

مدلسازی عدم تقارن اطلاعات در مساله حمله به شبکه حمل و نقل مواد خطرناک

امیرسامان خیرخواه، دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

حمیدرضا نویدی، دانشیار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

معصومه مسی بیدگلی (نویسنده مسئول)، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، همدان

E-mail: bidgoli_m2000@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۲۴ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۵

چکیده

در این مقاله، مساله توزیع مواد خطرناک در شرایطی مورد بررسی قرار می‌گیرد که در آن از یک سو، توزیع‌کننده درصدد انتخاب مسیرهای اقتصادی با کمترین هزینه بر روی شبکه است و از سوی دیگر به منظور افزایش ایمنی حمل مواد خطرناک، آژانسی نظارتی به عنوان مهاجم، در صدد است که تصمیم توزیع‌کننده برای عبور از کمان‌های شبکه را تحت کنترل قرار دهد و در صورتی که توزیع‌کننده از این کمان‌ها عبور نماید، از وی جریمه دریافت نماید. در این تحقیق، تعارض موجود بین دو تصمیم‌گیرنده در حالتی که آن‌ها درک یکسانی از اطلاعات شبکه ندارند، در قالب مدلی دوسطحی مدلسازی می‌شود. از آنجا که چنین مساله‌ای از نوع مسایل محاسباتی دشوار محسوب می‌شود و روش‌های دقیق برای حل این مسایل زمانبر است، دو الگوریتم فراابتکاری دوسطحی برای حل مساله توسعه داده می‌شود. همچنین به کمک نتایج حاصل از حل مسایل تصادفی در ابعاد مختلف، کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی در مقایسه با یکدیگر تحلیل می‌شوند.

واژه های کلیدی: حمله به شبکه، حمل مواد خطرناک، مسیریابی وسایل نقلیه، عدم تقارن اطلاعات، برنامه‌ریزی دوسطحی

۱. مقدمه

اکثر مدل‌های موجود در ادبیات موضوع، با هدف کمینه کردن ریسک در طول کوتاهترین مسیر بین زوج گره‌های ابتدایی و انتهایی مشخصی ارائه شده‌اند. با این وجود در بسیاری از کاربردهای زندگی واقعی، مساله توزیع این مواد خطرناک در بین مجموعه‌ای از مشتریان که بر روی گره‌های شبکه قرار گرفته‌اند و از طریق کمان‌ها به یکدیگر متصل شده‌اند، مطرح است. این مساله، تحت عنوان "مساله مسیریابی وسایل نقلیه" شناخته می‌شود که از جمله مسایل شناخته‌شده در حوزه تحقیق در عملیات است و تحقیقات زیادی، طی چند دهه اخیر بر روی این مساله و روش‌های حل آن انجام شده‌است. Vural، Eksioglu و Reisman (۲۰۰۹)، مروری آماری بر روی مطالعات صورت گرفته بر روی مساله VRP انجام داده‌اند. لاپورته (۱۹۹۲) مروری بر روش‌های حل ارائه‌شده برای این مساله تا اواخر دهه ۱۹۸۰ با تمرکز بر روی روش‌های حل دقیق انجام داد. Toth و Vigo (۲۰۰۱) نیز مروری بر مدل‌ها، آزادسازی‌ها و الگوریتم‌های دقیق مبتنی بر روش‌های شاخه و کران را ارائه کردند. [Eksioglu, Vuran and Reisman, 2009]

بخش عمده‌ای از تحقیقات صورت گرفته در حوزه VRP، به مطالعه مساله مورد نظر در شرایطی پرداخته‌اند که صرفاً تصمیمات توزیع‌کننده بر عملکرد شبکه تاثیرگذار است. در بخشی از مسایل دنیای واقع، با موارد کاربردی مواجهیم که در این مسایل نه تنها توزیع‌کننده بلکه تصمیم‌گیرنده متعارضی وجود دارد که مانع از دست یافتن توزیع‌کننده به اهدافش به صورت کامل می‌شود. مسایلی از این دست، تحت عنوان "مساله حمله به شبکه" شناخته می‌شود. هدف اولیه حمله به شبکه، کمینه کردن بیشینه جریان مواد در طول شبکه‌ای با ظرفیت محدود بود که توسط دشمنی با منابع محدود، مورد حمله قرار می‌گیرد. این مساله برای اولین بار، به منظور حمله به خطوط تغذیه دشمن در طول جنگ ویتنام مورد استفاده قرار گرفت [McMasters and Mustin (۱۹۷۰)]. از جمله تحقیقات انجام گرفته در این زمینه عبارتند از: Kevin و دیگران (۲۰۱۱)، Royset و Wood (۲۰۰۷)، Lim و Smith (۲۰۰۷)، Claudio و دیگران (۲۰۱۰)، Rocco و Ramirez-Marquez (۲۰۰۹)، و دیگران (۲۰۰۹). گروه دیگری از مدل‌های حمله به شبکه، مساله بیشینه کردن کوتاهترین مسیر است. در این مساله، کاربر شبکه به دنبال این است که کوتاهترین

هر روزه حجم بسیار زیادی از مواد خطرناک در طول جاده‌های سراسر دنیا جابجا می‌شوند که به واسطه ماهیت این مواد، حملشان می‌تواند با سطوح بالایی از ریسک همراه باشد. برای نمونه، تصادف یک وسیله نقلیه حامل مواد آتش‌زا یا سمی ممکن است منجر به حوادث ناگواری در طول بزرگراه شود و زندگی رانندگان و ساکنین حاشیه بزرگراه را به خطر اندازد.

مواد انفجاری، رادیواکتیو، سمی، موادی که دارای خاصیت اکسیده کردن یا خوردگی هستند، گاز فشرده، مواد قابل اشتعال و مواردی از این قبیل تحت عنوان مواد خطرناک شناخته می‌شوند. به علت اینکه حمل این مواد، اثرات غیرقابل بازگشتی بر سلامت و امنیت عمومی جامعه دارد، حمل این مواد طی سال‌های گذشته از سوی دولت‌ها و محققین مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. Caramia, Bianco, Gzara و Erkut، Xie, Giordani و دیگران، Wei و Xiao, Wang، Jiang و دیگران از جمله محققینی هستند که اخیراً کارهای خوبی در این زمینه ارائه نموده‌اند. [Gzara and Erkut, 2008, Garamia, Bianco and Giordani, 2009, Xie, et al, 2012, Xwe and Xiao, 2013, Jian et al, 2014]. روشی موثر برای کاهش ریسک حمل مواد خطرناک، محدود کردن حامل‌های این مواد برای عبور از جاده‌هایی مشخص است. به این منظور اکثر شهرهای بزرگ دنیا، "مسیرهایی برای عبور حامل‌های مواد خطرناک" طراحی کرده‌اند. Erkut و Gzara و Kara و Verter مساله طراحی شبکه حمل مواد خطرناکی را مطالعه کردند که در آن دولت، شبکه امنی را برای عبور حامل‌های مواد خطرناک طراحی می‌کند و توزیع‌کنندگان، کوتاه‌ترین مسیرها روی این شبکه را انتخاب می‌کنند. روش دیگری که برای کاهش آسیب‌های ناشی از حمل این مواد وجود دارد، تنظیم مقرراتی برای کنترل جاده‌های شهری و روستایی از طریق جریمه کردن حامل‌های خاطی، توقیف این حامل‌ها و جلوگیری از ادامه مسیر آن‌ها و مقرراتی نظیر این است. Zhang و Rosing، Hodgson، مکانیابی ایستگاه‌های بازرسی را مورد بررسی قرار دادند که حامل‌های مواد خطرناکی را که از مسیرهای با ریسک بالا عبور می‌کنند را جریمه می‌کنند [Gzara and Erkut, 2008, Verter and Kara, 2004, Hodgson, Rosing and Zhang, 1996]

مدلسازی عدم تقارن اطلاعات در مساله حمله به شبکه حمل و نقل مواد خطرناک

کردند. نکته مهمی که در مورد چنین بازی‌هایی وجود دارد این است که در دنیای واقع عمدتاً دو بازیکن درک یکسانی از اطلاعات شبکه ندارند یا به عبارت دیگر، عدم تقارن اطلاعات بین بازیکنان وجود دارد. در این مقاله، فرض عدم تقارن اطلاعات بین مهاجم و مدافع، مورد مطالعه قرار می‌گیرد و بازی شکل گرفته بین این دو تصمیم‌گیرنده متعارض که تحت عنوان بازی استکلبرگ مهاجم-مدافع شناخته می‌شود [Bard, 1998]، در قالب مدلی دوسطحی، مدلسازی و روش‌های حل مناسب و کارآیی برای حل این مدل پیچیده محاسباتی ارائه می‌شود. به کمک مدل طرح‌شده در این مقاله، می‌توان به سوالات زیر پاسخ داد:

(۱) بهترین طرح حمله به شبکه از سوی آژانس نظارتی چیست و بهتر است کدام کمان‌ها مورد بازرسی قرار گیرند تا ریسک عبور حامل‌ها در طول شبکه کمینه شود؟

(۲) کدامیک از مسیرها باید توسط توزیع‌کننده انتخاب شوند به گونه‌ای که هزینه توزیع مواد خطرناک و سرویس‌دهی به مشتریان کمینه شود؟

(۳) اثر دقیق تخمین‌های توزیع‌کننده و در نظر گرفتن عدم تقارن اطلاعات بر تصمیمات اتخاذشده توسط مهاجم چیست؟

(۴) فرض می‌کنیم که مهاجم از تخمین‌های توزیع‌کننده در مورد جریمه‌های کمان‌ها اطلاع دارد. اگر توزیع‌کننده، این پارامترها را به صورت نادرستی تخمین بزند، ریسک تصمیم‌گیری اشتباه آژانس نظارتی با حمله نکردن به کمان‌هایی خاص، افزایش می‌یابد. میزان این ریسک تصمیم‌گیری در چه حدی است؟

مقاله حاضر به اینصورت سازمان‌دهی شده است که: در بخش ۲، مروری بر تحقیقات صورت گرفته در حوزه حمله به شبکه ارائه می‌شود. مدل ریاضی دو سطحی برای مدلسازی مساله حمله به شبکه مسیریابی حامل‌های مواد خطرناک تحت شرایط عدم تقارن اطلاعات در بخش ۳ پیشنهاد می‌شود. در بخش ۴، الگوریتم‌های تکامل تدریجی دوسطحی و الگوریتم ژنتیک دوسطحی برای حل مدل دو سطحی فوق، توسعه داده می‌شوند و در بخش ۵، کارآیی این الگوریتم‌ها با پیاده‌سازی آن‌ها بر روی مسایلی تصادفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش پایانی نیز، نتایج و تحقیقات آتی مورد بحث قرار می‌گیرد.

