نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی نقشه برداری

سال پنجم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۶
Vol.5, No.3, Autumn 2017
۹۹-۱۲۲

مدلسازی گسترش آتش‌سوزی جنگل بر مبنای اتوماتای سلولی با به‌کارگیری زنجیره مارکوف و تخصیص چند هدفه زمین با فیلتر همسایگی

پرهام پهلوانی [۱*]، حمیدرضا صحرائیان [۲]، امین راعی [۳]

۱- استادیار دانشکده مهندسی نقشه¬برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران
۲- دانشجوی کارشناسی¬ارشد مهندسی سیستم¬های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده¬های فنی دانشگاه تهران
۳- دانشجوی دکترای مهندسی سیستم¬های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه¬برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده¬های فنی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۲۸

چکیده

امروزه نیاز به شناسایی فاکتورهای موثر بر آتش‌سوزی جنگل، مدلسازی روند توسعه آتش و تبیین اقداماتی برای اطفاء آن، جهت کاهش خسارات و هزینه¬های سنگین ناشی از آتش¬سوزی جنگل، احساس می¬شود. در این تحقیق سعی نمودیم تا ابتدا با استفاده از روش رگرسیون وزن¬دار جغرافیایی در ترکیب با الگوریتم ژنتیک، به شناسایی فاکتورهای موثر بر گسترش آتش در منطقه مورد مطالعه از میان فاکتورهای بیوفیزیکی و انسانی بپردازیم. در ادامه با استفاده از الگوریتم اتوماتای سلولی و روش زنجیره مارکوف به همراه تخصیص چند هدفه زمین با فیلترهای همسایگی مختلف برای کالیبره نمودن قوانین انتقال اتوماتای سلولی، به مدلسازی گسترش آتش‌سوزی جنگل در این منطقه پرداختیم. برای مقایسه با نتایج روش فوق-الذکر، از ترکیب الگوریتم اتوماتای سلولی با روش رگرسیون لجستیک نیز استفاده کردیم. نتایج این تحقیق نشان داد که برای آتش‌سوزی منطقه مورد مطالعه در تاریخ ۲۶آبان ۱۳۸۹، الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری زنجیره مارکوف به همراه تخصیص چند هدفه زمین با فیلتر همسایگی ۳×۳ و توان تفکیک مکانی ۳۰ متر، دارای دقت بهتری نسبت به سایر فیلترهای همسایگی و توان‌های تفکیک مکانی است. شاخص کاپا، دقت کلی و شاخص عامل نسبی در این حالت به‌ترتیب برابر با ۸۸/۸ درصد، ۹۵/۱ درصد و ۸۹/۰ درصد به دست آمدند. مقایسه بین دو روش پیشنهادی تحقیق نیز نشان داد که نتایج الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری زنجیره مارکوف به همراه تخصیص چند هدفه زمین، دارای دقت و صحت بالاتری نسبت به نتایج الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری رگرسیون لجستیک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: گسترش آتش‌سوزی جنگل، رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی، اتوماتای سلولی، زنجیره مارکوف، MOLA، رگرسیون لجستیک.

*نویسنده مکاتبه کننده: دانشکده مهندسی نقشه¬برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده¬های فنی دانشگاه تهران
تلفن: ۶۱۱۱۴۵۲۴

Email: pahlavani@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

۱- مقدمه

آتش‌سوزی جنگل‌ها از جمله مهم‌ترین و خطرناک‌ترین بلایای طبیعی دنیا در حال حاضر به‌شمار می‌آید و در نتیجه، شناسایی فاکتورهای ایجاد و گسترش آن برای تسریع در تشخیص و واکنش به آن، ضروری به‌نظر می‌رسد. تاکنون تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده است که در اکثر موارد، انسان را عامل اصلی آن دانسته‌اند [۱، ۲ و ۳] اما فاکتورهای انسانی تأثیرگذار بر آتش‌سوزی جنگل‌ها هنوز به صورت دقیق شناسایی نشده‌اند. در تحقیقات گذشته، فاکتورهای اصلی تأثیرگذار بر آتش‌سوزی، شامل فاکتورهای بیولوژیکی-فیزیکی یا به‌طور خلاصه بیوفیزیکی و فاکتورهای اجتماعی-اقتصادی یا انسانی بودند. فاکتورهای انسانی شامل کاربری زمین، فرآیندهای مدیریت سوخت، محدودیت‌های قانونی، میزان دسترسی به جنگل، فاکتورهای فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی [۴ و ۵] بودند. فاکتورهای بیوفیزیکی تابعی از سه متغیر شامل: (الف) شرایط جوی نظیر دما، رطوبت، میزان بارندگی، جهت عمده وزش باد و سرعت حداکثر آن، (ب) ویژگی‌های سوختی نظیر نوع مواد سوختنی، نرخ بارگذاری سوخت، رطوبت مواد سوختنی و اشتعال‌پذیری آن‌ها و (ج) توپوگرافی منطقه نظیر ارتفاع، شیب و جهت شیب بودند [۶]. تحقیقات نشان داده‌اند که هیچ یک از این دو فاکتور به تنهایی قادر به تعیین الگوی آتش‌سوزی جنگل‌ها نیستند و باید برای رسیدن به الگویی مناسب و منطبق با واقعیت، این دو فاکتور با یکدیگر ترکیب شوند [۴، ۷ و ۸].

برای حصول موفقیت در برنامه‌ریزی و مدیریت بحران آتش‌سوزی پهنه‌های جنگلی، امکان پیش‌بینی نحوه گسترش مکانی آتش در محدوده جنگلی به‌منظور طرح سناریوهای محتمل، مقابله با این بحران در دو فاز پیش از بحران و حین وقوع این بحران، از جمله مولفه‌های اساسی تاثیرگذار می‌باشد [۹]. در رابطه با تهیه نقشه‌های ریسک و پتانسیل آتش‌سوزی، تحقیقات زیادی نظیر [۱۰] صورت گرفته که در این پژوهش‌ها از آمار آتش‌سوزی‌ها و فاکتورهای انسانی و بیوفیزیکی منطقه و به‌کارگیری تحلیل‌های مکانی برای تولید نقشه‌های پتانسیل، استفاده شده‌است. اولین مدل گسترش آتش‌سوزی جنگل در سال ۱۹۸۱ ارائه گردید که یک مدل نیمه تجربی برای محاسبه‌ی سرعت گسترش آتش تاجی فعال و غیر فعال در جنگل‌های مخروطی برگ کانادا بود [۱۱]. مدل ارائه شده توسط راترمل[1] [۱۲] نیز به محاسبه بیشینه نرخ گسترش آتش با استفاده از یک معادله دینامیکی می‌پردازد که بنابر این معادلات، آتش به‌صورت بیضی‌گون گسترش می‌یابد که در آن محور بزرگ بیضی به موازات جهتی است که نرخ گسترش آن ماکزیمم می‌باشد. [۱۳] یک مدل مبتنی بر اتوماتای سلولی[2] را برای پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی، توسعه داد که تحت سناریوهای مختلف آب و هوا و توپوگرافی قابل استفاده بود. چالش اصلی موجود در این مدل، نحوه ارتباط آن با فاکتورهای ایستا و پویای مکانی و زمانی تأثیرگذار بر گسترش آتش‌سوزی نظیر شیب، سرعت و جهت باد بود. [۱۴ و ۱۵] نیز در سال ۲۰۱۵ به ارائه مدلی از اتوماتای سلولی پرداختند که با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی عددی، نتایج حاصل از این روش را بهبود می‌داد. پس از مطالعات و پژوهش‌های گسترده در این رابطه [۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹]، محققین دریافتند که استفاده از روش‌هایی همچون اتوماتای سلولی و نیز به‌کارگیری روش‌هایی برای کالیبره کرده آن نظیر روش‌های هوشمند، می‌تواند نتایج مطلوب‌تری را به همراه داشته باشد. در این رابطه [۲۰] به بررسی و ارزیابی مدل‌های کارافلیدیس، برجاک و پروجیاس جهت شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل با استفاده از اتوماتای سلولی پرداخت و از روش بهینه‌سازی

[1] Richard C. Rothermel
[2] Cellular Automata

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

زنبور عسل و روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات، جهت بهینه‌سازی مدل‌ها استفاده نمود. [۲۱] نیز به مدلسازی گسترش آتش‌سوزی جنگل با استفاده از اتوماتای سلولی و بهره‌گیری از الگوریتم زنبورها برای بهینه‌سازی آن پرداخت.

هدف ما در این تحقیق، تعیین فاکتورهای موثر بر آتش‌سوزی جنگل گلستان و سپس استفاده از این فاکتورها برای مدلسازی گسترش آتش‌سوزی بر مبنای اتوماتای سلولی است. همچنین از فیلترهای همسایگی ۳×۳، ۵×۵ و ۷×۷، برای بررسی تأثیر فیلتر همسایگی در فرآیند گسترش آتش‌سوزی جنگل استفاده شده‌است. برای کالیبراسیون اتوماتای سلولی مورد استفاده در این تحقیق از روش زنجیره مارکوف[۱] به همراه تخصیص چند هدفه زمین (MOLA)[۲] و روش رگرسیون لجستیک (LR)[۳] بهره گرفته شده‌است. همچنین هر دو فاکتور بیوفیزیکی و انسانی در گسترش آتش در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند که برای تعیین فاکتورهای موثر بر آتش‌سوزی در این منطقه، از مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR)[۴] به همراه الگوریتم ژنتیک (GA)[۵] استفاده شده‌است.

در ادامه، در بخش ۲، روند کلی پیشنهادی تحقیق، ارائه شده و الگوریتم‌ها و روش‌های پیشنهاد شده در این تحقیق مرور شده است. بخش ۳ به منطقه مورد مطالعه و آماده‌سازی داده‌ها می‌پردازد. بخش ۴ به پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج می‌پردازد و در نهایت، بخش ۵ به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات آتی می‌پردازد.

