

طراحی شبکه مکان‌یابی محور قابل اعتماد تحت اختلال گسترده با امکان برقراری ارتباط مستقیم بین غیرمحورها

مقاله پژوهشی

محدثه حق دوست، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ایران، تهران

عماد روغنیان*، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ایران، تهران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: e_roghanian@kntu.ac.ir

دریافت: ۹۹/۰۵/۲۷ - پذیرش: ۹۹/۱۰/۰۵

صفحه ۱۸-۱

چکیده

مکان‌یابی صحیح تسهیلات اثرات زیادی بر منافع اقتصادی، ارائه خدمات مطلوب و افزایش سطح رضایت‌مندی مشتریان دارد. تصمیم در مورد مکان تسهیلات عمدتاً از تصمیم‌گیری‌های بلندمدت و استراتژیک شرکت‌های بزرگ خصوصی و دولتی است و در مکان‌یابی تسهیلات، قابلیت اطمینان امر مهمی است که در هنگام اخذ این تصمیم استراتژیک باید مدنظر قرار گرفته شود تا در صورت عدم کارکرد یا خرابی یکی از اجزاء، سیستم با کم‌ترین زبانی به کارکرد خود ادامه دهد. در این مقاله برای اولین بار مدل عدد صحیح غیرخطی برای مسئله مکان‌یابی محور با تخصیص تک تحت اختلال ارائه شده است که به منظور افزایش قابلیت اطمینان علاوه بر در نظر گرفتن محور پشتیبان و مسیرهای جایگزین از رویکرد تقویت استفاده شده است، در حالی که امکان برقراری ارتباط مستقیم بین گره‌های غیر محور وجود دارد. به دلیل دشوار بودن حل مسئله، از الگوریتم ژنتیک جهت حل استفاده شده است و نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک از نظر سرعت حل عملکرد بهتری نسبت به گمز دارد. همچنین جواب‌هایی با کیفیت عالی ارائه می‌دهد. نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که در نظر گرفتن رویکرد تقویت باعث کاهش در هزینه کل شده است.

واژه‌های کلیدی: اختلال، الگوریتم ژنتیک، تقویت، محور پشتیبان، P-محور میانه

۱-مقدمه

درمحورها به طور همزمان جریان جمع‌آوری، طبقه‌بندی و توزیع می‌شوند. به این صورت که جریان یا کالا از پره‌های مختلفی که به محور اختصاص داده شده‌اند، جمع‌آوری می‌شود و با کالا یا جریان‌هایی که دارای مقاصد یکسان هستند ترکیب شده و ارسال می‌شوند. به این ترتیب اپراتورها می‌توانند از منافع اقتصاد به مقیاس استفاده کنند. مکان‌یابی محور به طور گسترده در حمل‌ونقل، مخابرات، پست و سیستم‌های تحویل بار کاربرد دارد. در مسئله مکان‌یابی محور، مکان محورها تعیین می‌شود و گره‌های غیرمحور به محورها اختصاص می‌یابند. دو نوع تخصیص در مسئله مکان‌یابی محور وجود دارد، تخصیص تک و چندگانه. در تخصیص تک هر گره غیرمحور دقیقاً به یک محور اختصاص می‌یابد و تمام ورودی‌ها و خروجی‌ها از و

مسائل مکان‌یابی محور از مسائل نوینی است که در ده‌های اخیر در حوزه مکان‌یابی بیان شده است. به طور سنتی در مسائل مکان‌یابی محور به تعیین مکان محور و تخصیص پره‌ها به محور پرداخته می‌شود. اولین مقاله در زمینه مکان‌یابی محور در سال ۱۹۸۵ منتشر شد (Toh and Higgins, 1985) که در مورد کاربرد محور در خطوط هوایی بود؛ (O'Kelly, 1987) اولین مدل ریاضی را برای مسئله مکان‌یابی محور ارائه داد و پس از آن (Campbell, 1994) نقش زیادی در مدل‌سازی ریاضی مکان‌یابی محور داشت. با گذشت زمان مقالات منتشر شده در زمینه مکان‌یابی محور افزایش یافتند. از نقاط محوری می‌توان به عنوان تسهیلات ویژه‌ای نام برد که نقش ایستگاه‌های واسطه‌ای را در سیستم توزیع ایفا می‌کنند.

جایگزین وجود دارند به طوری که در هر سطح برای هر جریان محور پشتیبان و مسیر جایگزین انتخاب می شود. همچنین در این مدل بودجه محدودی جهت غنی سازی مراکز محور در نظر گرفته شده است و مکان یابی و تخصیص به گونه ای انجام می شود که هزینه های ایجاد محورها، حمل و نقل، تعمیر محور مختل شده، جریمه عدم تامین تقاضا و استفاده از محور غیرقابل شکست ساختگی حداقل شوند. ساختار این مقاله بدین شرح خواهد بود: در بخش ۲ پیشینه موضوع ارائه می شود، در بخش ۳ مدل ریاضی معرفی می شود، در بخش ۴ به تشریح روش حل پرداخته شده است، در بخش ۵ تحلیل حساسیت انجام می شود و در بخش ۶ نتیجه گیری ارائه می شود.

۲- پیشینه تحقیق

(Kim, H. and O'Kelly, 2009) برای نخستین بار مسئله مکان یابی محور قابل اعتماد را مطالعه کردند. آن ها مسئله را به دو زیر مسئله حداکثر قابلیت اطمینان که به دنبال جریان کامل در میان گره ها در سطح مشخصی از قابلیت اطمینان هست و پراکندگی اجباری P محور به این معنی که برای افزایش قابلیت اطمینان تا جایی که امکان پذیر باشد مراکز محور از هم دور باشند، تبدیل کردند و یک مدل دوهدفه که قابلیت اطمینان و پراکندگی را به طور همزمان در نظر می گیرد ارائه دادند. (Zarandi, Davari and Sisakht, 2012) مسئله محورپوششی با تخصیص چندگانه را با در نظر گرفتن پوشش پشتیبان و پراکندگی اجباری محورها مطالعه کردند. در مدل آن ها شعاع پوشش از قبل مشخص شده و اگر فاصله گره غیرمحور تا محور کم تر از شعاع پوشش باشد، آن گره پوشش داده می شود و همچنین اگر حداقل Q مسیر ممکن برای تامین نیاز یک مشتری در یک محدوده زمانی وجود داشته باشد آن مشتری تحت پوشش پشتیبان قرار می گیرد. آن ها به این موضوع در مقاله خود اشاره کردند که این Q بار پوشش به منظور در نظر گرفتن شرایط اضطراری، زمانی که فاجعه ای رخ می دهد و یا افزایش سطح رضایت مشتری از طریق ایجاد مسیرهای مختلف است. (Parvaresh et al., 2013) یک مدل دوسطحی در قالب بازی استکلبرگ رهبر- دنباله رو از مسئله محور میانه تحت اختلالات عمدی ارائه دادند. در مدل آن ها هدف دنباله روها شناسایی محورهایی است که در صورت خرابی منجر به بیشترین کاهش در بهره وری خدمات شود و هدف رهبر مکان یابی محورها به گونه ای است که حداقل هزینه حمل و نقل در شرایط عادی و شکست ایجاد شود. آن ها برای

به آن گره از طریق آن محور صورت می گیرد. در تخصیص چندگانه هر گره غیر محور حداقل به یک محور اختصاص می یابد و می تواند از بیش از یک محور جهت ارسال و یا دریافت جریان/ کالا استفاده نماید. در مدل های مکان یابی محور ϵ فرض به طور معمول وجود دارد:

۱. شبکه محور کامل است.
۲. ارتباط بین دو محور هزینه کمتری به ازای هر واحد کالا/ جریان نسبت به ارتباط بین یک محور و یک پره و یا دو پره دارد.

۳. امکان ارتباط مستقیم بین گره های غیرمحور وجود ندارد.

۴. هزینه ها متناسب با فاصله هستند و نابرابری مثلثی رعایت می شود. در دنیای واقعی و کاربردی مثال های متعددی از توقف کارکرد مجموعه تسهیلات و برهم خوردن نظم حاکم بر سیستم ارائه شده است. یکی از بهترین و بارزترین مثال های این موضوع می توان به حادثه تروریستی یازده سپتامبر اشاره نمود که بر اثر این حادثه، بخش اعظمی از فرآیندهای اقتصادی، اداری و تجاری به دلیل توقف کارکرد چند تسهیل مهم و کلیدی از جمله برج های دوقلو مرکز تجارت جهانی متوقف شد. هر چند پس از این حادثه، فرآیندهای کاری مربوطه به صورت موقت شروع به کار کردند؛ اما استقرار و ساخت تسهیلات آسیب دیده و متوقف شده بین ۳ تا ۵ سال به طول انجامید. بنابراین عدم توجه به بحث قابلیت اطمینان در مکان یابی تسهیلات ممکن است خسارات جانی و مالی فراوانی را در برداشته باشد. به طور سنتی در مسائل مکان یابی محور به تعیین مکان محور و تخصیص پره ها به محور پرداخته می شود و فرض می شود که محورها همیشه در دسترس هستند. حال آن که بنا به دلایل مختلف مانند آب و هوای نامساعد، تجهیزات خراب، اعتصابات کارگری، حملات عمدی ممکن است محور خراب شود و نتواند خدمت دهی انجام دهد. بروز اختلال ممکن است باعث هزینه حمل و نقل بیشتر، تاخیر در تحویل، کمبود موجودی و از دست دادن سهم بازار شود (Peng et al., 2011). بنابراین، تصمیم گیرندگان مجبور به مدنظر قرار دادن اختلال در زمان طراحی شبکه می باشند. در این مقاله برای نخستین بار مدل ریاضی قابل اعتمادی برای مسئله مکان یابی محور با امکان برقراری ارتباط مستقیم بین گره های غیر محور ارائه شده است. در مدل تعریف شده محور پشتیبان و مسیرهای

