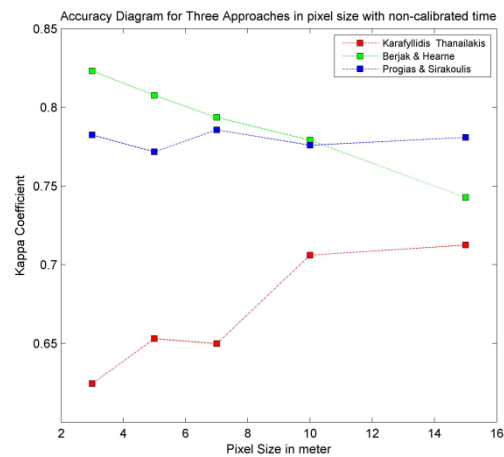
ابعاد سلول	۱۵ متر (۴۵ دقیقه)			۱۰ متر (۳۰ دقیقه)			۷ متر (۲۰ دقیقه)			۵ متر (۱۵ دقیقه)			۳ متر (۱۰ دقیقه)			
	زمان کالیبره شده	تعداد اجرا در واقعیت	تعداد اجرا در برنامه	ضریب کاپا	زمان کالیبره شده	تعداد اجرا در واقعیت	تعداد اجرا در برنامه	ضریب کاپا	زمان کالیبره شده	تعداد اجرا در واقعیت	تعداد اجرا در برنامه	ضریب کاپا	زمان کالیبره شده	تعداد اجرا در واقعیت	تعداد اجرا در برنامه	ضریب کاپا
کارافیلیدیس	۲۲	۹۸	۹۴	۰/۵۷۷	۲۲	۹۸	۹۸	۰/۶۳۷	۱۸	۱۱۷	۱۱۷	۰/۶۳	۱۴	۱۵۴	۱۵۴	۰/۶۳۴
برجاک	۱۴۵	۱۴	۱۴	۰/۷۷۱	۱۰۵	۲۰	۲۰	۰/۷۹۵	۸۰	۲۷	۲۷	۰/۸۰۲	۶۷	۳۷	۳۷	۰/۸۱۲
پروجیاس	۱۸۴	۱۱	۱۱	۰/۷۸۰	۱۲۸	۱۶	۱۶	۰/۷۹	۹۰	۲۳	۲۳	۰/۷۸۵	۶۵	۳۳	۳۳	۰/۷۷۱

افزایش خطای نهایی در مقایسه با حالت غیرکالیبره می‌شود. این درحالی است که نتایج در دو روش دیگر با کالیبره کردن زمان، روند مطلوب‌تری را نشان می‌دهد. شکل‌های ۵ و ۶ نمودار ضرایب کاپای به‌دست‌آمده در دو روش را برای هر سه مدل مربوطه نشان می‌دهند.



شکل ۶- رفتار سه مدل با در نظر گرفتن پنج نوع اندازه پیکسل و زمان کالیبره شده

همان‌طور که از نتایج برمی‌آید، در روش کارافیلیدیس به‌دلیل ضعف روش در شبیه‌سازی گسترش آتش، برای رسیدن به وضعیت مطلوب در بهینه‌ترین زمان به تعداد اجراهای بیشتری نیاز است که پیرو آن به‌دلیل رابطه مستقیم میان میزان خطا و تعداد اجراها، منجر به کاهش دقت و



شکل ۵- رفتار سه مدل با در نظر گرفتن پنج نوع اندازه پیکسل و زمان استخراج شده از اطلاعات آتش‌سوزی

