University of Tehran

Journal of Forest and Wood Products Online ISSN: 2383-0530

Home Page: https://jfwp.ut.ac.ir

The numerical investigation of air humidity effects on the fire spread in forests (case study: Malekrod-Siahkal forest)

Mohammad Norouzi[1] | Esmaeil Mohammadian Bishe[2] | Hossein Afshin[3*] | Bijan Farhanieh[4] | Roghayeh Jahdi[5]

1. Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: norouzi.mohammad@ut.ac.ir
2. Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: mohammadian@mech.sharif.edu
3. Corresponding Author, Department of Mechanical Engineering at Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: afshin@sharif.edu
4. Department of Mechanical Engineering at Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: bifa@sharif.edu
5. Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received 22 November 2022
Revised 23 February 2023
Accepted 04 March 2023
Published online 15 June 2023

Keywords:
Dynamics,
Environment,
Fires,
Humidity,
Simulation.

ABSTRACT

Forest fires are a natural part of the ecosystem, but their uncontrolled spread can result in severe economic and environmental damage. Therefore, it is vital to take measures to prevent and manage their spread. However, given the intricate and complex nature of fires, studying real fires in their environmental context can be challenging, if not impractical. As an alternative, researchers can use computer simulation models based on field studies to better understand fire behavior and its effects on the environment. The FARSITE simulator, based on the Rothermel model, was used to conduct numerical simulations of fire spread with respect to fuel, topography, and weather conditions such as humidity. Simulation results showed that the Sorensen and kappa coefficients were at their highest at 0.80 and 0.77, respectively, in air humidity scenarios; with average values of fire spread rate, flame length, and fireline intensity being 0.58 m/min, 0.54 m, and 74.54 kW/m, respectively. Based on these results, it can be concluded that increasing air humidity is a natural way to prevent fire spread. Furthermore, numerical studies and simulations of fire behavior and spread are appropriate alternatives to experimental studies in this field due to their lower costs and fewer limitations.

Cite this article: Norouzi, M., Mohammadian Bishe, E., Afshin, H., Farhanieh, B., Jahdi, R. (2023). The numerical investigation of air humidity effects on the fire spread in forests (case study: Malekrod-Siahkol forest). *Journal of Forest and Wood Products*, 76 (1), 55-64. DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2023.350562.1227

© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2023.350562.1227

دانشگاه تهران

نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب

سایت نشریه: https://jfwp.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۲۳۸۳

بررسی عددی آثار رطوبت هوا بر گسترش آتش در جنگل‌ها (مطالعهٔ موردی: جنگل ملکرود سیاهکل)

محمد نوروزی[۱]| اسماعیل محمدیان بیشه[۲]| حسین افشین[۳*]| بیژن فرهانیه[۴]| رقیه جهدی[۵]

۱. گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. رایانامه: norouzi.mohammad@ut.ac.ir

۲. گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. رایانامه: mohammadian@mech.sharif.edu

۳. نویسندهٔ مسئول، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. رایانامه: afshin@sharif.edu

۴. گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. رایانامه: bifa@sharif.edu

۵. دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران. رایانامه: uma.ac.ir@roghayeh.jahdi

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۳/۲۵

کلیدواژه:
آتش‌سوزی، پویایی، رطوبت، شبیه‌سازی، محیط‌زیست.

چکیده

آتش‌سوزی‌های جنگلی جزء جدایی‌ناپذیر طبیعت است، اما عدم کنترل آن‌ها ممکن است باعث ایجاد خسارات اقتصادی و محیط‌زیستی شدیدی شود که باید اقداماتی را برای مقابله با گسترش آتش‌سوزی انجام داد. به‌دلیل طبیعت سخت و پیچیده آتش‌سوزی، پژوهش‌هایی که آتش‌سوزی‌های واقعی را در مقیاس محیطی بررسی می‌کنند، تقریباً غیرعملی است. به‌عنوان یک حالت جایگزین، پژوهشگران می‌توانند از مدل‌های شبیه‌سازی کامپیوتری براساس مطالعات میدانی، برای درک بهتر رفتار و آثار گسترش آتش‌سوزی در محیط مورد مطالعه استفاده کنند. در پژوهش حاضر به شبیه‌سازی عددی گسترش آتش‌سوزی با تأثیر پارامترهای آب و هوایی نظیر رطوبت موجود در هوا در شبیه‌ساز فارسایت براساس مدل روترمل پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که بیشترین ضریب سورنسن و ضریب کاپا برای تغییرات رطوبت موجود در هوا برابر با ۰/۸۰ و ۰/۷۷ می‌باشد. مقادیر متوسط نرخ گسترش آتش، طول شعله و شدت خط آتش برای سناریو شبیه‌سازی با بالاترین ضریب سورنسن و ضریب کاپا به‌ترتیب برابر ۰/۵۸ m/min، ۰/۵۴ m و ۷۴/۵۴ kW/m خواهد بود. در یک ارزیابی کلی با توجه به داده‌های شبیه‌سازی شده می‌توان نتیجه گرفت که افزایش رطوبت هوا یکی از راهکارهای طبیعی کاهش احتمال گسترش آتش‌سوزی به‌شمار می‌رود. همچنین، روش مطالعات عددی و شبیه‌سازی رفتار و گسترش آتش‌سوزی، به‌دلیل هزینه‌های پایین و محدودیت‌های کمتر جایگزین مناسبی برای مطالعات تجربی در این زمینه می‌باشد.