مسیر بین گره مبدا و مقصد در یک شبکه جهت‌دار (یا غیرجهت‌دار) را برای عبور انتخاب نماید. در این شرایط، مهاجمی در تلاش است تا با حمله به شبکه (از طریق طولانی‌تر کردن طول کمان‌ها با استفاده از منابعی محدود)، طول کوتاه‌ترین مسیر را حتی‌الامکان بیشینه نماید. برخی از تحقیقات خوب انجام گرفته در این حوزه عبارتند از: Wood and, 2008, [Bailey and Bayrak Israeli, 2008]

علاوه بر دو حوزه پیشینه جریان و کوتاه‌ترین مسیر، حمله به شبکه می‌تواند در حوزه مساله توزیع و مسیریابی نیز کاربردهای مهمی داشته باشد. برای اولین بار خیرخواه، نویسدی و مسی بیدگلی، [Naviddi, Kheirkhah and Messi Bidgoli, 2015] مساله حمله به شبکه توزیع مواد خطرناک را تحت شرایطی مورد بررسی قرار دادند که در آن تضاد منافع بین دو تصمیم‌گیرنده متعارض مطالعه می‌شود. به این ترتیب که از یک سو توزیع‌کننده به دنبال این است که به اقتصادی‌ترین شکل ممکن و با کمترین هزینه، مواد خطرناک را در بین مشتریان در طول شبکه توزیع کند. از سوی دیگر، آژانس نظارتی جهت افزایش ایمنی جاده‌ها و کاهش میزان ریسک ناشی از حمل مواد خطرناک در طول جاده‌ها در تلاش است تا با اخذ جریمه از حامل‌ها، آن‌ها را مجبور نماید تا از کمان‌هایی با ریسک پایین‌تر عبور نمایند، هرچند این کمان‌ها هزینه توزیع بالاتری را برای توزیع‌کننده به همراه داشته باشند. از آنجا که آژانس نظارتی، منابع کافی برای نظارت بر کلیه کمان‌های شبکه در اختیار ندارد، ناچار است تا با قرار دادن ایستگاه‌های بازرسی در برخی از کمان‌ها حتی‌الامکان ریسک عبور این حامل‌ها را کمینه کند. قرار گرفتن ایستگاه بازرسی بر روی کمان، اصطلاحاً به نام "حمله به آن کمان" شناخته می‌شود و آژانس نظارتی، مهاجمی است که شبکه را برای توزیع‌کننده، ناامن می‌کند. در مقابل توزیع‌کننده به عنوان مدافع، مسیرهای بهینه را بر روی این شبکه تغییر یافته به گونه‌ای انتخاب می‌کند که مجموع هزینه‌های توزیع و جریمه به کمترین مقدار خود کاهش یابد.

[Messi Bidgoli and Navidi, Kheirkhah, 2015] مساله مورد نظر را برای شرایطی که دو تصمیم‌گیرنده، درک یکسانی از اطلاعات شبکه دارند، فرموله کردند و مدل پیشنهادیشان را با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی-فراالبتکاری دوسطحی و هم‌چنین یک الگوریتم فراالبتکاری تکامل تدریجی دوسطحی حل

جدول ۱. مروری بر حوزه‌های مختلف کاربردی مسئله حمله به شبکه

محققین	زمینه مورد استفاده
Brown (2007)	مباحث امنیتی
Apostolakis and Lemon (2005)	تروریسم
McMasters and Mustin (1970)	عملیات‌های نظامی
Morton, Pan and Saeger (2007)	قاچاق مواد هسته‌ای
Pan (2005)	کنترل مرزها
Lim and Smith (2007)	شبکه‌های زنجیره تامین
Garg and Smith (2008)	تحلیل قابلیت اطمینان شبکه
Washburn and Wood (1995)	شبکه قاچاق دارو
Salmeron, Wood and Baldick (2004)	حفاظت از شبکه‌های توزیع برق در برابر حمله تروریست‌ها
Smith, Lim and Sudargho (2007)	شبکه‌های ارتباطی داده‌ها و صوت/خدمات نظامی و ترانزیت عمده
Granata, Steeger and Rebennack (2013)	فعالیت‌های شناسایی و تجسس، شبکه‌های حمل و نقل
Prince, Geunes and Smith (2013)	شبکه‌های تامین مواد از تامین‌کنندگان به شیوه‌ای رقابتی
Aksen and Aras (2012)	مساله حمله به شبکه‌های مکانیابی و حفاظت از تسهیلات

برای مدل کردن مساله حمله به شبکه مسیریابی حامل‌های مواد خطرناک (NIHVRP) با اطلاعات نامتقارن ارائه می‌شود.

۳. مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای مساله NIHVRP با اطلاعات نامتقارن

به منظور مدل‌سازی تعارض منافع بین توزیع‌کننده و آژانس نظارتی که تحت عنوان مساله حمله به شبکه یا بازی استکلبرگ شناخته می‌شود به مدل برنامه‌ریزی دوسطحی نیاز است که در سطح بالا، آژانس نظارتی به دنبال یافتن بهترین طرح حمله به شبکه است که طی آن مجموع جریمه‌های اخذشده از حامل‌های خاطی مواد خطرناک و ریسک مرتبط با این خودروهای خاطی، بیشینه شود. از سوی دیگر توزیع‌کننده در تلاش است تا با انتخاب بهترین مسیرها برای توزیع مواد خطرناک، مجموع هزینه‌های مرتبط با توزیع این مواد و جریمه‌های پرداخت‌شده را کمینه نماید. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیحی که در این مقاله برای مساله مسیریابی وسیله نقلیه ارائه می‌شود مبتنی بر مدل ریاضی جریان دو شاخصه برای مساله مسیریابی است. برخی از فرضیات در نظر گرفته‌شده برای مساله CVRP ارائه‌شده در سطح پایین مدل عبارتند از:

۲. مروری بر ادبیات مساله حمله به شبکه

موضوع حمله به شبکه و مسایل مرتبط در زمینه‌های متنوعی همچون قاچاق دارو، برنامه‌ریزی‌های نظامی، حفاظت از شبکه‌های انتقال برق در برابر حمله‌های تروریستی، کنترل بیماری‌های واگیر در بیمارستان‌ها و قاچاق مواد هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. به علت کاربرد گسترده این حوزه، در سال‌های اخیر محققین به طور گسترده‌تری به این موضوع پرداخته‌اند. بعضی از تحقیقات کاربردی مهم در این زمینه در حوزه‌های مختلف، در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱، گستردگی حوزه‌های کاربرد مساله حمله به شبکه را نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً ذکر شد، حمله به شبکه تاکنون در سه حوزه بیشینه جریان، کوتاهترین مسیر و توزیع و مسیریابی مورد مطالعه قرار گرفته است. خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌گرفته در زمینه حمله به شبکه در سه حوزه مذکور، در جدول ۲ نمایش داده شده است. تحقیق حاضر حالت تعمیم‌یافته‌ای از تحقیق انجام‌گرفته [Messi, Navidi, Kheirhah, 2015] و Bidgoli] برای حالتی است که دو بازیکن درک یکسانی از اطلاعات شبکه ندارند. در بخش بعد، مدل ریاضی دوسطحی

مدلسازی عدم تقارن اطلاعات در مساله حمله به شبکه حمل و نقل مواد خطرناک

جدول ۲. مطالعات انجام گرفته در حوزه حمله به شبکه

نویسنده	قطعی/تصادفی / نظریه بازی‌ها	مساله پیوسته / گسسته	یک / چند حمله	حمله به گره / کمان	شبکه جریان یک محصولی / چند محصولی	منابع محدود / نامحدود	شبکه جهت دار / غیر جهت دار	تابع هدف	روش حل
McMasters and Mustin (1970)	قطعی	گسسته	یک حمله	کمان	یک	محدود	دار	کمینه کردن ظرفیت جریان شبکه	یک مدل برنامه‌ریزی خطی
Steinrauf (1991)	قطعی	گسسته	یک حمله	کمان	یک	محدود	دار	کمینه کردن بیشینه جریان عبوری	چند مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح
Wood (1993)	قطعی	گسسته	یک حمله	کمان	یک	محدود	دار	کمینه کردن بیشینه جریان عبوری	چند مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح انعطاف‌پذیر
Washburn and Wood (1995)	نظریه بازی‌ها	گسسته	یک حمله	کمان	یک	محدود	جهت دار / غیر جهت دار	بیشینه کردن احتمال شناسایی	مدل بازی دو نفره با مجموع صفر
Cormican, Morton and Wood (1998)	تصادفی (موفقیت حمله و ظرفیت کمان‌ها تصادفی هستند.)	گسسته	یک و بیشتر	کمان	یک	محدود	دار	تکنیک‌های تقرب متوالی	مدل جریمه الگوریتم تجزیه
Lim and Smith (2007)	قطعی	گسسته	یک حمله	کمان	چند محصولی	محدود	جهت دار	چند هدف متفاوت همچون	PSDA
Rocco and Ramirez-Marquez (2009)	قطعی	گسسته	یک حمله	یک	یک	محدود	جهت دار / غیر جهت دار	هزینه، جریان شبکه و تابعی از مدت حمله	PSDA
Royset and Wood (2007)	قطعی	گسسته	یک حمله	یک	یک	محدود	دار	هزینه و جریان شبکه	الگوریتم ژنتیک برای DNIP
Dai and Poh (2002)	قطعی	گسسته و پیوسته	یک حمله	کمان	یک	محدود	دار	کمینه کردن بیشینه جریان	PSDA
Kennedy et al. (2011)	قطعی	گسسته	یک حمله	گره، کمان یا مختلط	یک	نامحدود (منابع مشابه یا متفاوت)	دار	کمینه کردن بیشینه جریان	برنامه‌ریزی دوسطحی
Zenklusen (2010)	قطعی	گسسته	یک حمله	کمان یا مختلط	یک	محدود	دار	کمینه کردن هزینه حمله برای یک کاربر مشخص	یک روش بهینه‌سازی تدریجی (PSDA) برای (SNIP)
Ramirez-Marquez and Rocco (2009)	تصادفی	گسسته	یک حمله	کمان	یک	محدود	جهت دار	کمینه کردن بیشینه احتمال فرار قاچاقچی	یک مدل عدد صحیح تصادفی
Dimitrov et al. (2008)	تصادفی (سناریوی تهدید مدافع، نامشخص است)	پیوسته	یک حمله	کمان	یک	محدود	جهت دار (شبکه دوبخشی)	یک مدل دقیق (MTNIP-E) و یک مدل تقریبی (MPNIM)	یک مدل عدد صحیح تصادفی
Akgün, Tansel and Wood (2011)	گسسته	گسسته	یک حمله	کمان	یک	محدود	دار	کمینه کردن هزینه حمله برای یک کاربر مشخص	یک مدل دقیق (MTNIP-E) و یک مدل تقریبی (MPNIM)
Smith, Lim and Sudargho (2007)	نظریه بازی	پیوسته	یک حمله	کمان / گره	چند محصولی	محدود	دار	بیشینه کردن ریسک مشاهده شده در طول شبکه توزیع مواد خطرناک	برنامه‌ریزی دوسطحی
Kheirkhah, Navidi and Messi Bidgoli (2015)	نظریه بازی	گسسته	یک حمله	کمان	چند محصولی	محدود	دار	بیشینه کردن ریسک مشاهده شده در طول شبکه توزیع مواد خطرناک	دو الگوریتم فراابتکاری دوسطحی

x_{ij} : متغیری صفر و یک است که در صورتی که حامل مواد خطرناک از کمان ij عبور نماید، مقدار ۱ و در غیراینصورت، مقدار ۰ می‌گیرد.

c_{ij} : هزینه عبور هر واحد از مواد خطرناکاز کمان ij ,

r_{ij} : ریسک ناشی از عبور حامل مواد خطرناکاز کمان ij ,

b_{ij} : بودجه مورد نیاز برای حمله به کمان ij ,

D_j : تقاضای مواد خطرناک مربوط به مشتری واقع در گره j .

f_{ij} : جریمه تخصیص داده شده به حامل خطای از کمان ij ,

\bar{f}_{ij} : تخمین توزیع‌کننده از جریمه تخصیص داده شده به حامل خطای عبوری از کمان ij ,

B : بودجه کل مهاجم به منظور حمله به کمان‌های شبکه،

H : ضریب تبدیل ریسک به هزینه.

