محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران، دوره۷۳، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹
صفحات ۱۲۹ تا ۱۴۱

مدل‌سازی وقوع و گسترش جبهه‌ی آتش‌سوزی با استفاده از روش اتوماتای سلولی (مطالعه موردی: منطقه حفاظت شده ارسباران)

مریم ملکی[۱]؛ لیلا ملکانی[۲*] و خلیل ولیزاده کامران[۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه سنجش از دور و GIS ، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی دانشگاه تبریز

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی مرند دانشگاه تبریز

۳- دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت۹۸/۰۵/۱۹-تاریخ انتشار۹۸/۰۹/۰۴)

چکیده:

آتش‌سوزی، سالانه خسارت قابل ملاحظه‌ای را به عرصه‌های طبیعی وارد می‌سازد. اتوماتای سلولی ابزاری است برای مدلسازی و شبیه‌سازی فرایندهایی که در جهان واقعی رخ می‌دهند. با علم به نحوه‌ی گسترش آتش‌سوزی و تهیه نقشه ریسک آتش‌سوزی، از این نقشه‌ها می‌توان برای جلوگیری و پیشگیری از آتش‌سوزی و خسارات ناشی از آن استفاده کرد. در این تحقیق ابتدا پهنه‌بندی ریسک آتش‌سوزی در جنگل‌های ارسباران با استفاده از عوامل محیطی چون شیب، جهت شیب، پوشش گیاهی و جهت باد غالب و بهره‌گیری از مدل Fire risk مشخص شده، سپس از مدل اتوماتای سلولی در غالب روش الکساندریدیس برای شبیه‌سازی نحوه‌ی گسترش جبهه‌ی آتش استفاده گردید. به دلیل وقوع آتش‌سوزی‌های زیاد ثبت شده در جنگل‌های ارسباران و غنای سرشار فلور و فون در آن، مستلزم حفاظت بیشتر مخصوصا از نظر آتش‌سوزی است.

بررسی نتایج مدل Fire risk نشان داد که ۵۶/۳۶ درصد از منطقه دارای پتانسیل زیاد و خیلی زیاد برای وقوع آتش‌سوزی می‌باشد و جهت شیب و مقدار آن بیشترین تاثیر را در وقوع و گسترش جبهه‌ی آتش دارند. همچنین میزان همبستگی نقشه نهایی پتانسیل وقوع آتش‌سوزی با خطوط ارتباطی بیش از ۰/۷۳ می‌باشد که نشان می‌دهد عامل انسانی سهم بسزایی در ایجاد حریق داشته است. نتایج بدست آمده از مدل اتوماتای سلولی نیز نشان دادند که استفاده از این مدل همراه با GIS، علاوه بر سرعت بخشیدن به شبیه‌سازی گسترش جبهه آتش و قابلیت نمایشی پویا از آن، از دقت بالایی (۰/۸۸) نیز برخوردار است.

کلید واژگان: آتش‌سوزی، GIS، منطقه حفاظت شده ارسباران، اتوماتای سلولی

*نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۴۱۴۲۲۶۰۰۰۳ ایمیل: lmalekani@tabrizu.ac.ir

۱. مقدمه

یکی از پدیده‌هایی که معمولاً در اکثر نقاط جهان اتفاق می‌افتد پدیده‌ی آتش‌سوزی است. خسارت‌های مالی و جانی ناشی از این حادثه غیر مترقبه بسیار زیاد و گاها جبران‌ناپذیر می‌باشد. آتش‌سوزی می‌تواند ناشی از عوامل طبیعی و یا انسانی باشد. کشور ما ایران به دلیل قرار گرفتن در کمربند خشک کره زمین و ناحیه‌ی پرفشار جنب حاره‌ای، شرایط جوی لازم جهت وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع را دارا می‌باشد. بر اساس آمار منتشر شده از سوی جنگل‌ها و مراتع سالانه ۱۵هزار مورد آتش‌سوزی در ایران رخ می‌دهد، به‌طوری که هر سال شش صدم درصد از جنگل‌های کشور بر اثر این پدیده از بین می‌رود (Ardakani *et al.*, 2009). آتش‌سوزی با خسارات جبران‌ناپذیری که به جنگل‌ها وارد می‌کند سبب تغییر در اکولوژی منطقه شده (Adab *et al.*, 2013; Vakalis *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2005) و همواره این بوم‌سازگان حیاتی را مورد تهدید قرار می‌دهد (Marozas *et al.*, 2007). نقشه نواحی دارای خطر آتش‌سوزی جنگل می‌تواند راهنمای مفیدی برای مدیریت آتش‌سوزی‌های عرصه‌های طبیعی و همینطور استراتژی پیش‌گیری بسیار مهمی به شمار رود. چنین نقشه‌هایی به ماموران اداره منابع طبیعی کمک خواهد کرد که از احتمال خطر آتش‌سوزی در عرصه‌های طبیعی آگاهی یابند و یا در زمان آتش‌سوزی عمل شایسته و مناسب انجام دهند. به علت غنای سرشار فلور و فون، وجود گونه‌های گیاهی و جانوری کمیاب منطقه‌ی ارسباران، به عنوان منطقه حفاظت شده و از سوی سازمان جهانی یونسکو به عنوان یکی از ذخیره‌گاه‌های زیست‌کره جهان انتخاب شده است (Hejazi *et al.*, 2009). بنابراین لزوم توجه و حفاظت هرچه بیشتر از این منطقه امری بدیهی و غیرقابل انکار است. با این وجود بر اساس آمار در دسترس این جنگل‌ها همه ساله به دلیل آتش‌سوزی، آسیب زیادی می‌بیند و مساحت وسیعی از آن‌ها در زمان کوتاهی نابود می‌گردد. با تکیه بر دلایل مذکور و دلایل فراوان دیگر، توسعه و ایجاد نقشه‌های به موقع، دقیق و مستند از نواحی آتش‌گرفته و آسیب‌دیده و هم‌چنین ایجاد نقشه‌های مناطق آسیب‌پذیر و با احتمال آتش‌سوزی بالا و مدل‌های شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی به عنوان سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری به مدیران جنگل برای انتخاب بهترین روش اطفاء و جلوگیری از پیشروی آتش به دلیل کمبود وقت و لزوم تصمیم گیری سریع، ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین شبیه‌سازی گسترش آتش در جنگل‌ها با مدلی مناسب و کارآمد با توجه به شرایط توپوگرافی، پوشش گیاهی و اقلیمی لازم است.

