

## ارائه روشی بر مبنای اتوماتای سلولی برای مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی در جنگل‌های پارک ملی گلستان

پرهام پهلوانی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا صحرائیان<sup>۲</sup> و بهناز بیگدلی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.  
(pahlavani@ut.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران. (sahraian@ut.ac.ir)

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران. (bigdeli@shahroodut.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۰۸

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۷/۲۹

### چکیده

در این پژوهش عامل‌های مؤثر بر آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان مشخص شد و سپس با استفاده از این عامل‌ها، مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل بر مبنای اتوماتای سلولی انجام شد. برای تعیین عامل‌های مؤثر بر آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان، از رگرسیون چندگانه خطی به همراه الگوریتم ژنتیک استفاده شد. برای بررسی مقدار تأثیر توان تفکیک مکانی نقشه‌های مورد استفاده بر روی نتایج حاصل از مدل‌سازی، عامل‌های مؤثر در توان‌های تفکیک مکانی مختلف تولید می‌شوند و از این داده‌ها به‌عنوان ورودی الگوریتم پیشنهادی، استفاده شد. همچنین از فیلترهای همسایگی  $3 \times 3$ ،  $5 \times 5$  و  $7 \times 7$  برای بررسی تأثیر فیلتر همسایگی در فرآیند توسعه آتش‌سوزی جنگل به‌کار گرفته شد. برای مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان از اتوماتای سلولی استفاده می‌شود که برای کالیبره کردن آن از الگوریتم بهینه‌سازی زنبورعسل، بهره گرفته شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم پیشنهادی با فیلتر همسایگی  $3 \times 3$  دارای دقت بالاتری نسبت به دیگر فیلترهای همسایگی است. در بهترین حالت شاخص کاپا، دقت کلی و شاخص عامل نسبی به ترتیب برابر با  $0/92$ ،  $0/96$  و  $0/94$  به‌دست آمده است که این نتایج برای آتش‌سوزی تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی زنبورعسل، آتش‌سوزی جنگل، رگرسیون چندگانه خطی.

## مقدمه

(2008) Ntaimo مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل را با روش مشخصات سیستم رویداد گسسته انجام داد که بر پایه تقسیم جنگل به مناطق کوچکی به نام سلول بود. Bodrožic و همکاران (2004) توسعه آتش‌سوزی جنگل را با استفاده از اتوماتای سلولی و به‌کارگیری عامل‌های پوشش گیاهی و شرایط باد، مدل‌سازی کرد. Encinas و همکاران (2007) مدل پیشنهادی (Karafyllidis and Thanailakis, 1997) را بهبود داده و مدل اتوماتای سلولی را بر پایه منطقه سوخته کسری ارائه داد. ایشان با ارائه سلول‌های شش‌ضلعی، ناهمگونی بین سلول‌های همسایه را از بین برده و برای هر سلول مرکزی، شش سلول در اطراف آن با تأثیر یکسان تعریف کرد. ایشان عامل‌های توپوگرافی، باد و نرخ توسعه آتش‌سوزی جنگل را به‌عنوان عامل‌های مؤثر بر آتش‌سوزی در نظر گرفت. Alexandridis و همکاران (2008) برای مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی، مدلی بر پایه اتوماتای سلولی و استفاده از عامل‌هایی مانند نوع و تراکم پوشش گیاهی، سرعت و جهت باد، توپوگرافی و پدیده لکه‌ای ارائه داد. Wang و همکاران (2014) توسعه آتش‌سوزی-های مهیب در آمریکا را با استفاده از مدل اتوماتای سلولی و ابعاد واقعی آتش‌سوزی، مورد بررسی قرار داد. در این راستا، داده‌های سری زمانی ۳۱ آتش‌سوزی مهیب اتفاق افتاده در آمریکا در سال ۲۰۱۲ جمع‌آوری شد. Ghisu و همکاران (2015) مدلی بر پایه اتوماتای سلولی ارائه داد و برای بهبود نتایج حاصل از این مدل، از روش‌های بهینه‌سازی عددی استفاده کرد. Jellouli و همکاران (2016) با استفاده از عامل‌هایی مانند تراکم پوشش گیاهی، رطوبت، باد و ارتفاع به ارائه مدلی بر اساس اتوماتای سلولی پرداخت. ایشان با به‌کارگیری داده‌های ترکیبی تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی سطح زمین، سناریوهای مختلفی را در منطقه مورد

از جمله مهم‌ترین منابع کره زمین، جنگل‌ها هستند که عملکرد آنها نقش اساسی در حفظ تعادل اکولوژیکی دارد. آتش‌سوزی، قسمت جدانشدنی بیشتر اکوسیستم‌های جنگلی بوده و به‌عنوان عامل اکولوژیکی تخریب و بازسازی جنگل محسوب می‌شود، اما عدم کنترل آن می‌تواند خسارات اقتصادی و زیست‌محیطی شدیدی ایجاد کند (Ruffault and Brun et al., 2013, Mouillot, 2017). امروزه آتش‌سوزی‌های وسیع در جنگل‌ها به دلیل اثرهای مخرب آن، یکی از بحران‌های زیست‌محیطی تلقی می‌شود. آتش‌سوزی‌های شدید جنگل در مقیاس وسیع می‌تواند بر حاصلخیزی جنگل، ساختار پوشش گیاهی، ذخیره کربن اکوسیستم، افزایش احتمال فرسایش خاک و هجوم گونه‌های گیاهی خارجی اثر بگذارد (Shokri et al., 2017, 2017, Hanes et al., 2017). بنابراین ارائه مدل‌هایی که بتوانند رفتار و نحوه توسعه آتش‌سوزی را مدل‌سازی کنند، ضروری به‌نظر می‌رسد. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان به پهنه‌بندی عرصه‌های جنگلی از نظر خطر توسعه آتش و وسعت سطح دچار آتش‌سوزی پرداخت (Woo et al., 2017). این مدل‌ها می‌توانند فرآیند آتش‌سوزی را در طی زمان‌های مختلف پیش کرده و به ارزیابی نقش عامل‌های مختلف محیطی تأثیرگذار بر آتش‌سوزی بپردازند و همچنین به کمک این مدل‌ها می‌توان نحوه تخصیص امکانات به مناطق آتش‌گرفته را مشخص کرد (Thomas et al., 2013, 2017, Alexander and Cruz, 2013, 2017).

در زمینه مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل، پژوهش‌های بسیاری مانند Karafyllidis and Thanailakis (1997) انجام شده است که در آن به ارائه مدلی بر اساس اتوماتای سلولی تحت سناریوهای مختلف آب و هوایی و توپوگرافی پرداخت.

پژوهش پیاده‌سازی کرد تا با استفاده از آنها، تصمیم‌گیری‌های لازم برای جلوگیری و کنترل آتش‌سوزی‌ها را پیش از وقوع آتش‌سوزی انجام دهند. پس از پژوهش‌های گسترده در این رابطه، پژوهشگران دریافتند که استفاده از روش‌هایی همچون اتوماتای سلولی و نیز به‌کارگیری روش‌هایی برای کالیبره کردن آن مانند روش‌های هوشمند، می‌تواند نتایج مطلوب‌تری را به‌همراه داشته باشد (Lopes et al., 2017).

هدف این پژوهش، ابتدا تشخیص عامل‌های تأثیرگذار بر آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان و سپس به‌کارگیری این عامل‌ها برای مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی بر اساس اتوماتای سلولی است. برای تشخیص عامل‌های تأثیرگذار بر آتش‌سوزی منطقه موردپژوهش از روش رگرسیون چندگانه خطی به‌همراه الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. برای بهبود نتایج حاصل از مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل، از بهینه‌سازی زنبورعسل برای کالیبره کردن اتوماتای سلولی بهره گرفته شده است. برای تعیین مقدار تأثیر فیلترهای همسایگی بر مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل نیز از فیلترهای همسایگی مختلف استفاده شده و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

#### مواد و روش‌ها

در گام نخست این پژوهش، پردازش‌های موردنیاز بر روی ۱۴ عاملی که در آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان مؤثر بوده‌اند اعمال می‌شود تا نقشه‌های موردنیاز حاصل از این عامل‌ها برای گام‌های بعدی، ایجاد شوند. برای ممانعت از دخالت داده‌هایی که همبستگی زیادی با یکدیگر دارند و سبب ایجاد اختلال در فرآیند مدل‌سازی می‌کنند، از آنالیز همبستگی بین داده‌ها استفاده می‌شود. در ادامه، داده‌ها وارد الگوریتم ژنتیک در ترکیب با رگرسیون چندگانه

خطی می‌شوند تا از این طریق عامل‌های بهینه مؤثر بر توسعه آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان تعیین شوند. برای ایجاد نقشه شایستگی یا همان نقشه احتمال تغییر وضعیت سلول‌ها در هنگام آتش‌سوزی، از بهینه‌سازی زنبورعسل بهره گرفته می‌شود. در آخر، مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان با به‌کارگیری اتوماتای سلولی و نقشه احتمال حاصل از بهینه‌سازی زنبورعسل، در توان‌های تفکیک مکانی مختلف تولید خواهند شد. دقت حاصل از مدل‌سازی، با استفاده از شاخص کاپا، دقت کلی و شاخص عامل نسبی بیان شده‌اند. روند کلی روش پیشنهادی این پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است.