استناد: نوروزی، محمد؛ محمدیان بیشه، اسماعیل؛ افشین، حسین؛ فرهانیه، بیژن؛ جهدی، رقیه (۱۴۰۲). بررسی عددی آثار رطوبت هوا بر گسترش آتش در جنگل‌ها (مطالعهٔ موردی: جنگل ملکرود سیاهکل). *نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۶ (۱)، ۵۵-۶۴.

DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2023.350562.1227

© نویسندگان. **ناشر:** مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2023.350562.1227

۱. مقدمه

آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع از خطرناک‌ترین حوادث طبیعی است که به‌عنوان یکی از بحران‌های مهم محیط‌زیستی تلقی می‌شود. کنترل آتش‌سوزی‌های جنگلی در صورت وقوع، دشوار می‌باشد و تا زمانی که یک تغییر اساسی در شرایط گسترش آتش به وجود نیاید، ادامه خواهد داشت [۱]. آتش‌سوزی‌های جنگلی با منشاء طبیعی یا انسانی، آثار زیان‌بار و ویرانگری به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر جوامع انسانی دارند و در صورت وقوع، تأثیر غیرقابل جبرانی بر محیط‌زیست، جنگل‌ها، روستاها و ساکنان آن‌ها می‌گذارند [۲].

سیاست‌گذاران باید تغییر آب و هوا و تأثیر آن بر کنترل و مدیریت آتش‌سوزی را مورد بررسی قرار دهند [۳]. پایش دقیق شرایط خطر آتش‌سوزی یکی از متداول‌ترین پیش‌نیازها برای حفاظت جنگل در مقابل آتش‌سوزی می‌باشد [۴]. اولین گام برای مدل‌سازی آتش‌سوزی جهت ارائهٔ اطلاعات به شبیه‌سازی، نیاز به یک مدل توسعه‌یافته می‌باشد [۵]. شبیه‌سازهای آتش در مقیاس عملیاتی این مزیت را دارند که می‌توانند سریع‌تر از پیش‌بینی‌های زمان واقعی حاضر شوند. شبیه‌ساز فارسایت[۱] یک مدل شبیه‌ساز گسترش آتش مبتنی بر سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی[۲] می‌باشد که توسط سازمان جنگل‌ها و کشاورزی ایالات متحده آمریکا[۳] و اساساً برای برنامه‌ریزی و مدیریت آتش‌سوزی‌ها در عرصه‌های طبیعی به‌منظور تشریح و بررسی نحوهٔ رفتار و انتشار آتش‌سوزی‌های مهیب طراحی و توسعه داده شده‌است [۶]. این مدل قادر است حرکت و رفتار آتش را در عرصه‌های محیطی محاسبه و گسترش جبههٔ آتش را در طول زمان و با در نظر گرفتن تغییرات شرایط آب و هوایی در زمان و مکان تعیین نماید. این مدل در ابتدا برای شبیه‌سازی آتش‌سوزی‌های تجویزی که در پارک‌های ملی آمریکا و عرصه‌های طبیعی آن صورت می‌گرفت، توسعه داده شد؛ سپس شبیه‌سازی‌ها با استفاده از شبیه‌سازی‌های کنترل‌شده به‌همراه اطلاعات کامل و جامع محیطی مورد ارزیابی قرار گرفت. در همین راستا فینی[۴] و ریان[۵] از مدل رشد آتش فارسایت به‌منظور شبیه‌سازی آتش‌سوزی در پارک‌های ملی آمریکا و برای پشتیبانی از تصمیمات مدیریتی که در زمینهٔ آتش‌سوزی گرفته می‌شود، استفاده نمودند [۷].

رژیم‌های آتش‌سوزی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی به‌دلیل تغییر روش‌های اطفای آتش، استفادهٔ بیش از حد زمین[۶] و گرم شدن هوا، در حال تغییر هستند [۸]. مطالعات مختلفی روی پارامترهای اثرگذار بر روی انتشار آتش شامل تغییرات اقلیمی، توزیع مکانی مادهٔ سوختنی (پوشش گیاهی)، توپوگرافی و تغییرات سرعت و جهت باد شبیه‌سازی‌های متعدد آتش‌سوزی‌های جنگل انجام شده است [۹]. مطالعات نشان داده‌اند که یک مدل مادهٔ سوختنی با پارامترهای مختلف مانند بار و رطوبت مادهٔ سوختنی تأثیر متفاوتی بر روی رفتار آتش دارد [۱۰]. کای[۷] و همکاران (۲۰۱۹) در شمال شرقی چین به شناسایی اهمیت عدم قطعیت مدل‌های مادهٔ سوختنی و تعیین پارامترهای حساسیت برای کالیبراسیون مدل آتش استفاده شده به‌منظور مدل‌سازی آتش‌سوزی و مدیریت ماده‌سوختنی در منطقهٔ مورد مطالعه پرداختند. نتایج نشان داد بیشتر پارامترهای مدل مادهٔ سوختنی تأثیر نسبتاً کمی بر عدم قطعیت خروجی مدل در این منطقه داشته است [۱۱]. Sadat Razavi و همکاران (۲۰۲۲)، تأثیر تغییرات اقلیمی بر گسترش آتش‌سوزی جنگل با استفاده از جمع‌آوری پارامترهای مؤثر در طول یک دورهٔ ۲۳ ساله و طیف گسترده‌ای از متغیرهای محیطی برای توسعهٔ یک مدل شبکهٔ عصبی مصنوعی با هدف پیش‌بینی نقاط آتش‌سوزی بالقوه را مورد بررسی قرار دادند. براساس خروجی‌های مدل و احتمال وقوع آتش‌سوزی، یک دامنهٔ دمایی برای جنگل‌های مختلف معرفی شد. همچنین، برای پیش‌بینی آتش‌سوزی در جنگل‌های معتدلهٔ منطقهٔ مورد مطالعه دما پارامتر تعیین‌کننده می‌باشد. در مقابل، با افزایش دما در محدوده‌ای فراتر از دمای گذرا[۸] که با توجه به شرایط محیطی برای هر جنگل تعیین می‌شود، آتش اغلب به دما وابسته است، در حالی که سایر