[1] Markov Chain
[2] Multi Objective Land Allocation
[3] Logistic Regression
[4] Geographically Weighted Regression (GWR)
[5] Genetic Algorithm

۲- روش پیشنهادی

روند کلی روش پیشنهادی این تحقیق در شکل (۱) ارائه شده است.

۲-۱- رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی

داده‌های مکانی ویژگی‌های خاصی دارند که آن‌ها را از سایر انواع داده، متمایز می‌کند. دو نمونه از این ویژگی‌ها عبارتند از: (الف) خودهمبستگی مکانی[۶] بر اساس قانون تابلر که بیان‌گر کاهش وابستگی‌ها با افزایش فاصله است [۲۲] و (ب) ناایستایی مکانی[۷] که بیان‌گر ناهمگونی محیط و تغییر خودهمبستگی مکانی در فضاست. روش کمترین مربعات معمولی[۸] (OLS) با این دو ویژگی سازگاری ندارد زیرا پیش‌فرض این روش استقلال کامل داده‌ها از هم و همگون بودن محیط است. بنابراین OLS بدون در نظر گرفتن وابستگی‌های مکانی بین داده‌ها، برای تمامی نقاط منطقه یک دسته جواب ارائه می‌دهد. به‌همین دلیل در سال ۱۹۹۸، روش GWR توسط [۲۳] مطرح شد. در این روش، وابستگی‌های مکانی مشاهدات در قالب ماتریس‌های وزن در نظر گرفته می‌شود و به‌دلیل وجود ناایستایی مکانی، ضرایب رگرسیون به‌صورت محلی و برای هر نقطه به‌طور جداگانه به دست می‌آید. رابطه کلی GWR به شکل رابطه (۱) است [۲۳].

$$y = \beta_0(u,v) + \sum_{j=1}^{p} \beta_j(u,v)X_j + \varepsilon \qquad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن y متغیر وابسته (متغیر آتش)، β_0 ضریب ثابت رگرسیون، X_j متغیر مستقل (فاکتورهای آتش‌سوزی منطقه) j ام، p تعداد متغیرهای مستقل، ε باقیمانده مدل و β_j ضرایب رگرسیون هستند که خود تابعی از موقعیت نقاط مشاهداتی (u,v)

[6] Spatial autocorrelation
[7] Spatial non-stationarity
[8] Ordinary Least Squares

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

می‌باشند. GWR برخلاف OLS، یک روش سرشکنی وزن دار است و ضرایب رگرسیون را از طریق رابطه (۲) به‌دست می‌آورد [۲۳]:

$$\hat{\beta}(u,v) = (X^T W(u,v) X)^{-1} X^T W(u,v) y \quad \text{رابطه (۲)}$$

شکل ۱: نمودار کلی حل مسأله

که در آن W ماتریس وزن مشاهدات (فاکتورهای آتش‌سوزی منطقه) است که خود تابعی از موقعیت نقاط می‌باشد. این ماتریس یک ماتریس قطری شامل وزن‌های جغرافیایی به صورت رابطه (۳) است [۲۳]:

$$\begin{bmatrix} W_1(u,v) & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & W_n(u,v) \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۳)}$$

تعیین وزن‌های جغرافیایی در GWR از اهمیت بالایی برخوردار است و تاکنون هسته‌های[1] متعددی بدین منظور ارائه شده است. یک نمونه از این هسته ها که کارآیی بالایی را از خود نشان داده است هسته مکعبی سه‌گانه[2] می‌باشد که در رابطه (۴) آمده است [۲۳]:

[1] Kernels
[2] Tricube

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

$$W_{ij} = \begin{cases} \left(1 - \left(\frac{d_{ij}}{h}\right)^3\right)^3 & , d_{ij} \le h \\ 0 & , d_{ij} > h \end{cases}$$ رابطه (۴)

که W_{ij} وزن جغرافیایی مربوط به مشاهده j ام در نقطه iام، d_{ij} فاصله اقلیدسی دو نقطه i و j و در نهایت h پارامتر پهنای باند می‌باشد که باید بهینه گردد. یکی از روش‌هایی که معمولاً برای تعیین پهنای باند بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش اعتبارسنجی متقابل[1] است [۲۴] که به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{n}[y_i - \hat{y}_i(h)]^2$$ رابطه (۵)

که در این رابطه n تعداد مشاهدات، y_i مشاهده iام و $\hat{y}_i$ مقدار برآورد شده مشاهده iام با استفاده از سایر مشاهدات است. برای سنجش خوبی برازش مدل نیز معمولاً پارامتر ضریب تعیین R^2 [۲۵] به کار می‌رود [۲۶] که به صورت رابطه های (۶، ۷ و ۸) بیان می‌شود:

$$R^2=1-\frac{SS_E}{SS_T}$$ رابطه (۶)

$$SS_E=\sum_{i=1}^{n}[y_i - \hat{y}_i]^2$$ رابطه (۷)

$$SS_E=\sum_{i=1}^{n}[y_i - \bar{y}_i]^2$$ رابطه (۸)

که در این روابط n تعداد مشاهدات، y_i مشاهده iام، $\hat{y}_i$ مقدار برآورد شده مشاهده iام و $\bar{y}_i$ میانگین مشاهدات است.

۲-۲- انتخاب فاکتورهای بهینه

در این مرحله، نسبت به انتخاب زیرمجموعه‌ای از فاکتورها که به ازای آن‌ها الگوریتم GWR بهترین عملکرد را داشته باشد، اقدام می‌شود. در این تحقیق، از الگوریتم ژنتیک ارائه شده در [۲۷] برای انتخاب فاکتورهای بهینه استفاده شده است. این الگوریتم به‌صورت ضمنی، وابستگی بین فاکتورها را نیز در نظر می‌گیرد و با توجه به آن، بهترین زیرمجموعه از فاکتورها را انتخاب می‌کند.

[1] Cross Validation

الگوریتم ژنتیک، یک الگوریتم اکتشاف جستجوگرایانه[2] بوده که بر اساس انتخاب طبیعی کار می‌کند. در الگوریتم ژنتیک یک جمعیت از راه‌حل‌های نماینده (کروموزوم) به سمت بهینه کلی حرکت می‌کنند که در آن‌ها هر یک از فاکتورها تشکیل دهنده یکی از ژن‌های کروموزوم می‌باشد. جمعیت (نسل) اول کروموزوم‌ها به‌صورت تصادفی تولید شده و روند بهینه‌سازی از این نسل شروع می‌شود. در این تحقیق هر کروموزوم دارای ۱۴ ژن (فاکتور) با مقادیر باینری مشابه شکل (۲) می‌باشد که هر بار تعدادی ژن، جهت ترکیب انتخاب می‌شوند. در این حالت، مقدار ۱ به ژن‌های انتخاب شده و مقدار ۰ به ژن‌های انتخاب نشده اختصاص داده می‌شود.

به‌عنوان نمونه، در کروموزوم شکل (۲)، ترکیبی از ژن‌ها شامل ۱۰ ژن شماره ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۷، ۱۰، ۱۱، ۱۳ و ۱۴ در نظر گرفته شده است. در این تحقیق از ترکیب ضربی تک‌نقطه‌ای[3] و جهش گوسین[4] استفاده شده است [۲۸]. در هر نسل تابع برازش برای تمامی کروموزوم‌های آن نسل محاسبه می‌شود. این تابع برازش معمولاً تابع هدف مسئله بهینه‌سازی است. تابع برازش الگوریتم ژنتیک پیشنهادی این تحقیق، $1-R^2$ و هدف ما از بهینه‌سازی، کمینه نمودن آن است.

[2] Search Heuristic
[3] Single Point Crossover
[4] Gaussian Mutation

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

فاکتورها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱

شکل ۲: نحوه قرارگیری ژن‌ها در یک کروموزوم

بر اساس سازوکار نخبه‌گرایی[1]، بهترین کروموزوم هر نسل به‌طور مستقیم به نسل بعد منتقل می‌گردد. همچنین بر اساس سازوکار انتخاب این تحقیق، تعدادی از کروموزوم‌های دارای مقدار تابع برازش بهتر در هر نسل بر اساس روش یکنواخت اتفاقی[2] [۲۸] انتخاب‌شده و محتوای این کروموزوم‌ها با اعمال تغییراتی از سوی عملگرهای ژنتیک (ترکیب ضربی و جهش) به نسل بعد انتقال می‌یابند. سپس این نسل جدید از کروموزوم‌های تولید شده در حلقه تکرار بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدین ترتیب، زمانی الگوریتم ژنتیک پایان می‌یابد که یا به تعداد بیشینه نسل‌ها و یا به مقدار تابع برازش رضایت بخش رسیده باشد.

۲-۳- اتوماتای سلولی

اتوماتای سلولی روشی با ویژگی‌های ساختاری شامل توپولوژی شبکه، تعریف همسایگی، شرایط مرزی شبکه و ویژگی‌های تابعی شامل تمام متغیرهای توصیف کننده وضعیت سلول‌ها، شرایط اولیه شبکه و قوانین انتقال حاکم بر رفتار شبکه است [۲۹]. سلول‌های تعریف شده در یک شبکه که دارای شکل‌های هندسی همگن یا ناهمگن هستند در طی دوره‌های زمانی گسسته به صورت تابعی از وضعیت خود سلول و همسایگانش تکامل می‌یابند [۳۰].

در اتوماتای سلولی برای مدلسازی محدوده سلول‌های تغییر وضعیت یافته، نیاز داریم احتمال تغییر وضعیت در سلول‌های مختلف بررسی شود. این احتمال با استفاده از رابطه (۹) به‌دست می‌آید [۳۱]:

رابطه (۹) $$S^{t}_{i,j}=\frac{A_b}{A_t}$$

که در این رابطه، A_b بیان‌گر نسبت مساحت تغییر وضعیت یافته و A_t مساحت کل سلول است. مقدار S برای یک سلول تغییر وضعیت یافته برابر با ۱، برای سلول‌های در حال تغییر، مقادیری بین ۰ و ۱ و برای سلول‌های بدون تغییر، برابر با ۰ است.