C : ظرفیت هر حامل

با این اوصاف، می‌توان مساله را به صورت زیر مدل‌سازی نمود:

$$[NIHVRP_ABL]: \max_{y \in Y} Z_u = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n (f_{ij} + Hr_{ij}) x_{ij} y_{ij} \quad (1)$$

$$s.t. \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n b_{ij} y_{ij} \leq B, y_{ij} \in \{0,1\} \quad (2)$$

که در آن

$$x^* = \arg\{Z_l = \min_{x \in X} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n (D_j c_{ij} + y_{ij}^* \bar{f}_{ij}) x_{ij}\} \quad (3)$$

$$s.t. \sum_{\{i,j\} \in \delta(\{h\})} x_{ij} = 2, \forall h \in V \quad (4)$$

$$\sum_{\{i,j\} \in \delta(\{S\})} x_{ij} \geq 2[q(S)/C], \forall S \in \varphi \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = 2m \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall \{i,j\} \in E\{\{0,j\}: j \in V\} \quad (7)$$

$$x_{0j} \in \{0,1,2\}, \forall \{0,j\}, \forall j \in V \quad (8)$$

(۱) پارامترهای مدل CVRP مورد مطالعه در این مقاله، استاتیک و قطعی در نظر گرفته شده‌اند.

(۲) در این مدل، تقاضاها قطعی هستند و تقاضای هر مشتری بین حامل‌ها شکسته نمی‌شود.

(۳) کلیه وسایل نقلیه، همسان هستند.

(۴) مساله تک دپویی است و کلیه وسایل نقلیه در ابتدا در این دپو مستقر هستند.

(۵) برای وسایل نقلیه صرفاً محدودیت ظرفیت منظور می‌شود.

(۶) هدف از مساله سطح پایین، بیشینه کردن سود ناشی از خدمات‌دهی به مشتریان می‌باشد.

(۷) هزینه سفر بین هر زوج از مشتریان، نامتقارن است.

فرضیات مرتبط با مدل حمله به شبکه نیز عبارتند از:

(۱) مدل حمله به شبکه حاضر، صرفاً شامل حالت گسسته می‌باشد.

(۲) مهاجم جهت جلوگیری از دستیابی توزیع‌کننده به کلیه اهدافش، با محدودیت منابع مواجه است.

(۳) مهاجم و مدافع درک یکسانی از اطلاعات شبکه ندارند.

(۴) حمله صرفاً به کمان‌های شبکه صورت می‌گیرد.

فرض کنید (V, E) شبکه‌ای جهت‌دار باشد که V و E به ترتیب نشان‌دهنده مجموعه گره‌ها و کمان‌های این شبکه هستند. n مشتری در گره‌های این شبکه، پراکنده شده‌اند و مسیریابی سرویس‌دهی به این مشتریان توسط m تجهیز نقلیه مورد بررسی است.

فرض کنید $\varphi = \{S: S \subseteq V, |S| \geq 2\}$ زیرمجموعه‌ای از مشتریان باشد. با داشتن $S \subseteq V$ فرض کنید $g = |S|$ مکمل مجموعه S باشد و $\delta(S)$ برشی از مشتریان باشد که توسط S تعریف شده است (یعنی داریم: $\delta(S) = \{\{i,j\} \in E: i \in S, j \notin S\}$ یا $\{i \in S, j \notin S\}$).

با داشتن زیرمجموعه‌ای از مشتریان مانند S فرض کنید $q(S) = \sum_{j \in S} D_j$ نشان‌دهنده کل تقاضای مشتریان در این زیرمجموعه باشد. در مدل پیشنهادی

برای زیرمجموعه S داریم: $C(S) = q(S)/C$.

متغیرها و پارامترهای مدل مورد بحث به صورت زیر تعریف می‌شوند:

y_{ij} متغیری صفر و یک است که در صورتی که کمان ij توسط مهاجم مورد حمله قرار بگیرد، مقدار ۱ و در غیراینصورت، مقدار ۰ می‌گیرد.

و Colson و Savard (۲۰۰۵) مروری جامع بر روش‌های حل ارائه شده برای مدل‌های برنامه‌ریزی دوسطحی انجام داده‌اند. Israeli و Wood (۱۹۹۹) الگوریتم‌های موجود برای مسایل برنامه‌ریزی دوسطحی عدد صحیح آمیخته (BLMIP) را دسته‌بندی نمود و مشاهده کرد که هیچ‌یک از این الگوریتم‌ها نمی‌توانند برای حل مساله بیشینه کردن کوتاهترین مسیر مناسب باشند. دلیل اصلی برای این موضوع این است که بسیاری از این الگوریتم‌ها از جمله Wen و Yang (۱۹۹۰) از روشی مثبت استفاده می‌کنند، که به این معنی است که این روش‌های حل قابل کاربرد برای شرایطی هستند که همکاری مثبت قوی بین اهداف پیرو و پیشرو وجود دارد. همانند مساله بیشینه کردن کوتاهترین مسیر، مساله مورد مطالعه در این تحقیق نیز مساله‌ای است با اهداف متضاد و به همین دلیل، الگوریتم‌های موجود برای حل این نوع مساله، غیرکارآمد هستند. لازم به ذکر است که تعدادی الگوریتم‌های حل دقیق برای مدل‌های برنامه‌ریزی دوسطحی وجود دارند، از جمله Önal (۱۹۹۳)، که از روش‌های مثبت استفاده نمی‌کنند اما نتایج محاسباتیشان خیلی امیدبخش نیست و هیچ کدام از این الگوریتم‌ها برای حل مسایل با ابعاد بزرگ مورد استفاده قرار نگرفته‌اند و از نظر محاسباتی، پیچیده هستند. با این اوصاف، این نتیجه حاصل می‌شود که هیچ‌یک از الگوریتم‌های BLMIP موجود، کاندیداهای مناسبی برای حل کارای مدل دوسطحی پیشنهادی در این تحقیق نیست. در زیربخش بعدی، دو الگوریتم فراابتکاری به منظور حل کارای مدل دوسطحی پیشنهادی ارائه می‌شود.

۴-۱ ارائه دو الگوریتم فراابتکاری برای حل مدل

پیشنهادی

پیچیدگی مساله سطح پایین ملاحظه شده (CVRP)، ما را به سمت استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری هدایت می‌کند تا این مساله دوسطحی به صورتی کارا و در زمانی منطقی حل شود. در این بخش، دو الگوریتم تحت عناوین الگوریتم تکامل تدریجی دوسطحی و الگوریتم ژنتیک دوسطحی به منظور حل مساله مورد مطالعه توسعه داده می‌شود.

۴-۲ الگوریتم تکامل تدریجی دوسطحی توسعه داده شده

الگوریتم تکامل تدریجی دوسطحی پیشنهاد شده برای مساله مسیریابی وسیله نقلیه تحت شرایط حمله، شکل توسعه یافته‌ای

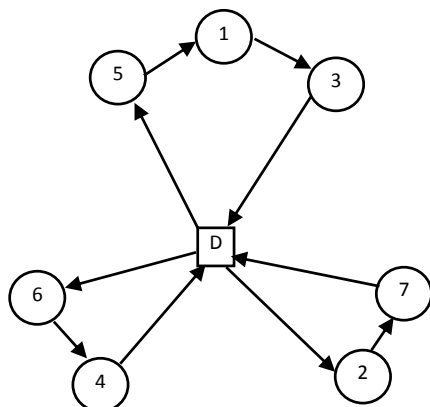
در مدل فوق، Z_u و Z_l به ترتیب توابع هدف برای مهاجم و مدافع هستند. همانطور که مشاهده می‌شود، مهاجم در تلاش است تا با حمله به برخی از کمان‌های شبکه، مجموع ریسک‌های کشف شده و جرایم دریافت شده از توزیع کننده خاطی را بیشینه نماید. از سوی دیگر، توزیع کننده نیز به دنبال کمینه کردن هزینه‌های توزیع ناشی از برآورده کردن تقاضای مشتریان در این شبکه مورد حمله قرار گرفته است. همانطور که در مدل فوق مشاهده می‌شود، مساله CVRP، بخشی از محدودیت‌های مساله حمله به شبکه به شمار می‌آید و به منظور دست یافتن به بهترین جواب مساله مورد مطالعه لازم است، ابتدا جواب بهینه مساله سطح پایین محاسبه شود.

مجموعه محدودیت‌های (۲) بیان می‌کنند که مجموع منابع مورد استفاده برای حمله به کمان‌های شبکه نباید از کل بودجه در دسترس برای حمله به شبکه فراتر رود. مجموعه محدودیت‌های (۴) تا (۸) به فرمولاسیون جریان دو شاخصه برای مساله CVRP مربوط می‌شوند. محدودیت (۴)، محدودیت‌های درجه برای هر مشتری است که طی آن برای زوج گره‌هایی که دپو را شامل نمی‌شود تنها یک کمان ورودی و یک کمان خروجی باید وجود داشته باشد. محدودیت (۵) که تحت عنوان محدودیت ظرفیت برای حامل‌های مواد خطرناک نامیده می‌شود، به نوعی تعمیم یافته محدودیت حذف زیرتور در مساله فروشنده دوره گرد است که اتصال گره‌ها برای هر تجهیز را تضمین می‌کند. علاوه بر این باعث می‌شود محدودیت ظرفیت هر تجهیز رعایت شود. محدودیت (۶) بیان می‌کند که m تجهیز باید در ابتدا از دپو شروع و در انتهای مسیر نیز به دپو بازگردند.

۴. روش‌های حل

همانطور که در بخش قبل بیان شد، مدل پیشنهاد شده در این تحقیق، مدل برنامه‌ریزی دوسطحی است که در آن مساله سطح پایین، یک مساله CVRP نامتقارن می‌باشد. مساله CVRP، حالت تعمیم یافته‌ای از مساله فروشنده دوره گرد است که جزء مسایل با پیچیدگی محاسباتی بالا محسوب می‌شود. از سوی دیگر، مدل‌های برنامه‌ریزی دوسطحی نیز طبیعتاً از جمله مسایل پیچیده محسوب می‌شوند و زمانی که مساله سطح پایین نیز مساله پیچیده‌ای باشد، این دشواری تشدید می‌شود. در سال‌های اخیر روش‌های حل جدیدی برای مدل‌های برنامه‌ریزی دوسطحی توسعه یافته‌اند. Bard (۱۹۹۸)، Stephan و Dempe (۲۰۰۲)

ملزم خواهد شد تا جریمه‌ای متناسب با ریسک کمان مربوطه را پرداخت نماید.



شکل ۱. نمونه‌ای از CVRP

برای مساله سطح بالا، ماتریس طرح حمله به شبکه، ماتریسی باینری همانند شکل ۲ با ابعاد $(n \times n)$ است که در آن اگر عنصر (i, j) مقدار ۱ را بگیرد، به این معناست که کمان مربوطه توسط مهاجم، مورد حمله قرار گرفته است و در غیراینصورت این کمان برای عبور مواد، امن است.

