مدل طراحی شبکه حمل و نقل بار بندر-پسکرانه با مکان‌یابی مراکز توزیع (مطالعه موردی ایران)

مقاله پژوهشی

محمد محمدپورعمران*، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
روزبه قوسی، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
احمد طاهرخانی کدخدائی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: omran@iust.ac.ir

دریافت: ۹۸/۰۳/۱۰- پذیرش: ۹۸/۰۷/۲۵
صفحه۱۲۵-۱۱۱

چکیده

لجستیک جهانی شامل ارسال کالا در سطح خشکی و دریا می‌شود. در خشکی، از وجه‌های حمل و نقل مانند قطار و کامیون جهت جابجایی کالاها استفاده می‌شوند. طراحی شبکه حمل و نقل و ارتباط بین خشکی و دریا، شامل تعیین مراکز توزیع در خشکی و نحوه ارتباط آن‌ها با بندرهای دریایی است. تعیین بهینه مکان و ظرفیت مراکز توزیع و تعیین بهینه نوع وجه حمل و نقل در ارسال کالاها بین بنادر دریایی، مراکز توزیع و گره‌های مشتری، اهمیت بالایی در کارایی شبکه توزیع دارد. در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دو هدفه جهت مکان‌یابی مراکز توزیع ارائه می‌شود که در آن از حمل و نقل چندوجهی جهت ارتباط بین بندر و خشکی استفاده می‌شود. در این مدل، جریان عرضه و تقاضای داخلی و خارجی هر گره، در نظر گرفته شده و هدف آن تعیین مکان مراکز توزیع یا ترمینال‌هایی در خشکی است با این هدف که هزینه‌های حمل و نقل و همچنین آلودگی ناشی از وجوه حمل و نقل کمینه شود. در این پژوهش از روش اپسیلون محدودیت اصلاح شده جهت حل مسئله استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داد جهت احداث مراکز توزیع و توسعه وجه های حمل و نقل می بایست بالغ بر ۹۶ تا ۱۰۶ میلیارد دلار سرمایه گذاری نمود. همچنین میزان تولید گاز کربن دی اکسید در هر کدام از این سرمایه گذاری‌ها چیزی حدود ۴۰ تا ۵۶ میلیون تن در سال خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: بندر، پسکرانه، مرکز توزیع، لجستیک، حمل و نقل چندوجهی

۱- مقدمه

بنادر دریایی نقش مهمی در حمل و نقل بین‌المللی ایفا می‌کنند و در گذر زمان به عنصری تاثیرگذار در طراحی شبکه‌های حمل و نقل بین‌المللی تبدیل شده است. همچنین به دلیل افزایش حجم حمل و نقل، ساختار بنادر دریایی پیچیده‌تر شده و نیازمند هماهنگی بیشتر هم در محیط درونی خود و هم در ارتباط با محیط بیرون خود دارد. ارتباط بنادر دریایی با محیط بیرون از خود شامل ارتباط با حمل و نقل در خشکی و ارتباط با بنادر دریایی خارجی است. کشورهایی که دارای حجم بالایی از حمل و نقل درون مرزی و برون مرزی هستند، نیازمند طراحی بهینه شبکه حمل و نقل هستند. زیرا تحقیقات نشان داده است هزینه حمل و نقل نقش زیادی در تعیین قیمت نهایی محصولات دارد. لذا طراحی بهینه شبکه حمل و نقل موجب صرف جویی بالایی می‌شود. طراحی شبکه حمل و نقل در لجستیک بین الملل، شامل طراحی عناصر حمل و نقل در خشکی و دریا و یکپارچگی این دو با هم است. پیوستگی و ارتباط نزدیک بین بندر و حمل و نقل منجر به رشد یک زمینه تحقیق تحت عنوان مسائل بندر-پسکرانه شده است. مفهوم مرکز توزیع، ترمینال داخلی، بندرداخلی و بندرخشک در ادبیات هر دو به منطقه‌ای به دور از دریا اشاره می‌کنند که امور مربوط به

ارسال و دریافت بارها را از مناطق مشتری انجام داده و با بنادر دریایی داخلی در ارتباط هستند. لذا در این تحقیق از واژه مرکز توزیع استفاده می‌گردد. در این شبکه حمل و نقل، مشتریان تصمیم می‌گیرند بارهای خود را به صورت مستقیم و یا از طریق مراکز توزیع به سمت بنادر دریایی ارسال و یا از سمت آن‌ها دریافت کنند. همچنین این مشتریان می‌توانند انتقال بارهای خود را از طریق وجوه حمل و نقلی ممکن در خشکی انجام دهند. وجوه فعلی در خشکی شامل کامیون و قطار است. طراحی شبکه حمل و نقل در خشکی شامل تعیین وجه‌های حمل و نقل و تعیین مراکز توزیع است به طوریکه هزینه‌های حمل و نقل کاهش یابد. همچنین، چگونگی توسعه وجوه حمل و نقل، بین مشتریان و مراکز توزیع و بنادر دریایی، از دیگر موضوعاتی است که مورد توجه سیاست‌گذاران در حوزه توسعه زیرساخت‌های حمل و نقل است و ممکن است در کاهش هزینه‌های حمل و نقل موثر باشد. از طرفی، آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از حمل و نقل بار، یکی دیگر از مسائلی است که به شدت مورد توجه محققان در حوزه لجستیک قرار گرفته است. در این تحقیق، ما یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دو هدفه جهت مکان‌یابی مراکز توزیع و چگونگی بهره‌گیری از سیاست حمل و نقل چندوجهی در حد فاصل بین بندر و مرکز توزیع ارائه می‌دهیم. این تحقیق به طور مطالعه موردی در ایران مورد بررسی قرار گرفته است. ایران دارای ۳۱ استان بوده و به دلیل داشتن موقعیت جغرافیایی مناسب و دسترسی به راه های دریایی و زمینی، شرایط و بستر مراکز توزیع در دل خود را دارد. متغیرهای این مدل، انتخاب مراکز توزیع و نوع ظرفیت آنها، انتخاب نوع وجه حمل و نقل مناسب بین هر دو گره، احداث وجوه حمل و نقل جدید و یا توسعه آن‌ها، ارتباط بین بنادر دریایی و ارسال‌های مستقیم از بندر به مقصد و برعکس است. هدف اول کاهش هزینه‌های احداث مراکز توزیع و توسعه شبکه و حمل و نقل کالا از طریق وجوه حمل و نقل است. هدف دوم آن نیز کاهش میزان آلودگی ناشی از اشاعه گاز کربن دی اکسید منتشر شده ناشی از جابجایی کالا از طریق وسایل حمل و نقل است.

ساختار ادامه تحقیق به شرح ذیل است: در بخش دوم مرور ادبیات مربوط به مسئله و رویکردهای مدل‌سازی در زمینه مکان‌یابی مراکز توزیع و حمل ونقل چندوجهی ارائه می‌شود. در بخش سوم، مسئله به صورت شفاف توضیح داده شده و مدل برنامه ریاضی آن ارائه می‌شود. در قسمت چهارم، روش حل این مسئله تشریح شده و نتایج حاصل از پیاده‌سازی آن ارایه می‌شود. در قسمت پنجم نیز به جمع‌بندی و ارائه پیشنهادات پرداخته می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

در این بخش ادبیات مرتبط با مسئله پژوهش مرور می‌شود. در این بخش، رویکردهای مختلف نسبت به مرکز توزیع و بنادر دریایی بررسی شده و مدل مرتبط با این رویکرد تشریح می‌گردد. به طور کلی سه دسته از مسائل مهمی که در تحقیقات نوین مدل‌سازی مسائل مرتبط با بندر-پسکرانه مورد توجه قرار گرفته است عبارت اند از منطقه‌بندی بندر (توسعه کارکرد بندر به پسکرانه)، چندوجهی‌سازی، توسعه پایدار تحقیقات مرور شده در این زمینه در برخی از این سه زمینه ورود پیدا کرده‌اند که در ادامه به این تحقیقات اشاره می‌گردد. حلیم و همکارانش (Halim, Kwakkel, & Tavasszy, 2016) یک مدل استراتژیک برای توزیع بار در بندر-پسکرانه ارایه می‌کنند. آنها در مدل خود از ترکیب بهینه‌سازی چندهدفه برای تخمین محل و همچنین شبکه مراکز توزیع با مدل تخصیص استفاده می‌کنند. مطالعه موردی این مقاله قاره اروپا است که قابل تعمیم به سایر نقاط می‌باشد. مشخصه‌های اندازه‌گیری شده و بدست آمده از این مدل شامل هزینه حمل و نقل بندر-پسکرانه، زمان حمل و نقل بندر-پسکرانه و زمان توزیع از پسکرانه به نقاط دیگر است. لم و گو (Lam & Gu, 2016) در مقاله خود به دنبال مینیمم‌کردن زمان، هزینه و کمینه کردن مقدار گازهای منتشر شده از وسایل حمل و نقل هستند که دو مورد اول به طور مستقیم در توابع هدف یک مسئله دوهدفه و مورد سوم به عنوان محدودیت به کار گرفته شده است. در این مدل کانتینرها از بنادر خارجی به بنادر دریایی داخلی ارسال می‌شود. بعد از اینکه کانتینرها در بنادر دریایی داخلی خالی می‌شوند امور گمرکی قبل از اینکه از طریق شبکه حمل و نقل داخلی به مشتریان نهایی در شهرهای داخلی فرستاده شود انجام می‌شود. سه وسیله حمل (راه آهن، بارج، و کامیون) در این مدل در نظر گرفته شده

