فصلنامه علمی مطالعات مدیریت صنعتی – سال هفدهم، شماره ۵۴، پاییز ۹۸
صفحات ۱۴۰-۱۱۱

استراتژی محافظت از تسهیلات حیاتی در حضور حملات با سطوح شدت متفاوت

پیمان قاسمی،* کاوه خلیلی دامغانی، فرشید عبدی*****

تاریخ دریافت: ۹۵/۸/۱۰- تاریخ پذیرش: ۹۷/۲/۱۸

چکیده:

امروزه، زیرساخت‌های حیاتی در سیستم‌های تامین، در معرض حملات عمدی هستند که این امر سبب شده است تا برای فراهم آوردن آمادگی لازم و واکنش مناسب در برابر حملات، مسئله مستحکم‌سازی زیرساخت‌های حیاتی مطرح گردد. در این مقاله، نوع خاصی از مسئله مستحکم‌سازی زیرساخت‌های حیاتی مورد بحث قرار گرفته است که در آن، قبل از آنکه زیرساخت‌های حیاتی احداث گردند، در مورد مستحکم‌سازی آن‌ها برنامه ریزی می‌شود. مسئله به صورت یک برنامه‌ریزی دو سطحی فرموله شده است که در سطح بالا، (مدافع) با در نظر گرفتن این‌که کدام تسهیلات احداث شوند، هر تسهیل، در شرایط پیش از حمله، به کدام مشتری خدمت‌رسانی کند و برای شرایط بعد از حمله، برای هر تسهیل چه تعداد مدافع تخصیص داده شود، به دنبال کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ها می‌باشد.این درحالی است که در سطح پایین، (حمله کننده) با در نظر گرفتن این‌که به کدام تسهیلات و با چه سطح شدتی حمله شود، به دنبال تحمیل حداکثر هزینه به سیستم است. برای حل مسئله، روش فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده پیشنهاد شده است و با حل یک مثال و مقایسه نتایج آن با نتایج حل دقیق، کارآیی روش سنجیده شده است.

واژگان کلیدی: مسئله R- میانه ممانعتی، برنامه‌ریزی دو سطحی، مستحکم سازی احتمالی، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

پرتال جامع علوم انسانی

* دپارتمان مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران
** دپارتمان مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران (مسئول مکاتبات) k_khalili@azad.ac.ir
*** دپارتمان مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

مقدمه

وقایع اخیر جهان به وضوح نشان می‌دهد که تسهیلات و امکانات در برابر خطرات و حملات آسیب‌پذیرند. شناسایی زیرساخت‌های حیاتی سیستم و برنامه‌ریزی جهت افزایش امنیت و مستحکم‌سازی آن‌ها، عناصر کلیدی برای پایداری و بهره‌وری سیستم خدمات در هنگام حملات عمدی و رخ دادن فجایع طبیعی است (لیبراتور و همکاران،۲۰۱۱). زیرساخت‌های حیاتی شامل دارایی‌های فیزیکی از یک سیستم است که از دست دادن آن‌ها منجر به اختلال قابل توجهی در سیستم‌های عملیاتی و کاربردی می‌شودکه مثال‌های آن عبارتند از: ارتباطات حمل و نقل مثل پل‌ها، تونل‌ها و راه‌آهن، امکانات مثل پایانه‌ها، نیروگاه‌ها، انبارها، مراکز پاسخ اضطراری، بیمارستان‌ها، انبارهای بحرانی مثل واکسن، دارو، مواد غذایی، پرسنل کلیدی مثل اپراتورهای سیستم آب و نشانه‌های ملی که از دست دادن آن‌ها به شدت روحیه عمومی را تحت تاثیر قرار می‌دهد(لوسادا،۲۰۱۲).

یک زنجیره تامین را در نظر بگیریدکه متشکل از تسهیلات خدماتی و گره‌های تقاضا و خطوط حمل و نقل باشد. در دنیای واقعی این تسهیلات می‌تواند یک بیمارستان، مراکز فروش دارو، پایانه‌های حمل ونقل ریلی و خطوط ارتباطی و غیره باشند و نقاط تقاضا مکان-های متشکل از مشتریان‌اند که خواستار کالا یا دریافت خدمات از این تسهیلات هستند. هنگامی که یک یا تعدادی از این تسهیلات مورد حمله قرارگیرند، دچار نقص شوند و یا به طور کامل از بین روند، سیستم به اجبار متحمل هزینه‌های بیشتر جهت نقل و انتقال کالا و خدمات در درون شبکه می‌شود(ژو و همکاران،۲۰۱۳). در جهت کاهش این هزینه‌ها در این مقاله، به طور همزمان مسئله طراحی شبکه، مکان‌یابی و تخصیص در شرایط اضطرار و عادی با در نظر گرفتن مستحکم سازی احتمالی تحت سطوح مختلف شدت حمله مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله مسئله R- میانه ممانعتی با مستحکم سازی که توسط لیبراتور و همکاران فرموله شده است، بسط داده می‌شود. در این مدل هدف مدافع در ابتدا یافتن بهترین مکان از بین مکان‌های کاندید برای احداث تسهیلات است، سپس تخصیص نقاط تقاضا به هر تسهیل در

دو شرایط عادی و حمله این هدف دنبال می‌گردد. واضح است که هدف حمله کننده ایجاد بیشترین خرابی در شبکه خدمت‌رسانی است. یکی از فرض‌های مهم ارائه شده در مدل لیبراتور و همکاران احتمالی بودن تعداد حملات است. ایده جدیدی که در این مدل بکار برده شده است مستحکم بودن بالقوه مکان‌های کاندید برای احداث تسهیلات است، ازاین‌رو میزان مستحکم بودن بالقوه هر تسهیل با مکان کاندید برای احداث آن مرتبط است. مدافع در صدد طراحی شبکه‌ای است که مکان‌های انتخابی آن برای احداث تسهیلات از بیشترین استحکام بالقوه برخوردار باشد.

ایده دیگری که در این مدل به کاربرده شده است، متفاوت بودن میزان سطوح شدت حمله است. به بیان دیگر فرض برآن است که توانایی حمله کننده برای حمله از سطوح مختلف شدت، محدود است. ازاین رو به دنبال یافتن بهترین ترکیب از سطوح شدت مختلف برای ایجاد بیشترین خرابی در شبکه است. این مسئله با مفروضات بیان شده، به شکل یک مسئله غیر قطعی دوسطحی فرموله شده است که در بخش ۷ مثال ساده ای در ابعاد کوچک به کمک نرم افزار گمز و در ابعاد بزرگ به کمک یک روش فرابتکاری مبتنی بر الگوریتم تبرید شبیه سازی شده، حل گردیده است.

مرور ادبیات

از مدل‌های ممانعتی در تشخیص مسیرهای ارتباطی یا دارایی‌های حساس یک سیستم در یک شبکه عرضه[1] استفاده می‌شود. فرض کنید در یک شبکه عرضه عمومی نقاط استقرار تسهیلات خدماتی را گره‌ها و راه‌های ارتباطی بین نقاط تقاضا و تسهیلات را یال‌ها در نظر گرفت. اگر یک یا چند تسهیل در معرض خطر قرار گیرند یا از بین بروند، هزینه اضافی برای تولید و حمل و نقل به سیستم تحمیل می‌شوند. مدل‌های ارائه شده در زمینه ممانعت به دو دسته ی مدل‌های r میانه ممانعتی[2] و r پوششی ممانعتی[3] تقسیم می‌شوند. هدف مسائل r پوششی

1. Supply Network
2. R- Interdiction Median Problem
3. R- Interdiction Covering Problem

ممانعتی این است که پوشش دهی تقاضاها بیشینه شود؛ برای مثال، در مکانیابی ایستگاه آتشنشانی لازم است ایستگاه‌ها به گونه ای مکانیابی شوند که نقاط تقاضا در یک حداکثر فاصله سرویس دهی یا زمان سفر مشخص قرار گیرند. مسئله r میانه ممانعتی بصورت از بین رفتن یک زیر مجموعه R تایی ازP تسهیل تعریف می‌شود بصورتی که موجب بیشینه شدن متوسط مسافت سرویس دهی یا کل مسافت می‌شود.

ایده اصلی مسئله مکانیابی تسهیلات دفاعی در مسئله r میانه ممانعتی طراحی یک شبکه خدمات رسان با هدف حداقل سازی مجموع هزینه‌های ثابت و عملیاتی یک سیستم، تحت معرض اختلالات بوده است. در این مسئله مدافع سعی دارد از بین مکان‌های بالقوه برای احداث تسهیلات دفاعی، مکان‌هایی را انتخاب کند که هر تسهیل خدمت رسان حداقل تحت نظر یک تسهیل دفاعی باشد.

