

مقایسه عملکرد مدل‌های اولیه و بهینه‌شده اتوماسیون سلولی در پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی جنگل

محمدواثق الحاج خلف^۱، شعبان شتایی^{۲*} و رقیه جهدی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد جنگل‌داری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- *نویسنده مسئول، استاد، گروه جنگل‌داری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

پست الکترونیک: shataee@gau.ac.ir

۳- استادیار، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۹

چکیده

مدل اتوماسیون سلولی به‌عنوان یکی از پرکاربردترین مدل‌های شبیه‌سازی گسترش آتش، نیازمند به‌کارگیری پارامترهای مناسب و ضریب‌های دقیق هستند. هدف اصلی پژوهش پیش‌رو، مقایسه مدل‌های اولیه اتوماسیون سلولی و مدل بهینه‌شده با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل به‌منظور پیش‌بینی نرخ گسترش آتش در یک جنگل دست‌کاشت در شمال شرقی استان گلستان است. با تهیه نقشه واقعیت زمینی نمونه‌ای، قابلیت داده‌های طیفی نوری و راداری ماهواره‌های سنتینل ۱ و ۲ برای تهیه نقشه تیپ و تراکم پوشش گیاهی مورد نیاز در مدل‌سازی گسترش آتش به‌عنوان هدف فرعی بررسی شد. پس از تصحیح تصاویر و استخراج شاخص‌های گیاهی، نقشه‌های نوع و تراکم پوشش گیاهی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی تهیه شد. نتایج ارزیابی صحت نشان داد که بهترین نتیجه با تلفیق داده‌های نوری و راداری به‌دست می‌آید (صحت کلی و ضریب کاپا به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۷۵). مدل‌سازی گسترش آتش با استفاده از مدل‌های اولیه و نیز با ضریب‌های بهینه‌شده در پژوهش‌های پیشین انجام شد. به‌منظور بهبود نتایج و بررسی مقایسه‌ای، ضریب‌های مدل براساس شرایط منطقه با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل بهینه‌سازی شد. سپس، مدل‌سازی تکرار شد و با آتش‌سوزی واقعی مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل‌های بهینه‌شده با الگوریتم کلونی زنبورعسل (بهینه‌شده Alexandridis و همکاران (۲۰۱۱) با صحت کلی، ضریب کاپا و ضریب سورنسن به ترتیب ۰/۹۲، ۰/۷۴ و ۰/۷۸ و بهینه‌شده Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) به ترتیب ۰/۹۳، ۰/۷۴ و ۰/۷۸) مطابقت بیشتری با آتش‌سوزی واقعی در مقایسه با مدل‌های اولیه و بهینه‌شده پیشین داشتند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم کلونی زنبورعسل، بهینه‌سازی، جنگل دست‌کاشت، سنتینل.

مقدمه

جو و نیز به خطر انداختن زندگی و دارایی انسان‌ها شده است (Andela et al., 2019). پیش‌بینی رفتار و آثار آتش، یک بخش مهم از مدیریت آتش در عرصه‌های طبیعی است (Scott & Burgan, 2005). استفاده از مدل‌سازی برای

در سال‌های اخیر، افزایش وقوع آتش در عرصه‌های طبیعی سبب آسیب و تخریب بوم‌سازگان‌های طبیعی و انسانی، تغییر در چرخه‌های زیست‌زمین‌شیمیایی و ترکیبات

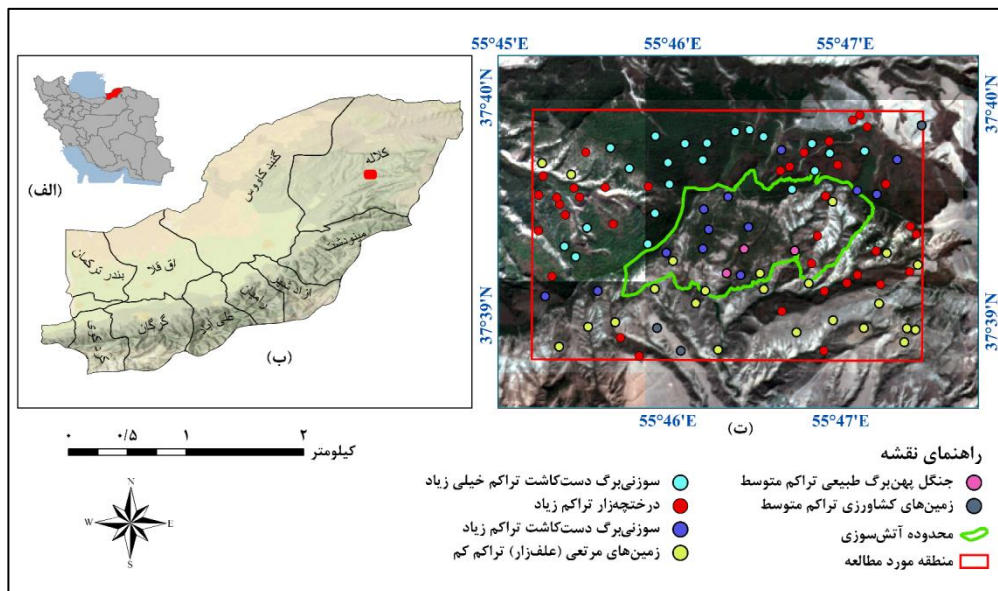
توپوگرافی، اقلیمی و محیطی ضروری است که ضریب‌های تجربی مدل اتوماسیون سلولی بهینه‌سازی شوند. با توجه به اهمیت اتوماسیون سلولی، بهینه‌سازی‌هایی برای بهبود کارایی این مدل انجام شده است. به‌عنوان نمونه، L. Hernández Encinas و همکاران (۲۰۰۷) یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی نرخ گسترش آتش در محیط‌های همگن و ناهمگن ارائه کردند. این مدل مبتنی بر یک مدل اتوماسیون سلولی دوبعدی بود که سلول‌های آن در مناطق شش‌ضلعی منظم قرار داشتند. Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸، ۲۰۱۱) یک مدل اتوماسیون سلولی مرتبط با سیستم اطلاعات جغرافیایی و داده‌های هواشناسی برای پیش‌بینی گسترش آتش معرفی کردند. نکته مهم دیگر در به‌کارگیری این مدل‌ها، بهینه‌سازی ضریب‌های مدل است که پژوهش‌هایی نیز در این زمینه انجام گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، Homchaudhuri و همکاران (۲۰۱۳) شبیه‌سازی گسترش آتش را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبود دادند. Rui و همکاران (۲۰۱۸) مدل اتوماسیون سلولی را با یک مدل آتش‌سوزی جنگل به‌منظور بهبود دقت زمان انتشار آتش تلفیق کردند. در ایران نیز تعدادی از پژوهشگران (Gazmeh *et al.*, 2013a, 2013b; Ghaemi Rad & Karimi, 2015; Eskandari & Oladi, 2017) برای پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال به‌کار گرفتند. براساس نتایج این پژوهش‌ها، مدل مذکور در صورتی در پیش‌بینی گسترش آتش، قابلیت زیادی خواهد داشت که داده‌های تجربی برای تعیین ضریب‌های بهینه مدل وجود داشته باشند. از این‌رو، کارایی این مدل در مناطق مختلف نیازمند بهینه‌سازی است (Alexandridis *et al.*, 2008, 2011; Gazmeh *et al.*, 2013a; 2013b). به همین دلیل، روش‌های زیادی از جمله هوش مصنوعی و جمعی به‌عنوان روش‌های کارآمد و کم‌هزینه به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی معرفی شده‌اند. در این راستا، Gazmeh و همکاران (۲۰۱۳a، ۲۰۱۳b) با استفاده از الگوریتم هوش ازدحام ذرات، ضریب کاپا در شبیه‌سازی گسترش آتش را از ۰/۵۸ به ۰/۹۱ ارتقا دادند. همچنین، با استفاده از

پیش‌بینی گسترش و رفتار آتش تحت حالت‌های مدیریتی مختلف برای درک بهتر فرایندهای آتش‌سوزی و حمایت از سرزمین، یک روش نوین و مؤثر محسوب می‌شود (Taylor *et al.*, 2013). از طریق این پیش‌بینی‌ها می‌توان شرایطی که در آن رفتار آتش تغییر خواهد کرد را شناسایی کرد. همچنین، پیش‌بینی آتش باعث ارزیابی بهتر واکنش‌های مدیریتی در مقابل آتش‌سوزی در جنگل می‌شود. این امر به مدیران این امکان را می‌دهد که شیوه‌های ممکن اطفای حریق به‌منظور فرونشانی کاراتر و مقرون‌به‌صرفه‌تر آتش‌سوزی‌های جنگل را ارزیابی کنند. پیش‌بینی رفتار آتش و شبیه‌سازی گسترش آن ابتدا باید براساس مدل‌های مختلف طراحی شده انجام گیرد و کارایی این مدل‌ها نیز ارزیابی شود. تاکنون مدل‌های زیادی برای شبیه‌سازی گسترش آتش طراحی و استفاده شده‌اند. براساس این مدل‌ها، مهم‌ترین عواملی که بر میزان گسترش و شکل جبهه آتش در جنگل‌ها تأثیر می‌گذارند، عبارتند از ماده سوختنی (نوع و تراکم پوشش گیاهی)، توپوگرافی (شیب و موانع طبیعی)، سرعت و جهت باد، رطوبت ماده سوختنی و ارتفاع درختان (Alexandridis *et al.*, 2011).