ارزش استفاده شود و ممکن است زمانی که اشیاء با ارزش جابجا می‌شوند، مورد حمله قرار بگیرند (جرایم عمدی). آن‌ها به یک شبکه محور قابل اعتماد با تمام ویژگی‌های معمولی سه جزء جدید مرکز جعلی، تخصیص جعلی و جریان جعلی را اضافه کردند و یک برنامه عددصحيح مختلط خطی برای مسئله محور میانه قابل اعتماد پیشگیرانه ارائه دادند که تابع هدف از چهار قسمت هزینه حمل‌ونقل واقعی و جعلی و هزینه ایجاد محور واقعی و جعلی تشکیل شده است. (Marufuzzaman et al., 2014) یک مدل ریاضی جهت طراحی یک شبکه حمل‌ونقل چندوجهی قابل اعتماد برای سیستم زنجیره تامین سوخت‌های زیستی ارائه دادند که محورهای چندوجهی تحت اختلالات وابسته به مکان هستند و احتمال اختلال در محور چند وجهی با استفاده از مدل‌های احتمالی و با توجه به داده‌های دنیای واقعی برآورد می‌شود. هم‌چنین از الگوریتم تجزیه بندرز جهت حل این مسئله استفاده نمودند. (Sadeghi et al., 2015) مسئله مکان‌یابی محور پوششی قابل اعتماد با تخصیص تک را با هدف حداقل هزینه اولیه و حمل‌ونقل بررسی نمودند. در مسئله آن‌ها ظرفیت مسیر به علت ترافیک روزانه، زلزله، سیل و غیره در معرض افت قرار دارد و با توجه به شدت حادثه میزان کاهش ظرفیت متفاوت خواهد بود و آن‌ها ظرفیت جاده‌ها را متغیر تصادفی در نظر گرفتند که از توزیع ارلنگ بریده پیروی می‌کند و از روش محدودیت شانس برای ساخت محدودیت قابلیت اطمینان ظرفیت استفاده کردند که حداکثر جریانی که شبکه می‌تواند حمل کند را مشخص می‌نماید. هم‌چنین برای بدست آوردن جواب نزدیک بهینه الگوریتم فراابتکاری تکامل تفاضلی را معرفی کردند و عملکرد روش خود را با الگوریتم ژنتیک مقایسه نمودند. (An, Zhang and Zeng, 2015) یک مدل عددصحيح مختلط غیرخطی جهت طراحی شبکه محور قابل اعتماد ارائه دادند و برای رسیدگی به اختلالات از محور پشتیبان و مسیرهای جایگزین استفاده کردند. آن‌ها از روش شاخه‌وکران و ساده‌سازی لاگرانژی برای بدست آوردن جواب بهینه استفاده نمودند و با حل مثال‌های عددی، افزایش انعطاف‌پذیری شبکه‌های محور در مقابل در دسترس‌تر نبودن و هم‌چنین عملکرد الگوریتم ارائه شده را نشان دادند. (Azizi et al., 2016) یک مدل عددصحيح مختلط درجه دو برای مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی محور میانه با تخصیص تک ارائه دادند که تابع هدف آن حداقل‌سازی مجموع وزن‌دار هزینه حمل‌ونقل در شرایط عادی و در صورت بروز اختلال است. در مدل آن‌ها احتمالات شکست ناهمگن هستند و در هر زمان تنها یک شکست رخ می‌دهد و برای حل نیز یک الگوریتم ژنتیک با یک عملگر تقاطع کارآمد ارائه دادند. (Mohammadi et al.,

حل مسئله دو الگوریتم براساس شبیه‌سازی تبرید ارائه دادند که به منظور محاسبه هزینه حمل‌ونقل از روش شمارش و روش اکتشافی حریص استفاده می‌شود و از روش تاگوچی جهت تنظیم پارامترها استفاده نمودند. (Mohammadi, Jolai and Tavakkoli-Moghaddam, 2013) یک مدل چندهدفه تصادفی برای مسئله مکان‌یابی محور پوششی با عدم قطعیت ارائه دادند. اهداف در مدل آن‌ها حداقل کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری فعلی و حداقل حداکثر زمان حمل‌ونقل بین هر جفت مبدأ-مقصد در شبکه است. در مسئله آن‌ها چندین نوع وسیله جهت حمل‌ونقل وجود دارد و مدت زمان سفر بین هر جفت گره متغیر تصادفی با توزیع نرمال مستقل هست که در صورت بروز اختلال زمان سفر افزایش خواهد یافت. هم‌چنین یک الگوریتم رقابت استعماری چندهدفه برای بدست آوردن جواب مسئله ارائه دادند. (Parvaresh et al., 2014) مسئله مکان‌یابی محور میانه با تخصیص چندگانه را در شرایطی که محورها در معرض اختلالات عمدی هستند، بررسی کردند و یک مدل دو سطحی با دو تابع هدف در قالب بازی استکلبرگ رهبر-دنباله‌رو ارائه نمودند. در مدل آن‌ها تابع هدف اول هزینه حمل‌ونقل در شرایط عادی را حداقل می‌نماید و تابع هدف دوم حداکثر هزینه حمل‌ونقل تحت اختلال را حداقل می‌نماید. آن‌ها دو الگوریتم فراابتکاری چندهدفه براساس روش شبیه‌سازی تبرید و جستجوی ممنوع نیز توسعه دادند. (Eghbali, Abedzadeh and Setak, 2014) مسئله محور پوششی با تخصیص تک را بررسی نمودند. در مدل آن‌ها پوشش زمانی رخ می‌دهد که هزینه، زمان یا مسافت بین هر اتصال در مسیر بین مبدأ و مقصد که از دو محور می‌گذرند از یک مقدار مشخصی کم‌تر باشد. آن‌ها در مدل خود قابلیت اطمینان را برای محورها و مسیرها در نظر گرفتند به طوری که قابلیت اطمینان مسیرهای انتخاب شده به طور تضمینی از مقدار مشخصی کم‌تر نخواهد بود. مدل آن‌ها دارای دو هدف است که در تابع اول هزینه‌های مسافت و هزینه اولیه حداقل می‌شود و در تابع دوم متوسط تعداد اتصالات بین هر جفت مبدأ و مقصد حداقل می‌شود تا حداکثر رضایت مشتری از این طریق کسب شود، چون مشتری ترجیح می‌دهد با تعداد کم‌تر یا بدون واسطه به مقصد برسد. جهت حل نیز از NSGA-II استفاده کردند و مقادیر پارامترهای الگوریتم را از روش سطح پاسخ تعیین نمودند. (Hamidi, Gholamian and Shahanaghi, 2014) یک مفهوم جدید در مسئله محور به نام محور قابل اعتماد پیشگیرانه مطرح نمودند که براساس تعریف پدافند غیرعامل هست. آن‌ها در مقاله خود به این موضوع اشاره داشتند که به منظور حمل‌ونقل آسان‌تر و سریع‌تر بهتر است از شبکه محور جهت حمل‌ونقل اشیاء با

برش چندگانه استفاده کردند. (Azizi, 2019) الگوریتم فراابتکاری بهینه سازی ازدحام ذرات برای مسئله مکان‌یابی محور با تخصیص تک و احتمال شکست ناهمگن ارائه داد. (Roghianian and Haghdooost, 2019) در مقاله خود برای مسئله مکان‌یابی محور با تخصیص تک تحت اختلال، مدل عددصحیح غیرخطی ارائه نمودند که به منظور افزایش قابلیت اطمینان علاوه بر در نظر گرفتن محور پشتیبان و مسیرهای جایگزین از رویکرد تقویت استفاده شده است. (Madani et al, 2018) یک مدل قابل اعتماد دو هدفه برای مسئله مکان‌یابی محور پوششی با تخصیص تک ارائه دادند. در مدل پیشنهادی آن‌ها تابع هدف شامل حداکثرسازی جریان پوشش داده شده مورد انتظار و حداقل سازی تراکم است که به منظور افزایش قابلیت اطمینان از محور پشتیبان استفاده کردند و مدل را با استفاده از NSGA-II حل نمودند. (Ghaffarinasab, and Motallebzadeh, 2018) سه مدل ریاضی براساس بازی استکلبرگ برای مسئله مکان‌یابی محور میانه و مرکز و پوششی با تخصیص چندگانه تحت اختلال ارائه دادند. در مدل تک سطحی دنباله‌رو، هدف حداکثرسازی هزینه حمل‌ونقل رهبر هست و در مدل دو سطحی رهبر، هدف حداقل سازی هزینه حمل‌ونقل پس از بروز اختلال هست. آن‌ها از شبیه سازی باز پخت جهت حل مسئله استفاده نمودند. (Maiyar and Thakkar, 2018) یک مدل پایدار عدد صحیح مختلط غیرخطی چند دوره‌ای با هدف حداقل‌سازی هزینه حمل‌ونقل و ایجاد محور، مسیریابی دوباره، هزینه‌های زیست محیطی و اجتماعی برای حمل و نقل دانه‌های غذایی بین دو ایالت هند در حضور اختلال معرفی کردند و جهت حل مسئله بهینه سازی ازدحام ذرات و تکامل تفاضلی را ترکیب کردند. (Ramamoorthy et al, 2018) در تحقیق خود دو مدل ریاضی جهت بررسی مسئله مکان‌یابی محور با در نظر گرفتن اختلال براساس بازی استکلبرگ ارائه دادند و جهت کاهش مسئله به تک سطحی دو روش جدید معرفی کردند و مسئله را با استفاده از تجزیه بندرز حل نمودند. (Rostami et al, 2018) در تحقیق خود برای مسئله مکان‌یابی محور میانه با تخصیص تک یک فرمول دو سطحی ارائه می‌دهند و از روش تجزیه بندرز جهت حل استفاده می‌کنند. آن‌ها در مدل خود از محور پشتیبان جهت مقابله با اختلال استفاده نمودند (Momayez et al, 2018) یک مدل برنامه‌نویسی تصادفی دو مرحله‌ای برای مسئله مکان‌یابی محور با تخصیص تک با محدودیت ظرفیت و امکان بروز اختلال ارائه دادند که مقادیر تخفیف هزینه حمل‌ونقل بین گره محور و غیر محورها براساس تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز تعیین می‌شود. آن‌ها مدل خود را به یک فرم سناریویی تبدیل کردند و