تعریف همسایگی در اتوماتای سلولی، می‌تواند به صورت مختلفی انجام پذیرد نظیر شکل (۳) که به همسایگی مور[3] معروف است و شامل همسایگی هشت سلول مجاور سلول مرکزی است.

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 ۳: هشت همسایگی مور

بنابراین، وضعیت هر سلول در لحظه t+1 به‌صورت تابعی از وضعیت خود سلول و سلول‌های همسایه آن در لحظه t می‌باشد که به آن تابع انتقال اتوماتای سلولی گفته می‌شود که در حالت دو بعدی به‌صورت رابطه (۱۰) بیان می‌شود [۲۹]:

رابطه (۱۰) $$S^{t+1}_{i,j}=S^{t}_{i,j}+S^{t}_{(\alpha\in N)}(X_1,X_2,\dots,X_n)$$

در رابطه فوق، $S^{t}_{(\alpha\in N)}(X_1,X_2,\dots,X_n)$ تابعی از وضعیت سلول‌های همسایه سلول مرکزی بوده که در آن، n تعداد سلول‌های همسایه سلول مورد نظر است. در این تحقیق $S^{t}_{(\alpha\in N)}(X_1,X_2,\dots,X_n)$ نسبت سلول‌های آتش گرفته به کل سلول‌های

[1] Elitism
[2] Stochastic uniform
[3] Moore Neighborhood

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

همسایه می‌باشد که بطور مستقیم بر روی وضعیت سلول مرکزی در لحظه t+1 موثر است.

۲-۴- زنجیره مارکوف

یک فرآیند تصادفی است که انتقال از یک حالت به حالت دیگر، در متغیرهای تصادفی آن صورت می‌پذیرد. با توجه به ویژگی مارکوف، حالت بعدی یک متغیر فقط به حالت فعلی آن متغیر وابسته بوده و به وقایع قبل از آن بستگی ندارد [۳۱ و ۳۲]. زنجیره مارکوف از جمله روش‌های حافظه‌دار محسوب می‌شود و به طول حافظه‌ای که مقادیر احتمال ممکن برای حالت بعدی بوسیله آن محاسبه می‌گردد، مرتبه مارکوف گفته می‌شود. در مدلسازی‌هایی که از مارکوف مرتبه یک استفاده می‌شود، احتمال تغییر حالت یک مرحله‌ای بر پایه احتمالات شرطی، به‌صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود [۳۳]:

$$P(i \rightarrow j)=P[X_t=j \mid X_{t-1}=i] \qquad \text{رابطه (۱۱)}$$

که رابطه فوق، احتمال تغییر حالت یک مرحله‌ای از زمان t-1 به زمان t را بیان می‌کند. احتمال تغییر حالت یک مرحله‌ای، در زنجیره مارکوف دارای اهمیت بسیاری است و ابزار بسیار مفیدی برای ارائه احتمال‌های تغییر حالت یک زنجیره مارکوف بوده و برابر با احتمال انتقال از حالت i به حالت j است [۳۳]. زنجیره مارکوف شامل سه ماتریس است که ارتباط بین این ماتریس‌ها در رابطه‌های (۱۲ و ۱۳) بیان شده است [۳۴]:

$$M_{LC} \times M_t = M_{t+1} \qquad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\begin{bmatrix} LC_{AA} & LC_{AB} \\ LC_{BA} & LC_{BB} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_t \\ B_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{t+1} \\ B_{t+1} \end{bmatrix} \qquad \text{رابطه (۱۳)}$$

که در رابطه (۱۲)، M_{LC} ماتریس انتقال بین وضعیت آتش گرفته و آتش نگرفته برای سلول‌هاست، M_t و M_{t+1} تعداد سلول‌های هر متغیر در دو زمان t و t+1 می‌باشند که بسط این رابطه به‌صورت رابطه (۱۳) می‌باشد. در رابطه (۱۳)، A نشان‌دهنده متغیر شماره یک (وضعیت آتش نگرفته سلول)، B نشان‌دهنده متغیر شماره دو (وضعیت آتش گرفته سلول)، A_t نشان‌دهنده تعداد سلول‌های موجود در حالت یک در زمان t و B_t نشان‌دهنده تعداد سلول‌های موجود در حالت دو در زمان t می‌باشند. برای نمونه، در ماتریس انتقال M_{LC} مقدار LC_{AB} نشان‌دهنده احتمال تغییر از حالت یک در زمان t به حالت دو در زمان t+1 است. در این روش، کل منطقه مورد مطالعه را به بازه‌های زمانی یکسان تقسیم‌بندی می‌کنند. سپس تعداد سلول‌های مربوط به هر حالت (آتش و غیر آتش) سلول، در زمان t و t+1 مشخص می‌شود. در نهایت، مقدار احتمال تغییر وضعیت از هر حالت در زمان t به حالت دیگر در زمان t+1، با توجه به تعداد سلول‌های مربوط به حالت‌های مختلف در بازه‌های زمانی t و t+1، تعیین می‌شوند [۳۵]. اندازه ماتریس انتقال با توجه به تعداد پارامترهای موجود در مسئله متغیر است.

۲-۵- مدل ترکیبی CA-Markov

یکی از روش‌های پرکاربرد در مدلسازی‌های گسترش شهری و گسترش آتش است که روشی ترکیبی برای تخصیص وضعیت خاص به هر سلول می‌باشد. در این روش ابتدا تعداد سلول‌های قابل گسترش توسط روش مارکوف پیش‌بینی می‌شوند. سپس سلول‌های مستعد برای گسترش در بازه‌های زمانی مشخص شده برای زنجیره مارکوف (که برابر با تعداد تکرار مشخص شده برای اتوماتای سلولی است)، با در نظر گرفتن تعداد سلول‌های قابل گسترش و نقشه‌های شایستگی، شناسایی می‌شوند. در هر بازه زمانی، این سلول‌های شناسایی شده به‌عنوان سلول‌های مستعد برای گسترش، با نقشه موجود در ابتدای بازه زمانی، همپوشانی داده می‌شوند. در نهایت با اتمام بازه‌های زمانی مشخص شده، نقشه مورد نظر پیش‌بینی می‌شود [۳۶].

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

۲-۶- تخصیص چند هدفه زمین (MOLA)

برای مدلسازی تغییرات چندگانه وضعیت سلول‌ها، نیازمند روشی برای مشخص شدن مناطق مناسب برای تخصیص وضعیت به هر یک از سلول‌ها هستیم. از روش MOLA برای اختصاص یک وضعیت خاص به سلول مورد نظر استفاده می‌شود. این موضوع در مسائلی که نیاز به تصمیم‌گیری بر مبنای بیش از یک وضعیت، که ممکن است این وضعیت‌ها با هم در تعارض باشند، نمود بیشتری پیدا می‌کند [۳۷]. به عبارت دیگر روش MOLA رویه‌ای پشتیبان تصمیم‌گیری است که هدف آن ایجاد راه حل بهینه در تخصیص مکانی به وضعیت‌های چندگانه و ناسازگار است [۳۸] یعنی برای یک سلول، بیش از یک هدف مورد انتظار باشد. با توجه به مسئله مورد نظر در این تحقیق که دو وضعیت برای سلول‌ها (آتش و غیر آتش) مورد انتظار است، تخصیص چند هدفه زمین وظیفه حل مشکل اختصاص یک وضعیت خاص به سلول‌ها را حل خواهد کرد. برای حل تعارض بین وضعیت‌های مختلف سلول‌ها، در این روش از مفهوم کوتاه‌ترین فاصله تا سلول ایده‌آل استفاده شده‌است. بر اساس این مفهوم، ابتدا سلول ایده‌آل برای هر وضعیت مشخص می‌شود. سلول ایده‌آل به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که این سلول، مناسب‌ترین سلول برای یک وضعیت بوده و نامناسب‌ترین سلول برای وضعیت دیگر باشد که این سلول در مرحله طبقه‌بندی مجدد نقشه، شناسایی می‌شود [۳۶]. سپس سلول‌های منطقه مورد مناقشه با توجه به این‌که به کدام سلول ایده‌آل نزدیک‌تر هستند، تعیین وضعیت می‌شوند.

۲-۷- رگرسیون لجستیک

رگرسیون لجستیک، یک روش رگرسیونی تعمیم یافته است که در آن متغیرهای پیش‌گو به‌صورت ترکیب‌های بولی[1] از متغیرهای دو حالتی ساخته می‌شوند. از این روش در مواردی که نیاز به مشخص کردن میزان تأثیر فاکتورهای مستقل بر روی متغیر وابسته است، استفاده می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به در نظر گرفتن اثرات متقابل بین چندین متغیر در قالب یک عبارت بولی و تلخیص متغیرها به صورتی که مدل نهایی همچنان قالب یک مدل رگرسیونی را داشته و ضرایب به سادگی تفسیر و آزمون شوند، اشاره کرد [۳۹]. فرمول رگرسیون لجستیک به صورت رابطه (۱۴) بیان می‌شود [۴۰ ، ۴۱]:

$$P(X) = \frac{1}{1+e^{-(\alpha+\sum b_i X_i)}}$$ رابطه (۱۴)

که $P(X)$ بیان‌گر احتمال تغییر وضعیت هر سلول است که از آن برای تولید نقشه احتمال (نقشه شایستگی) استفاده می‌شود. X_i پارامترهای مستقل مدل که فاکتورهای موثر بر آتش‌سوزی جنگل گلستان هستند و α ثابت رابطه و $B=(b_0,b_1,\ldots,b_k)$ ضرایب رگرسیون هستند که α و b_i باید برآورد شوند. برای برآورد بهترین ترکیب ضرایب برازش مدل (α و b_i)، رگرسیون لجستیک از روش بیشینه درست‌نمایی که در رابطه (۱۵) بیان شده است، استفاده می‌کند [۴۰]:

$$L=\prod_{i=1}^{N} \mu_i^{y_i} \times (1-\mu_i)^{(1-y_i)}$$ رابطه (۱۵)

که در این رابطه L بیانگر احتمال، N بیانگر تعداد مشاهدات، y_i بیان‌گر مقدار مشاهده شده متغیر وابسته برای نمونه i که در این تحقیق منظور منطقه نهایی سوخته شده است و μ_i بیانگر مقدار پیش‌بینی شده برای متغیر وابسته برای نمونه i است (رابطه (۱۶)).

$$\mu_i=\frac{1}{1+e^{-(\sum_{k=0}^{k} b_k x_{ik})}}$$ رابطه (۱۶)

که برای بیشینه کردن رابطه (۱۵)، باید رابطه غیر خطی زیر (رابطه (۱۷)) حل شود:

$$\sum_{i=0}^{N}(y_i - \mu_i) \times x_{ij} = 0$$ رابطه (۱۷)

[1] Combining Boolean

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

که در این رابطه x_{ij} بیان‌گر مقدار مشاهده شده فاکتور j برای نمونه i است که از الگوریتم نیوتون-رافسون [۴۰] برای حل آن استفاده می‌شود. با طی مراحل فوق، رگرسیون لجستیک قادر به برآورد ضرایب رابطه است.

