



سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



## ارائه مدل جدید برنامه‌ریزی حمل‌ونقل کانتینری در شبکه بنادر دریایی ایران

مجید عباسی<sup>۱\*</sup>، نسیم نهاوندی<sup>۲</sup>

\*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۳

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۶

© نشریه صنعت حمل‌ونقل دریایی ۱۳۹۵، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه صنعت حمل‌ونقل دریایی است.

### چکیده

بدون شک یکی از عوامل توسعه حمل‌ونقل و افزایش سرعت آن در دریای امروز به وجود آمدن حمل‌ونقل کانتینری است. به طوری که جایگاه حمل‌ونقل کانتینری در صنعت حمل‌ونقل جایگاهی تثبیت‌شده و رو به توسعه است. اما آنچه در عرصه حمل‌ونقل کانتینری تا به امروز به عنوان مسئله‌ای حل نشده، باقی مانده است، معضل کانتینر خالی است که به علت ناهماهنگی بین صادرات و واردات کالا در همه بنادر جهان وجود دارد. اما میزان موفقیت این بنادر در کاهش این معضل، با یکدیگر تفاوت دارد. در این مقاله، با توجه به اهمیت زیاد مسئله کانتینر خالی به لحاظ هزینه‌های نگهداری، تخلیه و بارگیری، کمبود محوطه و امکانات نگهداری در بنادر وارداتی از یک سو، و هزینه فرصت از دست رفته، عدم رضایت‌مندی مشتری و وابستگی اقتصادی به بنادر دیگر کشورها در بنادر صادراتی که با کمبود کانتینر خالی مواجه‌اند از سوی دیگر، به بررسی مسئله تغییر موقعیت کانتینر خالی پرداخته شده است. به همین منظور در این پژوهش، مدل برنامه‌ریزی حمل‌ونقل کانتینر خالی با هدف کمینه کردن هزینه کل شامل هزینه حمل‌ونقل، نگهداری، کسری، تخلیه و بارگیری کانتینر خالی با در نظر گرفتن همزمان سطح کسری و موجودی ارائه شده است. به منظور اعتبارسنجی و آزمایش‌های عددی مدل ارائه‌شده، با در نظر گرفتن یک شبکه مکانی - زمانی از بنادر دریایی ایران به عنوان شبکه مورد مطالعه واقعی در مسئله تغییر موقعیت کانتینر خالی، مدل پیشنهادی به روش برنامه‌نویسی خطی، در محیط نرم‌افزار Gams، استفاده شده است. نتایج محاسبات نشان‌دهنده کارایی مدل پیشنهادی در به تعادل رساندن سطح کسری کانتینر خالی در بنادر شبکه، کاهش ۴۱/۲٪ هزینه کل نسبت به دنیای واقعی و بهینه‌گی اهداف تعیین شده است.

**واژه‌های کلیدی:** حمل‌ونقل دریایی، حمل‌ونقل کانتینری، کانتینر خالی، برنامه‌نویسی خطی، محیط نرم‌افزار Gams

## ۱- مقدمه

## ۱-۱- بیان مسئله

آنچه در عرصه حمل و نقل کانتینری تا به امروز به عنوان مسئله‌ای حل نشده، باقی مانده است، معضل کانتینر خالی است که به علت ناهماهنگی بین صادرات و واردات کالا در همه بنادر جهان وجود دارد. اما میزان موفقیت این بنادر در کاهش این معضل، با یکدیگر تفاوت دارد. با توجه به اهمیت زیاد مسئله کانتینر خالی به لحاظ هزینه‌های نگهداری، تخلیه و بارگیری، کمبود محوطه و امکانات نگهداری در بنادر وارداتی از یک سو، و هزینه فرصت از دست رفته، عدم رضایت‌مندی مشتری و وابستگی اقتصادی به بنادر دیگر کشورها در بنادر صادراتی که با کمبود کانتینر خالی مواجه‌اند از سوی دیگر، بررسی تغییر موفقیت کانتینرهای خالی مسئله اصلی این مقاله است. به همین منظور در این پژوهش، مدل برنامه‌ریزی حمل و نقل کانتینر خالی با هدف کمینه کردن هزینه کل شامل هزینه حمل و نقل، نگهداری، کسری، تخلیه و بارگیری کانتینر خالی با در نظر گرفتن همزمان سطح کسری و موجودی ارزیابی و ارائه شده است.