مسئله P محور مرکز و میانه با تخصیص تک را بررسی کردند و آن را به صورت یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط غیرخطی دوهدفه ارائه دادند که به‌طور همزمان مکان محور، تخصیص گره‌های غیرمحور به محور و تخصیص انواع مختلف اتصالات بین محورها تعیین می‌شوند. تابع هدف اول هزینه اولیه و حمل‌ونقل را حداقل می‌کند و تابع هدف دوم حداکثر زمان سفر بین گره‌ها را حداقل می‌سازد. در مدل آن‌ها عدم قطعیت در جریان‌ها، هزینه‌ها، زمان و عملیات محور وجود دارد که از یک رویکرد صف فازی برای مدل کردن عدم قطعیت در شبکه استفاده نمودند. جهت حل مدل از الگوریتم تکاملی قدرتمند مبتنی بر نظریه بازی و الگوریتم بهینه سازی علف هرز مهاجم استفاده کردند. آن‌ها هم‌چنین چندین تحلیل حساسیت انجام دادند و نتایج نشان دادند که شکست محورها به‌طور قابل توجهی ساختار و مقادیر هزینه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد به‌طوری‌که گره‌های غیر محور به احتمال زیاد به محورها با احتمال شکست کم‌تر اختصاص می‌یابند. (Mohammadi et al., 2016) طراحی شبکه لجستیک قابل اعتماد از طریق یک مسئله مکان‌یابی محور را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها ابتدا یک برنامه نویسی عددصحیح مختلط به منظور حداقل رساندن مجموع هزینه اسمی و هزینه شکست ارائه دادند که تحریب به دو صورت جزئی و کامل است. در مدل آن‌ها در صورت بروز اختلال کامل از محور پشتیبان استفاده می‌شود که هزینه بیش‌تری دربر خواهد داشت و در صورت بروز اختلالات جزئی نرخ خدمت‌دهی کاهش می‌یابد به این معنی که مدت زمان پردازش افزایش می‌یابد و یا جهت دریافت خدمت باید انتظار کشید تا محور به حالت نرمال بازگردد. آن‌ها هم‌چنین یک مسئله مکان‌یابی محور قابل اعتماد تک هدفه p - نیرومندی را نیز فرمول‌بندی کردند و یک الگوریتم ترکیبی از ژنتیک و رقابت استعماری جهت حل مسئله ارائه دادند. (Mohammadi, Jula and Tavakkoli, 2017) Moghaddam, 2017) یک مدل ریاضی برای طراحی شبکه قابل اعتماد حمل و نقل مواد خطرناک بر اساس توپولوژی مکان‌یابی محور ارائه دادند که در این مدل از حالات حمل و نقل مختلف به منظور کاهش ریسک و اختلال استفاده شده است. آن‌ها یک رویکرد کارآمد نیز جهت بدست آوردن جواب‌های نزدیک بهینه معرفی نمودند. (Fotuhi and Huynh, 2017) در تحقیق یک مدل ریاست و قابل اعتماد برای توسعه شبکه حمل و نقل راه آهن ارائه دادند که تقاضا و تامین دارای عدم قطعیت است و از الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای حل مسئله استفاده نمودند (Yahyaee and Bashiri, 2017) به منظور کاهش تعداد سناریوها برای حل مدل مکان‌یابی محور قابل اعتماد پیشنهادی خود از تجزیه بندرز با

امکان ارتباط مستقیم نیز وجود دارد. او یک روش حل که به تعیین مکان محور می‌پردازد و زیرمسئله مسیریابی را به صورت جداگانه طی تکرارهای مختلف انجام می‌دهد نیز ارائه داد. (Nickel, Schöbel and Sonneborn, 2001) در مقاله خود مدل مکان‌یابی محور را به صورتی که در حمل‌ونقل عمومی شهری قابل اجرا (مناسب) باشد، ارائه دادند. آن‌ها در مدل خود از فرض لزوم ارتباط کامل مابین محورها و همچنین عدم ایجاد ارتباط مستقیم بین گره‌های غیر محور چشم‌پوشی کرده بودند. (Yoon and Current, 2008) یک فرمولاسیون جدید برای مکان‌یابی محور با امکان برقراری ارتباط مستقیم بین مبدأ- مقصد ارائه دادند. در این مدل جهت ایجاد محورها و مسیرها هزینه در نظر گرفته شده است و هزینه متغیر برای عبور از مسیرها نیز وجود دارد. همچنین جهت حل مسئله یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر دوگان نیز ارائه دادند. (Catanzaro et al., 2011) یک مدل عددصحیح برای مسئله پارتیشن‌بندی مکان‌یابی محور- مسیریابی معرفی نمودند. به این صورت که شبکه موجود به زیرشبکه‌هایی تقسیم می‌شوند که در هر زیرشبکه حداقل یک محور ایجاد می‌شود سپس جریان‌ها به‌طوری که هزینه‌ها حداقل شوند، مسیریابی می‌شوند. در مسئله تعریف شده توسط آن‌ها شبکه محور کامل نیست و امکان ارتباط مستقیم بین مبدأ و مقصد وجود دارد. همچنین آن‌ها از نامساوی‌های معتبر جهت تقویت مدل استفاده نمودند. در جدول زیر خلاصه‌ای از مقالات مطالعه شده در زمینه مکان‌یابی محور قابل اعتماد ارائه شده است. نسبت به تحقیقاتی که تا به حال در حوزه مکان‌یابی محور با امکان بروز اختلال در شبکه انجام شده است، در این مقاله برای نخستین بار یک مدل ریاضی عددصحیح غیرخطی قابل اعتماد برای مسئله مکان‌یابی محور میانه با امکان برقراری ارتباط مستقیم بین گره‌های غیر محور ارائه می‌شود که جهت افزایش قابلیت اطمینان به طور همزمان بودجه محدودی جهت تقویت محورها، محور پشتیبانی و مسیرهای جایگزین در نظر گرفته شده است. همچنین در تابع هدف هزینه تعمیر محور خراب مدنظر قرار گرفته است.

یک روش متاهیورستیک براساس جستجوی پیشرفته انطباقی جهت حل ارائه دادند. (Torkestani et al, 2018) برای مسئله مکان‌یابی محور سلسله مراتبی با حمل‌ونقل چندگانه یک مدل پویا ارائه دادند که در تمام دوره‌ها محورها و تخصیص‌ها و مسیرها می‌توانند با نوسانات تقاضا مقابله کنند. آن‌ها در مدل خود فرض کردند که محورها و مسیرها ممکن است چنددوره بسته باشند ولی مجدد باز می‌شوند و جهت حل مسئله از شبیه سازی مونت کارلو در الگوریتم اکتشافی دو مرحله‌ای استفاده کردند. (Yahyaei et al, 2019) برای مسئله مکان‌یابی محور با تخصیص تک یک مدل ریاضی درجه دوم ارائه دادند که محورها در معرض تخریب عمده قرار می‌گیرند و ممکن است بیش از یک محور در یک مسیر خراب شود. آن‌ها در مدل خود برای افزایش قابلیت اطمینان از محور پشتیبان استفاده کردند و مدل شامل دو هدف، حداقل‌سازی جریان‌های از دست رفته و حداقل‌سازی هزینه کل است که با اضافه کردن یک محدودیت مبتنی بر ساختار، تابع هدف به یک عدد کاهش می‌یابد. (Eydi and Nasiri, 2019) یک مدل ریاضی برای مسئله مکان‌یابی محور میانه با تخصیص تک ارائه دادند که سعی در انتخاب مسیرهایی با قابلیت اطمینان بیش‌تر دارد و برای مواجهه با خرابی محورها به انتخاب محور پشتیبان می‌پردازد. مدل ارائه شده دارای دو هدف، حداقل‌سازی جریان با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان مسیرها و حداقل‌سازی جریان از دست رفته ناشی از خرابی است که از الگوریتم ممتیک جهت حل استفاده شده است. یکی از فرض‌هایی که معمولاً در مکان‌یابی محور در نظر می‌گیرند، عدم ارتباط مستقیم بین گره‌های غیرمحور هست که این فرض برای اولین بار توسط (Aykin, 1994) آزادسازی شد. او مدلی جهت تعیین مکان محورها ارائه نمود که در آن محدودیت ظرفیت جهت خدمت‌رسانی وجود دارد و امکان انتقال جریان به طور مستقیم و غیرمستقیم (از طریق محور) بین گره‌ها وجود دارد. (Aykin, 1995) مدلی ارائه نمود که به‌طور همزمان به تعیین مکان محورها و مسیریابی برای هر محور می‌پردازد. در مسئله تعریف شده توسط او علاوه بر امکان ارتباط بین یک مبدأ و مقصد از طریق ۱ یا ۲ محور،