در ادامه، الگوریتم‌ها و روش‌های پیشنهادی ارائه شده در این پژوهش، مرور شده است.

#### رگرسیون چندگانه خطی

رگرسیون چندگانه، مشابه رگرسیون خطی ساده است با این تفاوت که به‌جای یک متغیر رگرسور، شامل دو یا تعداد بیشتری متغیر رگرسور است. در واقع با این روش می‌توان وابستگی آتش‌سوزی به چند عامل مختلف را بررسی کرد. در رگرسیون چندگانه، روش حداقل مربعات می‌تواند برای تخمین‌زدن ضرایب رگرسیون مورد استفاده قرار گیرد. در رگرسیون چندگانه فرض می‌شود که تعداد مشاهدات بیش از تعداد متغیرها باشد. مجموعه مشاهدات (آتش و عامل‌های مؤثر بر آن) به‌صورت زیر است (Uyanık and Güler, 2013):

$$X_{i1} \cdot X_{i2} \cdot \dots \cdot X_{ik} \cdot Y_i \quad (1) \text{ رابطه}$$

که در رابطه فوق،  $i = 1, 2, \dots, n > k$  است. مدل

رگرسیون چندگانه خطی مطابق رابطه (۲) است

$$: (Uyanık and Güler, 2013)$$

رابطه (۲)

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon \rightarrow y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon$$



شکل ۱- نمودار کلی پیشنهادی حل مسئله

Figure 1. General diagram of the proposed method

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_0} |_{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k} = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right) = 0 \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_j} |_{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k} = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right) x_{ij} = 0 \quad \text{رابطه (۵)}$$

با ساده‌سازی این روابط، به روابط زیر دست

می‌یابیم (Aiken et al., 2003):

رابطه (۶)

$$n\beta_0 + \beta_1 \sum_{i=1}^n (x_{i1}) + \beta_2 \sum_{i=1}^n (x_{i2}) + \dots + \beta_k \sum_{i=1}^n (x_{ik}) = \sum_{i=1}^n (y_i)$$

تابع حداقل مربعات مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود (Aiken et al., 2003):

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right)^2 \quad \text{رابطه (۳)}$$

هدف، حداقل کردن این تابع با توجه به  $\beta_0, \beta_1, \dots$

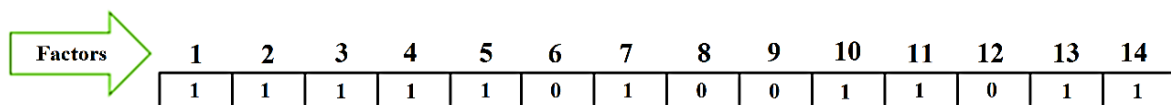
است. در نتیجه برای تخمین حداقل مربعات

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$  باید روابط زیر ارضا شوند (Aiken et al., 2003):

(et al., 2003)

این الگوریتم نسل جدید سعی دارد که ارزش بیشتری از تابع ارزش را به خود اختصاص دهد و با این عملکرد به تابع هدف نزدیک‌تر شود. در هر مرحله از تکرار، هریک از کروموزوم‌ها با احتمال خاصی با یکدیگر ترکیب می‌شوند که پیامد آن یک یا چند کروموزوم جدید به نام فرزند است. در این فرزندان ممکن است طبق احتمال خاصی عمل جهش ژنی اتفاق افتد، به این صورت که مقدار یک یا چند ژن از کروموزوم تغییر کند. در مرحله آخر فرزندان طبق تابع ارزش، ارزیابی شده و بر اساس ارزش آنها و ارزش والدین یعنی نسل اولیه که این فرزندان را تولید کرده‌اند نسل جدید تولید خواهد شد. این مراحل تا جایی تکرار می‌شود که نسل حاضر به جواب بهینه یا یکی از زیر جواب‌های بهینه، همگرا شود (Sivanandam and Deepa, 2008).

در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک ارائه شده توسط Hasanlou and Samadzadegan (2010) استفاده شده است که از ترکیب ضربی تک‌نقطه‌ای و جهش گوسین بهره گرفته شده است. هر کروموزوم دارای ۱۴ ژن (عامل) با مقادیر باینری مشابه شکل ۲ است که هر بار تعدادی ژن، برای ترکیب انتخاب می‌شوند. در این حالت، مقدار ۱ به ژن‌های انتخاب شده و مقدار صفر به ژن‌های انتخاب نشده اختصاص داده می‌شود.



شکل ۲- نحوه قرارگیری ژن‌ها در یک کروموزوم

Figure 2. Placement of genes on a chromosome

الگوریتم ژنتیک پیشنهادی این تحقیق،  $1-R^2$  و هدف ما کمینه کردن آن است.

حال به تعداد  $P = k + 1$  معادله وجود دارد که به ازای هر ضریب مدل رگرسیونی، یک معادله منظور شده است. در مدل رگرسیون چندگانه که به تعداد  $k$  رگرسور وجود دارد، برای بررسی پراکندگی مدل، بهتر است تا تعداد رگرسورها نیز مدنظر قرار گیرد. بدین منظور رابطه  $R^2$  برای مدل رگرسیونی چندگانه به صورت زیر اصلاح می‌شود (Aiken et al., 2003):

$$R_{Adjusted}^2 = 1 - \frac{SS_E/n - p}{SS_T/n - 1} = \frac{(n-1)R^2 - k}{n - p} \quad (9)$$

### الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، یکی از الگوریتم‌های جستجو است که به صورت تصادفی جواب مسئله را پیدا می‌کند. این الگوریتم در دسته الگوریتم‌های آزمون و خطا جای می‌گیرد (Sivanandam and Deepa, 2008). روش‌های متعددی برای نمایش و کدگذاری وجود دارد که از مهم‌ترین و معمول‌ترین آنها روش دودویی و نمایش اعشاری شناور است (Shan et al., 2008). در آغاز، جمعیت اولیه که جواب‌ها را نشان می‌دهند به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. هر یک از اعضای این جمعیت که کروموزوم نامیده می‌شود یکی از پاسخ‌های مسئله است. هریک از این کروموزوم‌ها از رشته‌ای از اعداد با طول برابر انتخاب می‌شود که هر یک از این اعداد، ژن نام دارد. الگوریتم ژنتیک بر اساس تکرار عمل می‌کند که به جمعیت در هر مرحله، نسل گفته می‌شود. هریک از اعضای این نسل بر اساس تابع ارزش، ارزیابی می‌شوند. در

در هر نسل، تابع برازش برای تمامی کروموزوم‌های آن نسل محاسبه می‌شود که تابع برازش

## اتوماتای سلولی

در رابطه فوق،  $S_{(\alpha \in \mathbb{N})}^t(X_1, X_2, \dots, X_n)$  تابعی از

وضعیت سلول‌های همسایه سلول مرکزی بوده که در آن،  $n$  تعداد سلول‌های همسایه سلول مرکزی است. در این پژوهش،  $S_{(\alpha \in \mathbb{N})}^t(X_1, X_2, \dots, X_n)$  نسبت سلول-های آتش‌گرفته به کل سلول‌های همسایه است که بر وضعیت سلول مرکزی در لحظه  $t+1$  تأثیرگذار است.

