مسئله‌ی بهینه سازی یکپارچه‌ی مکانیابی و استقرار چند دوره‌ای برای اصلاح پیش‌گیرانه‌ی پوشش گیاهی و استقرار منابع مهار آتش

اشکان تیموری[a]، مهدی بشیری[a]

[a] دانشگاه شاهد، تهران

نویسنده مسئول: مهدی بشیری (bashiri@shahed.ac.ir)

چکیده

آتش‌سوزی‌های طبیعی یکی از سوانح مربوط به جنگل‌ها، با عوامل ایجاد کننده‌ی غیر انسانی هستند که افزایش تراکم گیاهان قابل اشتعال، از دلایل رشد این آتش‌سوزی‌ها است. دو رویکرد مهم جهت جلوگیری از این اتفاق، عملیات اصلاح گیاهان و عملیات استقرار تجهیزات مهار حریق است. در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی مختلط مبتنی بر پوشش در مسئله‌ی مکان‌یابی و تخصیص ارائه شده است که عملیات کاهش حجم پوشش گیاهی یک منطقه‌ی جنگلی در چند دوره‌ی زمانی، به همراه تعیین استقرار منابع مهار آتش و اعزام آتش‌نشان در دوره‌ی آخر را دنبال می کند. جهت اصلاح پوشش گیاهی و استقرار منابع، یکی از مناطق جنگلی شمال ایران بررسی و با فرض تفاوت رشد گونه‌های گیاهی قسمت‌های مختلف، منطقه به نقاط شبکه‌ای مجزا و گسسته، تفکیک شده‌است. نتایج حاصل از حل مدل نشان دهنده‌ی افزایش پوشش حجم گیاهان و کاهش ریسک آتش‌سوزی است.

کلمات کلیدی: مسئله‌ی مکان یابی پوشش؛ برنامه‌ریزی مختلط؛ آتش‌سوزی‌های طبیعی؛ اصلاح گیاهان؛ مهار حریق

۱. مقدمه

سوانح و بلایای طبیعی مانند زلزله، خشک‌سالی، آتش‌سوزی‌های طبیعی، سیل و طوفان از گذشته‌های دور، یکی از اجزای جدایی‌ناپذیر زندگی بشر بوده‌اند. در این میان، آتش یکی از اجزای غیرقابل انکار در اکوسیستم‌های جنگلی است که می‌تواند تهدیدی جدی برای جان انسان‌ها، منابع طبیعی، محیط زیست و دارایی‌ها، به‌حساب آید[1]. در ایران نیز، هر سال، شاهد آتش‌سوزی‌های کوچک و بزرگ زیادی، بخصوص در جنگل‌های شمال و غرب کشور هستیم، که هم دلایل طبیعی و هم دلایل انسانی، دارند. تغییر در آب‌وهوای کره زمین و افزایش دمایی که در سال‌های گذشته به وجود آمده است، تعداد و شدت این آتش‌سوزی‌های طبیعی را افزایش داده است و به دنبال این مسئله، فعالیت‌های مراکز اطفاء حریق و آتش‌نشانی‌ها، به‌طور قابل توجهی، رشد کرده است. افزایش ارتفاع و تراکم گیاهان قابل اشتعال، در یک پوشش جنگلی، یکی از عمده‌ترین دلایل افزایش نرخ شروع و پیشروی آتش‌سوزی‌های طبیعی، در مناطق مختلف است. اقدامات مراکز آتش‌نشانی و یگان‌های حفاظت از محیط زیست، از لحاظ زمان واکنش، در سه فاز طبقه‌بندی می‌شوند: ۱) اقدامات پیش از آتش‌سوزی، شامل پیش‌بینی، پیشگیری و تأمین تجهیزات ضروری، ۲) اقدامات حین آتش‌سوزی، شامل ارسال آتش‌نشان‌ها، نجات انسان‌ها و منابع و دارایی‌ها، مهار آتش و جلوگیری از گسترش آن. ۳)اقدامات پس از آتش‌سوزی، شامل بازبینی محل حادثه جهت حداکثر سازی عملیات نجات، پاک‌سازی محل از پسماندهای خطرناک، برآورد آسیب‌ها و خسارات ناشی از آتش‌سوزی. مدیریت آتش‌سوزی‌های طبیعی شامل ترکیبی از فعالیت‌ها و پروسه‌های پیچیده مانند اصلاح پوشش گیاهی[a]، پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی، شناسایی محل دقیق آتش، جلوگیری از گسترش آتش و استقرار تجهیزات مهار حریق[b] است[2]. از آن‌جایی که همواره پیشگیری از وقوع آتش‌سوزی و اندیشیدن تمهیداتی جهت جلوگیری از گسترش آن، بسیار مفیدتر از مهار آن پس از رشد و عملیات پس از وقوع آتش‌سوزی است، در نتیجه از میان موارد فوق‌الذکر، انجام عملیاتی مانند اصلاح پوشش گیاهی و کاهش حجم گیاهان قابل اشتعال، دارای اهمیت ویژه و اولویت بالاتری، نسبت به سایر فعالیت‌ها، می‌باشد. اصلاح پوشش گیاهی، به عملیات تغییر حجم و ساختار گیاهان قابل اشتعال یک ناحیه‌ی جنگلی، گفته می‌شود که می‌تواند به یکی از دو شکل زیر، یا ترکیبی از این دو، صورت گیرد: سوزاندن عامدانه‌ی علف‌های هرز و گیاهان خشک و قابل اشتعال، کوتاه کردن و هرس کردن و کاهش حجم گیاهان مستعد آتش‌سوزی[3] . هدف تمامی اقدامات پیش‌گیرانه، کاهش وقوع، کاهش شدت و سرعت در شناسایی آتش‌سوزی است[4]. به‌طور کلی