جدول ۱. خلاصه‌ای از مقالات منتشر شده در زمینه مکان‌یابی محور

مطالعه موردی	محدودیت ظرفیت	امکان برقراری ارتباط مستقیم بین گره‌های غیرمحورها	روش حل		
			فراابتکاری	ابتکاری	دقیق
Kim and O'Kelly	-	-			*
Zarandi et al	-	-			*
Parvaresh et al	-	-	*		
Mohammadi et al	*	-	*		

Parvaresh et al	۲۰۱۴			*	-	-	-
Eghbali et al	۲۰۱۴			*	-	-	-
Hamidi et al	۲۰۱۴	*			-	-	-
Sadeghi et al	۲۰۱۴			*	-	-	-
Marufuzzaman et al	۲۰۱۴	*			-	*	*
An and et al	۲۰۱۵	*			-	-	-
Azizi et al	۲۰۱۶			*	-	-	-
Mohammadi et al	۲۰۱۶			*	-	-	*
Mohammadi et al	۲۰۱۶			*	-	*	-
Fotuhi and Huynh	۲۰۱۷			*	-	*	*
Yahyaei and Bashiri	۲۰۱۷		*		-	-	-
Madani et al	۲۰۱۸			*	-	-	*
Ghaffarinasab and Motallebzadeh	۲۰۱۸			*	-	-	-
Maiyar and Thakkar	۲۰۱۸			*	-	*	-
Ramamoorthy et al	۲۰۱۸		*		-	-	-
Rostami et al	۲۰۱۸		*		-	-	-
Momayez et al	۲۰۱۸			*	-	*	-
Torkestani et al	۲۰۱۸		*		-	*	*
Azizi	۲۰۱۹			*	-	-	-
Yahyaei et al	۲۰۱۹		*		-	-	-
Eydi and Nasiri	۲۰۱۹			*	-	-	-
Roghanian and Haghdoost	۲۰۱۹			*	-	*	-

۳- مدل ریاضی

در این بخش رویکرد این مقاله برای مقابله با عدم اطمینان تشریح شده و مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌شود.

احداث شده را تقویت نمود تا آن محورها غیرقابل شکست شوند.

۳-۲ - مفروضات مسئله

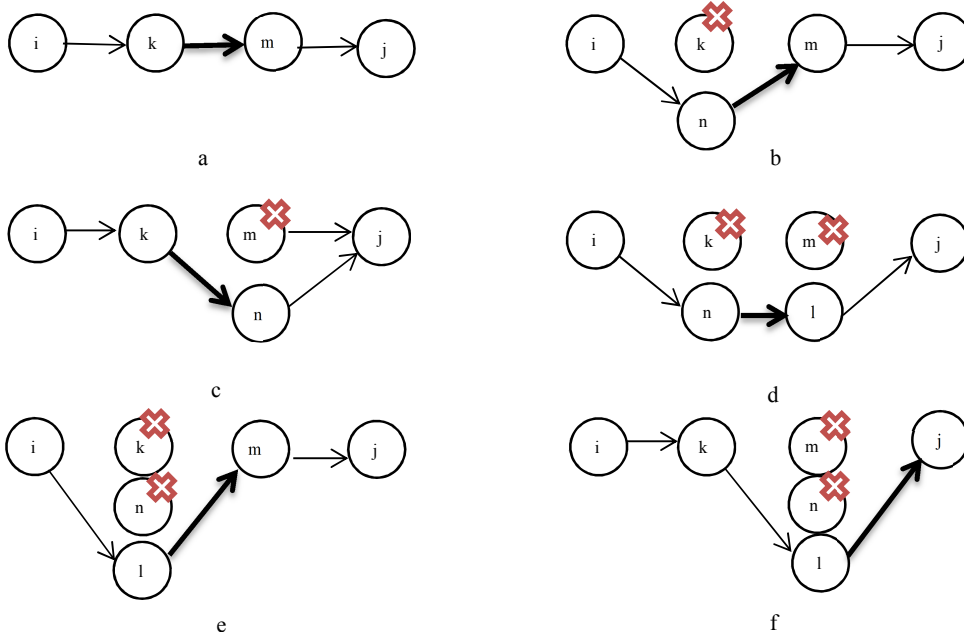
در مسئله مکان‌یابی محور با تخصیص تک، هر گره غیرمحور به یک محور خاص اختصاص می‌یابد و تمام ورودی و خروجی‌ها به آن گره توسط محور صورت خواهد گرفت. همان‌طور که (Peng et al., 2011) در مقاله خود مطرح کردند، احتمال این‌که بیش از دو تسهیل غیر مرتبط به طور همزمان مختل شوند کم است. بنابراین در این مطالعه فرض شده است که در هر زمان حداکثر دو شکست رخ می‌دهد و احتمالات شکست مستقل و ناهمگن هستند و گره‌های

۳-۱- تشریح قابلیت اطمینان در مدل

در این مطالعه احتمال خرابی برای محورها در نظر گرفته شده است و فرض شده است که مسیرهای بین نقاط تقاضا و محورها دچار خرابی نمی‌شوند و به منظور افزایش قابلیت اطمینان از رویکرد محور پشتیبان و تقویت محور استفاده می‌شود؛ به این صورت که در زمان خرابی یک محور، می‌توان از محور پشتیبان جهت ارسال کالا استفاده نمود. هم‌چنین با استفاده از بودجه‌ای محدود می‌توان یکسری از محورهای

تقویت محور شامل هزینه متغیر و هزینه راه‌اندازی هست. هزینه راه‌اندازی، یک هزینه ثابت است که برای غنی‌سازی محور لازم است به طور مثال عبارت است از هزینه تحقیق و توسعه، آموزش پرسنل. هزینه متغیر غنی‌سازی، با میزان بهبود قابلیت اطمینان متغیر است. مثال‌ها عبارتند از هزینه کسب و نصب هرگونه امکانات حفاظتی، هزینه تهیه و ذخیره‌سازی موجودی پشتیبانی، هزینه استخدام نیروی کار اضافه (Li, Zeng, and Savachkin, 2013). در مدل ارائه شده در این مطالعه، امکان برقراری ارتباط مستقیم بین گره‌های غیر محور وجود دارد.

غیرمحور در سطوح مختلف به محورها اختصاص می‌یابند. به این معنی که در ابتدا هر پره به یک محور اختصاص می‌یابد، تخصیص اولیه، سپس در سطح یک و دو ($r=1,2$) پره به محور پشتیبان اختصاص می‌یابد. البته در صورتی که تخصیص اولیه پره یک محور تقویت شده باشد، دیگر محور پشتیبان انتخاب نخواهد شد و هم‌چنین اگر پشتیبان اول یک پره، محور ساختگی غیرقابل شکست و یا یک محوری که مورد محافظت قرار گرفته شده باشد، پشتیبان دوم انتخاب نخواهد شد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد در این مطالعه بودجه‌ای محدود، B ، جهت تقویت محورها در نظر گرفته شده است و محور با صرف هزینه می‌تواند احتمال خرابی را به صفر برساند.



شکل ۱. ساختار مختلف شبکه محور قابل اعتماد- (a) زمانی که شکستی در مسیر رخ ندهد. (b) زمانی که محور اول خراب شود. (c) زمانی که محور دوم خراب شود. (d) زمانی که محور اول و دوم خراب شود. (e) زمانی که محور اول و پشتیبان اول محور اول خراب شوند. (f) زمانی که محور دوم و پشتیبان اول محور دوم خراب شوند.

۳-۳- مجموعه‌های تعریف شده در مدل

مجموعه سطوح تخصیص است. یک مسیر بین مبدأ (i) و مقصد (j) با ϵ عنصر نمایش داده می‌شود (i, k, m, j) به طوری که k محور اول و m محور دوم است. هزینه حمل و نقل و حجم حمل و نقل بین i و j به ترتیب برابر C_{ij} و W_{ij} است. هزینه حمل و نقل هر واحد جریان از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

مجموعه کل گره‌های موجود در شبکه برابر N هست. $N = \{1, 2, \dots, N\}$ و مجموعه گره‌های کاندید برای محور $H = \{1, 2, \dots, N+1\}$ است. ما فرض می‌کنیم مجموعه H با مجموعه N یکسان است و تنها تفاوت آن‌ها در گره $N+1$ است که یک گره غیرقابل شکست ساختگی هست. $\Gamma = \{1, 2\}$

$$F_{ikmj} = C_{ik} + \alpha C_{km} + C_{mj} \quad (1)$$

$Y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{i به محور k اختصاص داده شده است} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

$X_{ikmj} = \begin{cases} 1 & \text{جریان } i-j \text{ از طریق محور k و m منتقل شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

$U_{ijnr} = \begin{cases} 1 & \text{محور } \Gamma, n \text{ امین سطح پشتیبانی برای محور اول در جریان } i-j \text{ باشد.} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

$V_{ijnr} = \begin{cases} 1 & \text{محور } \Gamma, n \text{ امین سطح پشتیبانی برای محور دوم جریان } i-j \text{ باشد.} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

$Z_k = \begin{cases} 1 & \text{محور k محافظت شده است} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{مبدأ i به طور مستقیم با مقصد j در ارتباط باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

۳-۴- پارامترها

α : ضریب تخفیف ارتباط دو محور $0 < \alpha < 1$

P: تعداد محور

ρ : ضریب تاثیر اختلال در هزینه کل

B: حداکثر بودجه جهت محافظت از محورها

f_i : هزینه اولیه احداث محور

q_i : احتمال شکست هر گره $q_i \in [0, 1]$

s_i : هزینه ثابت کاهش احتمال شکست

e_i : هزینه متغیر کاهش احتمال شکست

CV_i : ظرفیت محور

η_i : هزینه تعمیر محور مختل شده

W_{ij} : حجم حمل و نقل بین i-j

C_{ij} : هزینه حمل و نقل بین i-j

ϕ_{ij} : جریمه عدم تامین مشتری

۳-۵- متغیر تصمیم

متغیرهای تصمیم شامل متغیر تخصیص Y، متغیر مسیر X، متغیرهای محور پشتیبان U و V و متغیر غنی‌سازی محور Z و متغیر ارتباط مستقیم b هستند.