است. در جایی که راه آهن و بارج وجود دارد و امکان آن وجود داشته باشد که پیش از ارسال با کامیون از آنها استفاده شود، این وسایل بکار می‌روند. در غیر اینصورت می‌توان به وسیله کامیون تمام مسیر را از بنادر تا مشتری انتهایی طی کرد. همچنین در مطالعه‌ای که یانون (Iannone & Thore, 2010) انجام داده است مدلی جهت توسعه مسئله انتقال بار چندوجهی سنتی و چندکالایی معرفی شده است. مقصود اصلی مدل وی نشان دادن و اندازه گیری سودی که کارگزاران لجستیکی در مسیریابی کانتینرهای دریایی از طریق بنادرداخلی می‌توانند داشته باشند است. همچنین در پژوهش دیگری یانون، مدلی جهت انتخاب وجه/مسیر حمل و نقل برای بهینه کردن جریان چندوجهی بندر-پسکرانه برای کانتینرهای وارداتی پر و خالی استفاده ارائه داده است. مقصود اصلی مدل، مشخص کردن و اندازه‌گیری مزایای امکان‌پذیر در توسعه دروازه‌های خروجی بندر به بنادر داخلی و بکارگیری راه حل‌های توزیع بین‌وجهی برای بندر-پسکرانه است (Iannone, 2012). وانگ در سال ۲۰۰۸ (Wang, 2008) در مقاله خود با ترکیب سیستم حمل و نقل با توزیع شعاعی با سیستم حمل و نقل یکپارچه بین بنادر و پسکرانه‌های آنها، یک مدل غیرخطی بهینه دو سطحی را برای سیستم لجستیک ارائه داده است. برای دستیابی به کمینه هزینه لجستیک بندر، مدل معرفی شده فاکتورهای ذیل را مشخص می‌کند: ۱) پسکرانه‌هایی که به وسیله هر بندر سرویس داده می‌شود ۲) ظرفیت حمل و نقل بین هر بندر و پسکرانه آن ۳) حجم حمل و نقل بار و ظرفیت متناظری که از طریق هاب از بندر مبدا به مقصد اختصاص داده می‌شود ٤) حجم حمل و نقل بار و ظرفیت متناظری که به طور مستقیم از بندر مبدا به مقصد اختصاص داده می‌شود.در سال ۲۰۱۰ مینگجوبین و مائوبینگ (Mingjun & Maoying, 2010) یک مدل برنامه ریزی دو سطحی را پیشنهاد می‌دهند که هدف اول آن کاهش هزینه حمل و نقل کل در منطقه گروه بندری و هدف دوم آن افزایش سود اقتصادی یک بنگاه منفرد است. این مقاله پویایی پسکرانه‌ی هر بندر را در سیستم حمل و نقل لجستیکی منظور نموده است. کیم و همکارانش (Kim, Janic, & Van Wee, 2009) در مقاله‌ای ارتباط بین هزینه‌های حمل و نقل و انتشار گازهای کربن دی‌اکسید در یک شبکه را بررسی می‌کنند. وقتی که قرار بر تغییر عوامل مختلف باشد، تبادل بین عوامل موجب تغییر وجه و مسیرهای حمل و نقل می‌شود. شبکه بار ارایه شده در این مقاله ترکیب مختلفی از وجوه حمل و نقل را در خود دارد و از طریق تغییر وجه و مسیر این سیستم باید به میزان اشاعه کربن دی‌اکسید به همراه زمان و مکان معقولی دست یابد. در این مقاله از تکنیک بهینه‌سازی چندهدفه به عنوان ابزار تصمیم گیری برای ایجاد این ارتباطات استفاده شده است. کولینین و همکارانش (Cullinane, Ping, & Wang, 2002) تحلیلی از شبکه توزیع حمل و نقل کانتینری در چین ارائه می‌دهند و سپس مدلی چندهدفه برای بهینه کردن پیکره‌بندی و جریان آن ارائه می دهند. رحیمی و همکارانش (Rahimi, Asef-Vaziri, & Harrison, 2008) پتانسیل یکپارچه‌سازی بنادر داخلی در سیستم حمل و نقل بین‌وجهی منطقه‌ای کالا را به وسیله یک مدل جایابی-تخصیص بررسی می‌کنند و کالیفرنیای جنوبی را به عنوان مطالعه موردی انتخاب کرده‌اند. در این مقاله ابتدا به وسیله تحلیل حرکت کامیون‌ها مکان‌های بالقوه برای بنادر داخلی مشخص شده است و سپس به وسیله مدل شش بندرداخلی انتخاب می‌شود. فنگ و همکارانش (Feng, Zhang, Li, & Wang, 2013) مطرح می‌کنند که ترکیب بندردریایی-بندرداخلی به عنوان پشتوانه و ستون لجستیک منطقه‌ای به کار می‌رود و در مقاله خود یک مدل جایابی-تخصیص برای بهینه‌سازی شبکه بندر دریایی-بندرداخلی ارایه می‌دهند و به وسیله الگوریتم ژنتیک و گریدی به حل آن می‌پردازند. مطالعه مورد مربوط به کشور تایوان است. در این پژوهش وجوه مختلف حمل و نقلی در این مقاله درنظر گرفته نشده است. لاتیلا و همکارانش (Lättilä, Henttu, & Hilmola, 2013) استفاده بیشتر از راه آهن در حمل و نقل جهت کاهش انتشار گاز CO2 را بررسی می‌کنند. راه آهن، مراکز توزیع (بنادرداخلی) را به بنادردریایی متصل می‌کند. در این مقاله دو پیکره‌بندی مختلف مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در یکی از آنها متصدیان حمل و نقل به طورمستقیم به بندردریایی متصل می‌شوند در حالی که در حالت دوم از بنادرخشک استفاده می‌کنند. سیستم با استفاده از شبیه‌سازی رویداد-گسسته ارزیابی می‌شوند. در سیستم، سطح انتشار C_{O2} و هزینه‌های حمل و نقل در پیکره‌بندی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته

است. برای این کار سناریوهای مختلف قیمت انرژی مدنظر قرار می‌گیرند. همچنین حالتی که به جای هزینه، انتشار گاز کمینه می‌شود هم مورد مقایسه قرار می‌گیرد. کرانیک و همکارنش در سال ۲۰۱۵ (Crainic, Dell'Olmo, Ricciardi, & Sgalambro, 2015) مفهوم مرکز توزیع و نقش آن در بهینه‌سازی توزیع بار را مورد بررسی قرار می‌دهند و چالش‌های متوجه آن بررسی می‌شود. سپس مسئله تاکتیکالی تعریف می‌کنند تا مسیرهای بهینه و برنامه‌ریزی برای استفاده از ناوگان وسایل نقلیه بین ترمینال‌های یک سیستم بین‌وجهی که بر پایه مرکز توزیع است مورد بررسی قرار گیرد. در این مدل طراحی شبکه خدمت‌دهی با برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط حل شده است. اما انتقال کوتاه دریایی و مسائل محیط زیست مورد توجه قرار نگرفته است. ژانگ (Zhang, Janic, & Tavasszy, 2015) مدلی جهت بهینه کردن حمل و نقل بار ارائه داده است که به طور همزمان ساختار چندوجهی و شبکه هاب‌محور و اهداف مختلف طراحی بازیگران را در نظر می‌گیرد. مدل با داده‌های واقعی حمل کانتینر پسکرانه هلند اعتبارسنجی می‌شود بدین صورت که هزینه CO2، پیکره‌بندی شبکه ترمینال و شبکه هاب به عنوان معیارهای طراحی انتخاب می‌شوند. ترکیب این سیاست‌ها نتایج بهتری از بکارگیری یک سیاست را نشان می‌دهد. در این مدل مسئله ارتباط بنادرداخلی و پایداری محیط زیست مورد توجه قرار گرفته است. لی و همکارانش (Lee, Hu, & Chen, 2010) هزینه‌های خارجی حمل و نقل کانتینری را در دو حالت با کامیون و انتقال کوتاه دریایی از طریق مدل توسعه داده شده مورد بررسی قرار می‌دهند و نتیجه می‌گیرند که هزینه‌های خارجی انتقال کوتاه دریایی بسیار کمتر از حمل و نقل به وسیله کامیون است. در این تحقیق با رویکرد از بالا به پایین، توسعه سیاست‌های دولتی جهت کاهش هزینه‌های خارجی حمل و نقل داخلی و ترویج انتقال کوتاه دریایی در کشور تایوان مورد بررسی قرار گرفته است. چانگ و همکارانش (Chang, Notteboom, & Lu, 2015) در مقاله‌ای، قالبی برای طراحی بهینه و معقول بندرخشک مطرح می‌کنند که برای بندر دالیان چین این مطالعه صورت گرفته است. یک مدل دو فازی است که به ترتیب شهرهای کاندید و مراکز توزیع بهینه را انتخاب می‌کند. از طریق خوشه بندی فازی شهرهای پسکرانه بندر دالیان انتخاب شده و برنامه‌ریزی خطی جهت کمینه کردن هزینه به کار گرفته شده است تا ظرفیت و مکان‌های بهینه به دست آید. در این تحقیق مسائل توسعه پایدار محیط زیست و انتقال کوتاه دریایی مورد نظر نبوده است و وجوه حمل و نقل، کامیون و راه آهن می‌باشند. در سال ۲۰۱۷ وی و شنگ (Wei & Sheng, 2017) یک مدل برنامه ریزی ریاضی دو هدفه مکان یابی تخصیص جهت بهینه سازی ارتباط بین بندر پسکرانه پایدار را ارائه داده اند. اهداف این مدل، کاهش هزینه‌های حمل ونقل و کاهش میزان انتشار گازهای کربنی است. همچنین وی جهت بیان مکانیزم همکاری میان بندر خشک و بندر دریایی، پارامتری تحت عنوان ضریب هزینه همکاری را به مدل اضافه نموده است. جنبه نوآورانه مدل این است که می‌تواند مکان استراتژیک بندر خشک را با توجه به هزینه‌ها و متناسب با محیط زیست انتخاب کند و همچنین می‌تواند به طور همزمان، همکاری‌ها و ارسال بارها را در شبکه مورد بررسی قرار دهد. کیس مورد مطالعه در این تحقیق استان هنان در کشور چین است. همانطور که بیان شد در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با دو هدف جهت مکان‌یابی مراکز توزیع و چگونگی استفاده از حمل و نقل چندوجهی در خشکی ارائه شده است. در مدل هایی که مطالعه شد چگونگی توسعه زیرساخت‌های حمل و نقل از جمله وجوه حمل و نقل و وسایل حمل و نقل بررسی نشده است. همچنین مطالعه ای که بنادر چندگانه که یک پسکرانه را تغذیه می کنند را در نظر گرفته باشد و ارتباطات بین دریایی تحت عنوان شبکه فیدری با استفاده از کشتی های کوچک (بارج) را در نظر گرفته باشد وجود ندارد. در این پژوهش در انتخاب مراکز توزیع حجم بارهای داخلی و تعاملات خارجی (صادرات و واردات) از طریق بنادر دریایی در نظر گرفته شده است.

۳- تعریف مساله

در این مقاله، قصد بر این است که تعداد و مکان مراکز توزیع در خشکی شناسایی گردد. در مسائل مکان یابی مراکز توزیع، همواره تعدادی مناطق مشتری با مقادیر عرضه و تقاضای مشخص وجود دارد. در این تحقیق هر استان یک منطقه مشتری محسوب می‌گردد. این مسئله شامل گره های استان‌ها، بنادر دریایی خارجی و بنادر دریایی داخلی است.

مراکز توزیع از بین گره‌های استان ها انتخاب شده و سایر استان ها به مراکز توزیع تخصیص می‌یابد. هر استان فقط به یک مرکز توزیع متصل می‌شود. استان‌ها تقاضا و عرضه خارجی خود را از طریق مرکز توزیع خود و یا ارتباط مستقیم با بنادر دریایی برآورده می‌کنند و همچنین از طریق مراکز توزیع، تقاضا و عرضه داخلی خود را برآورده می‌کنند. در اینجا مراکز توزیع نقش هاب را ایفا می‌کنند. همچنین، با توجه به وجود و یا عدم وجود وجه حمل و نقل بین دو گره، باید تعیین شود که بین هر دو گره چه وجهی وجود داشته باشد و یا احداث گردد. هدف اول مسئله، کاهش هزینه‌های کل شامل هزینه‌های احداث مراکز توزیع، هزینه‌های حمل و نقل است. هدف دوم نیز کاهش مقادیر گاز کربن‌دی‌اکسید منتشر شده است. همچنین قصد بر این است که به صورت استراتژیک مشخص شود چه تعداد مسیر اعم از ریلی و یا جاده‌ای احداث گردد. همچنین مدل فعلی قابلیت تعیین ظرفیت مراکز توزیع را دارند لذا میزان ظرفیت استراتژیک مراکز توزیع از دیگر سوالات این تحقیق است.

۱-۳- مفروضات تحقیق

در این تحقیق مفروضاتی در نظر گرفته شده است که در ادامه اشاره می‌شود:

- همه استان ها دارای مقادیری عرضه و تقاضای داخلی و خارجی هستند که باید همگی برآورده شوند.
- هر استان به صورت مستقیم با مرکز توزیع یا بنادر دریایی در ارتباط خواهد بود.
- هر مرکز مجاز است بر اساس مقادیر جریان ورودی و خروجی به آن بندر، از بین ظرفیت‌های درنظر گرفته شده، یکی را انتخاب کند و هزینه احداث آن مرکز توزیع بر اساس مقدار ظرفیت آن بندر محاسبه می‌گردد.
- وجه‌های حمل و نقل خشکی بین استان‌ها و بنادر دریایی با استان‌ها وجود دارد و از طریق واگن قطار و کامیون صورت می‌گیرد و ارتباط بین بنادر دریایی تنها از طریق ارسال دریایی (کشتی‌های کوچک) صورت می‌گیرد.
- هزینه احداث وجوه حمل و نقل بین دو گره، هنگامی که آن وجه در حالت فعلی وجود داشته باشد برابر صفر است.
- از آنجا که مدل به صورت استراتژیک ارایه می‌گردد، ظرفیت‌های وسایل نقلیه، وجه‌های حمل و نقل و مراکز توزیع بر حسب دوره‌ای که مورد نظر است محاسبه می‌گردند که در این پژوهش به صورت سالانه است. به عنوان مثال حداکثر مقدار باری که یک وسیله نقلیه می‌تواند در سال بین دو استان و بنادر دریایی جابجا کند به عنوان ظرفیت وسایل نقلیه مورد نیاز محاسبه می‌گردد. همچنین بر همین اساس، تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز در طول دوره مورد نظر محاسبه می‌گردد.
- برای بنادر دریایی داخلی ظرفیت نامحدودی درنظرگرفته نشده است و ارسال بار از سمت تمامی استان‌ها و مراکز توزیع و بالعکس می‌تواند صورت گیرد.
- در این تحقیق، هزینه‌ی مرتبط با حمل و نقل بین بنادر دریایی داخلی و خارجی در نظر گرفته نشده است.
- هزینه‌های احداث وجه حمل و نقل و هزینه‌های حمل و نقل توسط آن وجه جداگانه محاسبه می‌گردد. زیرا در این مدل فرض بر این است تعدادی وجه در حال حاضر وجود دارد و تعدادی نیز باید احداث گردند.
- اگر از استان اول به دوم یک وجه حمل و نقل احداث شود برعکس آن نیز باید همان وجه حمل و نقل باشد. از آنجا که هزینه ساخت یک وجه حمل و نقل بین دو استان یکسان است و به جهت حرکت بستگی ندارد، هزیه ساخت آن وجه یکبار باید در تابع هدف محاسبه گردد.
- فرض می شود تعدادی کامیون و واگن در حال حاضر وجود دارد جهت توسعه ناوگان حمل و نقل، نیاز به افزایش این وسایل است.
- تعداد کشتی های کوچک (شبکه فیدری) بین بنادر آبی نامحدود در نظر گرفته شده است و تنها میزان بار جابجا شده بین بنادر اهمیت دارد.

۲-۳- مدل سازی

مسئله مذکور و با فرضیات بیان شده در بخش‌های قبلی، در قالب برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه مدل‌سازی می‌شود. پایه مدل‌سازی در مقاله حاضر بر اساس طراحی شبکه حمل و نقل و هاب است. از ترکیب این دو، جهت مدل‌سازی جریان مربوط به انتقال بارهای داخلی و خارجی استفاده شده است. لذا در ادامه، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله تعریف شده و مدل ریاضی مسئله مورد نظر بیان می‌شود.