1- FARSITE
۲- Geographic information system
۳- USDA Forest service
۴- Finney
۵- Ryan
۶- Maximum Land-use
۷- Cai
۸- Transient temperature

متغیرها در این محدوده ممکن است تأثیر کمتری بر خروجی مدل داشته باشد [۱۲]. Duguy و همکاران (۲۰۰۷) شبیه‌سازی آتش‌سوزی رخ داده در سال ۱۹۷۹ در جنگل‌های مدیترانه‌ای منطقهٔ والنسیا، با استفاده از شبیه‌ساز فارسایت را ارزیابی قرار دادند. در همچنین تأثیر چندین نوع مادهٔ سوختنی بر توزیع و نرخ گسترش آتش‌سوزی مورد مطالعه، بررسی شد. با مقایسهٔ رفتار و گسترش آتش‌سوزی شبیه‌سازی شده با آتش واقعی، نتایج خروجی از مدل‌سازی آتش در منطقهٔ مورد مطالعه نزدیک به واقعیت ارزیابی شد [۱۳]. همچنین Jahdi و همکاران (۲۰۱۴) در منطقهٔ جنگل‌های شمال ایران، با شبیه‌سازی چهار تیپ مادهٔ سوختنی در شبیه‌ساز فارسایت به بررسی رفتار و گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های توشی سیاهکل پرداخته شد. در این مطالعه تیپ‌های مادهٔ سوختنی با پیمایش زمینی و جمع‌آوری اطلاعات به چهار تیپ علفزار، علف–درختچه‌زار، جنگل طبیعی و جنگل‌کاری تقسیم شده‌اند. براساس نتایج به‌دست آمده، تیپ‌های مادهٔ سوختنی، درختچه‌زارها و جنگل‌های طبیعی، بلندترین طول شعله و بیشترین انتشار گرما در واحد سطح را به خود اختصاص دادند. همچنین تیپ مادهٔ سوختنی برای علفزارها سریع‌ترین نرخ گسترش آتش‌سوزی سطحی و تیپ مادهٔ سوختنی جنگل‌کاری شدت آتش‌سوزی کمتری را شامل می‌شود [۱۴].

بادهای شدید با جهت رو به پایین می‌تواند عاملی خطرناک برای گسترش آتش‌سوزی‌های جنگل باشد. در ارتباط با آثار باد بر رفتار و گسترش آتش نیز مطالعات متعددی انجام شده است. به‌عنوان مثال، Zinger و همکاران (۲۰۲۰) دو آتش‌سوزی که توسط بادهای شدید در یک منطقهٔ جنگلی در کالیفرنیا، ایالات متحده گسترش یافته بود، در شبیه‌ساز فارسایت شبیه‌سازی شد. نقشه‌های مادهٔ سوختنی منطقهٔ مورد مطالعه با دقت بالا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تهیه شده و داده‌های ساعتی باد به‌عنوان ورودی به شبیه‌ساز داده شدند. همچنین منطقهٔ سوخته‌شده در شبیه‌ساز فارسایت با الگوریتم حداقل زمان حرکت[۱] در شبیه‌ساز فلم‌مپ[۲] مقایسه شد. براساس نتایج، اگر تعداد آتش‌سوزی‌های نقطه‌ای به کمترین مقدار خود برسد، شبیه‌ساز فارسایت نتایج دقیقی از نرخ گسترش آتش‌سوزی ارائه خواهد کرد، ولی در صورتی که تعداد آتش‌سوزی‌های نقطه‌ای قابل‌توجه باشد، هر دو شبیه‌ساز نمی‌توانند به‌درستی آتش‌سوزی واقعی را شبیه‌سازی کنند [۱۵]. طی سالیان اخیر، مطالعهٔ رفتار و گسترش آتش یکی از موضوعات مهم بررسی‌شده در بسیاری از پژوهش‌ها می‌باشد. اکثر پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه به بررسی نوع مادهٔ سوختنی، پوشش گیاهی مورد نظر و سرعت باد در منطقه می‌پردازند. در پژوهش حاضر سعی شده است که با شبیه‌سازی مدل واقعی آتش‌سوزی روی داده در جنگل ملکرود شهرستان سیاهکل با استفاده از شبیه‌ساز فارسایت و با تغییر پارامترهای اقلیمی نظیر رطوبت موجود در هوا گسترش آتش‌سوزی، بررسی شود. از نتایج این پژوهش می‌توان برای اطلاع‌رسانی دقیق‌تر به مدیران و مسئولان منابع طبیعی و محیط‌زیست در مورد تأثیر عوامل اصلی مؤثر بر رفتار و گسترش آتش به‌منظور کنترل و مدیریت اثربخش آن در جنگل‌ها و مراتع استفاده نمود.