GIS با ابزار و توانمندی‌هایش می‌تواند فرایند حل مسئله را تسهیل بخشد. برای پیش‌بینی رفتار و گسترش جبهه آتش مدل‌های عددی بسیاری ارائه شده که با GIS ادغام می‌شوند. یکی از مدل‌های ریاضیاتی جهت مدل نمودن رشد جبهه آتش، اتوماتای سلولی است که شامل مدل‌های گرید مبناست. ثابت شده است که اتوماتای سلولی قادر است رابطه بین عوامل پویا و پیچیده‌ی یک فضای ماکروسکوپیک را از طریق مجموعه‌ای از قوانین ساده که قادرند فیزیک مدل را در سطح میکروسکوپیک توصیف نمایند، پیش‌بینی کند. این ویژگی در کنار این واقعیت که می‌توان به سادگی اتوماتای سلولی را با داده‌های رقومی حاصل از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سایر منابع اقدام نمود، آن را به یک روش مناسب برای مدل‌سازی رفتار پیچیده‌ی گسترش آتش تبدیل نموده است (Alexandridis *et al.*, 2008).

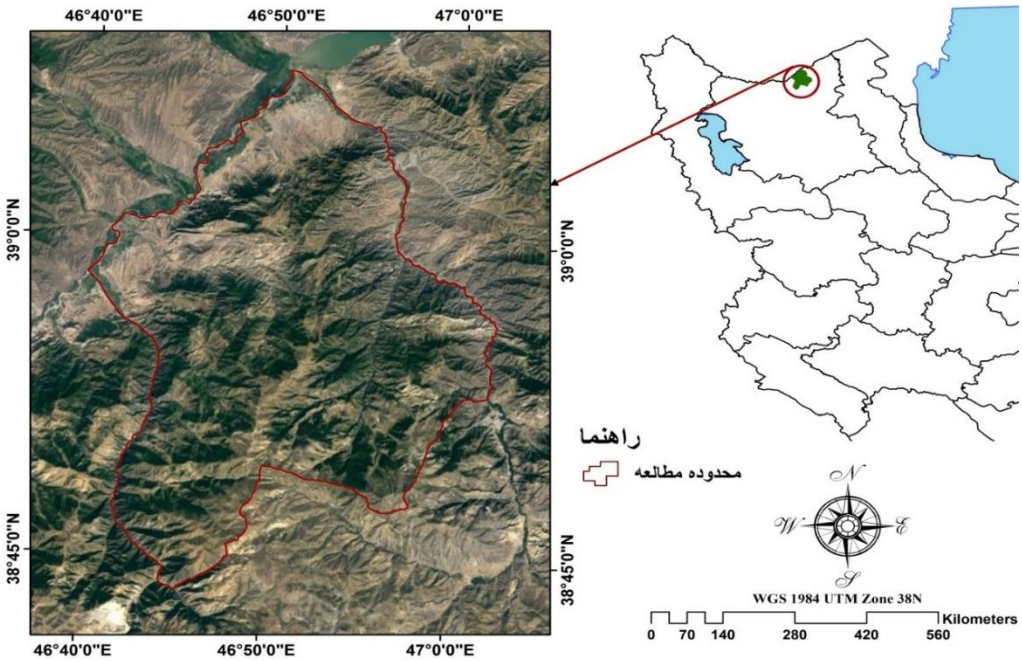
چند نمونه از مطالعات صورت گرفته داخلی و خارجی جهت شبیه‌سازی گسترش آتش اشاره می‌گردد. GhaemiRad و Karimi از مدل CA جهت شبیه-سازی گسترش آتش بخشی از جنگل‌های استان گیلان استفاده نمودند. Eskandari و Oladi نیز مدل CA را جهت شبیه‌سازی گسترش آتش در جنگل‌های نکا-ظالمرود بکار بردند. نتایج هر دو تحقیق با مقایسه محدوده‌ی آتش سوزی واقعی رخ داده نشان داد که روش اتوماتای سلولی روش مناسبی جهت مدلسازی گسترش آتش سوزی است. (Ghaemi Rad & Karimi, 2015، Eskandari and Oladi, 2017). Encinas و همکاران، Alexandridis و همکاران، Rui و همکاران با به کارگیری اتوماتای سلولی دوبعدی گسترش آتش‌سوزی را شبیه‌سازی نمودند. مقایسه‌ی بین شبیه‌سازی و نتایج واقعی نشان داد که مدل پیشنهادی، پیش‌بینی را به شیوه‌ای کاملا مناسب با ویژگی‌های مکانی و زمانی از آتش‌سوزی واقعی، ارائه می‌دهد (Encinas *et al.*, 2007; Alexandridis *et al.*, 2008; Rui *et al.*, 2018).

در نتیجه تحقیق پیش‌رو تلاش شده است ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و فنون سنجش از دور، مناطق دارای پتانسیل بالای آتش‌سوزی در منطقه را با توجه به عوامل محیطی نمایش دهد و سپس با در نظر گرفتن پارامترهای متعددی که از طریق مرور تحقیقات پیشین و نظرات کارشناسان اتخاذ شده است، مدل-سازی گسترش جبهه‌ی آتش‌سوزی جنگل‌های ارسباران را با روش اتوماتای سلولی، هرچه بیش‌تر به واقعیت نزدیک نماید.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه حفاظت شده ارسباران در جنوب رودخانه مرزی ارس و در شمال شهرستان اهر و غرب کلیبر در استان آذربایجان شرقی قرار گرفته است. این منطقه محدوده-ای به وسعت ۸۱۰۷۲/۸۵ هکتار که دارای طول جغرافیایی ۳۸ درجه و ۷۲ دقیقه تا ۳۹ دقیقه و ۱۳ شرقی، و عرض جغرافیایی ۴۶ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۴ دقیقه شمالی می‌باشد.



شکل ۱- محدوده منطقه مورد مطالعه

به دلیل غنای سرشار فلور و فون، وجود گونه‌های گیاهی و جانوری کمیاب، در سال ۱۳۵۵ از سوی سازمان جهانی یونسکو، به عنوان ذخیره‌گاه زیست‌کره نامگذاری شد و یکی از مناطق زیستکره بیوسفر نه گانه ایران است (Hejazi *et al.*, 2009). در طی سال‌های اخیر این منطقه به دلیل وضعیت خاص اقلیمی و کاربری اراضی و همچنین افزایش دخالت‌های انسانی دچار بیش‌ترین دست‌خوش تغییرات شده است. با توجه به تعداد زیاد آتش‌سوزی‌های رخ داده، نواحی جنگلی این منطقه جهت مشخص کردن بخش‌های با پتانسیل آتش‌سوزی بالا و همچنین اتخاذ برنامه‌ریزی‌های صحیح مدیریتی در راستای حفظ گونه‌های گیاهی و جانوری انتخاب شد.