کارافیلیدیس برای اعمال اثر گونه‌های گیاهی مختلف، شیب و سرعت و جهت باد از مجموعه‌ای از فاکتورهای وزنی-تجربی استفاده شده است، انتظار می‌رود با توسعه محدوده شبیه‌سازی، دقت روش مربوطه کاهش یابد (Progas & Ch.Sirakoulis, 2013). به این ترتیب با کاهش ابعاد پیکسل و افزایش اطلاعات جزئی موردنیاز در مدل‌سازی، دقت روش کارافیلیدیس کاهش می‌یابد. این درحالی است که با کاهش ابعاد پیکسل و در دست داشتن اطلاعات جزئی و دقیق‌تر از یک منطقه می‌توان دقت شبیه‌سازی دو روش برجاک و پروجیاس را افزایش داد. دلیل این امر قابلیت دو مدل برجاک و پروجیاس در اثر دادن پارامترهای مؤثری همچون شیب، جهت شیب و سرعت و جهت باد در مدل‌سازی گسترش جبهه آتش است، اما با این وجود در یک نگاه کلی دقت روش برجاک از پروجیاس بیشتر است که علت آن را می‌توان در پارامترهای مؤثر موجود در هر

بحث

در این پژوهش ابتدا سه مدل کارافیلیدیس، برجاک و پروجیاس در منطقه مورد مطالعه اجرا شد و رفتار آنها با انجام آنالیز حساسیت مربوط به پارامترهای اندازه پیکسل و گام‌های زمانی تغییر وضعیت در اتوماتای سلولی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که بدون در نظر گرفتن فرآیند کالیبراسیون، دقت مدل‌سازی روش کارافیلیدیس از دو روش برجاک و پروجیاس کمتر است که با نتایج تحقیقات پیشین نیز مطابقت دارد. به‌طوری‌که پیش از این در پژوهش‌هایی همچون Berjak و Hearne (۲۰۰۲)، Hernandez Encinas و همکاران (۲۰۰۷)، Yassemi و همکاران (۲۰۰۸) و Ch.Sirakoulis و Progas (۲۰۱۳) به نقاط ضعف روش کارافیلیدیس و کارایی ضعیف آن در مدل‌سازی جبهه آتش اشاره شده است. به‌عبارت دیگر، با توجه به اینکه در روش

- models for estimating fire behavior. General Technical Report INT-122.
- Artes, T., Cencerrado, A., Cortes, A. and Margalef, T., 2013. Relieving the effects of uncertainty in forest fire spread prediction by hybrid MPI-OpenMP parallel strategies. International Conference on Computational science, Procedia Computer Science, 18: 2278-2287.
 - Beer, T., 1989. The Australian national bushfire model. Proceedings of 8th Biennial Conference and Bushfire Dynamics Workshop, Canberra, Australia, pp. 568-572.
 - Berjak, S. and Hearne, J., 2002. An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savana system. Ecological Modelling, 148: 133-151.
 - Boboulos, M. and Purvis, M.I.R., 2009. Wind and slope effects on ROS during the fire propagation in East-Mediterranean pine forest litter. Fire Safety Journal, 44: 764-769.
 - Brun, C., Artes, T., Margalef, T. and Cortes, A., 2012. Coupling wind dynamics into a DDDAS forest fire propagation prediction system. Procedia Computer Science, 9: 1110-1118.
 - Chamani Takladani, B., Sadi Mesgari, M. and Yaghoubkhani Ghiasvand, M., 2013. Agent based modeling for forest fire spreading. Third Conference of Environment Programming and Management (In Persian).
 - Cheney, N.P., 1981. Fire behavior. A.M. Gill, G.H. Groves and I.R. Noble, Editors, Fire and the Australian Biota, Australian Academy of Science, Canberra, 157-175.
 - Denham, M., Wendt, K., Bianchini, G., Cortés, A. and Margalef, T., 2012. Dynamic Data-Driven Genetic Algorithm for forest fire spread prediction. Journal of Computational Science, 3: 398-404.
 - Eskandari, S., Oladi Ghadikolaei, J. and Jalilvand, H., 2013. Efficiency evaluation of Dong model for determination of fire risk potential in Zarrin Abad Forests. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 21(3): 439-451 (In Persian).
 - Gazme, H., Chehreghan, A., Ale-Sheikh, A. and Karimi, M., 2013. Modeling forest fire front spreading using Cellular Automata, Spatial information system and Particle swarm optimization. Journal of Surveying Engineering and Spatial Information, 3: 71-85 (In Persian).
 - Hernandez Encinas, A., Hernandez Encinas, L., Hoya White, S., Martin del Rey, A. and Rodriguez Sanchez, G., 2007. Simulation of