اتوماسیون سلولی (Cellular Automata)، یکی از پرکاربردترین مدل‌های شبیه‌سازی گسترش آتش است که استفاده بهینه از آن نیاز به استفاده از پارامترهای مناسب و ضریب‌های دقیق برای این پارامترها دارد. در این روش، زمین به‌صورت یک شبکه رستری شامل سلول‌های مربعی یا شش‌ضلعی تعریف می‌شود و هر سلول به چهار حالت غیرقابل سوختن (بدون ماده سوختنی)، سوخته‌نشده، در حال سوختن و به‌طور کامل سوخته‌شده تقسیم‌بندی می‌شود (Alexandridis *et al.*, 2011). نرخ گسترش آتش بالقوه براساس هر یک از این پارامترها توسط داده‌های تجربی یا به‌طور نظری در یک پایه تجربی ارزیابی می‌شود (A. Hernández Encinas *et al.*, 2007; Quartieri *et al.*, 2010; Alexandridis *et al.*, 2011). در بررسی و به‌کارگیری الگوریتم‌های مختلف برای شبیه‌سازی گسترش آتش در مناطق مختلف و با شرایط مختلف پوشش گیاهی،

داده‌های راداری و نوری، دقت این نقشه‌ها بهبود می‌یابد. آتش‌سوزی‌های زیادی در جنگل‌کاری‌های شرق استان گلستان به‌ویژه در توده‌های سوزنی‌برگ به‌دلیل حساسیت این گونه‌ها به آتش‌سوزی رخ می‌دهند. ازجمله آن‌ها می‌توان به منطقه کریم‌ایشان در حوزه سرچنگل‌بانی مراوه‌تپه اشاره کرد که به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در پژوهش پیش‌رو انتخاب شد. هدف اصلی پژوهش پیش‌رو، مقایسه عملکرد مدل‌های اتوماسیون سلولی اولیه ارائه‌شده توسط Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸، ۲۰۱۱) و نیز ضریب‌های به‌دست‌آمده مدل توسط Gazmeh و همکاران (۲۰۱۳a، ۲۰۱۳b) و بهینه‌سازی مدل با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل به‌منظور پیش‌بینی گسترش آتش در جنگل‌های دست‌کاشت مورد مطالعه بود. همچنین، قابلیت داده‌های سنجش‌ازدور نوری و راداری برای تهیه نقشه تیپ و تراکم پوشش گیاهی به‌عنوان یکی از نقشه‌های پایه و مهم به‌منظور مدل‌سازی گسترش آتش به‌عنوان هدف فرعی بررسی شد.

الگوریتم کلونی زنبورعسل (ABC) توانستند که ضریب کاپا در نقشه پیش‌بینی گسترش آتش را تا ۰/۹۲ افزایش دهند. از سوی دیگر، پوشش گیاهی یکی از عوامل مهم در گسترش آتش و تنها عامل محیط‌زیستی آتش محسوب می‌شود که توسط انسان قابل کنترل است. این عامل باید با دقت زیاد تهیه شده و در مدل به‌کار گرفته شود (Fernandes, 2001). انواع مختلف پوشش گیاهی، حساسیت متفاوتی در مقابل آتش‌سوزی دارند. همچنین، تراکم پوشش گیاهی، عامل اثرگذار بر گسترش آتش است (Alexandridis et al., 2008, 2011). با توجه به دشواری تهیه نقشه نوع و تراکم پوشش گیاهی به‌روش‌های سنتی، سنجش‌ازدور به‌عنوان روش کم‌هزینه و کارآمد در این راستا به‌کار گرفته شده است. تاکنون پژوهش‌های زیادی برای تهیه نقشه‌های پوشش گیاهی با داده‌های نوری و راداری به‌صورت جداگانه و یا تلفیق این دو داده انجام شده‌اند (Vreugdenhil et al., 2018; Ghasemian Sorboni et al., 2019; Grabska et al., 2019). گزارش کردند که با تلفیق



شکل ۱- محدوده منطقه مورد مطالعه در ایران (الف) و استان گلستان (ب) و موقعیت قطعه‌نمونه‌های پوشش گیاهی بر روی تصویر رنگی

واقعی Sentinel 2 (ت)

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در منطقه جنگل کاری کریم‌ایشان واقع در ۵۵ کیلومتری شمال شرقی شهر کلاله و در حوزه سرچنگلبانی مراوه تپه در استان گلستان در شمال شرقی ایران انجام شد (شکل ۱). این منطقه در طول جغرافیایی 39° تا 45° شرقی و 37° تا 38° عرض شمالی قرار دارد. منطقه مورد مطالعه از نظر پوشش گیاهی از غرب به شرق و شرایط توپوگرافی، سیمای متفاوتی دارد. مساحت این عرصه حدود ۳۰۰۰ هکتار است که با گونه‌های زیرین (*Cupressus sempervirens*) کاج بادامی (*Pinus pinea*) و سرو نقره‌ای (*Pinus brutia*)، کاج *arizonica*) با فاصله کاشت 3×3 متر مربع جنگل کاری شده است. همچنین، در اطراف منطقه مورد مطالعه، لکه‌های درختچه‌ای پهن برگ طبیعی شامل انار (*Punica granatum*) و سیاه‌تلو (*Paliurus Spina-Christi*)، مراتع به همراه لکه‌های کوچک از درختان پهن برگ طبیعی در دره‌ها شامل شیردار (*Acer Cappadocicum*) و پلت (*Acer velutinum*) و اراضی کشاورزی وجود دارند.

ویژگی‌های آتش رخ داده

آتش‌سوزی در منطقه کریم‌ایشان در تاریخ ۲۴ شهریور ۱۳۹۶ در ساعت ۱۰:۳۰ صبح شروع شده بود و بعد از ۱۱ ساعت توسط نیروهای اطفای حریق محلی فرونشانی شد (گزارش حریق یگان حفاظت اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان، ۱۳۹۶). در طی این آتش‌سوزی، ۱۳۷ هکتار تحت تأثیر آتش قرار گرفت. با توجه به آثار آتش بر پوشش گیاهی، آتش‌سوزی از نوع آتش سطحی تا تاجی شدید بود. اطلاعات سرعت و جهت باد به صورت ساعتی در طی حریق از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مطالعه

یعنی ایستگاه سینوپتیک کلاله اخذ شد. متوسط سرعت باد، پنج متر بر ثانیه و جهت باد ۲۷۰ درجه بود.

تهیه نقشه واقعیت زمینی نوع و تراکم پوشش گیاهی برای تهیه نقشه واقعیت زمینی پوشش گیاهی، صد قطعه نمونه دایره‌ای شکل با شعاع ۱۷/۸۴ متر به روش نمونه‌گیری انتخابی پیاده شد. این قطعه‌نمونه‌ها در تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی با تعداد مناسب برحسب فراوانی تیپ پوشش گیاهی در منطقه برداشت شده و موقعیت مکانی آن‌ها با GPS ثبت شد. نمونه‌ها به دو دسته ۷۰ درصد آموزش و ۳۰ درصد ارزیابی تفکیک شدند (جدول ۳). تیپ‌های منطقه مورد مطالعه با توجه به نوع گونه غالب، درصد پوشش گیاهی علفی، درختچه‌ای و درختی در پنج طبقه (شامل جنگل سوزنی‌برگ دست‌کاشت، جنگل پهن برگ طبیعی، درختچه‌زار طبیعی، زمین‌های مرتعی و اراضی کشاورزی) و در چهار طبقه تراکمی (کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) تقسیم شدند (شکل ۲). طبقه‌های تراکمی تیپ‌های جنگلی (سوزنی‌برگ دست‌کاشت و جنگل پهن برگ طبیعی) با توجه به تعداد طبقه‌های پوشش گیاهی (دو تا سه طبقه) مشخص شدند، در حالی که طبقه‌بندی تراکمی تیپ‌های دیگر برحسب درصد پوشش آن‌ها انجام شد. برای تعیین درصد پوشش گیاهی، قطر تاج درختان و درختچه‌ها اندازه‌گیری شد و با توجه به مساحت قطعه‌نمونه، درصد پوشش آن‌ها تعیین شد، در حالی که درصد پوشش علفی به صورت چشمی در هر قطعه‌نمونه تخمین زده شد. همچنین، ۳۸ قطعه‌نمونه (۳۸ درصد از کل قطعه‌نمونه‌ها) به منظور محاسبه ارتفاع پوشش گیاهی و رطوبت ماده سوختنی انتخاب شدند. ارتفاع با استفاده از متر لیزری و رطوبت مواد سوختنی به روش تخریبی و تعیین وزن اولیه و وزن خشک اندازه‌گیری شدند.