۲-۲. روش تحقیق

این تحقیق با هدف پیش‌بینی و پیش‌گیری آتش-سوزی‌های آینده با استفاده از مدل‌سازی خطر وقوع و گسترش آتش‌سوزی در منطقه حفاظت شده ارسباران انجام گرفته است. بدین منظور پس از جمع‌آوری داده-ها و اطلاعات مورد نیاز، تصاویر ماهواره‌ای مربوطه تهیه شده و عملیات آماده‌سازی تصویر در محیط نرم‌افزار ENVI شامل پیش پردازش، و ایجاد لایه‌های مورد نظر جهت انجام تحلیل‌های مختلف آماده گردید. سپس تحلیل‌های لازم بر روی لایه DEM منطقه‌ی مورد مطالعه اجرا و نتایج حاصل به محیط نرم‌افزار ArcGIS منتقل شدند. پس از آن تحلیل‌های مختص به انجام مدل (فایرریسک و الکساندریدیس) جهت تشخیص وقوع و گسترش آتش‌سوزی در منطقه اجرا شد. در مرحله‌ی بعد نیز برای مدل‌سازی گسترش جبهه‌ی آتش به روش اتوماتای سلولی، فاکتورهای مربوطه به محیط نرم‌افزار MATLAB منتقل گشته و مدل‌سازی شدند. بر اساس مطالعات و بررسی‌های انجام شده در این تحقیق جهت تعیین مناطق مستعد آتش‌سوزی و مدل‌سازی جبهه‌ی گسترش آتش‌سوزی داده‌های زیر استفاده شد.

- ❖ داده‌های هواشناسی ایستگاه هواشناسی کلیبر شامل جهت و سرعت باد (اداره هواشناسی استان آذربایجان‌شرقی)
- ❖ لایه رقومی ارتفاع (DEM 30m) (مستخرج از تصاویر سنجنده ASTER از وب‌سایت سازمان فضایی آمریکا)
- ❖ تصاویر ماهواره‌ای Landsat ۸ سنجنده‌ی OLI، ردیف ۳۳ گذر ۱۶۸ مربوط به ۲۷ جولای ۲۰۱۵ (از وب‌سایت سازمان فضایی آمریکا)
- ❖ لایه‌ی پوشش گیاهی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ (از سازمان حفاظت محیط زیست استان آذربایجان‌شرقی)
- ❖ نقاط آتش‌سوزی سنوات گذشته (از سازمان حفاظت محیط زیست استان آذربایجان‌شرقی)

۲-۲-۱. مدل FIRE RISK

جهت ارزیابی خطر آتش‌سوزی، از روش فایرریسک استفاده می‌شود. این روش عوامل محیطی شیب، جهت شیب و پوشش گیاهی را برای تعیین مناطق مستعد آتش‌سوزی استفاده می‌کند. شایان ذکر است که میزان خطر آتش‌سوزی به صورت مقادیر عددی ما بین ۰ و ۱ بیان می‌شود، به صورتی که عدد ۱ بیانگر بالاترین میزان خطر می‌باشد. با توجه به اینکه جهت باد غالب به صورت شمال‌غرب به جنوب‌شرق می‌باشد و با در نظر گرفتن هر یک از این سه فاکتور، فرمول نهایی خطر آتش‌سوزی به صورت زیر قابل بیان می‌باشد.

(۱)

$$\text{Fire Risk} = \frac{\left(\frac{slope}{90}\right)+\left(1-\frac{abs(315-aspect)}{315}\right)+\left(\frac{NDVI+1}{2}\right)}{3}$$

با توجه به شرایط جنگل‌های ایران و سرشت آتش-سوزی در این جنگل‌ها که غالبا از نوع سطحی می‌باشد، مدل‌های نیمه‌تجربی الکساندریدیس و اتوماتای سلولی می‌توانند بهترین گزینه‌ها برای مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران باشند. دلیل مناسب بودن آن‌ها، قابلیت تعمیم و سازگاریشان 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. از این رو در این مطالعه از تلفیق مدل نیمه تجربی الکساندریدیس و اتوماتای سلولی استفاده شده است.

۲-۲-۲. تفسیر مدل نیمه تجربی الکساندریدیس

در این روش پارامترهای مورد استفاده شامل انواع پوشش گیاهی، تراکم پوشش گیاهی، سرعت باد و جهت آن، ارتفاع زمین و جهت شیب می‌باشد. برای هر سلول احتمال سوخته شدن توسط رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Alexandridis *et al.*, 2008).

$$P_{burn} = P_h(1 + P_{veg})(1 + P_{den})P_wP_s \quad (۲)$$

که در این رابطه P_{burn} احتمال سوخته شدن یک سلول، P_h نشان‌دهنده‌ی یک ضریب تجربی است و بیانگر احتمال گسترش آتش‌سوزی به یکی از سلول-های همسایه می‌باشد. این ضریب تحت شرایط نبود باد، توپوگرافی، نوع و پوشش گیاهی یکسان محاسبه می‌گردد. P_{veg} نوع پوشش گیاهی، P_{den} تراکم پوشش گیاهی، P_w اثر سرعت و جهت باد، P_s اثر توپوگرافی بر گسترش آتش‌سوزی می‌باشد.

۲-۲-۳. تعیین گسترش جبهه آتش‌سوزی با روش اتوماتای سلولی

CA به راحتی می‌تواند با داده‌های مکانی و غیرمکانی GIS ترکیب شود. ادغام اتوماتای سلولی با مدل نیمه تجربی الکساندریدیس این امکان را فراهم می‌کند تا گسترش آتش‌سوزی را بتوان لحظه به لحظه مورد بررسی قرار داد. در حقیقت CA یک مدل ریاضی است که بر اساس ارتباط محلی و بر قوانینی ساده استوار است. محلی بودن به این معناست که در تعیین مقدار جدید هر سلول، سلول‌هایی که در همسایگی وی هستند تاثیرگذار هستند و سلول‌های دورتر، تاثیری ندارند. همسایگی یکی از مهمترین پارامترهای موثر در اتوماتای سلولی می‌باشد. غالبا دو همسایگی رایج مور و ون نیومن به ترتیب با تعریف ۸ و ۴ سلول همسایگی در شبکه مربعی جهت شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که نتایج حاصل از همسایگی ون نیومن به دلیل کاهش اثر سلولهای همسایگی ضعیف بوده و نتایج حاصل از همسایگی مور بسیار دقیق‌تر است (GhaemiRad and Karimi, 2017). در این تحقیق نیز با استفاده از مدل همسایگی مور، مدل‌سازی گسترش جبهه‌ی آتش‌سوزی جنگل انجام گردید. برای پیش‌بینی روند گسترش آتش‌سوزی چندین حالت در نظر گرفته شده است.