۲-۸- روش‌های ارزیابی نتایج

در این تحقیق از سه معیار دقت کلی[1]، شاخص کاپا[2] و شاخص عامل نسبی[3] که معمولا برای بیان دقت مدلسازی استفاده می‌شوند، بهره گرفتیم. این معیارها میزان تطابق بین نقشه مدلسازی شده و نقشه مرجع را بیان می‌کنند. در شاخص کاپا بر خلاف دقت کلی، از تمام مقادیر ماتریس مقایسه برای محاسبه دقت استفاده می‌شود و این یک مزیت مهم برای شاخص کاپا می‌باشد. این در حالی است که هر دو معیار در بیان جداگانه دقت مکان، دارای نقص هستند. رابطه‌های (۱۸ و ۱۹) مربوط به این دو معیار می‌باشند [۳۶]:

رابطه (۱۸) $$\text{Overall Accuracy} = \frac{\sum_{i=1}^{c} P_{ii}}{\sum_{i=1}^{c}\sum_{j=1}^{c} P_{ij}}$$

رابطه (۱۹) $$\text{Kappa} = \frac{\sum_{i=1}^{c} P_{ii} - \sum_{i=1}^{c} P_{iT}P_{Ti}}{1-\sum_{i=1}^{c} P_{iT}P_{Ti}}$$

که i و j بیانگر تعداد حالت‌های موجود برای هر سلول، P_{ii} بیانگر تعداد سلول‌هایی که در واقعیت در حالت i بوده و در مدلسازی نیز در حالت i هستند، P_{ij} بیانگر سلول‌هایی از کاربری i در واقعیت بوده که در مدل به حالت j هستند، P_{iT} بیان‌گر مجموع سلول‌های حالت i در واقعیت و P_{Ti} بیان‌گر مجموع سلول‌های حالت i در مدل هستند.

شاخص عامل نسبی، دقت مدلسازی را با در نظر گرفتن حدود آستانه مختلف به‌دست می‌آورد. این شاخص، منحنی‌ای است که محور X آن از رابطه (۲۰) و محور Y آن از رابطه (۲۱) با توجه به حدود آستانه تعیین شده محاسبه می‌شود [۳۶].

رابطه (۲۰) $$\text{False Positive \%} = \frac{B}{B+D}$$

رابطه (۲۱) $$\text{True Positive \%} = \frac{A}{A+C}$$

که در این روابط، A بیانگر تعداد سلول‌هایی است که هم در نقشه مدلسازی شده و هم در نقشه مرجع گسترش یافته‌اند، B بیانگر تعداد سلول‌هایی است که توسط مدل گسترش یافته اما در نقشه مرجع گسترش نیافته‌اند، C بیانگر تعداد سلول‌هایی است که توسط مدل گسترش نیافته اما در نقشه مرجع گسترش یافته‌اند، D بیانگر تعداد سلول‌هایی است که هم در نقشه مدلسازی شده و هم در نقشه مرجع گسترش نیافته‌اند. در نهایت مساحت زیر نمودار را محاسبه کرده که عددی بین ۰/۵ تا ۱ به‌دست می‌آید. عدد ۰/۵ نشان‌دهنده برازش اتفاقی و عدد ۱ نشان‌دهنده بهترین برازش است.

۳- منطقه مورد مطالعه و آماده‌سازی داده‌ها

در این بخش به معرفی منطقه مورد مطالعه و روند آماده‌سازی داده‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۱- منطقه مورد مطالعه

از جمله جنگل‌های با اهمیت ایران که دارای جاذبه‌های توریستی و گردشگری فراوانی است، جنگل گلستان می‌باشد. این جنگل شامل قسمت‌هایی از استان گلستان، خراسان‌شمالی و سمنان است. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق در شکل (۴) نمایش داده شده است که در محدوده ′۳۷°۴۷ – ′۳۷°۲۰ شمالی و ′۵۶°۱۲ – ′۵۵°۸۷ شرقی واقع شده و مساحتی در حدود ۶۸۱/۵۵۳ کیلومتر مربع دارد که بخش عمده آن در استان خراسان‌شمالی واقع شده است. بیشتر آتش‌سوزی‌های ثبت شده در ارتباط با این منطقه، دارای منشأ انسانی بوده و در نزدیکی جاده‌ها صورت گرفته‌است.

[1] Overall Accuracy
[2] Kappa Index
[3] Relative Operating Characteristic

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

شکل ۴: منطقه مورد مطالعه

۳-۲- آماده‌سازی داده‌ها

قسمت عمده داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل منطقه واقعی سوخته شده در آتش‌سوزی ۲۶ آبان ۱۳۸۹ و آتش‌سوزی ۲۴ تیر ۱۳۹۰ که در شکل (۵) نمایش داده شده‌است و داده‌های دیگری نظیر مدل رقومی ارتفاعی[1] منطقه، شبکه راه‌ها، رودخانه‌ها، کاربری اراضی، جنس خاک و مناطق مسکونی که در شکل (۶) نمایش داده شده‌است از سازمان نقشه‌برداری کل کشور و سازمان منابع طبیعی استان‌های خراسان شمالی، گلستان و سمنان تهیه شده‌است. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به کاربری اراضی و جنس خاک در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و شبکه راه‌ها و رودخانه‌ها در مقیاس ۱:۵۰۰۰ تهیه شده‌اند و مربوط به سال ۸۵ می‌باشند. همچنین داده‌های هواشناسی شامل ۵ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک نزدیک به منطقه مورد مطالعه به همراه مختصات مکانی آن‌ها، از طریق سازمان هواشناسی کشور بدست آمده است. این داده‌ها شامل حداکثر، حداقل و متوسط دما، میزان بارش، حداکثر سرعت باد و جهت عمده وزش باد می‌باشند. به دلیل این‌که مقادیر این فاکتورها به صورت دقیق برای تمام منطقه مورد مطالعه در اختیار نبود، برای کسب این مقادیر از درون‌یابی[2] به روش کریجینگ عمومی[3] با مدل نمایی، بهره گرفتیم که به‌عنوان نمونه، شکل (۷) این داده‌ها را برای تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ نمایش می‌دهد. نقشه‌های نمایش داده شده در قسمت آماده‌سازی داده‌ها، به‌عنوان نمونه بوده که فقط شکل‌های با توان تفکیک مکانی[4] ۳۰ متر نمایش داده شده‌اند.

با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه تهیه شده توسط سازمان نقشه برداری کشور با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر، لایه‌های اطلاعاتی شیب و جهت شیب با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر تولید شده است. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به مناطق مسکونی، راه‌ها و رودخانه‌ها دارای ساختار برداری[5] بودند. برای استفاده از این داده‌ها در الگوریتم‌های پیشنهادی این تحقیق، با استفاده از آنالیز فاصله اقلیدسی[6] در نرم‌افزار ArcGIS، لایه‌های رستری[7] با توان تفکیک مکانی ۳۰ متری تولید گردید. در این لایه‌ها، مقدار هر سلول بیان‌گر فاصله از نزدیک‌ترین منطقه مسکونی، جاده یا رودخانه است.

به‌دلیل کم بودن تعداد ایستگاه‌های هواشناسی نزدیک به منطقه، همان‌طور که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود، تعداد ۱۰۰۰ نقطه به‌صورت تصادفی با تراکم بیشتر در محدوده آتش در منطقه مورد مطالعه با توزیع یکنواخت تولید گردید. این کار به این علت صورت گرفت که روش GWR با تعداد نقاط بالا، نتیجه مطلوب‌تری را ارائه می‌کند.

[1] Digital Elevation Model (DEM)

[2] Interpolation
[3] Ordinary Kriging
[4] Positional Resolution
[5] Vector
[6] Euclidean Distance
[7] Raster

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

ب الف

شکل ۵: آتش‌سوزی‌های اتفاق افتاده در منطقه مورد مطالعه در تاریخ‌های الف) ۲۶ آبان ۱۳۸۹ و ب) ۲۴ تیر ۱۳۹۰

شکل ۶: لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در این تحقیق (الف) مناطق مسکونی، (ب) کاربری اراضی، (ج) مدل رقومی ارتفاعی منطقه، (د) رودخانه‌ها، (ه) شبکه راه‌ها و (و) جنس خاک

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

شکل ۷: لایه‌های اطلاعاتی تولید شده حاصل از درون‌یابی (الف) میزان بارندگی(mm)، (ب) جهت باد غالب، (ج) حداکثر سرعت باد(m/s)، (د) متوسط دما(°C)، (ه) حداقل دما(°C) و (و) حداکثر دما(°C) بین ایستگاه‌های هواشناسی نزدیک منطقه مورد مطالعه برای تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹

شکل ۸: نقاط تصادفی تولید شده در منطقه مورد مطالعه

۴-پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این تحقیق از محیط برنامه‌نویسی MATLAB برای مدلسازی گسترش آتش‌سوزی جنگل بر روی یک سیستم Core ™ i5 2.40 GHz ، RAM:4GB، ویندوز ۶۴ بیتی استفاده شد. ابتدا وابستگی ۱۴ فاکتور مختلف که در جدول (۱) ارائه شده‌اند بر آتش‌سوزی‌های جنگلی در مناطق مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌است. این مشاهدات به‌صورت دودویی (۱ برای آتش و ۰ برای غیر آتش) علاوه بر مختصات نقاط که برای محاسبه وزن‌های جغرافیایی لازم می‌باشند به‌عنوان دیگر ورودی‌های الگوریتم برای حل مسأله استفاده شدند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

جدول ۱: فاکتورهای مورد مطالعه در این تحقیق

شماره	فاکتور	شماره	فاکتور	شماره	فاکتور
۱	فاصله از رودخانه‌ها (m)	۶	ارتفاع (m)	۱۱	متوسط دما (°C)
۲	فاصله از جاده‌ها (m)	۷	مقدار شیب	۱۲	جهت باد غالب
۳	فاصله از مناطق مسکونی (m)	۸	جهت شیب	۱۳	حداکثر سرعت باد (m/s)
۴	جنس خاک	۹	حداکثر دما (°C)	۱۴	میزان بارندگی (mm)
۵	کاربری زمین	۱۰	حداقل دما (°C)		

پیش از اجرای الگوریتم، لازم است ابتدا همبستگی بین داده‌ها بررسی شود. بدین منظور از روابط (۲۲ و ۲۳) استفاده گردید [۴۲]:

$$\mathrm{Cov}(X,Y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})(Y_i-\bar{Y})}{n} \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$r = \frac{\mathrm{Cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

که در آن‌ها $\mathbf{Cov(X,Y)}$ کوواریانس دو مجموعه داده x و y، $\bar{\mathbf{X}}$ و $\bar{\mathbf{Y}}$ میانگین این دو مجموعه داده، $\mathbf{n}$ تعداد داده‌های هر مجموعه و $\mathbf{r}$ ضریب همبستگی بین دو مجموعه داده با انحراف معیارهای $\boldsymbol{\sigma_X}$ و $\boldsymbol{\sigma_Y}$ است. تمام مقادیر ضریب همبستگی بین ۰/۷- و ۰/۷ واقع است که نشان می‌دهد هیچ‌کدام از داده‌ها همبستگی قابل ملاحظه‌ای به سایر داده‌ها ندارد. بنابراین از همه آن‌ها در الگوریتم GWR استفاده گردید. شکل (۹) نمایشی از ماتریس همبستگی بین مجموعه داده‌های مورد استفاده در این مطالعه با ترتیبی مطابق جدول (۱) می‌باشد.

شکل ۹: نمایشی از ماتریس همبستگی بین مجموعه داده‌های الف) ۲۶ آبان ۱۳۸۹ و ب) ۲۴ تیر ۱۳۹۰

در الگوریتم GWR از هسته‌ی رابطه (۴) استفاده گردید و برای بهینه‌سازی پارامتر پهنای باند نیز روش اعتبارسنجی متقابل به‌کار گرفته شد. فاکتورها به همان ترتیبی که در جدول (۱) ارائه شده است، کروموزم‌های الگوریتم ژنتیک را تشکیل دادند. مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در این تحقیق نیز در جدول (۲) آمده است. پس از اجرای الگوریتم، مقدار R^2 برابر با ۰/۹۹۳۱ به دست آمد. ۸ فاکتور فاصله از مناطق مسکونی، جنس خاک، کاربری زمین، ارتفاع، مقدار شیب، جهت شیب، حداقل دما و جهت باد غالب با بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک با تابع هدف $1- R^2$ به‌عنوان فاکتورهای موثر تعیین شدند. شکل (۱۰) نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک با پارامترهای مذکور در جدول (۲) را نمایش می‌دهند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

جدول ۲: پارامترهای الگوریتم ژنتیک مورد استفاده

پارامتر	مقدار
اندازه جمعیت[1]	۱۰
تعداد نسل[2]	۱۰۰
نرخ ترکیب ضربی[3]	۰/۸
کسر مهاجرت[4]	۰/۲
فواصل مهاجرت[5]	۲۰
مقیاس (جهش گوسین)[6]	۰/۵
کاهش (جهش گوسین)[7]	۰/۷
تعداد نخبه[8]	۱

الف

ب

شکل ۱۰: (الف) بهترین مقدار و میانگین مقادیر تابع برازش و (ب) میانگین فاصله بین افراد هر نسل

[1] Population Size
[2] Number of Generations
[3] Crossover Rate
[4] Migration Fraction
[5] Migration Interval
[6] Scale (Gaussian Mutation)
[7] Shrink (Gaussian Mutation)
[8] Elite Count

حال با توجه به فاکتورهای مشخص شده به‌عنوان فاکتورهای موثر بر آتش‌سوزی، اقدام به مدلسازی گسترش آتش در منطقه مورد مطالعه می‌کنیم. ترکیب اتوماتای سلولی و روش‌های زنجیره مارکوف، MOLA و رگرسیون لجستیک سبب می‌شود که بتوان توسعه آتش را در هر لحظه مورد بررسی قرار داد. در الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش زنجیره مارکوف به همراه MOLA، از سه فیلتر همسایگی ۳×۳، ۵×۵ و ۷×۷ استفاده شده است که در شکل (۱۱) نمایش داده شده‌اند.

شکل ۱۱: فیلتر همسایگی: الف) ۳×۳، ب) ۵×۵، ج) ۷×۷

با توجه به ماهیت گسترش آتش‌سوزی جنگل، دو وضعیت برای سلول‌ها قابل تصور است، به بیان دیگر، سلول یا می‌تواند سالم بوده یا سوخته شده‌باشد و در حالتی که سوخته شده‌است قابل برگشت به وضعیت سالم نخواهد بود. برای پیاده‌سازی الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به همراه MOLA، با در نظر گرفتن نقطه معلوم برای شروع آتش‌سوزی و محدوده نهایی آتش‌سوزی، ماتریس انتقال و ماتریس احتمال تغییر وضعیت سلول‌ها را به‌دست می‌آوریم. با در نظر گرفتن فیلترهای همسایگی ۳×۳، ۵×۵ و ۷×۷ و اجرای زنجیره مارکوف به همراه MOLA، به هر سلول وضعیت مشخصی را اختصاص می‌دهیم.

برای بررسی میزان تأثیر توان تفکیک مکانی نقشه‌های مورد استفاده بر روی نتایج حاصل از مدلسازی گسترش آتش‌سوزی جنگل، فاکتورهای موثر بر آتش‌سوزی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

جنگل در قالب نقشه‌هایی با توان‌های تفکیک مکانی مختلف، تولید شد. سپس از این فاکتورها به‌عنوان ورودی الگوریتم پیشنهادی استفاده کردیم. جدول‌های (۳ و ۴) بیان‌گر شاخص کاپا و زمان اجرای حاصل از مدلسازی گسترش آتش‌سوزی جنگل با استفاده از الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به همراه MOLA برای فیلتر همسایگی ۳×۳ می‌باشد.

جدول ۳: شاخص کاپا و زمان اجرای حاصل از مدلسازی گسترش آتش‌سوزی جنگل با استفاده از الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به همراه MOLA برای فیلتر همسایگی ۳×۳ برای آتش‌سوزی در تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹

توان تفکیک مکانی(متر)	شاخص کاپا	زمان اجرا(دقیقه)
۱۵۰	۰/۷۸۸	۹
۱۲۰	۰/۸۳۳	۱۱
۹۰	۰/۸۶۴	۱۶
۶۰	۰/۸۷۷	۲۳
۳۰	۰/۸۸۸	۳۵
۲۰	۰/۸۹۱	۷۶
۱۰	۰/۸۹۳	۲۰۴
۵	۰/۸۹۴	۸۰۹

با توجه به جدول (۳)، توان‌های تفکیک مکانی بهینه برای آتش‌سوزی در تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ مقادیر ۳۰، ۶۰ و ۹۰ متر انتخاب شدند. با توجه به جدول (۴)، برای آتش‌سوزی در تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰ بدلیل کوچک بودن مساحت آتش گرفته، از توان‌های تفکیک مکانی ۵، ۱۰ و ۱۵ متری استفاده شد تا بتوان به دقت بهینه و مطلوب با توجه به زمان اجرای الگوریتم دست یافت. با توجه به شرایط و ضوابط فوق، در هر لحظه از زمان‌بندی اتوماتای سلولی، سلول‌های در حال سوختن بررسی شده و اثر آن بر سلول‌های همسایه، با توجه به قوانین انتقال محلی، مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت به هر سلول عددی به‌صورت ۰ یا ۱ که به ترتیب بیان‌گر سالم بودن یا سوختن سلول است نسبت می‌دهد.

جدول ۴: شاخص کاپا و زمان اجرای حاصل از مدلسازی گسترش آتش‌سوزی جنگل با استفاده از الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به همراه MOLA برای فیلتر همسایگی ۳×۳ برای آتش‌سوزی در تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰

توان تفکیک مکانی(متر)	شاخص کاپا	زمان اجرا(دقیقه)
۹۰	۰/۶۸۱	۱۱
۶۰	۰/۷۲۳	۱۳
۳۰	۰/۷۸۸	۱۷
۱۵	۰/۸۳۹	۲۳
۱۰	۰/۸۵۵	۳۷
۵	۰/۸۶۶	۶۱
۳	۰/۸۶۹	۱۴۳
۱	۰/۸۷۰	۳۲۵

مدت زمان آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه در تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹، ۲۹ روز بوده و مساحت ۸۷۰ هکتار از جنگل‌ها آتش گرفته است. آتش‌سوزی در تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰، یک روز به طول انجامیده و مساحت ۵۸ هکتار از جنگل‌ها آتش گرفته است. با در نظر گرفتن فیلترهای همسایگی و توان‌های تفکیک مکانی مختلف، می‌توان تعداد تکرارهای مورد انتظار اتوماتای سلولی را برای رسیدن به محدوده نهایی گسترش آتش‌سوزی به‌دست آورد [۲۰]. به‌عنوان نمونه برای منطقه مورد مطالعه در تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹، جهت آتش گرفتن یک سلول ۹۰ متری به حدود ۴۰ دقیقه زمان نیاز است که با در نظر گرفتن پنجره همسایگی ۵×۵، نیاز به ۱۶ ساعت زمان برای سوختن کامل این پنجره همسایگی است. با این تفاسیر با گام زمانی ۱۶ ساعت نیاز به ۴۴ تکرار برای رسیدن به محدوده واقعی آتش است. در جدول (۵)، تعداد تکرارهای مورد نیاز اتوماتای سلولی برای هر دو منطقه مورد مطالعه با توجه به فیلترهای همسایگی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

و توان‌های تفکیک مکانی مختلف مشخص شده است. نقشه‌های مدلسازی گسترش آتش‌سوزی جنگل حاصل از اجرای الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به همراه MOLA برای تاریخ‌های ۲۶ آبان ۱۳۸۹ و ۲۴ تیر ۱۳۹۰ ایجاد شدند. در این مدلسازی‌ها از فیلترهای همسایگی ۳×۳، ۵×۵ و ۷×۷ و همچنین از توان‌های تفکیک مکانی بهینه استفاده گردید که شکل‌های (۱۲ و ۱۳) به‌عنوان نمونه، این نقشه‌ها را با فیلتر همسایگی ۳×۳ نمایش می‌دهند.

جدول ۵: تعداد تکرارهای مورد نیاز اتوماتای سلولی برای هر دو منطقه مورد مطالعه با توجه به فیلترهای همسایگی و توان‌های تفکیک مکانی مختلف

فیلتر همسایگی	توان تفکیک مکانی(متر)	تعداد تکرار برنامه
۳×۳	۹۰ (منطقه اول)	۱۲۷
	۶۰ (منطقه اول)	۳۰۷
	۳۰ (منطقه اول)	۱۳۰۵
	۱۵ (منطقه دوم)	۳۲۳
	۱۰ (منطقه دوم)	۷۲۶
	۵ (منطقه دوم)	۲۹۰۳
۵×۵	۹۰ (منطقه اول)	۴۴
	۶۰(منطقه اول)	۱۰۲
	۳۰(منطقه اول)	۳۴۸
	۱۵ (منطقه دوم)	۱۰۳
	۱۰ (منطقه دوم)	۲۴۰
	۵ (منطقه دوم)	۷۲۰
۷×۷	۹۰ (منطقه اول)	۲۲
	۶۰ (منطقه اول)	۵۱
	۳۰ (منطقه اول)	۲۱۸
	۱۵ (منطقه دوم)	۵۴
	۱۰ (منطقه دوم)	۱۲۱
	۵ (منطقه دوم)	۴۸۴

الف

ب

ج

شکل ۱۲: نقشه مدلسازی گسترش آتش حاصل از اجرای الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به‌همراه MOLA، برای تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ با فیلتر همسایگی۳×۳ و توان‌های تفکیک مکانی (الف) ۳۰ متر، (ب) ۶۰ متر و (ج) ۹۰ متر

جهت تعیین میزان دقت و صحت پیش‌بینی‌های حاصل از مدلسازی، از شاخص کاپا، دقت کلی و شاخص عامل نسبی استفاده شده‌است. با توجه به اطلاعات موجود در

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

ماتریس‌های خطا، شاخص کاپا، دقت کلی و شاخص عامل نسبی برای مدلسازی با الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به همراه MOLA، با فیلترهای همسایگی و توان‌های تفکیک مکانی مختلف در جدول‌های (۶ و ۷) آمده است.

شکل ۱۳: نقشه مدلسازی گسترش آتش حاصل از اجرای الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به همراه MOLA، برای تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰ با فیلتر همسایگی۳×۳ و توان‌های تفکیک مکانی (الف) ۵ متر، (ب) ۱۰ متر و (ج) ۱۵ متر

جدول ۶: شاخص‌کاپا، دقت‌کلی و شاخص عامل نسبی برای مدلسازی با الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به همراه MOLA با فیلترهای همسایگی و توان‌های تفکیک مکانی مختلف برای تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹

توان تفکیک مکانی (متر)	فیلتر همسایگی	شاخص کاپا	دقت کلی	شاخص عامل نسبی
۳۰	۳×۳	۰/۸۸۸	۰/۹۵۱	۰/۸۹۰
	۵×۵	۰/۸۸۵	۰/۹۵۰	۰/۸۸۸
	۷×۷	۰/۸۸۳	۰/۹۴۹	۰/۸۸۸
۶۰	۳×۳	۰/۸۷۷	۰/۹۴۸	۰/۸۸۳
	۵×۵	۰/۸۷۴	۰/۹۴۶	۰/۸۸۱
	۷×۷	۰/۸۷۳	۰/۹۴۶	۰/۸۸۰
۹۰	۳×۳	۰/۸۶۴	۰/۹۴۲	۰/۸۷۰
	۵×۵	۰/۸۶۴	۰/۹۴۲	۰/۸۶۹
	۷×۷	۰/۸۶۳	۰/۹۴۱	۰/۸۶۷

جدول ۷: شاخص‌کاپا، دقت‌کلی و شاخص عامل نسبی برای مدلسازی با الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به همراه MOLA با فیلترهای همسایگی و توان‌های تفکیک مکانی مختلف برای تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰

توان تفکیک مکانی (متر)	فیلتر همسایگی	شاخص کاپا	دقت کلی	شاخص عامل نسبی
۵	۳×۳	۰/۸۶۶	۰/۸۸۰	۰/۹۱۸
	۵×۵	۰/۸۶۴	۰/۸۷۸	۰/۹۱۷
	۷×۷	۰/۸۶۰	۰/۸۷۴	۰/۹۱۵
۱۰	۳×۳	۰/۸۵۵	۰/۸۷۱	۰/۹۱۱
	۵×۵	۰/۸۵۱	۰/۸۶۸	۰/۹۰۹
	۷×۷	۰/۸۴۲	۰/۸۶۲	۰/۹۰۶
۱۵	۳×۳	۰/۸۳۹	۰/۸۵۸	۰/۸۹۹
	۵×۵	۰/۸۲۶	۰/۸۴۸	۰/۸۹۴
	۷×۷	۰/۸۲۰	۰/۸۴۳	۰/۸۹۲

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

برای مقایسه الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به همراه MOLA، اقدام به پیاده‌سازی الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش رگرسیون لجستیک کردیم. در این روش با در نظر گرفتن نقشه فاکتورهای موثر بر آتش‌سوزی، محدوده آتش‌سوزی و اجرای روش رگرسیون لجستیک، ماتریس احتمال تغییر وضعیت سلول‌ها را به‌دست آوردیم. سپس با استفاده از این ماتریس، نقشه احتمال تغییر وضعیت سلول‌ها را در توان‌های تفکیک مکانی مختلف همان‌طور که در شکل‌های (۱۴ و ۱۵) نمایش داده شده است، ایجاد کردیم. این نقشه‌ها میزان تمایل و استعداد هر سلول برای سوختن را بیان می‌کند و به هر سلول عددی بین ۰ تا ۱ نسبت می‌دهد که ۰ بیان‌گر عدم تمایل به سوختن و ۱ بیانگر تمایل و استعداد کامل سلول برای سوختن است. از این نقشه به‌عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در قوانین انتقال اتوماتای سلولی استفاده شد.

شکل ۱۴: نقشه احتمال تغییر وضعیت سلول‌ها حاصل از رگرسیون لجستیک برای تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ با توان‌های تفکیک مکانی الف) ۳۰ متر، ب) ۶۰ متر و ج) ۹۰ متر

شکل ۱۵: نقشه احتمال تغییر وضعیت سلول‌ها حاصل از رگرسیون لجستیک برای تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰ با توان‌های تفکیک مکانی الف) ۵ متر، ب) ۱۰ متر و ج) ۱۵ متر

با توجه به اینکه پیاده‌سازی با استفاده از فیلتر همسایگی ۳×۳ دارای دقت بالاتری نسبت به دو فیلتر همسایگی دیگر می‌باشد، برای مقایسه الگوریتم‌های پیشنهادی از این فیلتر همسایگی کردیم. اتوماتای سلولی نیز با همان ویژگی‌های به‌کار رفته در روش مارکوف به همراه MOLA، استفاده شد. شکل‌های (۱۶ و ۱۷)، نقشه‌های مدلسازی گسترش آتش حاصل از اجرای الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش رگرسیون لجستیک، با توان‌های تفکیک مکانی مختلف را برای تاریخ‌های ۲۶ آبان ۱۳۸۹ و ۲۴ تیر ۱۳۹۰ نشان می‌دهند. جدول‌های (۸ و ۹) نیز دقت حاصل از مدلسازی با الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش رگرسیون لجستیک با توان‌های تفکیک مکانی مختلف را برای هر دو منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

الف ب ج

شکل ۱۶: نقشه مدلسازی گسترش آتش حاصل از اجرای الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش رگرسیون لجستیک، برای تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ با فیلتر همسایگی۳×۳ و توان‌های تفکیک مکانی (الف) ۳۰ متر، (ب) ۶۰ متر و (ج) ۹۰ متر

الف ب ج

شکل ۱۷: نقشه مدلسازی گسترش آتش حاصل از اجرای الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش رگرسیون لجستیک، برای تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰ با فیلتر همسایگی۳×۳ و توان‌های تفکیک مکانی (الف) ۵ متر، (ب) ۱۰ متر و (ج) ۱۵ متر

جدول ۸: شاخص‌کاپا، دقت‌کلی و شاخص عامل نسبی حاصل از مدلسازی با الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش رگرسیون لجستیک با توان‌های تفکیک مکانی مختلف برای تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹

توان تفکیک مکانی(متر)	شاخص کاپا	دقت کلی	شاخص عامل نسبی
۳۰	۰/۸۳۶	۰/۹۳۳	۰/۸۷۶
۶۰	۰/۸۲۲	۰/۹۲۷	۰/۸۶۶
۹۰	۰/۷۹۲	۰/۹۱۷	۰/۸۴۰

جدول ۹: شاخص‌کاپا، دقت‌کلی و شاخص عامل نسبی حاصل از مدلسازی با الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش رگرسیون لجستیک با توان‌های تفکیک مکانی مختلف برای تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰

توان تفکیک مکانی(متر)	شاخص کاپا	دقت کلی	شاخص عامل نسبی
۵	۰/۸۴۹	۰/۸۶۳	۰/۹۲۶
۱۰	۰/۸۲۷	۰/۸۴۵	۰/۹۱۴
۱۵	۰/۸۱۵	۰/۸۳۶	۰/۹۰۸

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

با توجه به جدول‌های (۶ و ۷) و شکل‌های (۱۲ و ۱۳)، ملاحظه می‌شود که برای الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به همراه MOLA، هرچه فیلتر همسایگی کوچک‌تر شده‌است، دقت مدلسازی بهبود می‌یابد. در یک فیلتر همسایگی یکسان نیز، هرچه توان تفکیک مکانی کوچک‌تر می‌شود، دقت مدلسازی بهبود می‌یابد. بهترین دقت در مدلسازی گسترش آتش‌سوزی جنگل با این روش برای تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹، استفاده از توان تفکیک مکانی ۳۰ متر و فیلتر همسایگی ۳×۳ بود. برای آتش‌سوزی تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰ نیز استفاده از توان تفکیک مکانی ۵ متر و فیلتر همسایگی ۳×۳، دقت بهتری را ارائه داد. پیاده‌سازی این روش در منطقه شماره یک نسبت به منطقه شماره دو، دارای دقت بهتری بوده و شاخص کاپا حدود ۲ درصد بهتر از منطقه شماره دو می‌باشد و نشان‌دهنده انطباق بیشتر پیاده‌سازی این روش با این منطقه است. با توجه به شکل‌های (۱۶ و ۱۷) و جدول‌های (۸ و ۹)، در پیاده‌سازی الگوریتم اتوماتای سلولی با رگرسیون لجستیک نیز با کوچک شدن توان تفکیک مکانی، دقت مدلسازی بهبود می‌یابد. بهترین دقت در این روش، برای تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ استفاده از توان تفکیک مکانی ۳۰ متر و برای تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰ استفاده از توان تفکیک مکانی ۵ متر می‌باشد. پیاده‌سازی این روش در منطقه شماره دو نسبت به منطقه شماره یک، دقت بالاتری را نشان می‌دهد بطوری که شاخص کاپا حدود ۱ درصد بهتر از منطقه شماره یک می‌باشد. در مقایسه دو روش پیشنهادی در این تحقیق، ملاحظه می‌شود که دقت پیاده‌سازی الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش زنجیره مارکوف به همراه MOLA، برای تمام توان‌های تفکیک مکانی، دارای دقت بالاتری نسبت به پیاده‌سازی الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش رگرسیون لجستیک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی شد ابتدا فاکتورهای موثر بر آتش‌سوزی‌های جنگل گلستان را شناسایی نمائیم. برای این منظور از روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) در حالت وزن‌دهی مکعبی سه‌گانه در ترکیب با الگوریتم ژنتیک استفاده شد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، ۸ فاکتور فاصله از مناطق مسکونی، جنس خاک، کاربری زمین، ارتفاع، مقدار شیب، جهت شیب، حداقل دما و جهت باد غالب، به‌عنوان فاکتورهای موثر تعیین شدند. در ادامه، مدلسازی گسترش آتش‌سوزی جنگل با استفاده از الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به همراه MOLA، برای دو آتش‌سوزی که در این منطقه رخ داده است انجام شد. برای بررسی تأثیر توان تفکیک مکانی بر روی نتایج حاصل از مدلسازی، از توان‌های تفکیک مکانی مختلف برای هر دو آتش‌سوزی استفاده شد تا بتوان به توان تفکیک مکانی مناسب دست یافت. توان تفکیک مکانی مناسب، مقداری است که هم سبب شود دقت حاصل از مدلسازی و هم زمان لازم برای اجرای الگوریتم، مناسب باشد. با انجام بررسی‌های لازم در این زمینه، با توجه به جدول‌های (۳ و ۴)، به این نتیجه رسیدیم که مقادیر ۳۰، ۶۰ و ۹۰ متری برای منطقه آتش‌سوزی در تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ و مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ متری برای منطقه آتش‌سوزی در تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰ به‌عنوان توان تفکیک مکانی مناسب انتخاب شوند. همچنین برای مشاهده تأثیرات فیلترهای همسایگی مختلف بر روی خروجی حاصل از اجرای الگوریتم‌های پیشنهادی نیز از سه فیلترهای همسایگی ۳×۳، ۵×۵ و ۷×۷ بهره گرفتیم. با توجه به نتایج حاصل از مدلسازی عددی گسترش آتش‌سوزی جنگل در این منطقه که در جدول‌های (۶ و ۷) آمده است، می‌توان به این نتیجه رسید که در استفاده از الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به همراه MOLA، فیلتر همسایگی ۳×۳ دارای دقت و صحت بهتری نسبت به

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

سایر فیلترهای همسایگی است. در این روش، به‌کارگیری توان تفکیک مکانی ۳۰ متر برای تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ نسبت به سایر توان‌های تفکیک مکانی، نتیجه مطلوب‌تری را ارائه می‌دهد. شاخص کاپا، دقت کلی و شاخص عامل نسبی در این حالت به ترتیب برابر با ۸۸/۸ درصد، ۹۵/۱ درصد و ۸۹/۰ درصد به دست آمدند. برای تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰ نیز استفاده از این روش با به‌کارگیری توان تفکیک مکانی ۵ متر نسبت به سایر توان‌های تفکیک مکانی، نتیجه بهتری ارائه می‌دهد و شاخص کاپا، دقت کلی و شاخص عامل نسبی در این حالت به ترتیب برابر با ۸۶/۶ درصد، ۸۸/۰ درصد و ۹۱/۸ درصد است. دقت پیاده‌سازی این روش در منطقه شماره یک نسبت به منطقه شماره دو، بالاتر می‌باشد بطوری که شاخص کاپا به‌طور میانگین، حدود ۲ درصد بهتر از شاخص کاپا در منطقه شماره دو می‌باشد. این مطلب نشان‌دهنده دقت و صحت بهتر در پیاده‌سازی این الگوریتم در منطقه یک بوده و انطباق بیشتری با واقعیت اتفاق افتاده در منطقه دارد. از الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش رگرسیون لجستیک برای مقایسه نتایج حاصل استفاده شد. در پیاده‌سازی الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش رگرسیون لجستیک نیز بهترین دقت برای تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹، مربوط به توان تفکیک مکانی ۳۰ متر بوده که شاخص کاپا، دقت کلی و شاخص عامل نسبی در این حالت به ترتیب برابر با ۸۳/۶ درصد، ۹۳/۳ درصد و ۸۷/۶ درصد به‌دست آمد. برای تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰ نیز استفاده از این روش با به‌کارگیری توان تفکیک مکانی ۵ متر نسبت به سایر توان‌های تفکیک مکانی، نتیجه بهتری ارائه می‌دهد. شاخص کاپا، دقت کلی و شاخص عامل نسبی در این حالت به ترتیب برابر با ۸۴/۹ درصد، ۸۶/۳ درصد و ۹۲/۶ درصد است. پیاده‌سازی این روش در منطقه شماره دو نسبت به منطقه شماره یک، دقت بالاتری را نشان می‌دهد بطوری که شاخص کاپا به‌طور میانگین حدود ۱ درصد بهتر از منطقه شماره یک می‌باشد. در هر دو الگوریتم پیشنهادی، استفاده از توان تفکیک مکانی‌کوچک‌تر، نتیجه بهتری را ارائه می‌دهد و همچنین استفاده از فیلترهای همسایگی کوچک‌تر دارای دقت مطلوب‌تری نسبت به فیلترهای همسایگی بزرگ‌تر است. به عبارت دیگر، استفاده از داده‌هایی با توان تفکیک مکانی بالاتر به‌عنوان ورودی الگوریتم‌های پیشنهادی، دارای نتایج با دقت بهتری است. همچنین استفاده از فیلتر همسایگی کوچک‌تر سبب می‌شود تا الگوریتم پیشنهادی بیشتر به جزئیات مسئله پرداخته و در نتیجه دقت بهتری را حاصل نماید. در مقایسه دو الگوریتم پیشنهادی این تحقیق، ملاحظه می‌شود که پیاده‌سازی الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری روش مارکوف به همراه MOLA برای تمام توان‌های تفکیک مکانی، دارای دقت بالاتری نسبت به‌پیاده‌سازی الگوریتم اتوماتای سلولی با به‌کارگیری رگرسیون لجستیک، در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که روش مارکوف به همراه MOLA زمانی که با اتوماتای سلولی ترکیب می‌شود، دارای قدرت پیش‌بینی و مدلسازی بالاتری نسبت به روش رگرسیون لجستیک است.

در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود تعداد فاکتورهای انسانی مورد استفاده به‌عنوان ورودی الگوریتم نظیر تعداد گردشگران، سطح تحصیلی و فرهنگی افزایش یابد. استفاده از روش‌های هوشمند نظیر الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی برای کالیبره کردن قوانین انتقال اتوماتای سلولی و مقایسه نتایج با یکدیگر، می‌تواند ما را در راستای بهبود نتایج یاری کند.

