حساسیت مدل گسترش آتش سطحی به تغییرات در رطوبت ماده سوختنی زنده (مطالعه موردی: بخش جنوبی پارک ملی گلستان)

رقیه جهدی*، دانش آموخته دکتری جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
وحید اعتماد، استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

E-mail*: r_jahdi@ut.ac.ir
دریافت: ۱۳۹٤/۰۲/۰۹- پذیرش: ۱۳۹٤/۰۵/۱۷

چکیده

پارامترهای مدل گسترش آتش سطحی Rothermel به دو گروه اصلی پارامترهای محیطی مانند سرعت باد سطحی و درجه شیب و پارامترهای ماده سوختنی مانند رطوبت‌های ماده سوختنی و بارهای ماده سوختنی در طبقات مختلف ماده سوختنی، طبقه‌بندی می‌شود. مدل‌های ماده سوختنی برای ساده‌سازی ارائه کمپلکس ماده سوختنی برای مدل گسترش آتش استفاده می‌شوند و مقدار و مشخصات فیزیکی هر طبقه ماده سوختنی زنده و مرده را تشریح می‌کنند. در این مطالعه، مدل گسترش آتش سطحی Rothermel برای ارزیابی ارزش‌های کلیدی رفتار آتش سطحی در دامنه‌ای از رطوبت‌های ماده سوختنی زنده برای مدل‌های ماده سوختنی انتخاب‌شده در بخش جنوبی پارک ملی گلستان استفاده شد. پارامترهای محیطی ثابت نگه داشته شدند، در حالی که رطوبت‌های ماده سوختنی زنده در طیف وسیعی از ارزش‌های مشاهده شده میدانی تغییر داده شد. نرخ گسترش سطحی، طول شعله و شدت خط آتش در این دامنه از رطوبت-های ماده سوختنی زنده برای ١٤ مدل ماده سوختنی استاندارد انتخاب‌شده در منطقه مطالعه بررسی شد. مشخصات رفتار آتش، حساسیت زیادی به رطوبت ماده سوختنی زنده نشان داد که این واکنش وابسته به مدل ماده سوختنی است. در موارد بسیاری، تغییرات کوچک در رطوبت ماده سوختنی زنده تغییرات شدیدی در رفتار آتش پیش‌بینی‌شده نشان‌داد. این تغییرات بزرگ ناشی از ترکیب رطوبت اطفاء ماده سوختنی زنده تجمعی مدل، حد سرعت باد موثر و تابع انتقال بار دینامیک برخی از مدل‌های ماده سوختنی بررسی شده است. علاوه بر این، حساسیت مدل گسترش آتش سطحی به تغییرات رطوبت ماده سوختنی زنده در قالب اندازه پیش‌بینی‌شده برای زون امنیت آتش‌بانان مورد بحث قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: مدل گسترش آتش سطحی، پارامترهای ماده سوختنی، رطوبت ماده سوختنی زنده، رفتار آتش، پارک ملی گلستان.

۱- مقدمه

آتش‌سوزی جنگل‌ها به‌عنوان حادثه شایع در شمال ایران به‌ویژه در پارک ملی گلستان بیشتر از مرداد ماه تا ابتدای دی و به‌دلیل کاهش رطوبت و افزایش سرعت باد رخ می‌دهد (Allard, 2001). به‌طور متوسط سالانه تقریبا ٦۰۰۰ هکتار از نواحی جنگلی در ایران دچار حریق می‌شود (FAO, 2005) که تقریبا ۷٪ آن در نواحی کوهستانی شمال ایران رخ می‌دهد (٤۰۰-۳۰۰ هکتار در سال؛ Banj Shafiei et al., 2010). قابلیت فهم و پیش‌بینی رفتار و گسترش آتش با استفاده از مدل‌های رفتار آتش برای مدیریت مؤثر آتش و واکنش‌های پیشگیرانه ضروری در اکوسیستم‌های بحرانی آتش‌سوزی (مانند پارک ملی گلستان) مهم است (Gu, et. al., 2008; Taylor et al., 2013). مدل‌سازی آتش دو کارکرد اصلی مشخص شامل پیش‌بینی وقوع آتش در

*نویسنده مسئول

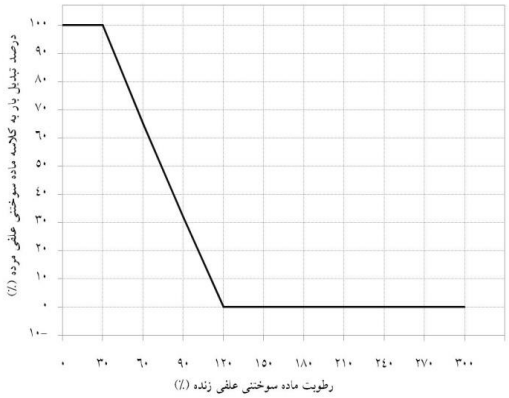
سیمای سرزمین "مدل‌سازی ریسک آتش" و پیش‌بینی گسترش آتش با توجه به احتراق "مدل‌سازی رفتار آتش" را ایفا می‌کند (Baker and Ehle, 2001). مدل‌های رفتار آتش که به‌طور کامل توسط Sullivan (۲۰۰۹) مورد بررسی قرار گرفته، برای بسیاری از تیپ‌های جنگل در ایالات متحده (Rothermel, 1972)، کانادا (Forestry Canada Fire Danger Group, 1972)، استرالیا (Luke and McArthur, 1978)، آفریقای جنوبی (Berjak and Hearne, 2002)، پرتغال (Viegas et al., 1998)، اسپانیا (Vega et al., 1998)، فرانسه (Morandini et al., 2001) و ... توسعه یافته است. سیستم مدل‌سازی آتش BehavePlus بر اساس مدل Rothermel، پارامترهای رفتار آتش (مانند نرخ گسترش و طول شعله)، اثرات آتش (مانند ارتفاع سوخته شدن و میزان مرگ و میر درختان)، و محیط آتش (مانند رطوبت ماده‌سوختنی و پارامتر تعدیل باد) را پیش‌بینی می‌کند (Andrews, 2008).

محاسبات در این سیستم نقطه‌ای (به‌صورت ثابت در زمان و یکنواخت در مکان) انجام و نتایج به صورت جدول‌ها و گراف‌هایی ارائه می‌شود که می‌توان از آنها برای درک مدل‌ها مانند آتش سطحی استفاده کرد. این چنین آگاهی لازمه شبیه‌سازی در سیستم‌های مکانی و تجزیه و تحلیل‌های پیچیده‌تر رفتار آتش است. مدل گسترش آتش سطحی Rothermel (۱۹۷۲) مؤلفه‌های مختلف مواد سوختنی، آب و هوا و توپوگرافی را برای پیش‌بینی رفتار آتش در نظر می‌گیرد. این پارامترها می‌تواند به دو گروه اصلی شامل پارامترهای محیطی مانند سرعت باد، درجه شیب و .. و پارامترهای ماده سوختنی مانند رطوبت‌های ماده سوختنی و بارهای ماده سوختنی طبقه‌بندی شوند (Andrews and Queen, 2001). مدل‌های ماده سوختنی مقدار و مشخصات فیزیکی هر کلاسه اندازه ماده سوختنی زنده و مرده را تشریح می‌کنند. کلاسه‌های اندازه ماده سوختنی مرده بر اساس زمانی که طول می‌کشد که با تغییرات رطوبت در اتمسفر به تعادل برسد (تاخیر زمانی۱)، طبقه‌بندی می‌شود. مواد سوختنی مرده در رابطه با تاخیر زمانی آنها که متناسب با قطر ماده سوختنی است، به چهار دسته طبقه‌بندی می‌شوند: موادسوختنی 1-hr (مواد سوختنی ریز دارای قطر کمتر از ۰/٦٤ سانتی‌متر)؛ موادسوختنی 10-hr (مواد سوختنی با قطر ۰/٦٤ تا ۲/٥٤سانتی‌متر)؛ مواد سوختنی 100-hr (مواد سوختنی با قطر ۲/٥٤ تا ۷/٦۲ سانتی‌متر) و مواد سوختنی 1000-hr (موادسوختنی ۷/٦۲ تا ۲۰/۳۲ سانتی‌متر) (Russell, 2005). کلاسه‌های ماده سوختنی زنده با فرم رشد آنها تعریف و به‌صورت علفی یا چوبی مشخص می‌شوند. پویایی‌های رطوبت مواد سوختنی زنده متفاوت از مواد سوختنی مرده است، به دلیل اینکه محتوای رطوبت آنها بیشتر با فرآیندهای فنولوژیکی یا مراحل توسعه گیاه مشخص می‌شود (Scott and Burgan, 2005).