جدول۱. مجموعه‌ها

N	مجموعه گره‌ها: $N = N_c \cup N_s \cup N_f$
N_s	مجموعه گره بنادر دریایی داخلی
N_f	مجموعه گره بنادر دریایی خارجی
N_c	مجموعه گره مناطق مشتری
N_{cs}	مجموعه گره مناطق مشتری و بنادر دریایی داخلی
A	مجموعه یال‌های واصل بین دو گره در N
K	مجموعه وجه های حمل و نقل
V	مجوعه وسایل نقلیه در خشکی (کامیون، قطار)
L	مجموعه حالات ظرفیت‌های مراکز توزیع

جدول۲. پارامترها

C_{ij}^k	هزینه حمل و نقل هر تن بار یال **(i,j)** توسط وجه نوع **k** (دلار)
CD_{ij}	هزینه حمل و نقل هر تن بار در یال **(i,j)** بین بنادر دریایی (دلار)
BW_{ij}^k	هزینه ساخت هر واحد مسافت از وجه حمل و نقل **k** در یال **(i,j)** (دلار)
$Distance_{ij}$	فاصله بین دو گره در یال **(i,j)** (کیلومتر)
DF_i^l	هزینه فعال‌سازی مرکز توزیع مرکز توزیع **i** از نوع **l** (دلار)
$DCAP_i^l$	ظرفیت **l** ام مرکز توزیع مرکز توزیع **i** (هزار تن)
$TCAP_{ij}^k$	ظرفیت وجه حمل و نقل **k** در یال **(i,j)** (هزار تن)
$ExternalFlow1_{ij}$	جریان مربوط به ارسال بار از استان ***i*** به بندر دریایی خارجی **j** (هزار تن)
$ExternalFlow2_{ij}$	جریان مربوط به ارسال بار از بندر دریایی خارجی ***i*** به استان **j** (هزار تن)
$InternalFlow_{ij}$	جریان مربوط به ارسال بار از استان ***i*** به استان **j** (هزار تن)
M	عدد بزرگ
$CO2Emi_k$	فاکتور تولید گاز CO2 براساس مقدار بار ارسال شده در واحد مسافت در وجه حمل و نقل ***k*** (گرم بر تن- کیلومتر)
NAT	تعداد کامیون موجود
NAW	تعداد واگن موجود
$TruckCAP$	ظرفیت حمل هر کامیون (تن در سال)
$WagonCAP$	ظرفیت حمل هر واگن (تن در سال)
$TruckCost$	هزینه استفاده از هر کامیون (دلار)
$WagonCost$	هزینه استفاده از هر واگن (دلار)

جدول۲. متغیرهای تصمیم

Y_i^l	متغیر باینری، اگر مرکز توزیع ***i*** با ظرفیت نوع ***l*** فعال شود مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.
X_{ij}	متغیر باینری، اگر منطقه ***j*** به مرکز توزیع ***i*** تخصیص داده شود مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.
Z_{ij}^k	متغیر باینری، اگر در یال ***(i,j)*** از وجه نوع ***k*** استفاده شود. مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.
US_{imj}	متغیر پیوسته، برابر با مقدار بار جابجا شده مربوط به جریان عرضه بار خارجی از گره **i** به گره **j** توسط مرکز توزیع m
UD_{imj}	متغیر پیوسته، برابر با مقدار بار جابجا شده مربوط به جریان تقاضای بار خارجی از گره **i** به گره **j** توسط مرکز توزیع m
SU_{ij}	متغیر پیوسته، برابر با مقدار بار جابجا شده از گره **i** به گره **j** در ارتباط با بنادر دریایی داخلی
$U1_{ij}^k$	متغیر پیوسته، برابر با مقدار بار جابجا شده مربوط به جریان بار خارجی از گره **i** به گره **j** توسط وجه ***k***

$U2_{ij}^{k}$	متغیر پیوسته، برابر با مقدار بار جابجا شده مربوط به جریان بار داخلی از گره i به گره j توسط وجه k
IU_{imhj}	متغیر پیوسته، برابر با مقدار بار جابجا شده مربوط به جریان بار داخلی از گره i به گره j توسط مرکز توزیع m و h
$H1_{ijm}$	متغیر پیوسته، برابر با مقدار بار جابجا شده از عرضه استان i و تقاضای آن به بنادر دریایی خارجی که از بندر دریایی داخلی j به بندر دریایی داخلی m می‌رود.
$H2_{ijm}$	متغیر پیوسته، برابر با مقدار بار جابجا شده از تقاضای استان i و عرضه آن به بنادر دریایی خارجی که از بندر دریایی داخلی j به بندر دریایی داخلی m می‌رود.
$W1_{ijm}$	متغیر پیوسته، برابر با مقدار بار انباشته شده از عرضه استان i و تقاضای بندر خارجی m که در بندر دریایی داخلی j دپو می‌شود.
$W2_{ijm}$	متغیر پیوسته، برابر با مقدار بار انباشته شده از تقاضای استان i و عرضه بندر خارجی m که در بندر دریایی داخلی j دپو می‌شود.
$NTruck$	تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز از نوع کامیون
$NWagon$	تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز از نوع واگن

$$Min\ Z1 = \sum_{i\in N_c}\sum_{l\in L} DF_i^l * Y_i^l + \sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{k\in K} BW_{ij}^k * Z_{ij}^k + \sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{k\in K}(U1_{ij}^k + U2_{ij}^k) * C_{ij}^k + \sum_{i\in N_s}\sum_{j\in N_s} SU_{ij} * CD_{ij} + TruckCost * NTruck + WagonCost * NWagon \quad (۱)$$

$$Min\ Z2 = \sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{k\in K}(U1_{ij}^k + U2_{ij}^k) * Distance_{ij} * CO2Emi_k + \sum_{i\in N_s}\sum_{j\in N_s} SU_{ij} * Distance_{ij} * CO2Emi_k \quad (۲)$$

$$\sum_{j\in N_c} X_{ij} = 1 \qquad \forall\, i \in N_c \quad (۳)$$

$$X_{ij} \le X_{jj} \qquad \forall\, i,j \in N_c \quad (٤)$$

$$US_{iij} \le \sum_{j\in N_f} ExternalFlow1_{if} * X_{ij} \qquad \forall\, i,j \in N_c, i \ne j \quad (٥)$$

$$UD_{iji} \le \sum_{f\in N_f} ExternalFlow2_{if} * X_{ij} \qquad \forall\, i,j \in N_c, i \ne j \quad (٦)$$

$$US_{ijm} \le \sum_{f\in N_f} ExternalFlow1_{if} * X_{ij} \qquad \forall\, i,j \in N_c, m \in N_s, i \ne j \quad (٧)$$

$$UD_{imj} \le \sum_{f\in N_f} ExternalFlow2_{if} * X_{ij} \qquad \forall\, i,j \in N_c, m \in N_s, i \ne j \quad (٨)$$

$$US_{iji} \le M * (1 - X_{ij}) \qquad \forall\, i,j \in N_c, i \ne j \quad (٩)$$

$$UD_{iij} \le M * (1 - X_{ij}) \qquad \forall\, i,j \in N_c, i \ne j \quad (۱۰)$$

$$\sum_{j\in N_{cs}} US_{iij} = \sum_{f\in N_f} ExternalFlow1_{if} \qquad \forall\, i \in N_c \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{j\in N_{cs}} UD_{iji} = \sum_{f\in N_f} ExternalFlow2_{if} \qquad \forall\, i \in N_c \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{i\in N_c}\sum_{j\in N_{cs}} UD_{iij} = 0 \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{i\in N_c}\sum_{j\in N_{cs}} US_{iji} = 0 \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{h\in N_c} IU_{imhj} \le InternalFlow_{ij} * X_{im} \qquad \forall\, i,j,m \in N_c, i \ne j \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{m\in N_c} IU_{imhj} \le InternalFlow_{ij} * X_{jh} \qquad \forall\, i,j,m \in N_c, i \ne j \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{m\in N_c}\sum_{h\in N_c} IU_{imhj} = InternalFlow_{ij} \qquad \forall\, i,j,m \in N_c, i \ne j \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{j\in N_s} W1_{ijm} = ExternalFlow1_{im} \qquad \forall\, i \in N_c, \forall\, m \in N_f \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{j\in N_s} W2_{ijm} = ExternalFlow2_{im} \qquad \forall\, i \in N_f, \forall\, m \in N_c \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{m\in N_c} US_{imj} = \sum_{m\in N_f} W1_{ijm} - \sum_{m\in N_s, m\ne j} H1_{imj} + \sum_{m\in N_s, m\ne j} H1_{ijm} \qquad \forall\, i \in N_c, j \in N_s \qquad (۲۰)$$