جنگل پهن برگ طبیعی



جنگل سوزنی برگ دست کاشت



زمین کشاورزی



درختچه زار طبیعی



زمین مرتعی (علفزار)

شکل ۲- تیپ‌های پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه

تصحیحات دقیق اتمسفری از ابزار Sen2core استفاده شد. برای تصحیح هندسی، حذف اثر توپوگرافی و جابه‌جایی ناشی از آن، مدل رقومی ارتفاعی و نقاط کنترل زمینی به کار گرفته شد. تصاویر راداری Sentinel-1 در قطبش‌های VV و VH دریافت شد و به کمیت‌های سیگما نات (Sigma Naught) تبدیل شدند. تصحیحات اثر توپوگرافی نیز انجام شد. همچنین، خطای نویز اسپکل (Noise Speckle) با استفاده از فیلتر پایین گذر با پنجره ۷×۷ حذف شد.

تهیه نقشه تیپ و تراکم پوشش گیاهی با استفاده از داده‌های سنجنش ازدور

به منظور تهیه نقشه تیپ و تراکم پوشش گیاهی به عنوان نقشه پایه برای شبیه‌سازی رفتار آتش، تصاویر ماهواره‌های Sentinel-1 و Sentinel-2 مربوط به پیش از آتش‌سوزی از سایت Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>) تهیه شدند (جدول ۱). تصاویر Sentinel-2 در سطح دو تصحیحات (هندسی و رادیومتری) تهیه شده بودند، اما برای

جدول ۱- داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در منطقه مورد مطالعه

سنجنده	اندازه تفکیک مکانی (متر)	تاریخ
Sentinel-1	۵	۱۳۹۶/۶/۲۱
Sentinel-2	مرئی و مادون قرمز نزدیک (۱۰)، مادون قرمز میانی (۲۰)	۱۳۹۶/۶/۲۳

طبقه‌بندی به‌روش آزمون وخطا بررسی شد تا بهترین نتیجه برحسب ضریب کاپا به‌عنوان نقشه پایه برای شبیه‌سازی گسترش آتش به‌دست آید. پس از طبقه‌بندی و انتخاب بهترین نقشه، فیلتر اکثریت (Majority) و هموارسازی (Smoothing) برای حذف تک‌پیکسل‌ها که به‌اشتباه طبقه‌بندی شده بودند، روی نقشه انجام شد.

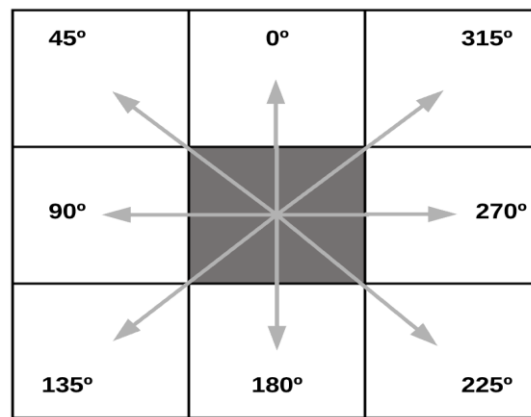
پس از تصحیحات لازم، شاخص‌های گیاهی راداری و نوری تهیه شد و مقدار پیکسل‌های شاخص‌های محاسبه‌شده منطبق با نمونه‌های واقعیت زمینی استخراج شد (جدول ۲). سپس، طبقه‌بندی تصاویر با کاربرد الگوریتم ناپارامتریک جنگل تصادفی با تلفیق داده‌ها و نیز به‌صورت جداگانه انجام شد. در اجرای الگوریتم، پارامترهای مختلف مانند تعداد درختان با استفاده از روش جستجوی شبکه و تعداد گره‌های

جدول ۲- شاخص‌های گیاهی استخراج‌شده براساس تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در منطقه مورد مطالعه

منبع	رابطه	نام انگلیسی	شاخص	سنجده
	$\frac{(\sigma_{vv(i)} + \sigma_{vh(i)})}{\sqrt{2}}$	Dual Pol Diagonal Distance	DPDD	
(Periasamy, 2018)	$\frac{(\sigma_{vv(i)} + \sigma_{vh(i)})}{\sigma_{vv(i)}}$	Vertical Dual Depolarization Index	VDDPI	
	IDPDD(i) × VDDPI(i) × $\sigma_{vh(i)}$	Dual Pol Soil Vegetation Index	DPSVii4	
	$\sigma_{vh(i)} - \sigma_{vv(i)}$	Sigma Nought Back Scatter Difference	SNBSD	Sentinel-1
	$\frac{(\sigma_{vv(i)} + \sigma_{vh(i)}) + \sigma_{vh(i)}}{\sqrt{2}}$	Inverse Dual Pol Diagonal Distance	IDPDD	
(Filgueiras et al., 2019)	$\frac{(\sigma_{vh(i)} - \sigma_{vv(i)})}{(\sigma_{vv(i)} + \sigma_{vh(i)})}$	Normalized Ratio Procedure between Bands	NRPB	
(Dey, n.d.)	$\frac{(4 \times \sigma_{vh(i)})}{(\sigma_{vv(i)} + \sigma_{vh(i)})}$	Radar Vegetation Index	RVI	
(Rouse et al., 1974)	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	
(Delegido, 2011)	$\frac{NIR - RED_{705}}{NIR + RED_{705}}$	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI ₇₀₅	
(Rondeaux et al., 1996)	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED + 0.16}$	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	OSAVI	
(Campos-Taberner et al., 2019)	$\frac{NIR - RED_{705}}{NIR + RED_{705} + 0.16}$	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	OSAVI ₇₀₅	Sentinel-2
(Daughtry et al., 2000)	$\frac{((RED_{705} - GREEN) - 0.2 \times (RED_{705} - GREEN)) \times (\frac{RED_{705}}{RED_{665}})}$	Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index	MCARI	
(Merzlyak et al., 1999)	$\frac{RED - GREEN}{RED_{740}}$	Plant Senescence Reflectance Index	PSRI	

سوختن، هنوز سوخته نشده، غیرقابل سوختن و به طور کامل سوخته شده در نظر گرفته می شود. سلول سوخته شده نمی تواند دوباره سوزانده شود. سلول در حال سوختن در یک گام زمانی جدا، به طور کامل سوخته می شود. آتش سوزی از یک سلول به سلول های همسایه خود به صورت تصادفی منتشر می شود. احتمال گسترش آتش به متغیرهای نوع و تراکم پوشش گیاهی (متغیرهای گسسته)، رطوبت و ارتفاع پوشش گیاهی، سرعت و جهت باد و شیب زمین (متغیرهای پیوسته) بستگی دارد. احتمال گسترش آتش با این عامل ها به صورت جداگانه محاسبه شد (Alexandridis et al., 2008, 2011).

مدل های اتوماسیون سلولی مورد استفاده در این پژوهش، مدل های ارائه شده توسط Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸، ۲۰۱۱) بر پایه قوانین اتوماسیون سلولی و روش همسایگی هشت تایی مور (Moore) (شکل ۳) بررسی شد. همچنین، ضریب ها برای مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) بهینه شده توسط Gazmeh و همکاران (۲۰۱۳a، ۲۰۱۳b) ارزیابی شد (جدول ۴). در این مدل، گسترش آتش در فضایی دوبعدی به صورت احتمالی بر حسب زمان و مکان نشان داده می شود. لازم به ذکر است که سلول ها در پژوهش پیش رو، مربعی شکل در نظر گرفته شدند. پیش فرض های اصلی این مدل به شرح زیر هستند: چهار حالت برای سلول ها شامل سلول های در حال



شکل ۳- روش همسایگی هشت تایی مور (Alexandridis et al., 2011)

Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) از رابطه ۱ و برای مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۱۱) از رابطه ۲ محاسبه شد:

احتمال گسترش آتش بر اثر متغیرهای فوق در سلول های همسایه یک سلول در حال سوختن برای مدل

$$P_{burn} = p_0(1 + P_{veg})(1 + P_{den})P_w P_s \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$P_{burn} = p_0(1 + P_{veg})(1 + P_{den})P_w P_s P_h P_m \quad \text{رابطه (۲)}$$

پوشش گیاهی، جهت و سرعت باد، شیب زمین، ارتفاع درختان و رطوبت ماده سوختنی هستند که در ادامه تشریح می شوند.