ماده سوختنی زنده به عنوان یک متغیر محیط آتش، دامنه گسترده‌ای از رفتار آتش به‌ویژه برای مدل‌های ماده سوختنی که دارای بارهای ماده سوختنی علفی هستند، ارائه می‌کند. در ارتباط با تغییر بارهای ماده سوختنی زنده، مواد سوختنی در دو دسته استاتیک و دینامیک طبقه‌بندی می‌شوند.

در مدل‌های ماده سوختنی استاتیک، شامل ۱۳ مدل ماده - سوختنی اصلی (Anderson, 1982) و ۲۳ مدل از ٤۰ مدل ماده سوختنی جدید (Scott and Burgan, 2005)، بارهای ماده سوختنی زنده به‌صورت فصلی تغییر نمی‌کنند. ۱۷ مورد از این ٤۰ مدل ماده سوختنی جدید دینامیک هستند. در این مدل‌های دینامیک در نتیجه تغییر مقدار رطوبت علفی زنده، بارهای ماده سوختنی علفی زنده به بارهای ماده سوختنی علفی مرده تبدیل می‌شوند. زمانی که رطوبت ماده سوختنی علفی زنده به کمتر از ۱۲۰٪می‌رسد، بار ماده سوختنی از طبقه ماده سوختنی علفی زنده به طبقه ماده سوختنی علفی مرده، تبدیل می‌شود. زمانی که رطوبت ماده سوختنی علفی زنده به ۳۰٪ می‌رسد، کل بار ماده سوختنی موجود به طبقه ماده سوختنی علفی مرده تبدیل می‌شود (شکل ۱). این تبدیل

بار می‌تواند اثر قابل‌توجهی روی پیش‌بینی‌های رفتار آتش بگذارد، به دلیل اینکه مواد سوختنی مرده مقدار رطوبت کمتری نسبت به مواد سوختنی زنده دارند و بنابراین به عنوان منبع گرمای بزرگ‌تری برای اشتعال هستند (Jolly, 2007).



شکل ۱. چگونگی تبدیل بار برای مدل‌های ماده سوختنی دینامیک (با مواد سوختنی زنده؛ Scott and Burgan, 2005)

در این مطالعه حساسیت مدل رفتار آتش BehavePlus به تغییرات در رطوبت ماده سوختنی علفی که به‌طور مستقیم در ارتباط با سهم ماده سوختنی علفی در یک مدل ماده سوختنی مشخص است، ارزیابی می‌شود. همچنین نشان داده شده است. در مواردی تغییرات خیلی کوچک در محتوای رطوبت ماده سوختنی علفی منجر به تغییرات بزرگ در رفتار آتش پیش‌بینی‌شده می‌شود. در انتها نتایج این حساسیت‌پذیری در قالب اثر آنها روی اندازه برآورد شده برای زون امنیت آتش‌بانان بیان می‌شود. در این مطالعه تاکید بر این است که دقت بسیار زیادی در زمان انتخاب ارزش‌های رطوبت ماده سوختنی زنده برای مدل-های ماده سوختنی اعمال شود. این مورد بویژه در مدل-های ماده سوختنی که در آنها وزن مواد سوختنی زنده نسبت به سایر مدل‌های ماده سوختنی بیشتر است، اهمیت بسزایی دارد.

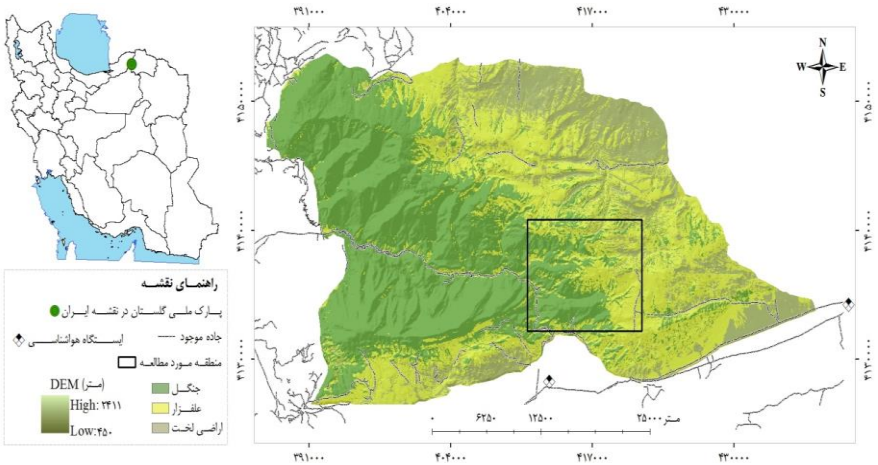
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

پارک ملی گلستان (شکل ۲) با مساحت ۹۱۸/۹۵ کیلومتر مربع در یک وضعیت انتقالی بین ناحیه نیمه مرطوب جنوب دریای کاسپین و نواحی نیمه خشک فلات شرقی-مرکزی ایران واقع شده است (Djamali et al., 2009). دامنه تغییرات ارتفاعی پارک از ٤٥٠ تا ٢٤١١ متر از سطح دریا متغیر است و حداقل ارتفاع در تنگراه و حداکثر آن در قله دیورکوجی است (غلامی باغی و مصداقی، ١٣٨٤). بارندگی‌ها از ۱۵۰ میلی‌متر در سال در جنوب شرق تا بیش از ۱۰۰۰ میلی‌متر در سال در بخش‌های مرکزی پارک نوسان دارد (Akhani, 1998). دمای متوسط سالیانه پارک بین ۱۱/۵ تا ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است. از نظر دما، پارک دارای تابستان‌های معتدل ولی زمستان‌های سرد و مناطق شرقی، شمال شرقی و جنوبی برف‌گیر است. رطوبت هوا بین ٦٠ تا ٨٣ درصد متغیر است (غلامی باغی و مصداقی، ۱۳۸۵).

پارک ملی گلستان که در شرقی‌ترین محدوده بیوم هیرکانی قرار دارد، از معدود زیستگاه‌های طبیعی کشور و تنها زیستگاه امن باقیمانده برای بسیاری از گونه‌های حیات وحش در این منطقه است (Varasteh Moradi, 2005). پارک به‌دلیل وجود رویشگاه‌های متنوع، دارای تنوع گیاهی چشمگیری است، به‌طوری که تاکنون حدود ۱۳۰۰ گونه در این منطقه شناسایی شده است (آخانی، ۱۳۸۳). آتش‌سوزی‌ها در پارک ملی گلستان بیشتر در ماه‌های فروردین تا آذر پراکنده‌اند؛ ولی بیشینه احتراق و مساحت سوخته شده در ماه‌های تیر تا آبان است.