## ۱-۲- پیشینه تحقیق

حمل و نقل کانتینری در چند دهه گذشته رشد سریع و قابل توجهی داشته است، تجارت جهانی از طریق کانتینر در سال ۲۰۱۱ به مقدار ۷۱٪ رشد کرده و توان ترمینال‌های کانتینری در سال ۲۰۱۱ تا ۵/۹٪ افزایش یافته است (اولیو و همکاران ۲۰۰۵). آنچه تا به امروز در عرصه حمل و نقل کانتینری به عنوان مسئله‌ای حل نشده باقی مانده است. معضل کانتینر خالی است که به علت ناهماهنگی بین صادرات و واردات کالا در همه بنادر جهان وجود دارد، اما میزان موفقیت این بنادر در کاهش این پدیده، نیز متفاوت و بسیار ناچیز است (چونگ و همکاران، ۲۰۰۲ و لی و همکاران ۲۰۰۴). مهمترین آسیب اقتصادی از این ناحیه، متوجه خطوط کشتیرانی است، از آنجا که کانتینر جزو دارایی‌های این خطوط می‌باشد و برای تهیه آن هزینه‌های بسیاری صرف شده است. زمانی که کانتینرهای یک کشتی در اسکله بندر تخلیه می‌شود، اگر ظرف مدت کوتاهی این کانتینرها مجدداً به چرخه عملیاتی خطوط کشتیرانی باز نگردند، این شرکت‌ها نمی‌توانند از سرمایه خود بهره‌برداری درستی داشته باشند، در نتیجه ناگزیر تصمیم به ترک آن بندر می‌گیرند، که در این صورت بازنده اصلی مناطق اطراف این بندر یا حتی کشوری است که گرفتار عدم توازن در صادرات و واردات می‌باشد. حاصل این اتفاق در بنادر یک کشور این است که نه تنها هزینه‌های واردات افزایش می‌یابد، بلکه وابستگی به بنادر کشورهای دیگر را نیز به دنبال دارد و عملاً استقلال اقتصادی کشور با مخاطره مواجه می‌شود (دونگ و همکاران، ۲۰۰۹).

دسترسی به کانتینر خالی در بنادر بستگی به کارایی مدیریت جریان کانتینر خالی دارد، به طوری که اگر جریان انتقال کانتینرهای خالی بین بنادر و انبارهای مختلف با دقت مدیریت نشود، ممکن است عدم دسترسی به کانتینر خالی در بنادر مخصوصاً در بنادر صادراتی، در دوره زمانی مناسب باعث افزایش ریسک عدم برآورده شدن تقاضا و رضایت‌مندی مشتری و همچنین انباشتگی کانتینر خالی مازاد در بنادر وارداتی، هزینه‌های سرسام‌آور نگهداری، کمبود محوطه

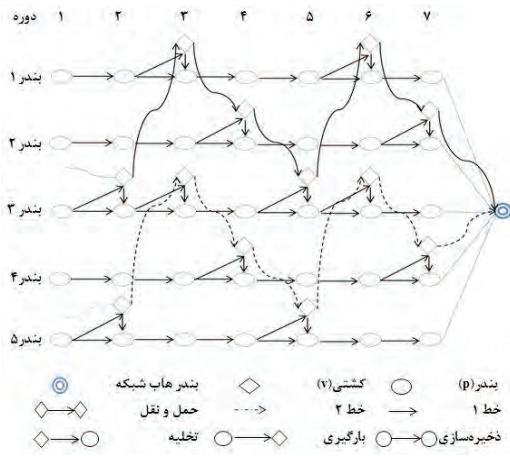
نگهداری و... شود (مون و همکاران، ۲۰۱۳ و لی و همکاران، ۲۰۰۷). در سال‌های اخیر با توجه به اهمیت مسئله مذکور مدل‌های مختلفی برای تغییر موفقیت کانتینر خالی ارائه شده است.

جول و همکاران در سال ۲۰۰۶ مدلی ریاضی به منظور بهینه کردن استفاده مجدد از کانتینرهای خالی بین دو بندر لس‌آنجلس و لانگ بیچ، با هدف کمینه کردن هزینه کل انتقال کانتینرهای خالی بین بنادر و انبارها ارائه داده‌اند. فنگ و همکاران در سال ۲۰۰۸، به بررسی تغییر موفقیت کانتینر خالی به عنوان یک مسئله دو مرحله‌ای برای کشتی‌های خطی (لایزر) پرداختند، که مرحله اول شامل تخمین موجودی کانتینر خالی در بنادر و مرحله دوم شامل ارائه برنامه تغییر موفقیت کانتینر خالی به منظور ارائه خدمات در شبکه حمل و نقل بوده است. تحقیق سانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰، به مسئله تخصیص کانتینرها بر مسیرهای حمل و نقل به منظور بهینه کردن حجم توزیع در بنادر در هر سفر متمرکز بود، هدف مدل پیشنهادی آنها تعیین حجم تخصیص کانتینرها در بنادر و بر کشتی‌ها و همچنین حداکثر استفاده شرکت‌های حمل و نقل از کانتینرها با کمینه کردن هزینه‌های عملیاتی بوده است. مون و همکاران در سال ۲۰۱۰، هدف مطالعه خود را ارائه برنامه‌ای برای انتقال کانتینرهای خالی بین بنادر به منظور کاهش عدم تعادلی که حتی با توسعه‌های اخیر حمل و نقل کانتینری، بین بنادر جدی‌تر شده، بیان کردند و مدلی ریاضی با هدف کاهش هزینه کل شامل هزینه حمل و نقل، هزینه جابه‌جایی، هزینه نگهداری ارائه دادند. مدل ارائه شده با در نظر گرفتن اجاره و خرید کانتینر فرمول‌بندی، و برای حل آن از برنامه‌نویسی عدد صحیح ترکیبی و الگوریتم ژنتیک استفاده شد. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱، با در نظر گرفتن سیاست مطلوب برای تغییر موفقیت کانتینرهای خالی، جریان کانتینرها را به عنوان یک جریان سیال پیوسته و تقاضا را به عنوان یک زنجیره مارکوف دو وضعیتی فرض کردند. هدف مدل پیشنهادی به حداقل رساندن هزینه‌های نگهداری، اجاره و تغییر موفقیت کانتینرهای خالی داخلی و خارجی بود، و برای حل مسئله کنترل بهینه از برنامه‌نویسی پویا استفاده کردند. سانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰، در تحقیقی دیگر سیاست تغییر موفقیت کانتینر خالی را با بنادر مقصد انعطاف‌پذیر، سیاستی که فقط خاص جریان مستقیم کانتینر خالی است، به صورت ریاضی تدوین، و چگونگی تاثیر آن را از طریق شبیه‌سازی ارزیابی کردند. آزمایشات نشان دادند که سیاست جدید به طور قابل توجهی، در شرایطی که تقاضاهای تجاری متعادل نیستند بهتر از سیاست معمولی است. فرانسیسکو و همکاران، به بررسی مسئله تغییر موفقیت کانتینرهای خالی در شبکه دریایی تحت اختلالات بندری پرداخته، و به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط به داده‌های مسئله از روش برنامه‌نویسی تصادفی با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف، استفاده کرده‌اند. آزمایشات انجام‌شده توسط آنها نشان‌دهنده آن است که مدل پیشنهادی چند سناریویی نسبت به مدل قطعی کارآتر بوده، و ریسک پیش رو، تقاضای مجهول کانتینر خالی را کاهش می‌دهد (فرانسیسکو و همکاران، ۲۰۱۳).