$$\sum_{m\in N_c} UD_{ijm} = \sum_{m\in N_f} W2_{mji} - \sum_{m\in N_s, m\ne j} H2_{imj} + \sum_{m\in N_s, m\ne j} H2_{ijm} \qquad \forall\, i \in N_c, j \in N_s \qquad (۲۱)$$

$$SU_{mj} = \sum_{i\in N_c} H1_{imj} + \sum_{i\in N_c} H2_{imj} \qquad \forall\, m,j \in N_s \qquad (۲۲)$$

$$\sum_{m\in N_c}\sum_{h\in N_c} IU_{ijmh} + IU_{mijh} + IU_{mhijm} = \sum_{k\in K} U2_{ij}^k \qquad \forall\, i,j \in N_c, i \ne j \qquad (۲۳)$$

$$\sum_{m\in N_c} US_{mij} + UD_{mij} = \sum_{k\in K} U1_{ij}^k \qquad \forall\, i,j \in N_{cs} \qquad (۲۴)$$

$$\sum_{i\in N_s}\sum_{j\in N_s}\sum_{k\in K} U1_{ij}^k = 0 \qquad (۲۵)$$

$$U1_{ij}^k + U2_{ij}^k \le TCAP_{ij}^k * Z_{ij}^k \qquad \forall\, i,j \in N_c, k \in K \qquad (۲۶)$$

$$U1_{ij}^k \le TCAP_{ij}^k * Z_{ij}^k \qquad \forall\, i \in N_c, j \in N_s, k \in K \qquad (۲۷)$$

$$U2_{ij}^k \le TCAP_{ij}^k * Z_{ij}^k \qquad \forall\, i \in N_s, j \in N_c, k \in K \qquad (۲۸)$$

$$\sum_{i\in N_{cs}}\sum_{j\in N_{cs}} EU_{jmi} + \sum_{i\in N_c}\sum_{j\in N_c}\sum_{h\in N_c} IU_{imjh} + IU_{ijmh} \le \sum_{l\in L} DF_i^l * Y_i^l \qquad \forall\, m \in N_c \qquad (۲۹)$$

$$\sum_{l\in L} Y_i^l = X_{ii} \qquad \forall\, i \in N_c \qquad (۳۰)$$

$$Z_{ij}^1 + Z_{ij}^2 + Z_{ij}^3 \le 1 \qquad \forall\, i,j \in N_{cs} \qquad (۳۱)$$

$$Z_{ij}^4 + Z_{ij}^5 \le 1 \qquad \forall\, i,j \in N_{cs} \qquad (۳۲)$$

$$Z_{ij}^k = Z_{ji}^k \qquad \forall\, i,j \in N_{cs}, i \ne j \qquad (۳۳)$$

$$\sum_{i\in N_{cs}}\sum_{j\in N_{cs}}\sum_{k\in K} U1_{ij}^k + U2_{ij}^k \le (NAT + NTruck) * TruckCAP \qquad k \le 3 \qquad (۳۴)$$

$$\sum_{i\in N_{cs}}\sum_{j\in N_{cs}}\sum_{k\in K} U1_{ij}^k + U2_{ij}^k \le (NAT + NWagon) * WagonCAP \qquad k \ge 4 \qquad (۳۵)$$

تابع هدف ۱ مجموع هزینه‌های احداث مراکز توزیع از هر نوع ظرفیت، حمل و نقل در خشکی و حمل و نقل آبی را کاهش می‌دهد. تابع هدف ۲ میزان گاز کربن منتشر شده را بر اساس مقدار بار جابجا شده در واحد مسافت کاهش می‌دهد. محدودیت ۳ بیان می‌کند هر استان به یک مرکز توزیع متصل گردد. محدودیت ٤ بیان می‌کند تنها در صورتی از یک استان به مرکز توزیع و بالعکس بار ارسال می‌گردد که آن استان به مرکز توزیع متصل شده باشد. محدودیت‌های۱۰-۵، حد بالای متغیرهای جریان بار عرضه و تقاضا را در مسیرهای ممکن کنترل می‌کنند. محدودیت‌های ۱۲-۱۱ بیان می‌کند مجموع متغیرهای جریان بار عرضه و تقاضای خارجی شروع شده از هر استان و ختم شده به هر استان باید به ترتیب برابر عرضه و تقاضای مورد نیاز خود از بندرهای خارجی باشد. محدودیت‌های ١٤-١٣ بیان می‌کند متغیرهای جریان بار عرضه و تقاضا در جهت نادرست خود مقدار صفر می‌گیرند. محدودیت‌های ۱۷-۱۵ مربوط به جریان بار داخلی هستند همچنین محدودیت‌های ١٦-١٥ از حرکت بار در مسیر نادرست جلوگیری می‌کند زیرا هر استان باید فقط به مرکز توزیع مربوط به خود متصل گردد. محدودیت ۱۷ نیز بیان می‌کند جریان عرضه و تقاضای هر استان باید برآورده گردد. محدودیت ۱۸ بیان می‌کند مقدار بار مرتبط با جریان عرضه از یک استان به بندر خارجی در هر بندر دریایی داخلی چقدر باشد. محدودیت ۱۹ مانند محدودیت ۱۸ و مرتبط با مقدار عرضه از بندر دریایی خارجی به یک استان است. محدودیت‌های ۲۱-۲۰ معادلات تعادلی بار مرتبط با هر استان در هر بندر دریایی داخلی را نشان می‌دهد. در این حالت، مقدار بار جابجا شده بین بنادر دریایی داخلی، بنادر داخلی و خارجی و بنادر داخلی و مراکز توزیع باید در حالت تعادل باشند. محدودیت ۲۲ مقدار بار جابجا شده بین دو بندر دریایی داخلی را نشان می‌دهد و این بار شامل بار مرتبط با جریان عرضه و تقاضا خواهد بود. محدودیت٢٤-٢٣ نشان می‌دهد بار ارسالی بین گره‌های استان‌ها، مراکز توزیع و بنادر دریایی باید از طریق وجه‌های حمل و نقل ارسال گردد. محدودیت ۲۵ بیان می‌کند ارتباط بین بنادرآبی فقط از طریق دریا است و از طریق وجه‌های حمل و نقل خشکی نیست. محدودیت‌های ۲۸-۲٦ نشان می‌دهد در صورتی که بین دو گره از یک وجه خاص استفاده شود حجم بار ارسالی در آن وجه نباید از ظرفیت آن تجاوز کند. محدودیت ۲۹ بیان می‌کند اگر یک استان به عنوان مرکز توزیع انتخاب شود حجم تبادل بار در آن بندر نباید از ظرفیت انتخاب شده در آن بندر تجاوز کند. همچنین اگر یک استان به عنوان مرکز توزیع انتخاب نشود حجم تبادل بار در آن بندر نباید از مجموع عرضه و تقاضای آن استان تجاوز کند. محدودیت ۳۰ مشخص می‌کند در صورتی که یک استان به عنوان مرکز توزیع انتخاب شود، از بین ظرفیت‌های از پیش طراحی شده تنها یکی انتخاب شود. محدودیت ۳۱ بیان دارد از هر کدام از وجه‌های جاده‌ای بین دو گره حداکثر یک وجه انتخاب شود. محدودیت ۳۲ همین قضیه را برای وجه‌های ریلی در نظر دارد. محدودیت ۳۳ بیان می‌کند وجه انتخاب شده بین دو شهر در دو طرف باید یکسان باشد. محدودیت های ۳۵-۳٤ نیز تعداد کامیون‌ها و واگن‌های مورد نیاز را تعیین می‌کند.