بر اساس گزارش‌های ثبت شده از آتش‌سوزی‌های رخ داده در دهه گذشته در پارک و نیز نقشه مناطق آتش‌گرفته در سال‌های گذشته (میردیلمی و همکاران، ۱۳۹۲) این آتش‌سوزی‌ها بیشتر در بخش جنوبی پارک متمرکز بوده‌اند. بنابراین در این مطالعه ارزیابی حساسیت مدل رفتار آتش به تغییرات در رطوبت ماده سوختنی علفی در بخش جنوبی پارک ملی گلستان با سابقه تکرار



شکل ۲. نمایی از پارک ملی گلستان و موقعیت آن در نقشه ایران، به همراه محدوده مورد مطالعه در بخش جنوبی پارک و موقعیت نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی به پارک

حریق زیاد در سال‌های گذشته (به‌عنوان مثال حریق‌های سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰) با مساحت تقریبا ۲۰ کیلومتر مربع (شکل ۲)، انجام می‌شود.

۲-۲- داده ورودی

نتایج قابل‌اعتماد از مدل‌های رفتار آتش به میزان زیادی وابسته به صحت داده‌های ورودی به‌ویژه داده آب و هوا و مدل‌های ماده سوختنی است (Arca et al., 2007). مواد سوختنی (مدل ماده سوختنی و تاج پوشش) و توپوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع) ورودی‌های مدل آتش هستند. لایه‌های توپوگرافی از طریق مدل رقومی ارتفاع (DEM) تهیه شده از نقشه‌های توپوگرافی رقومی ۱:۲۵۰۰۰ (سازمان نقشه‌برداری کشور؛ NCC) تهیه شد. داده آب و هوا (درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد، جهت باد و بارندگی) مربوط به تیر ماه ۱۳۹۰، از نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی به منطقه مطالعه جمع‌آوری شد.

این ایستگاه‌ها شامل ایستگاه کلیماتولوژی دشت گلستان (ارتفاع ۱۰۰ متر؛ ۰۱´E ،۵۶° N ۱۷´ ۳۷°) و ایستگاه هواشناسی خودکار رباط قره‌بیل (ارتفاع ۱۲۸۲ متر؛ ۱۹´E ،۵۶° N ۲۱´ ۳۷°) که به ترتیب در فاصله ۷ و ۲۰ کیلومتری مرز جنوبی و شرقی پارک ملی گلستان واقع شده‌اند، می‌باشد (شکل ۲).

به‌منظور اجرای مدل‌های آتش، انتخاب مدل‌های ماده سوختنی استاندارد مناسب یا توسعه مدل‌های ماده سوختنی محلی مورد نیاز است (Arca et al., 2007; Salis, 2008; Alcasena et al., 2016). اگرچه فلور و پوشش گیاهی پارک ملی گلستان به‌خوبی توسط آخانی (۱۹۹۸) با ارائه نقشه‌های توزیع بیشترین گونه‌های گیاهی گزارش شده، ولی هنوز نقشه پوشش‌گیاهی دقیقی از منطقه در دسترس نیست (Djamali et al., 2009). در این مطالعه شناسایی پارامترهای مدل ماده‌سوختنی بر اساس نقشه‌های پوشش زمین و پوشش گیاهی از طریق برآوردهای زمینی در طول پیمایش‌های گسترده، تهیه شدند.

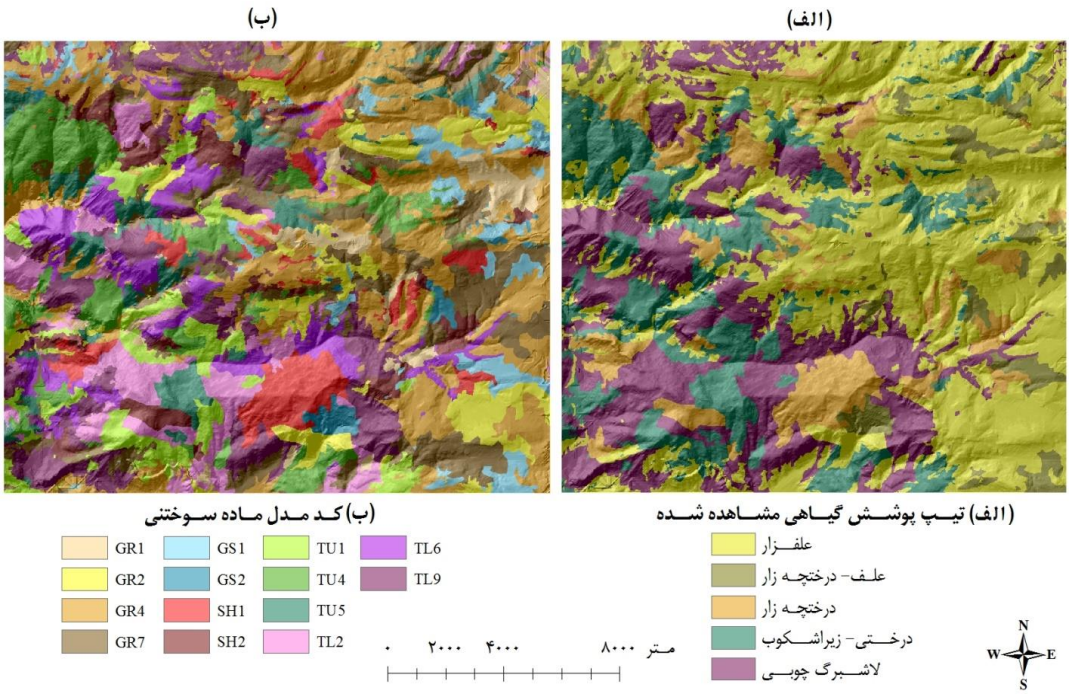
بر اساس مطالعات انجام‌شده با تمرکز بر نمونه‌برداری ماده‌سوختنی، روش نمونه‌برداری خط نمونه۲ (LIS; Marshall et al., 2000, 2003) متداول‌ترین روش برای هدف شبیه‌سازی گسترش آتش است. در این مطالعه برای تهیه نقشه پوشش‌گیاهی جنگل و علفزار که منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهند، نمونه‌برداری‌های زمینی به روش نمونه‌برداری خط‌نمونه انجام شد. هدف مطالعه، تعیین مدل‌های ماده‌سوختنی است که تفاوت‌های قابل-توجهی در پارامترهای مختلف پوشش‌گیاهی از جمله ترکیب و نوع گیاهان، ابعاد اجزاء ماده سوختنی، تراکم و مشخصات تاج و ... نشان می‌دهند.

بدین منظور قطعه نمونه‌های مربع‌شکل برای تشریح مشخصات پوشش‌گیاهی روی خط‌نمونه‌ها پیاده شد. خط‌نمونه‌ها ابتدا بر روی نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه طراحی و سپس با استفاده از نقاط مشخص جنگل، قطب‌نما و متر نواری بر روی زمین پیاده شدند. با توجه به غالبیت پوشش علفی و نیز پوشش درختی در منطقه، به ترتیب از قطعه نمونه‌های ۱×۱ متر و ۱۰×۱۰ متر بر روی خط نمونه‌ها در پوشش‌های علفی و جنگلی استفاده شد. در مجموع ۲۵ خط نمونه با فاصله ۱۰۰ متر از یکدیگر در دو ناحیه مورد مطالعه پیاده شدند. داده‌های پوشش‌گیاهی در ۱۳۰ قطعه نمونه ۱×۱ متر در علفزارها و ۱۲۰ قطعه نمونه ۱۰×۱۰ متر در درختچه‌زارها و اراضی جنگلی برداشت شد. در مجموع، ۲۵۰ قطعه نمونه با شروعی تصادفی در خط نمونه‌ها پیاده شدند. مختصات قطعه نمونه‌ها با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) برداشت و سپس وارد ArcGIS شدند.