7	6	5	4	3	2	1	
0	0	1	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	1	2
1	0	1	0	0	1	0	3
0	1	0	0	0	0	1	4
1	0	0	1	0	0	0	5
0	0	0	1	0	1	1	6
0	0	1	0	0	0	0	7

شکل ۲. نمونه‌ای از طرح حمله به شبکه برای NIHVRP

گام اول (تکامل جمعیت‌های اولیه): برای شروع الگوریتم، لازم است جمعیت‌های اولیه‌ای که برای دو مساله سطح بالا و پایین به صورت تصادفی تولید شده‌اند و به ترتیب با NIP_POP و CVRP_POP نشان داده می‌شوند، را به صورت متقارن با هم ترکیب کنیم. تکامل متقارن به این معنی است که جمعیت تولیدشده برای هر یک از دو سطح برای مساله مربوط به سطح دیگر کپی می‌شود و بالعکس. چون این فرایند برای مسائل مربوط به دو سطح بالا و پایین مدل صورت می‌گیرد، از این رو تحت عنوان تکامل متقارن شناخته می‌شود. در این صورت برای هر

از الگوریتم تکامل تدریجی است که توسط Legillon، Liefoghe و Talbi (۲۰۱۲) معرفی شده است. در این الگوریتم تکامل تدریجی دوسطحی، دو الگوریتم ژنتیک کامل در هر تکرار اصلی از الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد تا جواب‌های به دست آمده برای هر سطح از مساله را بهبود دهد. فرایند ارزیابی توابع هدف در طول این الگوریتم‌های بهبود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این وضعیت، امکان دارد که هر الگوریتم بهبود، طی چند نسل از جمعیت‌ها تکرار شود و جواب را بهبود دهد. این الگوریتم در تلاش است تا دو زیرجمعیت متفاوت مربوط به دو سطح مساله را تدریجاً بهبود دهد و به صورت دوره‌ای، اطلاعات را با جمعیت دیگر مبادله نماید. استراتژی تکامل به این منظور استفاده می‌شود که نحوه تبادل اطلاعات بین دو جمعیت را مشخص نماید. گام انتهایی هر تکرار این است که دو زیرجمعیت با یکدیگر تبادل اطلاعات نمایند. گام‌های این الگوریتم عبارتند از:

گام صفر (نمایش جواب و شروع الگوریتم): استفاده از شکل نمایش مناسب برای جواب‌ها، یکی از مشخصه‌های اصلی الگوریتم‌های فراابتکاری برای دستیابی به جواب‌های بهتر است. برای مساله سطح پایین، از یک نمایش ترتیبی برای هر جواب مساله استفاده می‌شود که در آن به هر مشتری و هر مسیر، عددی تخصیص داده می‌شود. اعداد مربوط به مسیرها بزرگتر یا مساوی با (تعداد مشتریان + ۱) است. در این نمایش، اعداد تخصیص داده شده به هر مسیر، نشان‌دهنده مشتریان تخصیص داده شده به آن مسیر و ترتیبی است که بر اساس آن، این مشتریان از توزیع کننده خدمات دریافت می‌کنند. در این نوع نمایش، لازم است تا محدودیت‌های زیر چک شوند تا از موجه بودن جواب مربوطه اطمینان حاصل شود: (۱) تعداد مسیرها، (۲) ظرفیت وسایل نقلیه و (۳) هر مشتری باید تنها یکبار و صرفاً توسط یک وسیله نقلیه ملاقات شود. نمونه‌ای از نمایش حل برای مساله سطح پایین با ۷ مشتری، ۱ دپو و ۳ وسیله نقلیه که از نمایش ترتیبی [5,1,3,9,6,4,10,2,7,11] حاصل شده است، به صورت نمایش داده شده در شکل ۱ می‌باشد.

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، کمان‌های (۱ و ۳)، (۱ و ۵)، (۲ و ۱) و ... مورد حمله آژانس نظارتی قرار گرفته است و در صورتی که توزیع کننده از هر یک از این کمان‌ها عبور کند،

مدلسازی عدم تقارن اطلاعات در مساله حمله به شبکه حمل و نقل مواد خطرناک

رعایت می‌کند را انتخاب و در طرح حمله مقدار یک به آن تخصیص می‌دهیم.

زمانی که عملگرهای تقاطع و جهش بر روی جمعیت فعلی اعمال شود، افراد این جمعیت بر مبنای تابع هدف محاسبه شده بر مبنای مقادیر واقعی پارامترها، ارزیابی و مرتب می‌شوند. سپس عملگر انتخابی برای حفظ اندازه ثابت آرشیو و جمعیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. عملیات انتخاب و آرشیو کردن، دقیقاً بعد از اجرای الگوریتم‌های بهبود اجرا می‌شود. این استراتژی‌های آرشیو کردن، بهترین جواب‌های حاصل در هر سطح را ثبت می‌کند و از این که فرآیند تکامل، باعث تغییر کامل زیرجمعیت‌های یک نسل شود، جلوگیری می‌کند.

گام سوم (حل مساله مسیریابی حامل‌های مواد خطرناک): در این گام نیز، الگوریتم ژنتیک‌برای جمعیت تکامل یافته سطح پایین که در تکرار قبلی از ترکیب CVRP_POP با NIP_RELATED به دست آمده است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما باید دقت شود که در این گام، محاسبات تابع هدف مساله سطح پایین بر اساس مقادیر تخمین زده شده از پارامترهای جریمه (f_{ij}) انجام می‌گیرد.

برای نشان دادن جهش در مساله مسیریابی، دو تا از مشتریان تخصیص داده شده به دو حامل مجزا را انتخاب می‌کنیم و جای آن‌ها را در صورتی با هم عوض می‌کنیم که محدودیت ظرفیت حامل رعایت شود و علاوه بر این در طرح حمله مربوط به این جواب (NIP_RELATED)، کمان ورودی به مشتری، مورد حمله قرار نگرفته باشد. به عنوان مثال، یک جواب از جمعیت مساله مسیریابی و طرح حمله مربوط به این جواب را به صورت زیر در نظر بگیرید.

	7	6	5	4	3	2	1	
0	0	0	0	1	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	0	0	2
1	0	1	0	0	0	0	0	3
0	1	0	0	0	0	0	1	4
1	0	0	1	0	0	0	0	5
0	0	0	1	0	1	1	0	6
0	0	1	0	0	0	0	0	7

شکل ۳(الف). طرح حمله قبل از جهش

یک از سطوح بالا و پایین مساله به ترتیب جمعیت‌های جدیدی به صورت $NIP_POP = NIP_RELATED$ و $CVRP_POP = CVRP_RELATED$ تعریف می‌شوند. با ترکیب NIP_RELATED با CVRP_POP می‌توان هزینه‌های توزیع مرتبط با مساله سطح پایین CVRP را با استفاده از پارامترهای تخمین زده شده مربوط به جریمه مسیره‌ها (f_{ij}) محاسبه نمود. از سوی دیگر با ترکیب CVRP_RELATED با NIP_POP می‌توان تابع هدف مساله سطح بالا (NIP) را با استفاده از مقادیر واقعی پارامترهای جریمه (f_{ij}) محاسبه نمود. **گام دوم (حل مساله حمله به شبکه سطح بالا):** در هر تکرار، الگوریتم‌های بهبوددهنده‌ای بر روی جمعیت تکامل یافته سطح بالا که در گام قبلی از ترکیب CVRP_RELATED با NIP_POP به دست آمده است، اعمال می‌شوند، تابع هدف مساله سطح بالا بر اساس مقادیر واقعی پارامترهای جریمه (f_{ij}) محاسبه و بهترین جواب‌های به دست آمده آرشیو می‌شوند. در اولین گام از هر نسل، یک الگوریتم ژنتیک برای مساله حمله به شبکه اجرا می‌شود که عملگر جهشی به صورت نشان داده شده در شکل ۳ بر روی هر یک از جواب‌های جمعیت مربوط به مساله حمله به شبکه (NIP_POP) اعمال می‌شود. فرض کنید جواب مربوط به مساله مسیریابی که مساله حمله به شبکه بر اساس آن بهبود داده می‌شود، به صورت زیر باشد:

$$CVRP_RELATED = [5, 1, 3, 9, 6, 4, 10, 2, 7, 11]$$

به منظور جهش، یکی از کمان‌هایی را که در جواب فعلی مورد حمله قرار گرفته و مقدار یک دارد را انتخاب می‌کنیم و به آن مقدار صفر تخصیص می‌دهیم و یکی از کمان‌هایی که در CVRP_RELATED تجهیز از آن عبور می‌کند، در جواب فعلی مورد حمله قرار نگرفته است و محدودیت بودجه حمله را

	7	6	5	4	3	2	1	
0	0	0	0	1	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	0	0	2
1	0	1	0	0	0	0	0	3
0	1	0	0	0	0	0	0	4
1	0	0	1	0	0	1	0	5
0	0	0	1	0	1	1	0	6
0	0	1	0	0	0	0	0	7

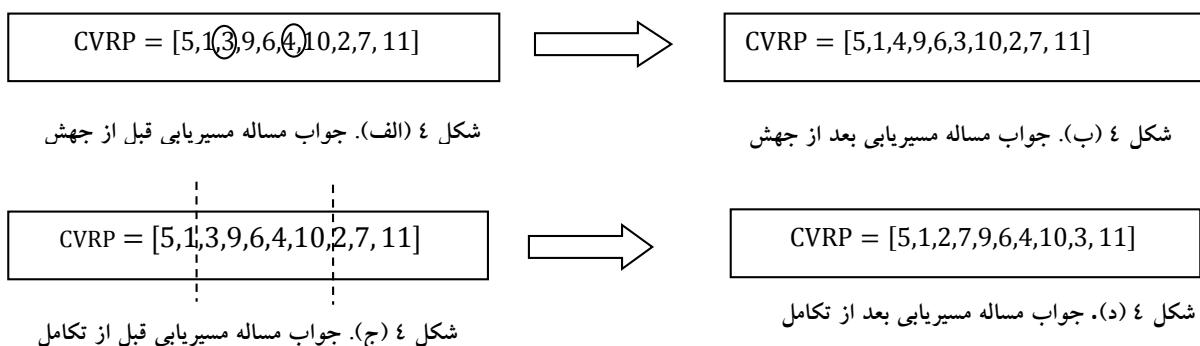
شکل ۳(ب). طرح حمله بعد از جهش

$$CVRP = [5,1,3,9,6,4,10,2,7,11]$$

NIP_RELATED=

	7	6	5	4	3	2	1	
0	0	1	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	1	2
1	0	1	0	0	0	1	0	3
0	1	0	0	0	0	0	1	4
1	0	0	1	0	0	0	0	5
0	0	0	1	0	0	1	1	6
0	0	1	0	0	0	0	0	7

جهش انجام گرفته در جواب فوق به صورت نشان داده شده در شکل ۴(ب) است:



شکل ۴.