پرواسی و همکاران یک مدل سه سطحی مکان یابی تسهیلات دفاعی به منظور ایجاد پوشش کامل در مسئلهٔ r میانه ممانعتی را ارائه کرده اند. مدل ارائه شده سه هدفه بوده و هدف اول حداقل سازی مجموع هزینه‌های ثابت استقرار تسهیلات دفاعی، هدف دوم حداقل هزینهٔ سرویس دهی مدافع پس از ممانعت و هدف سوم کمینه کردن مجموع هزینهٔ خدمات رسانی به متقاضیان از طریق ظرفیت باقیماندهٔ تسهیلات خدمت رسان است. ایدهٔ جدید این پژوهش، معرفی مفهوم تسهیلات مستحکم ساز است که از تسهیلات خدمت رسان در مقابل حمله مهاجم محافظت می کند. برای حل مدل ارائه شده از الگوریتم ترکیبی ژنتیک و الگوریتم شمارش صریح استفاده شده است (پرواسی و همکاران، ۱۳۹۶).

کمالی و همکاران مدلی را جهت حفاظت جان اشخاص سیاسی ارائه نموده اند. بدین صورت که دو گروه از محافظان قصد دارند از یک شخص سیاسی در خانه به بهترین نحو محافظت کنند. برای رسیدن به بالاترین درجه از حفاظت، به طور همزمان یک گروه تمایل دارد فاصله ی خود را به شخص نزدیکتر و گروه دیگر می‌خواهد این فاصله را دورتر سازد. نتایج حل بیانگر آن است که روش پیشنهادی در دام جواب بهینه محلی گرفتار نمی شود و سطح رفاه اجتماعی بهتری را برای مسئله مذکور فراهم می کند (کمالی و همکاران، ۱۳۹۵).

جعفرآبادی و همکاران یک مدل ریاضی سه سطحی بر اساس بازی پایه و پیرو برای محافظت از تسهیلات سیستم خدمت رسان ارائه کردند. در مدل ارائه شده مدافع می‌تواند با پیش بینی آسیب پذیری سیستم در مقابل اختلالات آتی، در خصوص تعداد و مکان تسهیلات خدمات رسان تصمیم گیری نماید. از این رو فرض می‌گردد تعدادی گزینه بالقوه جهت احداث تسهیلات با ویژگی‌های معلوم، از قبل مشخص شده باشند. از جمله اهداف این پژوهش کمینه کردن هزینه مکانیابی تسهیلات و کاهش هزینه‌های جاری سیستم تحت بدترین سناریوی تخریب توسط مهاجم می‌باشد. برای حل مدل ارائه شده از رویکرد ترکیبی جستجوی ممنوعه برای سطح اول و الگوریتم شمارش صریح برای سطح دوم استفاده شده است (جعفرآبادی و همکاران، ۱۳۹۴).

محمودجانلو و خادمی یک مدل ریاضی جهت مکانیابی تسهیلات و مستحکم سازی احتمالی آن‌ها ارائه نموده اند. مدل ریاضی پیشنهادی دو مرحله ای بوده و بصورت یک بازی استکلبرگ بین مهاجم و مدافع می‌باشد. هدف اول مدافع که بعنوان رهبر در مدل در نظر گرفته شده، حداقل سازی بودجه مستحکم سازی و افزایش ظرفیت اضطراری می‌باشد. هدف دوم مدافع کمینه کردن هزینه‌های جاری سیستم خدمات رسانی است. هدف مهاجم که به عنوان پیرو در نظر گرفته شده، حداکثر سازی هزینه‌های جاری سیستم خدمات رسانی می‌باشد. در نهایت نتایج تحقیق بیانگر صحت و دقت مدل ارائه شده می‌باشد (محمودجانلو و خادمی ، ۱۳۹۳).جبل عاملی و همکاران ضمن شناسایی عوامل موثر بر مکانیابی تسهیلات حساس با تاکید بر نگرش پدافند غیرعامل، مدل ترکیبی را جهت مکانیابی این تسهیلات ارائه نمودند. در توسعه مدل مذکور از روش ترکیبی، فرآیند تحلیل شبکه ای، روش دسته بندی تاکسونومی بهبود یافته و مدل ریاضی ایجاد پراندگی بین تسهیلات استفاده شده است. در این مدل از سه جنبه تسهیلات عمومی، تسهیلات نامطلوب و تسهیلات حساس مورد توجه قرار گرفته است. مدل ارائه شده، تسهیلات را درون سلول‌هایی با اندازه‌ها و فواصل یکسان مکانیابی می‌کند. برای ارزیابی وضعیت سلول‌ها در ارتباط با معیارهای مکانیابی از اطلاعات جغرافیایی استفاده شده است (جبل عاملی و همکاران، ۱۳۸۸).

کناک از رویکرد نظریه بازی‌ها برای حفاظت از تسهیلات و بالا بردن قابلیت اطمینان آن‌ها در برابر حملات نظامی استفاده کرد. وی برای این منظور مدلی را با هدف ماکزیمم کردن قابلیت اطمینان تسهیلات ارائه نمود و این مدل را با رویکرد ترکیبی تئوری بازی و الگوریتم ژنتیک حل نمود. وی برای این منظور از رویکرد شبیه سازی بهینه سازی[1] استفاده کرده است. در روش حل وی ورودی بهینه سازی خروجی شبیه سازی می‌باشد(کناک و همکاران،۲۰۱۵)

آلباردا و همکاران برای کمینه‌سازی این هزینه‌ها و شناسایی تسهیل مدنظر برای مستحکم شدن، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را ارائه کرده‌اند. از این‌رو، آن‌ها دو مدل ممانعتی به نام‌های مدل R- میانه ممانعتی و مدل پوششی ممانعتی تسهیلات را توسعه دادند (آلباردا،۲۰۱۵).

جاریو در یک مقاله مروری به بررسی پژوهش‌های انجام یافته در ارتباط به تصمیم گیری توزیع شده و طراحی مکانیزم‌های همکاری می‌پردازد. وی دلیل عمده استفاده از رویکرد تبدیل مدل‌های متمرکز به مدل توزیع شده را امنیت در تبادل اطلاعات معرفی می‌کند. بررسی پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که پارامتر تقاضا و میزان تولید از جمله عواملی هستند که اغلب سازمان‌ها مایل به به اشتراک گذاشتن آن با سایر سازمان‌ها نیستند. (جاریو و همکاران،۲۰۱۴)

آکسن و همکاران در مساله R- میانه ممانعتی با تسهیلات ظرفیت‌دار، مفهوم ممانعت جزئی تسهیلات را مطرح کردند که در مساله آن‌ها، برون‌سپاری تقاضا نیز امکان‌پذیر بود. برای حل این مساله دوسطحی با هدف پیش‌بینی مخل‌ترین حمله از جانب حمله‌کننده و بهترین پاسخ ممکن به آن حمله، توسط مدافع، دو الگوریتم ابتکاری برای حالت ممانعت کامل توسعه داده شد(آکسن و همکاران،۲۰۱۴)

هگمن با استفاده رویکرد تصمیم گیری توزیع شده مدلی دو سطحی در زنجیره تامین ارائه نمود. این مدل در دو سطح تولیدکننده و توزیع کننده ارائه شد. مکانیزم همکاری وظیفه ارتباط بین دو مدل را عهده داشت. در رویکرد وی خروجی مدل توزیع کننده ورودی مدل

1. Simulation based optimization

تولید کننده می‌باشد. مدل بین دو سطح تکرار خواهد شد تا آنجا که کمبود برابر صفر شود. نتایج حاصله بیانگر بهبود عملکرد زنجیره تامین در حالت غیرمتمرکز نسبت به حالت متمرکز می‌باشد(هگمن و همکاران،۲۰۱۴)

ژو و همکاران به مسئله میانه ممانعتی با مستحکم‌سازی احتمالی، پرداختند. هدف این مسئله شناسایی تسهیلات آسیب پذیر و ارائه راهبردی برای حفاظت از این تسهیلات است. در این مسئله برای محافظت از هر تسهیل، از مدافعانی استفاده می‌شود که به صورت واحدهای سلاحی هستند و در آن احتمال موفقیت واحدهای سلاحی در محافظت مقدار ثابتی است، توزیع منابع دفاعی قبل از ممانعت مشخص است و امکان تغییر در طول حمله وجود ندارد. برای حل این مسئله از روش جستجوی حریصانه تکراری استفاده شده است(ژو و همکاران،۲۰۱۳).

لیبراتور[1]و همکاران(۲۰۱۱) در مقاله‌ای به آنالیز استراتژی‌های محافظت، در شرایط غیر قطعی بودن تعداد ممانعت‌های پیشِ روی سیستم پرداختند. در این مقاله علاوه بر مدل R- میانه، یک مدل حداکثر پوشش نیز ارائه گردید. در این مدل، به دلیل عدم قطعیت در تعداد حملات، تعداد تسهیلات ممانعت‌شده نیز تصادفی می‌باشد. هدف این مسئله این است که در شرایطی با بدترین الگوی ممانعتی، هزینه‌های وزنی احتمالی کمینه گردد.