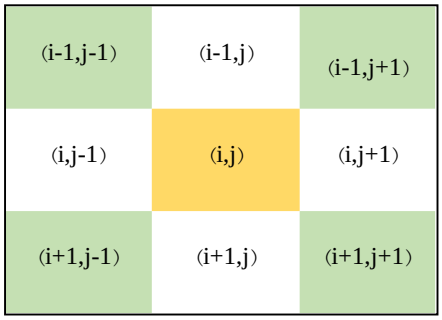
i حالت اول: سلول حاوی مواد سوختی نیست. در این حالت سلول در هیچ گام زمانی نمی‌تواند بسوزد.

ii حالت دوم: سلول حاوی مواد سوختی می‌باشد ولی هنوز نسوخته است.

iii حالت سوم: سلول در حال سوختن است.

iv حالت چهارم: سلول کاملا سوخته است.

این حالت‌های در نظر گرفته شده برای تمامی سلول‌ها ممکن است رخ دهد. از این رو برای اعمال قوانین به سلول‌های همسایه‌ی سلول مرکزی، از قوانین محلی اتوماتای سلولی استفاده می‌گردد. با توجه به شکل ۲ قوانین محلی شامل قوانین زیر می‌باشد.



شکل ۲- سلول مرکزی و همسایگی آن

i. اگر حالت سلول (i,j) در زمان t برابر ۱ باشد حالت سلول در گام زمانی t+1 نیز ۱ خواهد بود. این قانون بیانگر این مساله می‌باشد که اگر یک سلول حاوی مواد سوختی نباشد، در هیچ مرحله‌ای نخواهد سوخت و همواره دارای مقدار ثابت ۱ می‌باشد.

ii. اگر حالت سلول (i,j) در زمان t برابر ۳ باشد، حالت سلول در گام زمانی t+1 ، ۴ خواهد بود. این قانون بیان می‌کند، اگر سلول حاوی مواد سوختی در این مرحله در حال سوختن است، در مرحله‌ی بعد کامل می‌سوزد و سلول سوخته محسوب می‌شود و کد ۴ را اختیار می‌کند.

iii. اگر حالت سلول (i,j) در زمان t برابر ۴ باشد، حالت سلول در گام زمانی t+1، نیز ۴ خواهد بود. این قانون بیان می‌دارد، اگر سلول وضعیت سوخته داشته باشد، یعنی در مراحل قبل سوخته باشد، به دلیل نداشتن مواد سوختی جدید، همان سلول سوخته باقی می‌ماند.

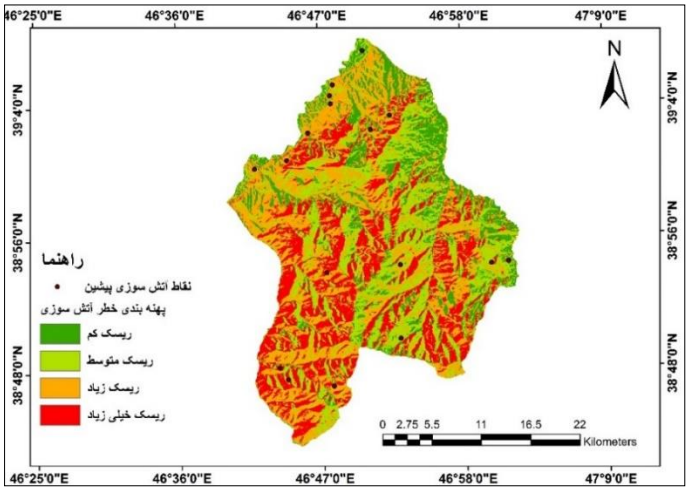
iv. اگر حالت سلول (i,j) در زمان t برابر ۳ باشد، حالت سلول‌های $(i \pm 1, j \pm 1)$ در زمان t+1 برابر با ۳ خواهد بود با احتمال P burn. این قانون انتقال، مهم‌ترین قانون انتقال محلی می‌باشد. در واقع شالوده اصلی قوانین انتقال محلی اتوماتای سلولی می‌باشد که اصل گسترش را تعیین می‌کند. بر پایه این قانون، اگر یک سلول در حالت سوختن باشد (در مرحله‌ی t)، آن‌گاه بر اساس همسایگی مور، ۸ سلول همسایه نیز در معرض احتراق می‌باشند. اینکه کدام سلول همسایه در مرحله‌ی بعد دچار احتراق می‌شود، بر اساس رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌گردد. تمامی مراحل گفته شده توسط اتوماتای سلولی، به طور هم‌زمان انجام می‌شود. به این صورت که در هر لحظه از زمان‌بندی اتوماتای سلولی، سلول‌های در حال سوختن بررسی شده و اثر آن بر ۸ سلول همسایه، مطابق با قوانین انتقال محلی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر سلول بر اساس قانون شماره ۴ عددی بین ۰ تا ۱ اتخاذ خواهد نمود که حالت سلول را در مرحله‌ی بعد نشان می‌دهد. در همین زمان نیز نمایشی پویا از جبهه‌ی آتش‌سوزی قابل نمایش می‌باشد. بررسی کل فضای اتوماتای سلولی در بازه‌های زمانی آن، نمایش پویای گسترش آتش‌سوزی را بر اساس عوامل تاثیر گذار بر آن نشان می‌دهد. بعد از اعمال فرمول Fire Risk و پهنه‌بندی منطقه از نظر پتانسیل ریسک آتش‌سوزی، مناطق دارای ریسک بالای وقوع آتش‌سوزی مشخص شدند. در مرحله‌ی بعد با استفاده از فرمول الکساندریدیس و تلفیق آن با روش اتوماتای سلولی، جبهه‌ی گسترش آتش‌سوزی در محیط MATLAB مدل‌سازی شد.