مشخصات پوشش‌گیاهی شامل ترکیب گونه‌های گیاهی، عمق بستر ماده سوختنی، تیپ لاشبرگ (سوزنی‌برگ یا پهن‌برگ)، عمق و فشردگی لاشبرگ، پوشش علفی، پوشش درختچه‌ای، تاج پوشش و میزان زمین لخت در هر قطعه نمونه برآورد شد. متوسط تاج پوشش برای هر قطعه نمونه و نیز برای هر تیپ پوشش محاسبه و نقشه آن در GIS تهیه شد. مشخصات پوشش گیاهی برآورد شده در عملیات میدانی، بر اساس توصیف مدل‌های ماده سوختنی آتش سرویس جنگل ایالات متحده (NFFL) تفسیر شدند. بر پایه این تفسیر، مدل‌های مواد سوختنی منطقه به کمک نقشه پوشش‌گیاهی تهیه شده، عکس‌های پوشش‌گیاهی منطقه و تجربیات کارشناسان جنگل تعیین شد. در واقع انتخاب مدل‌های ماده سوختنی بر اساس شباهت‌های بین مشخصات پوشش‌گیاهی مشاهده شده در عرصه (شکل ۳) و توصیف مدل‌های ماده سوختنی استاندارد (جدول ۱) انجام شد.

۲-۳- شبیه‌سازی در مدل BehavePlus

حساسیت مدل رفتار آتش BehavePlus 5.0.5. به تغییرات در رطوبت ماده سوختنی علفی زنده که به‌طور مستقیم در ارتباط با سهم ماده سوختنی علفی در یک مدل



شکل ۳. نقشه تیپ پوشش گیاهی منطقه و مدل‌های ماده سوختنی استاندارد انتخاب شده مطابق با جدول ۱ در منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. توصیف مدل‌های ماده سوختنی انتخاب شده در منطقه مورد مطالعه بر اساس مدل‌های ماده سوختنی Scott و Burgan (۲۰۰۵)

پوشش مشاهده‌شده	نام، کد و شماره مدل ماده سوختنی و تیپ ماده سوختنی حامل آتش	توصیف مدل ماده سوختنی
علفزار (تراکم خیلی کم)	علفی، GR1- ۱۰۱ (علف کوتاه و پراکنده اقلیم خشک)	حامل اصلی آتش علف پراکنده و کوتاه، میزان کمی ماده‌سوختنی مرده ریز ممکن است موجود باشد. رطوبت اطفاء GR1 شاخصی از بستر ماده‌سوختنی اقلیم خشک است، البته GR1 می‌تواند در بسترهای ماده‌سوختنی با رطوبت اطفاء زیاد نیز استفاده شود زیرا در هر دو مورد نرخ گسترش و طول شعله پیش‌بینی شده در مقایسه با مدل‌های دیگر GR کم است.
علفزار (تراکم کم)	علفی، GR2- ۱۰۲ (علف با بار کم اقلیم خشک)	حامل اصلی آتش علف، میزان کمی ماده‌سوختنی مرده ریز ممکن است موجود باشد. بار بیشتر از GR1، و بستر ماده‌سوختنی ممکن است پیوسته‌تر باشد. درختچه‌ها اگر وجود داشته باشند اثری روی رفتار آتش نمی‌گذارند.
علفزار (تراکم متوسط)	علفی، GR4- ۱۰٤ (علف با بار متوسط اقلیم خشک)	حامل اصلی آتش علف پیوسته، بار و عمق بیشتر از GR2 است، عمق بستر ماده‌سوختنی در حدود ٦۰ سانتی‌متر است.
علفزار (تراکم زیاد)	علفی، GR7- ۱۰۷ (علف با بار زیاد اقلیم خشک)	حامل اصلی آتش علف پیوسته، بار و عمق بیشتر از GR4، علف در حدود ۹۰ سانتی‌متر بلندی دارد.
علفی- درختچه‌ای (تراکم کم)	علفی-درختچه‌ای، GS1- ۱۲۱ (علف- درختچه با بار کم اقلیم خشک)	حامل اصلی آتش علف و درختچه ترکیب شده، درختچه‌ها در حدود ۳۰ سانتی‌متر بلندی دارند، بار علف کم است. نرخ گسترش متوسط، طول شعله کم است. رطوبت اطفاء کم.
علفی- درختچه‌ای (تراکم متوسط)	علفی-درختچه‌ای، GS2- ۱۲۲ (علف- درختچه با بار متوسط اقلیم خشک)	حامل اصلی آتش علف و درختچه ترکیب شده، درختچه‌ها در حدود ۳۰ تا ۹۰ سانتی‌متر بلندی دارند، بار علف متوسط است. نرخ گسترش زیاد، طول شعله متوسط است. رطوبت اطفاء کم.
درختچه‌زار ارس (تراکم کم)	درختچه‌ای، SH1- ۱٤۱ (درختچه با بار کم اقلیم خشک)	حامل اصلی آتش درختچه‌های چوبی و لاشبرگ درختچه، بار ماده‌سوختنی درختچه‌ای کم، عمق در حدود ۳۰ سانتی‌متر، مقداری ماده‌سوختنی علفی ممکن است وجود داشته باشد، نرخ گسترش خیلی کم، طول شعله خیلی کم
درختچه‌زار ارس (تراکم متوسط)	درختچه‌ای، SH2- ۱٤۲ (درختچه با بار متوسط اقلیم خشک)	حامل اصلی آتش درختچه‌های چوبی و لاشبرگ درختچه، بار ماده‌سوختنی متوسط (بیشتر از SH1)، عمق در حدود ۳۰ سانتی‌متر، ماده‌سوختنی علفی وجود ندارد، نرخ گسترش کم، طول شعله کم
جنگل طبیعی ارس با زیراشکوب علفی	درختی-زیراشکوب، TU4- ١٦٤ (سوزنی‌برگ کوتاه با زیراشکوب)	حامل اصلی آتش درختان سوزنی‌برگ کوتاه با زیراشکوب علفی یا خزه‌ای می‌باشد. نرخ گسترش متوسط، طول شعله متوسط
جنگل پهن‌برگ آمیخته (تراکم کم)	درختی-زیراشکوب، TU1- ١٦١ (درختی- علفی- درختچه‌ای با بار کم اقلیم خشک)	حامل اصلی آتش بار کم علف و یا درختچه با لاشبرگ است. نرخ گسترش کم، طول شعله کم.
جنگل پهن‌برگ آمیخته (تراکم زیاد)	درختی-زیراشکوب، TU5- ١٦٥ (درختی- درختچه‌ای با بار خیلی زیاد اقلیم خشک)	حامل اصلی آتش لاشبرگ زیاد و سنگین جنگل با زیراشکوب درختچه‌ای یا درخت کوچک می‌باشد. نرخ گسترش متوسط، طول شعله متوسط
جنگل پهن‌برگ بلوط خالص، بلوط- ممرز (تراکم کم)	لاشبرگ چوبی، TL2- ۱۸۲ (لاشبرگ پهن‌برگ با بار کم)	حامل اصلی آتش لاشبرگ پهن‌برگ است، بار کم، لاشبرگ پهن‌برگ فشرده. نرخ گسترش خیلی کم؛ طول شعله خیلی کم
جنگل پهن‌برگ بلوط خالص، بلوط- ممرز (تراکم متوسط)	لاشبرگ چوبی، TL6- ۱۸٦ (لاشبرگ پهن‌برگ با بار متوسط)	حامل اصلی آتش لاشبرگ پهن‌برگ است، بار متوسط، فشردگی کمتر از TL2 است، نرخ گسترش متوسط؛ طول شعله کم
جنگل پهن‌برگ بلوط خالص، بلوط- ممرز (تراکم خیلی زیاد)	لاشبرگ چوبی، TL9- ۱۸۹ (لاشبرگ پهن‌برگ با بار خیلی زیاد)	حامل اصلی آتش لاشبرگ پهن‌برگ نرم است، بار خیلی زیاد، نرخ گسترش متوسط؛ طول شعله متوسط