---

[۱] *Fuel treatment*
[۲] *Suppression preparedness*

مسائل پوشش[۱] با توجه به نوع تابع هدف و ماهیت داده‌های مسئله به چند دسته تقسیم می‌شوند: مسائل پوشش کلی[۲]، مسائل پوشش جزئی[۳]، مسائل پوشش دارای پشتیبان[۴]، مسائل پوشش فازی[۵]. مسئله‌ی عنوان شده در این مقاله، از نوع مسائل پوشش جزئی در حوزه‌ی مکان‌یابی و تخصیص، است، چراکه هدف مدل بیشینه کردن پوشش نقاط مختلف جنگل در هنگام آتش‌سوزی، با توجه به بودجه‌های تعیین‌شده است. پس همان‌طور که گفته شد از قبل می‌دانیم، به صفر رساندن میزان خسارات (با بودجه محدود)، امری ناممکن است. هدف این مطالعه، رسیدن به تصمیمات بهینه در عملیات چند دوره‌ای اصلاح پوشش گیاهی، استقرار و تخصیص منابع مهار آتش در دوره‌ی آخر با در نظر گرفتن بودجه‌ی تعیین شده است. منطقه‌ی "نوسکستان" واقع در استان گلستان به‌عنوان منطقه‌ی مدنظر برای مطالعه‌ی موردی، بررسی شده است و با فرض تفاوت رشد گونه‌های گیاهی قسمت‌های مختلف، منطقه به نقاط شبکه‌ای مجزا و گسسته، جهت تصمیم‌گیری برای اصلاح پوشش گیاهی و استقرار منابع، تفکیک شده است. این مقاله در ادامه به‌صورت زیر، سازمان‌دهی شده است: قسمت دو، مرور ادبیات و بررسی مطالعات پیشین است، در قسمت سه به تعریف مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرها و مدل‌سازی مسئله پرداخته خواهد شد. در قسمت چهار، یک مطالعه‌ی موردی در منطقه‌ای از جنگل‌های شمال ایران ارائه می‌شود، در قسمت پنج به حل مسئله پرداخته می‌شود، قسمت شش به تحلیل حساسیت‌ها و بررسی‌های عددی اختصاص داده شده است و در قسمت هفت نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای مطالعات آتی ارائه می‌گردد.

۲. مرور ادبیات

تحقیقات انجام‌شده در رابطه با مسائل پیش‌گیری از آتش‌سوزی را در چهار زمینه می‌توان دسته‌بندی کرد: ۱) پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی و انجام عملیات پیشگیری که اصلاح گیاهان یکی از این عملیات محسوب می‌شود، ۲) حفاظت از دارایی‌ها، ۳) عملیات امداد و نجات و ۴) جلوگیری از گسترش و پیشروی آتش‌سوزی. در این خصوص هوف و همکاران[5] یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای کاهش سرعت رسیدن یک آتش پیش‌رونده، به مناطق با پتانسیل بالا، ارائه کرده‌اند. رین‌هارت و همکاران[6] یک مدل برنامه‌ریزی مختلط پیشنهاد کرده‌اند که هدف آن یافتن بهترین نقاط جهت اجرای عملیات پیش‌گیرانه اصلاح پوشش گیاهی و کنترل آتش‌سوزی‌های آینده است. وی و همکاران[7] در مقاله‌ی خود اجرای عملیات اصلاح پوشش گیاهی را با توجه به پتانسیل هر ناحیه برای شروع یک آتش‌سوزی و با توجه به پارامتر زمان انتشار آتش، فرموله نموده‌اند. مدل برنامه‌ریزی مختلط یکپارچه، برای پیدا کردن نقاط بهینه، جهت اجرای عملیات پیش‌گیرانه‌ی اصلاح پوشش گیاهی و اعزام تجهیزات و آتش‌نشان‌ها، در مقاله‌ی میناس و همکاران[8] ارائه‌شده است. میناس و همکاران [4] یک مدل بهینه‌سازی چند دوره‌ای، برای انجام عملیات پیش‌گیرانه‌ی اصلاح پوشش گیاهی، برای کاهش تأثیرات آتش‌سوزی‌های جنگلی ارائه داده‌اند. همچنین مدلی که دارای دو تابع هدف، جهت بیشینه کردن نجات افراد پس از وقوع آتش‌سوزی و کمینه کردن هزینه‌های استفاده از وسایل نقلیه‌ی نجات است توسط شهپروری و همکاران[9] پیشنهاد شده است. میناس و همکاران[10] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای بیشینه کردن جمع‌آوری چوب‌ها و پسماند گیاهانی در نواحی با پوشش‌های گیاهی متفاوت، توسط آتش‌سوزی‌های عامدانه را ارائه داده‌اند. مرکر و همکاران[11] به بررسی نقطه‌ی تعادلی بین فعالیت‌های پیشگیری و اقدام علیه گسترش آتش، با خرابی‌ها و خسارات ناشی از آتش‌سوزی پیش‌رونده پرداخته‌اند و تأثیر هریک از اقدامات را بر رفتار آتش تحلیل نموده‌اند. در این مطالعه به ایده‌ی ارائه‌ی مدل چند دوره‌ای اصلاح پوشش گیاهی برای عملیات پیشگیری از گسترش آتش‌سوزی پرداخته‌شده است. علی‌رغم اهمیت زیاد اقدامات پیش‌گیرانه‌ی اصلاح پوشش گیاهی، نباید از نقش به سزای سایر فعالیت‌های مراکز اطفاء حریق، نظیر استقرار و تخصیص تجهیزات مهار آتش، غفلت کرد. درواقع عملیات پیش‌گیرانه اصلاح پوشش گیاهی و عملیات استقرار تجهیزات و کیوسک‌های آتش‌نشان‌ها برای مهار آتش، دو روی یک سکه و در تعامل با یکدیگرند، پس نمی‌توان به‌صورت مجزا به هر یک نگاه کرد. با ادغام رویکرد چند دوره‌ای با تصمیم‌گیری در مورد عملیات اصلاح پوشش گیاهی و تخصیص تجهیزات مهار آتش، می‌توان بهترین تصمیم در این خصوص را به دست آورد. از این رو در مقاله‌ی حاضر، با در نظر گرفتن خلأ تحقیقاتی موجود، یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه‌ی چند دوره‌ای، برای اقدامات پیش‌گیرانه‌ی اصلاح پوشش گیاهی و استقرار منابع مهار آتش ارائه می‌شود.

---

۱ *Covering Location Problem*
۲ *Set Covering Location Problem*
۳ *Partial CLP*
۴ *Back up CLP*
۵ *Fuzzy CLP*

۳. مدل‌سازی مسئله

برای فرموله کردن مدل مد نظر این مقاله، ابتدا مفروضاتی را در نظر می‌گیریم، مفروضات عبارت‌اند از: مناطق مورد بررسی و جنگل‌ها به‌صورت سلول‌های هم‌اندازه و یک‌شکل مربعی، در نظر گرفته شده است. منابع مهار آتش، به منابعی که برای جلوگیری از پیشروی آتش‌سوزی به آن‌ها نیاز داریم، اطلاق می‌شود و می‌تواند شامل تعداد آتش‌نشان‌ها، تعداد کپسول‌ها و تانکرهای آتش خاموش‌کن، یا در مقیاس‌های بزرگ، تعداد مجموعه‌ی کاملی از موارد ذکر شده به‌طور یکجا باشد. در مجموعه‌ی سلول‌هایی که جز همسایگی یک سلول می‌باشند خود سلول مورد نظر نیز سلول همسایه (با شعاع همسایگی صفر) محسوب می‌شود.