٤- روش حل: اپسیلون محدودیت

روش اپسیلون محدودیت یکی از روش‌های متداول در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه است. در این روش، یکی از اهداف انتخاب و سپس بهینه می‌شوند و مابقی اهداف به عنوان محدودیت درنظر گرفته می‌شوند. برای درک بهتر فرض کنید مسئله بهینه سازی زیر وجود دارد:

$$\max(f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)) \quad (۳٦)$$

$$X \in S$$

که در آن $f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)$ توابع هدف بوده و S نیز فضای موجه است. با استفاده از روش اپسیلون محدودیت مدل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\max\ f_1(x) \quad (۳۷)$$

$$f_2(x) \geq e_2$$

$$f_p(x) \geq e_p$$

$$X \in S$$

در این حالت، با تغییر مقادیر سمت راست e_i جواب‌های مسئله چند هدفه بدست می‌آید و می‌توان جبهه پارتو را تشکیل داد. این روش مزیت‌هایی نسبت به روش‌های دیگر دارد. به عنوان مثال، در مسائل خطی، روش مجموع وزنی روی فضای موجه اصلی پیاده سازی شده و موجب تولید جواب‌های گوشه‌ای می‌شود اما در روش اپسیلون محدودیت فضای موجه را تغییر داده و جواب‌های متنوع‌تری را بررسی می‌کند.(Steuer, 1986) علی‌رغم مزایای این روش، عیب‌هایی نیز وجود دارد. اولاً تضمینی وجود ندارد که جواب‌های بدست آمده در این روش در جبهه پارتو قرار بگیرند و جواب weakly efficient نباشند. ثانیا زمان حل در این روش در مسائل با تعداد تابع هدف بالا بسیار زیاد است. ثالثا جواب‌های بدست آمده برای هر تابع هدف باید در دامنه مجاز در هر تابع هدف قرار بگیرد (Mavrotas, 2009). لذا جهت رفع چنین عیوبی، از روش اپسیلون محدودیت اصلاح شده استفاده می‌شود.

٤-١- روش اپسیلون محدودیت اصلاح شده

در این روش، از بهینه‌سازی لکسیکوگراف، جهت تولید جدول payoff استفاده می‌شود. از این جدول جهت محاسبه دامنه هر تابع هدف استفاده می‌شود. این جدول متقارن بوده و دارای p سطر و ستون است و برای هر سطر یک مسئله بهینه‌سازی لکسیکوگراف مرتبط با تابع هدف آن سطر باید حل شود. روش کار این نوع بهینه‌سازی بدین صورت است: ابتدا تابع هدف اول (تابع هدف با اولویت بالاتر) بهینه شده و جواب آن به صورت $f_1 = Z_1^*$ بدست می‌آید. سپس تابع هدف دوم بهینه شده و $f_1 = Z_1^*$ به عنوان محدودیت در نظر گرفته می‌شود و $f_2 = Z_2^*$ بدست می‌آید. در قدم بعدی تابع هدف سوم بهینه شده و $f_1 = Z_1^*$ و $f_2 = Z_2^*$ به عنوان محدودیت در نظر گرفته می‌شوند. این روش تا آخرین تابع هدف پیاده می‌شود. مزیت این روش در این است که جواب‌های بدست آمده عضو جبهه پارتو خواهند بود. اما در روش بهینه‌سازی توابع هدف به صورت مجزا، تضمینی وجود ندارد که جواب‌های به دست آمده عضو جبهه پارتو باشند. روش تشکیل جدول payoff نیز بدین صورت است: بعد از بهینه‌سازی لکسیکوگراف با در نظر گرفتن تابع هدف اول به عنوان تابع هدف با اولویت بالاتر، جواب X^* به دست می‌آید. سپس مقادیر بقیه تابع هدف‌ها بر اساس جواب X^* محاسبه می‌شوند. در مرحله بعدی تابع هدف دوم به عنوان تابع هدف با اولویت بالا

انتخاب شده و مراحل بالا روی آن پیاده می‌شود. این روند تا آخرین تابع هدف ادامه دارد. در نهایت، جدول payoff به دست می‌آید. به صورت زیر:

جدول ٤. جدول payoff

$f_1(x)$	$f_2(x)$	...	$f_p(x)$
$\max f_1(x)$			
$\max f_2(x)$			
$\max f_p(x)$			

با داشتن این جدول، مینیمم و ماکزیمم هر ستون آن به عنوان دامنه تابع هدف مربوط به همان ستون در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعد، دامنه تمام تابع هدف‌ها باید به قسمت‌های مساوی و با تعداد برابر تقسیم شوند. در این حالت، به عنوان مثال اگر دامنه توابع هدف به چهار قسمت مساوی تقسیم شوند، پنج گرید پوینت برای هر مقدار سمت راست e_i بدست می‌آیند. همانطور که قبل‌تر بیان شد، یکی از ضعف‌های روش اپسیلون محدویت، تضمین efficient بودن جواب‌هاست. مدل ۲ امکان تولید جواب‌های weakly efficient را دارد. لذا جهت غلبه بر چنین عیبی، از مدل زیر استفاده می‌شود:

$$\max f_1(x) + eps(S_2/r_2 + S_3/r_3 + \cdots + S_p/r_p) \quad (۳۸)$$

$$f_2(x) - S_2 = e_2$$

$$f_p(x) - S_p = e_p$$

$$X \in S$$

دراین مدل، متغیر S_i متغیر slack و یا surplus مربوط به تابع هدف iام بوده و eps برابر با عددی بسیار کوچک است. جهت جلوگیری از مشکلاتی ناشی از مقایسه توابع هدف، متغیر S_i بر دامنه تابع هدف iام تقسیم می‌شود.

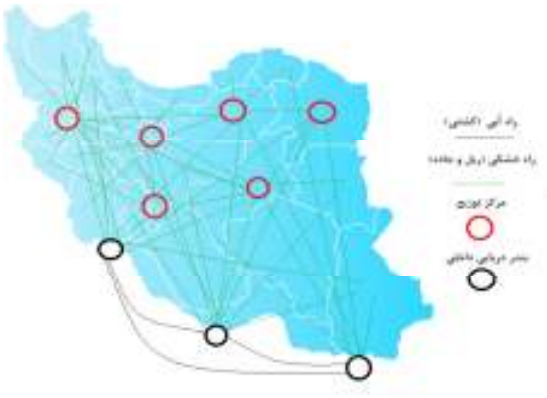
$$r_i = \max f_i(x) - \min f_i(x) \quad (۳۹)$$

عیب سوم روش اپسیلون محدودیت مربوط به زمان حل بالای آن در تعداد توابع هدف زیاد است. در روش اپسیلون محدودیت اصلاح شده، زمانی که مسئله به ازای مقدار سمت راست e_i نشدنی باشد، دیگر e_i را افزایش نداده و مسئله از حلقه مربوط به افزایش مقدار سمت راست این تابع هدف خارج می‌شود. لذا بررسی نکردن مسائل نشدنی موجب افزایش سرعت حل می‌گردد. الگوریتم کلی روش اپسیون محدودیت اصلاح شده بدین صورت است: ابتدا جدول payoff محاسبه شده و مینیمم و ماکزیمم هر تابع هدف بدست می‌آید. سپس دامنه همه توابع هدف به تعدادی مساوی بازه تقسیم می‌شوند و مقادیر سمت راست e_i برای هر تابع هدف بدست می‌آید. در نهایت مسئله (۳) برای هر ترکیب از مقادیر سمت راست توابع هدف حل می‌شود. اگر با افزایش این مقادیر، مسئله شدنی شود، جواب ذخیره شده و اگر مسئله نشدنی شود، الگوریتم از حلقه مربوط به افزایش مقدار سمت راست تابع هدف، خارج می‌شود.

نتایج عددی

این تحقیق با در نظر گرفتن ایران به عنوان مطالعه موردی انجام شده است. کشور ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خود و دسترسی به آب‌های آزاد از طریق خلیج فارس و دریای خزر، دریای عرب و اقیانوس هند، امکان استفاده از راه‌های آبی و دریایی را به طور همزمان دارد. لذا توسعه بنادر دریایی و زیرساخت‌های حمل و نقلی در خشکی، می‌تواند زمینه‌های افزایش ارتباط ایران را با کشورهای دیگر از طریق افزایش ترانزیت بار فراهم سازد. کشور ایران دارای ۳۱ استان بوده و هریک از این استان‌ها از طریق بنادر آبی موجود در جنوب ایران، ترانزیت بار به خارج از کشور را انجام می‌دهند. همچنین چشم انداز ایران بر افزایش قطب های صنعتی (که ایجاد قطب‌های صنعتی در کنار مراکز توزیع از جمله مزایای وجود این بخش است) و رفع نیازهای داخلی تاکید دارد، لذا علاوه بر عرضه و تقاضای خارجی، هر یک از

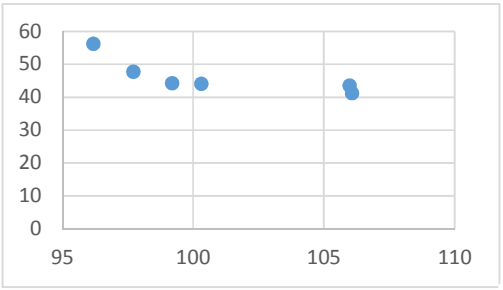
این استان‌ها جریانی از عرضه و تقاضای داخلی با یکدیگر دارند. مهمترین بنادر آبی موجود در جنوب ایران بندر شهید رجایی، بندر امام خمینی و بندر شهید بهشتی هستند که در این پژوهش به عنوان بنادر دریایی در نظر گرفته شده اند. (شکل ۱)