یک از این دو مدل جستجو نمود. در مدل برجاک هر دو پارامتر جهت باد و شیب که نقش مهمی در تعیین دقیق جهت گسترش جبهه آتش دارند، همزمان در مدل اعمال شده و اثر آنها در نظر گرفته می‌شود. این درحالی است که در مدل پروجیاس تنها عامل شیب وارد مدل می‌شود که همین مسأله بر دقت تعیین جهت گسترش اثرگذار بوده و در نتیجه منجر به کاهش دقت می‌شود. از سوی دیگر با کالیبره کردن گام زمانی شبیه‌سازی برای هر یک از سه الگوریتم به روش سعی و خطا، شاهد افزایش تعداد اجراها در الگوریتم کارافیلیدیس و در مقابل کاهش آنها در دو الگوریتم دیگر بودیم که پیرو آن به دلیل افزایش خطای تجمعی در هر اجرا، این کالیبراسیون منجر به کاهش دقت روش کارافیلیدیس و افزایش دقت برجاک و پروجیاس می‌شود.

در مجموع با توجه به روندهای مشاهده شده در شبیه‌سازی سه الگوریتم به نظر می‌رسد می‌توان برای شبیه‌سازی گسترش آتش در مناطق جنگلی استان گیلان از روش برجاک با پیکسل‌هایی با ابعاد سه تا هفت متر استفاده کرد و با دقت میانگین ۸۰ درصد به شبیه‌سازی جبهه آتش در این منطقه پرداخت. با این وجود به نظر می‌رسد در صورت عدم وجود اطلاعات کافی در ابعاد مورد نظر، استفاده از روش پروجیاس به دلیل ثبات نتایج به دست آمده از آن در برابر تغییر ابعاد سلول‌های تشکیل‌دهنده شبکه اتوماتای سلولی، بهینه‌تر و قابل اطمینان‌تر است. به نظر می‌رسد می‌توان با تغییر پنجره در حین مدل‌سازی و بکارگیری روش‌های بهینه‌سازی در تعیین ضرایب ثابت موجود در هر یک از مدل‌ها، دقت به دست آمده از مدل‌سازی را بهبود بخشید که این مسأله می‌تواند به‌عنوان موضوعی مستقل در پژوهش‌های بعدی مورد توجه قرار گیرد.

References

- 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.
- Anderson, H., 1982. Aids to determining fuel

