مقاله پژوهشی

طراحی و تحلیل حساسیت شبکه حمل‌ونقل بندر خشک با استفاده از مکان‌یابی هاب

الهام زیار[1*]، مهدی سیف‌برقی [2]، مهدی بشیری [3]

دانشگاه الزهرا دانشگاه شاهد

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۳۰

چکیده

با افزایش روزافزون جمعیت و درنتیجه افزایش تقاضای حمل‌ونقل کالا، طراحی مناسب شبکه‌های حمل‌ونقل کالا بیش‌ازپیش حائز اهمیت است. با توجه به این موضوع، استفاده از هاب در شبکه حمل‌ونقل با ارسال غیرمستقیم بین نقاط مبدأ و مقصد باعث کاهش قابل توجه هزینه‌ها و تعداد مسیرهای ارتباطی می‌گردد. در راستای تبدیل‌شدن کشور به هاب تجاری، توسعه هاب های لجستیکی ازجمله بنادر خشک با رویکرد بین‌المللی می‌تواند مثمر ثمر باشد. یکی از ویژگی‌های اصلی هاب اتصال غیرمستقیم نقاط از مبدأ به مقصد است که این موضوع گاهی باعث افزایش زمان حمل کالا می‌شود که در پی آن گاهی موجب فساد کالاها خواهد شد. در این پژوهش، با طراحی شبکه حمل‌ونقل به مکان‌یابی بنادرخشک پرداخته شده است که با امکان برقراری اتصال مستقیم از مبدأ به مقصد باعث انعطاف‌پذیری در مدل مکان‌یابی هاب شده است. مدل ریاضی ارائه‌شده با استفاده از سیپلکس در گمز حل شده است. سپس با تحلیل حساسیت صورت گرفته درزمینه تعداد بنادرخشک، بر لزوم ایجاد بنادرخشک به جهت کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، تأکید شد.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی هاب، بندرخشک، اتصال مستقیم، هاب تجاری، شبکه حمل‌ونقل

۱- مقدمه

تجارت بین‌الملل در دنیای امروز، با فاصله گرفتن از مفاهیم سنتی خود، شکل تازه‌ای به خود گرفته است. امروزه تجارت در قالب شبکه‌های جهانی صورت می‌گیرد که گستره آن‌ها تمامی قاره‌ها را شامل می‌شود. در چنین شرایطی فرآیندهای تجاری از مرز کشورهای مبدأ و مقصد عبور کرده و کشورهای طرف سومی را نیز که به نحوی در به انجام رساندن یا تسهیل آن‌ها دخیل هستند، در برمی‌گیرد. در این میان برخی کشورها به مدد ویژگی‌ها و مزیت خود به نقاط جذابی در شبکه‌های جهانی تجارت تبدیل می‌شوند که می‌توان آن‌ها را محل تجمع فعالیت‌های تجاری جهانی اعم از خریدوفروش، حمل‌ونقل، توزیع و ... دانست. به این مکان‌ها عنوان "هاب تجاری" اطلاق می‌شود. کشور ایران نیز با قرارگیری در یکی از راهبردی‌ترین نقاط جهان، ازنظر جغرافیایی از بسیاری از ویژگی‌هایی که یک منطقه را به هاب تجاری تبدیل می‌کند برخوردار است. ایران در مسیر تجارت اروپا-آسیا قرار دارد. از سوی دیگر کریدورهای ترانزیتی متعددی در مسیر شرقی-غربی و شمالی-جنوبی از ایران عبور می‌کنند. از سوی دیگر ایران هم از شمال و هم از جنوب به دریا متصل است که دسترسی به آب‌های آزاد از طریق مرزهای جنوبی میسر است. ایران با ۱۳ کشور مرز مشترک زمینی و دریایی دارد. همچنین از طریق ایران دسترسی غیرمستقیم به بیش از ۱۲ کشور دیگر که در فاصله تقریبی ۲۰۰۰ کیلومتری از

۱*- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران، نویسنده مسئول، پست الکترونیک: Elham.Ziar@yahoo.com نشانی: تهران، خیابان ده ونک، دانشگاه الزهرا

۲- دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی, دانشگاه الزهرا، تهران، ایران، پست الکترونیک:m.seifbarghy@Alzahra.ac.ir

۳- استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی, دانشگاه شاهد، تهران، ایران، پست الکترونیک: ad2594@conentry.ac.uk

اطراف کشور واقع شده‌اند، امکان‌پذیر است. به‌طورکلی منطقه خاورمیانه از مزیت‌های جغرافیایی بسیاری برای تبدیل‌شدن کشورهای آن به هاب تجاری برخوردار است. همه این موارد در حالی است که تنها دارا بودن مزیت‌های جغرافیایی برای یک کشور برای تبدیل‌شدن به یک هاب تجاری کافی نیست. موقعیت جغرافیایی خوب یک شرط لازم است اما کافی نیست. زیرساخت‌های تجاری توسعه‌یافته اعم از فیزیکی و غیر فیزیکی یکی از مهم‌ترین عوامل جذب جریان‌های تجاری در یک کشور هستند چراکه فرآیندهای تجاری به‌واسطه وجود زیرساخت‌های تجاری فیزیکی و غیر فیزیکی قابل جاری شدن خواهند بود. در راستای تبدیل‌شدن کشور به هاب تجاری، توسعه هاب‌های لجستیکی با رویکرد بین‌المللی می‌تواند مثمر ثمر باشد. هاب‌های لجستیک مراکزی هستند که در آن‌ها کلیه فعالیت‌های مرتبط با حمل‌ونقل، توزیع و سایر خدمات لجستیکی کالاها توسط چندین متصدی انجام می‌شود.

۱-۱- مکان‌یابی هاب

در راستای طراحی شبکه حمل‌ونقل، اخیراً محققان توجه زیادی به مسائل مکان‌یابی و تخصیص هاب داشته‌اند. شرکت‌های پست، مخابرات و حمل‌ونقل هوایی یکی از قدیمی‌ترین کاربران این قسم از طراحی شبکه‌های حمل‌ونقل می‌باشند اما در صنعت حمل‌ونقل دریایی و حمل‌ونقل چندوجهی کمتر به این موضوع پرداخته شده است [۹]. ایده اولیه مکان‌یابی هاب از حکیمی [۲] بود که مفاهیم اولیه و نزدیک به هاب را در این مقاله بیان کرد اما مدل واضح و مشخصی را ارائه نداد. سپس اوکلی [۳] در سال ۱۹۸۶ اولین مقاله از مکان‌یابی هاب را ارائه داد. او در این مقاله به معرفی مدل ریاضی این موضوع پرداخت. مدل‌های ریاضی زیادی بعد از مدل اوکلی گسترش یافت به‌طوری‌که بر روی فرضیات مدل پایه مانور زیادی داده شده است. به‌طور مثال بحث‌های تخصیص تکی یا چندتایی، هاب‌های دارای ظرفیت محدود یا نامحدود و... موردتوجه قرار گرفت. همچنین انواع مختلفی از مدل‌های هاب گسترش یافت ازجمله هاب میانه، هاب مرکزی، هاب پوششی و... .

کریمی و همکاران [۴] با ارائه یک مدل خطی عدد صحیح مختلطی از مکان‌یابی هاب به حداقل کردن کل هزینه شبکه لجستیکی پرداختند. در مدل ارائه‌شده تخصیص به‌صورت چندتایی و چند نوع گروه کالایی مدنظر قرار گرفت. سیستم حمل‌ونقل به‌صورت چندوجهی و قابلیت جداسازی کالاها از طریق هاب‌ها و سیستم‌های حمل‌ونقل وجود دارد. در این مدل ارائه‌شده ظرفیت هاب‌ها و سیستم‌های حمل‌ونقل محدود در نظر گرفته‌شده است. الومور و همکاران [۵] به طراحی یک مدل شبکه لجستیکی که حمل‌ونقل در آن به‌صورت چندوجهی بود، پرداختند. در این تحقیق تخصیص‌ها به‌صورت تکی و تعداد هاب‌ها از قبل مشخص شده است. دو نکته اصلی در نظر گرفته‌شده در این مدل هزینه حمل‌ونقل و زمان می‌باشد. مدل با استفاده از نامساوی‌های معتبر بهبودیافته و درنهایت با استفاده از یک الگوریتم هیوریستیک به حل آن پرداختند. دیتاهای مورداستفاده در این پژوهش شبکه‌های ترکیه‌ای و CAB بوده است. امبروسینو و سیوماچن [۶] با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به مکان‌یابی پلتفرم‌های لجستیکی به‌عنوان هاب در یک شبکه لجستیکی پرداختند. حمل‌ونقل در نظر گرفته‌شده به‌صورت چندوجهی و ظرفیت هاب‌ها محدود در نظر گرفته‌شده است. در این مدل تخصیص به‌صورت چندتایی لحاظ شده است. نکته مهم در نظر گرفته‌شده در این پژوهش این است که هاب‌ها به هم به‌صورت کامل متصل نیستند و جریان‌ها از حداقل یک هاب اجازه عبور دارند. گلاره و نیکل [۷] مدل جدیدی از مکان‌یابی هاب در حوزه حمل‌ونقل ارائه دادند. مدل به صورت تخصیص چندتایی و ظرفیت هاب‌ها نامحدود است. کاربرد مدل در شبکه حمل‌ونقل خطوط هوایی و داخل شبکه حمل‌ونقل شهری می‌باشد. درنهایت با استفاده از الگوریتم بندرز و شتاب‌دهنده‌های آن مدل مذکور قابلیت حل در ابعاد بالا را خواهد داشت. ایشفاق و ساک [۸] در مدل مکان‌یابی هاب خود در زمینه لجستیک به عوامل مختلفی اشاره کردند که این عوامل دلیل بر پیچیدگی مدل‌های طراحی شبکه حمل‌ونقل می‌باشد. ازجمله این عوامل ساختار هزینه حمل‌ونقل، اتصال چندوجهی، در دسترس بودن نقاط انتقال و عملکرد زمان سرویس می‌باشد. آن‌ها به گسترش یک مدل چند تخصیصه پی هاب میانه با در نظر گرفتن شرایط زمانی برای ارائه سرویس پرداختند. در سایز بالا مدل با الگوریتم فرااابتکاری جستجوی ممنوع حل شده و از طریق الگوریتم لاگرانژ حد پایینی برای مسئله برآورد شده است.

۱-۲- بندر خشک

براساس مطالعات معتبر بین‌المللی، بهبود و ارتقای عملکرد لجستیک به‌عنوان یکی از اهداف مهم توسعه کشورها، طی سالیان اخیر، مطرح شده است؛ چراکه لجستیک تأثیر به سزایی بر فعالیت‌های اقتصادی کشورها دارد. تبدیل شدن به هاب لجستیکی بین‌المللی و منطقه‌ای، یکی از مهم‌ترین راهبردهای تجاری کشورها طی سالیان اخیر در رشد و توسعه اقتصادی بوده است.

در این قسمت اشاره‌ای داریم به برخی از مهم‌ترین پژوهش‌های صورت گرفته در رابطه با بندر خشک:

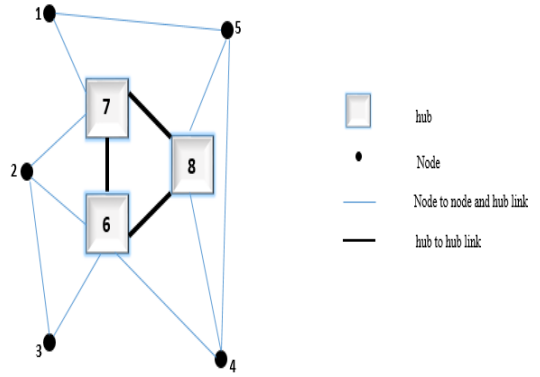
درودیان و همکاران [۱] به مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی بندر خشک به‌عنوان پایانه حمل‌ونقل چندوجهی با استفاده از رویکرد مسئله مکان‌یابی-تخصیص p-هاب میانه پرداختند. نوآوری‌های پرداخته شده در این مقاله به‌صورت موردی عبارت‌اند از: تعیین تعداد بهینه بندر/بنادر خشک به‌صورت درون‌زا توسط مدل؛ مکان‌یابی بندر/بنادر خشک با رویکرد مسائل مکان‌یابی و تخصیص مراکز صادراتی و وارداتی کشور به آن‌ها؛ تعیین تعداد و ظرفیت بندر/بنادر خشک؛ در نظر گرفتن محدودیت جابه‌جایی کمان‌ها در جابه‌جایی بار؛ در نظر گرفتن هزینه عملیاتی در بنادر خشک؛ استفاده از نرم‌افزار GIS جهت تعیین نقاط نامزد احداث بندر خشک با توجه به معیارهای خبرگان؛ اعمال شرایط واقعی ازجمله نوسان در پارامتر تقاضا و استفاده از روش‌های بهینه‌سازی و استوار سازی در شرایط عدم قطعیت. آمبروسینو و سیوماچن [۱۰] به مکان‌یابی بنادر خشک در شبکه‌های ترکیبی حمل‌ونقل پرداختند. مدل استفاده‌شده مکان‌یابی هاب با ظرفیت نامحدود است. در این پژوهش دو نوع از حمل‌ونقل (ریل و جاده) همزمان در نظر گرفته شده است. تابع هدف در این مدل حداقل سازی هزینه حمل‌ونقل، هزینه احداث هاب (بندر خشک) و هزینه عملیاتی در هاب است. مطالعه موردی در مناطق شمال غربی ایتالیا، بندر گنوآ است و درنهایت با سیپلکس مدل حل شده است. فنگ و همکاران [۱۱] به مکان‌یابی-تخصیص بنادر خشک پرداختند. (بهینه‌سازی سیستم بندرها) نکته حائز اهمیت در این مقاله این است که الزامی برای نقل و انتقالات از طریق بندر خشک وجود ندارد، یعنی کالاها می‌تواند از نقاط داخلی مستقیماً وارد بندرهای ساحلی شوند و برعکس. تابع هدف عبارت است از حداقل کردن هزینه حمل‌ونقل، هزینه راه‌اندازی بندر خشک، هزینه نگهداری تمام مسیرها از بنادر خشک به بنادر ساحلی و هزینه نگهداری زیرساخت‌ها در بنادر خشک. مطالعه موردی در تایوان انجام شده و درنهایت با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری حریصانه و ژنتیک به حل مدل پرداختند. عباسی و پیشوایی [۱۲] با یک مدل دو هدفه و با استفاده از GIS و AHP به مکان‌یابی بنادر خشک در ایران پرداختند. به این صورت که در مرحله اول نقاط مناسب برای ایجاد بندر خشک توسط GIS و AHP شناسایی شد و در مرحله دوم مکان بندرها و شیوه حمل‌ونقل با یک مدل دو هدفه مشخص شد. مدل به دو صورت قطعی و غیرقطعی (از منظر تقاضا) بررسی و حل شد. تابع هدف حداقل کردن اثرات محیطی و حداقل کردن هزینه‌ها است. گوان و همکاران [۱۳] به مکان‌یابی مراکز لجستیک با استفاده از برنامه‌ریزی چند سطحی مبتنی بر رقابت پرداختند. جریان‌ها در این مدل یک‌طرفه بوده و از کارخانه به سمت مراکز لجستیک و سپس مصرف‌کننده‌ها است. از دو مدل ریاضی استفاده‌شده، اولی تحت عنوان برنامه‌ریزی سطح بالا که بهترین مکان را برای مراکز لجستیک با کمترین هزینه انتخاب می‌کند و مدل دوم تحت عنوان برنامه‌ریزی سطح پایین که الگوهای توزیع تقاضای مشتریان را بین تعدادی مشخص از مراکز لجستیک مشخص می‌کند. درنهایت این مدل‌ها با الگوریتم ژنتیک حل شده است. هوا و همکاران [۱۴] به مکان‌یابی مراکز توزیع لجستیکی پرداختند. مدل به بررسی انتخاب نقاط مراکز توزیع و مشخص کردن مقدار انتقال محصولات به مشتری می‌پردازد. در این مدل مشتری فقط از یک مرکز توزیع می‌تواند برای تأمین نیازهای خود استفاده کند. این مدل با الگوریتم بهینه‌سازی ذرات تطبیقی حل شده است. یانگ و همکاران [۱۵] به بررسی مکان مراکز لجستیک در محیط فازی پرداختند. دو مدل قطعی و فازی نوشته‌شده در این مقاله که در مدل فازی تقاضای مشتری، حجم معاملات و هزینه راه‌اندازی را غیرقطعی فرض کرده است. در این مدل تابع هدف عبارت است از حداقل کردن هزینه راه‌اندازی هر مرکز توزیع، هزینه حجم معاملات هر مرکز توزیع، هزینه حمل‌ونقل از کارخانه به مرکز توزیع و هزینه حمل‌ونقل از مرکز توزیع به مشتری. برای حل از الگوریتم‌های تابوسرچ، ژنتیک و شبیه‌سازی فازی استفاده شده است. کومکورنریت [۱۶] از متد CFA-MACBETH-PROMETHEE که بر پایه تصمیم‌گیری چند معیاره است برای مکان‌یابی بنادر خشک استفاده کرده است. این

مجموعه از متدها برای ۱-مرتب کردن اهمیت معیارها و بررسی رابطه بین قوانین لجستیکی و تصمیم‌گیری‌های جغرافیایی برای تأسیس بندر خشک ۲-اندازه‌گیری جذابیت با روش ارزیابی مبتنی بر طبقه‌بندی و ۳- رنک کردن از بهترین تا بدترین آلترناتیوها برای بنادر خشک، استفاده می‌شوند. مطالعه موردی این مقاله در تایلند است. نگوین و نوتبوم [۱۷] با وزن دهی به معیارها و زیرمعیارها به مکان‌یابی بنادر خشک پرداختند. طبق بررسی‌های انجام شده در این پژوهش، حداقل کردن هزینه‌های راه‌اندازی و هزینه‌های لجستیکی، معیار اصلی در انتخاب مکان بنادر خشک است. مطالعه موردی این پژوهش در ویتنام است.

با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه مکان‌یابی هاب و ماهیت بندر خشک، همان‌طور که مشاهده می‌شود کمتر به موضوع بنادر خشک با رویکرد شبکه و مکان‌یابی توجه شده است. لذا در ادامه در این تحقیق به ارائه مدل ریاضی از مکان‌یابی هاب بنادر خشک پرداخته خواهد شد.

۲- توصیف مسئله و مدل‌سازی

در این بخش به ارائه مدلی از مکان‌یابی هاب بنادر خشک با در نظر گرفتن امکان جریان مستقیم از مبدأ به مقصد پرداخته خواهد شد. در این پژوهش با توجه به ماهیت موضوع که مکان‌یابی بنادر خشک می‌باشد، نیاز به این فرض وجود دارد که در شرایطی خاص که زمان حمل‌ونقل اهمیت ویژه‌ای دارد ازجمله زمان حمل‌ونقل کالاهای فسادپذیر، امکان جریان مستقیم از مبدأ به مقصد بدون گذر از هاب‌ها یا همان بنادر خشک وجود داشته باشد.



در این حالت در بیشتر موقعیت‌ها موجب افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل خواهد شد اما زمان حمل را کاهش می‌دهد. شکل (۱) حالتی را از شبکه هاب نشان می‌دهد که امکان برقراری ارتباط مستقیم از مبدأ به مقصد برقرار است.

شکل (۱): نمونه‌ای از شبکه هاب با امکان اتصال مستقیم

۲-۱- فرضیات مدل پیشنهادی

- امکان جریان مستقیم از مبدأ به مقصد بدون عبور از بنادر خشک برای کاهش زمان در مواقع نیاز وجود دارد.

- هر محموله برای جابه‌جایی درصدی از مسیر ریلی و جاده‌ای را اشغال می‌کند. بدین‌صورت که چند محموله به‌طور هم‌زمان می‌توانند از یک مسیر مشخص جابه‌جا شوند.

۲-۲ - مجموعه‌ها و اندیس‌های مدل

N : مجموعه نقاط $1, \dots, N$

I : مجموعه نقاط مبدأ $I, (I \in N) i = 1$

J : مجموعه نقاط مقصد $J, (J \in N) j = 1 \dots$

K, L : مجموعه نقاط بالقوه هاب‌های اول و دوم $(K, L \in N)$

m: مجموعه مسیرهای مختلف حمل بار ($m=1$ خطوط ریلی $m=2$ خطوط جاده‌ای)

۲-۳- پارامترهای مدل

P : تعداد بنادر خشک (هاب)

t_{ik}^m : زمان عزیمت از نقطه i به k با استفاده از حمل‌ونقل ریلی / جاده‌ای

T: حداکثر زمان مجاز برای حمل کالا از مبدأ به مقصد.

F هزینه به ازای هرروز دیرکرد از حداکثر زمان مجاز در تحویل کالا

q^m : هزینه ثابت حمل‌ونقل در صورت گذر از حداقل یک هاب در خطوط ریلی / جاده‌ای به ازای هر کیلومتر

q'^m : هزینه ثابت حمل‌ونقل به‌صورت ارتباط مستقیم بین مبدأ و مقصد در خطوط ریلی / جاده‌ای به ازای هر کیلومتر

d_{ik}^m : فاصله ریلی/ جاده‌ای بین دو نقطه iوk (کیلومتر)

W_{ij} : میزان جریان بار بین مبدأ i و مقصد j (تن)

B : حداکثر بودجه

: حداکثر ظرفیت مسیر ریلی / جاده‌ای

$$\gamma^m = \min\{\gamma_{ik}^m, \gamma_{kl}^m, \gamma_{lj}^m\} \gamma^m$$

α: ضریب تخفیف مسیر هاب به هاب

۲-۴- متغیرهای تصمیم مدل

Z_{ik} : متغیر باینری که در صورتی مقدار یک می‌گیرد که نقطه i به هاب k تخصیص یابد.

X_{ijkl}^{m} : متغیر باینری که در صورتی مقدار یک می‌گیرد که برای جریان از i به j از طریق مسیر ریلی / جاده‌ای ، از هاب k و l استفاده شود.

$U1_{ijkl}^{m}$: متغیر پیوسته که مقدار جریان عبوری از مبدأ i به مقصد j توسط هاب‌های k و l از طریق مسیر ریلی / جاده‌ای را نشان می‌دهد.

$U2_{ij}^{m}$: متغیر پیوسته که مقدار جریان عبوری از مبدأ i به مقصد j بدون عبور از هاب از طریق مسیر ریلی / جاده‌ای را نشان می‌دهد.

Y_{ij}^{m} : متغیر باینری که در صورتی مقدار یک می‌گیرد که جریان مستقیم از مبدأ i به مقصد j از طریق مسیر ریلی/جاده‌ای وجود داشته باشد.

$$\boldsymbol{Min\ Z} = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m x_{ijkl}^{m}\left(c_{ik}^{m} + c_{kl}^{m} + c_{lj}^{m}\right) + \sum_i \sum_j Y_{ij}^{m}\left(c_{ij}^{m}\right) + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m U1_{ijkl}^{m} * q^{m}\left(d_{ik}^{m} + \alpha * d_{kl}^{m} + d_{lj}^{m}\right) + \sum_i \sum_j \sum_m (U2_{ij}^{m} * q'^{m} * d_{ij}^{m}) - Min\{0, (T - (\sum_k \sum_l (t_{ik}^{m} + t_{kk}^{m} + t_{kl}^{m} + t_{ll}^{m} + t_{lj}^{m}) * x_{ijkl}^{m})) * F\} - Min\{0, (T - ((t_{ij}^{m}) * Y_{ij}^{m})) * F\} \quad (۱)$$

$$\boldsymbol{s.t.}$$

$$Z_{ik} \le Z_{kk} \quad \forall\, i,k \quad (۲)$$

$$\sum_k Z_{kk} = P \quad (۳)$$

$$\sum_l x_{ijkl}^{m} \le Z_{ik} \quad \forall\, i,j,k,m \quad (٤)$$

$$\sum_k x_{ijkl}^{m} \le Z_{jl} \quad \forall\, i,j,l,m \quad (٥)$$

$$\sum_k \sum_l x_{ijkl}^{m} + Y_{ij}^{m} = 1 \quad \forall\, i,j,m \quad (٦)$$

$$U1_{ijkl}^{m} \le \gamma^{m} * x_{ijkl}^{m} \quad \forall i,j,k,l,m \quad (٧)$$

$$U2_{ij}^{m} \le \gamma^{m} Y_{ij}^{m} \quad \forall\, i,j,m \quad (٨)$$

$$\sum_k \sum_l \sum_m U1_{ijkl}^{m} + \sum_m U2_{ij}^{m} = W_{ij} \quad \forall i,j \quad (٩)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m x_{ijkl}^{m}\left(c_{ik}^{m} + c_{kl}^{m} + c_{lj}^{m}\right) + \sum_i \sum_j \sum_m Y_{ij}^{m}\left(c_{ij}^{m}\right) \le B \quad (۱۰)$$

$$U1_{ijkl}^{m}, U2_{ij}^{m} \ge 0 \quad (۱۱)$$

$$Z_{ik}, x_{ijkl}^{m}, Y_{ij}^{m} \in \{0,1\} \quad (۱۲)$$

معادله (۱) نشان‌دهنده تابع هدف است که با هدف حداقل سازی مجموع هزینه‌های احداث و نگهداری مسیرهای ریلی و جاده‌ای و هزینه‌های مربوط به حمل‌ونقل کالا است. دو عبارت آخرکه غیرخطی است بیانگر حداقل کردن هزینه‌های مربوط به تخطی از زمان استاندارد حمل کالا می‌باشد. محدودیت(۲) بیانگر آن است که در صورتی می‌توان از نقطه i به هاب واقعی k ارتباط برقرار کرد که هاب واقعی k احداث شده باشد. محدودیت (۳) به‌صورت برون‌زا تعداد هاب‌ها را مشخص می‌کند. محدودیت (۴) و (۵) تضمین می‌کنند همه مسیرها از نقاط آغازی به نقاط پایانی از طریق هاب‌ها زمانی ایجاد می‌شود که از نقاط غیر هاب به هاب تخصیص ایجاد شده باشد. محدودیت (۶) بیان می‌کند به ازای هر نقطه آغازی و پایانی و به ازای هر روش حمل‌ونقلی، از یک کدام از مسیرهای دارای هاب یا مسیرهای مستقیم از مبدأ به مقصد، استفاده شود. محدودیت (۷) تضمین می‌کند مقدار جریان عبوری از مسیر هاب‌ها از مقدار ظرفیت مسیرها تخطی نکند. محدودیت (۸) همانند محدودیت قبلی تضمین عدم‌تخطی از ظرفیت مسیرهایی که نقاط مبدأ را مستقیماً به نقاط مقصد متصل می‌کنند، است. محدودیت (۹) بیان می‌کند که مجموع جریان‌هایی که از مسیرهای دارای هاب و مسیرهای مستقیم می‌گذرد برابر با کل تقاضا است. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند حداکثر هزینه احداث و نگهداری مسیرهای ریلی/ جاده‌ای از مقدار بودجه مشخص تخطی نکند.

وجود دو عبارت غیرخطی در تابع هدف موجب غیرخطی شدن مدل شده است، لذا با اضافه کردن محدودیت و متغیرهای زیر به مدل، مدل به صورت زیرخطی می‌شود:

$$S = Min\{0, (T - (\sum_k \sum_l (t_{ik}^{m} + t_{kk}^{m} + t_{kl}^{m} + t_{ll}^{m} + t_{lj}^{m}) * x_{ijkl}^{m})) * F\} \quad \forall\, i,j,m \quad (۱۳)$$

$$S' = Min\{(t_{ij}^{m}) * Y_{ij}^{m})) * F\} \quad \forall\, i,j,m \quad (۱٤)$$

$$Min\ Z = S + S' \quad (۱۵)$$

$$\boldsymbol{s.t.}$$

$$S \le (T - (\sum_k \sum_l (t_{ik}^m + t_{kk}^m + t_{kl}^m + t_{ll}^m + t_{lj}^m) * x_{ijkl}^m)) * F \quad \forall i,j,m \quad (۱۶)$$

$$S' \le \left(T - \left((t_{ij}^m) * Y_{ij}^m\right)\right) * F \quad \forall i,j,m \quad (۱۷)$$

$$S, S' \le 0 \quad (۱۸)$$

۳- بررسی و محاسبات عددی

برای آزمودن این مدل که یک برنامه‌ریزی خطی است، از نرم‌افزار گمز با حل‌کننده سیپلکس استفاده‌شده است. رایانه مورداستفاده دارای مشخصات پردازنده‌ی Intel® Core™i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.50GHz و ۶ گیگابایت رم اجرایی با سیستم‌عامل ویندوز ۷ است. برای حل این مسئله در سه سایز ۱۰،۲۰ و ۳۰ نقطه با تعداد هاب‌های مختلف مدل ریاضی در گمز اجرا شده است. در جدول زیر برخی از نتایج مربوط به اجرای مدل ریاضی در گمز آورده شده است:

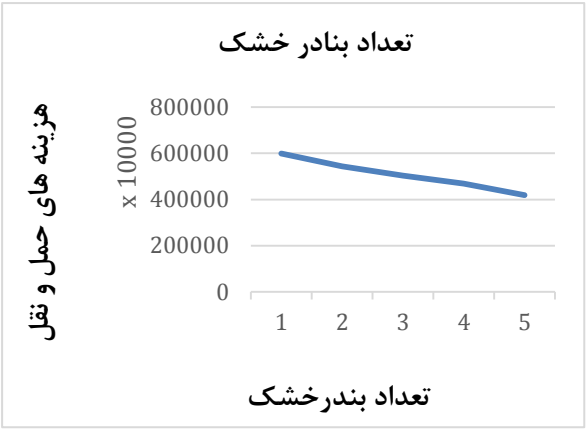
جدول (۱): نتایج حل مدل ریاضی

آزمایش	تعداد کل نقاط	تعداد نقاط کاندید هاب	مقدار تابع هدف	زمان حل سیپلکس در گمز(ثانیه)
۱	۱۰	۲	۲۶۱۵۴۷۵.۱۲	۱۳.۲۵
۲	۱۰	۳	۲۵۰۲۴۳۶.۲۸	۱۶.۶۵
۳	۱۰	۴	۲۴۰۴۲۱۴.۳۲	۱۴.۷۵
۴	۲۰	۴	۴۸۱۵۰۲۴۵۳۱۲.۲۴	۳۶۰.۳۵
۵	۲۰	۵	۴۵۶۷۳۵۴۱۲۶۸.۳۷	۳۷۷.۳۵
۶	۲۰	۶	۴۰۵۶۳۲۴۵۹۸۱.۸۵	۳۸۴.۳۶
۷	۳۰	۶	۵۲۱۵۵۳۶۵۴۱۲۵.۳۷	۱۳۰۵.۲۵
۸	۳۰	۷	۳۹۳۵۴۵۶۳۲۷۸۹.۲۵	۱۲۲۰.۵۷
۹	۳۰	۸	۱۰۵۱۳۶۷۸۴۱۲۶.۷۴	۱۳۶۰.۷۴

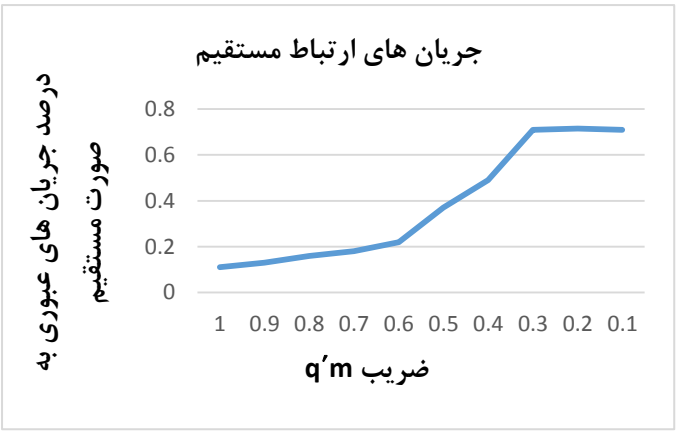
۴- تحلیل حساسیت

۴-۱- تحلیل حساسیت تعداد هاب‌ها (بنادر خشک)

به‌منظور بررسی حساسیت تابع هدف نسبت به تغییر تعداد بنادر خشک، تعداد هاب‌ها در بازه (۱،۵) تغییر داده‌شده است تا تغییرات تابع هدف که شامل هزینه احداث و نگهداری خطوط ریلی و جاده‌ای است، موردبررسی قرار گیرد. با افزایش تعداد بنادر خشک، هزینه احداث و نگهداری خطوط ریلی و جاده‌ای کاهش می‌یابد. این موضوع کاملاً واضح است که با احداث تعداد بیشتری بندر خشک و به‌طورکلی مراکز لجستیکی، اگرچه در کوتاه‌مدت هزینه‌های دولت به دلیل احداث بنادر خشک بالا می‌رود، اما درمجموع این موضوع موجب کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل خواهد شد. یکی از دلایل این موضوع، کاهش مسافت بین بنادر خشک است. در شکل (۲) این موضوع به‌خوبی قابل‌رؤیت است. بدیهی است که دولت به‌عنوان یک نهاد قانون‌گذار نقش مؤثری در ایجاد و ساماندهی بنادر خشک خواهد داشت.



شکل (۲): تعداد بنادر خشک



شکل (۳): تغییر هزینه حمل‌ونقل در جریان‌های مستقیم

۴-۲- تحلیل حساسیت تغییر هزینه حمل‌ونقل در جریان‌های مستقیم

در این قسمت با تغییرات ضریب هزینه حمل‌ونقل به‌صورت اتصال مستقیم از مبدأ به مقصد، تغییرات مقدار جریان عبوری به‌صورت اتصال مستقیم بررسی خواهد شد. ازآنجایی‌که هر دو نوع حمل‌ونقل یعنی حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای همزمان مدنظر است، لذا با تغییر ضریب این پارامتر، هر دو لحاظ می‌شود. تغییرات در ضریب هزینه q'_m در بازه (۰.۱،۱) بررسی شده است.

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، با کاهش ضریب هزینه در حمل‌ونقل به‌صورت مستقیم، مقدار حجم عبوری جریان از مسیرهای مستقیم افزایش پیدا می‌کند. طبیعتاً بخش خصوصی به دلیل کاهش زمان حمل‌ونقل، خواهان عبور همه جریان‌های خود از طریق مسیر مستقیم است. لذا اگر هزینه نیز از این طریق کم شود حجم بالایی از جریان را به‌صورت مستقیم عبور خواهد داد. در نمودار شکل (۳) این موضوع به‌صورت بهتری قابل‌مشاهده است.

۵- نتیجه و جمع‌بندی

در این تحقیق مدل ریاضی از مکان‌یابی هاب بنادر خشک ارائه شد. به جهت نزدیکی بیشتر با واقعیت امکان اتصال مستقیم از مبدأ به مقصد در مدل ریاضی لحاظ گردید. مدل ریاضی با استفاده از سیپلکس در سایزهای مختلف حل گردید و نشان داده شد در سایزهای بالا زمان حل به‌صورت محسوسی بالا می‌رود که نیاز به الگوریتم قوی‌تری در سایزهای بالاتر می‌باشد. درنهایت با تحلیل حساسیت بر روی تعداد بنادر خشک، لزوم ایجاد بنادر خشک مشخص گردید. در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد مبحث عدم قطعیت بر روی پارامترهایی ازجمله تقاضا و همچنین در نظر گرفتن چند دوره زمانی به‌منظور نزدیک‌تر شدن هر چه بیشتر مدل به واقعیت لحاظ گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود در نظر گرفتن زمان انتظار در بنادر خشک و هزینه‌های تخلیه و بارگیری در بنادر خشک، به جهت هرچه بیشتر نزدیک‌تر شدن به واقعیت لحاظ گردد.

۶- منابع و مآخذ

[۱] درودیان محدثه، پیشوایی میرسامان، فرهنگ مقدم بابک" ***مکان‌یابی بندر خشک با رویکرد مکان‌یابی محورها در شرایط عدم قطعیت تقاضا: مطالعه موردی ایران***" پژوهشنامه حمل‌ونقل، شماره ۵۲، پاییز ۱۳۹۶

[2] S. L. Hakimi, (1964) "***Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph***." Journal of Operations Research 12(3):450-459.

[3] O'Kelly M. E. (1986). ***The location of interacting hub facilities.*** Transportation Science, 20, 92–106.

[4] Karimi B, Bashiri M, Nikzad E. (2018). "***Multi-commodity Multimodal Splittable Logistics Hub Location Problem with Stochastic Demands***" International Journal of Engineering.

[5] Alumur S.A, Kara B.Y, Karasan O.C. (2012). "***Multimodal hub location and hub network design***" Journal of Omega 40(2012)927–939.

[6] Ambrosino D, Sciomachen A. (2016). "***A capacitated hub location problem in freight logistics multimodal networks***" Journal of Optimization Letters 10: 875

[7] Gelareh Sh, Nickel S. (2011). "***Hub location problems in transportation networks***" Jornal of Transportation Research Part E 47 (2011) 1092–1111.

[8] Ishfaq R, R.Sox Ch, (2010)"***Intermodal logistics: The interplay of financial, operational and service issues***" Journal of Transportation Research Part E 46 9

[9] Zanjirani Farahani R, Hekmatfar M, Blooru Arabani A, Nikbakhsh E. (2013)." ***Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications***" Journal of Computers & Industrial Engineering 64 -1096–1109.

[10] Ambrosino D, Sciomachen A. (2014) "***Location of mid-range dry ports in multimodal logistic networks***" Procedia - Social and Behavioral Sciences 108 118 – 128

[11] 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

[12] Abbasi M, Pishvaee MS. (2018). "***A two-stage GIS-based optimization model for the dry port location problem: A case study of Iran***" Journal of Industrial and Systems Engineering Vol. 11, No. 1, pp. 50-73

[13] Guan X, Wang X, Wang C, Yan Y. (2009). "***Study on Logistics Center Location Bi-Level Programming Model and Algorithm Based on Competition***" Journal of Transportation Systems Planning, Development and Management

[14] Hua X, Hu X, Yuan W. (2016). "***Research optimization on logistics distribution center location based on adaptive particle swarm algorithm***" Journal of optic

[15] Yang L, Ji X, Gao Z, Li K. (2007). "***Logistics distribution centers location problem and algorithm under fuzzy environment***" Journal of Computational and Applied Mathematics 208 303 – 315

[16] Komchornrit K. (2017). "***The Selection of Dry Port Location by a Hybrid CFA-MACBETH-PROMETHEE Method: A Case Study of Southern Thailand***" The Asian Journal of Shipping and Logistics 33(3) 141-153

[17] NGUYEN LC, NOTTEBOOM T. (2016). "***A Multi-Criteria Approach to Dry Port Location in Developing Economies with Application to Vietnam***" The Asian Journal of Shipping and Logistics 32(1) 023-032