شکل ۱. نمایی شماتیک از شبکه بندر-پسکرانه حمل بار

حجم بالایی از مراسلات دریایی ایران توسط این سه بندر صورت می گیرد و فرض می شود ترانزیت بار به داخل و خارج کشور از این سه بندر انجام می‌گیرد. همچنین طی بررسی بنادر خارجی تحت عنوان مناطقی که ایران با آن‌ها تجارت دارد مشخص شده است. ایران با خارج از خود در قالب ۸ گروه شرق آسیا، کشورهای حوزه خلیج فارس، افغانستان و آسیای میانه، هند و پاکستان، اروپا، قاره آمریکا، قاره افریقا و اقیانوسیه در ارتباط است و این موارد به عنوان بنادر دریایی خارجی در تحقیق یاد می‌شوند. ایجاد مراکز توزیع در سه سطح، ۵۰۰،۳۰۰ و ۷۰۰ هکتاری با ظرفیت ۵۰ هزار تن بار در هر هکتار و ٤۹۰ دلار هزینه ساخت در هر متر مربع در نظر گرفته شده است. داده‌های مربوط به مسافت بین استان‌ها، مقدار بارهای جابجا شده بین استان‌ها با هم و استان‌ها با بنادر دریایی خارجی از سالنامه آماری ثبت شده در وزارت راه و شهرسازی و زیرمجموعه‌های آن استخراج شده است. چهار نوع وجه حمل و نقل در قالب جاده‌های چهارباند و شش‌باند و ریل‌های تک ریل و دو ریل بر روی خشکی تعریف شده است و ظرفیت جاده‌ای ایران بر اساس محاسبات تردد کامیون بر روی جاده‌های با سطح سرویس C محاسبه شده است. مسیرهای ریلی نیز تک ریل و دو ریل درنظر گرفته شده است. ظرفیت ریلی بر اساس متوسط خطوط ریلی کشور محاسبه شده است. هزینه ساخت هر یک از وجه های مذکور به ترتیب برابر ۳،۷۵، ۵،٦۳، ۰،۹٤ و ۱،۸۸ میلیون دلار در هر کیلومتر محاسبه شده است. در مدل مذکور، امکان توسعه وجه های حمل و نقل در نظر گرفته شده است. لذا با توجه به اینکه در برخی از مسیرها، وجه حمل و نقل وجود دارد، هزینه احداث آن وجه حمل و نقل در آن مسیر برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. ظرفیت تردد در وجه‌های مذکور به ترتیب برابر ۵٤۳۱۲، ۸۱٤٦۸، ٤،٦ و ۱۱،۲ میلیون تن در سال تخمین زده شده است. از کامیون در وجه‌های جاده‌ای و از واگن در وجه‌های ریلی استفاده می‌شود. تعداد کامیون‌ها و و اگن‌های موجود در کشور ۳۳۰۰۰۰ و ۲٤۰۸۹ عدد، ظرفیت باری هریک به ترتیب برابر ۲۰ و ٦۰ تن و هزینه خرید هر کدام ۱۲۲ و ۸۳۳ هزار دلار تخمین زده شده است. میزان تولید گاز کربن‌دی‌اکسید کامیون، واگن و کشتی‌های اشاعه شونده در بنادر دریای آبی داخلی که در مسیر بین بنادر دریایی داخلی در حرکت هستند، به ترتیب برابر ۸۳، ۲۲ و ۳۱ گرم در هر تن-کیلومتر است. در این مدل تعداد کشتی‌ها و قیمت خرید هر کشتی در نظر گرفته نشده و فرض بر این است تعداد کشتی‌های کوچک مورد نیاز برای انجام حمل و نقل بین بنادر دریایی فراهم است. هزینه حمل و نقل هر تن بار در وجه‌های جاده ای، ریلی و کشتی‌های موجود در بنادر آبی به ترتیب برابر ۰،۰۱٦٦، ۰،۰۱۱۹ و ۰،۰۰۳٦ دلار در هر کیلومتر محاسبه شده است. با توجه داده‌های مسئله و به دلیل بالا بودن اندازه آن‌ها، مدل ارائه شده در این تحقیق توسط

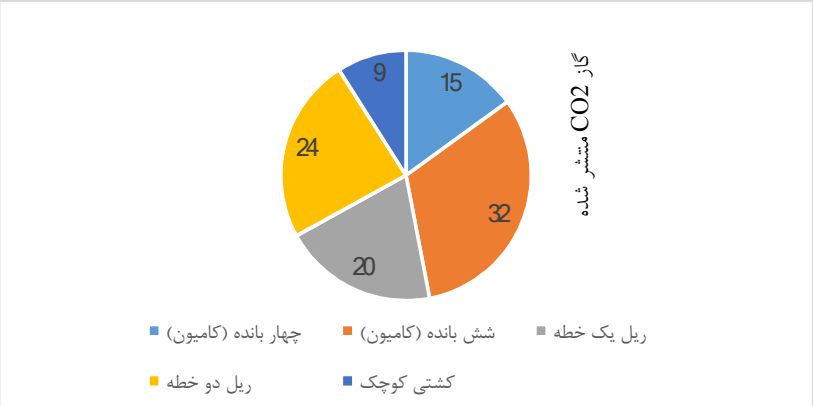
سرورهای موجود در سایت https://neos-server.org حل شده است. تعداد گرید پوینت‌ها در این روش برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است. در ادامه نتایج بدست‌آمده به شرح ذیل است: (شکل ۲). در جواب مطابق شکل ۲ مشاهده می‌شود مقدار هزینه کل از ۹۶ میلیارد دلار تا حدود ۱۰۶ میلیارد دلار تغییر می‌کند. همچنین مقدار گاز کربن‌دی‌اکسید منتشر شده نیز از ۴۰ میلیون تن در سال تا ۵۶ میلیون تن تغییر می‌کند. در مدل این مسئله فرض بر این است تعداد مراکز توزیع نامشخص است، لذا جواب‌های متنوعی در جبهه پارتو مشاهده می‌شود. به عنوان مثال، جواب مربوط به کمترین میزان تولید گاز کربن-دی‌اکسید دارای۱۲ مرکز توزیع است که آذربایجان غربی، اصفهان، ایلام، تهران، چهارمحال بختیاری، خراسان رضوی، سمنان، سیستان و بلوچستان، قزوین، لرستان و مازندران به عنوان مراکز توزیع مشخص شده اند. در این جواب، چهار مرکز با ظرفیت ۳۰۰ هکتاری، پنج مرکز با ظرفیت ۵۰۰ هکتاری و مابقی با ظرفیت ۷۰۰ هکتاری در نظر گرفته شده‌اند. هزینه های احداث مراکز برابر با ۳,۵ میلیارد دلار و هزینه‌های ساخت و حمل و نقل جاده ها و ریل ها برابر ۱۰۲ میلیارد دلار است. هزینه های حمل و نقل بین دریایی نیز برابر ۶ میلیارد دلار است. همچنین در این جواب سهم وجه های چهار باند، شش باند، ریل یک خطه و ریل دو خطه و حمل و نقل کشتی ها در تولید گاز کربن دی اکسید به ترتیب برابر با ۱۵، ۳۲، ۲۰، ۲۴ و ۹ درصد است (شکل ۳). همچنین میزان انباشت بار در هر یک از بنادر دریایی شهید رجایی، امام خمینی و شهید بهشتی به ترتیب برابر۴۳۵۸۴، ۵۸۵۷۵ و ۶۹۰۵۶ هزار تن در سال است. از طرفی، در دیگر جوابی که مربوط به تولید بیشترین گاز کربن دی اکسید است، استان های اردبیل، اصفهان، تهران، خراسان جنوبی، خراسان شمالی، خوزستان، قزوین، کرمان،کرمانشاه، گلستان، لرستان و همدان به عنوان مراکز توزیع معرفی شدند. در این بین، چهار مرکز با ظرفیت ۳۰۰ هکتاری، دو مرکز با ظرفیت ۵۰۰ هکتاری و مابقی با ظرفیت ۷۰۰ هکتاری در نظر گرفته شده اند. در این جواب، هزینه‌های احداث مراکز برابر با ۳,۸ میلیارد دلار و هزینه‌های ساخت و حمل و نقل جاده‌ها و ریل ها برابر ۹۴ میلیارد دلار و مابقی هزینه ها صرف هزینه های حمل و نقل بین دریایی شده است. همچنین در این جواب سهم وجه‌های چهار باند، شش باند، تک ریل و دو ریل و حمل و نقل کشتی‌ها در تولید گاز کربن دی اکسید به ترتیب برابر با ۱۳، ۳۴، ۱۶، ۳۰ و ۷ درصد است. همچنین میزان انباشت بار در هر یک از بنادر دریایی شهید رجایی، امام خمینی و شهید بهشتی به ترتیب برابر ۷۰۵۳۹، ۴۳۸۴۱ و ۵۷۱۳۵ هزار تن در سال است. جدول ۵ تعدادی از جواب های پارتو مرتبط با دو هدف را نمایش می‌دهد.