۱،۳. مجموعه‌ها و اندیس‌های مسئله

i اندیس شماره‌ی سلول‌ها (مجموعه‌ی نقاط مستعد آتش‌سوزی، که مکان آن‌ها کاندید اجرای عملیات اصلاح پوشش گیاهی هستند)؛ j اندیس شماره‌ی سلول‌ها (مجموعه‌ی مکان‌هایی که قابلیت استقرار منابع مهار آتش و فعالیت آتش‌نشان‌ها را دارا می‌باشند)؛ t اندیس شماره‌ی دوره‌ها؛ زیرمجموعه‌ای از T، که اندیس دوره‌ی آخر انجام عملیات اصلاح پوشش گیاهی است.

۲،۳. پارامترهای مسئله

در صورتی که سلول j ام، در همسایگی با شعاع صفر و یا یک سلول، از سلول i ام، قرار گیرد، $a_{ij}=1$ و در غیر این صورت $a_{ij}=0$ ؛ در صورتی که سلول j ام، در همسایگی با شعاع صفر و یا یک و یا دو سلول، از سلول i ام، قرار گیرد، $b_{ij}=1$ و در غیر این صورت $b_{ij}=0$ ؛ wl_i میانگین ارتفاع گیاهان سلول i ام در دوره‌ی اول؛ pr میزان کاهش ارتفاع گیاهان یک سلول، به ازای انجام یک‌بار عملیات اصلاح پوشش گیاهی در یک دوره؛ c_{ij} هزینه لازم برای مستقر کردن و استفاده از هر یک از آتش‌نشان‌ها، در سلول j ام؛ $cy_{i,t}$ هزینه‌ی لازم برای اجرای عملیات اصلاح گیاهان برای سلول i ام، در دوره‌ی t ام؛ bt کل بودجه‌ی در اختیار، برای استفاده از آتش‌نشان‌ها و استقرار تجهیزات آن‌ها جهت مهار آتش؛ by_t کل بودجه‌ی در اختیار، برای انجام عملیات اصلاح پوشش گیاهی، در دوره‌ی t ام؛ ru_i تعداد آتش‌نشان‌های موردنیاز برای مهار آتش‌سوزی در سلول i ام،که در این سلول، در هیچ دوره‌ای از قبل عملیات اصلاح پوشش گیاهی انجام نگرفته است؛ ry_i تعداد آتش‌نشان‌های مورد نیاز برای مهار آتش‌سوزی در سلول i ام، که در این سلول حداقل در یکی از دوره‌ها عملیات پیشگیری اصلاح پوشش گیاهی انجام گرفته است؛ m حداکثر تعداد آتش‌نشانی که امکان استقرار در یک سلول را دارند.

۳،۳. متغیرهای تصمیم مسئله

$W_{i,t}$ میانگین ارتفاع گیاهان سلول i ام، در t ام؛ X_j تعداد آتش‌نشان‌هایی که در سلول j ام، مستقر می‌شوند؛ $Y_{i,t}$ متغیر تصمیم صفر و یک که نشان می‌دهد در سلول i ام، در دوره‌ی t ام، عملیات اصلاح پوشش گیاهی صورت می‌گیرد یا خیر؛ Z_i متغیر تصمیم صفر و یک که نشان می‌دهد آیا سلول i ام ، قابل پوشش و مهار توسط آتش‌نشان‌ها است، یا خیر؛ ZU_i متغیر تصمیم صفر و یک که نشان می‌دهد آیا سلول i ام، که جز سلول‌هایی است که از قبل عملیات پیشگیری اصلاح پوشش گیاهی در هیچ دوره‌ای، در آن انجام گرفته است، قابل پوشش و مهار توسط آتش‌نشان‌ها می‌باشد، یا خیر؛ ZY_i متغیر تصمیم صفر و یک که نشان می‌دهد آیا سلول i ام که جز سلول‌هایی است که حداقل در یکی از دوره‌های قبلی، عملیات پیشگیری اصلاح پوشش گیاهی در آن انجام گرفته است، قابل پوشش و مهار توسط آتش‌نشان‌ها است، یا خیر؛ O_i متغیر تصمیم صفر و یک که نشان می‌دهد آیا سلول i ام، حداقل در یک دوره تحت عملیات اصلاح پوشش گیاهی، قرار گرفته است، یا خیر؛ Q_i متغیر تصمیمی که حاصل‌ضرب دو متغیر $W_{i,tp}$ و Z_t، در یکدیگر است و نشان دهنده‌ی این است که چه میزان از پوشش گیاهی سلول i ام، در دوره‌ی آخر، قابل پوشش و مهار توسط آتش‌نشان‌ها است (برای خطی سازی مدل، تعریف شده‌است)؛ $L_{i,j}$ متغیر تصمیم حاصل‌ضرب دو متغیر X_j و Y_i در یکدیگر است که برای خطی سازی مدل استفاده شده است.

۴،۳. مدل یکپارچه‌ی چند دوره‌ای اصلاح پوشش گیاهی و استقرار منابع مهار آتش

$$\max Ft = \sum_{i\in I} Q_i \quad \max Ft = \sum_{i\in I} Q_i \tag{۱}$$

Subject to:

$$\sum_J (L_{i,j} * b_{i,j}) \geq ry_i * ZY_i \qquad \forall i \in I \tag{۲}$$

$$\sum_J (X_j * a_{i,j} - L_{i,j} * a_{i,j}) \geq ru_i * ZU_i \qquad \forall i \in I \tag{۳}$$

$$ZY_i \leq O_i \qquad \forall i \in I \tag{۴}$$

$$Z_i \leq ZU_i + ZY_i \qquad \forall i \in I \tag{۵}$$

$$\sum_{J} cx_{j} * X_{j} \le bx \qquad (۶)$$

$$\sum_{I} cy_{i,t} * Y_{i,t} \le by_{t} \qquad t \in T \qquad (۷)$$

$$X_{j} \le m \qquad \forall j \in J \qquad (۸)$$

$$W_{i,t} = w1_{i} + t - pr * (\sum_{T} Y_{i,t}) \qquad \forall i \in I \quad , \quad t \in T \qquad (۹)$$

$$L_{i,j} \le X_{J} \qquad \forall i \in I \quad , \quad \forall j \in J \qquad (۱۰)$$

$$L_{i,j} \le M * O_{i} \qquad \forall i \in I \quad , \quad \forall j \in J \qquad (۱۱)$$

$$L_{i,j} \ge X_{j} - M * (1 - O_{i}) \qquad \forall i \in I \quad , \quad \forall j \in J \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{T} Y_{i,t} \le M * O_{i} \qquad \forall i \in I \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{T} Y_{i,t} \le O_{i} / M \qquad \forall i \in I \qquad (۱۴)$$

$$Q_{i} \le M * Z_{i} \qquad \forall i \in I \qquad (۱۵)$$

$$Q_{i} \le W_{i,tp} \qquad \forall i \in I \quad , \quad \forall tp \in T \qquad (۱۶)$$

$$Q_{i} \ge W_{i,tp} - M(1 - Z_{i}) \qquad \forall i \in I \quad , \quad \forall tp \in T \qquad (۱۷)$$