مطالعات انجام‌شده، نشان‌دهنده آن است که تحقیقات پیشین بدون در نظر گرفتن همزمان سطح کسری و موجودی و به تعادل رساندن سطح کسری و مازاد کانتینر خالی در بنادر صادراتی و وارداتی، به بررسی مسئله حمل و نقل کانتینر خالی پرداخته‌اند، در حالی که مدل‌های ارائه شده، باید در

نشان‌دهنده جریان تخلیه کانتینر خالی از کشتی هستند. و کمان‌ها از بنادر به کشتی نشان‌دهنده جریان بارگیری کانتینرها هستند.

مفروضات این مدل به این شرح‌اند: (۱) تقاضای مشتری برای کانتینر خالی باید برآورده شود، (۲) عرضه برابر است با تعداد کانتینرهایی که بعد از تخلیه بار یا تعمیرات نگهداری در هر دوره به چرخه حمل‌ونقل اضافه می‌شوند، (۳) موجودی برابر است با تعداد کانتینرهای خالی که در انتهای هر دوره باید ذخیره و نگهداری شود، (۴) فقط یک نوع از حالات حمل‌ونقل در نظر گرفته می‌شود (کشتی) و (۵) محدودیتی برای خرید و اجاره کانتینر خالی به منظور برآورده کردن تقاضای مشتری وجود ندارد.



شکل (۱): شبکه حمل‌ونقل مکانی - زمانی

## ۲-۲- نمادگذاری

تعاریف و توضیح نمادها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): تعریف و توضیح نمادها

بندر	$P$
کشتی	$V$
دوره زمانی	$t$
فاصله زمانی بین دو بندر متوالی	$\tau$
مجموعه بنادر	$P$
مجموعه کشتی‌هایی که در دوره $t$ به بندر $p$ می‌رسند.	$V(p, t)$
مجموعه کشتی‌هایی که در دوره $t$ بندر $p$ را ترک می‌کنند.	$W(p, t)$
تقاضا در بندر $p$ در دوره $t$ ام	$D_{tp}$
عرضه در بندر $p$ در دوره $t$ ام	$S_{tp}$
مدت زمانی که کشتی $v \in W(t, p)$ در بندر $p$ سپری می‌کند.	$\alpha_{tpv}$
هزینه نگهداری کانتینر خالی در بندر $p$	$ci_{tp}$
هزینه کسری کانتینر خالی در بندر $p$ در دوره $t$ ام	$CS_{tp}$
هزینه بارگیری بر کشتی $v$ در بندر $p$ در دوره $t$ ام	$cl_{tpv}$
هزینه تخلیه کانتینر از کشتی $v$ در بندر $p$ در دوره $t$ ام	$cu_{tpv}$
هزینه حمل و نقل توسط کشتی $v$ از بندر $p$ در دوره $t$ ام	$cr_{tpv}$
ظرفیت نگهداری کانتینر خالی در بندر $p$ در دوره $t$	$Ui_{pt}$
حداکثر ظرفیت تخلیه و بارگیری بر کشتی $v \in V(t, p)$ در مدت زمانی که در بندر $p$ سپری می‌کند.	$U_{tpv}$
ظرفیت کشتی $v$ برای انتقال کانتینر خالی از بندر $p$ به سایر بنادر در دوره $t$ ام	$Ur_{tpv}$

کاربرد و دنیای واقعی ایجاد تعادل سطح کسری و مازاد کانتینر خالی در بنادر صادراتی و وارداتی را تضمین و اهداف متفاوت و ناسازگاری را که در واقعیت وجود دارد بهینه کنند. به همین منظور در تحقیق حاضر به بررسی مسئله حمل‌ونقل کانتینر خالی با هدف بر طرف کردن شکاف‌های نظری و انطباق با دنیای واقعی پرداخته شده است.