در رابطه های فوق: p_0 ضریب تجربی و بیانگر احتمال گسترش آتش به سلول دیگر است. P_{veg} ، P_{den} ، P_w ، P_s ، P_h و P_m احتمال گسترش آتش به ترتیب براساس نوع و تراکم

اثر نوع و تراکم پوشش گیاهی پس از انجام طبقه‌بندی، انتخاب بهترین مقدار نوع و تراکم پوشش گیاهی برحسب توصیف Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸، ۲۰۱۱) و Giannino و همکاران (۲۰۱۷) و نیز وضعیت پوشش گیاهی در منطقه به صورت دو ماتریس جداگانه تعریف شد (جدول ۳).

جدول ۳- ضریب‌های نوع و تراکم پوشش در منطقه مورد مطالعه

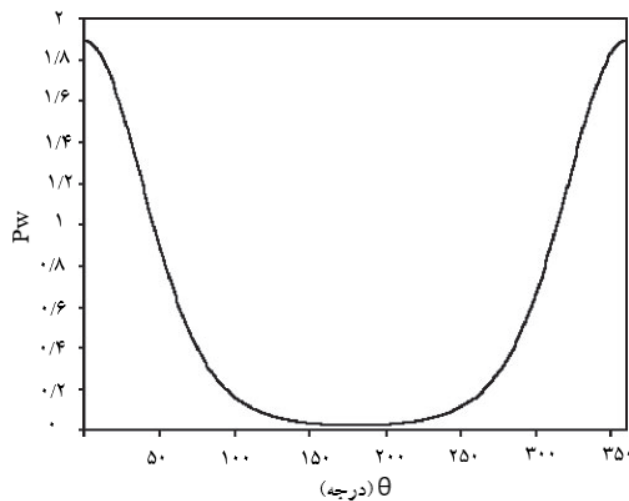
P_{den}	P_{veg}	تراکم پوشش گیاهی	درصد پوشش	نوع (تیپ) پوشش گیاهی
۰/۱۵	۰/۴	زیاد	۷۵	جنگل سوزنی‌برگ دست‌کاشت
۰/۳	۰/۴	خیلی زیاد	۹۰	
۰/۱۵	۰/۲	زیاد	۷۵	درختچه‌زار طبیعی
۰	۰	متوسط	۵۰	جنگل پهن‌برگ طبیعی
-۰/۳۵	۰/۴	کم	$۵۰ <$	مرتع
۰	-۰/۳	متوسط	۶۰	زمین‌های کشاورزی زراعی
-۰/۴	-۱	-	-	غیرقابل سوختن (جاده‌ها و رودخانه‌ها)

آتش بر اثر سرعت و جهت باد (p_w) از رابطه‌های ۳ و ۴ محاسبه می‌شود (Alexandridis et al., 2008, 2011). لازم به ذکر است که داده‌های مورد نیاز این بخش از ایستگاه کلاله اخذ شد.

اثر جهت و سرعت باد مدل‌های زیادی به منظور توصیف رابطه بین گسترش آتش و مشخصات باد پیشنهاد شده‌اند. در پژوهش پیش‌رو از یک مدل پویا که توسط Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) ارائه شده، استفاده شد. در این مدل، احتمال انتقال

$$p_w = f_t \times e^{c1^v} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$f_t = e^{V \times c2 \times (\cos \theta - 1)} \quad \text{رابطه (۴)}$$



شکل ۴- اثر زاویه باد بر احتمال گسترش آتش (Alexandridis et al., 2011)

(۲۰۰۱) استفاده شد:

$$R_m = a_1 \times e^{-bC_m} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن: a_1 و b ضریب‌های تجربی (جدول ۴) و C_m درصد رطوبت ماده سوختنی هستند. نمونه‌های پوشش گیاهی (شامل مواد سوختنی زنده و مرده) از طبقه‌های مختلف جمع‌آوری شدند. وزن تر این نمونه‌ها در عرصه با استفاده از ترازوی رقومی اندازه‌گیری شد. پس از خشک کردن این نمونه‌ها در دستگاه آون، رطوبت ماده سوختنی از رابطه ۹ محاسبه شد (Norum & Miller, 1984).

$$C_m = \frac{W_0 - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100 \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن: W_0 و W_{dry} به ترتیب وزن اولیه و وزن خشک ماده سوختنی هستند.

اثر ارتفاع پوشش گیاهی

ارتفاع پوشش گیاهی از عوامل اثرگذار بر انتشار آتش (Fernandes, 2001) و نیز بر سرعت باد است. به طوری که وجود پوشش گیاهی و ارتفاع آن باعث کاهش سرعت باد درون پوشش گیاهی می‌شود. برای محاسبه ارتفاع پوشش گیاهی، میانگین بالاترین طبقه در تپ‌های مختلف (درختان، درختچه‌ها و پوشش علفی) محاسبه شد. دلیل این مسئله این است که ارتفاع پوشش گیاهی در این مدل، نمایه عمق بستر ماده سوختنی به شمار می‌آید (Alexandridis et al., 2011). وابستگی نرخ گسترش (R_h) برحسب متر بر دقیقه با ارتفاع پوشش گیاهی (h) برحسب متر از رابطه ۱۰ محاسبه شد (Fernandes, 2001). در این رابطه d ضریب ارتفاع پوشش گیاهی است (جدول ۴).

$$R_h = h^d \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در آن‌ها: V نشان‌دهنده سرعت باد (متر/دقیقه)، C_1 و C_2 ضریب‌های تجربی تعیین‌شده (جدول ۴) و θ بیانگر زاویه (درجه) بین جهت انتشار آتش و جهت باد هستند. از آنجایی که جهت باد می‌تواند مقداری پیوسته بین صفر تا ۳۶۰ درجه باشد، بنابراین p_w مقادیر متفاوتی خواهد داشت (شکل ۴).

اثر عوامل توپوگرافی

احتمال گسترش آتش بر اثر شیب و مقدار آن از رابطه ۵ محاسبه شد:

$$p_s = e^{a\theta_s} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن: a ضریبی است که می‌تواند براساس داده‌های تجربی تنظیم شود (جدول ۴). θ_s نیز بیانگر شیب زمین (درجه) است. با توجه به شکل سلول‌ها که مربعی است، بسته به اینکه دو سلول همسایه مجاور و یا قطری باشند، زاویه شیب از راه‌های مختلفی محاسبه می‌شود. به این دلیل، زاویه شیب برای سلول‌های مجاور (صفر، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه) و برای سلول‌های قطری (۴۵، ۱۳۵، ۲۲۵ و ۳۱۵ درجه) از رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه می‌شود:

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{E_1 - E_2}{1} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{E_1 - E_2}{\sqrt{2}l} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن‌ها: E_1 و E_2 نشان‌دهنده ارتفاع دو سلول و l بیانگر طول ضلع سلول مربعی برحسب متر هستند.

اثر رطوبت ماده سوختنی

پژوهش‌های تجربی نشان داده‌اند که اشتعال‌پذیری پوشش گیاهی و پیرو آن، سرعت انتشار آتش به رطوبت ماده سوختنی بستگی دارد. برای محاسبه اثر رطوبت ماده سوختنی بر گسترش آتش از رابطه تعریف‌شده Fernandes

جدول ۴- ضریب‌های اولیه مربوط به مدل‌های پژوهش‌های پیشین به‌دست آمده برای منطقه مورد مطالعه

d	b	a ₁	c ₂	c ₁	a	P ₀	ضریب
-	-	-	۰/۱۳۱	۰/۰۴۵	۰/۰۵۷	۰/۵۸	Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸)
-	-	-	۰/۰۰۴	۰/۰۲۱۹	۰/۰۲	۰/۶۰۰۳	Gazmech و همکاران (۲۰۱۳a)
-	-	-	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۰۰۴۷	۰/۰۰۲۷	۰/۶۰۰۷	Gazmech و همکاران (۲۰۱۳b)
۰/۹۳۲	۰/۱۱۱	۳/۲۵۸	۰/۱۹۱	۰/۰۴۵	۰/۰۶۳	۰/۵۸	Alexandridis و همکاران (۲۰۱۱)

مدل

صحت کلی (OA) (Ryan, 2002)، ضریب (SC) Sorensen (SC) (Češka, 1966) و ضریب Cohen Kappa (KC) (Congalton, 1991) بودند.

$$OA = \frac{1}{N} \times \sum p_{ii} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$KC = \frac{p_0 - OA}{1 - OA} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$SC = \frac{2a}{2a + b + c} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

که در آن‌ها: N تعداد کل پیکسل‌ها، p_{ii} عنصرهای قطر اصلی ماتریس خطا یا تعداد پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده، p₀ توافق اتفاقی، a تعداد پیکسل‌های دارای وضعیت منطبق بین هر دو نقشه (واقعیت و پیش‌بینی شده)، b تعداد پیکسل‌های بیش‌برآورد (سوخته‌شده در نقشه پیش‌بینی شده، اما سوخته‌نشده در واقعیت) و c تعداد پیکسل‌های کم‌برآورد (سوخته‌شده در نقشه واقعیت، اما سوخته‌نشده در نقشه پیش‌بینی شده) هستند.