ماده سوختنی معین است، ارزیابی می‌شود. در شبیه‌سازی با BehavePlus پارامترهای آب و هوا و توپوگرافی، بار ماده سوختنی، رطوبت ماده سوختنی مرده و دیگر پارامترهای ماده سوختنی ثابت و تنها رطوبت ماده سوختنی زنده در دامنه‌ای از ارزش‌ها تغییر داده شد. این رویکرد امکان تجزیه وتحلیل حساسیت مدل در پیش‌بینی

رفتار آتش در دامنه‌ای از رطوبت‌های ماده سوختنی زنده را فراهم می‌کند. به‌طور کلی، مدل‌های ماده سوختنی در سه طبقه حساسیت ملایم، حساسیت زیاد و غیرحساس نسبت به تغییرات رطوبت ماده سوختنی طبقه‌بندی می‌شوند. رطوبت‌های ماده سوختنی مرده در ۵٪ ثابت نگه‌داشته، سرعت باد میانه شعله۳ ۱۰ km h-1 و شیب زمین نیز صفر درجه تعیین شد. رطوبت‌های ماده سوختنی زنده برای پوشش‌گیاهی علفی و چوبی از ۳۰٪ تا ۳۰۰٪ در گام‌های ۱۰٪ تغییر داده شد. این مقادیر دامنه‌ای از ارزش‌های مشاهده‌شده برای رطوبت ماده سوختنی علفی را پوشش می‌دهد (Ceccato et al., 2003). این ارزش‌ها برای مدل گسترش آتش سطحی برای ارزیابی پارامترهای رفتار آتش نرخ گسترش (ROS)، شدت خط آتش (FLI) و طول شعله (FML) برای تمامی مدل‌های ماده سوختنی انتخاب شده در منطقه، به‌کار برده شد.

۲-٤- تجزیه و تحلیل حساسیت BehavePlus به رطوبت ماده سوختنی زنده

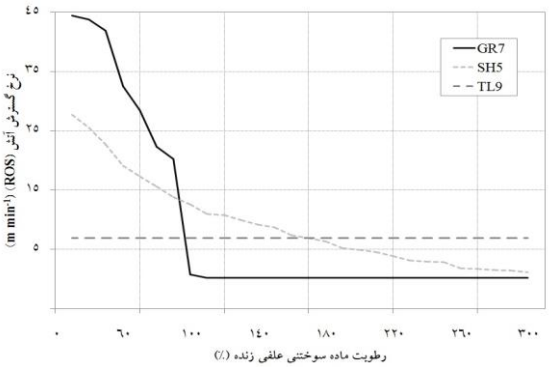
در استفاده از مدل‌ها از جمله مدل‌های رفتار آتش، درک کامل حساسیت آنها به ورودی‌ها ضروری است. ارزش‌های بسیاری از پارامترهای محیط‌زیست آتش می‌تواند در سراسر سیمای‌سرزمین و در طول زمان تغییر کند. در مدل‌ها، تنها انتخاب یک ارزش رطوبت ماده سوختنی زنده برای برآورد رفتار آتش بر اساس مدل رفتار آتش سطحی Rothermel می‌تواند مشکل‌ساز باشد. در این مورد انجام تجزیه و تحلیل‌های حساسیت به‌منظور تعیین پارامترهای مدل رفتار آتش که باید با دقت بیشتر انتخاب شوند (به‌واسطه اثر بزرگ این پارامترها روی پیش‌بینی‌های مدل و پارامترهای دیگر مدل)، می‌تواند مفید باشد.گرادیان‌های محلی به‌عنوان ابزاری مناسب برای تجزیه وتحلیل حساسیت یک مدل معین پیشنهاد شده است (McRae et al., 1982; Isukapalli, 1999). در این مطالعه نرخ تغییر گسترش، شدت خط آتش و طول شعله به ازای یک واحد تغییر در رطوبت ماده سوختنی زنده و همچنین بیشینه این تغییرات محاسبه شد که از این به بعد به نام گرادیان محلی بیشنیه٤ (MLG) مورد اشاره قرار می‌گیرد. MLG نرخ تغییر یک تابع واکنش۵ نسبت به دامنه‌ای از ارزش‌ها را اندازه‌گیری و بیشترین میزان تغییر در خروجی پیش‌بینی‌شده برای یک واحد تغییر در ورودی را تعیین می‌کند (Jolly, 2007). علاوه بر MLG، مقدار رطوبت ماده سوختنی زنده که در آن بیشترین حساسیت برای هر مدل ماده سوختنی به‌وجود می‌آید (بیشترین تغییر در رفتار آتش پیش‌بینی شده در فواصل ۱۰ درصدی) تعیین شد.

۳- نتایج

با استفاده از مدل BehavePlus، رفتار آتش در مدل‌های ماده سوختنی در دامنه‌ای از رطوبت‌های ماده سوختنی زنده با ثابت نگه داشتن دیگر پارامترهای محیط‌زیست آتش، شبیه‌سازی شد. در شکل ٤، نحوه تغییرات نرخ گسترش آتش در تیپ‌های ماده سوختنی مختلف به تغییرات رطوبت ماده سوختنی زنده ارائه شده است. بر اساس این شکل، تیپ‌های ماده سوختنی درختچه‌زار (مدل ماده سوختنی SH5) حساسیت ملایم، علفزار (مدل ماده سوختنی GR7) حساسیت زیاد و لاشبرگ چوبی (مدل ماده سوختنی TL9) غیرحساس به تغییرات رطوبت ماده سوختنی زنده ارائه است، زیرا مدل‌های ماده سوختنی لاشبرگ چوبی مواد سوختنی زنده ندارد.

۱۷ مورد از ٤۰ مدل ماده سوختنی استاندارد (Scott and Burgan, 2005) دارای مواد سوختنی زنده هستند. در منطقه مورد مطالعه، مدل‌های ماده سوختنی لاشبرگ چوبی (TL2-TL6-TL9) بدون مواد سوختنی زنده و غیرحساس به تغییرات رطوبت ماده‌سوختنی زنده می‌باشند و انحراف استاندارد مشخصه‌های نرخ گسترش، طول شعله و شدت خط آتش به این تغییرات، برابر صفر بوده است. دیگر مدل‌های ماده سوختنی، حساسیت‌های متفاوتی را به تغییرات رطوبت ماده سوختنی زنده نشان دادند و برخی از مدل‌ها مانند مدل‌های ماده سوختنی تیپ

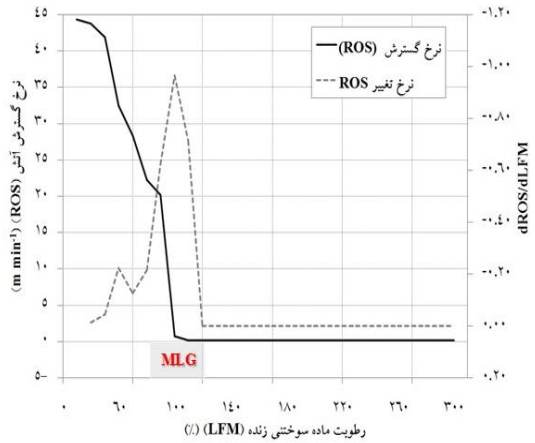
پوشش علفی بسیار حساس بوده‌اند و روند تغییرات آنها در پارامترهای نرخ گسترش، شدت خط آتش و طول شعله نیز یکسان بوده است.