تحقیق حاضر از جنبه‌های مختلفی نسبت به تحقیقات پیشین نوآوری دارد. از جمله می‌توان به (۱) در نظر گرفتن همزمان سطح کسری و موجودی، محدودیت‌های مرتبط و مطابق با دنیای واقعی، (۲) ایجاد تعادل سطح کسری و مازاد کانتینر خالی در بنادر صادراتی و وارداتی در یک شبکه مکانی - زمانی واقعی از بنادر که نتایج به‌دست آمده مؤید آن است، اشاره کرد.

در این پژوهش ابتدا مسئله اصلی پژوهش تعریف و مدل‌سازی شد، سپس به حل مثال عددی و مقایسه نتایج پرداخته شد و دست‌آخر، نتایج حاصل از پژوهش و پیشنهادات برای تحقیقات آینده ارائه گردید.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- تعریف مسئله و مدل‌سازی

در جریان حمل‌ونقل کانتینری، کانتینرهای پر، از بندر مبدأ بر اساس درخواست مشتریان به بندر مقصد حمل می‌شوند. اما با توجه به عدم تعادل تجاری این جریان‌ها، کانتینرهای خالی غیرضروری در بنادر وارداتی انباشته می‌شوند، در حالی که بنادر صادراتی با کمبود کانتینر خالی مواجه‌اند. این عدم توازن باعث می‌شود بنادر وارداتی با مشکلاتی از قبیل هزینه‌های سرسام‌آور چیدمان، نگهداری، تخلیه و بارگیری، کمبود محوطه و امکانات نگهداری و غیر آن، مواجه شوند. در نقطه مقابل، بنادر صادراتی با هزینه کسری کانتینر خالی به جهت پاسخ‌گویی به تقاضا، هزینه فرصت از دست رفته، عدم رضایت‌مندی مشتری و حتی وابستگی اقتصادی به بنادر سایر کشورهای همسایه روبرو می‌شوند. بنابراین شرکت‌های حمل‌ونقل کانتینری برای رفع این مشکل باید به صورت دوره‌ای، کانتینرهای خالی را بین بنادر وارداتی و صادراتی تغییر موقعیت دهند. در واقع مسئله پژوهش تغییر موقعیت کانتینر خالی، انتقال کانتینر خالی بدون استفاده، از بنداری که دارای مازاد کانتینر خالی می‌باشند به بنداری است که با کسری کانتینر خالی مواجه‌اند. در این پژوهش به منظور مدل‌سازی و تحلیل مسئله، یک شبکه مکانی - زمانی  $G(P, V)$  در نظر گرفته شد که در آن  $P$  نشان‌دهنده مجموعه بنادر و  $V$  نشان‌دهنده مجموعه کشتی‌های موجود در شبکه است. شکل (۱)، نشان‌دهنده شبکه مکانی - زمانی حمل‌ونقل دریایی است که به منظور تحلیل و مدل‌سازی مسئله طراحی شده و متشکل از ۷ دوره زمانی است که بنادر در هر دوره تکرار و با علامت بیضی مشخص شده‌اند. کشتی‌ها که در دوره‌هایی به بنادر می‌رسند با لوزی مشخص شده‌اند و خطوط کشتیرانی با مسیرهای ۱ و ۲ در شکل (۱)، مشخص شده‌اند. به عنوان مثال کشتی‌ای که روی خط ۱ حرکت می‌کند در دوره ۲ به بندر ۳ می‌رسد. کمان‌ها از یک بندر در یک دوره زمانی به همان بندر در دوره زمانی بعد نشان‌دهنده جریان ذخیره‌سازی کانتینر خالی در بنادر است. همچنین کمان‌ها از یک کشتی در یک دوره زمانی، به همان کشتی در دوره زمانی بعد نشان‌دهنده جریان انتقال کانتینرها توسط کشتی از یک بندر به بندر بعدی است. کمان‌ها از کشتی به بنادر موجود در شبکه،

به بندر بعد منتقل می‌شوند. محدودیت (۶)، بیان‌گر ظرفیت جابه‌جایی است به طوری که حجم تخلیه و بارگیری کانتینر خالی بر کشتی  $v \in V(t, p)$  در مدت زمانی که در بندر سپری می‌کند نباید از  $U_{tpv}$  تجاوز کند. محدودیت (۷)، حجم انتقال کانتینرهای خالی از بندر  $p$  توسط کشتی‌ها به سایر بنادر نباید بیشتر از ظرفیت کشتی‌ها باشد.