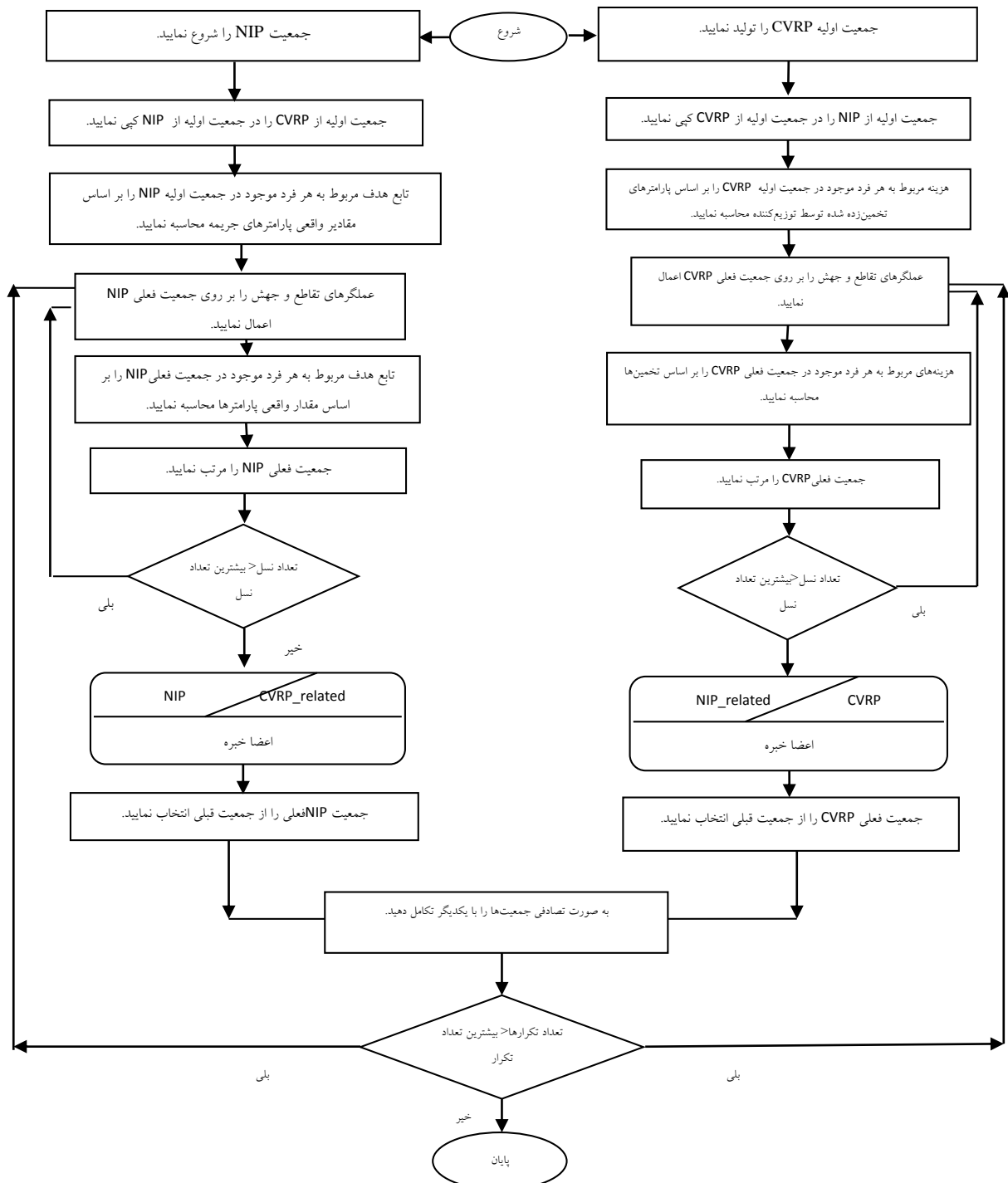
است که در گام اول الگوریتم انجام گرفت. جواب‌های حاصل از فرایند تکامل جمعیت‌ها برای مساله مربوط به هر سطح، به آرشیو مربوطه اضافه می‌شود و به منظور حفظ اندازه ثابت آرشیو، افراد مناسب حفظ و افرادی که تابع هدف آن‌ها از افراد موجود در آرشیو بهتر نیست، حذف می‌شوند.

گام پنجم (بررسی شرط توقف و انتخاب جمعیت نسل بعد): در صورتی که تعداد تکرارهای الگوریتم به بیشترین تعداد تکرارهای مجاز رسید، الگوریتم خاتمه می‌یابد. در غیراینصورت از بین آرشیو مربوط به بهترین جواب‌های حاصل برای دو سطح، به تعداد اندازه جمعیت نسل‌ها، بهترین جواب‌های به دست آمده را انتخاب می‌کنیم و به گام دوم برمی‌گردیم. شکل ۵، چارچوبی از الگوریتم تکامل تدریجی دوسطحی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

برای نمایش نحوه تقاطع جواب‌ها در مساله مسیریابی نیز مشتریان تخصیص داده شده به دو حامل مجزا را در نظر می‌گیریم و پس از تعیین محلی که تقاطع در آن‌ها انجام می‌گیرد، جواب‌های جدید را به صورت نشان داده شده در شکل ۴(د) به دست می‌آوریم. تنها در صورتی این تقاطع صورت می‌گیرد که در جواب حاصل، محدودیت ظرفیت رعایت شده باشد.

گام چهارم (تکامل): یک استراتژی تکامل باید در طول الگوریتم به منظور تبادل اطلاعات، مورد استفاده قرار بگیرد. الگوریتم تکامل تدریجی دوسطحی، از یک جمعیت و آرشیو متفاوت برای هر سطح استفاده می‌کند. فرایند تکامل در این الگوریتم لزوماً خیره‌گرا نیست و دو جمعیت، به صورت تصادفی، جواب‌ها را با یکدیگر مبادله می‌نمایند. در این الگوریتم، تکامل جمعیت‌های مربوط به دو سطح به صورت متقارن انجام می‌گیرد. تکامل انجام گرفته در این بخش از الگوریتم، دقیقاً مشابه با فرایند تکاملی

مدلسازی عدم تقارن اطلاعات در مساله حمله به شبکه حمل و نقل مواد خطرناک



شکل ۵. فلوچارت مربوط به الگوریتم تکامل تدریجی دوسطحی برای NIHRP با اطلاعات نامتقارن

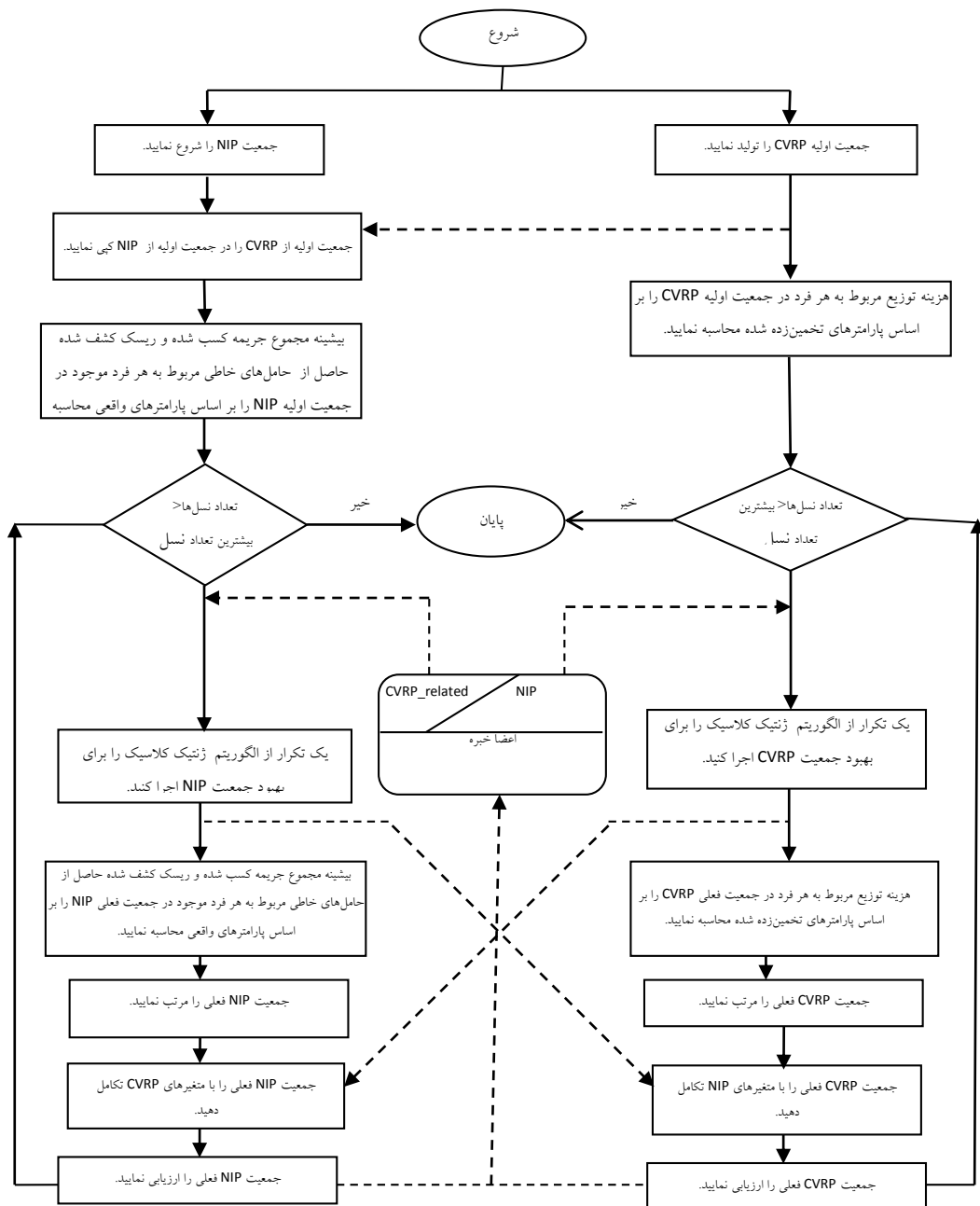
۳-۴. الگوریتم ژنتیک دوسطحی توسعه داده شده

الگوریتم ژنتیک دوسطحی برای اولین بار توسط Oduguwa و Roy (۲۰۰۲) ارائه شد. در این تحقیق برآنیم تا الگوریتم مذکور را برای مساله مورد مطالعه، توسعه دهیم. فلوچارت نمایش داده شده در شکل ۶، گام های مربوط به الگوریتم توسعه داده شده فوق را به

نمایش می گذارد. یکی از تفاوت های اساسی این الگوریتم با الگوریتم تکامل تدریجی توسعه داده شده در این است که در این الگوریتم فرض می کنیم که هماهنگی نامتقارنی بین دو بازیکن رخ می دهد. هماهنگی نامتقارن به این معنی است که تکامل صرفاً در یک جهت اتفاق می افتد، به این معنی که پیرو (توزیع کننده)، افراد

الگوریتم‌های ژنتیک مربوط به هر سطح پس از بهبود یافتن در طی یک تکرار الگوریتم، با یکدیگر تکامل داده می‌شوند. پس از این که عملگر تکامل برای هر نسل مورد استفاده قرار گرفت، اعضا خبره هر دو جمعیت در قالب یک جمعیت خبره بیرونی ذخیره می‌شوند. اگر بهترین اعضا نسل حاضر از اعضا حاضر در این جمعیت خبره مناسب‌تر باشند، اعضا حاضر در این جمعیت خبره با بهترین اعضا از نسل فعلی جایگزین می‌شوند.