۳. نتایج

۳-۱. بررسی عوامل محیطی

پس از اجرای مدل Fire Risk با استفاده از عوامل محیطی شیب، جهت شیب و شاخص پوشش گیاهی منطقه و استانداردسازی هرکدام از آن‌ها، نقشه نهایی

ریسک آتش‌سوزی به دست آمد. این نقشه وضعیت منطقه را از لحاظ پتانسیل وقوع آتش سوزی نشان می‌دهد (شکل ۳). در تهیه نقشه ریسک از تصاویر ماه جولای استفاده شده است. در این ماه میزان پوشش گیاهی در بالاترین حد و خشک‌ترین حالت خود می‌باشد که امکان آتش‌سوزی بیشتری دارد. طبقه-بندی و مساحت‌های هرکدام از پهنه‌های خطر آتش-سوزی در جدول ۱ آورده شده است. بر اساس جدول ۱، بیش‌تر از ۵۶ درصد منطقه در وضعیت ریسک زیاد و خیلی زیاد برای آتش‌سوزی قرار دارد. که این امر نشان‌دهنده‌ی حساسیت منطقه به آتش‌سوزی می‌باشد و مستلزم حفاظت و مراقبت هرچه بیش‌تر است. جهت مقایسه‌ی میزان اثر هرکدام از پارامترهای طبیعی، میزان هم‌بستگی آن‌ها با نقشه نهایی فایرریسک محاسبه شد و ارتباط میان آن‌ها به صورت کمی بررسی شد. میزان هم‌بستگی عوامل در جدول ۲ نشان داده شده است. مطابق جدول ۲ مشخص است که جهت شیب با مقدار ۵۳ درصد، بالاترین میزان هم-بستگی را با نقشه نهایی دارد. این بدان معنی است که موثرترین پارامتر طبیعی در منطقه حفاظت شده ارسباران که بیش‌ترین تاثیر را در افزایش پتانسیل آتش‌سوزی دارد جهت شیب است و پس از آن به ترتیب شیب و پوشش گیاهی در مرتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. جهت شیب که نمایانگر میزان دریافت تابش خورشید و گرما در یک محدوده است با تنوع گیاهی و خشک بودن گیاهان و در حقیقت ماده سوختی در ارتباط است. مناطقی که بالاترین میزان دریافت خورشید را دارند برای وقوع حریق مستعدتر هستند. همچنین آتش شیب‌های رو به بالا را سریعتر از شیب-های رو به پایین طی می‌کند بنابراین مقدار یا درصد شیب تاثیر مستقیم در میزان و نحوه گسترش آتش در مناطق جنگلی دارد (Salehi and Zarei, 2016). با توجه به اطلاعات در دسترس مربوط به آمار آتش‌سوزی سال‌های قبل، نقاط آتش‌سوزی که قبلا مبدا شروع آتش‌سوزی بوده، مطابق شکل۳ در منطقه مشخص شده است. طبق نتایج به دست آمده از مدل Fire Risk، نقاط آتش‌سوزی قبلی در نواحی با ریسک بالا رخ داده‌اند بطوریکه از مجموع ۱۸ نقطه آتش‌سوزی رخ داده در منطقه مورد مطالعه تعداد ۱۳ نقطه آتش‌سوزی معادل ۷۲ درصد در پهنه‌های با پتانسیل زیاد و خیلی زیاد رخ داده است و این نشان می‌دهد که نقشه حاصل از مدل Fire Risk دارای دقت قابل قبولی می‌باشد.



شکل ۳- نقشه نهایی ریسک آتش‌سوزی با مدل فایر ریسک

جدول ۱- طبقات پتانسیل ریسک آتش‌سوزی و مساحت مربوط به هرکدام

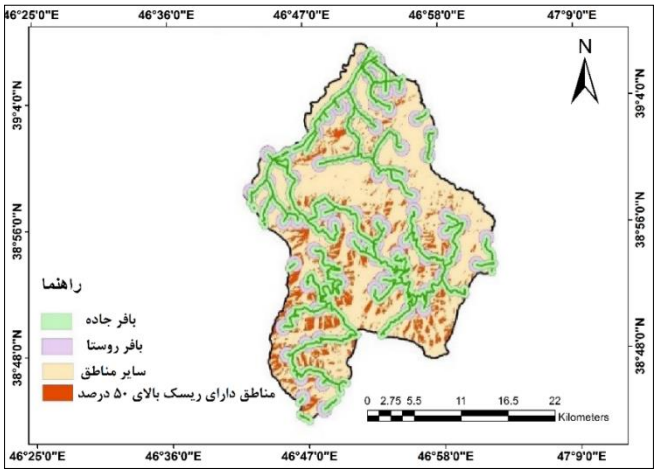
طبقات پتانسیل ریسک آتش‌سوزی	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)
پتانسیل کم	۱۳۴۷۴/۳۲	۱۶/۶۳
پتانسیل متوسط	۲۱۸۵۸/۶۳	۲۶/۹۸
پتانسیل زیاد	۲۵۲۶۵/۸۹	۳۱/۱۹
پتانسیل خیلی زیاد	۲۰۳۹۲/۴۷	۲۵/۱۷

جدول ۲- مقایسه‌ی کمی اثر پارامترهای طبیعی با نقشه نهایی فایرریسک

پارامترهای طبیعی	شیب	جهت شیب	شاخص پوشش گیاهی
میزان همبستگی	۰/۴۱	۰/۵۳	۰/۳۹

۳-۲. بررسی عوامل اقتصادی – اجتماعی

با توجه به رشد جمعیت در دهه‌های اخیر، تهاجم به عرصه‌های جنگلی به منظور امرار معاش، تامین سوخت و کشاورزی بخصوص توسط ساکنین آبادی‌های اطراف افزایش یافته است. نقش گردشگران در ایجاد حریق نیز در این زمینه غیرقابل انکار است. بدین منظور دو عامل جهت بررسی عوامل اقتصادی- اجتماعی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. تاثیر عوامل انسانی مجاورت با جاده و مناطق مسکونی، از طریق انجام تحلیل‌های لازم در محیط ArcMAP، و ایجاد بافر ۱ کیلومتری برای روستاها و بافر ۵۰۰ متری برای جاده محاسبه شد و با روی هم گذاری لایه‌ها نشان داده شده است (شکل ۴). مطابق شکل ۴ متوجه می‌شویم که حضور جاده‌ها و روستاها در مناطق دارای ریسک بالا، بسیار اثرگذار در امر وقوع آتش‌سوزی است و رابطه معنی‌داری را ایجاد کرده است. جهت بررسی کمی ارتباط بین عوامل انسانی و پتانسیل وقوع آتش‌سوزی، میزان هم‌بستگی آن‌ها با نقشه پهنه‌بندی منطقه از نظر وقوع ریسک به دست آمد. جدول ۳ گویای این رابطه و هم‌بستگی بین آن‌ها است. جهت بررسی کمی ارتباط بین عوامل انسانی و پتانسیل وقوع آتش‌سوزی، میزان هم‌بستگی آن‌ها با نقشه پهنه‌بندی منطقه از نظر وقوع ریسک به دست آمد. جدول ۳ گویای این رابطه و هم-بستگی بین آن‌ها است.