۳-۶- تابع هدف و محدودیت‌های مسئله

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{k=1}^N f_k Y_{kk} + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{j=1}^N F_{ikmj} W_{ij} X_{ikmj} (1 - q_k (1 - Z_k)) (1 - \\ & q_m (1 - Z_m)) + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N F_{ikkj} W_{ij} X_{ikkj} (1 - q_k (1 - Z_k)) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\sum_{m=1}^N F_{iimj} X_{iimj} W_{ij} (1 - \right. \\ & q_m (1 - Z_m)) + \sum_{k=1}^N F_{ikjj} X_{ikjj} W_{ij} (1 - q_k (1 - Z_k)) + F_{iijj} X_{iijj} W_{ij} + F_{iijj} X_{iijj} W_{ij} \left. \right) \\ & + \rho \left[\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^{N+1} \sum_{l=1}^{N+1} (F_{ilmj} W_{ij} X_{ikmj} U_{ijl1} q_l (1 - q_m (1 - Z_m)) (1 - q_l (1 - Z_l)) + \right. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 & F_{inmj}w_{ij}X_{ikmj}U_{ijl1}U_{ijn2}q_kq_l) + \\
 & (F_{iknj}w_{ij}X_{ikmj}V_{ijn1}q_m(1 - q_k(1 - Z_k))(1 - q_n(1 - Z_n)) + F_{iklj}w_{ij}X_{ikmj}V_{ijn1}V_{ijl2}q_mq_n) + \\
 & F_{ilmj}w_{ij}X_{ikmj}U_{ijl1}V_{ijn1}q_mq_k + \\
 & \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{N+1} (F_{illj}w_{ij}q_kX_{ikkj}U_{ijl1}(1 - q_l(1 - Z_l)) + F_{innj}w_{ij}q_kq_lX_{ikkj}U_{ijl1}U_{ijn2}) + \\
 & \sum_{k=1}^N \eta_k q_k (1 - Z_k) Y_{kk} + \\
 & \left. \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \varphi_{ij} w_{ij} (Y_{ii} q_i (1 - Z_i) + Y_{jj} q_j (1 - Z_j)) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^2 (U_{ijk+1r} f_{k+1} + V_{ijk+1r} f_{k+1}) \right] \\
 & + \sum_i \sum_{j \neq i} c_{ij} w_{ij} b_{ij}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{m=1}^N X_{ikmj} &\leq Y_{ik} \quad \forall i, j \in N, k \in \{1, \dots, N\} \quad j \neq i & (3) \\
 \sum_{k=1}^N X_{ikmj} &\leq Y_{jm} \quad \forall i, j \in N, m \in \{1, \dots, N\} \quad j \neq i & (4) \\
 \sum_{k=1}^N Y_{ik} &\leq 1 \quad \forall i \in N & (5) \\
 \sum_{k=1}^N Y_{kk} &= P & (6) \\
 b_{ij} + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^K X_{ikmj} &= 1 \quad \forall i, j \quad j \neq i & (7) \\
 b_{ij} - b_{ji} &= 0 \quad \forall i, j \quad j \neq i & (8) \\
 2b_{ij} &\leq 2 - Y_{ii} - Y_{jj} \quad \forall i, j \quad j \neq i & (9) \\
 \sum_{m=1}^N X_{ikmj} + U_{ijkr} &\leq Y_{kk} \quad \forall i, j \in N, j \neq i, k \in \{1, \dots, N\}, r \in \{1, 2\} & (10) \\
 \sum_{k=1}^N X_{ikmj} + V_{ijmr} &\leq Y_{mm} \quad \forall i, j \in N, j \neq i, m \in \{1, \dots, N\}, r \in \{1, 2\} & (11) \\
 \sum_{l=1}^{N+1} U_{ijl1} + \sum_{m=1}^N X_{imj} + \sum_{m=1}^N X_{ijmj} + b_{ij} &= 1 - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N Y_{ik} Z_k \quad \forall i, j \in N \quad j \neq i & (12) \\
 \sum_{n=1}^{N+1} V_{ijn1} + \sum_{k=1}^N X_{ikj} + \sum_{k=1}^N X_{ikij} + b_{ij} &= 1 - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i \\ m \neq j}}^N Y_{jm} Z_m \quad \forall i, j \in N \quad j \neq i & (13) \\
 \sum_{l=1}^N U_{ijl2} + U_{ijk+11} &= \sum_{l=1}^N U_{ijl1} (1 - Z_l) \quad \forall i, j \in N, j \neq i & (14) \\
 \sum_{n=1}^N V_{ijn2} + V_{ijk+11} &= \sum_{n=1}^N V_{ijn1} (1 - Z_n) \quad \forall i, j \in N, j \neq i & (15) \\
 \sum_{r=1}^2 U_{ijlr} &\leq Y_{ll} \quad \forall i, j \in N, j \neq i, l \in \{1, \dots, N\} & (16) \\
 \sum_{r=1}^2 V_{ijnr} &\leq Y_{nn} \quad \forall i, j \in N, j \neq i, n \in \{1, \dots, N\} & (17) \\
 \sum_{k=1}^N Y_{ik} Z_k + \sum_{l=1}^N \sum_{r=1}^2 U_{ijlr} Z_l + \sum_{r=1}^2 U_{ijk+1r} + \sum_{m=1}^N X_{imj} + \sum_{m=1}^N X_{ijmj} + b_{ij} &= 1 \quad \forall i, j \in N, j \neq i & (18) \\
 \sum_{m=1}^N Y_{jm} Z_m + \sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^2 V_{ijnr} Z_n + \sum_{r=1}^2 V_{ijk+1r} + \sum_{k=1}^N X_{ikij} + \sum_{m=1}^N X_{ikj} + b_{ij} &= 1 \quad \forall i, j \in N, j \neq i & (19) \\
 Y_{k+1k+1} &= 1 & (20) \\
 \sum_{k=1}^N [s_k + e_k q_k] Z_k &\leq B & (21) \\
 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^N X_{ikmj} w_{ij} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^N X_{imkj} w_{ij} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^2 (U_{ijkr} + V_{ijkr}) w_{ij} &\leq CV_k & (22) \\
 &\forall k \in \{1, \dots, N+1\} \\
 Y_{ik} \in \{0.1\}, X_{ikmj} \in \{0.1\}, U_{ijlr} \in \{0.1\}, V_{ijnr} \in \{0.1\}, Z_k \in \{0.1\}, b_{ij} \in \{0.1\} &\forall i, j, k, m, n, l, r & (23)
 \end{aligned}$$

قسمت هشتم جریمه از دست دادن جریان یا تقاضا را محاسبه می‌کند، در صورتی که مبدأ یا مقصد محور باشند، چون در صورت بروز اختلال در یک محور، محور دیگر قادر به پاسخ‌گویی نخواهد بود. میزان جریمه، φ_{ij} دو برابر هزینه حمل و نقل هر واحد جریان مابین مبدأ و مقصد در نظر گرفته شده است. قسمت نهم هزینه استفاده از محور ساختگی غیرقابل شکست است. قسمت دهم هزینه حمل و نقل مستقیم

قسمت اول تابع هزینه مربوط به هزینه اولیه احداث محور است. قسمت دوم و سوم هزینه حمل و نقل در شرایط عادی را درحالی محاسبه می‌کند که مبدأ و مقصد هر دو پره هستند. قسمت چهارم هزینه حمل و نقل را در شرایطی که مبدأ یا مقصد محور باشند، محاسبه می‌کند. قسمت پنجم و ششم محاسبه هزینه حمل و نقل با استفاده از مسیرهای جایگزین در زمان بروز اختلال است. قسمت هفتم هزینه تعمیر محور خراب است.

بودجه موجود جهت غنی‌سازی و محدودیت (۲۲) مربوط به ظرفیت محورها است.

۴-روش حل

جهت حل مسئله مکان‌یابی محور در بسیاری از مقالات از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در این مطالعه نیز برای حل مدل ریاضی معرفی شده از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است که برگرفته از مقاله (Azizi et al., 2016) است.

۴-۱- معرفی الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک اولین بار توسط جان هلند در ۱۹۷۵ مطرح گردید. اساس الگوریتم ژنتیک، تکامل طبیعی هست. الگوریتم ژنتیک برخلاف سایر رویکردهای فراابتکاری؛ به جای کار بر روی یک جواب (کروموزوم) منفرد؛ در هر تکرار بر روی جمعیتی از جواب‌ها کار می‌کند. که در هر تکرار الگوریتم به جمعیت، نسل گفته می‌شود. برای تولید نسل جدید، برخی از جواب‌ها در نسل فعلی انتخاب می‌شوند که به آن جمعیت والد می‌گویند. کروموزوم‌های جمعیت والد با استفاده از سه عملگر اساسی ژنتیک به نام تقاطع و جهش یا حضور مجدد، فرزندان خود را جهت حضور در نسل بعدی تولید می‌کنند. عملگر جهش عموماً برای حفظ سطح قابل قبولی از تنوع در جمعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد و فرزندان برای حضور در نسل بعدی پذیرفته می‌شوند که دارای برازندگی بهتری نسبت به والدین خود باشند. این امر موجب می‌گردد که نسل جدید نسبت به نسل قبلی تکامل یابد. با افزایش تکرار الگوریتم، متوسط برازندگی نسل‌ها بهبود خواهد یافت تا این‌که الگوریتم به ناحیه خاصی از فضای جواب همگرا گردد.