شکل ٤. نرخ‌های گسترش پیش‌بینی‌شده در رطوبت‌های مختلف ماده سوختنی زنده توسط مدل BehavePlus در سه تیپ ماده‌سوختنی علفی (GR7)، درختچه‌ای (SH5) و لاشبرگ چوبی (TL9)

در این مطالعه پارامترهای رفتار آتش شامل نرخ گسترش، شدت خط آتش و طول شعله و MLG (بیشترین تغییر در این پارامترها) برای یک واحد تغییر در رطوبت ماده سوختنی زنده با استفاده از مدل BehavePlus محاسبه شد. نمونه‌ای از MLG برآورد شده در دامنه‌ای از نرخ‌های گسترش آتش سطحی پیش‌بینی‌شده در شکل ٥ ارائه شده است. این شکل ارزش‌های زیاد مناطقی را نشان می‌دهد که در آن مدل حساسیت زیادی به تغییرات در رطوبت‌های مختلف ماده‌سوختنی زنده نشان داده است. در این شکل، MLG در رطوبت ماده سوختنی زنده (LFM) ١٠٠٪ مشاهده می‌شود، جایی که نرخ گسترش از ٢٠/٢ به ٠/٧ متر بر دقیقه کاهش یافته است. نتایج MLG برای همه مدل‌های ماده سوختنی منطقه مورد مطالعه که دارای موادسوختنی زنده هستند نیز در شکل ٦ ارائه شده است.

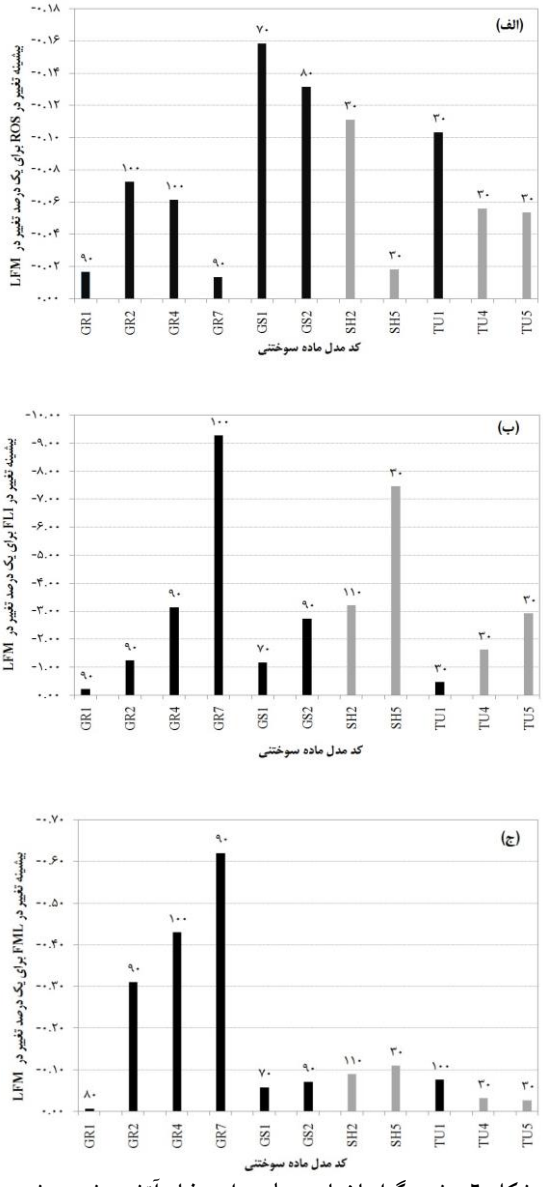
مدل‌های ماده سوختنی علفی بین همه مدل‌های ماده سوختنی استاندارد بیشترین حساسیت را به تغییرات رطوبت ماده سوختنی زنده نشان دادند. حساس‌ترین این مدل‌ها، مدل‌های مواد سوختنی دینامیک است که در آنها بارهای ماده سوختنی از علفی زنده به طبقه ماده سوختنی مرده hr-١ تبدیل می‌شود. زمانی که در مدل ماده سوختنی بار علفی در نظر گرفته شود، بارهای آنها عامل قوی حساسیت آن مدل ماده سوختنی به تغییر در رطوبت ماده سوختنی زنده است. این مورد در شکل ٦ ارائه شده که در آن گرادیان‌های محلی بیشینه برای هر مدل ماده سوختنی نسبت به بارهای ماده سوختنی علفی برای آن مدل معین، نشان داده شده‌است.



شکل ٥. نرخ‌های گسترش پیش‌بینی‌شده در رطوبت‌های مختلف ماده سوختنی زنده توسط مدل BehavePlus در تیپ ماده سوختنی علفی (GR7) و نرخ تغییر مربوط به آن (dROS/dLFM)

در این مطالعه علاوه بر تعیین گرادیان محلی بیشینه برای یک مدل ماده سوختنی مشخص، ارزش‌های رطوبت ماده سوختنی که در آن مدل‌ها حساس‌تر بودند، نیز تعیین شد (شکل ٦). در این شکل گراف‌های ارائه‌شده سه مشخصه رفتار آتش شامل: الف) نرخ گسترش؛ ب) شدت خط آتش ؛ ج) طول شعله برای مدل‌های ماده سوختنی که انحراف استاندارد آنها بزرگتر از صفر بوده است، را ارائه می‌نماید. اعداد بالای ستون‌ها (ستون‌های سیاه و خاکستری رنگ، به ترتیب برای مدل‌های ماده سوختنی استاتیک و دینامیک) برای هر مدل ماده سوختنی، مقدار رطوبتی که در آن مدل‌های ماده سوختنی مختلف بیشترین حساسیت را نشان می‌دهد، را بیان می‌کند. مقدار رطوبت ماده سوختنی که در آن مدل گسترش آتش سطحی حساس‌تر بود با تیپ ماده سوختنی تغییر کرده است. بر

اساس نتایج تیپ‌های ماده سوختنی علفی (GR1-GR2-GR4-GR7) حساس‌تر به رطوبت ماده سوختنی زنده ۱۰۰-۹۰٪، علفی-درختچه‌ای (GS1-GS2) حساس‌تر به رطوبت ماده سوختنی زنده ۷۰ و ۹۰٪، درختچه‌ای (SH5 و SH2) حساس‌تر به رطوبت ماده سوختنی زنده ۳۰ و ۱۱۰٪، و درختی- زیراشکوب (TU1-TU4-TU5) حساس‌تر به رطوبت ماده سوختنی زنده ۳۰ و ۱۰۰٪ بوده‌اند (شکل ٦).