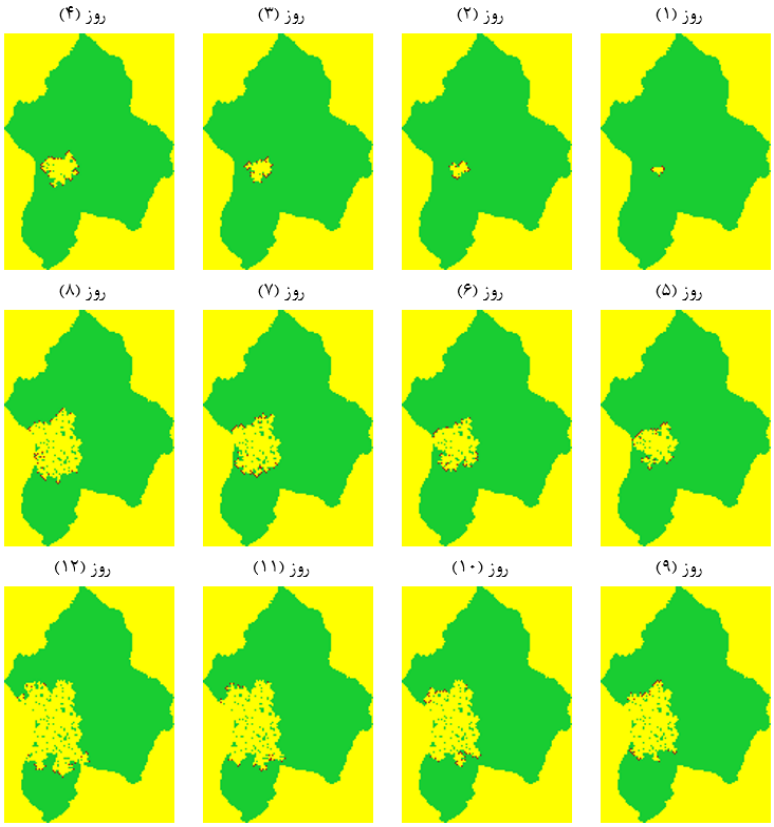


شکل۴- نقشه بافر ایجاد شده برای روستا و جاده

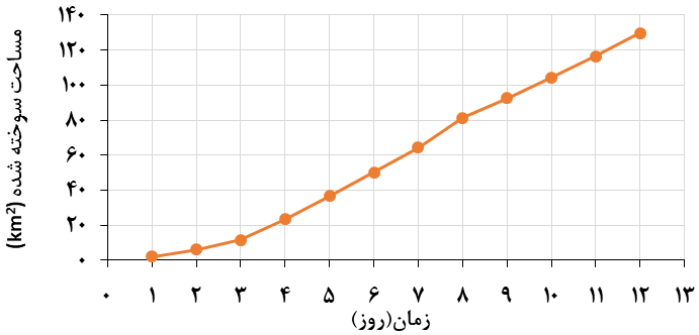
جدول ۳- مقایسه‌ی کمی اثر پارامترهای انسانی با نقشه نهایی فایرریسک

پارامترهای انسانی	مجاورت با مناطق مسکونی	مجاورت با جاده
میزان همبستگی	۰/۵۷	۰/۷۳

طبق نتایج مندرج در جدول ۳، عامل مجاورت با جاده، بالاترین هم‌بستگی را با مقدار ۷۳ درصد نشان داده است. و پس از آن عامل مجاورت با مناطق مسکونی، با مقدار ۵۳ درصد در رتبه‌ی بعدی قرار گرفته است. به طور کلی از مقایسه‌ی میزان هم‌بستگی عوامل طبیعی و عوامل انسانی استنباط می‌شود که میزان تاثیر پارامترهای انسانی هم‌چون نزدیکی با جاده و مناطق مسکونی از پارامترهای طبیعی در منطقه‌ی مورد مطالعه بیش‌تر است و می‌توان گفت که عامل نزدیکی با جاده بیش‌ترین سهم را در ایجاد وقوع آتش‌سوزی در منطقه دارد. لذا این مسئله نیازمند اندیشیدن تدابیر مناسب برای حفاظت هرچه بیش‌تر منطقه است. در ادامه با به کارگیری مدل الکساندریدیس که یک مدل نیمه تجربی است پارامترهای بیشتری نسبت به مدل Fire Risk در نظر گرفته شده است. سپس در MATLAB بر مبنای روش اتوماتای سلولی، تمام پارامترها کدنویسی شد. نتیجه حاصل شده به صورت تصاویری است که گسترش آتش را به صورت سلول به سلول مدل‌سازی می‌کند. درواقع روند انتشار آتش را در موقعیت‌ها و روزهای مختلف نشان می‌دهد. به ترتیب مدل‌سازی صورت گرفته برای نقاط مختلف، طی شکل‌های زیر به حضور نمایش داده می‌شود. لازم به توضیح است که در این تحقیق، شدت انتشار آتش به صورت مساحت سوخته شده محاسبه شده است. شکل ۵ مدل گسترش آتش‌سوزی برای یکی از نقاط آتش‌سوزی را با روند ۱۲ روزه نشان می‌دهد.جهت تحلیل مساحت سوخته شده در محل آتش‌سوزی، مساحت‌های آن‌ها در نرم‌افزار Excel با هم مقایسه و نتایج زیر حاصل شد (شکل ۶).



شکل ۵- روند گسترش آتش‌سوزی در ۱۲ روز



شکل ۶- مساحت سوخته شده در ۱۲ روز اول آتش‌سوزی

از نمودار شکل ۶ پیداست، اگر فرض کنیم آتش‌سوزی تا ۱۲ روز ادامه داشته باشد، مساحتی سوخته شده در روزهای مختلف، باهم متفاوت هستند. این عامل بستگی به پارامترهای محیطی و شرایط منطقه دارد. مبنای گسترش جبهه‌ی آتش در روش اتوماتای سلولی، فراهم بودن شرایط آتش‌سوزی برای تک تک سلول‌ها است. این بدان معنی است، تا زمانی که سلول‌های همسایه‌ی جبهه‌ی آتش، شرایط سوختن را داشته باشند، سیستم سلول را زنده فرض کرده و جبهه‌ی آتش را به سلول مجاور نیز انتقال می‌دهد تا جایی که سلول را به حالت مرده برساند. شرایط مناسب برای سوختن شامل: شیب زیاد، جهت شیب مناسب (به سمت باد غالب)، داشتن پوشش گیاهی که نقش سوخت را ایفا می‌کند و همین‌طور میزان سرعت و جهت باد غالب است. با استفاده از تحلیل‌های مربوط در محیط Arc MAP، میانگین مقدار عددی پتانسیل ریسک برای محدوده‌ی اطراف نقاط آتش‌سوزی پیشین به دست آمد. سپس به همین ترتیب میانگین مقدار عددی برای پارامترهای شیب، جهت شیب و پوشش گیاهی نیز استخراج شد. پس از استاندارد سازی مقادیر به دست آمده، به منظور یافتن رابطه‌ی موجود بین عوامل ذکر شده و میزان ریسک آتش‌سوزی، میزان همبستگی میان آن‌ها در محیط EXCEL محاسبه شد. جدول ۴ میانگین مقدار عددی پارامترها را بعد از استاندارد سازی بر حسب درصد نشان می‌دهد.