جدول (۳): مدل مفهومی

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V(p, t)} (cl_{tpv} x l_{tpv} + cu_{tpv} x u_{tpv} + cr_{tpv} x r_{tpv}) + \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} cs_{tp} x s_{tp} + ci_{tp} x i_{tp} \quad (1)$$

$$x i_{tp} = x i_{(t-1)p} + \sum_{v \in V(p, t)} x u_{(t-\alpha_{pv})pv} + S_{tp} - \sum_{v \in V(p, t)} x l_{tpv} - x s_{(t-1)p} - D_{tp} \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (2)$$

$$x i_{tp} \leq U i_p \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (3)$$

$$x s_{tp} = x s_{t-1p} + D_{tp} - x i_{(t-1)p} - \sum_{v \in V(p, t)} x u_{(t-\alpha_{pv})pv} - B_{tp} \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (4)$$

$$x r_{(t-\tau)(p-1)v} - x r_{tpv} - x u_{tpv} + x l_{tpv} = 0 \quad \forall v \in V(p, t), \forall p \in P, \forall t \in T \quad (5)$$

$$x l_{tpv} + x u_{tpv} \leq U_{tpv} \quad \forall v \in V(p, t), \forall p \in P, \forall t \in T \quad (6)$$

$$x r_{tpv} \leq U r_{tpv} \quad \forall v \in V(p, t), \forall p \in P, \forall t \in T \quad (7)$$

$$x l_{tpv}, x u_{tpv}, x r_{tpv}, x s_{tp}, x i_{tp} \geq 0 \quad \forall v \in V(p, t), \forall p \in P, \forall t \in T \quad (8)$$

### ۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این بخش به منظور اعتبارسنجی کارایی مدل ارائه شده برای مسئله تغییر موقعیت کانتینر خالی و آزمایش عددی، یک شبکه مکانی - زمانی حمل‌ونقل دریایی بین بنادر ایران که متشکل از ۵ بندر، ۲ خط کشتیرانی و ۴ کشتی (شکل ۱) است در هفت دوره زمانی با هدف انتقال کانتینرهای خالی از بنداری که دارای مازاد کانتینر خالی هستند، به بنداری که با کسری کانتینر خالی مواجه‌اند و همچنین به تعادل رساندن مسئله در نظر گرفته شد. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، مربوط به بنادر ایرانی موجود در شبکه می‌باشد و از طریق تحقیقات میدانی به دست آمده‌اند. مقادیر مربوط به پارامترهای هزینه بر مبنای تعرفه‌های سازمان بنادر و دریانوردی در تمام بنادر و دوره‌های زمانی مختلف شبکه، یکسان در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از مقادیر بدست آمده مربوط به متغیرهای سطح کسری و موجودی در قیاس با مقادیرشان در دنیای واقعی به منظور مقایسه و اعتبارسنجی نتایج حاصله، در افق زمانی برنامه‌ریزی شده، در

### ۲-۳- متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم در جدول (۲) بیان شده است.

جدول (۲): متغیرهای تصمیم

$x i_{tp}$	سطح موجودی کانتینر خالی در بندر $p$ در انتهای دوره $t$ ام
$x s_{tp}$	سطح کسری کانتینر خالی در بندر $p$ در دوره $t$ ام
$x u_{tpv}$	تعداد کانتینر خالی که باید در بندر $p$ در دوره $t$ از کشتی $v \in V(p, t)$ تخلیه شوند.
$x l_{tpv}$	تعداد کانتینرهای خالی که در بندر $p$ در دوره $t$ که باید بر کشتی $v \in V(p, t)$ بارگیری شوند.
$x r_{tpv}$	تعداد کانتینر خالی که توسط کشتی $v \in V(p, t)$ از بندر $p$ در دوره $t$ به سایر انتقال داده می‌شود.

### ۲-۴- مدل‌سازی

در جدول (۳)، مدل‌سازی پس از بررسی جامع مدل‌های ارائه شده در ادبیات موضوع و مصاحبه‌های مکرر با کارشناسان و خبرگان در حوزه مدیریت و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل دریایی (بندر بوشهر)، و انطباق با دنیای واقعی انجام گرفت. نتایج حاصل بیان‌گر اعتبار بالای مدل پیشنهادی می‌باشد.

در مدل ارائه شده، تابع هدف (۱)، عبارت از کمینه کردن هزینه کل، شامل هزینه حمل‌ونقل، تخلیه و بارگیری، هزینه نگهداری موجودی و کسری کانتینر خالی در افق برنامه‌ریزی می‌باشد. رابطه (۲)، مربوط به محدودیت موجودی کانتینر خالی در هر بندر، در هر دوره می‌باشد به طوری که موجودی کانتینر خالی در انتهای هر دوره برابر است با مجموع موجودی دوره قبل به علاوه عرضه در هر دوره، به علاوه مجموع کانتینرهای خالی تخلیه شده از کشتی‌هایی که در دوره  $t$  بندر  $p$  را ترک می‌کنند، منهای مجموع تقاضا در هر دوره، کسری کانتینر خالی در دوره قبل و مجموع کانتینرهای خالی بارگیری شده بر کشتی‌هایی که در دوره  $t$  به بندر  $p$  می‌رسند.