## بهینه‌سازی زنبورعسل

بهینه‌سازی زنبورعسل یک الگوریتم جستجوی تصادفی هدایت‌شده است که در این پژوهش، از این روش برای به‌دست آوردن مقادیر بهینه برای وزن هر عامل مؤثر بر آتش‌سوزی جنگل استفاده شده است تا بتوان مقدار تابع برازش را کمینه کرد. این روش از سه دسته زنبور شامل زنبورهای کارگر، زنبورهای ناظر و زنبورهای پیش‌آهنگ تشکیل شده است (Akay and Karaboga, 2017). یافتن منابع غذایی (راه‌حل) اولیه و انتقال اطلاعات مربوط به آن به کندو را زنبورهای کارگر انجام می‌دهند. زنبورهای ناظر بر اساس اطلاعات هر منبع غذایی و با توجه به شایستگی آن منبع، تصمیم‌گیری برای مراجعه به منابع غذایی را عهده‌دار هستند. زنبورهای پیش‌آهنگ نیز وظیفه جستجوی تصادفی منابع غذایی را انجام می‌دهند (Karaboga et al., 2014). تعداد زنبورهای کارگر به‌اندازه تعداد منابع غذایی است و در صورتی که منبع غذایی بعد از مدتی توسط زنبورهای کارگر و ناظر، نامناسب تشخیص داده شود زنبور پیش‌آهنگ منبع غذایی جدید را جایگزین خواهد کرد. عدم پیشرفت تابع تناسب برای یک منبع غذایی پس از گذشت تعداد حلقه‌های مشخص که به آن حد گفته می‌شود، بیانگر ناکارایی آن منبع بوده و توسط زنبورها رها می‌شود. الگوریتم زنبورعسل برای بهینه‌سازی توسط سه شاخص کنترل‌کننده شامل تعداد منابع غذایی، تعداد حلقه‌های محدودکننده و حداکثر تعداد حلقه‌های اجرا،

اتوماتای سلولی یک سیستم دینامیک و گسسته در مکان و زمان است که بر روی یک شبکه منظم از سلول‌ها عمل می‌کند. در این سیستم، مقدار یا حالت هر سلول در طول زمان در قالب تابعی از مقادیر سلول‌های همسایه و مقدار خود سلول، تغییر می‌کند (Whitsed and Smallbone, 2017). چیزی که در این مدل دارای اهمیت است این است که این تغییرات در قالب زمان و مکان فقط به شکل محلی تغییر می‌کنند و فقط سلول‌های مجاور هستند که در این تغییرات دخیل می‌باشند. اتوماتای سلولی دارای پنج المان اصلی و پایه است که شامل شبکه منظم سلولی، مجموعه مقادیر ممکن برای هر سلول، همسایگی، قوانین انتقال و فضای زمانی است (Perryman et al., 2012). برای مدل‌سازی محدوده سلول‌های تغییر وضعیت یافته در اتوماتای سلولی، باید احتمال تغییر وضعیت در سلول‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. این احتمال با استفاده از رابطه (۱۰) به‌دست می‌آید (Whitsed and Smallbone, 2017):

$$S_{i,j}^t = \frac{A_b}{A_t} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در رابطه فوق،  $A_b$  بیانگر نسبت مساحت تغییر وضعیت یافته و  $A_t$  مساحت کل سلول است. مقدار  $S$  برای یک سلول تغییر وضعیت یافته برابر با عدد یک، برای سلول‌های در حال تغییر، مقادیری بین صفر تا یک و برای سلول‌های بدون تغییر، برابر با عدد یک است. تابع انتقال اتوماتای سلولی بیانگر مقدار تأثیرات وضعیت سلول مرکزی و سلول‌های همسایه آن در لحظه  $t$ ، بر وضعیت آن سلول در لحظه  $t+1$  است. این تابع در حالت دوبعدی به‌صورت رابطه (۱۱) بیان می‌شود (Whitsed and Smallbone, 2017):

$$S_{i,j}^{t+1} = S_{i,j}^t + S_{(\alpha \in \mathbb{N})}^t(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$(P_s)_{ij}^t = 1 + \left(\ln\left(\frac{1}{\alpha}\right)\right)^\beta \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

که در رابطه فوق،  $\alpha$  عددی بین صفر تا یک بوده و  $\beta$  نیز عددی بین صفر تا ۱۰ است که عوامل بی-نظمی را کنترل خواهند کرد. مقدار  $(P_1)_{ij}^t$  از رابطه (۱۶) حاصل می‌شود (Feng et al., 2011):

$$(P_1)_{ij}^t = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i)}} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

که  $x_i$  عامل‌های مؤثر بر آتش‌سوزی جنگل و  $\alpha_0$  مقدار ثابت و  $\alpha_i$  وزن هر عامل مؤثر را مشخص می‌کند. مقادیر  $\alpha_i$  توسط اجرای الگوریتم بهینه‌سازی زنبورعسل بر روی رابطه فوق به دست خواهند آمد. در آخر با استفاده از مقادیر فوق، می‌توان وضعیت هر سلول را در مرحله بعد بدست آورد به طوری که اگر مقدار  $P_{ij}^t$  از مقدار حد آستانه  $P_{th}$  بیشتر باشد، سلول موردنظر در مرحله بعد تغییر وضعیت خواهد داد و در غیر این صورت، به همان حالت باقی خواهد ماند. تابع برازش موردنظر در این پژوهش، مطابق رابطه (۱۷) تعریف شد (Feng et al., 2011):

$$FF = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (F_{ij} - f_{ij})^2 \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

که در رابطه فوق،  $FF$  مقدار تابع برازش،  $n \times m$  تعداد کل سلول‌های منطقه،  $f_{ij}$  تعداد سلول‌هایی است که الگوریتم تشخیص داده که باید تغییر وضعیت دهند و  $F_{ij}$  تعداد سلول‌هایی است در واقعیت تغییر وضعیت داده‌اند که مقدار صفر یا یک دارند.

#### منطقه مورد پژوهش و آماده‌سازی داده‌ها

جنگل‌های پارک ملی گلستان از جمله مهم‌ترین جنگل‌های کشور ایران محسوب می‌شود و شامل قسمت‌هایی از استان‌های گلستان، سمنان و خراسان شمالی است که به دلیل وقوع آتش‌سوزی‌های متعدد در این جنگل، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، آتش‌سوزی‌های تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ و ۲۴ تیر ۱۳۹۰ مورد بررسی قرار گرفته‌اند و محل

هدایت می‌شود. در هر دور اجرای حلقه، اطلاعات مربوط به بهترین منابع غذایی کشف‌شده ذخیره می‌شود تا در نهایت، بهینه‌ترین منبع در حلقه پایانی تعیین شود (Akay and Karaboga, 2017). زنبور ناظر یک منبع غذایی را با توجه به مقدار احتمال مربوط با آن منبع غذایی انتخاب می‌کند که با رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود (Karaboga et al., 2014):

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

در رابطه فوق،  $fit_i$  مقدار شایستگی منبع  $i$  بوده و  $SN$  تعداد منابع غذایی که برابر تعداد زنبورهای کارگر است. در اتوماتای سلولی مورد استفاده در این پژوهش، احتمال تغییر وضعیت هر سلول در لحظه  $t$  به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شود (Fengxia and Gang, 2012):

$$P_{ij}^t = (P_1)_{ij}^t \times (P_n)_{ij}^t \times (P_s)_{ij}^t \times \text{Con}(\cdot) \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

که در رابطه فوق،  $(P_1)_{ij}^t$  احتمال محلی که بیانگر پتانسیل هر سلول برای تغییر وضعیت است،  $(P_n)_{ij}^t$  احتمال تغییر وضعیت برای هر سلول با توجه به سلول‌های همسایگی بوده،  $(P_s)_{ij}^t$  شاخص بی‌نظمی تصادفی است که می‌تواند حاصل از هر خطای ناشناخته باشد و  $\text{Con}(\cdot)$  محدودیت‌های توسعه آتش‌سوزی را در نقاط مختلف نشان می‌دهد.

با توجه به فیلتر همسایگی مورد استفاده، مقدار  $(P_n)_{ij}^t$  از رابطه (۱۴) به دست می‌آید (Fengxia and Gang, 2012):

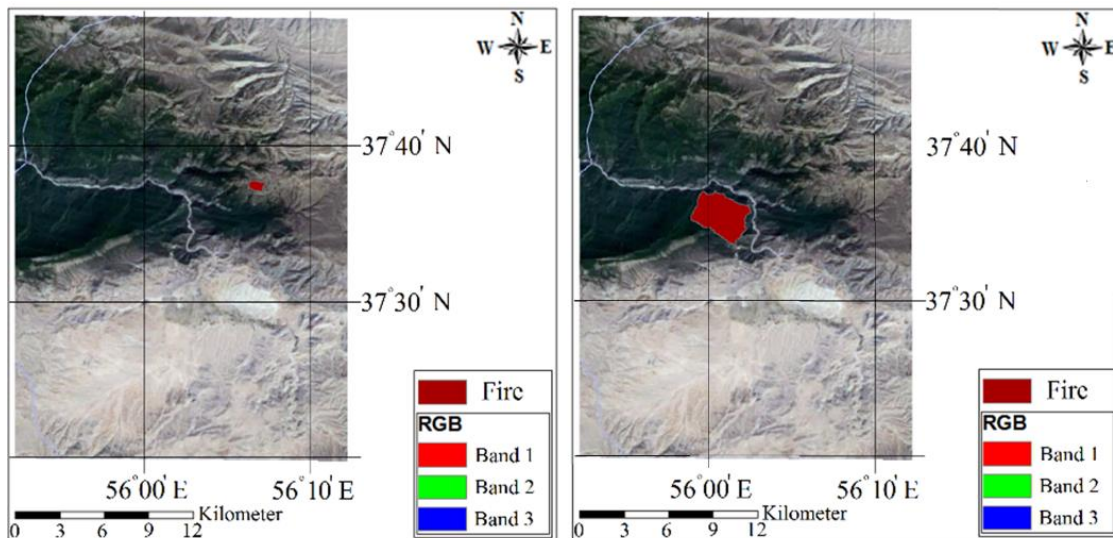
$$\text{رابطه (۱۴)}$$

$$(P_n)_{ij}^t = \frac{\text{تعداد سلول‌های آتش‌گرفته در همسایگی مورد نظر}}{\text{تعداد کل سلول‌های همسایگی مورد نظر}}$$

در فرآیند مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل، امکان دارد خطاهای تصادفی ناشناخته وجود داشته باشند که با استفاده از رابطه (۱۵) می‌توان آنها را کنترل کرد (Feng et al., 2011):



قرارگیری این آتش‌سوزی‌ها در محدوده  $37^{\circ}47'$  -  $37^{\circ}20'$  شمالی و  $56^{\circ}12'$  -  $55^{\circ}87'$  شرقی واقع است که در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۳- آتش‌سوزی‌های رخ داده در منطقه در تاریخ‌های ۲۶ آبان ۱۳۸۹ (سمت راست) و ۲۴ تیر ۱۳۹۰ (سمت چپ)

Figure 3. The incidents occurred in the study areas: November 17, 2010 (right) and July 15, 2011 (left)

مقادیر این داده‌ها برای کل منطقه مورد پژوهش برآورد می‌شوند.

### نتایج

در این پژوهش، وابستگی آتش‌سوزی‌های جنگلی در منطقه مورد پژوهش به ۱۴ عامل مختلف در دسترس، بررسی شده است. برای سنجش وابستگی عامل‌ها، از رگرسیون چندگانه خطی استفاده شده و مشاهدات به-صورت دودویی (یک برای آتش و صفر برای غیر آتش) در نظر گرفته شده‌اند. بدین‌صورت که رگرسیون چندگانه خطی با الگوریتم ژنتیک ترکیب شده تا هم‌زمان با عمل رگرسیون، ترکیب بهینه‌ای از عامل‌های مؤثر بر آتش‌سوزی‌های منطقه مورد پژوهش به دست آید. داده‌ها به ترتیب شامل فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی، جنس خاک، کاربری زمین، ارتفاع منطقه، مقدار شیب،

دیگر داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل مناطق مسکونی، جنس خاک، کاربری اراضی، رودخانه‌ها، جاده‌ها و مدل ارتفاعی منطقه هستند. این داده‌ها از اداره کل منابع طبیعی استان‌های گلستان، سمنان و خراسان شمالی و نیز سازمان نقشه‌برداری کل کشور تهیه شده‌اند. با استفاده از مدل ارتفاعی منطقه و به‌کارگیری نرم‌افزار GIS، لایه‌های اطلاعاتی شیب و جهت ایجاد می‌شوند. با استفاده از آنالیز فاصله اقلیدسی در این نرم‌افزار، لایه‌های اطلاعاتی مناطق مسکونی، جاده‌ها و رودخانه‌ها که دارای ساختار برداری هستند به ساختار رستری تبدیل می‌شوند. داده‌های حداقل، متوسط و حداکثر دما، مقدار بارش، حداکثر سرعت باد و جهت عمده وزش باد از سازمان هواشناسی تهیه شدند که شامل پنج ایستگاه هواشناسی سینوپتیک نزدیک منطقه مورد پژوهش است. با استفاده از درون‌یابی به روش کریجینگ عمومی با مدل نمایی،



جهت ، حداکثر دما، حداقل دما، متوسط دما، جهت باد غالب، حداکثر سرعت باد و مقدار بارندگی هستند. ترتیب قرارگیری عامل‌ها برای تشکیل هر کروموزوم از الگوریتم ژنتیک به همان ترتیبی است که نام برده شد و مقادیر شاخص‌های الگوریتم ژنتیک به صورت جدول ۱ است.

جدول ۱- شاخص‌های الگوریتم ژنتیک مورد استفاده

Table 1. The parameters of the used genetic algorithm

مقدار Value	شاخص Parameter	مقدار Value	شاخص Parameter
20	فاصله مهاجرت Migration Interval	10	اندازه جمعیت Population size
-0.5	مقیاس (جهش گوسین) Scale (Gaussian Mutation)	100	تعداد نسل Number of Generations
0.7	کاهش (جهش گوسین) Shrink (Gaussian Mutation)	0.8	نرخ ترکیب ضربی Crossover rate
1	تعداد نخبه Elite count	0.2	کسر مهاجرت Migration Fraction

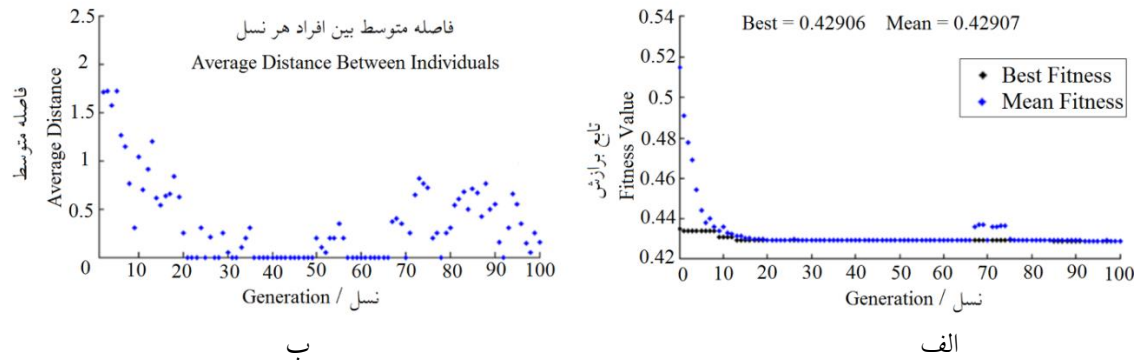
انتخاب بهترین ترکیب عامل‌ها را با توجه به همبستگی‌ها و حساسیت‌های آنها می‌دهد بنابراین، آنالیز حساسیت در خود الگوریتم ژنتیک صورت می‌گیرد. پس از ۳۰ بار اجرای الگوریتم ژنتیک همراه با رگرسیون چندگانه خطی، میانگین مقادیر تابع برازش برابر با ۰/۴۲۹۱ به دست آمده است و ۱۰ عامل شامل فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی، جنس خاک، کاربری زمین، ارتفاع منطقه، مقدار شیب، کمینه دما، جهت باد غالب و بیشینه سرعت باد به عنوان عامل‌های مؤثر شناخته شده‌اند. شکل ۴ میانگین نتایج به دست آمده از ۳۰ بار تکرار الگوریتم ژنتیک را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است هر چه تعداد نسل افزایش یافته است همگرایی میانگین و بهترین جواب به مراتب بیشتر شده است به گونه‌ای که فاصله متوسط بین افراد هر نسل کمتر گردیده به گونه‌ای که افراد هر نسل به یکدیگر شبیه‌تر شده‌اند.

تابع هدف الگوریتم ژنتیک در این پژوهش  $1-R^2$  و هدف از بهینه‌سازی، کمینه کردن آن است. الگوریتم ژنتیک مذکور، ۳۰ بار اجرا شده و میانگین این ۳۰ بار تکرار به عنوان خروجی نهایی در نظر گرفته شده است. قبل از استفاده از ۱۴ عامل، ابتدا باید همبستگی بین داده‌ها و حساسیت عامل‌ها ارزیابی شود که برای این منظور از روابط زیر استفاده می‌شود (Dale, 2014):

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$r = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

که در روابط فوق،  $\text{Cov}(X, Y)$  کوواریانس دو مجموعه داده  $X$  و  $Y$ ،  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  میانگین این دو مجموعه داده،  $n$  تعداد داده‌های هر مجموعه و  $r$  ضریب همبستگی بین دو مجموعه داده با انحراف معیارهای  $\sigma_X$  و  $\sigma_Y$  است. تمام مقادیر ضرایب همبستگی بین ۰/۷ و -۰/۷ هستند که بیانگر این مسئله است که داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، همبستگی قابل توجهی با یکدیگر ندارند. الگوریتم ژنتیک در قالب بهینه‌سازی، به انتخاب عوارض می‌پردازد و این



شکل ۴- میانگین (الف) بهترین مقدار و میانگین مقادیر تابع برازش و (ب) میانگین فاصله بین افراد هر نسل با استفاده از رگرسیون چندگانه خطی در ۳۰ تکرار

Figure 4. Mean of (a) the best and average values of the fitness; and (b) the mean of the distance between individuals of each generation using multiple linear regressions in 30 iterations

جزر میانگین مربعات خطای نرمال شده باقی مانده‌های مدل که با استفاده از نقاط چک محاسبه شده‌اند، به ترتیب برابر با ۰/۴۵۳۳ و ۰/۴۷۲۲ به دست آمده‌اند.

ضرایب حاصل از رگرسیون چندگانه خطی در جدول (۲) ارائه شده است که ضرایب مربوط به عامل-هایی که مؤثر تشخیص داده نشدند با علامت (-) مشخص شده‌اند. مقادیر جزر میانگین مربعات خطا و

جدول ۲- میانگین ضرایب رگرسیون حاصل از رگرسیون چندگانه خطی در ۳۰ تکرار

Table 2. Average regression coefficients obtained by the multiple linear regressions in 30 iteration

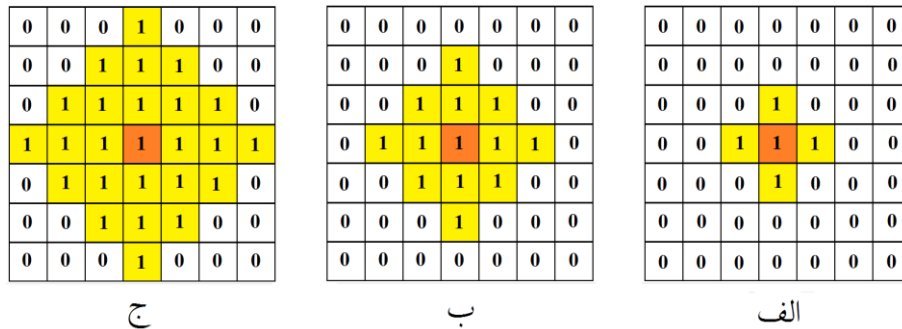
مقدار Value	عامل Factor	مقدار Value	عامل Factor
-	شیب (درجه) Aspect (Deg)	0.0001	فاصله از رودخانه‌ها (متر) Distance from river (m)
-	حداکثر دما (سانتی‌گراد) Maximum temperature (°C)	-0.00007	فاصله از جاده‌ها (متر) Distance from road (m)
-0.3851	حداقل دما (سانتی‌گراد) Minimum temperature (°C)	0.00007	فاصله از مناطق مسکونی (متر) Distance from residential areas (m)
-	متوسط دما (سانتی‌گراد) Average temperature (°C)	0.00272	جنس خاک Type of soil
0.69504	جهت باد غالب (درجه) Direction of the dominant wind (Deg)	-0.01991	کاربری زمین Land use
0.01216	حداکثر سرعت باد (متر بر ثانیه) Maximum speed of wind (m/s)	-0.00007	ارتفاع (متر) Height (m)
-	مقدار بارندگی (میلی‌متر) Rate of rain (mm)	0.0026	مقدار شیب (درجه) Slope (Deg)

آتش‌سوزی است. همچنین بزرگ بودن اندازه ضرایب رگرسیون، بیانگر تأثیر بیشتر عامل موردنظر در آتش-سوزی جنگل است. در این پژوهش، جهت باد غالب

علامت ضرایب رگرسیون اگر مثبت باشد یعنی شاخص موردنظر، تأثیر مثبت در آتش‌سوزی دارد و در صورتی که منفی باشد نشان‌دهنده تأثیر منفی در

پارک ملی گلستان را بر اساس اتوماتای سلولی انجام داد. در این راستا برای بررسی تأثیر فیلترهای همسایگی بر مدل‌سازی، از سه فیلتر همسایگی  $3 \times 3$ ،  $5 \times 5$  و  $7 \times 7$  استفاده شده است که در شکل ۵ به نمایش در آمده‌اند.

دارای بیشترین تأثیر بر آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان است که این تأثیر دارای اثر مثبت است به عبارت دیگر، روند آتش‌سوزی جنگل در این منطقه دارای تناسب مستقیم با جهت باد غالب منطقه است. حال بعد از شناسایی عامل‌های مؤثر بر آتش‌سوزی می‌توان مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل‌های



شکل ۵- فیلتر همسایگی: الف)  $3 \times 3$ ، ب)  $5 \times 5$  و ج)  $7 \times 7$

Figure 5. Neighborhood Filter: a)  $3 \times 3$ , b)  $5 \times 5$ , and c)  $7 \times 7$

پایه‌سازی الگوریتم اتوماتای سلولی با بهینه‌سازی زنبورعسل، ابتدا مطابق جدول (۳) شاخص‌های ورودی روش بهینه‌سازی زنبورعسل مقداردهی شده‌اند:

برای بیان وضعیت‌های مختلف سلول‌ها، دو حالت به صورت صفر و یک تعریف شده است که عدد صفر بیانگر این است که سلول آتش‌نگرفته و عدد یک بیانگر این است که سلول آتش‌گرفته است. در

جدول ۳- شاخص‌های ورودی روش بهینه‌سازی زنبورعسل

Table 3. Input parameters of the artificial bee colony

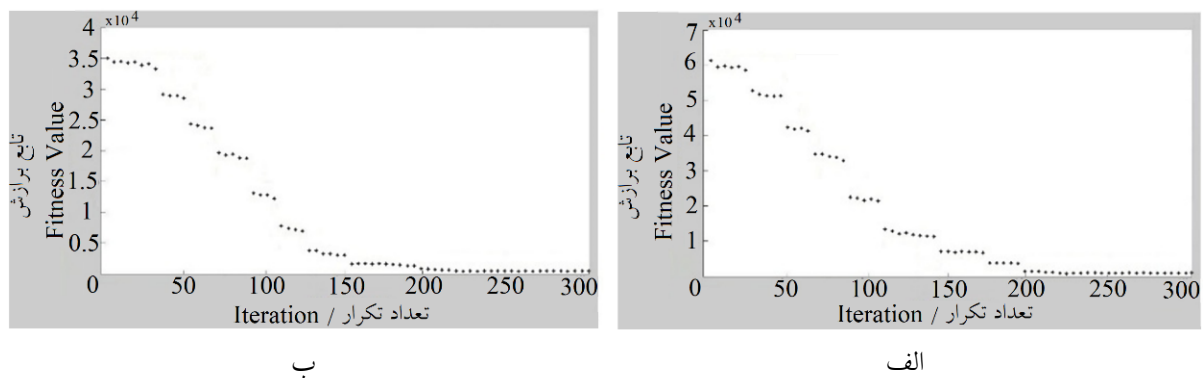
مقدار Value	شاخص Parameter
0	حد پایین Minimum Limit
1	حد بالا Maximum Limit
60	تعداد زنبورها Number of Bees
30	تعداد منابع غذا Number of food sources
300	حداکثر تکرار Maximum iteration

جواب‌ها با استفاده از این مقادیر به دست آمده‌اند. هدف ما در این قسمت، کمینه کردن تابع برازش است و

برای به دست آوردن مقادیر فوق، از روش سعی و خطا بهره گرفته شده است که در نهایت، بهترین

تکرار برای آتش‌سوزی تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر و برای آتش‌سوزی تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰ با توان تفکیک مکانی پنج متر نشان می‌دهند.