۴-۲ ساختار کروموزوم

تعداد ژن‌های کروموزوم جواب برابر با تعداد گره‌ها است. هر کروموزوم محل احداث محور و تخصیص غیر محورها به محور را نشان می‌دهد.

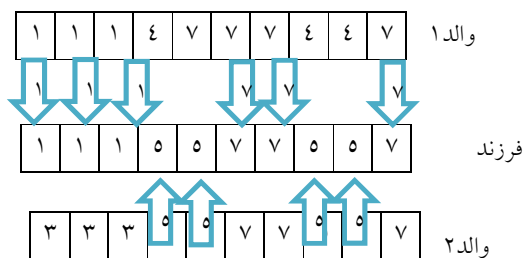
مابین مبدأ و مقصد را محاسبه می‌کند. محدودیت (۳) تضمین می‌کند در صورتی مسیر $i-k-m-j$ ایجاد می‌شود که مبدأ i به محور k اختصاص داده شده باشد. محدودیت (۴) تضمین می‌کند در صورتی مسیر $i-k-m-j$ ایجاد می‌شود که مقصد j به محور m اختصاص داده شده باشد. محدودیت (۵) نشان می‌دهد که هر گره غیر محور حداکثر به یک محور اختصاص می‌یابد. محدودیت (۶) تعداد محورهایی که باید مکان‌یابی شوند را مشخص می‌کند. محدودیت (۷) نشان می‌دهد که انتقال جریان/کالا بین هر مبدأ- مقصد یا از طریق محور یا ارتباط مستقیم صورت می‌گیرد. محدودیت (۸) نشان می‌دهد در صورتی که جریان $i-j$ به صورت مستقیم منتقل شود آن‌گاه جریان مابین $i-j$ نیز باید به صورت مستقیم منتقل شود. محدودیت (۹) نشان می‌دهد که جریان $i-j$ در صورتی می‌تواند به طور مستقیم منتقل شود که i و j محور نباشند. محدودیت (۱۰) و (۱۱) تضمین می‌کنند محور اولیه و محور پشتیبان گره‌ای هستند که به عنوان محور برگزیده شده‌اند و این دو از هم متفاوت هستند. محدودیت (۱۲) و (۱۳) اطمینان ایجاد می‌کنند که مسیرهای جایگزین برای تمامی جریان‌ها در سطح اول انتخاب می‌شود به غیر از زمانی که مبدأ یا مقصد جریان محور باشد و یا ارتباط مستقیم مابین مبدأ و مقصد وجود داشته باشد و یا این‌که محور اولیه انتخاب شده برای آن جریان، مورد حفاظت قرار گرفته شده باشد. محدودیت (۱۴) و (۱۵) تضمین می‌کنند که برای سطح دوم، مسیرهای جایگزین انتخاب شود مگر این‌که در سطح ماقبل، محور مسیر جایگزین مورد محافظت قرار گرفته شده باشد و یا این‌که محور ساختگی غیرقابل شکست باشد. محدودیت (۱۶) و (۱۷) اطمینان ایجاد می‌کنند که محورهای مسیرهای جایگزین در سطوح مختلف با یکدیگر متفاوت هستند. محدودیت (۱۸) و (۱۹) نشان می‌دهند که در صورت عدم ارتباط مستقیم بین یک مبدأ و مقصد، محور اول و دوم برای آن جریان در تخصیص اولیه یا در یکی از سطوح تخصیص باید یک محور غنی‌سازی شده و یا محور غیرقابل شکست ساختگی باشد. محدودیت (۲۰) الزام ایجاد محور غیرقابل شکست را بیان می‌کند، محدودیت (۲۱) مربوط به

۱	۵	۱	۵	۵	۵	۷	۱	۷	۷
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

شکل ۲. کروموزوم محل احداث محور و تخصیص غیر محورها به محور

۴-۵- عملگر تقاطع

در این قسمت با استفاده از یک مثال عملگر تقاطع توضیح داده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در والد ۱، گره ۱، ۴ و ۷ محور هستند و در والد دوم گره ۳، ۵ و ۷ محور هستند. از والد اول از چپ به راست کروموزوم فرزند پر می‌شود، بدین صورت که تمام ژن‌هایی که در والد اول مقدار ۱ را گرفته‌اند، در کروموزوم فرزند نیز مقدار ۱ می‌گیرند. حال باید از والد دوم جهت پرکردن کروموزوم فرزند استفاده شود، اولین کاندید محور ۳ است. از آنجایی که تمام ژن‌هایی که در والد دوم مقدار ۳ را گرفته‌اند، محور بعدی در والد ۱ بررسی می‌شود که محور ۵ هست و تمام ژن‌هایی که در والد دوم مقدار ۵ را گرفته‌اند، در کروموزوم فرزند نیز مقدار ۵ را می‌گیرند. به همین صورت ادامه داده می‌شود تا تمامی ژن‌های کروموزوم فرزند مقداردهی شوند. حال اگر ژنی در کروموزوم فرزند بدون مقدار بماند آن فرزند غیرقابل قبول است و فرآیند دوباره از ابتدا با انتخاب دو والد دیگر آغاز می‌شود.



شکل ۳. مثالی از عملگر تقاطع

کروموزوم شکل ۲ با فرض داشتن ۱۰ گره طراحی شده است. هر ژن نمایانگر یک گره است و عدد داخل هر ژن بیانگر محوری است که آن گره به آن اختصاص یافته است. به طور مثال گره غیرمحور ۳ به محور ۱ اختصاص یافته است. سایر تصمیم‌ها شامل، محوری که باید تقویت شود، محور پشتیبان، مسیرهای جایگزین و ارتباط مستقیم بین غیرمحورها به صورت تصادفی گرفته می‌شود.

۴-۳- تولید جواب اولیه

هر کدام از کروموزوم‌ها به صورت تصادفی تولید می‌شوند.

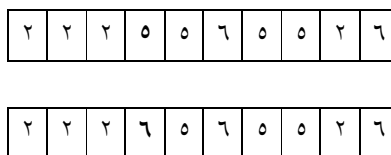
۴-۴- تعیین مقدار تابع برازندگی

تابع برازندگی شامل محاسبه تک تک قسمت‌های تابع هدف و مقدار جریمه است. در این مطالعه استراتژی برخورد با جواب‌هایی که محدودیت ظرفیت را رعایت نمی‌کنند، استراتژی جریمه‌ای در نظر گرفته شده است. بدین صورت که به کروموزوم‌هایی که محدودیت ظرفیت را رعایت نکرده‌اند جریمه تعلق می‌گیرد.

۴-۶- عملگر جهش

در صورتی که آن ژن غیرمحور باشد، از بین سایر محورهای موجود در آن کروموزوم، محور دیگری به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و جایگزین محور قبلی می‌شود.

عملگر جهش انتخاب شده در این مقاله متفاوت با مقاله (Azizi et al., 2016) هست. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است یک ژن به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و



شکل ۴. مثالی از عملگر جهش

۷-۴- شرط توقف

شرط توقف الگوریتم ژنتیک می‌تواند تعداد مشخصی نسل، عدم بهبود در بهترین شایستگی جمعیت در طی چند نسل متوالی، رسیدن به محدودیت زمانی مشخص باشد. در این مطالعه برای مسائل با ابعاد کوچک و متوسط، زمانی الگوریتم متوقف می‌شود که بهبود در تابع برازندگی طی ۶ نسل متوالی کم‌تر از 10^{-5} باشد و برای مسائل با ابعاد بزرگ الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که بهبود در تابع برازندگی طی ۱۰ نسل متوالی کم‌تر از 10^{-5} از باشد.

۵- نتایج محاسباتی

مدل ریاضی ارائه شده توسط مثال‌هایی با تعداد گره و تعداد محور مختلف حل شدند و پارامترهایی ورودی مثال‌ها به

صورت تصادفی ایجاد شدند. مسائل با تعداد گره، N و تعداد محور، H هستند و در سطوح مختلف α حل شدند. جهت حل مسائل از نرم‌افزار گمز حل‌گر **BARON** و هم‌چنین الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نتایج محاسبات توسط الگوریتم ژنتیک و گمز در جدول ۲ نشان داده شده است. در این جدول هزینه کل، مکان محور، محوری که تقویت می‌شود و زمان رسیدن به جواب بهینه/بهترین جواب گزارش شده است. لازم به ذکر است نتایج الگوریتم ژنتیک به‌ازای ۲۰ بار اجرای برنامه بدست آمده است و سپس حداقل آن‌ها در نظر گرفته شده است. با توجه به **NP-hard** بودن مسئله، حل‌گر **BARON** نرم‌افزار گمز قادر به حل مثال‌های با بیش از ۵ گره نیست و فقط از الگوریتم ژنتیک جهت حل مسائل با بیش از ۵ گره استفاده شده است.