محدودیت (۳)، موجودی کانتینر خالی در هر بندر در هر دوره نباید از حداکثر ظرفیت مجاز موجودی در همان بندر تجاوز کند. محدودیت (۴)، بیان‌گر سطح کسری هر بندر در دوره‌های زمانی مختلف است که از مجموع کسری دوره قبل به علاوه تقاضا در هر دوره منهای، مجموع موجودی دوره قبل، تعداد کانتینرهای تخلیه شده و عرضه در هر دوره می‌باشد. محدودیت (۵)، یک تعادل منطقی می‌باشد. فرض کنید اگر از کشتی‌ای که در دوره  $t-\tau$  از بندر  $i-1$  حرکت و در دوره  $t$  به بندر  $i$  می‌رسد، هیچ کانتینر خالی تخلیه نگردد ( $x u_{tpv} = 0$ )، آنگاه کانتینرهای خالی که توسط کشتی  $v(t, p)$  به بندر  $i$  منتقل می‌شوند به علاوه کانتینرهای خالی که بر کشتی  $v(t, p)$  بارگیری می‌شوند برابر تعداد کانتینرهایی هستند که توسط کشتی  $v(t, p)$  از بندر  $i$  به بندر بعد منتقل می‌شوند. به همین شکل اگر بر کشتی‌ای که در دوره  $t-\tau$  از بندر  $i-1$  حرکت و در دوره  $t$  به بندر  $i$  می‌رسد، هیچ کانتینر خالی بارگیری نگردد ( $x l_{tpv} = 0$ )، آنگاه کانتینرهای خالی که توسط کشتی  $v(t, p)$  به بندر  $i$  منتقل می‌شوند منهای کانتینرهای خالی که از کشتی  $v(t, p)$  تخلیه می‌شوند برابر تعداد کانتینرهایی هستند که توسط کشتی  $v(t, p)$  از بندر  $i$

۴ (بنادر صادراتی)، بیشتر است. و با دنیای واقعی کاملا مطابقت دارد. اما همان‌طور که در جدول (۶) مشهود است از دوره ۱ حجم موجودی کانتینر خالی در بنادر ۳ و ۵ به واسطه بارگیری کانتینرهای خالی موجودی بر کشتی‌های موجود در شبکه نسبت به موجودی بنادر ۳ و ۵ در دنیای واقعی جدول (۴)، کاهش یافته است. همچنین با توجه به برنامه حرکتی کشتی‌ها در شبکه، کانتینرهای موجودی در بنادر ۳ و ۵ پس از بارگیری به بندری (بنادر ۱ و ۲ و ۳) که با کسری کانتینر خالی مواجه‌اند انتقال داده شده است، به‌طوری که بر اساس جدول (۶) در بندر ۱ از دوره ۳ به بعد و در بنادر ۲ و ۴ از دوره ۴ به بعد سطح موجودی به واسطه تخلیه کانتینر خالی از کشتی‌های شبکه افزایش داشته است و در نتیجه آن سطح کسری در این بنادر، بنا بر جدول (۷)، به صفر رسیده است.

جدول (۷): مقادیر بدست آمده سطح کسری (مدل پیشنهادی)

بندر	دوره‌ها				
	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۰	۸	۰	۰	۰
۲	۰	۷	۱۳	۱۹	۰
۳	۰	۰	۰	۰	۰
۴	۹	۶	۱۳	۱۹	۰
۵	۰	۰	۰	۰	۰

به‌طور کلی می‌توان گفت که موجودی، در بنادر وارداتی از طریق تغییر موقعیت کانتینرهای خالی موجودی کاهش یافته و در نقطه مقابل حجم موجودی در بنادر صادراتی شبکه افزایش یافته است. که نشان‌دهنده کارایی مدل پیشنهادی، ارائه‌شده در به تعادل رساندن و حل مشکل در دنیای واقعی می‌باشد.

در جدول (۷)، مقادیر بدست آمده سطح کسری از حل مدل پیشنهادی مشاهده می‌شود. بنابر مقادیر جدول (۷)، در تمامی دوره‌های زمانی، سطح کسری در بنادر ۳ و ۵، صفر می‌باشد که با وارداتی بودن این بنادر و همچنین جدول (۴)، که نشان‌دهنده سطح موجودی در دنیای واقعی است، تطابق دارد. در بندر ۱، در دوره زمانی ۱ و ۲ مقادیر کسری منطبق بر میزان کسری در دنیای واقعی جدول (۵)، است. اما از دوره ۳ به بعد به‌واسطه انتقال کانتینرهای خالی به این بندر، سطح موجودی کانتینرهای خالی در این بندر افزایش داشته و به تبع آن سطح کسری در سایر دوره‌های افق برنامه‌ریزی کاهش و به صفر رسیده است. در بنادر ۲ و ۴، هم به همین صورت در دوره‌های ۱ تا ۴ مقادیر سطح کسری مطابق با دنیای واقعی به دست آمده است که نشان‌دهنده قابلیت انطباق مدل ارائه‌شده با دنیای واقعی است. اما از دوره ۵ به بعد به سبب تخلیه کانتینرهای خالی انتقال داده شده در این دو بندر سطح کسری به صفر رسیده است. نکته قابل توجه سه ستون آخر جدول (۷)، به عبارت دیگر دوره‌های زمانی ۵ و ۶ و ۷، می‌باشند که در این دوره‌ها سطح کسری در همه بنادر (صادراتی و وارداتی)، صفر به دست آمده است. و بیان‌گر آن است که مدل پیشنهادی، عدم تعادل کسری کانتینر خالی بین بنادر وارداتی و صادراتی شبکه را به تعادل رسانیده، به گونه‌ای که هیچ بندری با کسری کانتینر خالی مواجه نشود، که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل قطعی ارائه شده است.