۲. روش‌شناسی پژوهش

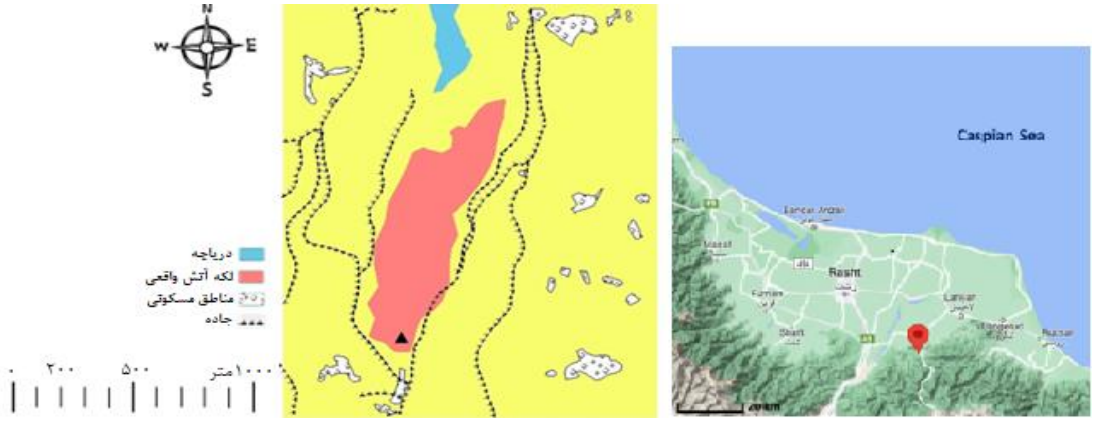
۲–۱. منطقهٔ پژوهش

منطقهٔ مورد مطالعه، لکهٔ آتش‌سوزی طبیعی با وسعت ۲۴ هکتار است که در جنگل ملکرود شهرستان سیاهکل واقع است. آتش‌سوزی روی داده از نوع سطحی بوده و در روزهای ۲۶ و ۲۷ آذرماه ۱۳۸۹ بین عرض جغرافیایی ´۰۳ °۳۷ و ´۰۸ °۳۷ شمالی و بین طول جغرافیایی ´۸۰ °۴۹ و ´۸۴ °۴۹ شرقی رخ داده است. ناحیه‌ای با وسعت ۲۵۰ هکتار شامل لکهٔ آتش‌سوزی و اطراف آن برای شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی بررسی شد. آتش‌سوزی در ساعت ۱۷ روز ۲۶ آذر ۱۳۸۹ گزارش شد [۱۴]. نقطهٔ شروع حریق در نزدیکی جاده در حاشیهٔ جنوبی منطقه واقع بود. با توجه به شیب ملایم و باد جنوبی، آتش به سمت شمال حرکت کرد و بعد از ۱۵ ساعت گسترش، در ساعت ۸ صبح متوقف شد [۱۴]. از جمله عواملی که مانع گسترش آتش‌سوزی در منطقه شدند، عبارت بودند از وجود جاده، دریاچه و ریل که این اطلاعات در شبیه‌سازی در نظر گرفته شدند. در شکل (۱، ب) نقشهٔ جاده‌های منطقهٔ مورد مطالعه به همراه دیگر موانع در مسیر پیشروی آتش مشخص شده است. نزدیکی نقطهٔ شروع احتراق به جاده و قرار

۱- Minimum travel time

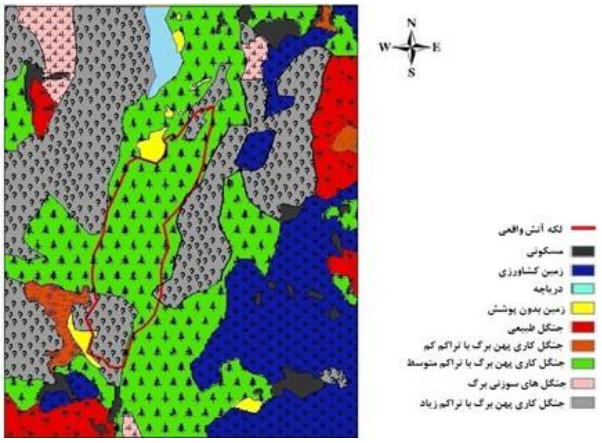
۲- FlamMap

گرفتن جنگل ملکرود بین جاده، احتمالاً یکی از عوامل مهم جلوگیری از گسترش آتش‌سوزی و مهار آن در حالت واقعی بوده است. براساس شباهت‌های بین مشخصات پوشش گیاهی موجود و مؤلفه‌های برآورده‌شده مواد سوختنی، انتخاب تیپ‌های مادهٔ سوختنی حامل آتش و مدل‌های مادهٔ سوختنی آن از بین تیپ‌های استاندارد انجام شد. در شکل ۲، طبقه‌بندی کلی پوشش گیاهی در جنگل ملکرود شهرستان سیاهکل نشان داده شده است. با در نظر گرفتن لکهٔ آتش مشاهده می‌شود که پوشش گیاهی غالب در منطقهٔ آتش‌سوزی از نوع جنگل‌کاری پهن‌برگ با تراکم متوسط می‌باشد.



ب) الف)

شکل ۱. الف) نقطهٔ شروع آتش در منطقهٔ مورد مطالعه ب) نقشهٔ موانع آتش در منطقه (جاده، دریاچه و ...)