جمعیت خود را با افراد جمعیت پیشرو (آژانس نظارتی) ترکیب می‌کند، اما عکس این موضوع صورت نمی‌گیرد. این هماهنگی تنها بین بهترین جواب‌های حاصل، مجاز است. این موضوع باعث می‌شود الگوریتم طی فرآیند جستجو، به سمت فضای بهینه هدایت شود. تکامل با کپی کردن متغیرهای سطح پایین در جمعیت سطح بالا صورت می‌گیرد. تفاوت عمده دیگری که بین دو الگوریتم توسعه داده شده در این مقاله وجود دارد این است که در این الگوریتم



شکل ۶. فلوچارت مربوط به الگوریتم ژنتیک دوسطحی توسعه داده شده برای NIHVPR با اطلاعات نامتقارن

مدلسازی عدم تقارن اطلاعات در مساله حمله به شبکه حمل و نقل مواد خطرناک

جدول ۳. پارامترهای استفاده شده در مسایل نمونه

پارامتر	مقدار
c_{ij}	Uniform (1,10)
r_{ij}	Uniform (1,20)
D_j	Uniform (1,10)
Q	۰,۸, ۰,۷, ۰,۶
f_{ij}	Uniform (1000,5000)
\bar{f}_{ij}	Uniform ($f_{ij} \cdot Q, f_{ij} \cdot (2 - Q)$)
H	۱۰۰۰
b_{ij}	۱
B	۲۰, ۱۲, ۵
C	۲۳
m	$\left\lfloor \sum_j D_j / C \right\rfloor$

جدول ۲. نمونه شبکه‌های استفاده شده

شماره نمونه	گره‌ها $n1 \times n2$	کمان‌ها	ظرفیت
1	$8 = 2 \times 4$	13	10
2	$24 = 4 \times 6$	53	50
3	$48 = 6 \times 8$	117	50
4	$60 = 6 \times 10$	149	50
5	$72 = 6 \times 12$	181	50
6	$64 = 8 \times 8$	161	50
7	$80 = 8 \times 10$	205	50
8	$96 = 8 \times 12$	249	100
9	$100 = 10 \times 10$	261	100
10	$160 = 10 \times 16$	429	100
11	$256 = 16 \times 16$	705	100

داده‌های مربوط به این شبکه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است و شکل مربوط به یک شبکه 3×3 ، در شکل ۷ نشان داده شده است که در آن دپو رابطه‌ای دوطرفه با کلیه گره‌های شبکه دارد.

برای ارزیابی و مقایسه نتایج به دست آمده از این الگوریتم‌ها، از دو معیار متفاوت منطقی بودن استفاده می‌کنیم که تحت عناوین منطقی بودن مستقیم و موزون شناخته می‌شوند و توسط Talbi و Liefoghe، Legillon (۲۰۱۲) معرفی شده است. اولین معیار، مشکل بودن بهبود یک جواب بدون در نظر گرفتن بهبود واقعی را در نظر می‌گیرد. این معیار، نسبت تعداد دفعاتی

لازم به ذکر است در شکل ۶، خط‌چین‌ها و گام‌هایی از الگوریتم که از طریق خط‌چین‌ها انجام گرفته‌اند، نشان‌دهنده فرایند تکامل و آرشوی هستند که پس از ارزیابی جواب‌های تکامل یافته انجام می‌گیرد.

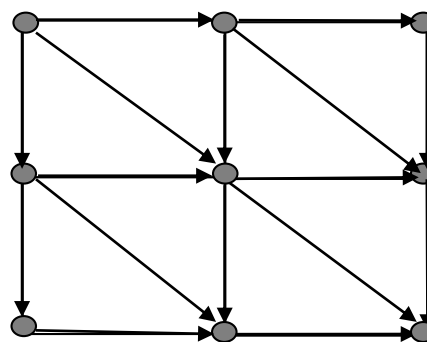
۵. نتایج محاسباتی

به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی برای مساله مورد بررسی، تعدادی مساله حمله به شبکه مسیریابی حامل‌های مواد خطرناک به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. تجزیه و تحلیل با ارائه جزئیات بیشتری در مورد این مسائل آغاز می‌شود.

۵-۱ مسائل نمونه

یازده شبکه مربعی جهت دار متفاوت با ابعاد $n1 \times n2$ به صورت تصادفی ایجاد می‌کنیم که در آن $n1$ و $n2$ به ترتیب تعداد سطرها و ستون‌های شبکه‌های طراحی شده هستند.

برای ارزیابی کارایی دو الگوریتم، یک نمونه مساله برای هر یک از یازده شبکه به صورت تصادفی تولید می‌شود که نحوه تعریف این مسایل، مشابه با روشی است که Bailey و Bayrak (۲۰۰۸) برای تولید مسایل نمونه حمله به شبکه کوتاهترین مسیر با اطلاعات نامتقارن از آن استفاده کردند. مقادیر پارامترهای f_{ij} به مقادیر \bar{f}_{ij} و Q بستگی دارند که در آن Q نشان می‌دهد که تخمین‌های توزیع‌کننده تا چه اندازه دقیق است. کلیه پارامترهای استفاده شده در مسایل نمونه در جدول ۳ خلاصه شده است.



شکل ۷. شبکه نمونه‌ای با ابعاد 3×3

برای الگوریتم‌های تکامل تدریجی و ژنتیک دوسطحی در جدول ۴ نمایش داده شده است.

۳-۵ نتایج حاصل از الگوریتم‌ها

دو الگوریتم توسعه داده شده برای حل مساله NIHVPR با اطلاعات نامتقارن در محیط مطلب، کدنویسی و بر روی یک سیستم اینتل پنتیوم فور با CPU ۳,۰۵ گیگاهرتز و حافظه ۵۱۲ مگابایت اجرا شده‌اند. هر مساله، ده بار اجرا شده است و چهار معیار ارزیابی شامل میانگین و بهترین معیار تابع هدف برای مساله سطح بالا و منطقی بودن مستقیم و موزون برای مساله سطح بالا محاسبه شده‌اند و نتایج حاصل، برای مقایسه عملکرد دو الگوریتم در جدول ۵ نشان داده شده‌اند.

بر طبق جدول ۵، دو الگوریتم توسعه داده شده می‌توانند برای انواع مختلفی از مسایل NIHVPR با اطلاعات نامتقارن با ابعاد مختلف و بدون توجه به ماهیت فضای جستجو مورد استفاده قرار بگیرد. آزمایشات انجام شده، این نتیجه مهم را در پی داشت که الگوریتم تکامل تدریجی در مقایسه با الگوریتم ژنتیک دوسطحی، میانگین تابع هدف بهتری برای مساله سطح بالا به دست می‌دهد.

که الگوریتم، جواب را بهبود داده است به کل تعداد اجراهای الگوریتم را می‌شمارد. معیار منطقی بودن وزنی، بر همین اساس معیار منطقی بودن مستقیم عمل می‌کند با این تفاوت که به جای شمارش تعداد دفعاتی که الگوریتم، جواب‌ها را بهبود داده است، میزان بهبود را محاسبه می‌کند. منطقی بودن، معیاری است که کیفیت واکنش پیش‌بینی شده توسط الگوریتم را نشان می‌دهد. بدیهی است که یک پیش‌بینی بد توسط تصمیم‌گیرنده پیرو احتمالاً به یک جواب بد، منتج خواهد شد [Legillon, Liefoghe and Talbi (2012)]. مزایا و ریسک‌های مدل‌سازی مربوط به تصمیم‌گیری در شرایط عدم تقارن اطلاعات در بخش بعد، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۵ تنظیم پارامترها

به منظور استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی برای حل مساله مورد مطالعه، لازم است تا ابتدا مقادیر مناسبی برای پارامترهای مورد استفاده در این الگوریتم‌ها انتخاب شوند. لازم به ذکر است که مقادیر این پارامترها از طریق تنظیم پارامترها به روش سعی و خطا محاسبه شده است و مقادیر انتخاب شده برای این پارامترها

جدول ۴. پارامترهای الگوریتم تکامل تدریجی و الگوریتم ژنتیک دوسطحی پیشنهادی

مقدار	تعریف پارامترها	پارامترهای الگوریتم
۱۴	اندازه جمعیت NIP	n_{NIP}
۱۴	اندازه جمعیت CVRP	n_{CVRP}
۰,۲۵	پارامتر نرخ جهش برای NIP در هر تکرار از الگوریتم	mut_rate_NIP
۰,۲۵	پارامتر نرخ جهش برای CVRP در هر تکرار از الگوریتم	mut_rate_CVRP
۴	پارامتر نرخ تقاطع برای NIP در هر تکرار از الگوریتم	$cross_rate_NIP$
۴	پارامتر نرخ تقاطع برای CVRP در هر تکرار از الگوریتم	$cross_rate_CVRP$
۰,۵	نسبتی از بهترین جواب‌های NIP و CVRP که از هر نسل حفظ شده است.	$kept_elitist_rate$
۲۰	تعداد تکرارهایی که الگوریتم تکامل تدریجی ادامه می‌یابد.	$max_iteration$
۳۰	تعداد نسل‌هایی که در هر تکرار الگوریتم تکامل تدریجی بهبود می‌یابد.	gen_number
۶۰۰	بیشترین تعداد نسل‌هایی که الگوریتم ژنتیک دوسطحی اجرا می‌شود.	$max_iteration$

مدلسازی عدم تقارن اطلاعات در مساله حمله به شبکه حمل و نقل مواد خطرناک

جدول ۵. مقایسه بین نتایج به دست آمده از NIHVRP با اطلاعات نامتقارن ($Q = 0.6$)

شماره مساله	میانگین معیار برازندگی مساله سطح بالا		بهترین معیار برازندگی مساله سطح بالا		منطقی بودن مستقیم		منطقی بودن وزنی	
	الگوریتم ژنتیک دوسطحی	الگوریتم تکامل تدریجی	الگوریتم ژنتیک دوسطحی	الگوریتم تکامل تدریجی	الگوریتم ژنتیک دوسطحی	الگوریتم تکامل تدریجی	الگوریتم ژنتیک دوسطحی	الگوریتم تکامل تدریجی
۱	۱,۵۰۶	۱۱,۷۰۴	۱,۴۱۸	۵,۳۷۸	۱,۲۳۶	۰,۶۲۲	۱,۶۵۵۶	۱,۵۴۴۷
۲	۱,۷۹۶۴	۳,۲۶۶	۱,۲۴۲	۱,۵۹۴	۱,۲۳۶	۰,۵۱۴	۱,۵۶۹۳	۱,۲۲۰۸
۳	۱۸۸,۷۷	۲۰۰,۳۰۴	۱۵۰,۰۵	۱۸۵,۲۵	۱,۲۳۶	۰,۵۷۳	۰,۶۹۴۶	۰,۵۵۵۶
۴	۱۹۸,۲۷۴	۲۱۴,۲۹	۱۴۳,۸۹	۱۶۴,۱۳	۱,۹۳	۰,۶۳۷	۱,۲۹۴۸	۰,۷۸۴۴
۵	۳۵۵,۳۵۴	۳۹۹,۷۰۶	۲۷۱,۴۹	۲۸۷,۳۳	۱,۴۹۷	۰,۷۹۰	۱,۰۵۷۲	۰,۵۴۲۴
۶	۲۹۷,۲۷۴	۲۹۹,۲۱	۲۲۳,۹۷	۲۰۷,۲۵	۱,۶۳۸	۰,۹۷۳	۰,۹۴۲۸	۱,۱۰۵۶
۷	۴۴۸,۳۷	۴۱۸,۸۹	۲۰۹,۸۹	۴۲۱,۹۷	۱,۰۵۰۸	۱,۹۲۴	۱,۳۴۷۶	۱,۰۲۲۸۸
۸	۲۰۳,۱۴	۲۳۵,۸۵	۱۷۵,۵۷	۲۰۶,۳۷	۲,۸۵۹	۱,۶۶	۱,۲۷۷۲	۰,۸۶۳۶
۹	۱۸۳,۱۳۸	۲۰۵,۶۶۶	۱۱۳,۰۹	۱۳۱,۵۷	۱,۳۵۱	۱,۶۶	۱,۱۰۱۲	۱,۲۴۹۰۴
۱۰	۴۱۷,۹۰۲	۴۲۳,۳۷۸	۳۴۷,۱۷	۳۹۰,۲۹	۲,۱۷۹	۱,۶۶	۲,۳۳۲	۰,۴۷۲۸۸
۱۱	۵۰۰,۶۰۶۸	۵۲۵,۹۸۵	۴۷۷,۰۵۸	۴۹۷,۰۳۴	۳,۰۸۱	۱,۹۶۳	۵,۷۶۵	۲,۴۲۱۲

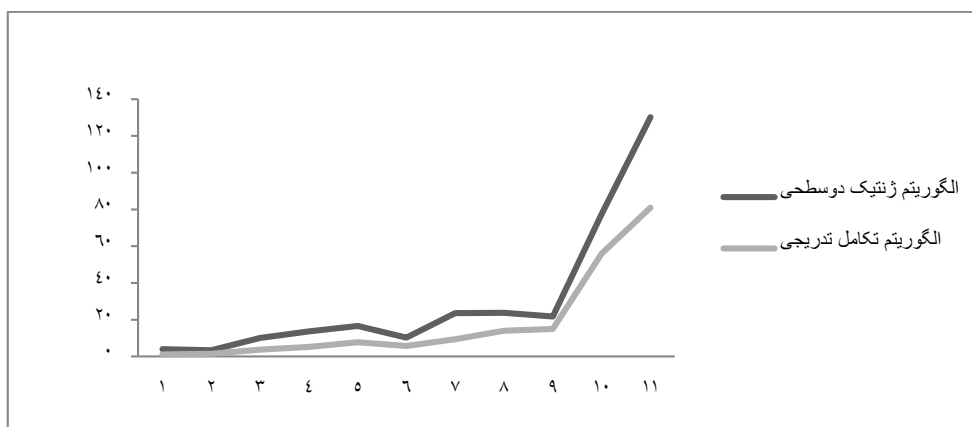
محاسباتی کمتری حل نماید که این موضوع یکی دیگر از مزایای این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم ژنتیک دوسطحی است.