جدول ۴- میانگین مقدار عددی استخراج شده پارامترهای موثر در محدوده‌ی آتش‌سوزی

پتانسیل ریسک آتش‌سوزی	پوشش گیاهی	جهت شیب	شیب	نقاط آتش‌سوزی
۴۹/۲۳	۷۱/۶	۹۲/۷۵	۲۸/۵۳	۱

جدول۴، بیان‌گر تاثیر بسزای عوامل جهت شیب، پوشش گیاهی و شیب منطقه در سرعت گسترش جبهه‌ی آتش‌سوزی است. به منظور مقایسه‌ی میزان تاثیر هر کدام از پارامترهای طبیعی بررسی شده در آتش‌سوزی، رابطه‌ی همبستگی بین آنها نیز محاسبه شد.

جدول۵ مقدار همبستگی عوامل ذکر شده با پتانسیل ریسک آتش‌سوزی در محدوده‌ی نقاط آتش‌سوزی قبلی را نشان می‌دهد. مطابق با اعداد به دست آمده برای همبستگی پارامترهای طبیعی، جهت شیب با مقدار ۹۹ درصد بالاترین همبستگی با پتانسیل ریسک آتش‌سوزی را دارد. این بدان معنی است که از بین پارامترهای ذکر شده، جهت شیب تاثیر بیش‌تری در وقوع و انتشار جبهه‌ی آتش‌سوزی دارد.

جدول ۵- مقدار همبستگی پارامترهای طبیعی در آتش‌سوزی با پتانسیل ریسک در محدوده‌ی نقاط

پارامترهای طبیعی	شیب	جهت شیب	پوشش گیاهی
مقدار همبستگی	۰/۶۵	۰/۹۹	۰/۵۵

۳-۳. دقت نتایج

از آتش‌سوزی‌ها مکرر رخ داده در منطقه‌ی حفاظت شده ارسباران تنها اطلاعات یک مورد آتش‌سوزی از اداره منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی کسب گردید. این اطلاعات نشان می‌دهد که آتش‌سوزی در مدت یک هفته، مقدار ۵۷/۲۱ هکتار از جنگل‌های منطقه را از بین برده است و در صورت مهار نشدن مساحت سوخته شده به مراتب بیشتر از این مساحت سوخته شده می‌بود. مقدار شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل اتوماتای سلولی نیز در بازه‌ی مشابه به میزان ۶۴/۲۷ هکتار بوده است که تقریبا نزدیک به مقدار واقعی رخ داده می‌باشد. لازم به ذکر است که مطابق نتایج شبیه‌سازی در صورت مهار نشدن آتش، آتش-سوزی بمدت ۶۹ روز طول می‌کشید و میزان ۵۲۶/۵ هکتار از اراضی جنگلی طعمه حریق می‌شد. نزدیک بودن مقدار شبیه‌سازی شده به مقدار واقعی نشان از بالا بودن دقت مدل اتوماتای سلولی در شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی دارد.

جدول ۶- بررسی دقت نتایج بدست آمده

مقدار شبیه سازی مساحت سوخته شده (هکتار)	مقدار واقعی مساحت سوخته شده (هکتار)	زمان سوختن (روز)	ضریب کاپا	دقت کلی
۶۴/۲۷	۵۷/۲۱	۷ روز	۰/۸۶۷۵	۰/۸۸۴۳

۴. بحث و نتیجه‌گیری

آتش‌سوزی گسترده در جنگل‌ها از مصادیق بحران‌های طبیعی است و مقابله با آن مدیریت بحران به شمار می‌رود. تفاوت آتش‌سوزی جنگل با بلایای طبیعی نظیر سیل و زمین‌لرزه در این است که از یک سو زمان و مکان حدودی وقوع آن تقریباً قابل تخمین است و از سوی دیگر به تدریج رخ می‌دهد و لذا امکان کاهش خسارات و تلفات ناشی از آن در حین وقوع وجود دارد. دو بررسی در این تحقیق صورت گرفته است: تعیین نقشه‌های پتانسیل وقوع آتش‌سوزی و شبیه‌سازی جبهه آتش برای تعیین نقاط مستعد برای آتش‌سوزی از مدل Fire Risk استفاده شد. از ۱۸ نقطه آتش‌سوزی رخ داده در منطقه ارسباران تعداد ۱۳ نقطه آتش‌سوزی معادل ۷۲ درصد در پهنه‌های با پتانسیل زیاد و خیلی زیاد رخ داده است و این نشان می‌دهد که نقشه حاصل از مدل Fire Risk دارای دقت قابل قبولی است. این مقدار مشابه و بهتر از نتایجی است که محققان دیگر با مدل فایرریسک بدست آوردند (Ajin *et al.*, 2016 و Eugenio *et al.*, 2016).

با انجام تحلیل‌های لازم در محیط ArcMAP، و ایجاد بافر ۱ کیلومتری برای روستاها و بافر ۵۰۰ متری برای جاده مشخص گردید که عوامل انسانی سهم بسزایی در ایجاد آتش‌سوزی داشته بطوریکه میزان همبستگی نقشه نهایی پتانسیل وقوع آتش سوزی با خطوط ارتباطی بیش از ۰/۷۳ می‌باشد. در

اغلب تحقیقات دیگری که در جنگل‌های ایران انجام شده نیز عامل انسانی اصلی‌ترین عامل در شناسایی محل وقوع آتش سوزی‌ها بیان شده است (Ebrahimi *et al.*, 2018، Mohammadi *et al.*, 2011، Aalizadeh *et al.*, 2011).