آکسِن[2] و همکاران با در نظر گرفتن ظرفیت و محدودیت بودجه در مسئله R- میانه ممانعتی، به دنبال شناسایی تسهیلاتی بودند تا با تخصیص منابع حفاظتی به آن تسهیلات، تأثیر حملات احتمالی را کمینه کنند(آکسن و همکاران،۲۰۱۰) . در این مسئله پس از ممانعت شدن تسهیلات، سایر تسهیلات ممانعت نشده، دارای ظرفیت انعطاف‌پذیر هستند که به ازای افزایش یک واحد هزینه، امکان تخصیص مجدد یک مشتری به آن تسهیل امکان‌پذیر می‌شود. برای حل این مسئله از روش الگوریتم شمارش ضمنی[3] به‌کار رفته در درخت دودویی استفاده شده است.

1.Liberatore
2.Aksen
3.Implicit Enumeration Algorithm

دو روش تجزیه دقیق بِندِرز[1]و نابرابری‌های معتبر[2]توسط لوسادا[3]و همکاران برای حل مدل‌سازی مختلط عددصحیح دو سطحی با هدف کمینه سازی بیشترین مسافت طی شده ارائه شد(لوسادا و همکاران،۲۰۱۰) در این مدل هر گره تقاضا در هر دوره زمانی از نزدیک‌ترین تسهیل مختل نشده خدمت دریافت می‌کند.

در این مقاله، به طور همزمان مسئله طراحی شبکه، مکان‌یابی و تخصیص در شرایط اضطرار و عادی با در نظر گرفتن مستحکم سازی احتمالی تحت سطوح مختلف شدت حمله مورد بررسی قرار گرفته است.

بیان مسئله

در این مسئله، تعدادی از مناطق کاندید برای احداث زیرساخت‌های حیاتی وجود دارند که هریک از این زیرساخت‌های حیاتی پس از احداث در مناطق کاندید، خدمات و یا کالاهایی را به گره‌های تقاضا ارائه می‌دهند. هریک از این زیرساخت‌های حیاتی می‌بایست در شرایط پیش و پس از حمله، تقاضای مشتریان را ارضاء کنند. برای مستحکم‌سازی این زیرساخت‌های حیاتی، بودجه محدودی در نظر گرفته شده است تا در شرایط حمله، از زیرساخت‌های حیاتی حفاظت کنند. در طرف مقابل، حمله کننده نیز برای حمله به زیرساخت‌های حیاتی بودجه محدودی دارد. این مسئله را می‌توان به صورت یک بازی رهبر-پیرو در نظر گرفت که در آن مدافع (رهبر) با در نظر گرفتن این‌که کدام تسهیلات احداث شوند، هر تسهیل، در شرایط پیش از حمله، به کدام مشتری خدمت‌رسانی کند و برای شرایط بعد از حمله، برای هر تسهیل چه تعداد مدافع تخصیص داده شود، به دنبال کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ها می‌باشد این درحالی است که حمله کننده (پیرو) با در نظر گرفتن این‌که به کدام تسهیلات و با چه سطح شدتی حمله شود، به دنبال تحمیل حداکثر هزینه به سیستم است.

تغییرات اساسی مدل نسبت به مدل لیبراتور(۲۰۱۱) به شرح زیر می‌باشد:

1.Benderz
2.Super-Valid-Inequalities
3.Losada

۱. ارائه‌ی مدل جدید برنامه‌ریزی دوسطحی چندهدفه برای مساله **R**- میانه
۲. در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت تسهیلات و امکان افزایش ظرفیت تسهیلات و برون‌سپاری تقاضا بعد از ممانعت
۳. در نظر گرفتن ممانعت جزئی تسهیلات و مستحکم‌سازی تسهیلات با ملاحظه احتمال موفقیت برای مستحکم‌سازی
۴. در نظر گرفتن امنیت اطلاعات در دو سطح مدل با استفاده از تصمیم گیری توزیع شده

مدلسازی:

مفروضات

الف- منابع مستحکم‌سازی، به صورت واحدهای سلاحی هستند؛ یعنی در نهایت منابع مستحکم‌سازی مختلف با استفاده از ضرایب خاص به یک واحد سلاحی تبدیل شده اند، چرا که ممکن است یک منبع مستحکم‌سازی، کارایی بیشتری نسبت به منبع مستحکم‌سازی دیگر داشته باشد.

ب- هر واحد سلاحی یک مدافع نقطه‌ای تکی است و قادر است تنها، نزدیکترین تسهیل به خودش را مستحکم کند. که احتمال موفقیت این مستحکم‌سازی، یک مقدار از پیش تعیین شده می‌باشد.

ج-توزیع جغرافیایی منابع مستحکم‌سازی، قبل از حمله تعیین می‌شوند و امکان تغییر در طول حمله وجود ندارد.

د- حمله به یک تسهیل، زمانی موفق خواهد بودکه علاوه بر غلبه بر استحکام بالقوه یک تسهیل، تمام واحدهای دفاعی آن تسهیل شکست خورده باشند.

ه- برای تخمین بدترین حالت ممکن، فرض شده است که ممانعت کننده اطلاعات کاملی را در مورد مکان‌های کاندید احداث تسهیل، موقعیت هریک از گره‌های تقاضا و توزیع جغرافیایی واحدهای دفاعی دارد.

و- ظرفیت تسهیلات نامحدود است و هر گره تقاضا، از نزدیکترین تسهیل موجود، خدمت دریافت می‌کند.

اندیس‌ها:

i: اندیسی که معرف مکان تقاضا می‌باشد. $i = 1, 2, \dots n$

j: اندیسی که معرف مکان کاندید احداث تسهیل می‌باشد. $j = 1, 2, \dots m$

k: اندیسی که معرف سطوح شدت حمله است. $k = 1, 2, \dots k_{max}$

i_v: اندیسی که معرف v امین نزدیکترین تسهیل به گره i است. $i_v = 1, 2, \dots m$

پارامترها:

n :تعداد گره‌های تقاضا

m :تعداد نقاط کاندید برای احداث تسهیل $m > p$

p :تعداد تسهیلات مورد نیاز

q :تعداد واحدهای سلاحی در دسترس

R :تخمینی از حداکثر تعداد کل حملات

P_r :احتمال اینکه تعداد کل حملات r باشد

r_k :تعداد حملات با سطح شدت k

a_i :مقدار تقاضای گره i

d_{ij}:فاصله بین گره تقاضای i و تسهیل احداث شده در مکان j

ω :احتمال اینکه هریک از مدافعین بتوانند از تسهیل خود را مستحکم کنند.

β_{jk} :احتمال از بین رفتن (ممانعت کامل) تسهیل فعال شده در مکان j پس از حمله با سطح شدت k

φ_{ijk} :احتمال تخصیص گره i به تسهیل فعال شده در مکان j پس از حمله با سطح شدت k

f_j :هزینه احداث تسهیل در مکان کاندید j

τ_{jk} :احتمال کارایی بالقوه تسهیل j پس از حمله با سطح شدت k

متغیرهای تصمیم

$$Y_j = \begin{cases} 1 & \text{اگر مکان j ام برای احداث تسهیل فعال شود} \\ 0 & \text{در غیر صورت} \end{cases}$$

$$U_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{اگر گره i قبل از حمله، به تسهیل فعال شده در مکان j تخصیص یابد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

Z_j: تعداد مدافعان تسهیل j ام

$$S_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{اگر به تسهیل فعال شده در مکان j ام با سطح شدت k حمله شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

براساس فرضیات الف، ب و د، احتمال از بین رفتن (ممانعت کامل) تسهیل فعال شده در مکان j پس از حمله با سطح شدت k، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\beta_{jk} = (1-\omega)^{Z_j} \times S_{jk} \times (1-\tau_{jk}) \quad (۱)$$

بنابراین، با استفاده از رابطه (۱)، احتمال تخصیص گره i به تسهیل فعال شده در مکان j پس از حمله با سطح شدت k براساس رابطه (۲)، قابل محاسبه است.

$$\varphi_{ii_v k} = \begin{cases} \left(1-\beta_{i_1 k}\right) \times Y_{i_v} & v = 1 \\ \left(1-\beta_{i_v k}\right) \times \prod_{l=1}^{v-1} \beta_{i_l k} \times Y_{i_v} & 1 < v \le r+1 \\ 0 & v > r+1 \end{cases} \quad (۲)$$

ضابطه نشان داده شده در رابطه (۲) نشان می‌دهد که مقدار $\varphi_{ii_v k}$، براساس مقادیر مختلف v، سه حالت مختلف را شامل می‌شود:

حالت اول: $v = 1$، این حالت وضعیتی را نشان می‌دهد نزدیکترین تسهیل به گره تقاضای i ، به طور موفقیت‌آمیز، مورد حمله واقع نشده است.