۴-۵ بررسی مزایا و ریسک‌های مرتبط با منظور کردن

فرض عدم تقارن اطلاعات

برای بررسی مزایای در نظر گرفتن عدم تقارن اطلاعات، نتایج به دست آمده را با حالتی مقایسه می‌کنیم که این عدم تقارن اطلاعات منظور نشده است. در این شرایط، دو بازیکن درک یکسانی از پارامترهای مساله دارند و هر دوی آنها بر اساس مقادیر f_{ij} تصمیم‌گیری می‌کنند. دو معیار ارزیابی ریسک و مزیت برای این دو حالت مختلف، به ترتیب با R و I نشان داده می‌شوند که به صورت زیر تعریف می‌شوند

از سوی دیگر، الگوریتم تکامل تدریجی از دیدگاه معیار منطقی بودن نیز در همه اجزای کدهای الگوریتم، عملکرد بهتری از خود نشان داد. از آنجا که این الگوریتم، پاسخ‌های منطقی‌تری در اختیار ما قرار می‌دهد، می‌توانیم پیش‌بینی‌های بهتری از تصمیمات اتخاذ شده داشته باشیم. دلیل اینکه چرا الگوریتم ژنتیک دوسطحی به جواب‌های منطقی منتج نمی‌شود این است که کل الگوریتم تمایل دارد تا بعضی از جواب‌های غیرمنطقی را به واسطه داشتن مقادیر بهتر برای تابع هدف سطح بالا حفظ نماید و برخی از جواب‌های منطقی را به واسطه تعمیر بد، کنار بگذارد. علاوه بر منطقی بودن، همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، الگوریتم تکامل تدریجی می‌تواند این مساله را در زمان



شکل ۷. مقایسه بین دو الگوریتم فراابتکاری توسعه داده شده بر اساس زمان محاسباتی (بر حسب ثانیه)

استفاده از f_{ij} تعیین می‌شود. فرض کنید هزینه کل این مسیرها $Z_{u,3}^b$ باشد و بهترین مقدار تابع هدف به دست آمده برای مساله NIHVRP با در نظر گرفتن $Q = 1$ در تخمین پارامترها توسط توزیع کننده در مساله سطح پایین، با $Z_{u,4}^b$ نشان داده شود. آنگاه $\%R$ با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\%R = \left| \frac{Z_{u,4}^b - Z_{u,3}^b}{Z_{u,4}^b} \right| \times 100 \quad (10)$$

نتایج حاصل از مقایسه بین حالات با تقارن اطلاعات و بدون تقارن اطلاعات در شکل ۸ نشان داده شده است.

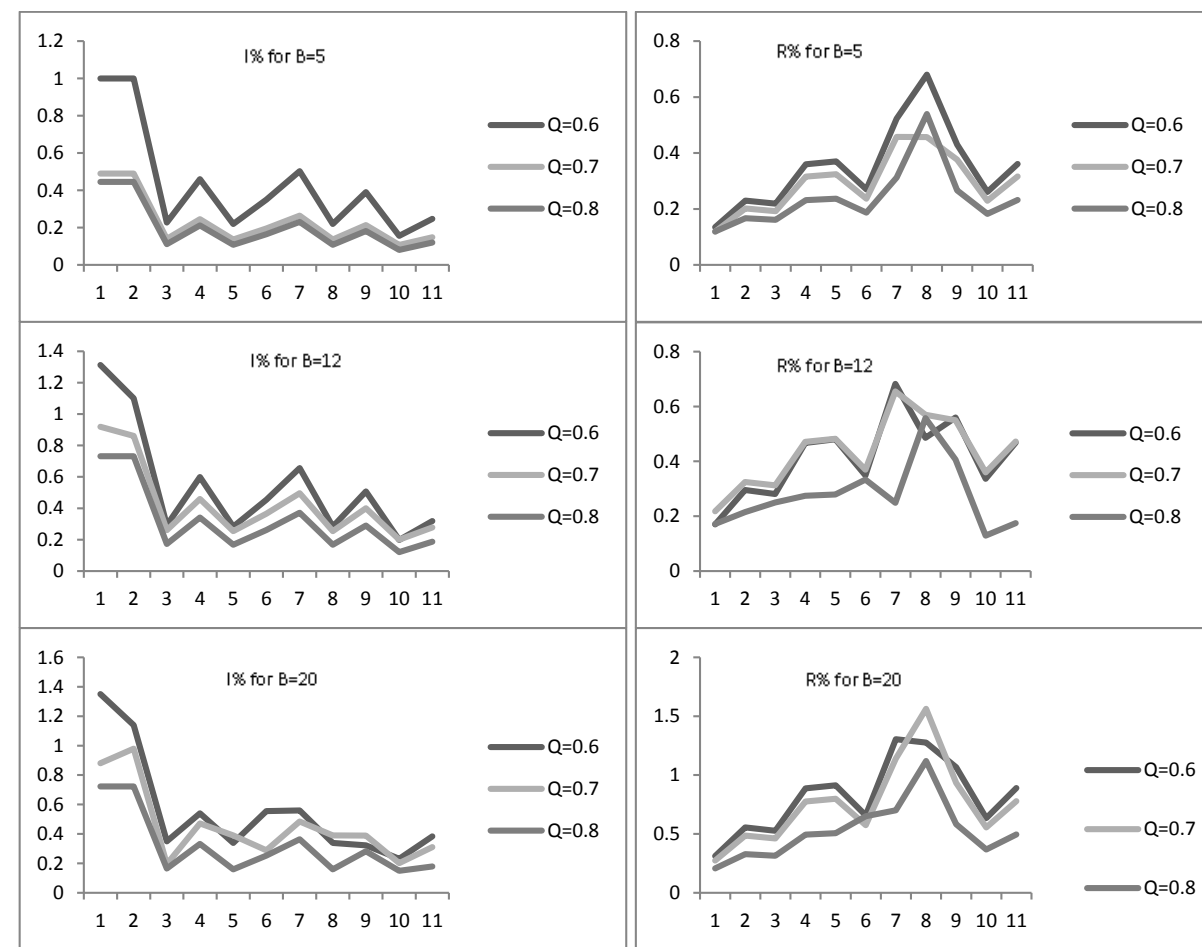
شکل ۹، میانگین‌های مزایا و ریسک‌های حاصل از کلیه مسایل نمونه را برای مساله NIHVRP با اطلاعات نامتقارن به ازاء مقادیر متفاوتی از بودجه و دقت تخمین پارامترهای مهاجم توسط توزیع کننده نمایش می‌دهد. با محاسبه میانگین $\%I$ و $\%R$ روی کلیه نمونه شبکه‌ها، مشاهده می‌شود که NIHVRP با اطلاعات نامتقارن در صورتی که بودجه بیشتری به حمله تخصیص داده شود (زمانی که B افزایش می‌یابد) و زمانی که توزیع کننده، پارامترهای مهاجم را با دقت کمتری تخمین می‌زند (زمانی که Q کاهش می‌یابد)، می‌تواند بهتر از مدل‌های با اطلاعات متقارن، شرایط واقعی را فرموله کند. بنابراین اگر مهاجم بداند که توزیع کننده نمی‌تواند پارامترها را به درستی تخمین زند، او باید دانش بهتری درباره توزیع کننده به دست بیاورد و مقداری منابع اضافی برای حمله به شبکه در نظر بگیرد.

$\%I$ معیاری است برای محاسبه میزان درصد افزایش در تابع هدف سطح بالا در شرایطی که فرض عدم تقارن اطلاعات منظور می‌شود و به صورت زیر محاسبه می‌شود. مساله سطح بالا با استفاده از f_{ij} حل می‌شود. این به این معنی است که مهاجم بهترین طرح حمله را با این فرض که توزیع کننده نیز همین اطلاعات را در اختیار دارد، محاسبه می‌کند. سپس توزیع کننده با استفاده از تخمین‌هایش از \bar{f}_{ij} ، مسیرهایی با کمترین میزان هزینه توزیع را می‌یابد. در نهایت، هزینه واقعی این مسیرها با استفاده از f_{ij} محاسبه می‌شود. این مقدار، هزینه توزیع کننده را برای حالتی که مهاجم هیچگونه عدم تقارن اطلاعاتی را لحاظ نمی‌کند، در اختیار ما قرار می‌دهد. ما این مقدار را به صورت $Z_{u,1}^b$ تعریف می‌کنیم و $Z_{u,2}^b$ را به عنوان بهترین مقدار تابع هدف سطح بالا با اطلاعات نامتقارن در نظر می‌گیریم. بنابراین $\%I$ ، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

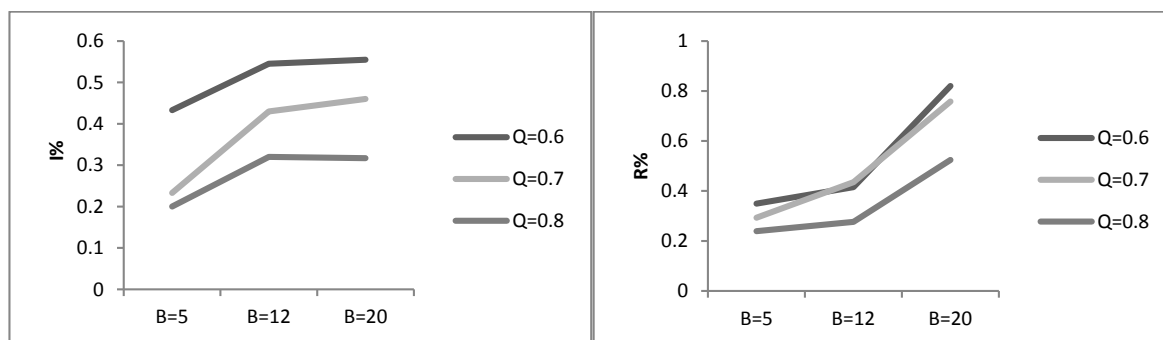
$$\%I = \left| \frac{Z_{u,2}^b - Z_{u,1}^b}{Z_{u,1}^b} \right| \times 100 \quad (9)$$