شکل ٦. بیشینه گرادیان‌های محلی برای رفتار آتش پیش‌بینی‌شده (الف)؛ ROS (ب)؛ FLI (ج)) در رطوبت‌های مختلف ماده سوختنی زنده (LFM) توسط مدل BehavePlus در تیپ‌های مختلف ماده سوختنی

٤- بحث

در مطالعات زیادی مانند Sun و همکاران (۲۰۰٦) بر اهمیت تعیین اثر رطوبت مواد سوختنی زنده در رفتار آتش تاکید شده‌است. مدل‌های ماده سوختنی دینامیک نسبت به مدل‌های استاتیک، به‌دلیل تغییر رطوبت ماده سوختنی زنده و در نتیجه نسبت بار ماده سوختنی زنده به بار ماده سوختنی مرده پیچیده‌تر هستند. تغییرات پارامترهای رفتار آتش در این مدل‌ها در رطوبت ماده سوختنی علفی زنده کمتر از ۱۲۰٪، شدیدتر است. مدل‌های ماده سوختنی دینامیک منطقه مورد مطالعه، شامل همه مدل‌های ماده سوختنی علفی و علفی-درختچه‌ای (GR1, GR2, GR4, GR7, GS1, GS2) و مدل ماده سوختنی درختچه‌ای SH1 و درختی-زیراشکوب TU1 بوده است. در این مدل‌ها با کاهش زیاد رطوبت ماده سوختنی زنده، مقدار کافی بار از مواد سوختنی زنده به طبقات ماده سوختنی مرده منتقل و در نتیجه شدت‌های واکنش بیش از معیار حد سرعت باد شده و نرخ‌های گسترش به‌شدت افزایش یافته‌است. در مدل‌های ماده سوختنی که مقدار رطوبت آنها نزدیک به مقادیر رطوبت معمول در فصل تابستان است، انتخاب مقادیر رطوبت باید با دقت بیشتری در شبیه‌سازی‌ها انجام‌شود. بر اساس نتایج، پارامترهای رفتار آتش مانند طول شعله در مدل‌های ماده سوختنی علفی در رطوبت‌های ماده سوختنی زنده ۱۰۰-۹۰٪، حساس‌تر بوده است، البته رطوبت‌های ماده سوختنی زنده زمان تابستان نیز بیشتردر این دامنه قرار دارد. به عنوان مثال، برای مدل ماده سوختنی علفی GR7 کاهش در رطوبت ماده سوختنی زنده از ۱۱۰٪ به ۱۰۰٪ طول شعله پیش‌بینی‌شده را از ۱/۲ متر به ۳/۸ متر افزایش داد. به بیانی دیگر ۲۲۰٪ افزایش در طول شعله پیش‌بینی شده برای یک کاهش خیلی‌جزئی در مقدار رطوبت برآورد شد. بنابراین درک درست حساسیت هر مدل ماده سوختنی به تغییرات رطوبت ماده سوختنی زنده مهم می‌باشد. با انتخاب مقدار رطوبت ماده سوختنی زنده خیلی زیاد، شدت رفتار آتش می‌تواند کم برآورد شده و

منجر به اخذ تصمیمات نادرست مانند اجـرای تیمارهـای ناصحیح در پوشش‌های گیاهی مختلـف شـود. عـلاوه بـر اهمیت پیش‌بینی‌های رفتار آتش در مدیریت حریق و مواد سوختنی، به‌کارگیری دقـت زیـاد در انتخـاب پارامترهـای محیط‌زیست آتش در برآورد مشخصات بالقوه رفتار آتش برای تضمین امنیت آتش‌بانان نیز ضروری است. Butler و Cohen (۱۹۹۸) پیشنهاد کردند که انـدازه حـداقل زون امنیت آتش‌بانان و فاصله آنها از جبهـه در حـال اشـتعال، نباید کمتر از ٤ برابر ارتفاع شعله آتـش باشـد. بـا فـرض اینکه پتانسیل آتش‌سوزی در همه جهت‌ها به یـک میـزان وجود دارد (یعنـی تشـکیل یـک زون امنیـت دایـره‌ای) و طول شعله معادل با ارتفاع شعله اسـت (Andrews and Bevins, 2003)، در مدل ماده‌سـوختنی علفـی GR7 در رطوبت ماده سوختنی زنده ۱۰۰٪، نیـاز بـه تعیـین سـطح اندازه زون امنیت به میزان تقریباً ۱۰ برابـر سـطح بـرآورد شده در رطوبت ماده سوختنی زنده ۱۱۰٪، خواهد بود.

۵- جمع بندی و نتیجه‌گیری

رفتـار و گسـترش آتـش جنگـل بـه‌دلیـل تعـداد عوامـل فیزیکی- شیمیایی موثر و نیز ارتبـاط غیرخطـی بـین ایـن عوامل، پدیده‌ای بسیار پیچیـده اسـت (Santoni et al., 2011; Jose et al., 2014). استفاده از مـدل‌هـای رفتـار آتش به قابلیت فهم و پیش‌بینـی رفتـار و گسـترش آتـش برای مدیریت موثر آتش کمک می‌کند. خروجی‌های ایـن مدل‌ها به میزان قابل‌توجهی وابسته به کیفیت داده ورودی به‌ویژه داده آب و هوا و مـدل‌هـای مـاده سـوختنی اسـت (Arca et al., 2007; Salis, 2008). مقـدار رطوبـت پایین ماده سـوختنی بـه معنـی دسترسـی بیشـتر بـه مـاده سوختنی برای حریق بوده و رطوبت ماده سوختنی نیز اثـر قابل‌توجه روی رفتـار و گسـترش آتـش (Jolly, 2007; Matthews et al., 2012) دارد. بنابراین در این مطالعـه، حساسیت مدل رفتار آتش BehavePlus بـه تغییـرات در رطوبت ماده سوختنی علفی که به‌طور مسـتقیم در ارتبـاط با سهم ماده سوختنی علفی در یـک مـدل مـاده سـوختنی مشخص اسـت، ارزیـابی شـد. نتـایج بررسـی حساسـیت مدل‌های ماده سوختنی منطقه به تغییرات در رطوبت مـاده سوختنی زنده نشـان داد کـه تغییراتـی بسـیار کوچـک در مقدار رطوبت مـاده سـوختنی زنـده مـی‌توانـد منجـر بـه تغییراتی بزرگ در رفتار آتش پیش‌بینی‌شده شود. علاوه بر این، بیشینه حساسیت مدل‌های مـاده سـوختنی در مقـادیر متفاوت رطوبت ماده سوختنی زنده به‌دست آمد. برخی از مدل‌های ماده سوختنی بیشینه حساسیت در رطوبت مـاده سوختنی زنده ۳۰٪ را نشان دادند، اما بیشتر مدل‌های ماده سوختنی منطقه مورد مطالعه در مقـادیر رطوبـت زیـادتر، حساسیت‌های بیشتری را نشـان دادنـد (ماننـد مـدل‌هـای ماده‌سوختنی علفی). بنابراین در انتخـاب مقـادیر رطوبـت ماده سوختنی زنده باید دقت زیادی شود.

٦- سپاسگزاری

از اداره کـل حفاظـت محـیط زیسـت اسـتان گلسـتان، مجموعه مدیریت و پرسنل یگان حفاظت محـیط زیسـت پارک ملی گلستان بـه دلیـل مسـاعدت در اجـرای طـرح سپاسگزاری می‌شود.

۷- پی نوشت‌ها

1. Time lag
2. Line Intersect Sampling
3. Midflame wind speed
4. Maximum Local Gradient
5. Response function

۸- منابع

- غلامی باغی، نغمه.، مصداقی، م.، (۱۳۸۵) "بررسی تنوع الگوی مکانی گونه‌های مهم مرتعی پارک ملـی گلسـتان و مناطق همجوار"، مجله علوم کشـاورزی و منـابع طبیعـی، جلد ۱۳، شماره ۲: ۱۷۱-۱٦۱.

- میردیلمی، طیبه.، شتایی، شـعبان.، کاووسـی، م. (۱۳۹۲) "پهنه‌بندی خطر آتش‌سـوزی در پـارک ملـی گلسـتان بـا استفاده از روش ترکیب خطـی وزنـی (WLC)" ، مجلـه

جنگـل ایـران، انجمـن جنگلبـانی ایـران، سـال پـنجم، شماره ٤: ٣٩٠-٣٧٧.

- Akhani, H. E., (1982) "Aids to determining fuel models for estimating fire behavior", GTR-INT-122, USDA Forest Service. (Ogden, UT).

- Andrews, P. L., Queen, L. P., (2001) "Fire modeling and information system technology", International Journal of Wildland Fire, Vol. 10, pp. 343–352.