حالت دوم: $1 < v \leq r+1$، این حالت وضعیتی را نشان می‌دهد که v امین نزدیکترین تسهیل به گره تقاضای i، به طور موفقیت‌آمیز، مورد حمله واقع نشده است اما سایر تسهیلات نزدیکتر به گره i، به صورت کامل تخریب شده اند.

حالت سوم: $v > r+1$ ، نشان می‌دهد که گره تقاضای i، پس از حمله، هرگز به تسهیلاتی که دور تر از $r+1$ امین نزدیکترین تسهیل به گره تقاضای i هستند، تخصیص نخواهد یافت؛ توجه داشته باشید که حمله کننده می‌تواند حداکثر r تا از تسهیلات را تخریب کند، بنابراین همواره در بین اولین نزدیکترین تسهیل و $r+1$ امین نزدیکترین تسهیل به گره تقاضای i، حداقل یک تسهیل ممانعت نشده وجود دارد که گره تقاضای i، پس از حمله، به آن تسهیل تخصیص خواهد یافت.

با توجه به مطالب ذکر شده، مجموع مسافت وزنی، بر اساس رابطه زیر قابل بسط دادن است:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{v=1}^{p}\sum_{k=1}^{k_{max}} a_i d_{ii_v} \varphi_{ii_{vk}} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{v=2}^{r+1}\sum_{k=1}^{k_{max}}\left[a_i d_{ii_v}(1-\beta_{i_v k}) \times \prod_{l=1}^{v-1}\beta_{i_l k} \times Y_{i_v}\right] + \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{k_{max}} a_i d_{ii_v}(1-\beta_{i_1 k}) \times Y_{i_v} \quad (۳)$$

بنابراین، می‌توان مسئله را به صورت دو سطحی فرموله‌بندی کرد:

سطح اول از نظر مدافع:

$$Min\left\{\sum_{j=1}^{m} Y_j \times f_j + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} a_i d_{ij} U_{ij} + \sum_{r=1}^{R} P_r \times W_r(Z)\right\} \quad (۴)$$

با محدودیت:

$$\sum_{j=1}^{m} Y_j = p \quad (۵)$$

$$\sum_{j=1}^{m} Z_j = q \quad (۶)$$

$$\sum_{i=1}^{n} U_{ij} = 1 \qquad \forall j = 1,2,..,m \quad (۷)$$

$$Y_j \geq U_{ij} \quad (۸)$$

$$Z_j \geq 0 \quad (۹)$$

$$Y_j \epsilon \{0,1\} \quad (۱۰)$$

$$U_{ij} \epsilon \{0,1\} \quad (۱۱)$$

سطح دوم از نظر حمله کننده:

$$W_r(Z) = Max \sum_{i=1}^{n} \sum_{v=1}^{p} \sum_{k=1}^{k_{max}} a_i d_{ii_v} \varphi_{ii_{vk}} = \quad (۱۲)$$
$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{v=2}^{r+1} \sum_{k=1}^{k_{max}} \left[a_i d_{ii_v} \left(1 - \beta_{i_v k}\right) \times \prod_{l=1}^{v-1} \beta_{i_l k} \times Y_{i_v} \right] +$$
$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{k_{max}} a_i d_{ii_v} \left(1 - \beta_{i_1 k}\right) \times Y_{i_v}$$

محدودیت‌ها:

$$\beta_{jk} = (1-\omega)^{Z_j} \times S_{jk} \times (1 - \tau_{jk}) \qquad \forall j = 1,2,..,m \quad (۱۳)$$

$$\sum_{j=1}^{p} S_{jk} \leq r_k \qquad \forall k = 1,2,..,k_{max} \quad (۱۴)$$

$$\sum_{k=1}^{k_{max}} S_{jk} \leq 1 \qquad \forall j = 1,2,..,m \quad (۱۵)$$

$$S_{jk} \leq Y_j \qquad \forall j,k \quad (۱۶)$$

$$\sum_{k=1}^{k_{max}} r_k \leq R \qquad \forall j = 1,2,..,m \quad (۱۷)$$

$$S_{jk} \epsilon \{0,1\} \qquad \forall j,k \quad (۱۸)$$

در تابع هدف، رهبر (مدافع) به دنبال کمینه کردن هزینه احداث و هزینه تخصیص قبل و بعد از حمله است، این در حالیست که پیرو (حمله کننده) در محدودیت (۱۲) به دنبال تحمیل حداکثر هزینه بر سیستم است به طوری که با حداکثر کردن مجموع مسافت وزنی مورد انتظار، کارایی سیستم را کمینه کند. محدودیت (۵) این اطمینان را حاصل می‌کند که در مکان‌های کاندید، به تعداد تسهیلات مورد نیاز، تسهیل احداث شده است.محدودیت‌های (۶)، (۱۴) و (۱۷)، به ترتیب بیانگر محدودیت منابع مدافع و حمله‌کننده می‌باشد؛ که محدودیت (۶) بیان می‌کند که مجموع تعداد واحدهای سلاحی q است و محدودیت (۱۷) بیان می‌کند که براساس پیش‌بینی صورت گرفته، حمله کننده حداکثر می‌تواند به تعداد Rحمله داشته

باشد که در محدودیت (۱۴)، تعداد حملات با سطح شدت k از حد بالای خود یعنی r_k تجاوز نخواهد کرد. محدودیت (۷) بیان کننده این است که هر گره تقاضا، قبل از حمله دقیقا از یک تسهیل خدمت دریافت می‌کند. محدودیت‌های (۸) و (۱۶) بدین منظور اعمال شده است تا به ترتیب، از تخصیص گره‌های تقاضا به تسهیلات احداث نشده و حمله به تسهیلات احداث نشده جلوگیری شود. محدودیت (۱۳) نشان‌دهنده احتمال از بین رفتن تسهیل فعال شده در مکان j پس از حمله با سطح شدت k را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۵) نشان دهنده این است که یک تسهیل بیش از یکبار، مورد حمله قرار نمی‌گیرد. و در آخر، محدودیت‌های (۹)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۸) بیانگر مقادیر مجاز برای متغیرهای تصمیم است.

نحوه ارتباط دو سطح مدل

تصمیم گیری توزیع شده[1] به فرآیندی گفته می‌شود که در آن تصمیم گیرندگان متعدد برای موضوعی واحد تصمیم گیری می‌کنند. موضوعی که در این نوع تصمیم گیری مهم است، سطح همکاری می‌باشد. سطح همکاری در این نوع تصمیم گیری محدود می‌باشد. در عین حال اعضای تصمیم گیرنده مجبورند بصورت محدود(نه بصورت متمرکز) با یکدیگر همکاری کنند. همکاری میان تصمیم گیرندگان بر عهده مکانیزم همکاری[2] می‌باشد(خلیلی و قاسمی،۲۰۱۶).

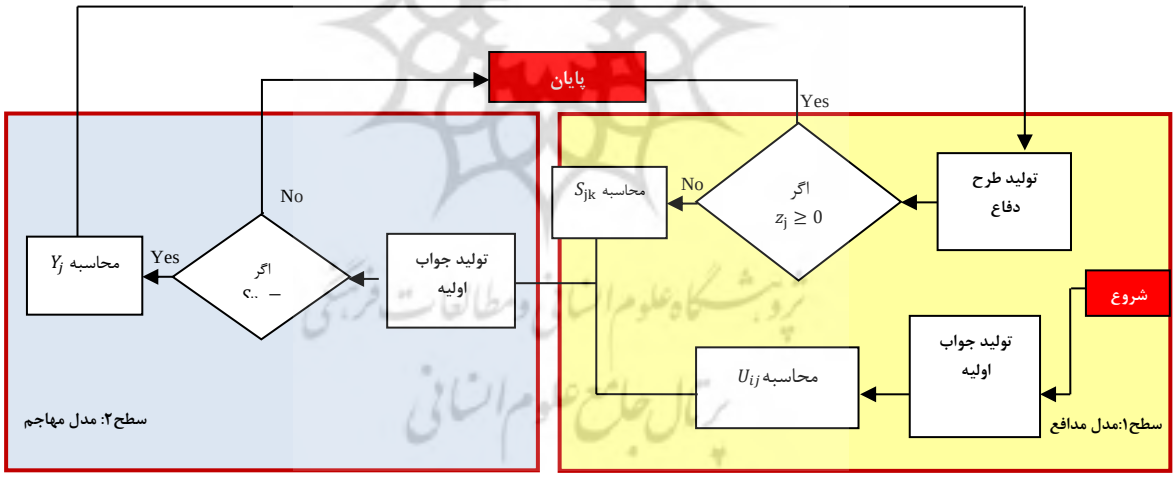
شرح تصمیم گیری توزیع شده به این صورت می‌باشد که الگوریتم با حل مدل اولیه(تصمیم گیرنده اول) آغاز می‌شود، جواب‌های اولیه تولید شده به عنوان ورودی مدل ثانویه(تصمیم گیرنده دوم) می‌باشد. اگر جواب رضایت بخش باشد الگوریتم متوقف می‌شود در غیر این صورت مدل ثانویه اجرا خواهد شد و نتایج آن به عنوان ورودی مدل اولیه خواهد بود اگر شرایط برقرار باشد الگوریتم متوقف خواهد شد در غیر این صورت الگوریتم تکرار خواهد شد.