مراجع

[1] Y. Bergeron, S. Gauthier, M. Flannigan, and V. Kafka, “Fire regimes at the transition between mixed wood and coniferous boreal forest in Northwestern Quebec”, Ecology,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

Vol.85, No.7, PP. 1916–1932, 2004.

[2] P. F. Hessburg, J. K. Agee, and J. F. Franklin, "Dry forests and wildland fires of the inland Northwest USA: Contrasting the landscape ecology of the pre-settlement and modem eras", For. Ecol. Manage. Vol.211 , No.1 –2, PP. 117–139, 2005.

[3] J. Martinez-Fernandez, E. Chuvieco, and N. Koutsias, "Modeling long-term fire occurrence factors in Spain by accounting for local variations with geographically weighted regression", Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol.13, PP. 311 – 327, 2013.

[4] B. G. Dickson, J. W. Prather, Y. Xu, H. M. Hampton, E. N. Aumack, and T. D. Sisk, "Mapping the probability of large fire occurrence in northern Arizona, USA", Landscape Ecology, Vol.21 , PP. 747–761, 2006.

[5] D. E. Mercer, and J. P. Prestemon, "Comparing production function models for wildfire risk analysis in the wildland-urban interface", For. Policy Economics, Vol.7, No.5, PP. 782–795, 2005.

[6] C. M. Countryman, "The fire environment concept", USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, General Technical Report PSW-7. Berkeley, CA, 1972.

[7] M. A. Moritz, J. E. Keeley, E. A. Johnson, and A. A. Schaffner, "Testing a basic assumption of shrubland fire management: How important is fuel age?", Frontiers Ecol. Environm. Vol.2, PP. 67–72, 2004.

[8] D. C. Odion, E. J. Frost, J. R. Strittholt, H. Jiang, D. A. Della-Salla, and M. A. Moritz, "Patterns of fire severity and forest conditions in the western Klamath Mountains, north-western California" Conservation Biology, Vol.18, PP. 927–936, 2004.

[9] J. Glasa, and L. Halada, "On elliptical model for forest fire spread modeling and simulation", Mathematics and Computers in Simulation, vol. 82, 76-88, 2008.

[10] S. Oliveira , F. Oehler, J. San-Miguel-Ayanz, A. Camia, and J. Pereira, "Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest", Forest Ecology and Management, 275, 117-129, 2012.

[11] CE. Van Wagner, "Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System", Canadian Forest Service, vol. 35, 333-339, 1987.

[12] [12] R.C. Rothermel, "A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels", USDA Forest Service Gen Tech Rep INT, pp. Res Pap INT-115, 1972.

[13] I. Karafyllidis, and A. Thanailakis, "A model for prediction forest fire spreading using cellular autómata", Ecological Modelling, vol. 99, pp. 87-97, 1997.

[14] T. Ghisu, B. Arca, G.Pellizzaro, and P. Duce, "An Improved Cellular Automata for Wildfire Spread", Procedia Computer Science, Volume 51, Pages 2287–2296, 2015.

[15] T. Ghisu, B. Arca, G.Pellizzaro, and P. Duce, "An optimal Cellular Automata algorithm for simulating wildfi re spread", Environmental Modelling & Software, Volume 71, Pages 1–14, 2015.

[16] Z. Yongzhong, Z.D. Feng, H. Tao, W. Liyu, L. Kegong, and D. Xin, "Simulating wildfire spreading processes in spatially heterogeneous landscapes using an improved cellular automaton model", IGARSS'04, Proceedings of the 2004 IEEE International, Vol. 5, 3371–3374, 2004.

[17] A. Hernández Encinas, L. Hernández Encinas, S. Hoya White, A. Martín del Rey, and G. Rodríguez Sánchez, "Simulation of forest fire fronts using cellular autómata", Advances in Engineering Software, vol. 38, pp. 372–378, 2007.

[18] S. Yassemi, S. Dragicevic, and M. Schmidt, "Design and implementation of an integrated GIS-based celular automata model to characterize forest fire behaviour",

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

ecological modelling 2I0, 71–84, 2008.

[19] C. Brun, T. Margalef, and A. Cort' es, "Coupling Diagnostic and Prognostic Models to a Dynamic Data Driven Forest Fire Spread Prediction System", Procedia Computer Science, vol. 18, 1851-1860, 2013.

[20] T. Ghaemi Rad, "Review and evaluate different approaches to simulate forest fire spreading using celular automata", M.Sc. Thesis in Geo-Spatial Information System, K.N.Toosi University of Technology, 2014.

[21] H. Gazmeh, "Modelling Forest Fire Spread using Cellular Automata", Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.) in GIS Department, K.N.Toosi University of Technology, 2012.

[22] W. R. Tobler, "A computer movie simulating urban growth in the Detroit region", Economic Geography, Vol.46, No.2, PP. 234-24, 1970.

[23] D. P. McMillen, and J. F. McDonald, "Locally weighted maximum likelihood estimation: Monte Carlo evidence and an application", Advances in Spatial Science, pp 225-239, 1998.

[24] C. Brunsdon, S. Fotheringham, and M. Charlton, "Geographically weighted regression – modelling spatial non-stationarity", The Statistician, Vol.47, No.3, PP. 431-443, 1998.

[25] S. Shekhar, and H. Xiong, "Encyclopedia of GIS", Springer Science and Business Media, 2008.

[26] M. Charlton, and A. S. Fotheringham, "Geographically Weighted Regression", White Paper. Kildare, Ireland: National Centre for Geocomputation, National University of Ireland, Maynooth, 17, 2009.

[27] M. Hasanlou, and F. Samadzadegan, "ICA/PCA base genetically band selection for classification of Hyperspectral images", Asian Conference on Remote Sensing, presented at the 31st, 2010.

[28] J. McCall, "Genetic algorithms for modelling and optimisation", Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 184, pp. 205-222, 2005.

[29] C. Lett, C. Silber, and N. Barret, "Comparison of a cellular automata network and an individual-based model for the simulation of forest dynamics", Ecological Modeling, 121: 277- 293, 1999.

[30] S. Wolfram, "Universality and complexity in cellular automata", Physica D: Nonlinear Phenomena, Vol. 10, Pages 1-35, 1984.

[31] W. Li, "Markov chain random filds for estimation of categorical variables", Mathematical Geology, Vol. 39, 321-335, 2007.

[32] A. Papoulis, "Probability, random variables and stochastic", McGraw-Hill europe, 97 pp, 2002.

[33] J. J. Arsanjani, M. Helbich, and E. de Noronha Vaz, "Spatiotemporal simulation of urban growth patterns using agent-based modeling: the case of Tehran", Cities, Vol. 32, pp. 33-42, 2013.

[34] M. R. Muller, and J. Middleton, "A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada", Landscape Ecology, Vol. 9, pp. 151 -157, 1994.

[35] L. Sang, C. Zhang, J. Yang, D. Zhu, and W. Yun, "Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA–Markov model", Mathematical and Computer Modelling, Vol. 54, 938–943, 2011.

[36] H. Askarian Omran, and P. Pahlavani, "Using of Markov Chain, MOLA, and Neighborhood filter for developing and increasing the efficiency of Logistic Regression to predict multiple land-use changes, a case study: Tehran", Engineering Journal of Geospatial Information Technology, Vol. 3, 89–109, 2015.

[37] S. J. Carver, "Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems", International Journal of Geographical Information Science, Vol. 5,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

pp. 321 -339, 1991.

[38] J. R. Eastman, H. Jiang, and J. Toledano, "Multi-criteria and multi-objective decisión making for land allocation using GIS", in Multicriteria analysis for land-use management, ed: Springer, Vol. 9, pp. 227-251, 1998.

[39] I. Ruczinski, C. Kooperberg, and M. LeBlanc, “Logic Regression”, Jurnal of Computational and Graphical statistics, Vol. 12, 475-511, 2003.

[40] D. G. Kleinbaum, and M. Klein, “Logistic regression: a self-learning text”, Springer Science & Business Media, 2010.

[41] A. Tayyebi, P. C. Perry, and A. H. Tayyebi, “Predicting the expansion of an urban boundary using spatial logistic regression and hybrid raster–vector routines with remote sensing and GIS”, International Journal of Geographical Information Science, Vol. 28, pp. 639-659, 2014.

[42] P. Dale. “Mathematical Techniques in GIS, Second Edition”, CRC Press, 2014.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.5, No.3, Autumn 2017

Modeling the spreading of forest fire based on a cellular automata using the markov chain and MOLA with a neighborhood filter

Parham Pahlavani *[1], Hamid Reza Sahraiian [2], Amin Raei [3]

1- Assisstant professor at School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.
2- MSc student of GIS at School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.
3- PhD student of GIS at School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

Abstract

Nowadays, to reduce the damages and high costs of forest fire, there is a need for identifying the factors affecting forest fire, modeling the spread of the fire, as well as specifying the actions to extinguish forest fire. In this research, we tried to identify the biophylsical and human factors affecting spread of the fire in a study area using the geographically weighted regression (GWR) integrated with a genetic algorithm. Subsequently, spread of the forest fire was modeled using the cellular automata (CA), markov chain, and multi-objective land allocation (MOLA) with various neighborhood filters for calibration of transition rules of the CA. Moreover, a combination of the CA and logistic regression was used to compare with the results of the method mentioned above. Results showed that for the fire that happened on the study area on November 17, 2010, the proposed CA algorithm using Markov chain and MOLA with a 3×3 neighborhood filter and 30 m pixel size is more precise than those of the other neighborhood filters and pixel sizes. In this case, the kappa index, the overall accuracy, and the relative operating characteristic (ROC) were equalled to 88.8 %, 95.1 %, and 89.0 %, respectively. Also, comparison of two proposed methods of this research indicated that the CA algorithm using the Markov chain and MOLA reached more precise and accurate results than those achieved by the CA algorithm using the logistic regression.

Key words:. Spreading of Forest Fire, Geographically Weighted Regression, Cellular Automata, Markov Chain, MOLA, Logistic Regression

Correspondence Address: School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
Tel: 021-61114524.
Email : pahlavani @ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.99]