- Andrews, P. L., Bevins, C., Carlton, D., (2002) "BehavePlus fire modeling system. Version 1.0: user's guide", United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Systems for Environmental Management. Fort Collins, CO.

- Andrews, P. L., Bevins, C. D., (2003) "BehavePlus fire modeling system, version 2: Overview", in '2nd InternationalWildland Fire Ecology and Fire Management Congress'. (Orlando, FL)

- Andrews, P. L., (2008) "BehavePlus fire modeling system, version 4.0: Variables", United States Department of Agriculture. Forest Service. General Technical Report RMRS-GTR-213WWW. Fort Collins, CO, 2008.

- Arca, B., Duce, P., Laconi, M., Pellizzaro, G., Salis, M., Spano, D., (2007) "Evaluation of FARSITE simulator in Mediterranean maquis", International Journal of Wildland Fire, Vol. 16, pp. 563–572.

- Alcasena, F. J., Salis, M., García, C. V., (2016) "A fire modeling approach to assess wildfire exposure of valued resources in central Navarra, Spain", European Journal of Forest Research, Vol. 135, No. 1, pp. 87–107.

- Allard, G., (2001) "The fire situation in Islamic Republic of Iran", In: FRA Global Forest Fire Assessment 1990- 2000. Forest Resources Assessment Programme, Working Paper 55, pp. 198-202.

- Baker, W. L., Ehle, D., (2001) "Uncertainty in surface-fire history: the case of ponderosa pine forests in the western United States", Canadian Journal of Forest Research, Vol. 31, pp. 1205-1226.

- Banj Shafiei, A., Akbarinia, M., Jalali, G., Hosseini, M., (2010) "Forest fire effects in beech dominated mountain forest of Iran", Forest Ecology and Management, Vol. 259, pp. 2191-2196.

- Berjak, S. G., Hearne, J. W., (2002) "An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system", Ecological Modelling, Vol. 148, No, 2, pp. 133-151.

- Butler, B., Cohen, J. D., (1998) "Firefigther Safety Zones: A theoretical model based on radiative heating", International Journal of Wildland Fire, Vol. 8, pp. 73–77.

- Ceccato, P., Leblon, B., Chuvieco, E., Flasse, S., Carlson, J. D., (2003) "Estimation of live fuel moisture content", In 'Wildland fire danger estimation and mapping, the role of remote sensing data'. (Ed. E Chuvieco) (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.: Singapore)

- Djamali, M., de Beaulieu, J. L., Campagne, P., Andrieu-Ponel, V., Ponel, P., Leroy, SAG, Akhani, H., (2009) "Modern pollen rain–vegetation relationships along a forest–steppe transect in the Golestan National Park, NE Iran", Review of Palaeobotany and Palynology, Vol. 153, pp.272–281.

- FAO., (2005) "Global Forest Resources Assessment", Progress to wards Sustainable Forest Management, 350 pp.

- Forestry Canada Fire Danger Group. (1992). "Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System", For. Can. Inf. Rep. ST-X-3, Ottawa.

- Gu, F., Hu, X., Ntaimo, L., (2008) "Towards validation of DEVS-FIRE wildfire simulation model", Proc. High Performance Computing and Simulation Symposium (HPCS08), part of SpringSim08, 2008.

- H., (1998) "Plant biodiversity of Golestan National Park, Iran", Stapfia, Vol. 53, pp. 1–411.

- Isukapalli, S. S., (1999) "Uncertainty analysis of transport-transformation models". (Rutgers University, Newark: NJ)

- Jolly, W. M., (2007) "Sensitivity of a surface fire spread model and associated fire behaviour fuel models to changes in live fuel moisture", International Journal of Wildland Fire, Vol. 16, pp. 503–509.

- Jose, R. S., Perez, J. L., Gonzalez-Barras, R. M., Pecci, J., Palacios, M., (2014) "Sensitivity analysis of a FMC model for improving forecasting forest fires: Comparison with real fires in Spain", Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, EGU2014-4178, 2014

F., (2011) “Wildland fire behaviour case studies and fuel models for landscape-scale fire modeling”, Journal of Combustion, Vol. 2011: Article ID 613424. 12 p.

- Taylor, S. W., Woolford, D. G., Dean, C. B., Martell, D. L., (2013) “Wildfire prediction to inform fire management: statistical science shallenges”, Statistical Science, Vol. 28, No. 4, pp. 586–615.

- Scott, J. H., Burgan, R., (2005) “Standard fire behavior fuel models: A comprehensive set for use with Rothermel’s Surface Fire Spread Model”, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, RMRS-GTR-153. (Fort Collins, CO).

- Sullivan, A., (2009) “Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasiempirical models”, International Journal of Wildland Fire, Vol. 18, pp.369-386.

- Sun, L., Zhou, X., Mahalingam, S., Weise, D. R., (2006) “Comparison of burning characteristics of live and dead Chaparral fuels”, Combustion and Flame, Vol. 144, pp. 349-359.

- Varasteh Moradi, H., (2005) “Determination of sex ratio and age groups in two species Cervus elaphus and Capreolus capreolus in Golestan National Park”, Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources, Vol. 12, No. 4, pp. 154-161.

- Vega, J. A., Cuinas, P., Fontrubel, T., Perez-Gorostiaga, P., Fernandez, C., (1998) “Predicting fire behvaior in Galicia (NW Spain) shrubland fuel complexes”, In: Viegas DX, editor. Proceedings of the Third International Conference on Forest Fire Research, Luso, Portugal: University of Coimbra; 1998. pp. 713-28.

- Viegas, D. X., Ribeiro, P. R., Maricato, L., (1998) “An empirical model for the spread of a fireline inclined in relation to the slope gradient or to wind direction”, in: Viegas DX, editor. Proceeding of the Third International Conference on Forest Fire Research, vol. 2718. Coimbra, Portugal: University of Coimbra; 1998. pp. 325-42.

- Luke, R. H., McArthur, A. G., (1978) “Bushfires in Australia”, Australian Government Publishing Service, Canberra, ACT.

- Marshall, P. L., Davis, G., LeMay, V. M., (2000) “Using line intersect sampling for coarse woody debris”, Tecnical Report TR-003, Research Section, Vancouver Forest Region, British Columbia Ministry of Forests. 37 p.

- Marshall, P. L., Davis, G., Taylor, S., (2003) “Using line intersect sampling for coarse woody debris: Practitioner’s questions addressed”, Ministry of Forests. -Vancouver Forest Region Extension Note EN-012. 10 pp.

- Matthews, S., Sullivan, A. L., Watson, P., Williams, R.J., (2012) “Climate change, fuel and fire behaviour in a eucalypt forest”, Global Change Biology, Vol. 18, No. 10, pp. 3212-3223.

- McRae, G. J., Tilden, J. W., Seinfeld, J. H., (1982) “Global sensitivity analysis – a computational implementation of the Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST)”, Computers & Chemical Engineering, Vol. 6, pp. 15–25.

- Morandini, F., Santoni, P., Balbi, J., (2001) “The contribution of radiant heat transfer to laboratory-scale fire spread under the influences of wind and slope”, Fire Safety Journal, Vol. 36, No. 6, pp. 519-543.

- Rothermel, R. C., (1972) “A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels” , USDA Forest Service Research Paper, INT-115. (Intermountain Forest and Range Experiment Station: Ogden, UT)

- Russell, S., (2005) “Fuel Loading, Fuel Moisture Are Important Components of Prescribed Fire” , Rangelands, Vol. 27, No. 5, 20 pp.

- Salis, M., (2008) “Fire Behavior simulation in Mediterranean Maquis using FARSITE (Fire Area Simulator)”, PhD Doctoral Thesis, Universita' Degli Studi Di Sassari. 166 pp.

- Santoni, P. A., Filippi, J. B., Balbi, J. H., Bosseur,