همانطوری که از شکل ۱ مشخص است، مکانیزم همکاری با مدل مدافع آغاز می‌شود. پس از حل مدل، متغیر تصمیم U_{ij} که مربوط به تخصیص می‌باشد، به عنوان ورودی مدل مهاجم در

1. Distributed decision making
2. Coordination mechanism

نظر گرفته خواهد شد. پس از حل مدل مهاجم اگر $s_{ik} = 0$ شود، به این معناست که به تسهیل حمله نشود و الگوریتم متوقف خواهد شد. در غیر این صورت اگر به تسهیل حمله شود، سایر متغیرهای مدل مهاجم محاسبه می‌شود و خروجی این مدل به عنوان ورودی مدل مدافع در نظر گرفته می‌شود. پس از حل مدل مدافع، اگر تعداد مدافعان مثبت محاسبه شود الگوریتم متوقف خواهد شد، در غیر این صورت این الگوریتم تکرار خواهد شد.

نحوه ارتباط دو سطح مدل بر اساس تصمیم گیری توزیع شده می‌باشد. در این شیوه دو مدل از دید دو تصمیم گیرنده ارائه خواهد سپس این دو مدل توسط مکانیزم هماهنگی با یکدیگر مرتبط می‌شوند. دلیل و ضرورت استفاده از این روش حداقل کردن اطلاعات به اشتراک گذاشته بین دو تصمیم گیرنده می‌باشد. هر یک از این دو مدل تابع هدف مربوط به خود را داشته و هر یک از دو تصمیم گیرنده (مدافع و مهاجم) از تابع هدف طرف مقابل بی اطلاع می‌باشد. مکانیزم هماهنگی دو سطح مدل و چگونگی تبدیل و ارتباط دو مدل با یکدیگر در شکل ۱ مشخص می‌باشد.



شکل ۱. مکانیزم هماهنگی دو سطح مدل

روش تحقیق

الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

منشأ الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (SA)، کارهای کریک پاتریک [1] و کِرنی [2] و همکارانشان در سال‌های ۱۹۸۳ و ۱۹۸۵ است. آن‌ها برای حل مسائل سخت بهینه‌سازی، روشی مبتنی بر تکنیک تبرید تدریجی پیشنهاد نمودند. تکنیک تبرید تدریجی توسط متالورژیست‌ها برای رسیدن به حالتی که در آن ماده جامد، به‌خوبی مرتب و انرژی آن کمینه شده باشد، استفاده می‌شود. این تکنیک شامل قرار دادن ماده در دمای بالا و و سپس کم کردن تدریجی این دماست. تابع هدف مسئله، مشابه انرژی یک ماده است که باید با کمک تعریف یک دمای مجازی، کمینه شود. دما در این حالت، یک پارامتر قابل کنترل در الگوریتم است. مشکل اصلی تبرید شبیه‌سازی شده، سخت بودن تنظیم پارامترهای این الگوریتم، نظیر دمای اولیه و نرخ کاهش دما (تبرید) است. از طرف دیگر، تبرید شبیه‌سازی شده دارای مزیت انعطاف‌پذیری نسبت به تغییر مسئله و پیاده‌سازی ساده است (یقینی،۱۳۹۵).

الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده دارای ۵ بخش می‌باشد:

الف- تابع پذیرش: الگوریتم می‌تواند به وسیله احتمال پذیرش جواب‌های بدتر از بهینه‌های محلی خارج شود. احتمال پذیرش بستگی به دمای فعلی (T) و میزان تغییرات تابع هدف (انرژی ΔE) دارد. تابع پذیرش در الگوریتم‌های SA، به‌صورت زیر می‌باشد.

$$P(\Delta E,T)=e^{\frac{-\Delta E}{T}} \rangle R \qquad (۱۹)$$

که در آن، E مقادیر تابع هدف و ΔE اختلاف مقدار تابع هدف جواب فعلی و جواب همسایه است. Tدمای فعلی و R یک عدد تصادفی بین صفر و یک است. تابع بالا، بیانگر آن است که اگر عدد تصادفی تولید شده در هر تکرار، کمتر از میزان احتمال باشد، آن‌گاه ما جواب همسایه را با وجود این‌که بدتر است، می‌پذیریم.

1. kirkpatrick
2. cerny

ب- دمای اولیه: اگر دمای اولیه بسیار بالا باشد، جستجو کم و بیشتر تصادفی می‌شود. در غیر این‌صورت یعنی هنگامی‌که دما بسیار کم باشد، جستجو تا حدودی تبدیل به یک جستجوی محلی می‌شود. بنابراین باید بین این دو حالت، تعادل ایجاد کنیم. برای این مثال مقدار دمای اولیه برابر ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود(اسکاپرا،۲۰۰۸)

ج-مکانیزم ایجاد جواب همسایگی: برای ایجاد جواب همسایگی، یک متغیر از جواب جاری انتخاب شده و در صورت صفر بودن تبدیل به یک و یا درصورت یک بودن تبدیل به صفر می‌گردد. این مکانیزم، مکانیزم ایجاد همسایگی تصادفی می‌باشد. در صورتی که جواب همسایگی ناممکن شود برای رسیدن به بهینگی از رویکرد ابتکاری زیر استفاده می‌شود.

جهت ایجاد جواب اولیه و همچنین جلوگیری از ناممکن شدن مسئله از یک الگوریتم ابتکاری استفاده شده است. گام‌های این الگوریتم در ادامه با یک مثال شرح داده شده است:

گام اول:ابتدا یک ماتریس $K \times N$ را در نظر گرفته و تمامی تسهیلات را به صورت تصادفی در آرایه‌های آن قرار می‌دهید.(جدول۱)

جدول۱. گام اول تولید جواب اولیه

x_{ij}	تخصیص تسهیل به گره				
۱	۴	۶	۱۰	۱۳	۹
۲	۱۱	۷	۱۲		
۳	۵		۸		

گام دوم:تمامی اعداد یک سطر به سمت چپ کشیده می‌شود.(جدول۲)

جدول۲. گام دوم تولید جواب اولیه

کارگاه	تخصیص تسهیل به گره
۱	۴ ۶ ۱۰ ۱۳ ۹
۲	۱۱ ۷ ۱۲
۳	۵ ۸

- **گام سوم:** در این گام برای هر یک از تسهیلات به طور تصادفی یکی از گره را انتخاب نموده آن را درسطر مربوط به آن تسهیل به طور تصادفی جای می‌دهیم. لازم به ذکر است بایستی توجه شود که تسهیل تخصیص داده‌شده به هر گره حتماً بعد از شماره خود تسهیل در جدول قرار خواهد گرفت. (جدول۳)

جدول۳. گام سوم تولید جواب اولیه

کارگاه	تخصیص تسهیل به گره
۱	۴ ۶ ۱۰ ۱۴ ۱۶ ۲۰ ۱۳ ۹ ۱۹ ۲۳
۲	۱۱ ۷ ۲۷ ۱۲ ۳۲ ۳۱
۳	۵ ۸ ۲۵ ۲۸

گام چهارم: ماتریس جواب به دست آمده توسط محدودیت‌ها مورد سنجش قرار می‌گیرد و بعنوان یک جواب شدنی اولیه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به این که جواب اولیه یک جواب ممکن می‌باشد و با توجه به اینکه الگوریتم برای مسئله با ابعاد کم شدنی است، بنابراین قطعا جواب نهایی جوابی شدنی و ممکن خواهد بود.