برای مدل‌سازی گسترش جبهه آتش‌سوزی جنگل از مدل اتوماتای سلولی و روش الکساندریس بهره برده شده است. این روش در عین سادگی، دارای قدرت بالایی در اعمال قوانین همسایگی بر سلول‌های همسایه است و مطابق با آنچه Eskandari و Oladi در سال ۲۰۱۷ در مقایسه نتایج انواع مختلف مدل‌ها عنوان کردند شکل جبهه گسترش آتش‌سوزی در مدل اتومای سلولی شباهت زیادی به محدوده‌ی آتش‌سوزی واقعی دارد و این امکان را فراهم می‌آورد که گسترش آتش‌سوزی را در هر زمان بررسی نمود.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی جبهه گسترش آتش‌سوزی مشاهده می‌شود که عامل جهت شیب برای محدوده نقاط آتش‌سوزی رخ داده قبلی و در نظر گرفته شده، بیش‌ترین میزان همبستگی و در نتیجه بالاترین تاثیر را از میان عوامل دیگر دارد. پس از آن عامل شیب، با مقدار ۶۵ درصد، هم‌بستگی بیشتری را نشان می‌دهد و عامل پوشش گیاهی در مرتبه‌ی بعدی قرار می‌گیرد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی نیز نشان داد که این مدل با دقت کلی ۸۸ درصد و ضریب کاپای ۸۶ درصد دارای دقت بالایی برای شبیه‌سازی آتش‌سوزی در منطقه می‌باشد از طرفی نزدیک بودن مقدار واقعی مساحت سوخته شده در آتش‌سوزی‌های پیشین با مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل اتوماتای سلولی بیانگر این ادعا می‌باشد. در تحقیق مشابهی Eskandari و Oladi در سال ۲۰۱۷ گسترش آتش در جنگل‌های بخش سه نکا-ظالمرود را با استفاده از مدل اتومای سلولی شبیه‌سازی نمود و نتایجی مشابه این تحقیق داشته است. دقت کلی و شاخص کاپای آن بترتیب ۰/۸۸ و ۰/۷۴ بدست آمد که نشان دهنده دقت مدل CA است.

References

Aalizadeh, L., Karinian, R., Ejlali, F., 2011. Investigating the main causes of Deforestation in forests of Lorestan Province and suggested solutions. Natural hazards. National Congress on Central Zagros Forests, Capabilities and bottlenecks, Lorestan, Iran. (In Persian).

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, 65(3), 1723-1743.

Ajin, R.S., Loghin, A.M., Vinod, P.G., Jacob, M.K., 2016. Forest fire risk zone mapping using RS and GIS techniques: a study in Achankovil forest division, Kerala, India. Journal of Earth, Environment and Health Sciences, 2(3), 109-115.

Alexandridis, A., Vakalis, D., Siettos, C. I., Bafas, G. V., 2008. A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990. Applied Mathematics and Computation, 204(1), 191-201.

Ardakani, A., ValadaneZoj, M. J., Mansourian, A., 2009. The spatial analysis of fire across the country using RS and GIS. Journal of (In Persian).http:// journals. Msrt. ir/files/site1/rds_journals/911/article-911-444129. pdf.

Ebrahimi, H., Rasouli, A. A., Mokhtari, D., 2018. Investigation of changes in fire risk and its influencing factors using MAXENT model, Case Study: Forests and Rangelands of East Azerbaijan Province. Geography and Environmental Hazards, 25, 57-73. (In Persian).

Encinas, A.H., Encinas, L.H., White, S.H., del Rey, A.M., S'anchez, G.R., 2007.Simulation of forest fire

fronts using cellular automata. Advances in Engineering Software Journal, 38, 372–378.

Eskandari, S., 2017. Methods of modeling and evaluation of fire occurrence risk in the forests of world and Iran. Human and Environment, 15 (3), 91-110. (In Persian).

Eskandari, S., Oladi, J., 2017. Modelling of forest fire spread using Cellular Automata. Natural hazards. Geographical Planning of Space Quarterly Journal, 7(25), 37-53. (In Persian).

Eugenio, F.C., Dos Santos, A.R., Fiedler, N.C., Ribeiro, G.A., da Silva, A.G., Dos Santos, Á.B., Paneto, G.G. and Schettino, V.R., 2016. Applying GIS to develop a model for forest fire risk: a case study in Espírito Santo, Brazil. Environmental Management Journal, 173, 65-71.

Ghaemi Rad T, Karimi M., 2017. Comparison of Different Neighborhoods in Fire Spread Modelling Using Cellular Automata. Geospatial Engineering Journal. 19-27. (In Persian).

Ghaemi Rad, T., Karimi, M., 2015. Evaluation performances of different forest fire spread models using cellular automata (case study: The forests of Lakan district in Rasht). Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 23(1), 64-78. (In Persian).

Hejazi, M., Roustayi, S., Khayam, M., 2009. The introduction and analysis of the physiographic and topographic reactions of Arasbaran biosphere reserve over vegetation zoning. Journal of (In Persian) Quarterly journal of geography and planning, 27, 141-158.

Li, C., Hans, H., Barclay, H., Liu, J., Carlson, G., Campbell, D., 2008. Comparison of spatially explicit forest landscape fire disturbance models. Forest Ecology and Management, 254(3), 499-510.

Marozas, V., Racinskas, J., Bartkevicius, E., 2007. Dynamics of ground vegetation after surface fires in hemiboreal Pinus sylvestris forests. Forest Ecology and Management, 250(1-2), 47-55.

Mohammadi, F., Shabanian, N., Pourhashemi, M., Fatehi, P., 2011. Risk zone mapping of forest fire using GIS and AHP in a part of Paveh forests. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 18, 4(42), 569-586. (In Persian).

Nematollahi, M.A., Babaei Naiij, M., Layeghi, M., Aghaii Zadeh, R., 2012. Quantifying of schooling responses of rosy barb (Puntius barbus) to acute stress using computer vision. In: McKinlay, D. (Ed.). Proceedings of 10th International Congress on the Biology of Fish, Madison, Wisconsin, USA. 170-180.

Rui, X., Hui, S., Yu, X. Zhang, G., Wu, B., 2018. Forest fire spread simulation algorithm based on cellular automata. Natural hazards, 210(1-2), 71-84.

Vakalis, D., Sarimveis, H., Kiranoudis, C., Alexandridis, A., Bafas, G., 2004. A GIS based operational system for wildland fire crisis management I. Mathematical modelling and simulation. Applied Mathematical Modelling, 28(4), 389-410.

Valizadeh, KH., Omrani, K., Khosroshahi, S. S., 2014. Forest fire risk assessment using multi-criteria analysis: A case study Kaleybar Forest. In International Conference on Agriculture, Environment and Biological Sciences (ICFAE'14) June 4-5, Antalya (Turkey). 30-33.

Wang, S. L., Lee, H. I., Li, S. P., 2014. Fractal dimensions of wildfire spreading. Nonlinear Processes in Geophysics, 21(4), 815-823.

Xu, D., Dai, L.M., Shao, G.F., Tang, L., and Wang, H. 2005. Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe forestry Bureau, Jilin China. Journal of forestry research, 15(3): 169-174.

Yassemi, S., Dragićević, S., Schmidt, M. 2008. Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behaviour. Ecological modelling, 210(1-2), 71-84.

Zakeri Pashakolaei M, Alvaninejad S, Esmailzade O., 2014. Relationship between Plant Biodiversity and Topographical Factors in Forests of West Mazandaran (Case study: Research forest of Tarbiat Modares University). Iranian Journal of Applied Ecology. 3(8) :1-16. (In Persian).