شکل ۲. طبقه‌بندی پوشش گیاهی جنگل ملکرود

۲-۲. اجرای پژوهش

در این پژوهش، آثار تغییرات رطوبت هوا بر رفتار آتش و نرخ گسترش آتش‌سوزی بر روی جنگل ملکرود، بررسی شد. به‌منظور بالا بردن میزان دقت نتایج خروجی نسبت به تغییرات رطوبت هوا، از داده‌های چند سال اخیر منطقه استفاده شد. اکثر آتش‌سوزی‌های رخ داده در جنگل ملکرود بین بازهٔ زمانی ۵ مهر تا ۵ دی ماه می‌باشد. از سایت مرجع هواشناسی [۱۶]، کلیه داده‌های ساعتی برای بازهٔ سه ماههٔ اوج آتش‌سوزی در منطقهٔ مورد مطالعه از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۹ برای تحلیل بیشتر جمع‌آوری شدند. مقادیر کلی میانگین دما (درجه سانتی‌گراد) و رطوبت نسبی (درصد) برای داده‌های جمع‌آوری‌شده طی سالیان اخیر در بازهٔ زمانی مشخص به‌ترتیب عبارت از ۱۷< دما>۵ و ۹۹>رطوبت نسبی >۶۲ می‌باشد. همچنین در تهیهٔ فایل‌های ورودی آب و هوایی برای شبیه‌ساز فارسایت، مقادیر روزانه بیشترین دما را با کمترین رطوبت و کمترین دما را همراه با بیشترین رطوبت، در نظر می‌گیرند. محدودهٔ دمایی در منطقهٔ مورد نظر بین ۵ تا ۱۷ درجهٔ سانتی‌گراد به‌دست آمده است که این محدودهٔ دمایی برای

تمام سناریوهای تغییرات رطوبت یکسان در نظر گرفته می‌شود. همچنین به‌دلیل اینکه محدودهٔ رطوبت بین ۶۲ تا ۹۹ درصد بوده است؛ بنابراین تعداد سناریوهای انتخابی در این محدوده، بیشتر خواهد شد. برای اینکه از آثار تغییرات رطوبت در خارج از محدوده به‌دست آمده بی‌بهره نباشیم، چهار سناریو از مقادیر خارج از محدوده در نظر گرفته شدند. در جدول ۱، مقادیر عددی رطوبت، دمای بیشینه و کمینه به‌صورت کامل برای تمام سناریوهای در نظر گرفته شده، ارائه شده است.

جدول ۱. تعیین سناریوهای رطوبت در جنگل ملکرود

شمارهٔ سناریو	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5	Sc6	Sc7	Sc8
رطوبت (درصد)	۲	۲۲	۴۲	۶۲	۷۲	۸۲	۹۲	۹۹
کمترین دمای هوا (درجه سانتی-گراد)	۵							
بیشترین دمای هوا (درجه سانتی-گراد)	۱۷							

۲-۳. تحلیل آماری و روش‌های ارزیابی

ضریب سورنسن و ضریب کاپا اعدادی بین صفر تا یک می‌باشند که به‌عنوان معیاری برای دقت شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. با نزدیک شدن مقادیر این دو ضریب به عدد یک، نتایج شبیه‌سازی به حالت واقعی نزدیک‌تر خواهد شد. رابطهٔ ضریب سورنسن با استفاده از رابطهٔ ۱ محاسبه می‌شود [۱۷].

رابطهٔ ۱
$$Sc = \frac{2a}{2a+b+c}$$

ضریب سورنسن عدد بی‌بعدی است که پارامترهای عددی a، b و c موجود در رابطه ۱ به‌صورت a (مساحت مشترک سوخته‌شده در آتش‌سوزی واقعی و شبیه‌سازی‌شده)، b (مساحت سوخته‌شده در آتش‌سوزی شبیه‌سازی و سوخته نشده در آتش‌سوزی واقعی) و c (مساحت سوخته‌شده در آتش‌سوزی واقعی و سوخته نشده در آتش‌سوزی شبیه‌سازی‌شده) تعریف می‌شوند. ضریب آماری کاپا سطح شباهت لکه‌های مشاهده‌شده و آتش‌سوزی شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد که با استفاده از رابطهٔ ۲ محاسبه می‌شود [۵].

رابطهٔ ۲
$$K = \frac{N\sum_{i=1}^{r} x_{ii} - \sum_{i=1}^{r} x_{i+} * x_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^{r} x_{i+} * x_{+i}}$$

که r: تعداد ردیف‌های موجود در ماتریس خطا، x_{ii}: تعداد مشاهدات در ردیف i و ستون i در ماتریس خطا، N: تعداد کلی مشاهدات، و x_{+i} و x_{i+}:مقادیر مرزی ماتریس می‌باشند.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

در این مطالعه، داده‌های سیمای سرزمین (مادهٔ سوختنی، توپوگرافی و آب و هوا) برای شبیه‌سازی آثار تغییرات رطوبت در جنگل ملکرود شهرستان سیاهکل با مادهٔ سوختنی جنگل‌کاری پهن‌برگ با تراکم بالا و متوسط با کد ماده‌سوختنی (TL6, TL9) در شبیه‌ساز فارسایت وارد شد. سپس با در نظر گرفتن تمام شرایط محیطی مورد نیاز برای شبیه‌ساز و اعمال شرایط اولیهٔ آتش‌سوزی در جنگل ملکرود، سناریوهای تعیین‌شده در قسمت قبل، شبیه‌سازی‌ها انجام شد. نتایج آماری خروجی از شبیه‌سازی سناریوها شامل مساحت سوخته شده و نشده و همچنین ضریب سورنسن و ضریب کاپا برای هر ۸ سناریو در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج آماری شبیه‌سازی سناریوها در جنگل ملکرود

سناریوها	a (*ha*)	b (*ha*)	c (*ha*)	SC	K
Sc1	۲۲/۶۸	۱۰/۲۲	۱/۳۷	۰/۸۰	۰/۷۷
Sc2	۱۷/۳۲	۵/۶۸	۶/۷۳	۰/۷۴	۰/۷۱
Sc3	۱۴/۳۵	۴/۷۵	۹/۷۰	۰/۶۷	۰/۶۳
Sc4	۱۲/۰۴	۳/۶۶	۱۲/۰۱	۰/۶۱	۰/۵۷
Sc5	۱۰/۱۱	۳/۱۹	۱۳/۰۴	۰/۵۵	۰/۵۲
Sc6	۶/۴۵	۲/۳۵	۱۷/۶۰	۰/۳۹	۰/۳۶
Sc7	۴/۴۵	۱/۸۵	۱۹/۶۰	۰/۲۹	۰/۲۶
Sc8	۵/۰۳	۲/۰۷	۱۹/۰۲	۰/۳۲	۰/۲۹