- 173-179.
- Rothermel, R.C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Technical Report, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, Utah 84401, Research Paper INT-115.
 - Rothermel, R.C., 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires, A publication of the National Wildfire Coordinating Group.
 - Sakr, G.E., Elhajj, I.H. and Mitri, G., 2011. Efficient forest fire occurrence prediction for developing countries using two weather parameters. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24: 888-894.
 - Sarkar, C. and Abbasi, S.A., 2006. Cellular automata-based forecasting of the impact of accidental fire and toxic dispersion in process industries. *Journal of Hazardous Materials*, A137: 8-30 (In Persian).
 - Sarkargar Ardakani, A., Valadane Zoj, M.J. and Mansourian, A., 2009. The spatial analysis of fire across the country using RS and GIS. *Journal of Ecology*, 52: 25-43 (In Persian).
 - Sirakoulis, Ch., Karafyllidis, I. and Thanailakis, A., 2002. A cellular automaton methodology for the simulation of integrated circuit fabrication processes. *Future Generation Computer Systems*, 18: 639-657.
 - Trunfio, G.A., 2004. Predicting Wildfire Spreading Through a Hexagonal Cellular Automata Model. in: *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Berlin, Heidelberg, 3305: 385-394.
 - Wolfram, S., 1984. Universality and complexity in cellular automata. *Physica*, 10D: 1-35.
 - Yassemi, S., Dragicevic, S. and Schmidt, M., 2008. Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behaviour. *Ecological Modeling*, 210: 71-84.
 - Yongzhong, Z., Feng, Z.D., Tao, H., Liyu, W., Kegong, L. and Xin, D., 2004. Simulating wildfire spreading processes in spatially heterogeneous landscapes using an improved cellular automaton model. *IGARSS'04, Proceedings of the 2004 IEEE International*, 3371-3374.
 - Yu, N., Li, M. and Ruan, X., 2005. Applications of cellular automata in complex system study. *International Journal of Information and Systems Sciences*, 1(3-4): 302-310.
 - forest fire fronts using cellular automata. *Advances in Engineering Software*, 38: 372-378.
 - Innocenti, E., Silvani, X., Muzy, A. and Hill, D., 2009. A software framework for fine grain parallelization of cellular models with OpenMP. *Application to Fire Spread*, 24: 819-831.
 - Ivanilova, T.N., 1985. Set Probability identification in forest fire simulation. *Proceedings of the 2nd international symposium on systems analysis and simulation*, Pergamon, Berlin, 2: 185-188.
 - Jahdi, R., Darvishsefat, A. and Etemad, V., 2013. Predicting forest fire spread using fire behavior model (Case study: Malekroud Forest-Siahkal). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 5(4): 419-430 (In Persian).
 - Karafyllidis, I. and Thanailakis, A., 1997. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modeling*, 99: 87-97.
 - Lett, C., Silber, C. and Barret, N., 1999. Comparison of a cellular automata network and an individual-based model for the simulation of forest dynamics. *Ecological Modeling*, 121: 277-293.
 - Lopes, A.M.G., Sousa, A.C.M. and Viegas, D.X., 1995. Numerical simulation of turbulent flow and fire propagation in complex topography. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 27: 229-253.
 - Mallet, V., Keyes, D.E. and Fendell, F.E., 2009. Modeling wildland fire propagation with level set methods. *Computers and Mathematics with Applications*, 57: 1089-1101.
 - Nofarasti, S. and Tadayone Tabrizi, Gh., 2009. Application of cellular automata for simulation of fire spread. *National conference of software engineering*, 319-327 (In Persian).
 - Pastor, E., Zarate, L., Planas, E. and Arnaldos, J., 2003. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29: 139-153.
 - Porterie, B., Zekri, N., Clerc, J. and Loraud, J., 2007. Modeling forest fire spread and spotting process with small world networks. *Combustion and Flame*, 149: 63-78.
 - Progiar, P. and Sirakoulis, G., 2013. An FPGA processor for modeling wildfire spreading. *Mathematical and Computer Modeling*, 57: 1436-1452.
 - Quartieri, J., Mastorakia, N., Iannone, G. and Guarnaccia, C., 2011. A Cellular Automata Model for Fire Spreading Prediction. *Latest Trends on Urban Planning and Transportation*,

Evaluation performances of different forest fire spread models using cellular automata (case study: The forests of Lakan district in Rasht)

T. Ghaemi Rad¹ and M. Karimi^{2*}

1- M.Sc. Student of GIS Engineering, Department of GIS Engineering, Faculty of Geomatics Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2*- Corresponding author, Assistant Prof., Department of GIS Engineering, Faculty of Geomatics Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: mkarimi@kntu.ac.ir

Received: 06.29.2014

Accepted: 11.30.2014

Abstract

Accurate prediction of forest fire spread is crucial in minimizing its destructive effects. Forest fire depends on various factors e.g. topography, vegetation and climate. One of the challenges in modeling forest fire concerns the way it interacts with static and dynamic spatiotemporal trajectories affecting its spread such as slope, wind speed and wind direction. In this study, three previously developed approaches Karafyllidis, Berjak and Progius for modeling those parameters were analyzed, followed by investigating the effects of pixel size and time steps in a cellular automata. The study was conducted in the Lakan forest district in the vicinity of Rasht in Guilan province. The available topographic, vegetation, wind speed and wind direction data were initially analyzed in GIS. Then the three modeling approaches were implemented, followed by a consequent sensitivity analysis on the pixel size and time steps of switching in cellular automata, The effectiveness of the approaches was compared by means of Kappa coefficient. The results indicate that the Berjak method with a 3-7 m pixel size is more appropriate for modeling the spread of fire across the study site.

Keywords: Forest fire, pixel size, cellular automata, time steps, dynamic spatiotemporal parameters.