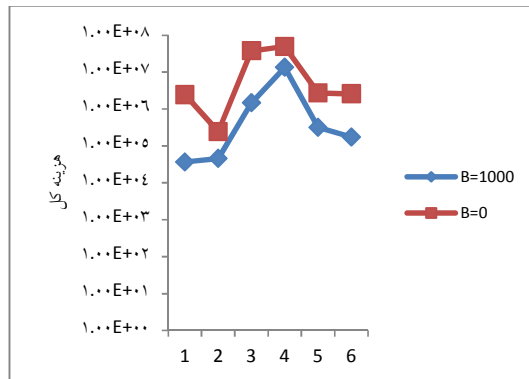
جدول ۲. نتایج محاسباتی مدل ریاضی توسط گمز و الگوریتم ژنتیک

مسئله	α	گمز				ژنتیک		شکاف	
		محور انتخاب شده	محور تقویت شده	هزینه کل	زمان حل	هزینه کل	زمان حل		
$4N2H$	۰/۲	۳	۴	۴	۱۱۲۳۷۹۴/۱۰	۷۴/۱۸	۱۱۲۳۷۹۴/۱۰	۷/۶۴	۰
	۰/۴	۳	۴	۴	۱۲۴۰۵۰۵/۰۷	۷۳/۸۳	۱۲۴۰۵۰۵/۰۷	۸/۰۹	۰
	۰/۸	۱	۴	۴	۱۴۵۷۹۶۵/۳۷	۷۹/۶۰	۱۴۵۷۹۶۵/۳۷	۸/۰۸	۰
$5N2H$	۰/۲	۳	۴	۴	۳۶۴۸۸/۹۴	۱۰۳۴/۲۷	۳۶۴۸۸/۹۴	۲۸/۸۶	۰
	۰/۴	۳	۴	۴	۳۸۷۶۵/۲۶	۷۴۳/۵۷	۳۸۷۶۵/۲۶	۱۶/۷۰	۰
	۰/۸	۳	۴	۴	۴۳۳۱۷/۸۹	۶۶۸/۵۰	۴۳۳۱۷/۸۹	۱۹/۴۳	۰
$7N2H$	۰/۲	۱	۲	۱	-	-	۹۳۹۷۰۹/۲۴	۳۷/۶۷	-
	۰/۴	۱	۲	۱	-	-	۱۰۰۵۰۳۶/۴۴	۴۵/۶۷	-
	۰/۸	۱	۲	۱	-	-	۱۱۷۸۹۱۰/۲۴	۳۸/۴۷	-
$15N2H$	۰/۲	۶	۱۵	۶	-	-	۴۷۰۱۲۶۹/۴۰	۳۸۲/۷۷	-
	۰/۴	۶	۱۰	۶	-	-	۴۸۱۶۹۲۱/۳۴	۵۷۱/۹۲	-
	۰/۸	۱۲	۱۵	۱۲	-	-	۵۰۹۴۳۱۳	۳۴۷/۹۹	-
$15N3H$	۰/۲	۴-۲-۷	۴	-	-	۲۲۹۴۳۳۶/۲۱	۴۲۱/۴۰	-	
	۰/۴	۳-۶-۷	۳	-	-	۲۳۹۴۱۲۱/۱۷	۵۰۸/۸۴	-	
	۰/۸	۶-۵-۲	۲	-	-	۲۵۱۰۹۹۴/۲	۴۴۸/۳۴	-	
$20N5H$	۰/۲	۱۲-۴-۳-۲	۱۲	-	-	۳۰۶۶۲۱۷/۱۲	۲۸۴۵/۶	-	
	۰/۴	۱-۲-۳-۴-۷	۷	-	-	۳۱۸۵۶۴۳/۳۲	۴۴۹۵/۷	-	
	۰/۸	۱۳-۱۲-۸-۶-۱۴	۱۴	-	-	۳۷۱۶۵۳۱/۹۵	۱۷۰/۱۷	-	

تحلیل حساسیت

گرفتن $B=0$ و $B=1000$ حل شدند و همان طور که در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است، با در نظر گرفتن بودجه‌ای محدود جهت غنی‌سازی محورها ($B=1000$) مقدار تابع هدف مسائل کاهش یافته است.

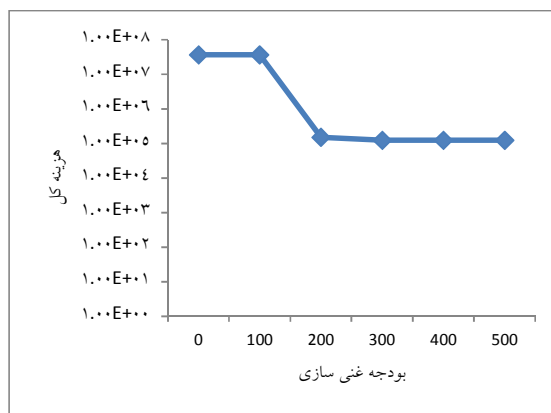
این قسمت به منظور شناخت پارامترهای حساس مدل و همچنین اثبات کارایی مدل ارائه شده است. ابتدا آنالیز حساسیت بر روی مقاوم‌سازی محورها یا عدم مقاوم‌سازی محورها انجام شده است. به این صورت که در صورتی که مقدار بودجه مقاوم‌سازی، B برابر با صفر در نظر گرفته شود چه تاثیری بر روی هزینه کل خواهد داشت. شش مسئله با در نظر



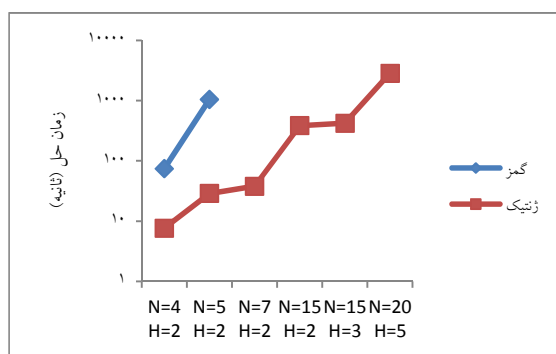
شکل ۵. تاثیر مقاوم‌سازی بر هزینه کل

با افزایش بودجه غنی‌سازی هزینه کل سیر نزولی پیدا می‌کند تا جایی که تمامی محورها تقویت شده و محور صاف می‌شود. شکل ۷ زمان حل مدل ریاضی توسط نرم‌افزار گمز و الگوریتم ژنتیک را نمایش می‌دهد، به طوری که با افزایش تعداد گره‌ها و تعداد محورها زمان حل افزایش یافته است. از منظر زمان حل، با توجه به پیچیدگی مدل زمان‌های حل مطلوب هستند.

به منظور بررسی تاثیر میزان بودجه غنی‌سازی بر هزینه کل در مدل ریاضی معرفی شده، مسئله‌ای با مقادیر مختلف B حل گردید. همان طور که در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است، با افزایش بودجه غنی‌سازی هزینه کل کاهش یافته است. بین بودجه ۰ تا ۱۰۰ به علت این که هیچ محوری تقویت نمی‌شود، منحنی صاف است و کاهشی در هزینه کل نداده است. اما

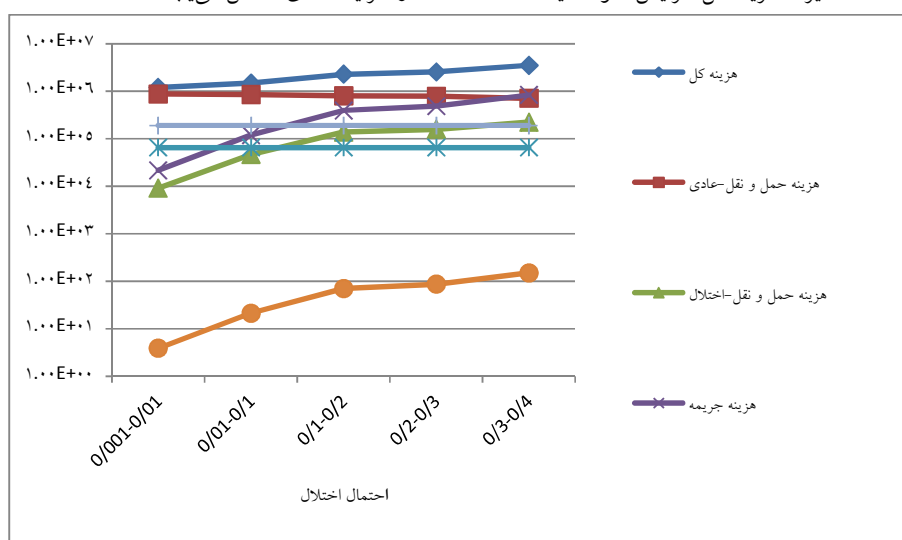


شکل ۶. تغییرات هزینه کل با توجه به میزان بودجه غنی‌سازی



شکل ۷. زمان حل مدل ریاضی توسط نرم افزار گمز و الگوریتم ژنتیک

یکی دیگر از پارامترهای ورودی تاثیرگذار، احتمال اختلال، هم چنین با افزایش احتمال اختلال، هزینه حمل و نقل در شرایط گره ها هست. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود با افزایش احتمال اختلال، میزان هزینه کل افزایش خواهد یافت. در شرایط عادی کاهش می یابد.



شکل ۸. تاثیر اختلال بر هزینه ها

۶- نتیجه گیری

نرم افزار گمز و الگوریتم ژنتیک حل شدند و بر روی پارامترهای مختلف مدل ریاضی تحلیل حساسیت انجام گردید و مشاهده شد که در نظر گرفتن بودجه محدود جهت غنی سازی محورها باعث کاهش در هزینه کل شبکه می شود و هم چنین میزان بودجه غنی سازی بر میزان کاهش هزینه کل تاثیرگذار خواهد بود. تحلیلی هم بر روی احتمال اختلال محورها صورت گرفت که نتایج حاکی از افزایش هزینه کل بر اثر افزایش احتمال اختلال می باشد. در آینده می توان شیوه تخصیص را از حالت تک به چندگانه تغییر داد و هم چنین ظرفیت محورها به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفت. توسعه مدل ارائه شده در حالت غیرقطعی از دیگر زمینه های تحقیقاتی جالب در این زمینه می باشد.