رطوبت هوا یکی دیگر از پارامترهای مهم جوی در تعیین پتانسیل شروع و گسترش آتش‌سوزی در یک ناحیه می‌باشد. به طوری که رطوبت نسبی هوا، تأثیرگذارترین پارامتر در وقوع گسترش آتش‌سوزی می‌باشد. هر چه رطوبت هوا بالاتر باشد از گسترش آتش‌سوزی جلوگیری می‌کند. همچنین پیش‌بینی آب و هوا در یک منطقه برای تشخیص خطر آتش‌سوزی برای ۷ روز آینده مفید است [۱۲] می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر رطوبت برای پیش‌بینی میزان گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های معتدل پارامتر مؤثری می‌باشد.

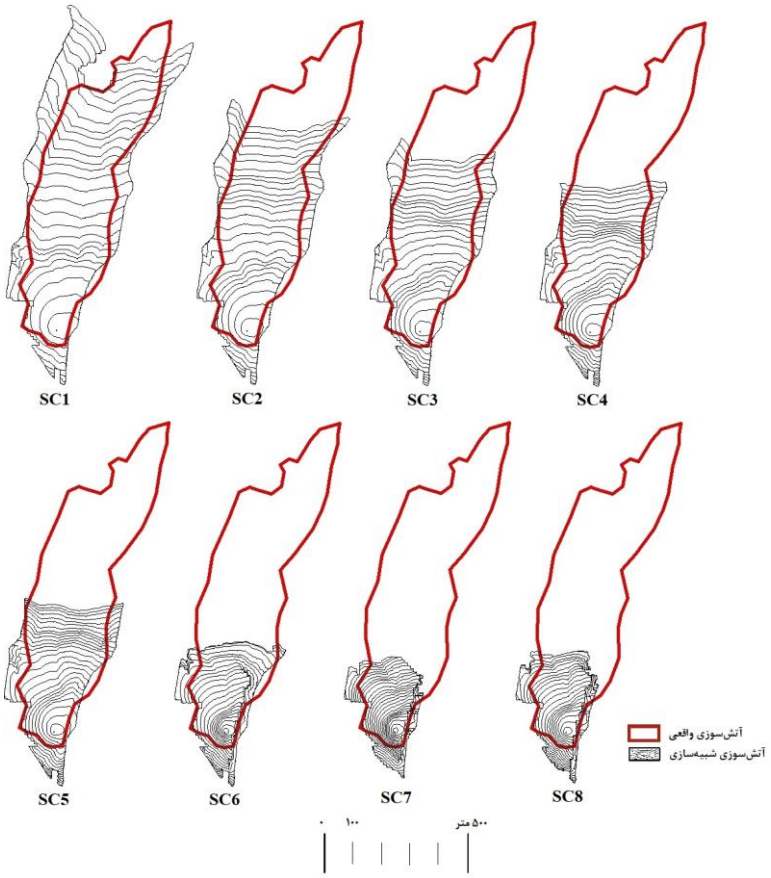
رطوبت هوا اثر مستقیمی بر تأمین میزان انرژی حرارتی مورد نیاز برای رسیدن به دمای احتراق و امکان سوختن دارد. کاهش رطوبت هوا بر پوشش گیاهی، از طریق خشکی و افزایش دمای بافت گیاه، اثرگذار است. با افزایش رطوبت، مقادیر نرخ گسترش آتش‌سوزی، طول شعله، شدت خط آتش و درصد همخوانی آن با لکهٔ آتش واقعی طبق شبیه‌سازی انجام‌شده کاهش می‌یابد. ضریب سورنسن و ضریب کاپا برای سناریو ۱ شبیه‌سازی‌شده براساس جدول ۲ به‌ترتیب برابر ۰/۸۰ و ۰/۷۷ می‌باشد که این سناریو بیشترین مقدار ضریب سورنسن و کاپا را در بین سناریوهای رطوبت دارد. با کنار هم قرار دادن خطوط گسترش آتش در فواصل زمانی معین برای سناریوهای شبیه‌سازی تغییرات رطوبت در شکل ۳، می‌توان به‌راحتی مشاهده کرد که در سناریوی ۱، خطوط گسترش آتش فراتر از لکهٔ آتش واقعی رفته‌اند و با افزایش رطوبت، تعداد خطوط گسترش آتش‌سوزی، کاهش پیدا می‌کند. با افزایش رطوبت هوا، خشکی مادهٔ سوختنی و محیط کاهش یافته، بنابراین آتش نمی‌تواند در منطقهٔ مورد مطالعه گسترش یابد. شدت آتش‌سوزی در طول ساعات روز به‌دلیل وجود دمای بالاتر و دیگر شرایط موجود برای وقوع آتش، افزایش پیدا می‌کند که این عامل باعث می‌شود مادهٔ سوختنی موجود در منطقه در طول روز نسبت به حالت مشابه بیشتر دچار حریق شوند (سوخته شوند)؛ زیرا در طول روز با کاهش رطوبت، دما و سرعت باد بیشتر خواهد شد. پس می‌توان با توجه به شبیه‌سازی انجام شده و تحلیل نتایج خروجی از شبیه‌سازی نتیجه گرفت که یکی از راهکارهای جلوگیری از توسعه و گسترش آتش‌سوزی در منطقهٔ آتش، افزایش رطوبت است. همچنین مقادیر نرخ گسترش آتش‌سوزی، شدت خط آتش و طول شعله برای ۸ سناریوی شبیه‌سازی‌شده در شبیه‌ساز فارسایت در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر ارائه شده در جدول به‌صورت مجموع مقدار میانگین با خطای استاندارد[۱] (SE) ارائه شده است. طبق مقادیر به‌دست آمده از شبیه‌سازی سناریوهای مربوط به رطوبت موجود در هوا و با مقایسه این مقادیر توسط ضریب سورنسن و ضریب کاپا مشاهده می‌شود که با افزایش مقادیر درصد رطوبت میزان گسترش آتش‌سوزی، طول شعله و شدت خط آتش کاهش می‌یابد. با بررسی شکل ۳ با تغییر سناریو از سناریوی ۷ به سناریوی ۸، افزایش نرخ گسترش آتش و دیگر پارامترهای مورد بررسی مشاهده شد. می‌توان از این شکل نتیجه گرفت در رطوبت بالای ۹۲ درصد، پارامتر رطوبت با افزایش کمی شاهد نتایج معکوس در گسترش آتش خواهیم بود. کمترین نرخ آتش‌سوزی، طول شعله و شدت خط آتش مربوط به سناریوی ۷ به‌ترتیب برابر با ۰/۰۶±۰/۱۶ متر بر دقیقه، ۰/۰۷±۰/۲۵ متر، ۸/۱۳±۱۵/۰۷ کیلووات بر متر می‌باشد.