جدول (۸): مقایسه نتایج حاصل از حل مدل‌ها و دنیای واقعی

هزینه کل محاسبه شده در دنیای	\$ ۸۷۱۸۹۵
هزینه کل حاصل از حل مدل پیشنهادی	\$ ۳۵۹۶۷۴
درصد کاهش هزینه کل مدل پیشنهادی نسبت به دنیای واقعی	٪۴۱/۲

جدول (۴)، (۵)، (۶)، (۷) و (۸) آمده است. برای حل هر مدل از نرم‌افزار Gams 24.1.3 که نرم‌افزاری پرکاربرد در حل مسائل برنامه‌ریزی ریاضی است، استفاده شد.

جدول (۴): سطح موجودی بنادر (دنیای واقعی)

بندر	دوره				
	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۸	۰	۰	۳	۰
۲	۴	۰	۰	۰	۰
۳	۱۴۷	۱۶۹	۱۹۳	۲۱۵	۲۴۵
۴	۰	۰	۰	۰	۰
۵	۱۷۹	۲۰۷	۲۱۳	۲۳۹	۳۱۳

در جدول (۴)، سطح موجودی کانتینر خالی در بنادر موجود در شبکه مورد مطالعه، در دنیای واقعی به منظور مقایسه نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود مقادیر موجودی در بنادر ۳ و ۴ شبکه، بیان‌گر سطح موجودی کانتینر خالی در این دو بندر به‌عنوان بنادر وارداتی شبکه است. در حالی که با توجه به مقادیر صفر جدول در بنادر ۱ و ۲ و ۴ شبکه در دوره‌های زمانی مختلف، این سه بندر به‌عنوان بنادر صادراتی شبکه دارای کسری کانتینر خالی نسبت به برآورده کردن تقاضای موجود هستند.

جدول (۵): سطح کسری (دنیای واقعی)

بندر	دوره				
	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۰	۸	۵	۰	۴
۲	۰	۷	۱۳	۱۹	۷
۳	۰	۰	۰	۰	۰
۴	۹	۶	۱۳	۱۹	۲۰
۵	۰	۰	۰	۰	۰

جدول (۵)، بیان‌گر مقادیر سطح کسری کانتینر خالی در بنادر شبکه در دوره‌های زمانی مختلف، در دنیای واقعی است. براساس مقادیر داده‌شده در جدول (۵) آشکار است که بنادر ۱ و ۲ و ۴، در دوره‌های زمانی مختلف با کسری کانتینر خالی به منظور پاسخ دادن به تقاضا مواجه‌اند، که بیان‌گر صادراتی بودن این بنادر در دنیای واقعی است. در حالی که در بنادر ۳ و ۵ شبکه، مقدار صفر برای سطح کسری لحاظ شده که در قیاس با جدول (۴)، که نشان‌دهنده سطح موجودی بنادر در دنیای واقعی است می‌توان گفت که بنادر ۳ و ۵ به‌عنوان بنادر وارداتی شبکه دارای حجم مازاد کانتینر خالی هستند و هیچ‌گاه با کسری کانتینر خالی روبرو نخواهند شد.

جدول (۶): سطح موجودی بنادر (مدل پیشنهادی)

بندر	دوره				
	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۸	۰	۴۴	۱۰۱	۹۴
۲	۴	۰	۰	۰	۴۰
۳	۹۶	۷۰	۱۲۰	۱۵۶	۱۸۶
۴	۰	۰	۰	۰	۴۳
۵	۱۲۰	۱۰۵	۱۱۱	۱۳۷	۱۷۳

با توجه به مقادیر بدست آمده از حل مدل پیشنهادی، برای سطح موجودی کانتینر خالی، در بنادر در دوره‌های مختلف زمانی در جدول (۶)، در قیاس با سطح موجودی در دنیای واقعی جدول (۴)، سطح موجودی در دوره‌های زمانی ابتدایی در بنادر ۳ و ۵ (بنادر وارداتی)، نسبت به بنادر ۱ و ۲

کشوری را در این بنادر به دنبال دارد، که این خود نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل ارائه‌شده در به تعادل رساندن سطح کسری کانتینر خالی در بنادر مختلف شبکه و بهینگی اهداف تعیین شده است. در نهایت براساس نتایج حاصل از آزمایش‌های عددی و مقایسه با دنیای واقعی، می‌توان نتیجه گرفت که مدل ارائه شده در تحقیق حاضر می‌تواند روش موثر و کارآمدی برای مسئله تغییر موقعیت کانتینرهای خالی در دنیای واقعی باشد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، مسئله مذکور با استفاده از سایر روش‌های بهینه‌سازی و ارائه مدل بهینه‌سازی مسئله تغییر موقعیت کانتینر خالی در شرایط عدم قطعیت بررسی و حل شود.