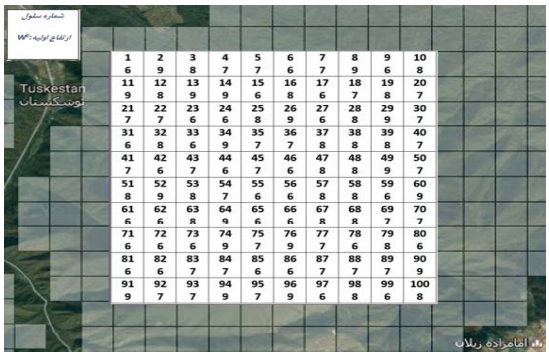
$$Y_{i,t}, Z_{i}, ZY_{i}, ZU_{i} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in I \quad t \in T \qquad (۱۸)$$

$$X_{j} \in INT \; , \; L_{i,j} \in INT \; , \; W_{i,t} \ge 0 \; , \; Q_{i} \ge 0 \qquad \forall j \in J \quad , \forall j \in J \quad , t \in T \qquad (۱۹)$$

تابع هدف مدل فوق (۱) مجموع حجم (ارتفاع) گیاهانی را که قابلیت پوشش توسط آتش‌نشان‌ها و امکان مهار آتش‌سوزی آن‌ها، وجود دارد، ماکسیمم می‌کند. محدودیت (۲) بیان می‌کند که اگر مجموع آتش‌نشان‌هایی که از سلول‌های همسایگی سلول مورد نظر، به مهار آتش‌سوزی می‌پردازند، از تعداد آتش‌نشان‌هایی که سلول مورد نظر نیاز دارد، بزرگ‌تر و یا مساوی باشند، این سلول تحت پوشش است. محدودیت (۳) همان شرط محدودیت قبل را برای سلول‌هایی که در هیچ دوره‌ای عملیات اصلاح پوشش گیاهی روی آن‌ها صورت نگرفته است بیان می‌کند. محدودیت (۴) تضمین می‌کند سلول‌هایی که به‌عنوان سلول‌های تحت اصلاح، شرایط پوشش یا عدم پوششان بررسی می‌شود، حتماً حداقل یک بار در یکی از دوره‌ها تحت عملیات اصلاح پوشش گیاهی، قرار گرفته است. محدودیت (۵) نشان می‌دهد که سلول پوشش داده شده یا جز سلول‌هایی است که تحت عملیات پیش‌گیرانه‌ی اصلاح پوشش گیاهی نبوده و پوشش داده‌شده است، و یا جز سلول‌هایی است که تحت عملیات پیش‌گیرانه‌ی اصلاح پوشش گیاهی بوده و پوشش داده شده‌است. محدودیت‌های (۶) و (۷) محدودیت‌های بودجه‌ای مدل که مجموع هزینه‌های استقرار منابع مهار آتش (اعزام آتش‌نشان‌ها) و مجموع هزینه‌های انجام عملیات پیش‌گیرانه‌ی اصلاح پوشش گیاهی در هر دوره هستند. محدودیت (۸) برای تعداد آتش‌نشان‌ها و محدودیت (۹) برای میزان ارتفاع پوشش گیاهی هر یک از سلول‌ها در نظر گرفته شده‌اند. محدودیت‌های (۱۰) تا (۱۲)، به‌منظور خطی سازی در مدل مسئله به‌کار برده شده‌اند. محدودیت‌های (۱۳) و (۱۴) تضمین می‌کنند که اگر سلول iام، حداقل یک بار در یکی از دوره‌ها، تحت عملیات اصلاح پوشش گیاهی قرار گرفته باشد، متغیر تصمیم O_i آن برابر با یک، و در غیر این صورت، مقدار صفر بگیرد. محدودیت‌های (۱۵) تا (۱۷) برای خطی سازی مدل و تعریف متغیر تصمیمQ_i، به کار برده شده‌اند و محدودیت(۱۸) و (۱۹) نوع متغیرهای تصمیم به کار رفته در مدل را نشان می‌دهند.

۴. مطالعه‌ی موردی

کشور ایران در نواحی شمالی و غربی دارای پوشش گیاهی جنگلی است و به دلیل آب‌وهوای گرم و خشک در بسیاری از مناطق شمال شرق و جنوب غربی آن، هر سال شاهد آتش‌سوزی‌های طبیعی متعددی در این مناطق هستیم. افزایش دما در طی سال‌های اخیر، به‌ویژه در نیمه‌ی نخست سال، سبب رشد چشم‌گیر وقوع این آتش‌سوزی‌ها شده است، به طوری‌که پس از آتش‌سوزی‌های ادامه‌دار در اردیبهشت و خردادماه سال نود و شش، بیش از پنج هکتار از جنگل‌ها و مراتع



(ب)

(الف)

شکل ۱. الف- نقشه‌ی هوایی جنگل کبودول منطقه‌ی توسکستان استان گلستان. ب- انتخاب ۱۰۰ سلول و متمایز کردن آن‌ها، به‌عنوان نقاط مورد مطالعه از جنگل کبودول و ذکر ارتفاع اولیه گیاهان هر یک از سلول ها در دوره t=0

باشت[1]، واقع در گچساران استان کهکیلویه و بویراحمد، طعمه‌ی حریق شد. همچنین در اردیبهشت ماه سال نود و شش، آتش‌سوزی جنگل‌های هردریژ[2] استان ایلام، به حدی شدید بود که بخش‌داری منطقه از مردم عادی، برای اطفای حریق، درخواست کمک کرد. همان‌طور که در قسمت مقدمه اشاره شد، مطالعه‌ی موردی این مقاله، یکی از جنگل‌های شمال شرقی ایران، به نام جنگل کبودول، واقع در منطقه‌ی توسکستان استان گلستان است. همان‌طور که در شکل ۱.الف مشاهده می‌شود، این جنگل در جنوب سد کوثر، و در جنوب غربی گرگان، واقع شده است. در شکل ۱.ب منطقه‌ی توسکستان و عمده‌ی پوشش گیاهی کبودول در قسمت سمت راست نقشه، مشخص می‌باشد. هر کدام از تقسیمات مربعی، نشان‌دهنده‌ی یک سلول می‌باشند، که هر سلول می‌تواند از لحاظ میزان ارتفاع پوشش گیاهی اولیه، آب موجود در خاک و سایر عوامل مؤثر برای رشد گیاهان، و شرایطی نظیر محدودیت‌های اصلاح گیاهان، ارزشمندی نوع پوشش و استقرار منابع مهار حریق و فعالیت آتش‌نشان‌ها، با سایر سلول‌ها متفاوت باشد. در شکل ۱.ب، برای پیاده‌سازی مدل و حل مسئله‌ی بهینه‌سازی یکپارچه‌ی چند دوره‌ای برای اصلاح پیش‌گیرانه‌ی پوشش گیاهی و استقرار منابع مهار آتش، یک قسمت از مرکز جنگل کبودول، شامل صد سلول، انتخاب شده است. این نقاط برای اجرای مدل و اعتبارسنجی و بررسی نتایج و تحلیل حساسیت‌ها، برگزیده و با رنگ متمایز، به صورت یک زمین ده در ده، نسبت به سایر نقاط جنگل، مشخص شده‌اند.