تابع تبرید: در الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، دما به صورت تدریجی، طوری کاهش می‌یابد که

$T_i > 0$,i به ازای

$$\lim_{t\to\infty} T_i = 0 \qquad (۲۰)$$

تابع تبرید در این مقاله از فرمول زیر پیروی می‌کند، که α همان نرخ تبرید (کاهش دما) است. در اینجا مقدار α برابر ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود.

$$T=T(1-\alpha) \qquad (۲۱)$$

ت- شرط خاتمه: شرط خاتمه‌ای که در حالت نظری پیشنهاد می‌شود، پایان الگوریتم در زمان صفر شدن دما است. اما در عمل می‌توان جستجو را زمانی متوقف کرد که احتمال پذیرش جواب، بسیار کوچک و ناچیز شود. ازاین‌رو شرط توقف را رسیدن به یک تعداد تکرار از پیش تعیین شده که در آن، در هر دما یک درصدِ از پیش تعیین شده از همسایه‌ها مشاهده شده است؛ در نظر می‌گیریم. در این‌جا تعداد تکرار برابر ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود.

اجزاء و پارامترهای الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

روش شبیه سازی تبرید به دفعات در مسایل بهینه سازی استفاده شده است. این روش، جزو روش‌های بهبود دهنده ای است که به وسیله آن می‌توان از نقاط بهینه محلی خارج شد، که این کار به دلیل پذیرش جواب‌هایی که باعث بدتر شدن تابع هدف می‌شود، صورت می‌گیرد. اگر چه روش شبیه سازی تبرید تدریجی توانایی زیادی در رسیدن به جواب‌های خوب دارد، لیکن این روش نسبت به پارامترها حساس بوده و تا حدود زیادی زمانبر می‌باشد. عملکرد و زمان محاسباتی این روش به نحو قابل توجهی به نحوه فرآیند تبرید و تعیین پارامترها جهت انجام آن بستگی دارد. تعیین پارامترها دارای الگوی مشخصی نمی باشد و در حقیقت انتخاب و تنظیم پارامترها، خود هنر به کارگیرنده روش می‌باشد.

به منظور نمایش جواب یا کروموزوم، رشته ای عددی که دارای مقادیر عدد صحیح می‌باشد، به کارگرفته می‌شود. مقادیری که به این رشته عددی اختصاص داده می‌شود، نشان دهنده انتخابی است که در هر گره به کار رفته است. به طور مثال، اگر ۱۰ گره وجود داشته باشد S= (۱،۳،۲،۵،۶،۱،۲،۴،۲،۳) این جواب یا کروموزوم نشان دهنده این است که گره۱ از انتخاب ۱، گره ۲ از انتخاب ۳، گره ۳ از انتخاب ۲، گره ۴ از انتخاب ۵ و ... استفاده می‌نمایند.

همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد، روش شبیه سازی تبرید دارای چهار پارامتر دمای اولیه، دمای نهایی، ضریب کاهش دما و تعداد تکرار الگوریتم در هر دما است. در این بخش به دنبال یافتن ترکیبی از این پارامترها هستیم که جواب بهتری را حاصل کند. برای این منظور مقدار هر یک از پارامترها را در بازهای مشخص تغییر و نتایج حاصل از اجرای الگوریتم را در جدول ۴ نمایش داده شده است. افزایش ضریب کاهش دما و نیز افزایش تعداد تکرار در هر دما نقاط بیشتری از فضای جواب مورد جست جو قرار گرفته و زمان حل نیز افزایش می‌یابد.

جدول٤. مقدار دهی پارامترها

ردیف	دمای اولیه	دمای نهایی	ضریب کاهش دما	تعداد تکرار در هر دما	جواب حاصل از الگوریتم	زمان حل (s)
۱	۱۰۰	۰,۱	۰,۱	۳۰	۴۲۱.۳	۰.۴۶
۲	۱۰۰	۰,۱	۰,۱	۱۰۰	۳۲۳.۶	۰.۵۰
۳	۱۰۰	۰,۱	۰,۱	۱۵۰	۳۲۳.۶	۰.۵۸
٤	۱۰۰	۰,۱	۰,۱	۱۰	۳۲۹.۹۸	۰.۴۸
٥	۲۰۰	۰,۱	۰,۱	۱۰	۳۲۳.۶	۰.۵۳
٦	۳۰۰	۰,۱	۰,۱	۱۰	۳۲۳.۶	۰.۶۳
۷	۱۰۰	۰,۱	۰,۰۰۱	۳۰	۴۲۱.۳	۰.۴۶
۸	۱۰۰	۰,۱	۰,۰۱	۳۰	۳۲۳.۶	۰.۸۳
۹	۱۰۰	۰,۱	۰,۹	۳۰	۳۲۳.۶	۰۹۷
۱۰	۵۰	۰,۱	۰,۰۱	۱۰	۳۲۹.۹۸	۰.۳۸
۱۱	۵۰	۰,۱	۰,۰۱	۱۰	۳۲۳.۵	۰.۴۶
۱۲	۵۰	۰,۰۰۱	۰,۰۱	۱۰	۳۲۳.۶	۰.۵۴

همانطور که در جدول ۴ مشخص است با افزایش دمای اولیه تا دمای ۲۰۰، به جواب بهتری رسیده ولی افزایش بیشتر دما لزوماً موجب بهتر شدن جواب‌ها نشده است. همچنین با افزایش ضریب کاهش دما از ۰,۰۰۱ به ۰,۰۱ به جواب بهتری دست پیدا کرده ایم البته با صرف زمان حل بالاتر. همچنین با افزایش تعداد تکرار الگوریتم در هر دما به این نتیجه می‌رسیم که بهترین عدد برای تعداد تکرار در هر دما عدد۱۰۰ می‌باشد زیرا با افزایش این پارامتر به بیش از این مقدار به جواب‌های بهتر نرسیده ایم. بنابراین بر اساس نتایج بدست آمده، بهترین ترکیب پارامترها برای الگوریتم‌ها دمای اولیه ۲۰۰، دمای نهایی۰,۰۱، تعداد تکرار در هر دما ۱۰۰، ضریب کاهش دمای ۰,۰۱ می‌باشد.

مکانیزم تولید جواب همسایگی

یکی از موارد مهم در متد شبیه سازی تبرید تدریجی، نحوه تولید جواب همسایگی می‌باشد. این جواب می‌بایست دارای دو خصصیت مهم ذیل باشد:

۱- به صورت تصادفی انتخاب شود. ۲- به نحوی از روی جواب قبلی، به دست آید.

لذا به روش مشابه با آن چه که جواب اولیه به دست آمد، جواب همسایگی نیز تولید می‌گردد. بدین منظور ابتدا عدد تصادفی برای هر گره انتخاب، سپس عدد به دست آمده در شماره انتخاب قبلی به دست آمده، ضرب می‌گردد. از آنجایی که ممکن است عدد به دست آمده از یک بزرگتر باشد، لذا تنها قسمت اعشاری آن انتخاب می‌شود. عدد حاصله، عددی تصادفی است که با توجه به جواب قبلی به دست آمده است و همانند انتخاب جواب اولیه بررسی می‌گردد که عدد تصادفی در کدام بازه قرار گیرد. ذیلاً الگوریتم پیشنهادی که در آن شروط تعادل و توقف، پارامترها و مقدارهی آن‌ها لحاظ شده اند، ارایه می‌گردد:

۱- مقدار دهی اولیه متغیرها: $T_0 = A$ ،$T = A_1$ ،$S_{jk} = 0$ ،$U_{ij} = 0$

۲- یک نقطه از فضای مسأله را انتخاب کن و در S برابر کروموزوم اولیه بگذار و $F(S)$ را محاسبه کن

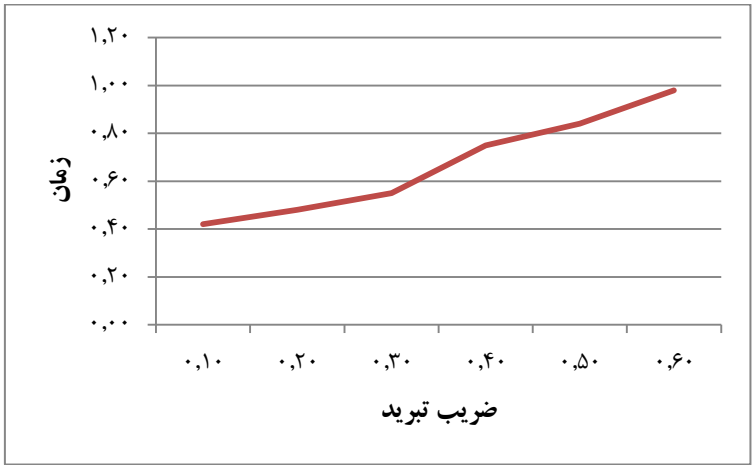
۳- اگر $T < T0$ به گام ۴ برو، در غیر اینصورت به گام ۶ برو.
۴- نقطه S_1 را از روی نقطه S یعنی کروموزوم اولیه بساز و $f(s_1)$ و را انتخاب کن
۵- اگر $U < e^{\frac{-\Delta E}{T}}$ باشد، به گام ۷ برو و در غیر اینصورت به گام ۶ برو.
۶- $U = u + 1$ و به گام ۲ برو

پایان

مقادیر S_{jk} و U_{ij} متغیرهای مسأله هستند که با توجه به هر مسأله توسط کاربر تعیین می‌گردند. از آن جایی که خصوصیات هر مسأله متفاوت می‌باشد می‌بایست چندین بار مسأله تا چندین مرحله، به طور آزمایشی حل گردد، تا پارامترهای کنترلی فوق شامل τ_{jk} تعیین گردند. به لحاظ وقت گیر بودن این مراحل انجام محاسبات فوق با برنامه کامپیوتری نوشته شده حل شده است.