۱- Standard error

یکی از جدی‌ترین بلایای طبیعی که بوم‌سازگان جنگل را تهدید می‌کند، آتش‌سوزی است [۱۸]. با برآورد و ارزیابی دقت هر کدام از سناریوهای گسترش آتش، می‌توان به درک رفتار و ریسک‌های آتش‌سوزی، پشتیبانی از اطفای آتش و طراحی مناسب آتش‌برها در سیمای سرزمین مستعد آتش‌سوزی، کمک کرد [۱۹].

جدول ۳. مقادیر خروجی نرخ گسترش آتش، شدت خط آتش و طول شعله برای سناریوی رطوبت در جنگل ملکرود

سناریوها	نرخ گسترش آتش (متر بر دقیقه)	شدت خط آتش (کیلووات بر متر)	طول شعله (متر)
Sc1	۰/۰±۵۸/۲۴	۷۴/۵۶±۵۴/۶۱	۰/۰±۵۴/۱۶
Sc2	۰/۰±۴۴/۱۹	۳۷±۵۰/۰۴	۰/۰±۴۴/۱۳
Sc3	۰/۰±۳۹/۱۸	۴۱/۳۰±۷۱/۲۶	۰/۰±۴۰/۱۲
Sc4	۰/۰±۳۲/۱۴	۳۳/۲۴±۸۶/۳۷	۰/۰±۳۶/۱۱
Sc5	۰/۰±۲۷/۱۳	۲۹/۲۳±۶۶/۷۷	۰/۰±۳۴/۱۲
Sc6	۰/۰±۲۳/۱۰	۲۵/۱۷±۲۸/۶۲	۰/۰±۳۲/۱۱
Sc7	۰/۰±۱۶/۰۶	۱۵/۸±۰۷/۱۳	۰/۰±۲۵/۰۷
Sc8	۰/۰±۱۹/۰۸	۲۱/۱۲±۱۱/۸۶	۰/۰±۲۹/۰۹



شکل ۳. خطوط گسترش آتش‌سوزی بین فواصل زمانی مشخص در سناریوهای تغییرات رطوبت

گرمایش در نزدیک سطح زمین و رطوبت مادهٔ سوختنی به هوای محیط این اجازه را می‌دهد که باعث گسترش آتش‌سوزی در محیط شوند [۲۰]. به‌دلیل شرایط مطلوب مادهٔ سوختنی در منطقه، گسترش آتش‌سوزی براساس لکهٔ آتش‌سوزی پیش‌بینی می‌شود که تیپ مادهٔ سوختنی جنگل طبیعی دارای بیشترین گسترش آتش به‌دلیل بار سنگین مادهٔ سوختنی می‌باشد [۱۴] که این نتیجه با شبیه‌سازی این پژوهش هم‌راستا بوده و مناطق جنگلی دارای نرخ گسترش آتش‌سوزی بالایی می‌باشند.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج خروجی شبیه‌سازی‌ها، از جمله ضریب سورنسن، ضریب کاپا، نرخ گسترش آتش، طول شعله و شدت خط آتش برای هر سناریو، به‌طور جداگانه برای هر بخش محاسبه و مقایسه شده است. در بین سناریوهای تغییرات رطوبت، سناریوی ۷ کمترین نرخ گسترش آتش‌سوزی را نسبت به سناریوهای دیگر نشان داده است. همچنین بیشترین ضریب سورنسن و کاپا برای سناریوی یک با ۲ درصد رطوبت برابر ۰/۸۰ و ۰/۷۷ می‌باشد. براساس نتایج شبیه‌سازی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش رطوبت هوا به‌صورت غیرمستقیم شاهد تغییراتی بر روی رطوبت مادهٔ سوختنی و دیگر عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی خواهیم بود. با توجه به نتایج شبیه‌سازی سناریوهای رطوبت در جنگل ملکرود، رطوبت بالا در زمان آتش‌سوزی واقعی می‌تواند از عوامل طبیعی جلوگیری از گسترش آتش باشد که در این حالت شاهد آتش‌سوزی طبیعی در سطح وسیع نخواهیم بود. با توجه به میزان رطوبت زیاد در جنگل‌های طبیعی پهن‌برگ شمال کشور، احتمال وقوع آتش‌سوزی در آن به‌سبب یک عامل محیطی به تنهایی، بسیار ناچیز است و نیاز به مجموعه شرایط اقلیمی برای ایجاد آتش‌سوزی دارد. پس با توجه به افزایش مقدار پارامترها از سناریوی ۷ به ۸ باید سناریوهایی بیشتری در این محدوده تعریف شود تا نقطهٔ بهینه پیدا شود. آثار نقشه‌های خروجی شبیه‌سازی شده رفتار آتش شامل نرخ گسترش آتش‌سوزی، شدت خط آتش و طول شعله می‌تواند به شکل کاملاً عملیاتی توسط مسئولان محلی مدیریت آتش‌سوزی، بدون پردازش بیشتر مورد استفاده قرار گیرد.