نتایج

نتایج طبقه‌بندی نقشه‌های نوع و تراکم پوشش گیاهی برحسب نوع سنجنده و باندهای مورد استفاده نشان داد که بهترین نتیجه با تلفیق همه باندها از هر دو سنجنده با صحت کلی ۸۱ درصد و ضریب کاپای ۰/۷۵ به‌دست آمد (جدول ۵). شکل ۵، نقشه به‌دست‌آمده از تلفیق داده‌های نوری و راداری را نشان می‌دهد. همچنین، دیگر عوامل ورودی مدل شبیه‌سازی گسترش آتش، در شکل ۶ ارائه

بهینه‌سازی و کالیبراسیون مدل در پژوهش پیش‌رو از الگوریتم کلونی زنبورعسل به‌منظور بهینه‌سازی ضریب‌ها در مدل‌های اتوماسیون سلولی اولیه ارائه‌شده توسط Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸)، (۲۰۱۱) استفاده شد. زیرا همه این ضریب‌ها تجربی هستند، اما داده‌های تجربی از منطقه مورد مطالعه در دسترس نیست. الگوریتم کلونی زنبورعسل، یک روش بهینه‌سازی است که رفتار زنبورهای عسل را شبیه‌سازی می‌کند (Karaboga, 2005). این الگوریتم متعلق به گروه الگوریتم‌های هوش جمعی است که توسط Karaboga (۲۰۰۵) ارائه شد. برای اجرای الگوریتم کلونی زنبورعسل، تعداد زنبورهای کارگر، پیش‌رو و جستجوگر به ترتیب نه، سه و دو تعیین شد. همچنین، ضریب کاپا به‌عنوان شاخص راه‌حل استفاده شد. بازه صفر تا ۱۰ نیز برای همه ضریب‌ها در نظر گرفته شد.

پیاده‌سازی مدل و ارزیابی صحت

پس از تعیین ضریب‌های نوع و تراکم مواد سوختنی، رطوبت ماده سوختنی و ارتفاع آن، در مرحله بعد، نقشه‌های رستری در محیط ArcMap 10.8 تهیه شد. همه نقشه‌ها به‌صورت ماتریس‌ها با استفاده از کدنویسی متلب فراخوانی شدند. سپس، نقطه شروع آتش انتخاب شد. با انجام شبیه‌سازی‌ها با استفاده از ضریب‌های اولیه و بهینه‌شده، مدل‌ها اجرا شدند و نقشه پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی در نرم‌افزار Matlab 2019b تهیه شد. پس از اجرای مدل و به‌دست آوردن نقشه‌های حاصل از آن، ارزیابی اعتبار نتایج نقشه‌های پیش‌بینی شده با نقشه محدوده آتش‌سوزی واقعی در ArcMap 10.8 انجام گرفت. معیارهای ارزیابی (رابطه‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳) شامل

پهن‌برگ طبیعی (۰/۸۵) و زمین کشاورزی (۰/۱) مشاهده شد. بیشترین ارتفاع پوشش گیاهی نیز متعلق به تیپ سوزنی‌برگ بود (۱۱ متر).

شده است. رطوبت مواد سوختنی و ارتفاع پوشش گیاهی برحسب تیپ پوشش گیاهی، کمیت‌های مختلفی دارند. بیشترین و کمترین مقدار رطوبت به ترتیب برای تیپ جنگل

جدول ۵- نتایج طبقه‌بندی نقشه‌های پوشش گیاهی با استفاده از داده‌های مورد بررسی

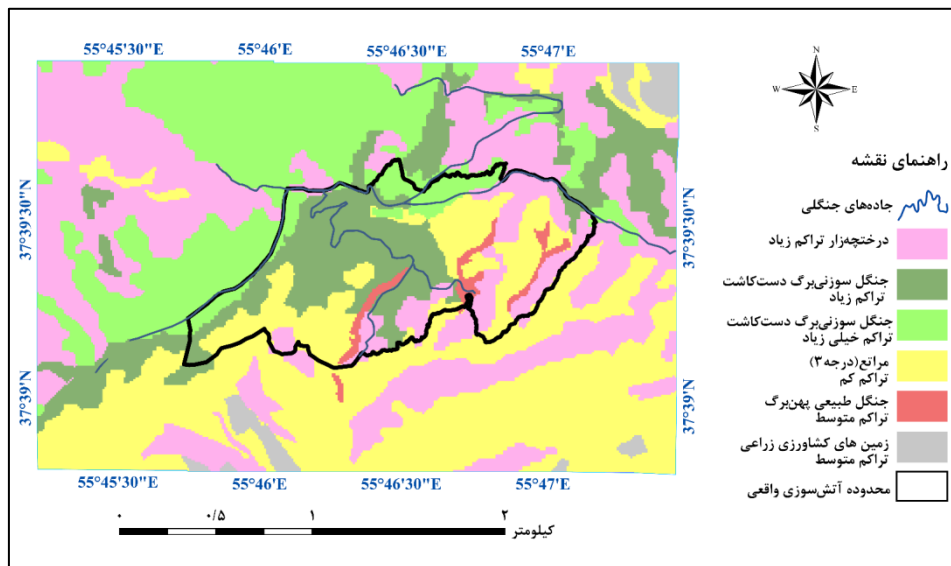
کل	Sentinel-2 + شاخص‌ها	Sentinel-2	Sentinel-1 + شاخص‌ها	Sentinel-1	باند‌ها
۸۱	۷۷	۷۶	۳۹	۳۹	صحت کلی (درصد)
۰/۷۵	۰/۶۹	۰/۶۵	۰/۳	۰/۲۱	ضریب کاپا

مدل‌های پیشین و بهینه‌شده آمده است که با نقشه آتش‌سوزی واقعی ارزیابی شدند. شکل ۷، محدوده‌های شبیه‌سازی شده را با مدل‌های مختلف و شکل ۸، نقشه زمانی گسترش آتش را با استفاده از مدل‌های مورد بررسی نشان می‌دهند.

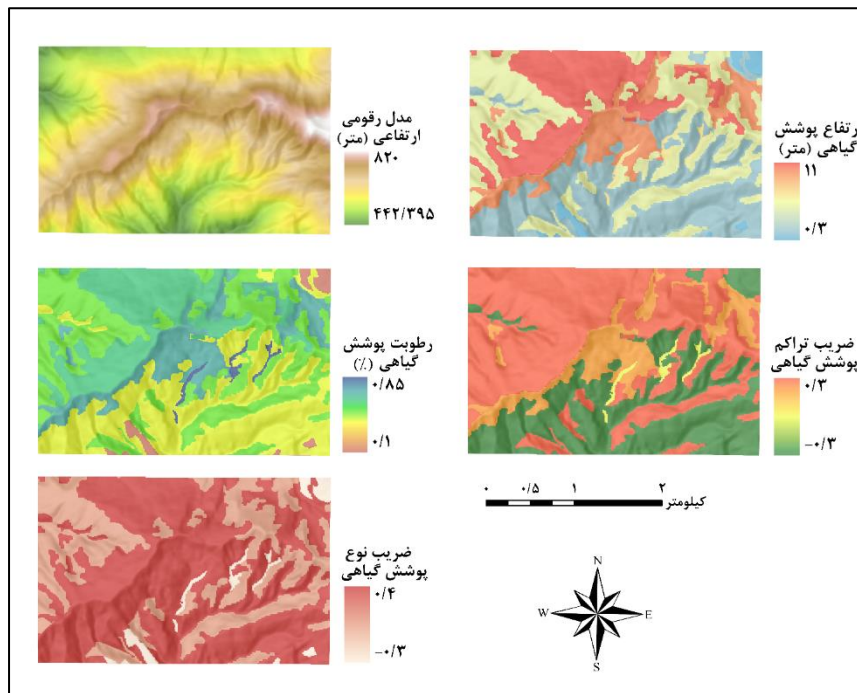
در شبیه‌سازی مدل گسترش آتش، بهینه‌سازی ضریب‌های مدل‌ها بسیار مهم هستند. جدول ۶، ضریب‌های بهینه‌شده با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل برای مدل‌های Alexandridis (۲۰۰۸، ۲۰۱۱) را نشان می‌دهد. در جدول ۷، نتایج شبیه‌سازی مدل گسترش آتش با