ضریب تبرید (کاهش دما)

این پارامتر تاثیر بسزایی در کیفیت و سرعت همگرایی کیفی و جستجوی دقیق تر در هر تکرار را دارد. از آنجا که قانون کاهش دما با فاکتور تبرید صورت می‌گیرد، هر چه دقیق تر انتخاب شود تکرارها متناسب تر رقم می‌خورد و امکان بروز عدم دستیابی به جواب‌های برتر نهایی را کاهش داده و این خود تاثیر مستقیم بر پیدایش معیارهای ارزیابی بهتر خواهد داشت. بدیهی است هر چه این مقدار بالا باشد، سیستم دیرتر سرد و نقاط بیشتری از فضای جواب جستجو می‌شود. اما زمان حل مطابق شکل۲ افزایش می‌یابد. بنابراین تعیین این ضریب تبادلی بین کیفیت جواب‌ها و سرعت پاسخگویی ایجاد می‌کند. همانطوری که در این شکل مشاهده می‌شود کاهش ضریب تبرید از ۰,۶ به ۰,۱ زمان را از ۰,۹۸ به ۰,۴۲ کاهش می‌یابد.



شکل۲. رابطه ضریب تبرید و زمان

مثال عددی و نتایج محاسبات

برای تفهیم مسئله یک مثال فرضی با اطلاعات داده شده در جدول زیر تولید گردید. ابتدا جواب دقیق مثال در حجم کم با استفاده از نرم‌افزار گمز به‌دست می‌آید، سپس با جواب به‌دست آمده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده در حجم بزرگ مقایسه می‌شود.

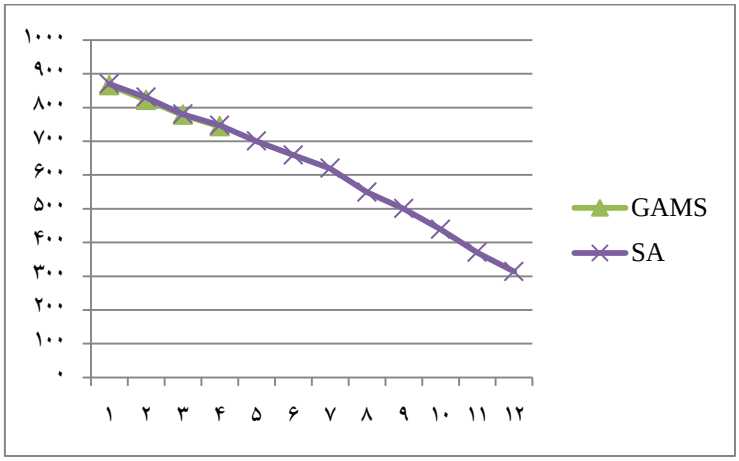
جدول زیر پارامترها و نتایج حاصل از حل مدل ارائه شده توسط الگوریتم دقیق و فرا ابتکاری می‌باشد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود ۱۲ نمونه برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شده است. نمونه‌های در نظر گرفته شده توسط دو روش حل دقیق(گمز) و الگوریتم تبرید شبیه سازی شده حل شده است. نتایج حاصله بیانگر آن است که الگوریتم حل دقیق(گمز) با توجه تابع هدف که از جنس هزینه می‌باشد، در حجم کم، عملکرد بهتری نسبت به روش تبرید شبیه سازی شده داشته است. با توجه به جدول ۵ الگوریتم حل دقیق تنها تا نمونه موردی ۴ قادر به حل مساله می‌باشد و برای حل نمونه موردی ۵ تا ۱۲ (حجم بزرگ) از روش تبرید شبیه سازی شده شده استفاده شده است.

جدول۵. نتایج حاصل از الگوریتم‌های دقیق و فرا ابتکاری

نمونه‌ها				پارامترها و توابع هدف	
	q	r	P	z_{GAMS}	Z_{SA}
نمونه ۱	۴	۲	۴۰	۸۶۵,۹	۸۷۰,۳۲
نمونه ۲	۴	۳	۴۰	۸۲۲,۳۲	۸۳۰,۲۳
نمونه ۳	۴	۴	۴۰	۷۷۸,۰۰	۷۷۹,۸۸
نمونه ۴	۴	۵	۴۰	۷۴۴,۲۲	۷۴۷,۱۲
نمونه ۵	۵	۲	۵۰	–	۷۰۰,۱۲
نمونه ۶	۵	۳	۵۰	–	۶۵۹,۱۲
نمونه ۷	۵	۴	۵۰	–	۶۱۹,۴۵
نمونه ۸	۵	۵	۵۰	–	۵۴۸,۹۹
نمونه ۹	۶	۲	۶۰	–	۵۰۰,۲۱
نمونه ۱۰	۶	۳	۶۰	–	۴۳۸,۸۳
نمونه ۱۱	۶	۴	۶۰	–	۳۷۰,۲۳
نمونه ۱۲	۶	۵	۶۰	–	۳۱۳,۵۰
میانگین	۵	۳,۵	۵۰	۵۲۸,۸۶۵	٦١٤,٨٣

برای حل مدل ارائه شده از الگوریتم تبرید شبیه سازی شده و نرم‌افزار متلب ۲۰۱۵ کدنویسی استفاده شده است. از طرف دیگر روش حل دقیق نیز در نرم‌افزار گمز۲۴ برای مسائل در حجم کم کدنویسی گردیده است. کدهای نوشته شده روی رایانه قابل‌حمل با پردازنده هفت هسته ای و حافظه داخلی ۴ گیگابایت و سیستم عامل ویندوز۷ اجرا گردید.

نمودار زیر مقایسه توابع هدف دو رویکرد حل متفاوت را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم حل دقیق همانطور که انتظار می‌رود عملکرد بهتری در حجم کم تا نمونه۴ نسبت به تبرید شبیه سازی شده داشته است. نزدیکی جواب‌های دو الگوریتم در حجم نمونه کم بیانگر عملکرد مناسب الگوریتم فراابتکاری طراحی شده می‌باشد. شیب زیاد الگوریتم تبرید شبیه سازی نیز حاکی از حساسیت بالای این روش به مقادیرp می‌باشد. همانطور که مشخص است هنگام تغییر مقادیر p نمودار تابع هدف با شیب متفاوتی واکنش نشان می‌دهد.



شکل۳. مقایسه توابع هدف در روش‌های مختلف

همچنین با توجه به اینکه مسئله شبیه مسائل مکانیابی و تخصیص می‌باشد، مدل ارائه شده با مدل لیبراتور و همکاران(۲۰۱۱) مقایسه شده است. مقایسه انجام شده در دو بخش می‌باشد:

الف) آنالیز تأثیر بیش‌ترین میزان افزایش ظرفیت در تسهیلات بر میزان هزینه:

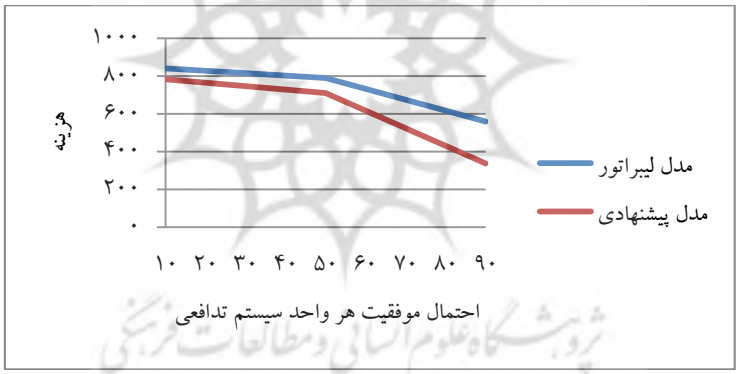
شکل۴، تأثیر مقادیر مختلف افزایش ظرفیت در هر تسهیل را بر روی میزان تابع هدف مدافع، برای m=۴ (۵ تسهیل و ۴۰ مشتری) نشان می‌دهد. زیرا مهم‌ترین هدف در این مدل‌سازی تعیین بودجه‌ریزی صحیح برای محافظت از تسهیلات است.