در مساله NIHVRP با عدم تقارن اطلاعات، فرض می‌کنیم که مهاجم، تخمین‌های توزیع کننده از f_{ij} را می‌داند. با این وجود، اگر مهاجم، از نادرست بودن تخمین‌های توزیع کننده مطلع باشد، آنگاه این کمبود اطلاعات به ریسکی در تصمیم‌گیری منتج می‌شود که با $\%R$ نشان داده می‌شود و به صورت زیر محاسبه می‌شود: مساله سطح بالا حل می‌شود و یک طرح حمله خوب Y^* به دست می‌آید. سپس مسیرهای واقعی روی این شبکه با

مدلسازی عدم تقارن اطلاعات در مساله حمله به شبکه حمل و نقل مواد خطرناک



شکل ۸. مقایسه بین مزایا و ریسک‌های جواب‌های حاصل با بودجه‌های متفاوت



شکل ۹. میانگین‌های مزایا و ریسک‌های حاصل از کلیه مسایل نمونه

الگوریتم فراابتکاری تحت عناوین الگوریتم ژنتیک دوسطحی و الگوریتم تکامل تدریجی دوسطحی برای حل مساله توسعه داده شد. نتایج حاصل از حل مسائل متعدد در ابعاد مختلف با الگوریتم مذکور، نشان‌دهنده کاراتر بودن الگوریتم تکامل تدریجی دو سطحی پیشنهادشده نسبت به الگوریتم دیگر از

۶ نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی

در این مقاله، مدلی دوسطحی برای مدلسازی مساله حمله به شبکه مسیریابی حامل‌های مواد خطرناک با اطلاعات نامتقارن ارائه شد و با توجه به پیچیدگی محاسباتی بالای این مساله، دو

- Emerging Technologies, Vol.17, No.2, pp. 175-196.
- Brown, G., Carlyle, M., Salmeron, J. and Wood, K. (2007) "Defending critical infrastructure", *Interfaces*, Vol. 36, No.6, pp.530-44.
- Claudio, M., Rocco, S., Ramirez-Marquez J. E., Daniel E. and Salazar, A. (2010) "Bi and tri-objective optimization in the deterministic network interdiction problem", *Reliability Engineering and System Safety*, 95, pp. 887-896.
- Colson, P. M. B. and Savard, G. (2005) "Bilevel programming: a survey", *4OR*, vol.3, 87-107.
- Cormican, K. J., Morton, D. P. and Wood, R. K. (1998) "Stochastic network interdiction", *Operations Research*, Vol.46, No.2, pp. 184-197.
- Dai, Y. and Poh, K. (2002, December) "Solving the network interdiction problem with genetic algorithms", In *Proceedings of the fourth Asia-Pacific conference on industrial engineering and management system*, Taipei, pp. 18-20.
- Dempe, Stephan (2002) "Foundations of bi-level programming", Kluwer Academic Publisher.
- Dimitrov, N. B., Gonzalez, M. A., Michalopoulos, D. P., Morton, D. P., Nehme, M. V., Popova, E. and Thoreson, G. G. (2008, November). "Interdiction modeling for smuggled nuclear material", In *Proceedings of the 49th annual meeting of the Institute of Nuclear Materials Management*.
- EKsioglu.B., Vural, A. V. and Reisman, A. (2009) "The vehicle routing problem: A taxonomic review", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.57, No.4, pp. 1472-1483.
- Erkut, E. and Gzara, F. (2008) "Solving the hazmat transport network design problem", *Computers and Operations Research*, Vol.35, No.7, pp. 2234-2247.
- Garg, M. and Smith, C. (2008) "Models and algorithms for the design of survivable multi-commodity flow networks with general failure scenarios", *Omega*; Vol.36, pp.1057-71.
- Granata, D., Steeger, G. and Rebennack. S. (2013) "Network interdiction via a Critical Disruption Path: Branch-and-Price algorithms", *Computers*
- جنبه‌های برانزنگی تابع هدف و منطقی بودن مساله سطح بالا و هم‌چنین زمان حل می‌باشد.
- تحقیق حاضر می‌تواند از چندین جهت تعمیم داده شود: (۱) می‌تواند برای مسایلی همچون کنترل نامحسوس، سنسورها و ... که بیش از یک منبع برای حمله به شبکه در دسترس مهاجم است نیز توسعه داده شود. (۲) در این تحقیق فرض شد که مهاجم به کمان‌های شبکه حمله می‌کند. مدل حاضر می‌تواند برای محیط‌های رقابتی و برای حالتی که به گره‌های شبکه حمله می‌شود، توسعه داده شود. (۳) همانطور که از شکل ۸ مشاهده می‌شود، بین میانگین مزایا و ریسک‌های حل به‌دست‌آمده، همبستگی مستقیمی وجود دارد. بنابراین اگر مهاجم، اطلاعات زیادی در مورد تخمین‌های توزیع‌کننده در اختیار نداشته باشد، به جای استفاده از تخمین‌های ثابت، بهتر است این تخمین‌ها را به صورت یک متغیر تصادفی در نظر بگیرد و مساله در قالب یک مدل تصادفی، مدل‌سازی شود.

۷. مراجع

- Akgün, İ., Tansel, B. Ç. and Wood, R. K. (2011) "The multi-terminal maximum-flow network-interdiction problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 211, No.2, pp. 241-251.
- Aksen, D. and Aras, N. (2012) "Abilevel fixed charge location model for facilities under imminent attack", *Computer and operation research*, Vol.39, No.7, pp.1364-1381.
- Apostolakis G. and Lemon, D. (2005) "A screening methodology for the identification and ranking of infrastructures vulnerability due to terrorism", *Risk Analysis*, Vol. 25, No.1, pp.361-76.
- Bard, J. (1998) "Practical Bilevel Optimization: Algorithms and Applications", Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- Bayrak, H. and Bailey, M. D. (2008) "Shortest path network interdiction with asymmetric information", *Networks*, Vol.52, No.3, pp. 133-140.
- Bianco, L., Caramia, M., and Giordani, S. (2009) "A bilevel flow model for hazmat transportation network design", *Transportation Research Part C*:

- McMasters, A. and Mustin, T. (1970) "Optimal interdiction of a supply network", *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 17, pp. 261–268.
- Morton, D., Pan, F. and Saeger, K. (2007) "Models for nuclear smuggling interdiction", *IIE Transactions on Operations Engineering*, Vol. 38, pp.3–14.
- Oduguwa, V. and Roy, R. (2002) "Bi-level optimization using genetic algorithm", *IEEE International Conference on Artificial Intelligence Systems (ICAIS 2002)*, pp. 322–327.
- Önal, H. (1993) "A modified simplex approach for solving bi-level linear programming problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 67, No. 1, pp. 126-135.
- Pan, F. (2005) "Stochastic network interdiction: models and methods", *Doctoral dissertation*, The University of Texas at Austin.
- Prince, M., Geunes, J. and Smith, C. (2013) "Procurement allocation planning with multiple suppliers under competition", DOI: 10.1080/00207543.2013.807956.
- Ramirez-Marquez, J. E. and Rocco, C. (2009) "Stochastic network interdiction optimization via capacitated network reliability modeling and probabilistic solution discovery", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94, pp. 913–921.
- Rocco, C. and Ramirez-Marquez, JE. (2009) "Deterministic network interdiction optimization via an evolutionary approach", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94, No. 2, pp. 568–76.
- Royset, J. O. and Wood, R. K. (2007) "Solving the bi-objective maximum-flow network-interdiction problem", *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 19, No. 2, pp. 175-184.
- Salmeron, J., Wood, K. and Baldick, R. (2004), "Analysis of electric grid security under terrorist threat", *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 19, No. 2, pp. 905-912.
- Smith, J. C., Lim, C. and Sudargho, F. (2007), "Survivable network design under optimal and heuristic interdiction scenarios", *J. Glob Optim*, Vol.38, pp. 181–199.
- and *Operations Research*, Vol.40, No.11, pp. 2689-2702.
- Hodgson, M. J., Rosing, K. E. and Zhang, J. (1996) "Locating Vehicle Inspection Stations to Protect a Transportation Network", *Geographical Analysis*, Vol.28, pp. 299–314.
- Israeli, E. and Wood, R. K. (2002) "Shortest path network interdiction", *Networks*, Vol.40, No.2, pp. 97-111.
- Jiang, Y., Zhang, X., Rong, Y. and Zhang, Z. (2014) "A Multimodal Location and Routing Model for Hazardous Materials Transportation based on Multi-commodity Flow Model", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 138, pp. 791-799.
- Kara, B. Y. and Verter, V. (2004) "Designing a road network for hazardous materials transportation", *Transportation Science*, Vol. 38, No.2, pp. 188–196.
- Kennedy, K. T., Deckro, R. F., Moore, J. T. and Hopkinson, K. M. (2011) "Nodal interdiction", *Mathematical and Computer Modeling*, Vol. 54, No.11, pp. 3116-3125.
- Kevin T. Kennedy, Richard F. Deckro, James T. Moore, Kenneth M. Hopkinson, (2011) "Nodal interdiction", *Mathematical and Computer Modeling*, Vol. 54, pp. 3116–3125.
- Kheirkhah, A., Navidi, H. and Messi Bidgoli, M. (2015) "A bi-level network interdiction model for solving the hazmat routing problem", *International Journal of Production Research*, (ahead-of-print), pp. 1-13, DOI:10.1080/00207543.2015.1084061.
- Laporte, G. (1992) "The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms", *European journal of operational research*, Vol. 59, pp. 345–358.
- Legillon, F., Liefoghe, A. and Talbi, E. (2012, June) "Cobra: A cooperative co-evolutionary algorithm for bi-level optimization", In *Evolutionary Computation (CEC), 2012 IEEE Congress*, pp. 1-8.
- Lim C. and Smith J. (2007) "Algorithms for discrete and continuous multi-commodity flow network interdiction problems", *IIE Transactions*; 39, pp. 15–26. [Special issue on Homeland Security].

- Operations Research, Vol. 43, No. 2, pp. 243-251.
- Wen, U. P. and Yang, Y. H. (1990) "Algorithms for solving the mixed integer two-level linear programming problem", Computers and Operation Researches, Vol. 17, pp. 133-142.
- Wood, R. K. (1993) "Deterministic network interdiction", Mathematical and Computer Modeling, Vol. 17, No. 2, pp. 1-18.
- Xie, Y., Lu, W., Wang, W. and Quadrifoglio, L. (2012) "A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation", Journal of hazardous materials, Vol. 227, pp. 135-141.
- Zenklusen, R. (2010) "Network flow interdiction on planar graphs", Discrete Applied Mathematics, Vol. 158, No. 13, pp. 1441-1455.
- Steinrauf, R. L. (1991) "A Network Interdiction Model", M.S. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA.
- Toth, P. and Vigo, D. (2001) "An overview of vehicle routing problems", In The vehicle routing problem, pp. 1-26. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Wang, H., Xiao, G. and Wei, Z. (2013) "Optimizing route for hazardous materials logistics based on hybrid ant colony algorithm", Discrete dynamics in nature and society.
- Washburn, A. and Wood, R. K. (1995) "Two-person zero-sum games for network interdiction", Operations Research, Vol. 43, No. 2, pp. 243-251.
- Washburn, A. and Wood, K. (1995) "Two-person zero-sum games for network interdiction",