جدول ۶- ضریب‌های بهینه به دست آمده با استفاده از الگوریتم ABC در منطقه مورد مطالعه

d	b	a ₁	c ₂	c ₁	a	p ₀	ضریب	مدل
۰/۵۳۵	۰/۰۶۸۹	۱/۰۰۲۶	۰/۴۵۷۵	۰/۰۶۲۳	۰/۰۹۰۲	۰/۷۱۹۶	Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸)	مدل
-	-	-	۰/۲۷۷۵	۰/۱۶۲۳	۰/۱۱۰۲	۰/۵۱۹۶	Alexandridis و همکاران (۲۰۱۱)	



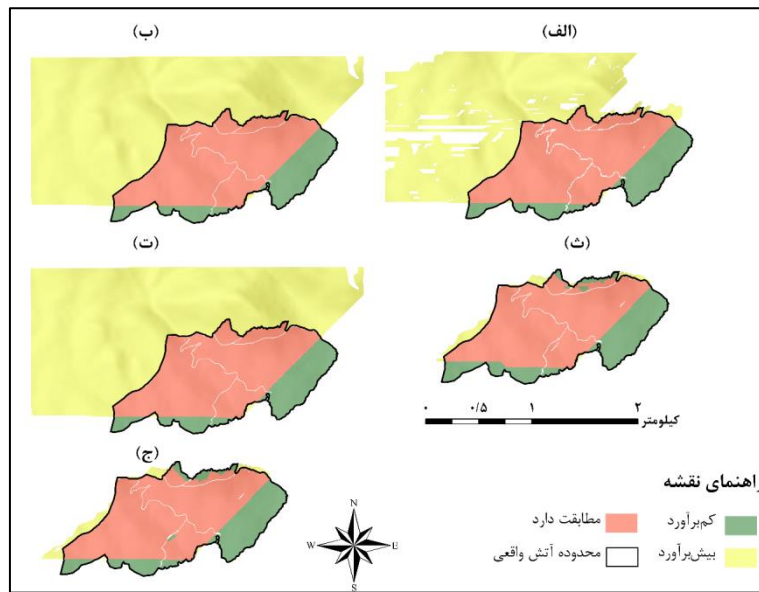
شکل ۵- نقشه پوشش گیاهی به دست آمده از طبقه‌بندی با تلفیق داده‌های نوری و راداری



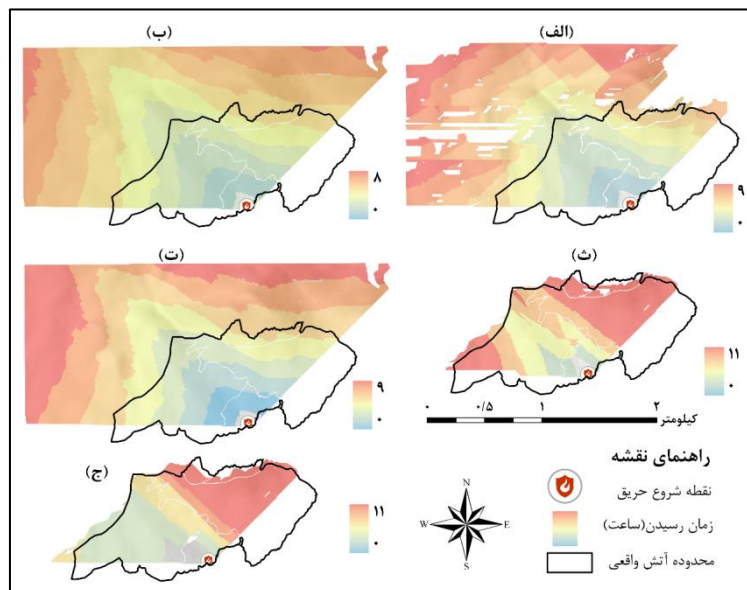
شکل ۶- نقشه‌های عوامل ورودی مدل مؤثر بر گسترش آتش

جدول ۷- نتایج شبیه‌سازی براساس مدل‌ها و ضریب‌های استفاده‌شده در منطقه مورد مطالعه

مدل		Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸)		Alexandridis و همکاران (۲۰۱۱)	
ضریب	اولیه	Gazmeh و همکاران (۲۰۱۳a)	Gazmeh و همکاران (۲۰۱۳b)	اولیه	بهبوده شده
زمان سوختن (ساعت)	۹/۱۷	۸/۸۶	۸/۲۵	۱/۸	۱۰/۹۹
کم‌برآورد (هکتار)	۳۴/۶۱	۳۳/۴۵	۳۳/۴۵	۱۳۶/۷۵	۳۷/۵۱
بیش‌برآورد (هکتار)	۲۰۱/۸	۲۷۳/۵۵	۲۷۳/۵۵	۰	۱۷/۹۱
مطابقت (هکتار)	۱۰۲/۲۲	۱۰۲/۳۸	۱۰۲/۳۸	۰/۰۸	۹۹/۳۲
صحت کلی (درصد)	۶۷	۴۰	۴۰	۰/۰۰۱	۹۲
ضریب کاپا	۰/۲۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۰۰۱	۰/۷۴
ضریب سورنسن	۰/۴۶	۰/۴	۰/۴	۰/۰۰۱۲	۰/۷۸



شکل ۷- محدوده شبیه‌سازی شده آتش با مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) با ضریب‌های اولیه (الف)، ضریب‌های Gazmeh و همکاران (۲۰۱۳a) (ب)، ضریب‌های Gazmeh و همکاران (۲۰۱۳b) (ت)، ضریب‌های بهینه‌شده (ث) و محدوده آتش شبیه‌سازی شده با مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۱۱) با ضریب‌های بهینه‌شده (ج)



شکل ۸- زمان رسیدن آتش شبیه‌سازی شده با مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) با ضریب‌های اولیه (الف)، ضریب‌های Gazmeh و همکاران (۲۰۱۳a) (ب)، ضریب‌های Gazmeh و همکاران (۲۰۱۳b) (ت)، ضریب‌های بهینه‌شده (ث) و محدوده آتش شبیه‌سازی شده با مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۱۱) با ضریب‌های بهینه‌شده (ج)

بحث

در تهیه نقشه پوشش گیاهی به‌عنوان ماده سوختنی، استفاده تلفیقی از داده‌های Sentinel-1 و Sentinel-2 باعث تفکیک بهتر طبقه‌هایی همانند درختچه‌ها، جنگل‌ها و مراتع شد. این طبقه‌ها، ویژگی‌های طیفی به‌نسبت مشابهی در تصاویر نوری دارند. این نتیجه با یافته‌های Campos-Taberner و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد. آن‌ها بیان کردند که تلفیق داده‌های Sentinel-1 و Sentinel-2 باعث بهبود نتایج طبقه‌بندی می‌شود. همچنین، براساس پژوهش Baumann و همکاران (۲۰۱۸)، تلفیق داده‌های Sentinel-1 و Landsat 8 افزایش قدرت تفکیک طبقه‌ها را به‌دنبال دارد. در پژوهش پیش‌رو، استفاده از داده‌های Sentinel-1 به‌تنهایی (باندهای اصلی + شاخص‌ها) نتایج مطلوبی را برای منطقه مورد مطالعه ارائه نداد. Ghasemian Sorboni و همکاران (۲۰۱۹) یافته‌های مشابهی را به‌دست آوردند. این نتیجه به‌دلیل محدودیت قطبشی سنجنده Sentinel-1 (فاقد باندهای HH و HV) است. در راستای نتایج پژوهش پیش‌رو، Baumann و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که همبستگی بین داده‌های طیفی Sentinel-1 و پوشش درختی و درختچه‌ای کم است (به‌ترتیب $R^2 = 0.4$ و $R^2 = 0.3$). نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که اگرچه استفاده از باندهای اصلی سنجنده Sentinel-2 نتایج خوبی را به‌همراه دارد، اما تلفیق این داده‌ها با شاخص‌های طیفی نیز باعث بهبود یافته‌ها می‌شود. زیرا به‌طور کلی شاخص‌های طیفی، نویزهای ناشی از خاک و تاج پوشش گیاهی را کاهش می‌دهند. علاوه‌براین، استفاده از شاخص‌های OSAVI705 و NDVI705 به‌دلیل استفاده از باند لبه قرمز باعث تفکیک بهتر طبقه‌های پوشش گیاهی می‌شود (Baumann et al., 2018).

در این پژوهش براساس شبیه‌سازی گسترش

آتش، نتایج متفاوتی برحسب ضریب‌ها و مدل به‌دست آمد. در مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) با ضریب‌های اولیه، محدوده آتش شبیه‌سازی شده بزرگ‌تر و نیز سرعت گسترش آتش شبیه‌سازی شده نسبت به آتش واقعی بیشتر بود، به‌طوری‌که در این سناریو طی نه ساعت، ۳۰۴ هکتار به‌عنوان منطقه سوخته‌شده شبیه‌سازی شد که بسیار بیشتر از مساحت آتش واقعی بود، بنابراین شبیه‌سازی براساس ضریب‌های اولیه مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) برای منطقه مورد مطالعه، نتایج مطلوبی را ارائه نداد. اعمال و به‌کارگیری ضریب‌های به‌دست‌آمده توسط Gazmeh و همکاران (۲۰۱۳a، ۲۰۱۳b) نیز به‌رغم بهینه‌سازی آن‌ها برای یک جنگل دیگر در استان گلستان، نتیجه خوبی را برای منطقه مورد مطالعه به‌دنبال نداشت. این مورد می‌تواند به‌دلیل وجود پستی‌وبلندی‌های زیاد در منطقه مورد مطالعه باشد. اعمال این ضریب‌ها در مدل منجر به تولید محدوده آتش بزرگ‌تر و سرعت گسترش آتش بیشتر از آتش واقعی شد (شکل‌های ۷ و ۸). با استفاده از ضریب‌های Gazmeh و همکاران (۲۰۱۳b) نرخ گسترش آتش بیشتر بود، اما از این نظر بین نتایج دو سناریوی مذکور، تفاوت اندکی وجود دارد. لازم به ذکر است که ضریب‌های Gazmeh و همکاران (۲۰۱۳a، ۲۰۱۳b) برای منطقه دیگر، اما با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مختلفی (به‌ترتیب الگوریتم PSO و HBF) به‌دست آمدند. ضریب‌های بهینه‌شده (جدول ۷) با استفاده از الگوریتم BCA برای مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) نتایج متفاوتی از سناریوهای پیشین نشان داد. در این حالت، زمان شبیه‌سازی به زمان واقعی آتش‌سوزی بسیار نزدیک بود (۱۰/۹۹ ساعت) و منطقه سوخته‌شده با مساحت ۱۱۱/۱۶ هکتار به‌میزان ۹۷/۳۳ هکتار با آتش واقعی مطابقت دارد. به همین ترتیب، دقت معیارهای

مورد بررسی زیاد بود ($OA=0/93$, $KC=0/74$) و ($SC=0/78$) (جدول ۷). این نتیجه با یافته‌های Gazmeh و همکاران (۲۰۱۳a, ۲۰۱۳b) مطابقت دارد. در مورد مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۱۱)، اعمال ضریب‌های اولیه نشان داد که پوشش گیاهی در این شرایط قابل سوختن نیست. دلیل اصلی این مسئله به رطوبت ماده سوختنی برمی‌گردد، زیرا ضریب اولیه، مقدار به نسبت زیادی است و برحسب فرمول باعث کاهش احتمال گسترش آتش می‌شود. قابل ذکر است که Fernandes (۲۰۰۱)، مقدار تفاوت بین نتایج در نرخ گسترش آتش را تا ۶۵ درصد گزارش کرد. اعمال ضریب‌های بهینه‌شده (جدول ۶) در مدل مذکور، نتایج خوبی در پژوهش پیش‌رو ارائه داد. در این سناریو، مساحت منطقه سوخته شده برابر با ۱۱۷/۲۳ هکتار بود و ۹۹/۳۲ هکتار با آتش واقعی مطابقت داشت ($OA=0/92$, $KC=0/74$) و ($SC=0/78$). همچنین، زمان سوختن بسیار نزدیک به زمان واقعی بود (۱۰/۹۹ ساعت) (جدول ۷). این نتیجه با مدل بهینه‌شده Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت دارد (شکل ۷-ث و ج). تفاوت اصلی در جهت گسترش آتش است. به طوری که در جهت غربی، مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۱۱) سرعت بیشتری نشان داد (شکل ۸-ج). این مسئله با رطوبت ماده سوختنی در ارتباط است. در این جهت در بیشتر کاربری‌های اراضی، زمین‌های مرتعی (علفزار) استقرار دارند که رطوبت به نسبت کمتری در مقایسه با تیپ‌های دیگر دارند (شکل ۶). در جهت شرقی، تیپ‌های پوشش گیاهی شامل جنگل پهن‌برگ طبیعی و درختچه‌زار طبیعی بودند. هرچند مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) رطوبت ماده سوختنی را در نظر نمی‌گیرد، اما به مطابقت بین هر دو مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸ و ۲۰۱۱) در پژوهش مشابهی را گزارش کردند.

به طور کلی، بر مبنای نتایج به دست آمده در پژوهش پیش‌رو می‌توان گفت که داده‌های راداری Sentinel-1 قابلیت تفکیک طبقه‌های کلی پوشش گیاهی را به تنهایی ندارند، در حالی که به کارگیری

Alexandridis و همکاران (۲۰۱۱) اشاره شد. لازم به ذکر است که بهینه‌سازی مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۱۱) به طور قابل توجهی باعث تغییر مقادیر ضریب‌های باد نسبت به مدل Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸) شد. این مسئله ممکن است به ارتفاع درختان برمی‌گردد. وجود درختان و ارتفاع آن‌ها موجب تغییر سرعت باد می‌شود. نکته دیگر این است که مساحت کم‌برآوردشده در همه نقشه‌های شبیه‌سازی شده در سمت جنوبی متمرکز شده بود، در حالی که بیشتر مساحت بیش‌برآورد در جهت شمالی قرار دارد. این مسئله نشان‌دهنده اثر باد بر گسترش آتش است. سرعت و جهت باد، جهت گسترش آتش را مشخص می‌کنند (Eskandari & Oladi 2015; Jahdi *et al.*, 2015). از عوامل مؤثر دیگر می‌توان به گسترش آتش در شیب رو به بالا اشاره کرد. این موضوع باعث افزایش سرعت گسترش آتش می‌شود. زیرا در شیب رو به بالا، فاصله شعله از مواد سوختنی رو به جلو کاهش می‌یابد. این امر سبب افزایش دمای مواد سوختنی می‌شود، بنابراین این مواد در زمان کمتری می‌سوزند. تحت این شرایط، سرعت گسترش در شیب رو به بالا به طور چشمگیری افزایش می‌یابد، اما در شیب رو به پایین، این مسئله برعکس می‌شود (Gazmeh *et al.*, 2013b; Jahdi *et al.*, 2017; L. Hernández Encinas و همکاران (۲۰۰۷)، Alexandridis و همکاران (۲۰۰۸، ۲۰۱۱)، Eskandari و Oladi (۲۰۱۷)، Rui و همکاران (۲۰۱۸) و Velasquez و همکاران (۲۰۱۹) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند.

- Randerson, J.T., 2019. The global fire atlas of individual fire size, duration, speed and direction. *Earth System Science Data*, 11(2): 529-552.
- Baumann, M., Levers, C., Macchi, L., Bluhm, H., Waske, B., Gasparri, N.I. and Kuemmerle, T., 2018. Mapping continuous fields of tree and shrub cover across the Gran Chaco using Landsat 8 and Sentinel-1 data. *Remote Sensing of Environment*, 216: 201-211.
 - Campos-Taberner, M., García-Haro, F.J., Martínez, B., Sánchez-Ruiz, S. and Gilabert, M.A., 2019. A copernicus Sentinel-1 and Sentinel-2 classification framework for the 2020+ European common agricultural policy: A case study in València (Spain). *Agronomy*, 9(9): 556.
 - Češka, A., 1966. Estimation of the mean floristic similarity between and within sets of vegetational relevés. *Folia Geobotanica et Phytotaxonomica*, 1(2): 93-100.
 - Congalton, R.G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of Environment*, 37(1): 35-46.
 - Daughtry, C.S.T., Walthall, C.L., Kim, M.S., de Colstoun, E.B. and McMurtrey, J.E., 2000. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74(2): 229-239.
 - Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L. and Moreno, J., 2011. Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. *Sensors*, 11(7): 7063-7081.
 - Dey, S., (n.d.). Radar vegetation index code for dual polarimetric Sentinel-1 data in EO browser. Available at: https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-1/radar_vegetation_index_code_dual_polarimetric/supplementary_material.pdf
 - Eskandari, S. and Oladi, J., 2017. Modelling of forest fire spread using cellular automata. *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*, 7(25): 38-54 (In Persian).
 - Fernandes, P.A.M., 2001. Fire spread prediction in shrub fuels in Portugal. *Forest Ecology and Management*, 144(1-3): 67-74.
 - Filgueiras, R., Mantovani, E.C., Althoff, D., Fernandes Filho, E.I. and Cunha, F.F.D., 2019. Crop NDVI monitoring based on Sentinel 1. *Remote Sensing*, 11(12): 1441.
 - Gazmeh, H., Alesheikh, A., Karimi, M. and

داده‌های سنجنده نوری Sentinel-2 قابلیت تفکیک بهتری از خود نشان دادند. با تلفیق داده‌های نوری و راداری، نقشه پوشش گیاهی با دقت قابل قبول تهیه شد. بررسی داده‌های راداری با قطبش کامل برای تعیین مشخصات پوشش گیاهی در پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود. همچنین، یافته‌های دیگر نشان داد که اتوماسیون سلولی به-رغم سادگی آن به شرط تعیین و بهینه‌سازی ضریب‌های مدل، گسترش آتش را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. شایان ذکر است که قابلیت پیش‌بینی رفتار و گسترش آتش با استفاده از مدل‌های اتوماسیون سلولی بهینه‌شده حتی بدون در نظر گرفتن اثر عوامل دیگری مانند رطوبت و ارتفاع درختان مناسب است. در این پژوهش، استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل باعث بهبود نتایج به دست آمده در منطقه مورد مطالعه شد. با توجه به اینکه بهینه‌سازی ضریب‌های مدل‌های اولیه باعث افزایش دقت نتایج شبیه‌سازی شد، بهینه‌سازی این مدل‌ها برای مناطق مختلف ضروری است. همچنین، ادامه پژوهش‌ها در این زمینه و بررسی روش‌های بهینه‌سازی دیگر برای به دست آوردن ضریب‌های بهتر و قابل تعمیم برای مناطق مشابه حائز اهمیت هستند.

منابع مورد استفاده

- Alexandridis, A., Russo, L., Vakalis, D., Bafas, G.V. and Siettos, C.I., 2011. Wildland fire spread modelling using cellular automata: Evolution in large-scale spatially heterogeneous environments under fire suppression tactics. *International Journal of Wildland Fire*, 20(5): 633-647.
- Alexandridis, A., Vakalis, D., Siettos, C.I. and Bafas, G.V., 2008. A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990. *Applied Mathematics and Computation*, 204(1): 191-201.
- Andela, N., Morton, D.C., Giglio, L., Paugam, R., Chen, Y., Hantson, S., van der Werf, G.R. and

- Karaboga, D., 2005. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Technical Report-tr06, Computer Engineering Department, Engineering Faculty, Erciyes University, Kayseri, Turkey, 10p.
- Merzlyak, M.N., Gitelson, A.A., Chivkunova, O.B. and Rakitin, V.Y., 1999. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 106(1): 135-141.
- Norum, R.A. and Miller, M., 1984. Measuring fuel moisture content in Alaska: standard methods and procedures. General Technical Report PNW-GTR-171, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland, Oregon, 34p.
- Periasamy, S., 2018. Significance of dual polarimetric synthetic aperture radar in biomass retrieval: An attempt on Sentinel-1. *Remote Sensing of Environment*, 217: 537-549.
- Quartieri, J., Mastorakis, N.E., Iannone, G. and Guarnaccia, C., 2010. A cellular automata model for fire spreading prediction. *Proceedings of the 3rd International Conference on Urban Planning and Transportation: Latest Trends on Urban Planning and Transportation*. Corfù, Greece, 22-24 Jul. 2010: 173-179.
- Rondeaux, G., Steven, M. and Baret, F., 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2): 95-107.
- Rouse, Jr.J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Volume I: Technical presentations, Section A*. Washington, D.C., 10-14 Dec. 1973: 309-317.
- Rui, X., Hui, S., Yu, X., Zhang, G. and Wu, B., 2018. Forest fire spread simulation algorithm based on cellular automata. *Natural Hazards*, 91(1): 309-319.
- Ryan, K.C., 2002. Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems. *Silva Fennica*, 36(1): 13-39.
- Scott, J.H. and Burgan, R.E., 2005. Standard fire behavior fuel models: A comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. General Technical Report RMRS-GTR-153, US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado, Chehreghan, A., 2013a. Spatio-temporal forest fire spread modeling using cellular automata, Honey Bee Foraging and GIS. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 3(1): 201-214.
- Gazmeh, H., Chehreghan, A., Alesheikh, M.A. and Karimi, M., 2013b. Modelling forest fire spread using cellular automata, GIS and PSO. *Geospatial Engineering Journal*, 4(3): 71-86 (In Persian).
- Ghaemi Rad, T. and Karimi, M., 2015. Evaluation performances of different forest fire spread models using cellular automata (case study: The forests of Lakan district in Rasht). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 23(1): 64-78 (In Persian).
- Ghasemian Sorboni, N., Pahlavani, P. and Bigdeli, B., 2019. Vegetation mapping of Sentinel-1 and 2 satellite images using convolutional neural network and random forest with the aid of dual-polarized and optical vegetation indexes. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W18: 435-440.
- Giannino, F., Russo, L., Ascoli, D., Migliozi, A., Siettos, C.I. and Mazzoleni, S., 2017. Cellular automata simulation of forest fire behavior on Italian landscape: The case of Sardinia. *AIP Conference Proceedings*, 1906(1): 100006.
- Grabska, E., Hostert, P., Pflugmacher, D. and Ostapowicz, K., 2019. Forest stand species mapping using the Sentinel-2 time series. *Remote Sensing*, 11(10): 1197.
- Hernández Encinas, A., Hernández Encinas, L., Hoya White, S., Martín del Rey, A. and Rodríguez Sánchez, G., 2007. Simulation of forest fire fronts using cellular automata. *Advances in Engineering Software*, 38(6): 372-378.
- Hernández Encinas, L., Hoya White, S., Martín del Rey, A. and Rodríguez Sánchez, G., 2007. Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata. *Applied Mathematical Modelling*, 31(6): 1213-1227.
- Homchaudhuri, B., Kumar, M. and Cohen, K., 2013. Genetic algorithm based simulation-optimization for fighting wildfires. *International Journal of Computational Methods*, 10(6): 1350035.
- Jahdi, R., Salis, M., Darvishsefat, A.A., Mostafavi, M.A., Alcasena, F., Etemad, V., ... and Spano, D., 2015. Calibration of FARSITE simulator in northern Iranian forests. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(3): 443-459.

- and GIS. Proceedings of International Symposium on Networks, Computers and Communications. Istanbul, Turkey, 18-20 Jun. 2019: 11p.
- Vreugdenhil, M., Wagner, W., Bauer-Marschallinger, B., Pfeil, I., Teubner, I., Rüdiger, C. and Strauss, P., 2018. Sensitivity of Sentinel-1 backscatter to vegetation dynamics: An Austrian case study. *Remote Sensing*, 10(9): 1396.
 - Taylor, S.W., Woolford, D.G., Dean, C.B. and Martell, D.L., 2013. Wildfire prediction to inform fire management: Statistical science challenges. *Statistical Science*, 28(4): 586-615.
 - Velasquez, W., Munoz-Arcentales, A., Salvachua-Rodriguez, J. and Bohnert, T.M., 2019. Wildfire propagation simulation tool using cellular automata 72p.

Comparative study of basic and Bee Colony-optimized models cellular automation for prediction of wildfire spread

M.W. Alhaj khalaf ¹, Sh. Shataee ^{2*} and R. Jahdi ³

1- M.Sc. Student of Forestry, Department of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2* - Corresponding author, Prof., Department of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: shataee@gau.ac.ir

3- Assistant Prof., Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 08.08.2020

Accepted: 19.11.2020

Abstract

As one of the most widely used models for fire spread simulation, cellular automata models commonly require appropriate parameters and the optimized coefficients. The main aim of this study was to compare the basic models of cell automation set by previous studies and optimized models using the Bee Colony Algorithm (ABC) to predict the rate of fire spread in a reforestation area in northeastern Golestan province, Iran. Furthermore, a sub-objective was to test the ability of optical and radar sensors (Sentinel 1 and 2) for mapping the vegetation stand type and density required for fire spread modeling. Following pre-processing and extraction of vegetation indices, vegetation type and density were mapped by the Random Forest algorithm. The accuracy assessment showed that the best result was obtained by combining the optical and radar data (Kappa coefficient (KC) = 0.75 and Overall accuracy (OA) = 0.81). Moreover, the fire spread was modeled using previous and optimized coefficients from previous studies. Model coefficients were optimized based on environmental conditions using the BCA algorithm and were compared with the occurred fire to improve the results and comparative evaluation. The results showed that the optimized models were more consistent (Sorenson coefficient (SC) = 0.78; KC = 0.74 and OA = 0.93 for Alexandridis *et al.*, 2011; and SC = 0.78; KC = 0.74 and OA = 0.92 for Alexandridis *et al.*, 2008) with the observed fire than the other applied cellular automation models.

Keywords: Bee colony algorithm, Golestan Province, optimization, reforestation, Sentinel.