شکل٤. آنالیز تاثیر بیش‌ترین میزان افزایش ظرفیت در تسهیلات

همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش مقدار بیش‌ترین میزان افزایش ظرفیت تسهیلات، میزان تابع هدف مدافع (بودجه لازم برای مدافع) نیز افزایش یافته، زیرا هر چه بیش‌ترین میزان افزایش ظرفیت تسهیلات، مقدار بزرگ‌تری داشته باشد، افزایش ظرفیت در هر کدام از تسهیلات نیز مقادیر بیش‌تری می‌گیرد. از آنجائی‌که مقدار افزایش ظرفیت در هر کدام از تسهیلات به صورت مستقیم در تابع هدف دوم سطح اول مدل تأثیرگذار است، با افزایش مقدارش منجر به افزایش هزینه برای بودجه‌ریزی مدافع برای مستحکم‌سازی تسهیلات می‌گردد. این امر صحت رفتار مدل را نشان می‌دهد. همچنین مقایسه میان مدل پیشنهادی و مدل لیبراتور و همکاران، با توجه به شیب بیشتر نمودار لیبراتور، بیانگر آن است که مدل پیشنهادی با میزان هزینه کمتری می‌تواند افزایش ظرفیت در تسهیلات را داشته باشد.

ب) آنالیز تأثیر احتمال موفقیت هر واحد سیستم تدافعی نوع rام بر میزان هزینه:

شکل۵ تأثیر مقادیر مختلف احتمال موفقیت هر واحد سیستم تدافعی نوع r ام بر میزان هزینه مدافع را برای m=۴ (۵ تسهیل و ۴۰ مشتری) نشان می‌دهد.



شکل ۵. آنالیز تأثیر احتمال موفقیت هر واحد سیستم تدافعی نوع rام بر میزان هزینه

همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش احتمال موفقیت هر واحد سیستم تدافعی نوع rام، میزان هزینه تحمیل شده به مدافع کاهش می‌یابد. با افزایش احتمال موفقیت هر واحد سیستم تدافعی نوع rام، در صورت حمله به هر تسهیل، بخش کم‌تری از ظرفیت آن تسهیل از بین رفته و پس از حمله نیاز کم‌تری به هزینه کردن برای افزایش ظرفیت تسهیلات و یا برون‌سپاری تقاضا

برای برآورده کردن تقاضای مشتریان وجود خواهد داشت. این امر صحت رفتار مدل را نیز مشخص می‌کند. همچنین مقایسه مدل لیبراتور با مدل پیشنهادی بیانگر آن است که احتمال موفقیت مدل لیبراتور با هزینه بیشتری امکانپذیر است و احتمال موفقیت مدل پیشنهادی با هزینه کمتری مهیا می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار مفهوم مستحکم‌سازی احتمالی و تعداد حملات احتمالی با سطوح شدت حملات متفاوت، به طور همزمان در مسئله میانه ممانعتی به‌کار گرفته شده است. مسئله به صورت یک برنامه‌ریزی دو سطحی فرموله شده است. در سطح بالا، مهاجم با در نظر گرفتن این‌که به کدام تسهیلات و با چه سطح شدتی حمله شود، به دنبال وارد کردن بیشترین اختلال به سیستم است. در حالیکه در سطح پایین، مدافع با در نظر گرفتن این‌که کدام تسهیلات احداث شوند و چه تعداد مدافع برای هر تسهیل قرار داده شود، به دنبال هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های احداث تسهیل در یک مکان و هزینه تقاضای وزنی قبل و بعد ازحمله است. روش فراابتکاری به نام الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده برای حل این مسئله پیشنهاد می‌شود و با حل یک مثال کارایی آن در مقایسه با حل دقیق توسط نرم‌افزار گمز و حل فراابتکاری سنجیده شده است. نتایج بیانگر آن است که با افزایش میزان ظرفیت تسهیلات، میزان تابع هدف مدافع (بودجه لازم برای مدافع) نیز افزایش یافته، زیرا هر چه بیش‌ترین میزان افزایش ظرفیت تسهیلات، مقدار بزرگ‌تری داشته باشد، افزایش ظرفیت در هر کدام از تسهیلات نیز مقادیر بیش‌تری می‌گیرد. برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود مسئله R میانه ممانعتی با بیش از سه سطح و الگوریتم‌های ابتکاری و یا فراابتکاری همانند ژنتیک و شبکه عصبی و... در نظر گرفته شود.

منابع

اکبری، مریم، جعفرآبادی، محمود جانلو، مهدی، جامیری، عاطفه، *ارائه یک مدل سه سطحی مکان یابی تسهیلات در مسأله R- میانه ممانعتی*، هشتمین کنفرانس بین المللی انجمن ایرانی تحقیق در عملیات، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ۱۳۹۴

پرواسی، سیدپارسا، بشیرزاده، رضا، خوش الحان، فرید، *ارائه یک مدل پوششی مستحکم سازی به منظور محافظت از تسهیلات در معرض اختلال در مسئلهٔ r میانه ممانعتی با رویکرد بازی استکلبرگ*، نشریه تخصصی مهندسی صنایع، دوره۵۱، شماره ۱، ۱۳۹۶، ۴۵-۵۸

جبل عاملی، محمد سعید، شهانقی، کامران، حسنوی، رضا، نصیری، محمدرضا، *ارائه مدل ترکیبی مکانیابی تسهیلات حساس*، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، دوره ۲۰، شماره۴، ۱۳۸۸، ۶۵-۷۶

کمالی، سیده فرزانه، ویسی، گلاره، *ارائه ی روشی نوین مبتنی بر تئوری بازی‌های غیرهمکارانه برای حل مسئله ی تخصیص محافظ*، کنفرانس بین المللی پژوهش‌های نوین در علوم مهندسی،۱۳۹۵

محمودجانلو، مهدی، خادمی، علیرضا، *ارائه یک مدل ریاضی دوسطحی جدید جهت مکانیابی ومستحکم سازی تسهیلات خدمات رسان درمساله R- میانه ممانعتی*، اولین همایش ملی پژوهش‌های مهندسی صنایع، ۱۳۹۳

یقینی، مسعود، اخوان کاظم زاده, محمد رحیم، *الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری*، انتشارات جهاد دانشگاهی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ۱۳۹۵

Aksen, D, leng, S., & Aras, N, (2014),” A bilevel partial interdiction problem with capacitated facilities and demand outsourcing”, *Computers & Operations Research*, Vol 41, p. 346-358.

Aksen, D, Piyade, N., & Aras, N, (2010), “The budget constrained r-interdiction median problem with capacity expansion ”,*Springer-Verlag* , p. 269-291.

Albareda, M ,Yolanda, H., & Justo, P, (2015), "The reliable *p*-median problem with at-facility service", *European Journal of Operational Research,* Vol 245 , p. 656–666.

Hegeman, J, Peidro, D, Alemany, M., & Manuel, M, (2014)," A Decentralized Production and Distribution Planning Model in an Uncertain Environment", *Supply Chain Management Under Fuzziness, Studies in Fuzziness and Soft Computing*, Vol 313, 318-330.

Jairo, R. Montoya, T, Diego, A., & Ortiz,V, (2014)," Collaboration and information sharing in dyadic supply chains: A literature review over the period 2000–2012" , *Estudios Gerenciales*, Vol 30, p. 343–354.

Khalili, K., & Ghasemi, P, (2016), " Uncertain Centralized/Decentralized Production-Distribution Planning Problem in Multi-Product Supply Chains: Fuzzy Mathematical Optimization Approaches",*Industrial Engineering & Management Systems* , Vol.15 p.156-172

Konak ,A, Sadan, K , Lawrence V., & Snyder, F, (2015)," A Game-Theoretic Genetic Algorithm for the reliable server assignment problem under attacks", *Computers & Industrial Engineering,* Vol 85 ,p. 73–85

Liberatore, F, Scaparra, M, Daskin, P., & Mark S, (2011), "Analysis of facility protection strategies against an uncertain number of attacks: The stochastic R- interdiction median problem with fortification," *Computers & Operations Research* 38, p. 357–366.

Losada, C, Scaparra, M, Paola, C., & Richard L., (2010) "On a bi-level formulation to protect uncapacitated p-median systems with facility recovery time and frequent disruptions," *Electronic Notes in Discrete Mathematics 36*, p. 591–598.

Losada, C, Scaparra, M, Paola, C, Richard L., & Mark S., (2012), "The stochastic interdiction median problem with disruption intensity levels ",*Springer Science+Business Media,* p. 345-365.

Scaparra, S, Maria P., Church, D., & Richard L., (2008), "A bilevel mixed-integer program for critical infrastructure protection planning ", *Computers&Operations Research 35* ,p. 1905 – 1923.

Zhu, Y, Zheng, Z., Zhang, X., & Cai K., (2013), "The r-interdiction median problem with probabilistic protection and its solution algorithm ",*Computers&OperationsResearch* 40,p.451-462.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی