

## مدل ترکیبی مکان‌یابی بنادر خشک و تحلیل پوششی داده‌ها در شبکه‌های

### حمل ترکیبی کالا

سید سینا مهری<sup>\*</sup>، کارشناس ارشد، دانشکده حمل‌ونقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران  
امیرعباس رصافی، دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ره)</sup>، قزوین، ایران  
حسین حق‌شناس، استادیار، دانشکده حمل‌ونقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران  
<sup>\*</sup>پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ss.mohri@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۰۱ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۲۰

صفحه ۱-۱۸

### چکیده

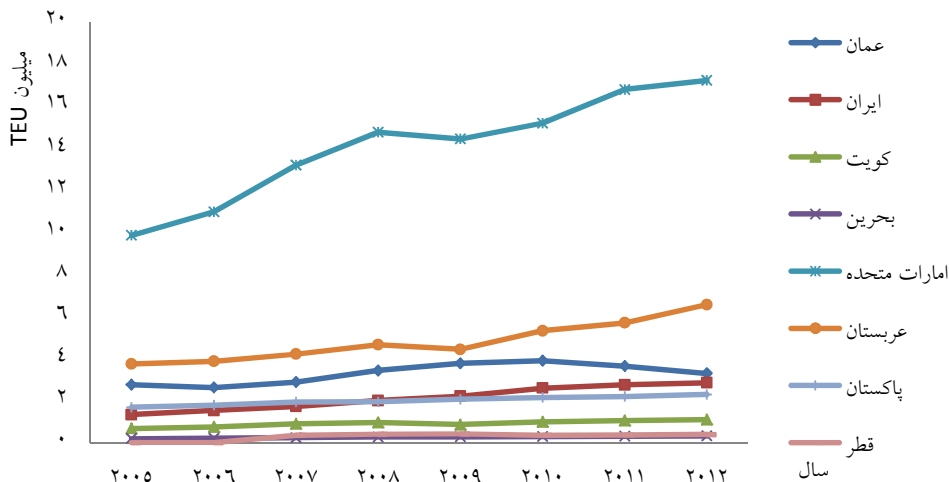
انتقال محموله‌ها از شبکه جاده‌ای به شبکه ریلی موجب کاهش مصرف سوخت، آلودگی هوا و تصادفات جاده‌ای می‌گردد. احداث بنادر خشک سهم بسزایی در توسعه حمل‌ونقل ترکیبی و استفاده از مزایای هر دو سیستم ریلی و جاده‌ای دارد. در این پژوهش مدل جدیدی از مکان‌یابی هاب در ترکیب با روش تحلیل پوششی داده‌ها برای شبکه‌های حمل‌ونقل ترکیبی کالاهای کانتینری (ریلی-جاده‌ای) از نقطه نظر سیستم ریلی ارائه شده است. شاخص‌های در نظر گرفته شده در روش تحلیل پوششی داده‌ها بر اساس خروجی‌های مدل مکان‌یابی هاب همچون مجموع هزینه کل سفرهای شبکه، حجم مسیرهای ریلی، کانتینر کیلومتر ریلی و طول مسیرهای ریلی تعیین گردیده‌اند. مدل پیشنهادی بر روی شبکه حمل کانتینری کالا در ایران پیاده گردید. ۴۰ سناریو مختلف بر اساس تعداد بندر خشک (۲ تا ۵) و درصد تخفیف مسیرهای ریلی (۰٪ تا ۹۰٪) برای مکان‌یابی بندر خشک در ایران بررسی گردید. پیاده‌سازی مدل تحلیل پوششی داده‌ها بر نتایج سناریوهای مکان‌یابی نشان داد، سناریوهای احداث دو بندر خشک و اعمال ۰٪، ۱۰٪ و ۳۰٪ تخفیف در مسیرهای ریلی، سناریوهای کارا در شبکه ایران می‌باشند. مقایسه کیفی امکانات موجود در بندر خشک پیشنهادی در این سه سناریو برتر، نشان داد احداث دو بندر خشک در شهرستانهای سیرجان و تهران و اعمال تخفیف ۱۰ درصد در تعرفه مسیرهای ریلی مطلوب‌ترین سناریو می‌باشد. در این سناریو کانتینر کیلومتر ریلی پیموده شده در شبکه ریلی برابر ۷۱۶ میلیون TEU-KM و طول مسیرهای ریلی استفاده شده برابر ۳۷۳۱ کیلومتر و متشکل از سه محور بندرعباس- سیرجان، سیرجان- تهران و تهران- بندرماهشهر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: بندر خشک، مکان‌یابی هاب، تحلیل پوششی داده‌ها، حمل‌ونقل کانتینری

### ۱- مقدمه

همچنین حمل کالاهای کانتینری در فاصله داخل کشور مواجه است. از منظر تولید و جذب کالاهای کانتینری، کشور ایران عملکرد مناسبی را در فاصله سالهای ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۲ نسبت به سایر کشورهای حوزه خلیج فارس نداشته است. شکل ۱ روند تغییرات مبادلات کانتینری در بنادر کشورهای حوزه خلیج فارس را در فاصله سالهای ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۲ نشان می‌دهد [UNCTAD, 2011].

مدت‌ها است مشکلات حمل‌ونقل چندوجهی را کشورهای مختلف از سد راه برداشته‌اند و با حمایت از کنوانسیون حمل‌ونقل چندوجهی سازمان ملل، مقررات جدید حمل‌ونقل چندوجهی را از ژانویه سال ۱۹۹۲ مورد اجرا گذاشته‌اند. حمل کالاهای به صورت کانتینری، متداول‌ترین شیوه حمل‌ونقل چندوجهی می‌باشد. حمل‌ونقل ترکیبی در ایران با مشکلات فراوانی در تولید و جذب کالاهای کانتینری و



شکل ۱. مقایسه حجم مبادلات کانتینری در حوزه خلیج فارس در فاصله سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۲

کانتینرهای وارداتی در بندر و ادامه حمل آن به صورت غیرکانتینری و ارسال کالاهای صادراتی به صورت غیرکانتینری به بندر کشور به دلیل عدم موجودی کانتینر خالی در نقاط داخلی کشور به عنوان مهمترین دلایل این مغایرت در اطلاعات ذکر گردیده است [مهری و حق شناس، ۱۳۹۴]. جدول ۱ جزئیات تناژ وارداتی و صادراتی کالاهای کانتینری از/ به بندر کشور را بر اساس گزارشات اداره بندر و کشتیرانی و سازمانهای راهداری و راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران را نشان می‌دهد.

در کنار عملکرد ثابت کشور ایران در تولید و جذب کالاهای کانتینری، حمل کانتینری این کالاها در فاصله داخلی کشور (فاصله میان بندر تا نقاط داخلی سرزمین) نیز از وضعیت نامطلوبی برخوردار است. مهری و حق شناس در سال ۱۳۹۴ با تحلیل اطلاعات سازمان راهداری، راه آهن و اداره بندر و کشتیرانی در سال ۱۳۹۲ نشان دادند که اختلاف زیادی مابین تناژ کانتینرهای حمل شده به سمت بندر کشور با آمار صادرات کانتینری از بندر و همچنین تناژ کالاهای کانتینری حمل شده از بندر با آمار واردات کانتینری به بندر کشور وجود دارد. در این پژوهش دلایلی همچون استریپ

جدول ۱. مقایسه اطلاعات حمل کانتینر به/ از بندر در سیستم ریلی و جاده‌ای با اطلاعات اداره بندر و کشتیرانی

سال	دسته حمل	مجموع تناژ حمل جاده ای و ریلی کانتینر به/ از بندر (میلیون تن)	تناژ گزارش شده توسط بندر (میلیون تن)	سهم حمل کانتینری
۱۳۹۲	واردات	۲.۷	۱۱.۵	۲۳٪
۱۳۹۲	صادرات	۱.۵	۷.۷	۱۹٪

کانتینرها در آنجا می‌باشد. رسوب کانتینرها در بندر آبی مشکلات متعددی از جمله: کاهش ظرفیت فضای انبار بندر، افزایش زمان سرویس دهی، افزایش هزینه‌های مشتریان، ایجاد ترافیک در پسرکرانه بندر، افزایش آمار تصادفات و افزایش هزینه‌های بندر را به همراه دارد [Roso, Woxenius and Lumsden, 2009]. احداث بندر خشک و اتصال مستقیم آن با بندر آبی، نه تنها باعث حل مشکل رسوب کانتینرها خواهد شد، بلکه منجر به افزایش حمل و نقل ترکیبی و افزایش موجودی کانتینرها در نقاط داخلی کشور می‌گردد

مهری و حق شناس ۲۰۱۷ با استفاده از روش درخت تصمیم به شناسایی مهمترین دلایل حمل غیرکانتینری کالاها در فاصله داخلی کشور پرداختند. در این پژوهش ناتوانی سیستم حمل ترکیبی کالا در داخل کشور به عنوان عامل اصلی کاهش تناژ حمل کانتینری کالاها در فاصله داخلی کشور معرفی شده و راهکار ایجاد بندر خشک به عنوان یکی از موثرترین راهکارهای حل این مشکل معرفی گردیده است [Mohri and Haghshenas, 2017]. یکی از مهمترین مشکلات موجود در بندر آبی، موضوع رسوب

می‌باشد. با استفاده از رویکرد شبکه‌ای، بنادر خشک را می‌توان به عنوان گره‌های هاب در شبکه معرفی نمود که وظیفه جمع‌آوری<sup>۱</sup> و توزیع<sup>۲</sup> کالاها در داخل کشور را برعهده داشته باشند. مدل‌های ریاضی مکان‌یابی بنادر خشک متعلق به شاخه مهمی از مسائل مکان‌یابی امکانات<sup>۳</sup> به نام مسائل مکان‌یابی هاب<sup>۴</sup> می‌باشند [Hekmatfar and Pishvaei, 2009]. مسائل مکان‌یابی هاب به طور همزمان به مکان‌یابی موقعیت هاب<sup>۵</sup> و تخصیص تقاضای موجود در شبکه به گره‌های هاب<sup>۶</sup> می‌پردازد. در یک تقسیم‌بندی بر اساس تفاوت‌های ساختاری و عملکردی در مدل‌های مکان‌یابی هاب بخصوص در عملکرد تابع هدف، مدل‌های مکان‌یابی هاب در پنج شاخه‌ی مسئله مکان‌یابی میانه<sup>۷</sup>، مسئله مکان‌یابی مرکز<sup>۸</sup>، مسئله مکان‌یابی پوششی<sup>۹</sup>، مسئله مکان‌یابی چندهدفه<sup>۱۰</sup> و مسئله مکان‌یابی پیوسته<sup>۱۱</sup> قرار می‌گیرند [Farahani (et al.), 2013]. مسائل مکان‌یابی میانه دارای تفاوت‌های زیادی با یکدیگر می‌باشند که در جدول ۲ به تعدادی از آنها اشاره شده‌است.

[Xie (et al.), 2017]. راهکار ایجاد بنادر خشک ابتدا توسط اسلک ۱۹۹۹، ون کلیک و ون دربرگ ۱۹۹۸ و نوتبام ۲۰۰۲ مطرح گردید [Slack, 1999; Notteboom, 1998; Van Klink and Van Den Berg, 2002]. پس از آن پژوهشگران تعاریف و دسته‌بندی‌های مختلفی برای بنادر خشک ارائه نمودند [Jarzemskis and Vasiliauskas, 2007; Roso, Woxenius and Lumsden, 2009; Roso and Lumsden, 2010; Cullinane and Wilmsmeier, 2011; Veenstra, Zuidwijk and Van Asperen, 2012]. به طور کلی بنادر خشک در پسرکرانه بنادر ساحلی به عنوان پایانه ترکیبی جهت اتصال مدهای مختلف به یکدیگر عمل کرده و به صورت مستقیم توسط یک گونه حمل و نقلی با ظرفیت بالا (راه آهن) به یک یا چند بندر ساحلی متصل است [Leveque and Roso, 2002]. همچنین بنادر خشک بر اساس فاصله از دریا و عملکرد آنها به سه دسته بنادر خشک با فاصله نزدیک از دریا، متوسط و دور تقسیم بندی می‌شوند [Roso, Woxenius and Lumsden, 2009].

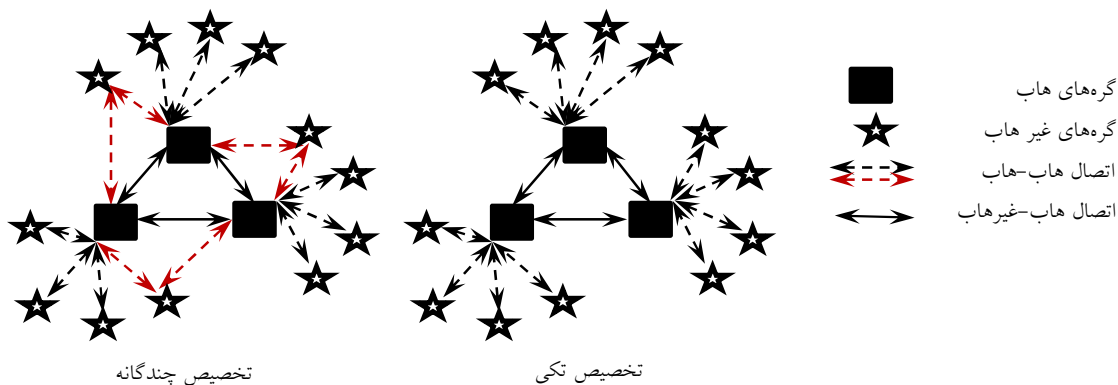
یکی از مسائل استراتژیک در استقرار بنادر خشک، شناسایی تعداد و مکان بهینه احداث آنها در شبکه‌های حمل‌کالا

جدول ۲. مهمترین تفاوت‌های مدل‌های مکان‌یابی هاب میانه

عنوان	زیرشاخه‌ها
فضای حل مسئله	گسسته-پیوسته
تابع هدف	MiniMax- MiniSum- Multi-objective
تعداد هاب مورد نیاز	مشخص - نامشخص
تعداد هاب	یک - بیش از یک
ظرفیت هاب	محدود - نامحدود
هزینه ساخت هاب	بدون هزینه - هزینه ثابت - هزینه متغیر
اتصال گره‌ها به هاب	تنها به یک هاب <sup>۱۲</sup> - اتصال به بیش از یک هاب <sup>۱۳</sup>
هزینه اتصال گره‌ها به یکدیگر و به هاب	بدون هزینه - هزینه ثابت - هزینه متغیر

هاب میانه<sup>۱۴</sup> دسته‌بندی می‌شود. مسئله تخصیص p-هاب میانه خود به دو مسئله تخصیص تکی و تخصیص چندگانه تقسیم می‌گردد [Campbell, 1994]. در مسئله تخصیص تکی p-هاب میانه<sup>۱۵</sup> هر گره غیر هاب تنها اجازه اتصال به یک هاب را دارد اما در تخصیص چندگانه<sup>۱۶</sup> گره‌های غیرهاب می‌توانند به چندهاب متصل باشند. شکل زیر تفاوت میان تخصیص تکی و چندگانه را در یک شبکه دارای سه هاب نشان می‌دهد.

مدل اولیه مکان‌یابی هاب میانه ابتدا توسط اکلای در سال ۱۹۷۸ مطرح گردید. تابع هدف این مسئله به صورت غیرخطی بوده و به نام رویکرد مدلسازی کمائی<sup>۱۷</sup> شناخته می‌شود [O'Kelly, 1987]. کمبل در سال ۱۹۹۴ سه مدل ریاضی جدید برای مسائل مکان‌یابی هاب میانه، مکان‌یابی هاب مرکزی و مکان‌یابی هاب پوششی ارائه کرد. این مدل‌ها دارای یک تابع هدف خطی بوده و به نام رویکرد مسیری<sup>۱۸</sup> شناخته می‌شوند. مدل ریاضی مکان‌یابی هاب میانه در پژوهش کمبل ۱۹۹۴ در گروه مسائل تخصیص چندگانه p-



شکل ۲. تفاوت میان تخصیص تکي و چندگانه را در یک شبکه دارای سه هاب

حمل و نقل هوایی<sup>۲۱</sup> [Aykin, 1995]، حمل و نقل چندوجهی<sup>۲۲</sup> [Vidovic (et al.), 2011]، ارتباطات<sup>۲۳</sup> [Kim and O’Kelly, 2009] و تحویل بار<sup>۲۴</sup> [Vasconcelos (et al.), 2011] گسترش پیدا کرده است. پژوهش حاضر به دسته پژوهش‌های مربوط به مکان‌یابی هاب در شبکه‌های حمل کالا به ویژه شبکه‌های حمل و نقل چندوجهی تعلق دارد. در ادامه مهمترین پژوهش‌های انجام شده در مکان‌یابی هاب برای شبکه‌های حمل و نقلی کالا به ویژه شبکه‌های چندوجهی حمل کالا ارائه گردیده است.

سیمیک در سال ۲۰۰۰ مسئله مکان‌یابی هاب را بر روی ۲۸ گره جذب و تولید کالاهای ریلی در راه‌آهن سراسری اروپا پیاده نمود. در این مطالعه هزینه‌های حمل وابسته به حجم تردد کالاها بوده و هدف مسئله حداقل نمودن مجموع هزینه‌های حمل کالا در شبکه می‌باشد [SIMIQ, 2000]. راکونیکا و وینتر در سال ۲۰۰۵ مدلی جهت مکان‌یابی گره‌های هاب در یک شبکه ریلی ارائه نمودند که ویژگی‌های حمل ترکیبی کالا نیز در این مدل آورده شده است. در این پژوهش یک سرویس ارزان، سریع و قابل اطمینان برای اتصال گره‌های هاب به یکدیگر در نظر گرفته شده است. نتایج مدل نشان می‌دهد پیاده سازی چنین سیستمی هزینه‌های پرسنل و فرکانس سرویس را کاهش خواهد داد [Racunicam and Wynter, 2005]. جنگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ به مکان‌یابی هاب در شبکه‌های ترکیبی پرداختند. مطالعه موردی این پژوهش بر روی شبکه ریلی ۱۰ کشور اروپایی با ۴۸ گره جذب و تولید انجام شده است. هدف این پژوهش ارائه بهترین ترکیب از موقعیت هاب، مسیرهای حرکت انواع قطارها، فرکانس حرکت انواع قطارها و تناژ

در بسیاری از شرایط، مطلوب است که گره‌های غیرهاب تنها به یک گره هاب متصل گردند. سورین کاپو و همکاران ۱۹۹۶ چند محدودیت مدل تخصیص تکي را با محدودیت‌های ساده تری جایگزین کردند. متغیرهای تصمیم مدل‌های خطی ارائه شده تا آن زمان از درجه ۱۹۴ برخوردار بودند [Skorin-Kapov, D., Skorin-Kapov, J. and O’Kelly, 1996]. ارنست و کیریشنامورثی ۱۹۹۹ مدل خطی جدیدی برای مسئله مکان‌یابی هاب با تخصیص تکي و از درجه سه ارائه نمودند. این مدل، رفتاری شبیه به هر دو مدل کمانی و مسیری معرفی شده در مطالعات گذشته دارد [Ernst and Krishnamoorthy, 1999]. ابری و همکاران ۲۰۰۰ و بلانند و همکاران ۲۰۰۴ مدل ارنست و کیریشنامورثی را برای تخصیص چندگانه توسعه دادند [Ebery (et al.), 2001; Boland (et al.), 2004]. مارین ۲۰۰۵ با ایده گرفتن از پژوهش [Ebery (et al.), 2001] مدل جدیدی برای مکان‌یابی هاب با تخصیص چندگانه ارائه نمود [Marin, 2005]. کمبل و همکاران ۲۰۰۵ مدل جدیدی به نام مکان‌یابی کمانی هاب را برای مسئله تخصیص p-هاب میانه معرفی نمودند. بر اساس این روش به جای انتخاب گره‌های هاب در شبکه، ابتدا کمان‌های هاب انتخاب می‌شوند. در این روش گره‌های دو سر کمان‌های هاب، گره‌های هاب شبکه می‌باشند [Campbell (et al.), 2005]. موازی با گسترش تئوری مدل‌های مکان‌یابی هاب، پژوهش‌های متعددی براساس کاربرد مدل‌های هاب در دنیای واقعی انجام شده است. در سالهای اخیر پژوهشگران توجه زیادی به طراحی شبکه‌های دارای هاب کرده‌اند. پیاده‌سازی شبکه‌های دارای هاب در زمینه‌های متعدد علمی از جمله

به کمینه‌سازی هزینه‌هایی همچون حمل کالا، بازگشایی و بستن بنادر خشک اختصاص یافته است. نتایج این مدل با در نظر گرفتن عدم قطعیت و تحلیل حساسیت نشان داد، بازگشایی بنادر خشک جدید برای سرویس دهی به کالاهای این بندر سناریوی بهینه‌تر از بستن بنادر خشک موجود می‌باشد [Wang (et al.), 2017].

در پژوهش حاضر مدل جدیدی از مکان‌یابی هاب در ترکیب با روش تحلیل پوششی داده‌ها برای شبکه‌های حمل‌ونقل ترکیبی کالاهای کانتینری (ریلی-جاده‌ای) از نقطه نظر سیستم ریلی ارائه شده است. در پژوهش‌های گذشته گونه‌های مختلف سفر در شبکه‌های چندوجهی از اهمیت یکسانی برخوردار بوده و هدف کاهش هزینه‌های حمل، هزینه‌های احداث هاب و احداث کمانهای جدید بوده است. این در حالی است که انتقال کانتینرها از شبکه جاده‌ای به شبکه ریلی موجب کاهش هزینه‌های غیرمستقیمی همچون کاهش مصرف سوخت، آلودگی هوا و تصادفات جاده‌ای می‌گردد. بنابراین مسئله اصلی پژوهش حاضر شناسایی مناسب‌ترین موقعیت‌ها جهت احداث بنادر خشک در یک شبکه ترکیبی در راستای افزایش منافع سیستم ریلی و سهم حمل ریلی کالاهای کانتینری می‌باشد.

جمع‌آوری اطلاعات دقیقی از هزینه‌های ساخت گره‌های هاب و هزینه‌های ساخت کمان‌های غیرهاب-هاب و هاب-هاب برای شبکه‌ها امری دشوار و همراه با خطا می‌باشد. در این پژوهش بجای حل یک مدل مکان‌یابی هاب با در نظر گرفتن هزینه‌های نامبرده و شناسایی گزینه برتر، از ترکیب یک مدل بدون محدودیت ظرفیت گره‌های هاب و کمانهای شبکه و هزینه‌های احداث آنها در ترکیب با روش تحلیل پوششی داده‌ها استفاده شده است. در این روش سناریوهای متعددی براساس تغییرات تعداد هاب در شبکه (۲ تا ۵) و درصد تخفیف در مسیرهای ریلی (۰٪ تا ۹۰٪) تولید گردیده و در ادامه با استفاده از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها، سناریو برتر انتخاب گردیده است. شاخص‌های در نظر گرفته شده در روش تحلیل پوششی داده‌ها بر اساس خروجی‌های مدل مکان‌یابی هاب همچون مجموع هزینه کل سفرهای شبکه، حجم مسیرهای ریلی، کانتینر کیلومتر ریلی و طول مسیرهای ریلی تعیین گردیده و به صورت غیرمستقیم منعکس کننده هزینه‌های نامبرده می‌باشند.

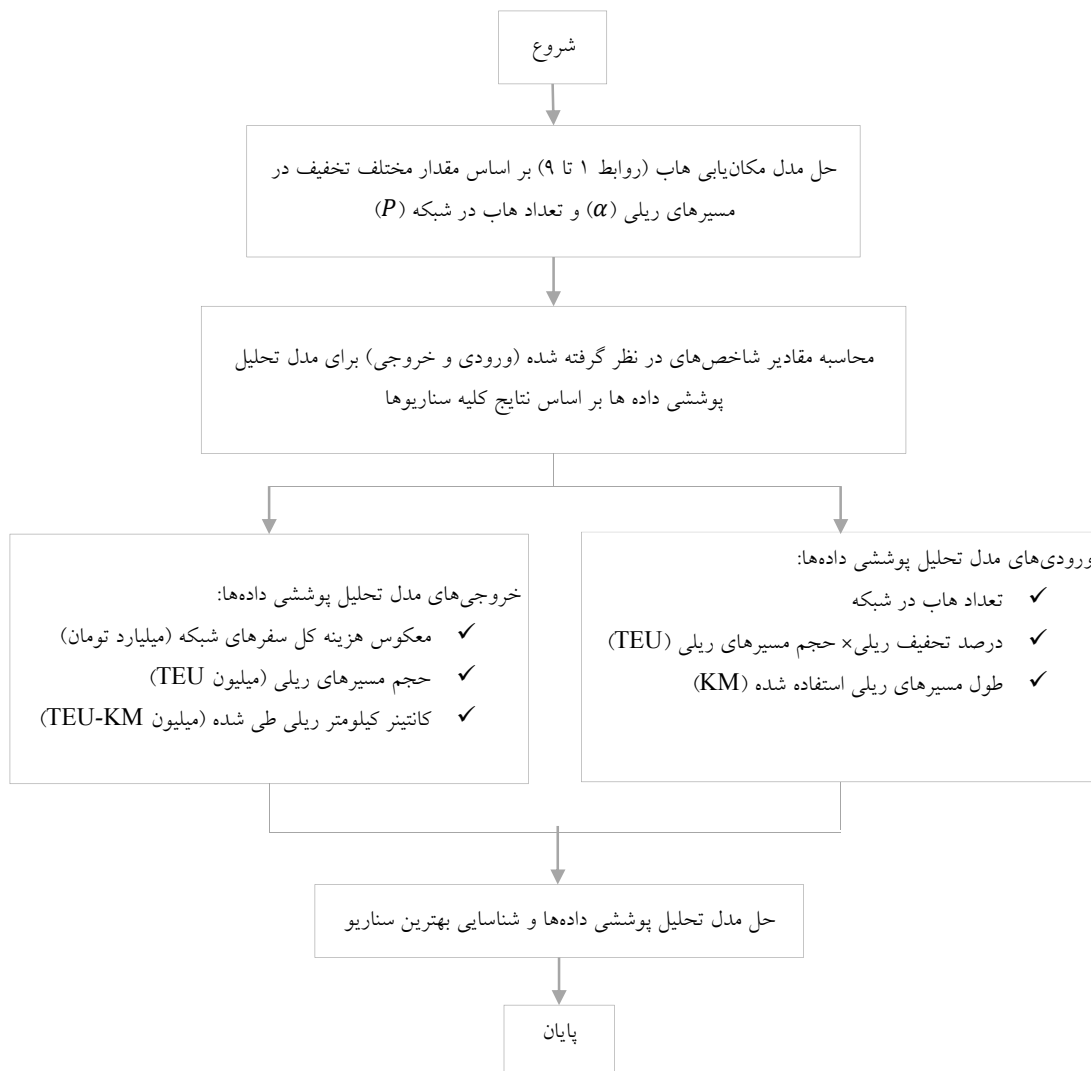
حمل هریک از قطارها بوده است. در این پژوهش هزینه‌های عملکردی قطارهای با ظرفیت مختلف در طول مسیر، هزینه تغییر آرایش واگن‌ها در هاب، هزینه تفکیک قطارها در هاب، هزینه انتظار واگن‌ها در هاب و هزینه سفر انواع قطارها در نظر گرفته شده است [Jeong, Lee, and Bookbinder, 2007].

لیمبرگ و جورکین در سال ۲۰۰۹ بر اساس یک فرآیند تکرارشونده میان مسئله مکان‌یابی هاب و مسئله تخصیص چندگونه‌سفر، به مکان‌یابی تعداد  $p$  هاب بر روی نقاط دارای پتانسیل تشکیل هاب پرداختند [Limboung and Jourquin, 2009]. آشفک و ساکس در سال ۲۰۱۱ به مکان‌یابی هاب در یک شبکه ترکیبی ریل و جاده با هدف حداقل نمودن هزینه‌های حمل و هزینه‌های ثابت (هزینه‌های ساخت هاب، هزینه‌های انتقال کالا از یک گونه سفر به گونه دیگر، باربرداری، بارگیری و ...) مربوط به هاب‌ها پرداخته‌اند. در این پژوهش علاوه بر کمینه نمودن هزینه‌های حمل، زمان سفر مسیرها نیز به مقاداری مطلوب محدود شده است [Ishfaq and Sox, 2011]. آمروسینو و سیموچن در سال ۲۰۱۴ به مکان‌یابی بنادر خشک برای بارهای کانتینری حمل شده در فاصله داخلی کشور پرداخته‌اند. مدل پیشنهادی در این پژوهش تنها اجازه عبور کالا از یک هاب را داده است و انتقال کالا از یک هاب به هاب دیگر میسر نمی‌باشد [Ambrosino and Sciomachen, 2014]. آمروسینو و سیموچن ۲۰۱۶ یک مدل مکان‌یابی چندگانه با در نظر گرفتن ظرفیت گره‌های هاب برای جابه‌های بارهای موجود در بنادر کشور به سمت نقاط داخلی سرزمین و برعکس ارائه کردند. در این پژوهش هدف انتقال بارهای یک مبدأ-مقصد از طریق چند مسیر عبوری از گره‌های هاب و توسط سیستم‌های ریلی، جاده‌ای و ترکیب این دو بوده است. در این پژوهش مکان‌یابی بر اساس وضعیت موجود دو سیستم ریلی و جاده‌ای با توجه به هزینه‌های احداث گره‌های هاب و نامحدود بودن ظرفیت مسیرهای ریلی و جاده‌ای انجام شده است [Ambrosino and Sciomachen, 2016]. وانگ و همکاران ۲۰۱۷ یک مدل مکان‌یابی بندر خشک برای بندر تیانجین ارائه نمودند. در این پژوهش علاوه بر امکان ایجاد بنادر خشک جدید، امکان بستن بنادر خشک موجود نیز در نظر گرفته شده است. تابع هدف مسئله

## ۲- تعریف مسئله و فرمول بندی آن

به منظور مکان‌یابی بندر خشک در یک شبکه ترکیبی ریلی-جاده‌ای و از نگاه سیستم ریلی، مدل جدیدی برپایه مدل ارائه شده در [Campbell, 1994] ارائه شده است. پژوهش‌های گذشته در مکان‌یابی بندر خشک در شبکه‌های ترکیبی، تفاوتی میان سیستم‌های دخیل در شبکه ترکیبی در نظر نگرفته و مدلسازی از نگاه کلیه سیستم‌های موجود در حمل ترکیبی کالا انجام شده است. با توجه به طراحی یک شبکه دارای بندر خشک از نگاه سیستم ریلی و به منظور تعیین حداکثر پتانسیل شبکه ریلی جهت حمل محموله‌ها،

محدودیت‌های ظرفیتی (گره‌های هاب و کمان‌های شبکه) به طور مستقیم در مدل ارائه شده اعمال نگردیده است. مدل ارائه شده بر اساس مقادیر مختلف تخفیف در تعرفه مسیرهای ریلی و تعداد هاب در شبکه حل گردیده و نتایج سناریوهای حاصل با استفاده از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها ارزیابی گردیده‌اند. ترکیب یک مدل مکان‌یابی هاب بدون ظرفیت با روش تحلیل پوششی داده‌ها بر اساس شاخص‌های متعدد اقتصادی منجر به شناسایی کارآمدترین برنامه توسعه‌ای برای سیستم ریلی خواهد شد. شکل ۳ روند انجام مدل‌سازی در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۳. چارچوب انتخاب بهترین مکان جهت احداث بندر خشک از نگاه سیستم ریلی

اطلاعات تقاضا و ماتریس هزینه سفر می‌باشد.

$$\text{Min} \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m C_{ij}^{km} h_{ij} z_{ij}^{km}$$

St:

$$\sum_k X_k = P \quad (2)$$

$$\sum_k \sum_m z_{ij}^{km} = 1 \quad \forall i, j \in P_{all} \quad (3)$$

$$C_{ij}^{km} = C_{ik} + \alpha C_{km} + C_{mj} \quad \forall i, j, k, m \in P_{all} \quad (4)$$

$$z_{ij}^{km} \leq X_m \text{ and } z_{ij}^{km} \leq X_k \quad \forall i, j, k, m \in P_{all} \quad (5)$$

$$z_{ij}^{km} \geq 0 \text{ and } X_k \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, m \in P_{all} \quad (6)$$

یک<sup>۲۴</sup> می‌باشد. در مدل ارائه شده، رابطه (۱) تابع هدف مسئله بوده و مجموع هزینه‌های سفر در شبکه ترکیبی حمل کالا را حداقل می‌سازد. رابطه (۲) بیان می‌کند که تعداد کل گره‌های هاب در نظر گرفته شده در شبکه باید برابر  $p$  باشد. رابطه (۳) شرط عبور کل تقاضا میان دو گره  $i$  و  $j$  را تامین می‌کند. رابطه (۴) هزینه حمل ترکیبی حمل کالا در شبکه ترکیبی را از نگاه سیستم تصمیم گیرنده (ریلی) محاسبه می‌کند. رابطه (۵) بیان می‌کند، در صورت عبور تقاضا از دو گره هاب  $k$  و  $m$  این دو گره باید به عنوان گره هاب انتخاب شوند. رابطه (۶) متغیرهای تصمیم مسئله را نشان می‌دهد که از جنس صفر و یک می‌باشند. در این پژوهش مقادیر  $C_{ik}$ ،  $C_{km}$  و  $C_{mj}$  در رابطه (۴) با توجه به وجود دو سیستم ریلی و جاده‌ای و در نظر گرفتن سیستم ریلی به عنوان تصمیم گیرنده بر اساس روابط (۷) تا (۹) تعیین شده‌اند.

$$C_{ik} = \left\{ \begin{array}{ll} \min\{C_{ik}^{rail}, C_{ki}^{rail}\} & \text{if } i \in P_{port} \text{ \& } i \in P_{rail} \text{ \& } k \in P_{rail} \\ \min\{C_{ik}^{road}, C_{ki}^{road}\} & \text{if other} \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$C_{ik} = \left\{ \begin{array}{ll} \min\{C_{mj}^{rail}, C_{jm}^{rail}\} & \text{if } j \in P_{port} \text{ \& } j \in P_{rail} \text{ \& } m \in P_{rail} \\ \min\{C_{mj}^{road}, C_{jm}^{road}\} & \text{if other} \end{array} \right\} \quad (8)$$

در زیر مدل ریاضی ارائه شده براساس تخصیص چندگانه  $p$ -هاب میانه آورده شده است. ورودی‌های مسئله شامل

(۱)

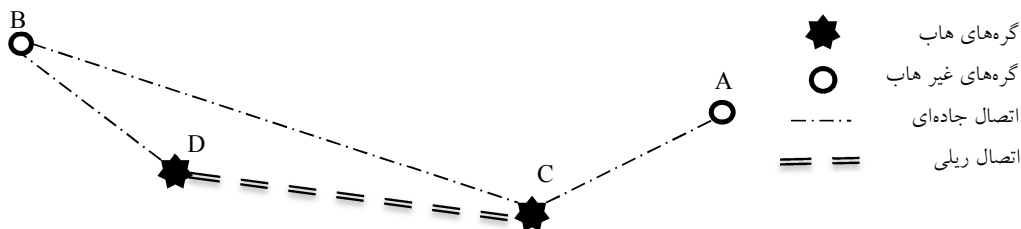
در مدل ریاضی بالا  $C_{ij}^{km}$  تعرفه حمل یک واحد کالا از  $i$  به  $j$  بوده که از دو هاب  $k$  و  $m$  نیز عبور کرده و براساس رابطه (۴) از سه قسمت تعرفه حمل کالا از مبدا به هاب  $C_{ik}$  (جمع آوری)، تعرفه حمل کالا میان دو هاب  $C_{km}$  (انتقال) و تعرفه حمل کالا از هاب به مقصد  $C_{mj}$  (توزیع) تشکیل شده‌است.  $\alpha$  یک ضریب تخفیف برای حمل کالاها میان دو هاب می‌باشد. در صورتی که مسئله همانند مسئله بالا به صورت ظرفیت نامحدود طراحی گردد،  $Z_{ij}^{km}$  یک متغیر صفر و یک خواهد بود و در غیر این صورت برابر نسبت حجم جریان منتقل شده از  $i$  به  $j$  که از دو هاب  $k$  و  $m$  عبور کرده به کل تقاضای موجود میان گره  $i$  و  $j$  می‌باشد.  $h_{ij}$  تقاضا موجود میان گره  $i$  و  $j$  و متغیر  $X_k$  یک متغیر صفر و یک بوده بطوریکه در صورت در نظر گرفتن گره  $k$  به عنوان هاب برابر یک و در غیر این صورت صفر می‌باشد. مدل بالا دارای  $n^4 + n^2 + n$  متغیر تصمیم بوده که همگی از نوع صفر و

$$C_{km} = \left\{ \begin{array}{ll} \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) \min\{C_{km}^{rail}, C_{km}^{road}\} & \text{if } k \in P_{rail} \& m \in P_{rail} \\ \min\{C_{km}^{road}, C_{km}^{road}\} & \text{if } \text{other} \end{array} \right\} \quad (9)$$

ریلی محاسبه می‌شود. این دو رابطه بر اساس تعریف بنادر خشک که ارتباط بنادر تا بندر خشک را به صورت یک سیستم پرفریت (ریلی) در نظر می‌گرفت، تعریف شده‌است. در رابطه (۹) تعرفه حمل کالا میان بنادر خشک دارای ایستگاه ریلی، به صورت ریلی در نظر گرفته شده‌است. همچنین  $\alpha$  درصد تخفیف تعرفه برای حمل کالاها میان دو بندر خشک در سیستم ریلی می‌باشد. افزایش درصد تخفیف تعرفه ریلی میان بنادر خشک باعث افزایش سهم حمل و نقل ریلی از کل تقاضا کانتینری شبکه خواهد گردید. به طور مثال در شکل ۴ تقاضایی از مبدا  $A$  به  $B$  وجود دارد و گره‌های  $C$  و  $D$  به عنوان بنادر خشک در شبکه پیشنهاد شده‌اند. در صورتی که هزینه حمل از  $C$  به  $D$  و از  $D$  به  $B$  بیشتر از هزینه حمل از  $C$  به  $B$  باشد، جریان تقاضا از محور  $C-D$  عبور نخواهد کرد و مسیر  $A-C-C-B$  را انتخاب خواهد کرد. در این وضعیت شرط عبور تقاضا از بنادر خشک رعایت شده است اما محور ریلی میان دو بندر خشک بدون استفاده مانده است.

بدلیل ناچیز بودن هزینه‌های تخلیه و بارگیری کانتینر در بنادر خشک در مقایسه با هزینه‌های حمل و مطلوبیت ورود کانتینرها به بنادر خشک برای سیستم ریلی این هزینه‌ها به عنوان خدمات رایگان در بنادر خشک در نظر گرفته شده‌است. در روابط بالا  $C_{ik}^{rail}$  تعرفه حمل ریلی از گره  $i$  به گره  $k$   $C_{ik}^{road}$  تعرفه حمل جاده‌ای از گره  $i$  به گره  $k$   $P_{rail}$  مجموعه گره‌های دارای ایستگاه ریلی در شبکه و  $P_{port}$  مجموعه گره‌های مستقر در بنادر شبکه می‌باشند. در یک شبکه دارای هاب و با توجه به تعریف بنادر خشک، سیستم ریلی در دو حالت مطلوبیت جذب تقاضا خواهد داشت. حالت اول مربوط به ارتباط بنادر دارای ایستگاه ریلی به بنادر خشک بوده و حالت دوم به ارتباط میان دو بندر خشک اشاره دارد.

روابط (۷) و (۸) نشان می‌دهند، در صورتی که گره مبدا و یا مقصد سفر، یکی از بنادر کشور و دارای ایستگاه ریلی باشد، تعرفه حمل کالا میان این نقاط و بنادر خشک بر حسب تعرفه



شکل ۴. تاثیر درصد تخفیف تعرفه در مسیرهای ریلی بر روی تقاضای جذب شده

با پتانسیل بالای کانتینری شدن استفاده شده است. کالاهای با پتانسیل بالای کانتینری شدن به کالاهایی گفته می‌شود که یا به صورت کانتینری حمل شده‌اند و یا در غیر این صورت در نوع کالا، مبدا و مقصد سفر آن تجربه حمل به صورت کانتینری بیش از ۱۰۰ تن بار وجود دارد. براساس این تعریف مجموع کالاهای با پتانسیل بالای کانتینری شدن که به بنادر یا از بنادر کشور حمل شده‌اند برابر با ۱۹.۶ میلیون تن گردید که به مقدار واقعی ۱۹.۲ میلیون تن اعلام شده توسط اداره بنادر و کشتیرانی کشور بسیار نزدیک می‌باشد. شکل ۵ شبکه ریلی کشور ایران و ۲۵ شهرستان فعال در حمل و نقل کالاهای

### ۳- آماده‌سازی اطلاعات

مدل ارائه شده در این پژوهش بر روی شبکه حمل کانتینری کالا در کشور ایران پیاده شده است. اطلاعات تقاضا از برنامه‌های اداره راهداری و راه‌آهن در سال ۱۳۹۲ استخراج گردیده است. جهت در نظر گرفتن تقاضای کالاهای صادراتی که فاصله داخلی را به طور غیرکانتینری طی کرده اما به صورت کانتینری از کشور خارج شده است و همچنین کالاهای کانتینری که استریپ شده و فاصله داخلی را به صورت غیرکانتینری طی کرده‌اند، از مفهومی به نام کالاهای



منحصر به فرد در نظر گرفته شده که در جدول ۳ نشان داده شده است.

دارای پتانسیل بالای کانتینری شدن که به عنوان گره‌های مسئله مکان‌یابی هاب در نظر گرفته شده‌است را نشان می‌دهد. همچنین برای هر یک از گره‌های شبکه یک شناسه



شکل ۵. شبکه ریلی ایران و شهرستانهای فعال در حمل‌ونقل کالاهای دارای پتانسیل بالای کانتینری شدن به عنوان گره‌های مسئله مکان‌یابی بندرخشک

جدول ۳. شناسه اختصاص داده شده به هریک از گره‌های شبکه (شهرستانهای کشور) دارای هاب

شهرستان	شناسه	شهرستان	شناسه	شهرستان	شناسه	شهرستان	شناسه
تهران	۱	بم	۸	مشهد خراسان	۱۵	ساوه	۲۲
قم	۲	سیرجان	۹	خواف	۱۶	بندرعباس	۲۳
قزوین	۳	یزد	۱۰	آبادان	۱۷	بروجرد	۲۴
کرج	۴	کاشان	۱۱	ماهشهر	۱۸	بوشهر	۲۵
اصفهان	۵	برخوار	۱۲	خرمشهر	۱۹	-----	-----
مبارکه	۶	شاهین شهر	۱۳	شیراز فارس	۲۰	-----	-----
اهواز	۷	تبریز	۱۴	کرمان	۲۱	-----	-----

در شبکه‌های دارای هاب به جهت حذف کمان‌های مستقیم انتقال کالا و انتقال جریان کالایی آنها بر کمان‌های متصل به هاب، جریان کالایی در محورهای متصل به هاب در هر دو جهت رفت و برگشت افزایش یافته که در نتیجه انتظار برابری هزینه حمل کالا در مسیر رفت و برگشت را خواهیم داشت. برابری هزینه‌های رفت و برگشت کالا در شبکه دارای هاب در قیمت قبل توسط روابط (۷) تا (۹) تامین شده‌است.

ماتریس هزینه سفر مبادی-مقاصد بر اساس تعرفه رسمی اعلام شده در شبکه جاده‌ای و ریلی کشور ایران آماده شده است. در شبکه دارای هاب (بندرخشک) هزینه‌های حمل به سه قسمت انتقال کالا از گره مبدا به هاب، هاب به هاب و هاب به گره مقصد تقسیم شده‌است. در بسیاری از موارد تفاوت در میزان تقاضا سفر در مسیر رفت و برگشت باعث می‌گردد، هزینه حمل کالا در مسیر رفت و برگشت با یکدیگر متفاوت باشد. در شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای ایران این اختلاف برای تعدادی از مسیرها به ۱.۷ برابر نیز رسیده است.

## ۴- نتایج مدلسازی

برابر دو، سه و چهار هاب حل شده است و نتایج آن در ادامه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. جدول ۴ نتایج مدلسازی را برای تعداد ۲ تا ۵ بندرخشک در شبکه و مقادیری از  $\alpha$  (درصد تخفیف تعرفه در محورهای ریلی) نشان می‌دهد. جداول کامل به پیوست آورده شده است.

مدل ریاضی صفر و یک عدد صحیح مختلط در این پژوهش توسط نرم افزار تجاری Cplex 12 به منظور یافتن جواب دقیق این مسئله حل گردیده است. مدل ریاضی مسئله در نرم افزار Java با استفاده از کتابخانه Cplex مدل شده است. مدل ارائه شده برای مقادیر مختلف  $\alpha$  از صفر تا ۹۰ درصد تخفیف در مسیرهای ریلی و همچنین تعداد هاب در شبکه

جدول ۴. نتایج مسئله مکانیابی بندرخشک برای تعداد ۲ تا ۵ بندرخشک در شبکه و مقادیری از  $\alpha$

تعداد بندرخشک (p)	درصد تخفیف در محورهای ریلی ( $\alpha$ )	هزینه سفر (میلیارد تومان)	حجم مسیرهای ریلی (میلیون TEU)	کانتینر کیلومتر ریلی (میلیون TEU-KM)	طول مسیرهای ریلی استفاده شده (KM)	گره‌های هاب
۲	۵۰٪	۱۲۴۳۸	۱.۱۱	۸۱۲.۴	۳۱۷۲	۲,۸
۲	۱۰٪	۱۳۰۸۳	۰.۷۸	۷۱۵.۷	۳۷۳۱	۱,۹
۳	۵۰٪	۱۱۱۳۹	۱.۱۶	۸۰۷.۰	۵۶۸۰	۱,۲,۹
۳	۱۰٪	۱۲۰۱.۴	۱.۰۳	۷۰۶.۴	۵۴۶۸	۱,۲,۹
۴	۵۰٪	۱۰۰۵.۴	۱.۳۹	۱۱۱۶.۶	۹۷۳۰	۱,۲,۸,۹
۴	۱۰٪	۱۱۵۱.۰	۱.۲۶	۱۰۹۵.۷	۱۰۲۹۰	۱,۲,۸,۹
۵	۵۰٪	۹۸۸.۸	۱.۳۹	۱۱۱۲.۷	۱۲۰۰۹	۱,۲,۷,۸,۹
۵	۱۰٪	۱۱۳۳۸	۱.۲۶	۱۰۹۰.۲	۱۰۵۹۱	۱,۲,۷,۸,۹

در شبکه می‌باشد. ستون هفتم نیز گره های پیشنهادی جهت احداث بندر خشک در کشور را معرفی می‌کند. به منظور تعیین کارا ترین گزینه پیشنهادی از روش تحلیل پوششی داده‌ها- ورودی محور CCR استفاده شده است. این مدل در سال ۱۹۷۸ توسط چارلز، کوپر و رودز در مقاله ای تحت عنوان "اندازه گیری کارایی واحد های تصمیم گیرنده" ارائه شد [Charnes, Cooper and Rhode, 1978]. در این روش هر یک از حالت‌های تعداد هاب در شبکه و درصد تخفیف در سیستم ریلی به عنوان یک DMU (واحد تصمیم گیری) در نظر گرفته شده است. جدول ۵ متغیرهای ورودی و خروجی استفاده شده در این ارزیابی را نشان می‌دهد.

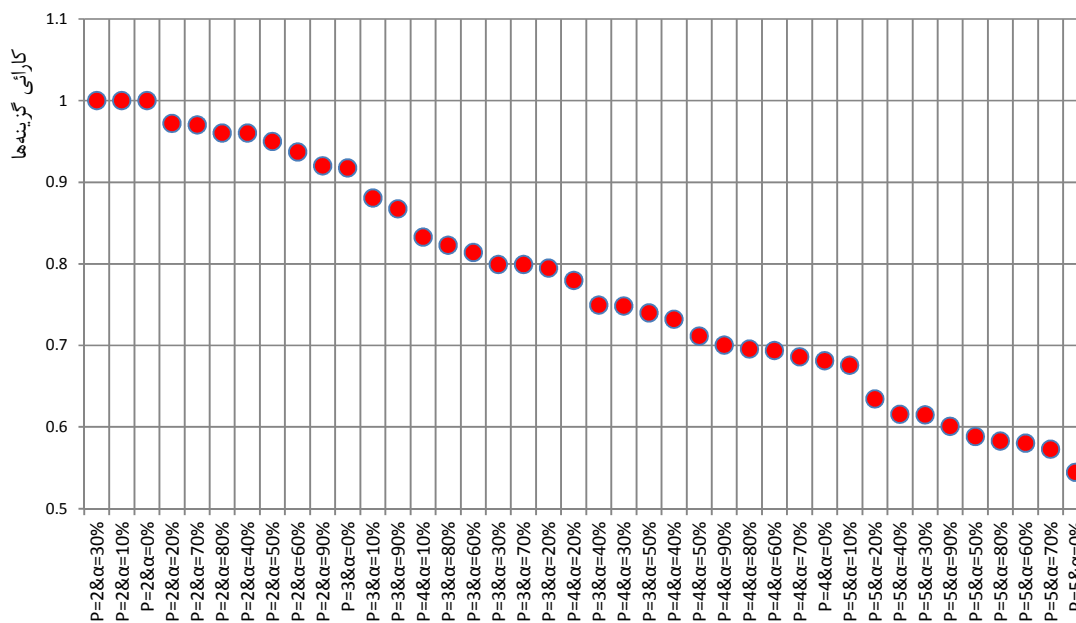
در جدول بالا ستون اول تعداد بندرخشک در شبکه را نشان می‌دهد که مقادیر دو تا پنج برای آن در نظر گرفته شده است. ستون دوم درصد تخفیف ریلی بوده که هر ۱۰ درصد یکبار از مقدار ۰ تا ۹۰ درصد تغییر می‌کند. بنابراین برای هر تعداد بندرخشک در شبکه درصد تخفیف ریلی ده حالت مختلف فرض شده است که در مجموع ۴۰ حالت مختلف بررسی شده است. مجموع هزینه سفر در شبکه هاب در ستون دوم نشان داده شده است. ستون چهارم حجم مسیرهای ریلی (میلیون TEU) و ستون پنجم میلیون کانتینر کیلومتر پیموده شده در شبکه را نشان می‌دهد. ستون ششم جدول نشان‌دهنده مجموع طول مسیرهای ریلی استفاده شده

جدول ۵. معرفی متغیرهای ورودی و خروجی استفاده شده در روش تحلیل پوششی داده‌ها

ورودی ها	خروجی ها
تعداد هاب در شبکه	معکوس هزینه کل سفرهای شبکه (میلیارد تومان)
درصد تخفیف ریلی $\times$ حجم مسیرهای ریلی (TEU)	حجم مسیرهای ریلی (میلیون TEU)
طول مسیرهای ریلی استفاده شده (KM)	کانتینر کیلومتر ریلی طی شده (میلیون TEU-KM)

روی یک محور به جای تقویت سه محور مختلف، هزینه‌های ورودی کاهش یافته و گزینه اول اقتصادی تر می‌باشد. افزایش مقدار ورودی‌ها باعث کاهش هزینه‌های کل سفرهای شبکه می‌گردد، در صورتی که در ارزیابی کارایی با افزایش ورودی‌ها انتظار افزایش خروجی‌ها را داریم. بنابراین معکوس هزینه‌های کل سفرهای شبکه به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. نتایج ارزیابی کارایی هر یک از گزینه‌ها بر اساس روش تحلیل پوششی داده‌ها در شکل ۶ آورده شده است.

متغیرهای تعداد هاب در شبکه و افزایش درصد تخفیف ریلی  $\times$  حجم مسیرهای ریلی (TEU) از ورودی‌های مسئله بوده و افزایش آنها باعث کاهش هزینه‌های سفر و افزایش حجم مسیرهای ریلی می‌گردد. برای روشن شدن علت قرارداد طول مسیرهای ریلی استفاده شده در متغیرهای ورودی مثالی آورده شده است. فرض کنید مقادیر ورودی و خروجی در مقایسه دو واحد تصمیم‌گیری تنها در طول مسیرهای ریلی متفاوت باشد. بطوریکه در گزینه اول یک محور ریلی و گزینه دوم سه محور ریلی در حال استفاده می‌باشند. بنابراین به جهت متمرکز شدن سرمایه‌گذاری بر



شکل ۶. نتایج ارزیابی گزینه‌ها بر اساس روش تحلیل پوششی داده‌ها

کارا این ارزیابی بوده و منجر به بالاترین منفعت شبکه ریلی خواهند گردید. در ادامه جزئیات نتایج این سه سناریو بررسی گردیده است. جدول زیر جزئیات نتایج مدلسازی در این سه سناریو را نشان می‌دهد. بر اساس مجموعه‌های مرجع معرفی شده برای سایر سناریوها غیر کارا، ساخت ۲ هاب و اعمال صفر درصد تخفیف ۱۰ مرتبه، ساخت ۲ هاب و اعمال ۱۰ درصد تخفیف ۲۳ مرتبه و ساخت ۲ هاب با ۳۰ درصد تخفیف ۹ مرتبه به عنوان جوامع مرجع تکرار شده‌اند. تکرار سناریو ساخت ۲ هاب و اعمال ۱۰ درصد تخفیف در مجموعه مرجع سایر سناریوهای نشان از کارآمدی این سناریو می‌باشد.

بر اساس نتایج حاصل شده، سناریوهای دارای دو بندر خشک از کارایی یک تا ۰.۹، سناریوهای با سه بندر خشک از کارایی ۰.۹ تا ۰.۷۵، سناریوهای با چهار بندر خشک از کارایی ۰.۸۳ تا ۰.۶۸ و سناریوهای با پنج بندر خشک از کارایی ۰.۶۷ تا ۰.۵۴ برخوردار می‌باشند. بنابراین افزایش تعداد بندر خشک باعث کاهش کارایی شبکه گردیده است. براین اساس احداث سناریوهای با دو بندر خشک مناسب ترین سناریوها برای سرویس‌دهی به کالاهای کانتینری در کشور ایران می‌باشند. از میان سناریوهای دارای ۲ بندر خشک، سه سناریو احداث ۲ بندر خشک و اعمال سطوح تخفیف ۰٪، ۱۰٪ و ۳۰٪ در تعرفه مسیرهای ریلی مجموعه

جدول ۶. جزئیات نتایج مدل‌سازی برای سه گزینه با بیشترین کارایی

گره‌های هاب	طول مسیرهای ریلی استفاده شده (KM)	کانتینر کیلومتر ریلی (میلیون TEU-KM)	حجم مسیرهای ریلی (میلیون TEU)	هزینه کل (میلیارد تومان)	درصد تخفیف در	تعداد هاب
					محورهای ریلی ( $\alpha$ )	
۲,۸	۳۱۷۲	۸۰۸,۰	۱,۰۸	۱۲۸۶,۳	٪۳۰	۲
۱,۹	۳۷۳۱	۷۱۵,۷	۰,۷۸	۱۳۰۸,۳	٪۱۰	۲
۲,۸	۲۶۹۰	۶۴۲,۴	۰,۶۹	۱۳۱۶,۲	٪۰	۲

نسبت به سایر شهرستان‌های ایران برخوردار است. بنابراین با توجه به کیفیت زیرساخت‌های حمل‌ونقلی مناسب در مجاورت مکان‌های پیشنهادی، سناریو انتخاب دو شهرستان تهران و سیرجان سناریو برتری خواهد بود. بررسی موقعیت‌های در نظر گرفته شده برای احداث بندر خشک در سناریوهای ساخت سه هاب در شبکه نشان داد، کلیه سناریو ها سه شهرستان تهران، قم و سیرجان را به عنوان شهرستان‌های دارای پتانسیل احداث بندر خشک معرفی نمودند (جدول پیوست).

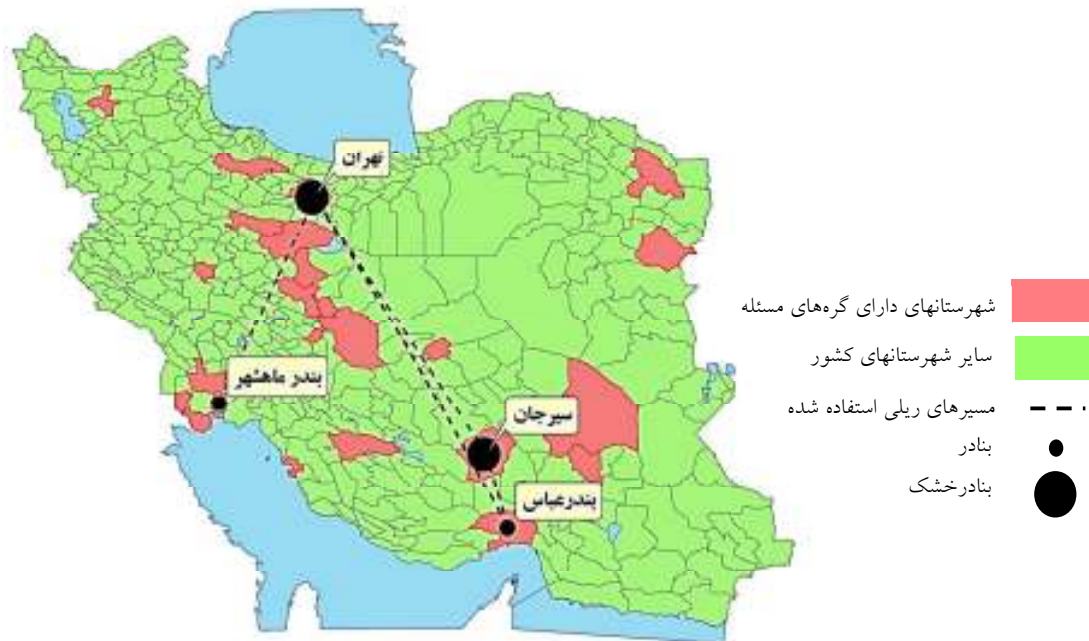
بنابراین انتخاب شهرستان‌های تهران و سیرجان به عنوان مکان‌های احداث بندر خشک، امکان توسعه شبکه در آینده و اضافه نمودن بندر خشک قم را نیز مهیا خواهد نمود. بنابراین با توجه به موارد ذکر شده سناریو احداث بندر خشک در شهرستان سیرجان و تهران و اعمال تخفیف ۱۰ درصد در تعرفه مسیرهای ریلی به عنوان سناریو برتر در این پژوهش معرفی گردیده است.

شکل ۷ موقعیت مکان احداث بندر خشک و کمانهای ریلی استفاده شده در شبکه را نشان می‌دهد.

در شرایط اعمال تخفیف صفر و سی درصد شهرستان‌های قم و بوم و در حالت اعمال تخفیف ده درصد شهرستان‌های تهران و سیرجان به عنوان مراکز احداث بندر خشک پیشنهاد شده‌اند. علاوه بر شاخص‌های در نظر گرفته شده در مدل تحلیل پوششی داده‌ها، معیارهای کیفی دیگری در تعیین موقعیت بندر خشک تاثیرگذار هستند.

در این پژوهش مکان‌یابی بندر خشک بر اساس اطلاعات کالاهای کانتینری انجام گرفت. این در حالی است که توسعه بندر خشک باعث جذب بیشتر سایر کالاها و استفاده آنها از امکانات این مجموعه‌ها خواهد شد. دو شهرستان تهران و سیرجان از لحاظ نزدیکی به مراکز عمده جذب و تولید بار و مراکز صنعتی و شهرهای بزرگ نسبت به دو شهرستان قم و بوم در اولویت می‌باشند.

بنابراین این دو شهرستان موقعیت‌های مناسب‌تری به منظور جذب بارهای غیرکانتینری در بندر خشک می‌باشند. یکی دیگر از شاخص‌های تاثیرگذار در تعیین موقعیت بندر خشک حضور زیرساخت‌های حمل‌ونقلی مناسب در مجاورت مکان‌های پیشنهادی می‌باشد. شهرستان تهران به عنوان پایتخت کشور ایران از زیرساخت‌های مناسب‌تری



شکل ۷. محل احداث بندر خشک و مسیرهای ریلی استفاده شده در سناریو برتر

## ۵- نتیجه گیری

تحلیل پوششی داده‌ها بر اساس شاخص‌های متعدد اقتصادی منجر به شناسایی کارآمدترین برنامه توسعه‌ای برای سیستم ریلی خواهد شد. شاخص‌های در نظر گرفته شده در روش تحلیل پوششی داده‌ها بر اساس خروجی‌های مدل مکان‌یابی هاب همچون مجموع هزینه کل سفرهای شبکه، حجم مسیرهای ریلی، کانتینر کیلومتر ریلی و طول مسیرهای ریلی تعیین گردیده و به صورت غیرمستقیم منعکس کننده هزینه‌های نامبرده می‌باشند. مدل مکان‌یابی بندر خشک در ترکیب با روش تحلیل پوششی داده‌ها بر روی شبکه کالاهای کانتینری کشور ایران پیاده گردید. سناریوهای در نظر گرفته شده بر اساس تغییرات تعداد هاب در شبکه (۲ تا ۵) و درصد تخفیف در مسیرهای ریلی (۰٪ تا ۹۰٪) پیاده شده و با استفاده از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها، سناریو برتر انتخاب گردیده است. بر اساس نتایج ارزیابی سناریوها، سه سناریو احداث ۲ بندر خشک و اعمال سطوح تخفیف ۱۰٪، ۳۰٪ و ۳۰٪ در تعرفه مسیرهای ریلی مجموعه کارا این ارزیابی می‌باشند و منجر به بالاترین منفعت شبکه ریلی خواهند گردید. در شرایط اعمال تخفیف صفر و سی درصد شهرستان‌های قم و بم و در حالت اعمال تخفیف ده درصد

در این پژوهش مدل جدیدی از مکان‌یابی هاب در ترکیب با روش تحلیل پوششی داده‌ها برای شبکه‌های حمل و نقل ترکیبی کالاهای کانتینری (ریلی-جاده‌ای) از نقطه نظر سیستم ریلی ارائه شده است. در پژوهش‌های گذشته گونه‌های مختلف سفر در شبکه‌های چندوجهی از اهمیت یکسانی برخوردار بوده و هدف کاهش هزینه‌های حمل، هزینه‌های احداث هاب و احداث کمانهای جدید برای شبکه بوده است. این در حالی است که انتقال کالاها از شبکه جاده‌ای به شبکه ریلی موجب کاهش هزینه‌های غیرمستقیمی همچون کاهش مصرف سوخت، آلودگی هوا و تصادفات جاده‌ای می‌گردد. در این پژوهش به منظور طراحی یک شبکه دارای بندر خشک از نگاه سیستم ریلی و به منظور تعیین حداکثر پتانسیل شبکه ریلی جهت حمل محموله‌ها، محدودیت‌های ظرفیتی (گره‌های هاب و کمان‌های شبکه) به طور مستقیم در مدل ارائه شده اعمال نگردیده است. مدل ارائه شده بر اساس مقادیر مختلف تخفیف در تعرفه مسیرهای ریلی و تعداد هاب در شبکه حل گردیده و نتایج سناریوهای حاصل با استفاده از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها ارزیابی گردیده‌اند. ترکیب یک مدل مکان‌یابی هاب بدون ظرفیت با روش

- Ambrosino, D. and Sciomachen, A. (2014), "Location of mid-range port in multimodal logistic networks" *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 108, pp. 118-128.
- Ambrosino, D. and Sciomachen, A., (2016), "A capacitated hub location problem in freight logistics multimodal networks" *Optimization Letters*, Vol. 10, No. 5, pp. 875-901.
  - Aykin, T., (1995), "Networking policies for hub-and-spoke systems with application to the air transportation system" *Transportation Science*, Vol. 29, No. 3, pp. 201-221.
  - Boland, N., Krishnamoorthy, M., Ernst, A., & Ebery, J. (2004), "Preprocessing and cutting for multiple allocation hub location problems" *European Journal of Operational Research*, Vol. 155, pp. 638-653.
  - Campbell, J.F. (1992), "Location and allocation for distribution systems with transshipments and transportation economies of scale", *Annals of Operations Research*, Vol. 40, pp. 77-99.
  - Campbell, J.F. (1994), "Integer programming formulations of discrete hub location problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 72, pp. 387-405.
  - Campbell, J.F., Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M. (2005), "Hub arc location problems: part II—formulations and optimal algorithms" *Management Science*, Vol. 51, No. 10, pp. 1556-1571.
  - Charnes, A., Cooper, W.W. and E. Rhode. (1978), "Measuring the Efficiency of Decision Making units", *European Journal of Operational Research*, Vol. 2, pp. 424-444.
  - Cullinane, K. and Wilmsmeier, G. (2011), "The contribution of the dry port concept to the extension of port life cycles", *Handbook of Terminal Planning*. Springer, New York, pp. 359-379.
  - Ebery, J., Krishnamoorthy, M., Ernst, A., & Boland, N. (2000), "The capacitated multiple allocation hub location problem: Formulations and algorithms" *European Journal of Operational Research*, Vol. 120, pp. 614-631.
  - Ernst, A., & Krishnamoorthy, M. (1999), "Solution algorithms for the capacitated single

شهرستانهای تهران و سیرجان به عنوان مراکز احداث بنادر خشک پیشنهاد شدند. بمنظور شناسایی سناریو برتر، علاوه بر شاخص‌های در نظر گرفته شده در مدل تحلیل پوششی داده‌ها، معیارهای کیفی دیگری همچون نزدیکی به مراکز عمده جذب و تولید بار و مراکز صنعتی و شهرهای بزرگ و کیفیت زیرساخت‌های حمل و نقلی مناسب در مجاورت مکان‌های پیشنهادی برای سه سناریو کارا بررسی گردید. بررسی کیفی موقعیت بندر خشک نشان داد سناریو احداث بندر خشک در شهرستان سیرجان و تهران و اعمال تخفیف ۱۰ درصد در تعرفه مسیرهای ریلی، سناریو برتر احداث بندر خشک از نگاه سیستم ریلی خواهد بود. در این سناریو حجم مسیرهای ریلی برابر ۷۸۰ هزار TEU، کانتینر کیلومتر ریلی پیموده شده ۷۱۶ میلیون TEU-KM و طول مسیرهای ریلی برابر ۳۷۳۱ کیلومتر و متشکل از سه محور بندرعباس-سیرجان، سیرجان-تهران و تهران-بندرماهشهر می‌باشد.

## ۶- پی‌نوشت

- 1- Collection
- 2- Distribution
- 3- Facility location problem
- 4- Hub location problem
- 5- Locating hub facilities
- 6- Allocating demand nodes to hub
- 7- Hub median location problem
- 8- Hub center location problem
- 9- Hub covering location problem
- 10- Multi-objective hub location problem
- 11- Continuous hub location problem
- 12- Single allocation
- 13- Multiple Allocations
- 14- Link-based
- 15- Path-based
- 16- P-hub median location problem
- 17- Single allocation p-HLP
- 18- Multiple allocation p-HLP
- 19- Index 4
- 20- Air transportation
- 21- Intermodal transportation
- 22- Telecommunications
- 23- Cargo delivery
- 24- Binary

## ۷- مراجع

- مهری، سی.س.، حق شناس، ح.، (۱۳۹۴)، "تحلیل وضع موجود حمل و نقل کانتینری در ایران و راهکارهای افزایش مطلوبیت حمل آن با راه‌آهن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده حمل و نقل دانشگاه صنعتی.

- Mohri, S.S. and Haghshenas, H. (2017), "Modeling the Container Selection for Freight Transportation: Case Study of Iran". *International Journal of Transportation Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp.31-44.
- Notteboom, T. E. (2002), "Consolidation and contestability in the European container handling industry", *Maritime Policy and Management*, Vol. 29, pp. 257–270.
- O’Kelly, M.E. (1987), "A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities" *European Journal of Operational Research*, Vol. 32, pp. 393-404.
- Racunicam, I. and Wynter, L. (2005), "Optimal location of intermodal freight hubs", *Transportation Research Part B*, Vol. 39, No. 5, pp. 453–477.
- Roso, V., Woxenius, J. and Lumsden, K. (2009), "The dry port concept: Connecting container seaports with the hinterland", *Journal of Transport Geography*, Vol. 17, No. 5, pp. 338-345.
- Roso, V. and Lumsden, K. (2010), "A review of dry ports", *Maritime Economics & Logistics*, Vol. 12, pp. 196-213.
- SIMIQ. (2000), "Intermodal Quality (IQ)", Technical report for the European Commission, coordinated by INRETS, pp. 67.
- Skorin-Kapov, D., Skorin-Kapov, J. and O’Kelly, M. (1996), "Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 94, pp. 582–593.
- Slack, B. (1999), "Satellite terminals: a local solution to hub congestion", *Journal of Transport Geography*, Vol. 7, No. 2, pp. 241–246.
- Sohn, J. and Park, S. (1998), "Efficient Solution procedure and reduced size formulations for p-hub location problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 108, pp. 118–126.
- UNCTAD (2012), "Review of Maritime Transport", source: United Nations Conference on Trade and Development, 04 Dec 2012, 196 page(s), Website: [www.unctad.org](http://www.unctad.org)
- allocation hub location problem" *Annals of Operations Research*, Vol. 86, pp. 141–159.
- Farahani, R.Z., Hekmatfar, M., Arabani, A.B. and Nikbakhsh, E. (2013), "Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 64, No. 4, pp. 1096-1109.
- Hamacher, H. W., Labbé, M., Nickel, S., and Sonneborn, T. (2004), "Adapting polyhedral properties from facility to hub location problems", *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 145, No. 1, pp. 104–116.
- Hekmatfar, M. and Pishvaei, M. (2009), In R. Z. Farahani, M. Hekmatfar (Eds.), "Hub location problem, in facilities location: Concepts, models, algorithms and case studies", Heidelberg: Springer-Verlag.
- Ishfaq, R. and Sox, C. R. (2011), "Hub location–allocation in intermodal logistic networks", *European Journal of Operational Research*, Vol. 210, pp. 213–230.
- Jarzemskis, A. and Vasiliauskas, A.V. (2007), "Research on dry port concept as intermodal node", *Transport* Vol. 22, No. 3, pp. 207–213.
- Jeong, S.J., Lee, C.G. and Bookbinder, J.H. (2007), "The European freight railway system as a hub-and-spoke network", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 41, No. 6, pp. 523-536.
- Kim, H., & O’Kelly, M. E. (2009), "Reliable p-hub location problems in telecommunication networks" *Geographical Analysis*, Vol. 41, No. 3, pp. 283–306.
- Leveque, P. and Roso, V. (2002), "Dry Port concept for seaport inland access with intermodal solutions", Master's thesis, Department of Logistics and Transportation, Chalmers University of Technology.
- Limbourg, S. and Jourquin, B. (2009), "Optimal rail -road container terminal locations on the European network" *Transportation Research Part E*, Vol. 45, pp. 551–563.
- Mari’n, A. (2005), "Formulating and solving splittable capacitated multiple allocation hub location problems" *Computers & OR* Vol. 32, No. 12, pp. 3093–3109.



## *Archive of SID*

- p-hub model with hub-catchment areas, existing hubs, and simulation: A case study of Serbian intermodal terminals" *Networks and Spatial Economics*, Vol. 11, No. 2, pp. 295–314.
- Wang, C., Chen, Q. and Huang, R. (2017), "Locating dry ports on a network: a case study on Tianjin Port" *Maritime Policy & Management*, pp.1-18.
  - Xie, Y., Liang, X., Ma, L. and Yan, H. (2017), "Empty container management and coordination in intermodal transport" *European Journal of Operational Research*, Vol. 257, No. 1, pp. 223-232.
  - Van Klink, H.A. and Van Den Berg, G. (1998), "Gateways and Intermodals", *Journal of Transport Geography*, Vol. 6, No. 1, pp. 1–9.
  - Vasconcelos, A. D., Nassi, C. D., & Lopes, L. A. S. (2011), "The uncapacitated hub location problem in networks under decentralized management" *Computers and Operations Research*, Vol. 38, pp. 1656–1666.
  - Veenstra, A., Zuidwijk, R. and Van Asperen, E. (2012), "The extended gate concept for container terminals: expanding the notion of dry ports", *Maritime Economics & Logistics* Vol. 14, No. 1, pp. 14–32.
  - Vidovic, M., Zecevic, S., Kilibarda, M., Vlajic, J., Bjelic, N., & Tadic, S. (2011), "The



پیوست

جدول ۱. پ. نتایج مسئله مکانیابی بندر خشک برای تعداد دو بندر خشک در شبکه و مقادیر مختلف  $\alpha$

تعداد هاب	درصد تخفیف در محورهای ریلی ( $\alpha$ )	هزینه کل (میلیارد تومان)	حجم مسیرهای ریلی (میلیون TEU)	کانتینر کیلومتر ریلی (میلیون TEU- KM)	طول مسیرهای ریلی استفاده شده (KM)	گره‌های هاب
۲	٪۹۰	۱۰۳۱۸	۱.۴۲	۸۵۳.۵	۳۴۵۵	۲,۹
۲	٪۸۰	۱۰۹۶۸	۱.۳۹	۹۶۶.۸	۳۹۱۹	۱,۹
۲	٪۷۰	۱۱۵۹۸	۱.۳۹	۹۵۸.۷	۳۹۱۹	۱,۹
۲	٪۶۰	۱۲۱۳.۶	۱.۱۶	۷۲۰.۲	۳۹۱۹	۱,۹
۲	٪۵۰	۱۲۴۳.۸	۱.۱۱	۸۱۲.۴	۳۱۷۲	۲,۸
۲	٪۴۰	۱۲۶۵.۳	۱.۱۱	۸۱۱.۸	۳۱۷۲	۲,۸
۲	٪۳۰	۱۲۸۶.۳	۱.۰۸	۸۰۸.۰	۳۱۷۲	۲,۸
۲	٪۲۰	۱۲۹۹.۳	۰.۷۸	۷۱۶.۵	۳۷۳۱	۱,۹
۲	٪۱۰	۱۳۰۸.۳	۰.۷۸	۷۱۵.۷	۳۷۳۱	۱,۹
۲	٪۰	۱۳۱۶.۲	۰.۶۹	۶۴۲.۴	۲۶۹۰	۲,۸

جدول ۲. پ. نتایج مسئله مکانیابی بندر خشک برای تعداد سه بندر خشک در شبکه و مقادیر مختلف  $\alpha$

تعداد هاب	درصد تخفیف در محورهای ریلی ( $\alpha$ )	هزینه کل (میلیارد تومان)	حجم مسیرهای ریلی (میلیون TEU)	کانتینر کیلومتر ریلی (میلیون TEU- KM)	طول مسیرهای ریلی استفاده شده (KM)	گره‌های هاب
۳	٪۹۰	۸۵۴.۸	۱.۴۷	۹۴۵.۷	۴۹۹۳	۱,۲,۹
۳	٪۸۰	۹۳۲.۲	۱.۴۴	۹۱۸.۹	۵۶۸۰	۱,۲,۹
۳	٪۷۰	۱۰۰۶.۸	۱.۴۲	۹۰۵.۳	۶۶۴۰	۱,۲,۹
۳	٪۶۰	۱۰۷۹.۸	۱.۴۲	۹۰۷.۷	۵۶۸۰	۱,۲,۹
۳	٪۵۰	۱۱۱۳.۹	۱.۱۶	۸۰۷.۰	۵۶۸۰	۱,۲,۹
۳	٪۴۰	۱۱۳۸.۸	۱.۱۵	۸۰۲.۸	۵۶۸۰	۱,۲,۹
۳	٪۳۰	۱۱۶۳.۰	۱.۱۴	۷۹۸.۰	۶۳۲۰	۱,۲,۹
۳	٪۲۰	۱۱۸۳.۵	۱.۰۳	۷۰۷.۷	۶۳۲۰	۱,۲,۹
۳	٪۱۰	۱۲۰۱.۴	۱.۰۳	۷۰۶.۴	۵۴۶۸	۱,۲,۹
۳	٪۰	۱۲۱۷.۵	۰.۹۵	۶۸۲.۶	۵۴۶۸	۱,۲,۹

جدول ۳. پ. نتایج مسئله مکانیابی بندر خشک برای تعداد چهار بندر خشک در شبکه و مقادیر مختلف  $\alpha$

تعداد هاب	درصد تخفیف در محورهای ریلی ( $\alpha$ )	هزینه کل (میلیارد تومان)	حجم مسیرهای ریلی (میلیون TEU)	کانتینر کیلومتر ریلی (میلیون TEU-KM)	طول مسیرهای ریلی استفاده شده (KM)	گره‌های هاب
۴	%۹۰	۸۲۶.۱	۱.۴۷	۱۰۲۰.۰	۷۷۳۲	۱,۲,۷,۹
۴	%۸۰	۸۷۳.۵	۱.۴۳	۱۱۵۱.۴	۹۷۳۰	۱,۲,۸,۹
۴	%۷۰	۹۱۸.۵	۱.۴۱	۱۱۳۰.۱	۹۷۳۰	۱,۲,۸,۹
۴	%۶۰	۹۶۲.۴	۱.۴۰	۱۱۲۰.۷	۹۷۳۰	۱,۲,۸,۹
۴	%۵۰	۱۰۰۵.۴	۱.۳۹	۱۱۱۶.۶	۹۷۳۰	۱,۲,۸,۹
۴	%۴۰	۱۰۴۸.۱	۱.۳۹	۱۱۰۴.۸	۹۷۳۰	۱,۲,۸,۹
۴	%۳۰	۱۰۸۳.۶	۱.۲۹	۱۱۰۵.۲	۱۱۱۴۵	۱,۲,۸,۹
۴	%۲۰	۱۱۱۷.۶	۱.۲۶	۱۰۹۶.۶	۱۱۱۴۵	۱,۲,۸,۹
۴	%۱۰	۱۱۵۱.۰	۱.۲۶	۱۰۹۵.۷	۱۰۲۹۰	۱,۲,۸,۹
۴	%۰	۱۱۸۲.۱	۰.۹۴	۸۴۴.۰	۱۰۲۹۰	۱,۲,۸,۹

جدول ۴. پ. نتایج مسئله مکانیابی بندر خشک برای تعداد پنج بندر خشک در شبکه و مقادیر مختلف  $\alpha$

تعداد هاب	درصد تخفیف در محورهای ریلی ( $\alpha$ )	هزینه کل (میلیارد تومان)	حجم مسیرهای ریلی (میلیون TEU)	کانتینر کیلومتر ریلی (میلیون TEU-KM)	طول مسیرهای ریلی استفاده شده (KM)	گره‌های هاب
۵	%۹۰	۸۰۱.۹	۱.۴۵	۱۱۷۰.۳	۱۲۵۵۸	۱,۲,۷,۸,۹
۵	%۸۰	۸۵۱.۲	۱.۴۳	۱۱۶۳.۸	۱۲۵۵۸	۱,۲,۷,۸,۹
۵	%۷۰	۸۹۹.۴	۱.۴۱	۱۱۴۳.۴	۱۱۶۷۶	۱,۲,۷,۸,۹
۵	%۶۰	۹۴۵.۸	۱.۳۹	۱۱۳۱.۷	۱۴۴۵۹	۱,۲,۷,۸,۹
۵	%۵۰	۹۸۸.۸	۱.۳۹	۱۱۱۲.۷	۱۲۰۰۹	۱,۲,۷,۸,۹
۵	%۴۰	۱۰۳۱.۴	۱.۳۹	۱۰۹۹.۳	۱۲۰۰۹	۱,۲,۷,۸,۹
۵	%۳۰	۱۰۶۶.۸	۱.۲۸	۱۰۹۹.۷	۱۲۵۵۸	۱,۲,۷,۸,۹
۵	%۲۰	۱۱۰۰.۶	۱.۲۶	۱۰۹۱.۱	۱۲۵۵۸	۱,۲,۷,۸,۹
۵	%۱۰	۱۱۳۳.۸	۱.۲۶	۱۰۹۰.۲	۱۰۵۹۱	۱,۲,۷,۸,۹
۵	%۰	۱۱۶۴.۸	۰.۹۴	۸۳۹.۰	۱۰۵۹۱	۱,۲,۷,۸,۹