برای جلوگیری از بروز اشتباهات و گیر افتادن در بهینه‌های محلی، این روش به تعداد ۳۰ مرتبه اجرا شده است که از بهترین اجرا برای محاسبه تابع برازش استفاده شده است. شکل ۶ برای نمونه، منحنی همگرایی روش بهینه‌سازی زنبورعسل را پس از ۳۰۰

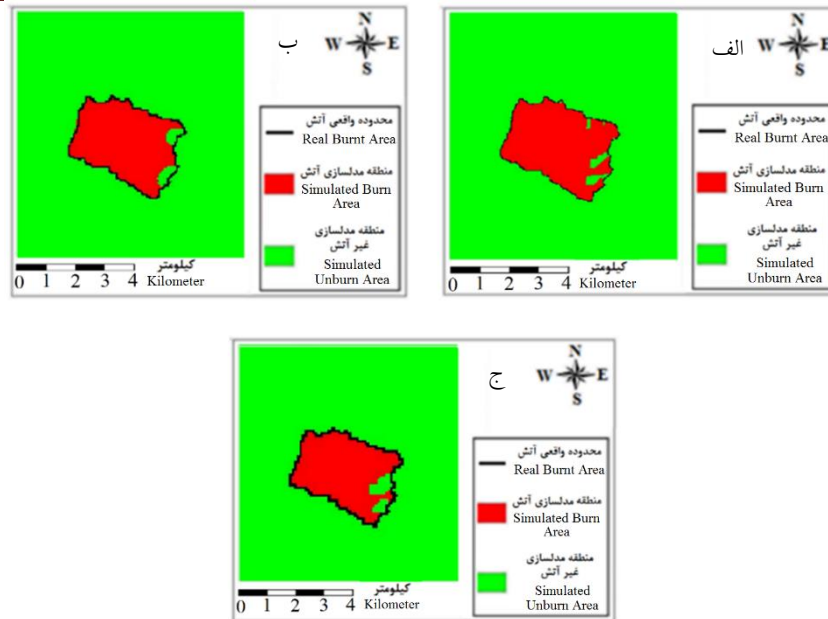


شکل ۶- همگرایی بهینه‌سازی زنبورعسل برای آتش‌سوزی تاریخ‌های الف) ۲۶ آبان ۱۳۸۹ و ب) ۲۴ تیر ۱۳۹۰  
Figure 6. The Convergence chart of the artificial bee colony for the forest fire: a) November 17, 2010, and b) July 15, 2011

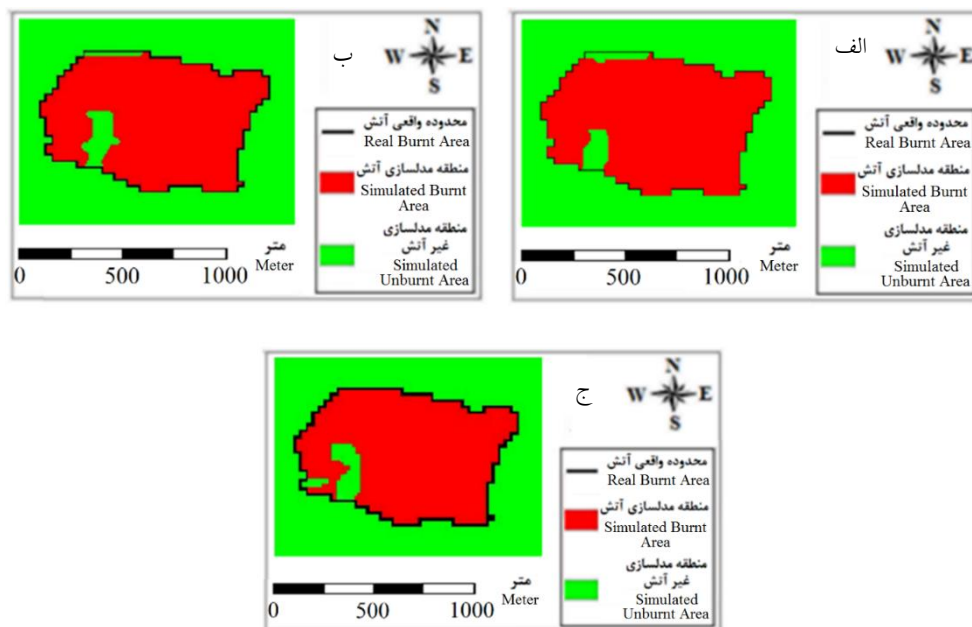
آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان با به‌کارگیری اتوماتای سلولی و بهینه‌سازی زنبورعسل برای آتش‌سوزی تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ و ۲۴ تیر ۱۳۹۰ تولید شده‌اند. برای نمونه، این نقشه‌ها با به‌کارگیری فیلتر همسایگی ۳×۳ در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده‌اند.

برای مشخص کردن دقت مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان، شاخص‌های آماری مانند شاخص کاپا، دقت کلی و شاخص عامل نسبی بکار گرفته شده‌اند. جدول‌های (۴ و ۵) نتایج حاصل از مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان با به‌کارگیری اتوماتای سلولی و بهینه‌سازی زنبورعسل را نمایش می‌دهند.

توان تفکیک مکانی، یکی از عواملی است که بر نتیجه مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل تأثیرگذار است. برای به دست آوردن مقادیر بهینه برای توان تفکیک مکانی، عامل‌های بهینه مؤثر بر آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان در توان‌های تفکیک مکانی مختلف ایجاد شده و به‌عنوان ورودی، وارد الگوریتم پیشنهادی شده‌اند. با توجه به دقت خروجی حاصل از مدل‌سازی با توان‌های تفکیک مکانی مختلف و نیز زمان لازم برای اجرای الگوریتم، توان‌های تفکیک مکانی بهینه برای آتش‌سوزی تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ مقادیر ۳۰، ۶۰ و ۹۰ متر و برای آتش‌سوزی تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰ مقادیر پنج، ۱۰ و ۱۵ به‌دست آمده‌اند. نقشه‌های حاصل از مدل‌سازی توسعه



شکل ۷- نقشه مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان با به‌کارگیری اتوماتای سلولی و بهینه‌سازی زنبورعسل برای تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ با فیلتر همسایگی  $3 \times 3$  و توان‌های تفکیک مکانی الف) ۳۰، ب) ۶۰ و ج) ۹۰ متر  
 Figure 7. Modeling of Golestan national park forests fire development using cellular automata and artificial bee colony on 17 November 2010 with  $3 \times 3$  neighborhood and spatial resolution a) 30 meters, b) 60 meters, and c) 90 meters



شکل ۸- نقشه مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان با به‌کارگیری اتوماتای سلولی و بهینه‌سازی زنبورعسل برای تاریخ ۲۴ آبان ۱۳۹۰ با فیلتر همسایگی  $3 \times 3$  و توان‌های تفکیک مکانی الف) ۵، ب) ۱۰ و ج) ۱۵ متر  
 Figure 7. Modeling of Golestan national park forests' fire development using cellular automata and artificial bee colony on 15 July 2011 with  $3 \times 3$  neighborhood and spatial resolution a) 5 meters, b) 10 meters, and c) 15 meters

جدول ۴- نتایج حاصل از مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان با بکاگیری اتوماتای سلولی و بهینه‌سازی زنبورعسل با فیلترهای همسایگی و توان‌های تفکیک مکانی مختلف برای تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹

Table 4. The results of modeling Golestan national park forests' fire development using cellular automata and artificial bee colony with different neighboring filters and spatial resolutions on 17 November 2010

شاخص عامل نسبی ROC	دقت کلی Overall Accuracy	شاخص کاپا Kappa Index	فیلتر همسایگی Neighboring Filter	توان تفکیک مکانی (متر) Spatial Resolution (m)
0.944	0.960	0.924	3×3	30
0.939	0.957	0.919	5×5	
0.936	0.955	0.916	7×7	
0.920	0.954	0.908	3×3	60
0.919	0.952	0.904	5×5	
0.917	0.950	0.900	7×7	
0.911	0.949	0.898	3×3	90
0.907	0.946	0.894	5×5	
0.904	0.944	0.890	7×7	

جدول ۵- نتایج حاصل از مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان با به‌کارگیری اتوماتای سلولی و بهینه‌سازی زنبورعسل با فیلتر همسایگی و توان‌های تفکیک مکانی مختلف برای تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰

Table 4. The results of modeling of Golestan national park forests' fire development using cellular automata and artificial bee colony with different neighboring filters and spatial resolutions on 15 July 2011

شاخص عامل نسبی ROC	دقت کلی Overall Accuracy	شاخص کاپا Kappa Index	فیلتر همسایگی Neighboring Filter	توان تفکیک مکانی (متر) Spatial Resolution (m)
0.952	0.932	0.919	3×3	5
0.949	0.929	0.916	5×5	
0.945	0.925	0.912	7×7	
0.943	0.916	0.905	3×3	10
0.940	0.912	0.900	5×5	
0.935	0.907	0.894	7×7	
0.930	0.893	0.880	3×3	15
0.925	0.885	0.873	5×5	
0.919	0.876	0.867	7×7	

بر آتش‌سوزی جنگل، تهیه نقشه‌های ریسک آتش‌سوزی و مقابله با توسعه آتش‌سوزی در جنگل‌ها را می‌افزاید. با توجه به اینکه عامل‌های مختلفی در توسعه آتش‌سوزی جنگل تأثیرگذار هستند، مدل‌سازی

#### بحث

روند رو به افزایش آتش‌سوزی در جنگل‌ها از یک سو و محدود بودن این منابع ارزشمند از سوی دیگر، ضرورت گسترش روش‌های شناسایی عامل‌های مؤثر

از مدل‌سازی، از شاخص کاپا، دقت کلی و شاخص عامل نسبی استفاده شده است. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی این پژوهش نشان داد که در بهترین حالت، شاخص کاپا، دقت کلی و شاخص عامل نسبی مدل‌سازی برای آتش‌سوزی تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۸۹ به ترتیب برابر با ۰/۹۲۴، ۰/۹۶۰ و ۰/۹۴۴ و برای آتش‌سوزی تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۰ به ترتیب برابر با ۰/۹۱۹، ۰/۹۳۲ و ۰/۹۵۲ هستند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از داده‌هایی با توان تفکیک مکانی کوچک‌تر، دقت بهتری را نسبت به توان‌های تفکیک مکانی بزرگ‌تر نتیجه می‌دهد. این در حالی است که با کاهش توان‌های تفکیک مکانی داده‌ها، زمان اجرای الگوریتم به شدت افزایش پیدا می‌کند بنابراین در حل این‌گونه مسائل باید از داده‌هایی با توان تفکیک مکانی مناسب و بهینه استفاده کرد که هم دقت حاصل از مدل‌سازی و هم‌زمان لازم برای اجرای الگوریتم، مناسب و بهینه باشد. همچنین با توجه به فیلترهای همسایگی ۳×۳، ۵×۵ و ۷×۷ که در این پژوهش استفاده شده است، فیلتر همسایگی ۳×۳ به دلیل پرداختن به جزئیات، دقت بهتری را نسبت به دو فیلتر دیگر نتیجه می‌دهد.

تاکنون پژوهش‌های بسیاری در رابطه با شناسایی عامل‌های مؤثر بر آتش‌سوزی جنگل و تهیه نقشه‌های ریسک آتش‌سوزی در این جنگل‌ها، مانند (Amiri et al., 2017) صورت گرفته است. همچنین در زمینه مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل‌ها نیز پژوهش‌های مختلفی انجام شده است که در این پژوهش‌ها تمرکز بر روی عامل‌های بیوفیزیکی بوده و کمتر به عامل‌های انسانی توجه شده است. همچنین در این پژوهش‌ها، روش‌هایی برای شناسایی عامل‌های مؤثر بر توسعه آتش‌سوزی در نظر گرفته نشده است و تمام عامل‌ها، بدون ارزیابی اولیه برای

توسعه آتش‌سوزی با در نظر گرفتن تمام عامل‌های ممکن در رفتار آتش و به‌کارگیری مدلی مناسب، می‌تواند ما را در پیش‌بینی نحوه پیشروی و توسعه آتش-سوزی جنگل یاری رساند.

در گام نخست این پژوهش سعی شده است تا عامل‌های مؤثر بر آتش‌سوزی‌های جنگل‌های پارک ملی گلستان، مشخص شوند. در این راستا از روش رگرسیون چندگانه خطی در ترکیب با الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. داده‌های این پژوهش در مجموع ۱۴ عامل شامل ۱۱ عامل بیوفیزیکی و سه عامل انسانی هستند که به‌عنوان ورودی الگوریتم پیشنهادی استفاده شده‌اند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، ۱۰ عامل شامل فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی، جنس خاک، کاربری زمین، ارتفاع منطقه، مقدار شیب، حداقل دما، جهت باد غالب و حداکثر سرعت باد به‌عنوان عامل‌های مؤثر شناخته شدند. وجود عامل‌های بیوفیزیکی و انسانی در عامل‌های مؤثر بر آتش‌سوزی جنگل‌های پارک ملی گلستان بیانگر این موضوع است که هر دو دسته از عامل‌های بیوفیزیکی و انسانی باید در کنار یکدیگر برای حل این‌گونه مسائل لحاظ شوند و هر دو دسته دارای اهمیت می‌باشند. در ادامه با توجه به عامل‌های مشخص شده، اقدام به مدل‌سازی آتش‌سوزی جنگل-های پارک ملی گلستان شده است که برای این منظور از ترکیب اتوماتای سلولی با بهینه‌سازی زنبورعسل استفاده شده است. همچنین برای بررسی مقدار تأثیر توان تفکیک مکانی نقشه‌های مورد استفاده بر روی نتایج حاصل از مدل‌سازی توسعه آتش‌سوزی جنگل-های پارک ملی گلستان، عامل‌های مؤثر در قالب نقشه‌هایی با توان‌های تفکیک مکانی مختلف تولید شده و از آنها به‌عنوان ورودی الگوریتم پیشنهادی استفاده می‌شود. برای تعیین دقت پیش‌بینی‌های حاصل



توسعه آتش‌سوزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در جدول ۶ مقایسه‌ای بین نتایج این پژوهش با پژوهش‌های مشابه پیشین انجام شده است که مقدار شاخص کاپا در این جدول، بیانگر بهترین جوابی است که با توجه به روش پیشنهادی در منطقه مورد نظر به دست آمده است.

جدول ۶- مقایسه نتیجه روش پیشنهادی این پژوهش با پژوهش‌های مشابه پیشین

Table 6. Comparison of the results of the proposed method of this study with those proposed by similar previous studies

شاخص کاپا Kappa Index	مرجع Reference	روش پیشنهادی Proposed Method
0.924	-	اتوماتای سلولی با بهینه‌سازی زنبورعسل Cellular automation with artificial bee colony
0.834	(Ghaemi Rad and Karimi, 2015)	مدل برجاک با بهینه‌سازی ازدحام ذرات Berjak model with particle swarm optimization
0.834	(Ghaemi Rad and Karimi, 2015)	مدل برجاک با بهینه‌سازی زنبورعسل Berjak model with artificial bee colony
0.823	(Ghaemi Rad and Karimi, 2015)	مدل برجاک Berjak model
0.790	(Ghaemi Rad and Karimi, 2015)	مدل پروجیاس Progiyas model
0.712	(Ghaemi Rad and Karimi, 2015)	مدل کارافیلیدیس Karafyllidis
0.530	(Jahdi et al., 2014)	FARSITE شبیه‌ساز سطح آتش FARSITE fire surface simulator

مدیریت جنگل، تعداد گردشگران، سطح تحصیلی، فرهنگی و اقتصادی مردم، افزایش یابد. همچنین عامل‌های بیوفیزیکی مانند لاشبرگ‌ها، تراکم پوشش گیاهی، نوع پوشش گیاهی، ویژگی‌های سوختی پوشش گیاهی، رطوبت هوا و رطوبت خاک به مسئله افزوده شوند. برای بررسی تأثیر فضاها سلولی و فیلترهای همسایگی مختلف بر روی نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها، پیشنهاد می‌شود از فضای سلولی شش ضلعی منتظم و نیز از فیلتر همسایگی مور و مور توسعه یافته استفاده شود و نتایج با یکدیگر مقایسه شوند.

## References

- Akay, B. & D. Karaboga, 2017. Artificial bee colony algorithm variants on constrained optimization, *An International Journal of*

با توجه به جدول فوق، ملاحظه می‌شود روش پیشنهادی این پژوهش که در آن از ترکیب اتوماتای سلولی با بهینه‌سازی زنبورعسل استفاده شده است دارای دقت بیشتری نسبت به دیگر روش‌های پیشنهادی پیشین است. مدل‌سازی این پژوهش شاخص کاپا را در حدود ۰/۰۹ نسبت به روش‌های پیشین بهبود داده است.

به دلیل اینکه عامل‌های انسانی، تأثیر بسزایی در وقوع آتش‌سوزی‌های جنگل دارند، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی تعداد عامل‌های انسانی مورد استفاده به‌عنوان ورودی الگوریتم مانند قوانین و سیاست‌های

*Optimization and Control: Theories & Applications*, 7(1): 98-111.

- Alexander, M. & M. Cruz, 2013. Are the applications of wildland fire behaviour models getting ahead of their evaluation

- again?, *Environmental Modelling and Software*, 41: 65-71.
- Alexandridis, A., D. Vakalis, C.I. Siettos, & G.V. Bafas, 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.
  - Amiri, T., A. Banj Shafiei, M. Erfanian, O. Hosseinzadeh, & H. Beygiheidarlou, 2017. Determining of effective criteria in locating firefighting station in forest, *Journal of forest research and development*, 2(4): 379-393. (In Persian)
  - Bodrožić, L., D. Stipanicev, & M. Šerić, 2004. Forest fires spread modeling using cellular automata approach, M.S. Thesis, University of Split, Split, Croatia, 80 p.
  - Banj Shafiei, A., H. Beygi Heidarlu, & M. Erfanian, 2015. Evaluating the Fuzzy Weighted Linear Combination Method in Forest Fire Risk Mapping (Case study: Sardasht Forests, West Azerbaijan Province, IRAN), *Journal of wood and forest science and technology*, 22(3): 29-52. (In Persian)
  - Banj Shafiei, A., H. Beygi Heidarlu, & M. Erfanian, 2015. Forest fire risk mapping using analytical hierarchy process technique and frequency ratio method (Case study: Sardasht Forests, NW Iran), *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 22(4): 559-573. (In Persian)
  - Brun, C., T. Margalef, & A. Cort' es, 2013. Coupling Diagnostic and Prognostic Models to a Dynamic Data Driven Forest Fire Spread Prediction System, *Procedia Computer Science*, 18: 1851-1860.
  - Dale, P. 2014. *Mathematical Techniques in GIS*, Second Edition, CRC Press.
  - Encinas, A.H., L.H. Encinas, H. White, M. del Rey & R. Sánchez, 2007. Simulation of forest fire fronts using cellular automata, *Advances in Engineering Software*, 38(6): 372-378.
  - Feng, Y., Y. Liu, X. Tong, M. Liu & S. Deng, 2011. Modeling dynamic urban growth using cellular automata and particle swarm optimization rules, *Landscape and Urban Planning*, 102(3): 188-196.
  - Fengxia, Y. & L. Gang, 2012. The Simulation and Improvement of Particle Swarm Optimization Based on Cellular Automata, *Procedia Engineering*, 29: 1113-1118.
  - Ghaemi Rad, T. & M. Karimi, 2015. Evaluation and comparison the results of optimization of forest fire spreading model based on cellular automata using PSO and ABC algorithms, *journal of Geographical Data (SEPEHR)*, 24(93): 65-76. (In Persian)
  - Ghaemi Rad, T. & M. Karimi, 2015. Evaluation performances of different forest fire spread models using cellular automata (case study: The forests of Lakan district in Rasht), *Iranian journal of Forests and Poplar Research*, 23(1): 64-78. (In Persian)
  - Ghisu, T., B. Arca, G. Pellizzaro & P. Duce, 2015. An optimal Cellular Automata algorithm for simulating wildfi re spread, *Environmental Modelling & Software*, 71: 1-14.
  - Hasanlou, M. & F. Samadzadegan, 2010. ICA/PCA base genetically band selection for classification of Hyperspectral images, *Asian Conference on Remote Sensing*, presented at the 31st.
  - Hanes, C., P. Jain, M. Flannigan, V. Fortin & G. Roy, 2017. Valuation of the Canadian Precipitation Analysis (CaPA) to improve forest fire danger rating, *International Journal of Wildland Fire*, 26(6): 509-522.
  - Jellouli, O., A. Bernoussi, M. Mâatouk & M. Amharref, 2016. Forest fire modelling using cellular automata: application to the watershed Oued Laou (Morocco). *Mathematical And Computer Modelling Of Dynamical Systems*, 22(5): 493-507.
  - Jahdi, R., A.A. Darvishshafat & V. Etemad, 2014. Predicting Forest Fire Spread Using Fire Behavior Model (Case study: Malekroud Forest-Siahkal), *Iranian journal of Forest*, 5(4): 419-430. (In Persian)
  - Karaboga, D., B. Gorkemli, C. Ozturk & N. Karaboga, 2014. A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications, *Artificial Intelligence Review*, 42(1): 21-57.
  - Karafyllidis, I. & A. Thanailakis, 1997. A model for prediction forest fire spreading using cellular automata, *Ecological Modelling*, 99(1): 87-97.
  - Lopes, A.M.G., L.M. Ribeiro, D.X. Viegas & J.R. Rapsoso, 2017. Effect of two-way coupling on the calculation of forest fire spread: model development, *International Journal of Wildland Fire*, 26(9): 829-843.
  - Ntaimo, L., M. Khargharia & B. Zeigler, 2004. Forest Fire Spread and Suppression in DEVS. Arizona Center for Integrative Modeling and Simulation, University of Arizona, 40 p.

- Perryman, H., Ch. Dugaw, M. Varner & D. Johnson, 2012. A cellular automata model to link surface fires to firebrand lift-off and dispersal, *International Journal of Wildland Fire*, 22(4): 428-439.
- Ruffault, J. & F. Mouillot, 2017. Contribution of human and biophysical factors to the spatial distribution of forest fire ignitions and large wildfires in a French Mediterranean region, *International Journal of Wildland Fire*, 26(6): 498-508.
- Shan, J., Sh. Alkheder & J. Wang, 2008. Genetic Algorithms for the Calibration of Cellular Automata Urban Growth Modeling, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74(10): 1267-1277.
- Shokri, R.A., R. Basiri & H. Taleshi, 2017. Effect of fire on structure and regeneration of oak coppice trees in Lorestan province (Case study: Tangeh Ghale area in Kuhdasht), *Journal of Forest Research and Development*, 3(2): 163-174. (In Persian)
- Sivanandam, S.N. & S.N. Deepa, 2008. Introduction to Genetic Algorithms, Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Thomas, C.M., J.J. Sharples & J.P. Evans, 2017. Modelling the dynamic behaviour of junction fires with a coupled atmosphere–fire model, *International Journal of Wildland Fire*, 26(4): 331-344.
- Uyanik, G. & N. Güler, 2013. A Study on Multiple Linear Regression Analysis, *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 106: 234-240.
- Wang, S.L., H.I. Lee & S.P. Li, 2014. Fractal dimensions of wildfire spreading, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 21(4): 815-823.
- Whitsed, R. & L. Smallbone, 2017. A hybrid genetic algorithm with local optimiser improves calibration of a vegetation change cellular automata model, *International Journal of Geographical Information Science*, 31(4): 717-737.
- Woo, H., W. Chung, J. Graham & B. Lee, 2017. Forest fire risk assessment using point process modelling of fire occurrence and Monte Carlo fire simulation, *International Journal of Wildland Fire*, 26(9): 789-805.

## **Providing a method based on cellular automata for modeling the forest fire development in Golestan national park forests**

**P. Pahlavani<sup>\*1</sup>, H. Sahraiiian<sup>2</sup> and B. Bigdeli<sup>3</sup>**

1- Assistant Professor, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, I. R. Iran. (pahlavani@ut.ac.ir)

2- Ph.D. student of Geospatial Information Systems, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, I. R. Iran. (sahraiiian@ut.ac.ir)

3- Assistant Professor, School of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Semnan, I. R. Iran. (bigdeli@shahroodut.ac.ir)

Received: 21.10.2018

Accepted: 27.02.2019

### **Abstract**

In the present study, firstly, the effective factors of Golestan national park forests fire have been identified. Then, by using these factors, forest fire development modeling is performed based on cellular automata. Multiple linear regression and genetic algorithm are used to determine the effective factors on Golestan national park forests fire. In order to investigate the effect of spatial resolution of the maps are used on the results of modeling, effective factors have been generated in different spatial resolution and these data are used as the input of the proposed algorithm. Also, the neighboring filters 3×3, 5×5, and 7×7 are used to investigate the effect of the neighboring filter in the forest fire development process. Cellular automata is used for modeling Golestan national park forests fire development, and the artificial bee colony is proposed to calibrate it. The results of this study show that using the proposed algorithm with 3×3 neighboring filter is more accurate than the other neighboring filters. In the best case, the Kappa index, the overall accuracy, and the relative operating characteristic are 0.924, 0.960, and 0.494, respectively that these results are for spatial resolution of 30 meters on November 17, 2010.

**Keywords:** Artificial bee colony, Forest fire, Genetic algorithm, Multiple linear regression.

---

\* Corresponding author

Tel: +982161114524