۵. منابع

[1]. Adab, H., Devikanniah, K., & Solaimani, K. (2013). Modeling fire risk in northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Natural Hazards*, 65, 1723-1743.

[2]. Liu, W., Wang, S., Zhou, Y., Wang, L., & Zhange, S. (2010). Analysis of forest potential fire Environment Based on GIS and RS. Proceedings of 18th International conference on geo-information. Beijing, China, pp: 18-20.

[3]. North, M.P., Stephens, S.L., Collins, B.M., Agee, J.K., Aplet, G., Franklin, J.F., & Fulé, P.Z. (2015). Reform forest fire management: Agency incentives undermine policy effectiveness. *Science*, 349, 1280-1281.

[4]. Vilar, L., Garrido, J., Echavarría, P., Martínez-Vega, J. & Martín, M. P. (2019). Comparative analysis of CORINE and climate change initiative land cover maps in Europe: Implications for wildfire occurrence estimation at regional and local scales. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78; 102-117.

[5]. Nami, M. H., Jaafari, A., Fallah, M. & Nabiuni, S. (2018). Spatial prediction of wildfire probability in the Hyrcanian ecoregion using evidential belief function model and GIS. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15; 373–384.

[6]. Finney, M. A. (1994). FARSITE: a Fire area simulator for fire manager. Fire Issues and solutions in urban ecosystems. Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture; p. 55-56

[7]. Finney, M. (2004). FARSITE: Fire Area simulator-model development and evaluation united states Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 p.

[8]. Duane, A., Kelly, L., Giljohann, K., Batllori, E., McCarthy, M. & Brotons, L. (2019). Disentangling the Influence of Past Fires on Subsequent Fires in Mediterranean Landscapes. *Ecosystems*, 22; 1338–1351.

[9]. Cruz, M. G., and Fernandes, P. M,. (2008). Development of fuel models for fire behaviour prediction in maritime pine (Pinus pinaster Ait.) stands. *International Journal of Wildland Fire*, 17; 194–204.

[10]. Cai, L,. He, H.S., Wu, Z., Lewis, B.L. & Liang, Y. (2014). Development of standard fuel models in boreal forests of Northeast China through calibration and validation. *PLoS One*, 9(4): e94043.

[11]. Cai, L,. S.He, H,. Liang, Y,. Wu, Z. & Huang, C. (2019). Analysis of the uncertainty of fuel model parameters in wildland fire modelling of a boreal forest in north-east China, *International Journal of Wildland Fire*, 28; 205-215.

[12]. Sadat Razavi, A,. Shafiepoor motlagh, M,. Noorpoor, A, & Ehasani, A. (2022). Modelling the Effect of Temperature Increments on Wildfires. *Pollution*, 8(1), 193-209. (In Persian)

[13]. Duguy, B., Alloza, J. A., Roder, A., Vallejo, R. & Pastor, F. (2007). modeling the effects of landscape fuel treatment on fire growth and behaviour in a mediterranean landscape (eastern spain). *International Journal of Wildland Fire*, 16, 619-632.

[14]. Jahdi, R., darvishsefat, A., & Etemad, V. (2014). predicting forest fire spread using fire behavior model (case study: malekroud forest-siahkal). *Iranian Journal of Forest*, 5 (4), 419-430. (In Persian)

[15]. Zinger, K., Carvalho, L. M., Peterson, S., Fujioka, F., Dunie, G.J., Jones, C. & Moritz, M. (2020). evaluating the Ability of FARSITE to simulate wildfires influenced by Extreme Downslope winds in santa Barbara, california. *Fire*, 3, 29.

[16]. Weather Underground's WunderMap, https://www.wunderground.com/ (accessed November 7, 2021).

[17]. Arca, B., Bacciu, V., Duce, P., Pellizzaro, G., Salis, M. & Spano, D. (2015). Use of simulator to produce fire probability Maps in a Mediterranean Area.

[18]. Hamadeh, N., Karouni, A., Daya, B. & Chauvet, P. (2017). Using correlative data analysis to develop weather index that estimates the risk of forest fires in Lebanon & Mediterranean: Assessment versus prevalent meteorological indices. *Case Studies in Fire Safety*, 7; 8-22.

[19]. Shinneman, D. J., Germino, M. J., Pilliod, D. S., Aldridge, C. L., Vaillant, N. M., & Coates, P. S. (2019). The ecological uncertainty of wildfire fuel breaks: Examples from the sagebrush steppe. *Frontiers Ecology Environment*, 279–288.

[20]. Toivanen, J., Engel, C. B., Reeder, M. J., Lane, T. P., Davies, L., & Webster, S. (2019). Coupled atmosphere-fire simulations of the Black Saturday Kilmore East wildfires with the Unified Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 210–230.