۵. حل مسئله

اطلاعات مربوط به پارامترهای مدل و داده‌هایی که به‌صورت اولیه و فرضی برای اعتبارسنجی و حل مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در جدول ۱، بیان شده است.

جدول ۱. مقدار پارامترهای مدل

مقدار	پارامتر
۱۰۰سلول(به‌صورت ۱۰در۱۰)	I, i: مجموعه‌ی نقاط مستعد آتش‌سوزی، که مکان آن‌ها کاندید اجرای عملیات اصلاح پوشش گیاهی هستند
مرتبط با همان مجموعه‌ی ۱۰۰سلول i	J, j: مجموعه‌ی مکان‌هایی که قابلیت استقرار منابع مهار آتش و فعالیت آتش‌نشان‌ها را دارا می‌باشند
۴دوره	T, t : تعداد دوره‌ها
دوره‌ی۴ام	tp: دوره‌ای که در آن عملیات ارسال آتش‌نشان‌ها رخ می‌دهد(آخرین دوره)
سلول‌هایی با فاصله‌ی کوچک‌تر، مساوی ۱ از سلول مورد نظر	$a_{i,j}$: همسایگی برای سلول‌هایی که در هیچ دوره‌ای تحت عملیات پیش‌گیرانه اصلاح پوشش گیاهی قرار نگرفته‌اند
سلول‌هایی با فاصله‌ی کوچک‌تر، مساوی ۲ از سلول مورد نظر	$b_{i,j}$: همسایگی برای سلول‌هایی که حداقل یک‌بار تحت عملیات پیش‌گیرانه اصلاح پوشش گیاهی قرار گرفته‌اند

[1] *Basht*
[2] *Harderij*

عدد صحیح تصادفی بین ۶تا۹ (تابع توزیع یکنواخت صحیح) در مقیاس ارتفاع

عدد صحیح و ثابت ۳ واحد، برای کاهش ارتفاع به ازای هر عملیات اصلاح پوشش گیاهی

۴۰۰۰۰ واحد پولی

۵۰۰۰ واحد پولی

۱۰۰۰۰۰۰ واحد پولی

۵۰۰۰۰ واحد پولی

عدد صحیح تصادفی بین ۲تا۶ (تابع توزیع یکنواخت صحیح) آتش‌نشان

۲ آتش‌نشان

۲۵ آتش‌نشان

wl_i : میانگین ارتفاع گیاهان سلول‌ها، در دوره‌ی اول

pr : میزان کاهش ارتفاع گیاهان یک سلول، به ازای انجام یک‌بار عملیات اصلاح پوشش گیاهی در یک دوره

cx_j : هزینه لازم برای مستقر کردن و استفاده از هر یک از آتش‌نشان‌ها

$cy_{i,t}$: هزینه‌ی لازم برای اجرای عملیات اصلاح گیاهان برای سلول i ام، در دوره‌ی tام؛

bx : کل بودجه‌ی در اختیار، برای استفاده از آتش‌نشان‌ها و استقرار تجهیزات آن‌ها جهت مهار آتش

by_t : کل بودجه‌ی در اختیار، برای انجام عملیات اصلاح پوشش گیاهی، در دوره‌ی t ام

ru_i : تعداد آتش‌نشان‌های مورد نیاز برای مهار آتش‌سوزی در سلول i ام،که در این سلول، در هیچ دوره‌ای، از قبل عملیات اصلاح پوشش گیاهی انجام گرفته است

ry_i : تعداد آتش‌نشان‌های مورد نیاز برای مهار آتش‌سوزی در سلول i ام، که در این سلول، حداقل در یکی از دوره‌ها، عملیات پیشگیری اصلاح پوشش گیاهی، انجام گرفته است

m : حداکثر تعداد آتش‌نشانی که امکان استقرار در یک سلول را دارند

همانطورکه در بخش چهارم، در شکل۱.ب ملاحظه شد، سلول‌ها شماره‌گذاری شده و میزان ارتفاع پوشش گیاهی هر سلول در دوره‌ی t=0 مشخص است. تصمیم اصلاح کردن بر اساس ملاحظاتی چون ارتفاع اولیه و حجم قابل اشتعال پس از رشد، در این قسمت بررسی خواهد شد.

شماره سلول
تعداد آتشنشان مورد نیاز:r
ارتفاع پس از 4 دوره:W
I, II, III , IV : شماره‌ی دوره‌ی اصلاح شده

1 2 10	2 2 13	3 4 12	4 4 11	5 2 (III) 8	6 3 10	7 3 11	8 3 13	9 2 10	10 2 (IV) 9
11 2 (II) 10	12 2 12	13 3 13	14 3 13	15 3 10	16 2(IV) 9	17 2 10	18 3 11	19 2 12	20 2 (II) 8
21 2 11	22 3 11	23 3 10	24 2 10	25 2 12	26 4 13	27 2 (I) 7	28 2 12	29 2 (III) 10	30 2 (IV) 8
31 2 (I) 7	32 2 (II) 9	33 2 (II) 7	34 2 (III) 10	35 2 (IV) 8	36 4 12	37 2 12	38 2 (I) 9	39 2 (I) 9	40 2 (IV) 8
41 2 (IV) 8	42 2 (IV) 7	43 2 (I) 8	44 2 (I) 7	45 2 (II) 8	46 3 10	47 3 12	48 2 12	49 3 13	50 2 (III) 8
51 2 (II) 9	52 2 13	53 2 12	54 4 11	55 2 10	56 5 10	57 5 12	58 2 12	59 3 10	60 2 (IV) 10
61 2 (III) 7	62 2 (IV) 7	63 2 (III) 9	64 2 13	65 2 10	66 2 10	67 4 12	68 2 12	69 5 11	70 2 12
71 2 (III) 7	72 5 10	73 4 10	74 4 13	75 2 11	76 4 13	77 4 11	78 6 10	79 2 12	80 2 10
81 2 (I) 7	82 2 10	83 2 11	84 2 11	85 2 (III) 7	86 2 (I) 7	87 2 11	88 2 11	89 2 (III) 8	90 3 13
91 2 (II) 10	92 3 11	93 2 (I) 8	94 4 13	95 2 (II) 8	96 2 (II) 9	97 2 (II) 7	98 2 (III) 9	99 2 (I) 7	100 2 (IV) 9

شماره سلول
تعداد fuel treatment ✂
ارتفاع پس از ۱ دوره: W^1

1 7	2 10	3 9	4 8	5 8	6 7	7 8	8 10	9 7	10 9
11 10	12 9	13 10	14 10	15 7	16 9	17 7	18 8	19 9	20 8
21 8	22 8	23 7	24 7	25 9	26 10	27 ✂ 4	28 9	29 10	30 8
31 ✂ 4	32 9	33 7	34 10	35 8	36 8	37 9	38 ✂ 6	39 ✂ 6	40 8
41 8	42 7	43 ✂ 5	44 ✂ 4	45 8	46 7	47 9	48 9	49 10	50 8
51 9	52 10	53 9	54 8	55 7	56 7	57 9	58 9	59 7	60 10
61 7	62 7	63 9	64 10	65 7	66 7	67 9	68 9	69 8	70 9
71 7	72 7	73 7	74 10	75 8	76 10	77 8	78 7	79 9	80 7
81 ✂ 4	82 7	83 8	84 8	85 7	86 ✂ 4	87 8	88 8	89 8	90 10
91 10	92 8	93 ✂ 5	94 10	95 8	96 10	97 7	98 9	99 ✂ 4	100 9

شکل ۲. الف- ارتفاع گیاهان هریک از سلول‌ها در دوره‌ی t=1 (سمت راست)، ب- ارتفاع گیاهان هریک از سلول‌ها در دوره‌ی t=4 (سمت چپ)

همان‌طور که در شکل شماره‌ی ۲.الف نشان داده شده است، در دوره‌ی اول با توجه به رشد گیاهان و عملیات اصلاح پوشش گیاهی، میزان ارتفاع گیاهان در دوره‌ی t=1 مشخص شده است. با گذشت زمان، دوره‌های دوم، سوم و چهارم (که برای اختصار تنها نتایج مربوط به دوره‌ی چهارم آورده شده است) میزان ارتفاع نهایی پوشش گیاهی پس از رشد و اعمال اصلاحات، همین‌طور تعداد آتش‌نشان مورد نیاز هر سلول برای مهار آتش‌سوزی و همچنین شماره‌ی دوره‌ای که

سلول در آن اصلاح شده‌است، در شکل ۲.ب درج شده است.

1 2 10	2 2 13	3 4 12	4 ⛥ 4 11 1	5 2 (III) 8	6 3 10	7 3 11	8 3 13	9 2 10	10 2 (IV) 9
11 2 (II) 10	12 ⛥ 2 12 2	13 ⛥ 3 13 1	14 3 13	15 ⛥ 3 10 2	16 2 (IV) 9	17 ⛥ 2 10 1	18 ⛥ 3 11 2	19 2 12	20 2 (II) 8
21 2 11	22 3 11	23 3 10	24 2 10	25 2 12	26 4 13	27 2 (I) 7	28 2 12	29 2 (III) 10	30 2 (IV) 8
31 2 (I) 7	32 2 (II) 9	33 2 (II) 7	34 2 (III) 10	35 2 (IV) 8	36 4 12	37 2 12	38 2 (I) 9	39 2 (I) 9	40 2 (IV) 8
41 2 (IV) 8	42 2 (IV) 7	43 2 (I) 8	44 2 (I) 7	45 2 (II) 8	46 3 10	47 3 12	48 ⛥ 2 12 2	49 3 13	50 2 (III) 8
51 2 (II) 9	52 2 13	53 2 12	54 4 11	55 2 10	56 5 10	57 5 12	58 ⛥ 2 12 1	59 3 10	60 2 (IV) 10
61 2 (III) 7	62 2 (IV) 7	63 ⛥ 2 (III) 9 2	64 2 13	65 ⛥ 2 10 2	66 2 10	67 ⛥ 4 12 2	68 2 12	69 5 11	70 2 12
71 2 (III) 7	72 5 10	73 4 10	74 4 13	75 2 11	76⛥ 4 13 1	77 4 11	78 ⛥ 6 10 1	79 ⛥ 2 12 2	80 2 10
81 2 (I) 7	82 2 10	83 ⛥ 2 11 3	84 2 11	85 2 (III) 7	86 2 (I) 7	87 2 11	88 2 11	89 2 (III) 8	90 3 13
91 2 (II) 10	92 3 11	93 2 (I) 8	94 4 13	95 2 (II) 8	96 2 (II) 9	97 2 (II) 7	98 2 (III) 9	99 2 (I) 7	100 2 (IV) 9

شماره سلول
تعداد آتشنشان مورد نیاز:r
ارتفاع پس از 4 دوره:W
I, II, III , IV : شماره‌ی دوره‌ی اصلاح شده
سلول پوشش یافته:
سلول سوخته :
آتشنشان‌های مستقر:⛥
عدد آتشنشان‌های مستقر:X

شکل ۳. استقرار آتش‌نشان‌ها و سلول‌های پوشش یافته و سلول‌های سوخته

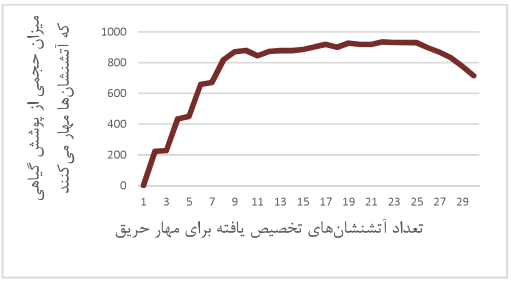
پس از گذشت چهار دوره و اتمام عملیات اصلاح پوشش گیاهی، همان‌طور که در مفروضات مطرح گردید، آتش‌سوزی اتفاق می‌افتد و مدل نقاط بهینه برای استقرار آتش‌نشان‌ها را مشخص می‌کند، طوری که بیشترین مهار آتش ممکن رخ دهد. نتایج به دست آمده از حل مدل فوق، بیانگر پوشش ۹۳۰ واحد از گیاهان جنگل مورد بررسی است که در شکل ۳ قابل ملاحظه است.

۶. تحلیل حساسیت و بررسی‌های عددی

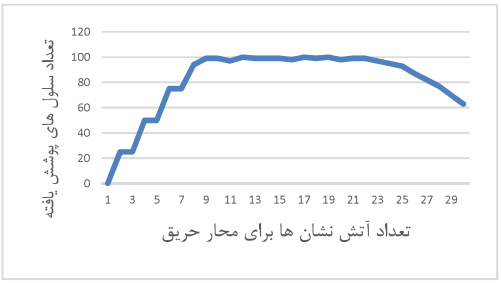
در این قسمت به تحلیل حساسیت‌های مدل پرداخته شده است و در قسمت اول آن، نوآوری‌های مدل نسبت به مقالات پیشین بررسی شده است. در قسمت دوم با اعمال محدودیت‌هایی نظیر احداث پایگاه‌های مهار حریق در خارج از جنگل و همچنین در نظر گرفتن نقاط استراتژیک، اقدام به بررسی صحت مدل شده است.

۱,۶. اهمیت کار این مقاله در مقایسه با مدل کلاسیک

مقدار تابع هدف در صورت ادغام نکردن مدل اصلاح پوشش گیاهی با مدل ارسال آتش‌نشان‌ها و در نظر گرفتن هریک به‌صورت مجزا، از تابع هدف مدل یکپارچه‌ی ادغام‌شده، کم‌تر است که همین امر، ضرورت استفاده از ایده‌ی این مقاله را به خوبی نشان می‌دهد. شکل ۴.الف نمودار تعداد سلول‌های پوشش یافته به ازای تخصیص بودجه‌های مختلف به عملیات اصلاح پوشش گیاهی و تعداد آتش‌نشان‌ها، از بودجه‌ی ثابت کل را نشان می‌دهد که این نمودار مطابقت تقریبی در روندهای ابتدا و انتهایی خود با نمودار تغییرات تابع هدف دارد. همان‌طور که از نمودار شکل ۴.ب مشخص است در سه حالت ارسال دوازده، هفده و نوزده آتش‌نشان، که تابع هدف مقادیر ۸۷۳، ۹۱۸ و ۹۲۷ را داراست، آتش‌سوزی در هر صد سلول مهار شده است در حالی که در حالت بهینه‌ی تخصیص بودجه‌ها که تابع هدفی برابر با ۹۳۵ واحد دارد، و بیست و دو نفر آتش‌نشان اعزام می‌شوند، آتش‌سوزی در هر صد سلول مهار نشده است. نکته‌ی مهم اینجاست که در مواردی که بودجه‌ی ارسال آتش‌نشان‌ها بین نه تا نوزده نفر است، با اینکه تعداد آتش‌نشان‌ها به‌اندازه‌ای افزایش یافته است که بتوانند بین نود و هفت تا صد سلول را پوشش دهند، اما چون همچنان بودجه‌ی اصلاح پوشش گیاهی زیاد است با مهار پوشش هر صد سلول نیز تابع هدف مقداری کمتر از حالت بهینه می‌گیرد.



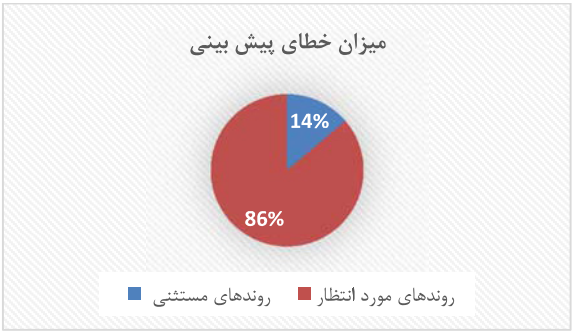
(الف)



(ب)

شکل ۴. الف- نمودار تابع هدف (میزان حجم کل پوشش گیاهی که آتش‌نشان‌ها مهار می‌کنند). ب- نمودار تعداد سلول‌های پوشش یافته به ازای تخصیص بودجه‌های مختلف به عملیات اصلاح پوشش گیاهی و تعداد آتش‌نشان‌ها از بودجه‌ی ثابت کل

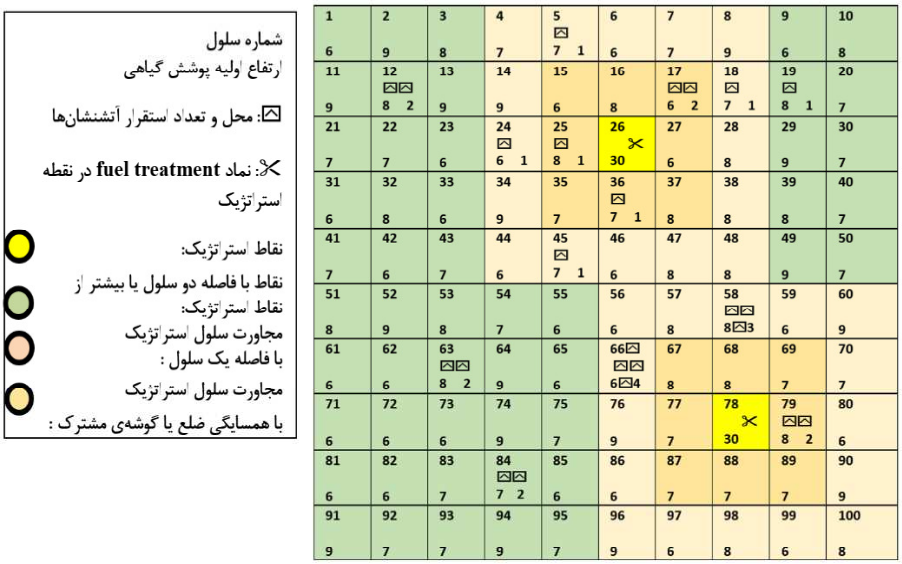
با تغییرات بودجه اختصاص‌یافته به ارسال آتش‌نشان‌ها و تعداد سلول‌های اصلاح شده، مقدار تابع هدف در سی حالت مختلف موجود در شکل۵، ملاحظه می‌شود. بین این سی حالت بیست ونه روند تغییر تابع هدف وجود دارد که از حالت یک تا نقطه بهینه، یعنی تخصیص بیست و دو آتش‌نشان، چهار روند استثنا وجود دارد (۸۸۰ به ۸۴۵ – ۸۷۸ به ۸۷۸ – ۹۱۸ به ۹۰۰ – ۹۲۷ به ۹۲۸) این در حالی است که بعد از نقطه بهینه تا اختصاص سی آتش‌نشان، تمام روندها کاهشی است و هیچ روند استثنایی وجود ندارد. نسبت این چهار حالت به بیست ونه روند موجود، در نمودار دایره‌ای میزان خطای پیش‌بینی در شکل ۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۵. نمودار دایره‌ای بیانگر میزان تطابق تغییرات تابع هدف با روند مورد پیش‌بینی مدل

۲،۶. بررسی صحت مدل‌سازی مسئله

شکل۶ نشان می‌دهد زمانی که دو سلول ۲۶ و ۷۸ (که در حل مسئله‌ی اصلی در هیچ دوره‌ای اصلاح نشده و سرانجام آتش‌سوزی در این دو سلول مهار نشده است) به‌عنوان نقاط استراتژیک در نظر گرفته می‌شوند، هم عملیات اصلاح پوشش گیاهی بر روی آن‌ها صورت می‌گیرد و هم آتش‌سوزی در این دو سلول مهار می‌شود. به این منظور آتش‌نشان‌های مورد نیاز برای مهار در این دو سلول دوازده نفر در نظر گرفته شده است و همان‌طور که در شکل۶ پیداست حجم پوشش گیاهی این دو سلول سی واحد فرض شده است. به این ترتیب از بیست و پنج آتش‌نشان، تعداد هجده آتش‌نشان در این دو سلول و یا همسایگی‌های یک و یا دو فاصله‌ای (به دلیل انجام عملیات اصلاح پوشش گیاهی بر روی این دو سلول)، مستقر شده‌اند و تنها هفت آتش‌نشان در سلول‌های دیگر استقرار یافته‌اند.



شکل ۶. استقرار آتش‌نشان‌ها در اطراف دو نقطه‌ی استراتژیک (سلول ۲۶ و ۷۸) و انجام عملیات اصلاح پوشش گیاهی در آن‌ها

در شکل۷ اجازه‌ی اعزام آتش‌نشان‌ها و استقرار منابع مهار آتش‌سوزی تنها در گوشه‌ی شمال غربی یعنی سلول یک و گوشه‌ی جنوب شرقی یعنی سلول صد، داده‌شده است. به این ترتیب ملاحظه می‌شود در صورت آتش‌سوزی از بیست و پنج آتش‌نشانی که در اختیار است تنها چهار آتش‌نشان در سلول یک و شش آتش‌نشان در سلول صد استقرار می‌یابند و تنها هجده سلول از صد سلول موجود تحت پوشش مهار حریق قرار می‌گیرند که نه سلول در همسایگی شمال غربی جنگل و نه سلول آن نیز در همسایگی جنوب غربی جنگل می‌باشند که این حالت تابع هدفی معادل با ۱۷۶ واحد به خود اختصاص می‌دهد. بلا استفاده ماندن پانزده آتش‌نشان دیگر، و همچنین سوختن هشتاد و دو سلول از صد سلول، نشان می‌دهد که در مسئله‌ی این مطالعه، مانند سایر مدل‌های پوشش مسائل امدادی، مفهوم زمان نجات در تعریف همسایگی‌ها و ماهیت مدل‌سازی مسئله لحاظ شده است و مسافت نقاط گوشه‌ای با نقاط داخلی جنگل سبب سوختن هشتاد و دو سلول تا رسیدن پانزده آتش‌نشان دیگر شده است. یک بار دیگر تحلیل حساسیت فوق با صد برابر کردن بودجه‌ی ارسال آتش‌نشان‌ها در نظر گرفته شد و نتایج حاصل از حل آن، عیناً همانند شکل۷ به دست آمد، که نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که افزایش بودجه هیچ تأثیری در تغییر تابع هدف و تعداد سلول‌های نجات یافته ندارد.

شکل۷. استقرار آتش‌نشان‌ها در نقاط گوشه‌ی شمال غربی و جنوب شرقی جنگل و عدم استقرار منابع مهار آتش در داخل جنگل

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

عملیات پیش‌گیرانه‌ی اصلاح پوشش گیاهی و ارسال آتش‌نشان‌ها و تجهیزات منابع حریق، دو فعالیت مهم در زمینه‌ی مقابله با آتش‌سوزی‌های طبیعی و کاهش خسارات و تلفات ناشی از آن محسوب می‌شوند که اولی در فاز پیش از حادثه و دومی در فاز حین حادثه می‌باشند. در نظر گرفتن افق زمانی و انجام عملیات اصلاح پوشش گیاهی به‌صورت چند دوره‌ای با ایده‌ی رشد گیاهان و تلفیق عملیات اصلاح پوشش گیاهی با عملیات ارسال آتش‌نشان‌ها و ارائه‌ی یک مدل حل یکپارچه برای حل این مسئله با در نظر گرفتن محدودیت بودجه، از اهداف این مطالعه به شمار می‌رفت که در قسمت مدل‌سازی و حل مسئله، تشریح شد. درنهایت این تحقیق، با ارائه‌ی یک مدل ریاضی یکپارچه برای ایجاد یک برنامه‌ریزی زمان‌بندی، جهت تعیین بهینه‌ی نقاطی که در هر دوره احتیاج به انجام عملیات اصلاح پوشش گیاهی دارند، و تخصیص تجهیزات مهار حریق به مناسب‌ترین نقاط، در دوره‌ی آخر به بیشینه کردن حجم مورد پوشش از گیاهان برای مهار حریق و کاهش خطر حاصل از یک آتش‌سوزی طبیعی در منطقه‌ی جنگلی مورد مطالعه پرداخت.

منابع

[1] Martell, D., 2011. The development and implementation of forest and wild land fire management decision support systems: reflections on past practices and emerging needs and challenges. Mathematical and Computational Forestry & Natural Resource Sciences, 3(1), 18-26.
[2] Rachmawati, R., Ozlen, M., Reinke, K. J., & Hearne, J. W., 2015. A model for solving the prescribed burn planning problem. SpringerPlus, 4, 630. http://doi.org/10.1186/s40064-015-1418-4.
[3] Finney, M. A., 2001. Design of regular landscape fuel treatment patterns for modifying fire growth and behavior. Forest Science, 47(2), 219-228.
[4] Minas, J. P., Hearne, J. W., & Martell, D. L., 2014. A spatial optimisation model for multi-period landscape level fuel management to mitigate wildfire impacts. European Journal of Operational Research, 232(2), 412-422.
[5] Hof, J., Omi, P. N., Bevers, M., & Laven, R. D., 2000. A timing-oriented approach to spatial allocation of fire management effort. Forest Science, 46(3), 442-451.
[6] Reinhardt, E. D., Keane, R. E., Calkin, D. E., & Cohen, J. D., 2008. Objectives and considerations for wildland fuel treatment in forested ecosystems of the interior western United States. Forest Ecology and Management, 256(12), 1997-2006.
[7] Wei, Y., 2012. Optimize landscape fuel treatment locations to create control opportunities for future fires. Canadian Journal of Forest Research, 42(6), 1002-1014.
[8] Minas, J., Hearne, J., & Martell, D., 2015. An integrated optimization model for fuel management and fire suppression preparedness planning. Annals of operations Research, 232(1), 201-215.
[9] Shahparvari, S., Chhetri, P., Abareshi, A., & Abbasi, B., 2015 Multi-objective decision analytics for short-notice bushfire evacuation: an Australian case study. Australasian Journal of Information Systems, 19(1). 133-151
[10] Minas, J. P., & Hearne, J. W., 2016. An optimization model for aggregation of prescribed burn units. Top, 24(1), 180-195.
[11] Mercer, D. E., Haight, R. G., & Prestemon, J. P., 2008. Analyzing trade-offs between fuels management, suppression, and damages from wildfire. The Economics of Forest Disturbances: Wildfires, Storms, and Invasive Species. Forestry Sciences, 247-272.