شکل ۲. نمودار پارتو

جدول ۵. نتایج عددی

گاز کربن دی اکسید (تن)	هزینه (میلیون دلار)
٤١,٢٢٦,٧٠٤	١٠٦,٠٧٠
٤٣,٥١٤,٢٣٢	١٠٥,٩٨٧
٤٣,٩٩٨,٨٥٢	١٠٠,٣١٧
٤٤,١٨٤,٧٠٩	٩٩,١٩٧
٤٧,٦٩٤,٠٢٥	٩٧,٧١٧
٥٦,٢٠١,٧٢٦	٩٦,١٨٥



شکل۳. درصد گاز CO2 منتشر شده در شبکه بهینه (جواب مربوط به کمترین میزان گاز منتشره)

٦- نتیجه‌گیری

حل مسائل حوزه استراتژیک در پیوند بندر و خشکی همچون توسعه زیرساخت‌های لجستیکی، مراکز توزیع یا ترمینال‌های داخلی و چگونگی استفاده از آن‌ها در مسیریابی حمل کالا از بندر اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی شبکه بندر-پسکرانه پیدا کرده است. در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دو هدفه جهت مکان‌یابی مراکز توزیع ارائه شد. این مدل که جریان کالای داخلی و خارجی را با هم در نظر گرفته، به دنبال تعیین نقاط مراکز توزیع و ظرفیت آن‌ها و نحوه استفاده از ظرفیت وجوه حمل و نقل در خشکی است. هدف اول کاهش هزینه‌های احداث بنادر و حمل و نقل کالا و هدف دوم کاهش میزان گاز کربن منتشر شده ناشی از جابجایی کالا است. مدل توسط روش اپسیلون محدودیت و توسط سرورهای موجود در سایت neos حل شده است. نتایج تحقیق نشان داد جهت احداث مراکز توزیع و توسعه وجه های حمل و نقل می‌بایست بالغ بر ۹٦ تا ۱۰٦ میلیارد دلار سرمایه‌گذاری نمود. همچنین میزان تولید گاز کربن‌دی‌اکسید در هر کدام از این سرمایه گذاری‌ها چیزی حدود ٤۰ تا ٥٦ میلیون تن تن در سال خواهد بود. به عنوان تحقیقات آتی دراین زمینه می‌توان مسئله را در حالت عدم قطعیت برای تقاضاها در نظر گرفت. همچنین، بررسی اینکه ایران تبدیل به یک هاب منطقه‌ای شود و کشورهای دیگر بارهای خود را از ایران عبور داده و به کشورهای مقصد برسانند نیز از دیگر پیشنهادهای آتی می‌باشد. لذا در نظر گرفتن بار ترانزیتی و کارکردی که ترمینال‌های توزیعی داخلی می‌توانند داشته باشند قابل بررسی است. همچنین بررسی پایداری شبکه توزیع حاصل از این تحقیق از نظر اجتماعی و اقتصادی نیز پیشنهاد دیگری برای تحقیق در آینده است. حل مدل با استفاده از روش‌های فراابتکاری و مقایسه آن در این مسئله قابل بررسی است. ظرفیت‌های در نظر گرفته شده مراکز توزیع با توجه به ظرفیت های مرسوم فعلی کشور تحت عنوان بنادر خشک و ... بوده است که می توان تحلیل حساسیت مدل بر روی این موارد را نیز در نظر گرفت. همچنین می‌توان به طور خاص و تحت مدلی ارتباط بندر دریایی به بندر دریایی را برای کشورمان در نظر گرفت. چراکه اهمیت اتصال خلیج فارس به شمال کشور که متعاقب آن اتصال به کشور روسیه و حوزه اروپا را در برخواهد داشت در طول سال‌های اخیر افزایش پیدا کرده است. توسعه سیستم و زیرساخت‌های حمل و نقل کشور و بهره‌گیری درست از بنادر خشک و مراکز و ترمینال‌های داخلی برای به وقوع پیوستن این مسئله قطعا نیاز به تحقیق و پژوهش بیشتری دارد. لذا توسعه شبکه بندر پسکرانه با نگاه به نقش ژئوپلیتیک ایران در این قسمت قابل توجه و حائز اهمیت است. این پژوهش در سطح استراتژیک به مدلسازی شبکه بندر-پسکرانه پرداخته است. در سطوح تاکتیکال و عملیاتی مسائل بیشماری قابل تامل و بررسی است. به عنوان مثال مدل فعلی توسعه شبکه ریلی کشور را نشان می‌دهد. حال در سطح تاکتیکال و عملیاتی برنامه‌ریزی جهت بهره‌گیری از شبکه ریلی و جاده‌ای با هدف کمترین تردد خالی ناوگان از مباحث مهمی است که اکنون مورد توجه است و مکان‌یابی مراکز توزیع و صنعتی با نگاه به این مسئله صورت می گیرد. در همین راستا مسائل بیشماری مورد توجه قرار می‌گیرد که هریک به تنهایی نقشی در افزایش بهره‌وری این شبکه خواهد داشت.

۷- مراجع

-Chang, Z., Notteboom, T., & Lu, J., (2015), "A two-phase model for dry port location with an application to the port of Dalian in China". Transportation Planning and Technology, 38(4), pp.442–464.

-Crainic, T. G., Dell'Olmo, P., Ricciardi, N., & Sgalambro, A., (2015), "Modeling dry-port-based freight distribution planning". Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 55, pp.518–534.

-Cullinane, K., Ping, J., & Wang, T.-F., (2002), "A multi-objective programming approach to the optimisation of china's international container transport networks". International Journal of Transport Economics/Rivista Internazionale Di Economia Dei Trasporti, pp.181–199.

-Feng, X., Zhang, Y., Li, Y., & Wang, W., (2013), "A location-allocation model for seaport-dry port system optimization". Discrete Dynamics in Nature and Society.

-Halim, R. A., Kwakkel, J. H., & Tavasszy, L. A., (2016), "A strategic model of port-hinterland freight distribution networks". Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 95, pp.368–384.

-Iannone, F., (2012), "The private and social cost efficiency of port hinterland container distribution through a regional logistics system. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 46(9), pp.1424–1448.

-Iannone, F., & Thore, S., (2010), "An economic logistics model for the multimodal inland distribution of maritime containers". International Journal of Transport Economics/Rivista Internazionale Di Economia Dei Trasporti, pp.281–326.

-Kim, N., Janic, M., & Van Wee, B., (2009), "Trade-off between carbon dioxide emissions and logistics costs based on multiobjective optimization". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2139), pp.107–116.

-Lam, J. S. L., & Gu, Y., (2016), "A market-oriented approach for intermodal network optimisation meeting cost, time and environmental requirements". International Journal of Production Economics, 171, pp.266–274.

-Lättilä, L., Henttu, V., & Hilmola, O.-P., (2013), "Hinterland operations of sea ports do matter: Dry port usage effects on transportation costs and CO2 emissions". Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 55, pp.23–42.

-Lee, P. T., Hu, K., & Chen, T., (2010), "External costs of domestic container transportation: Short-sea shipping versus trucking in Taiwan". Transport Reviews, 30(3), pp.315–335.

-Mavrotas, G., (2009), "Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems". Applied Mathematics and Computation, 213(2), pp.455–465.

-Mingjun, J. I., & Maoying, H. E., (2010), "Optimization of two-stage port logistics network of dynamic hinterland based on bi-level programming model". Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 10(6), pp.89–94.

-Rahimi, M., Asef-Vaziri, A., & Harrison, R., (2008), "An inland port location-allocation model for a regional intermodal goods movement system". Maritime Economics & Logistics, 10(4), 362–379.

-Steuer, R. E., (1986), "Multiple criteria optimization, Theory, Computation and Applications".

-Wang, C., (2008), "Optimization of hub-and-spoke two-stage logistics network in regional port cluster. Systems Engineering-Theory & Practice, 28(9), pp.152–158.

-Wei, H., & Sheng, Z., (2017), "Dry Ports-Seaports Sustainable Logistics Network Optimization: Considering the Environment Constraints and the Concession Cooperation Relationships". Polish Maritime Research, 24(s3), pp.143–151.

-Zhang, M., Janic, M., & Tavasszy, L. A., (2015), "A freight transport optimization model for integrated network, service, and policy design". Logistics and Transportation Review, 77, pp.61–76.