در این تحقیق در ابتدا به طور مختصر در مورد اهمیت در نظر گرفتن قابلیت اطمینان در مکان یابی تسهیلات پرداخته شد. سپس به مرور ادبیات در حوزه های مکان یابی محور قابل اعتماد و مکان یابی محور با امکان ارتباط مستقیم بین گره های غیر محور پرداخته شد. سپس مدل ریاضی برای مسئله مکان یابی محور با امکان برقراری ارتباط مستقیم بین گره های غیر محور ارائه شد که به تعیین مکان محور، تخصیص غیرمحورها به محورها، محور تقویت شده و محور پشتیبان می پردازد. تابع هدف مدل، حداقل سازی هزینه اولیه ایجاد محور، هزینه حمل و نقل در شرایط عادی و اختلال، هزینه تعمیر محور خراب، جریمه عدم تامین تقاضا و استفاده از محور غیرقابل شکست ساختگی است. مثال هایی از مدل ریاضی توسط

۷-مراجع

- Catanzaro, D., Gourdin, E., Labbé, M. and Özsoy, F.A., (2011), "A branch-and-cut algorithm for the partitioning-hub location-routing problem", *Computers & operations research*, 38(2), pp. 539-549.
- Drezner, Z., (1987), "Heuristic solution methods for two location problems with unreliable facilities", *Journal of the Operational Research Society*, pp. 509-514.
- Eghbali, M., Abedzadeh, M. and Setak, M., (2014), "Multi-objective reliable hub covering location considering customer convenience using NSGA-II", *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 5(3), pp. 450-460.
- Eydi, A. and Nasiri, R., (2019), "A P-hub median network design problem with preventive reliability approach for before and after hub failure", *Sādhanā*, 44(3), pp.57.
- Fotuhi, F. and Huynh, N., (2017), "Reliable intermodal freight network expansion with demand uncertainties and network disruptions", *Networks and Spatial Economics*, 17(2), pp.405-433.
- Ghaffarinasab, N. and Motallebzadeh, A., (2018), "Hub interdiction problem variants: and Solution approach", *Journal of Air Transport Management*, 68, pp.118-136.
- Maiyar, L.M. and Thakkar, J.J., (2018), "Modelling and analysis of intermodal food grain transportation under hub disruption towards sustainability", *International Journal of Production Economics*.
- Marufuzzaman, M., Eksioglu, S.D., Li, X. and Wang, J., (2014), "Analyzing the impact of intermodal-related risk to the design and management of biofuel supply chain", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 69, pp. 122-145.
- Models and metaheuristic solution algorithms", *European Journal of Operational Research*, 267(2), pp.496-512.
- An, Y., Zhang, Y. and Zeng, B., (2015), "The reliable hub-and-spoke design problem: Models and algorithms", *Transportation Research Part B: Methodological*, 77, pp. 103-122.
- Aykin, T., (1994), "Lagrangian relaxation based approaches to capacitated hub-and-spoke network design problem". *European Journal of Operational Research*, 79(3), pp. 501-523.
- Aykin, T., (1995), "The hub location and routing problem", *European Journal of Operational Research*, 83(1), pp. 200-219.
- Azizi, N., (2019)," Managing facility disruption in hub-and-spoke networks: formulations and efficient solution methods", *Annals of Operations Research*, pp. 1-27.
- Azizi, N., Chauhan, S., Salhi, S. and Vidyarthi, N., (2016), "The impact of hub failure in hub-and-spoke networks: Mathematical formulations and solution techniques", *Computers & Operations Research*, 65, pp. 174-188.
- Campbell, J.F., (1994), "Integer programming formulations of discrete hub location problems", *European Journal of Operational Research*, 72(2), pp. 387-405.
- Hamidi, M., Gholamian, M. and Shahanaghi, K., (2014), "Developing prevention reliability in hub location models", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 228(4), pp. 337-346.
- Kim, H. and O'Kelly, M.E., (2009), "Reliable p-hub location problems in telecommunication networks", *Geographical Analysis*, 41(3), pp. 283-306.
- Li, Q., Zeng, B. and Savachkin, A., (2013), "Reliable facility location design under disruptions", *Computers & Operations Research*, 40(4), pp. 901-909.
- Madani, S.R., Nookabadi, A.S. and Hejazi, S.R., (2018), "A bi-objective, reliable single allocation p-hub maximal covering location problem: Mathematical formulation

- disruptions", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(4), pp. 755-774.
- Peng, P., Snyder, L.V., Lim, A. and Liu, Z., (2011), "Reliable logistics networks design with facility disruptions", *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), pp. 1190-1211.
- Ramamoorthy, P., Jayaswal, S., Sinha, A. and Vidyarthi, N., (2018), "Multiple allocation hub interdiction and protection problems: Model formulations and solution approaches", *European Journal of Operational Research*, 270(1), pp.230-245.
- Roghalian, E. and Haghdoost, M., (2019), "Mathematical model for P-hub location problem under simultaneous disruption", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 12(1), pp.83-94.
- Rostami, B., Kämmerling, N., Buchheim, C. and Clausen, U., (2018), "Reliable single allocation hub location problem under hub breakdowns", *Computers & Operations Research*, 96, pp.15-29.
- Sadeghi, M., Jolai, F., Tavakkoli Moghaddam, R. and Rahimi, Y., (2015), "A new stochastic approach for a reliable p-hub covering location problem", *Computers & Industrial Engineering*, 90, pp. 371-380.
- Snyder, L.V. and Daskin, M.S., (2005), "Reliability models for facility location: the expected failure cost case", *Transportation Science*, 39(3), pp. 400-416.
- Snyder, L.V., (2003), "Supply chain robustness and reliability: Models and algorithms", (Doctoral dissertation, Northwestern University).
- Toh, R.S. and Higgins, R.G, (1985), "The impact of hub and spoke network centralization and route monopoly on domestic airline profitability", *Transportation Journal*, pp. 16-27.
- Torkestani, S.S., Seyedhosseini, S.M., Makui, A. and Shahanaghi, K., (2018), "The reliable design of a hierarchical multi-modes transportation hub location problems (HMMTHLP) under dynamic network
- Mohammadi, M., Jolai, F. and Tavakkoli Moghaddam, R., (2013), "Solving a new stochastic multi-mode p-hub covering location problem considering risk by a novel multi-objective algorithm", *Applied Mathematical Modelling*, 37(24), pp. 10053-10073.
- Mohammadi, M., Jula, P. and Tavakkoli Moghaddam, R., (2017), "Design of a reliable multi-modal multi-commodity model for hazardous materials transportation under uncertainty", *European Journal of Operational Research*, 257(3), pp. 792-809.
- Mohammadi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Siadat, A. and Dantan, J.Y., (2016), "Design of a reliable logistics network with hub disruption under uncertainty", *Applied Mathematical Modelling*, 40(9), pp. 5621-5642.
- Mohammadi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Siadat, A. and Rahimi, Y., (2016), "A game-based meta-heuristic for a fuzzy bi-objective reliable hub location problem", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 50, pp. 1-19.
- Momayezi, F., Chaharsooghi, S.K., Sepehri, M.M. and Kashan, A.H., (2018), "The capacitated modular single-allocation hub location problem with possibilities of hubs disruptions: modeling and a solution algorithm", *Operational Research*, pp.1-28.
- Nickel, S., Schöbel, A. and Sonneborn, T., (2001), "Hub location problems in urban traffic networks", *Mathematical Methods on Optimization in Transportation Systems*, 48, pp. 95.
- O'Kelly, M.E., (1987), "A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities", *European Journal of Operational Research*, 32(3), pp. 393-404.
- Parvaresh, F., Golpayegany, S.H., Husseini, S.M. and Karimi, B., (2013), "Solving the p-hub median problem under intentional disruptions using simulated annealing", *Networks and Spatial Economics*, 13(4), pp. 445-470.
- Parvaresh, F., Husseini, S.M., Golpayegany, S.H. and Karimi, B., (2014), "Hub network design problem in the presence of

-Yoon, M.G. and Current, J., (2008), "The hub location and network design problem with fixed and variable arc costs: formulation and dual-based solution heuristic", *Journal of the Operational Research Society*, 59(1), pp. 80-89.

-Zarandi, M.F., Davari, S. and Sisakht, S.H., (2012), "The Q-coverage multiple allocation hub covering problem with mandatory dispersion", *Scientia Iranica*, 19(3), pp. 902-911.

disruption (DND)", *Computers & Industrial Engineering*, 122, pp.39-86.

-Yahyaee, M. and Bashiri, M., (2017), "Scenario-based modeling for multiple allocation hub location problem under disruption risk: multiple cuts Benders decomposition approach", *Journal of Industrial Engineering International*, 13(4), pp.445-453.

-Yahyaee, M., Bashiri, M. and Randall, M., (2019), "A model for a reliable single allocation hub network design under massive disruption", *Applied Soft Computing*, pp.105561.

Design of a Reliable Hub Location Network under Massive Disruption with Direct Connections between Non–Hub Nodes

Mohadese Haghdoost, M.Sc., Grad., Department of Industrial Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Emad Roghanian, Associate Professor, Department of Industrial Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

E-mail: e_roghanian@kntu.ac.ir

Received: September 2020-Accepted: February 2021

ABSTRACT

The optimal locating of facilities has large effects on economic benefits, providing satisfactory service and levels of customer satisfaction. The decision of facilities location mostly is a long-term and strategic decision of the large private and public companies and reliability is important to make this strategic decision so that the system continues to operate with the least damage in case of stop working or failure of one of the components. This paper at the first time proposes a nonlinear integer model for reliable single allocation hub location problem that considers backup hub, alternative routes, and also uses fortification approach to improve the network reliability, while there is the possibility of direct connection between non-hub nodes. Due to the NP hard nature of the model, genetic algorithm is use in order to solve the defined problem and the numerical results illustrate the genetic algorithm has better performance than the GAMS in terms of speed, it also shows great quality answers. The results of the sensitivity analysis show that considering the protection approach has reduced the total cost.

Keywords: Disruption, Genetic Algorithm, Protection, Backup Hub, P-Hub Median