## مراجع

1. Choong, S. T., Cole, M. H., & Kutanoglu, E. (2002). Empty container management for intermodal transportation networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 38(6), 423-438.
2. Dong, J. X., & Song, D. P. (2009). Container fleet sizing and empty repositioning in liner shipping systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(6), 860-877.
3. Feng, C. M., & Chang, C. H. (2008). Empty container reposition planning for intra-Asia liner shipping. *Maritime Policy & Management*, 35(5), 469-489.
4. FRANCESCO, DI. M., LAI, M. & ZUDDAS, P. 2013. Maritime repositioning of empty containers under uncertain port disruptions. *Computers & Industrial Engineering*, 64, 827-837.
5. Jula, H., Chassiakos, A., & Ioannou, P. (2006). Port dynamic empty container reuse. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 42(1), 43-60.
6. Li, J. A., Liu, K., Leung, S. C., & Lai, K. K. (2004). Empty container management in a port with long-run average criterion. *Mathematical and Computer Modelling*, 40(1), 85-100.
7. Li, J. A., Leung, S. C., Wu, Y., & Liu, K. (2007). Allocation of empty containers between multi-ports. *European Journal of Operational Research*, 182(1), 400-412.
8. MOON, I.-K., DO NGOC, A.-D. & HUR, Y.-S. 2010. Positioning empty containers among multiple ports with leasing and purchasing considerations. *OR spectrum*, 32, 765-786.
9. Moon, I., Do Ngoc, A. D., & Konings, R. (2013). Foldable and standard containers in empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), 107-124.
10. Olivo, A., Zuddas, P., Di Francesco, M., & Manca, A. (2005). An operational model for empty container management. *Maritime Economics & Logistics*, 7(3), 199-222.
11. SONG, D.-P. & ZHANG, Q. 2010. A fluid flow model for empty container repositioning policy with a single port and stochastic demand. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 48, 3623-3642.
12. Zhang, R., Yun, W. Y., & Moon, I. K. (2011). Modeling and optimization of a container drayage problem with resource constraints. *International Journal of Production Economics*, 133(1), 351-359.

در اینجا به مقایسه هزینه کل حاصل از حل مدل پیشنهادی، و دنیای واقعی پرداخته می‌شود. در جدول (۸)، مقادیر هزینه کل مربوط به دنیای واقعی و هزینه کل حاصل از حل مدل پیشنهادی برای مسئله تغییر موقعیت کانتینر خالی، درج شده است. همان‌طور که در جدول (۸)، آمده است. استفاده از مدل پیشنهادی با هدف کاهش هزینه کل، همراه با کاهش هزینه قابل توجه برای مسئله تغییر موقعیت کانتینر خالی نسبت به دنیای واقعی است.

به‌طوریکه می‌توان گفت کاهش هزینه ۴۱/۲٪ در نتایج به‌دست آمده از حل مدل پیشنهادی نسبت به دنیای واقعی، به دلیل به تعادل رساندن سطح کسری کانتینر خالی در بنادر شبکه، باعث کاهش هزینه انبارداری، جابه‌جایی، استهلاک، چیدمان در بنادر وارداتی و همچنین کاهش هزینه کسری (خرید، اجاره ...) و هزینه فرصت از دست رفته، پاسخ‌گویی به تقاضا در زمان مناسب، رضایت‌مندی مشتری و افزایش ارزش‌آوری اقتصادی در بنادر صادراتی، شد که نشان‌دهنده کارایی مدل ارائه‌شده در به تعادل رساندن سطح کسری در مسئله و بهینگی اهداف تعیین‌شده می‌باشد.

## ۴- نتیجه‌گیری

با ورود کانتینر به عرصه حمل‌ونقل کالا، این حوزه دچار تحول عظیمی شده است. اما تا به امروز مشکل عدم توازن بین ورودی و خروجی کانتینر به بنادر همچنان باقی است. از این رو با توجه به اهمیت معضل کانتینر خالی در تمامی بنادر دنیا، در این پژوهش به بررسی مسئله تغییر موقعیت کانتینر خالی با در نظر گرفتن شکاف‌های نظری و انطباق آن با دنیای واقعی پرداخته شده است.

در این راستا مدل برنامه‌ریزی جدید، با هدف کمینه کردن هزینه کل و در نظر گرفتن همزمان سطح کسری و موجودی ارائه شده است. از نقاط قوت مدل ارائه‌شده در این پژوهش تضمین به تعادل رساندن سطح کسری و مزاد کانتینر خالی در بنادر مختلف موجود در شبکه حمل‌ونقل می‌باشد که برای اولین بار در این زمینه انجام شده است.

در تحقیق حاضر، به‌منظور اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده برای مسئله تغییر موقعیت کانتینر خالی، با در نظر گرفتن یک شبکه مکانی - زمانی از بنادر دریایی ایران و داده‌های مربوط به بنادر موجود در شبکه، مدل پیشنهادی به روش برنامه‌نویسی خطی با استفاده از نرم‌افزار Gams حل شد. نتایج محاسباتی به‌دست آمده نشان‌داد که استفاده از مدل پیشنهادی با کاهش هزینه قابل توجهی برای مسئله تغییر موقعیت کانتینر خالی نسبت به دنیای واقعی همراه است. به‌طوری‌که می‌توان گفت کاهش هزینه ۴۱/۲٪ در نتایج به‌دست آمده از حل مدل ارائه‌شده، نسبت به دنیای واقعی، به علت به تعادل رساندن سطح کسری در بنادر مختلف بوده است، که در نتیجه آن کاهش هزینه انبارداری، جابه‌جایی، استهلاک و چیدمان کانتینر خالی در بنادر وارداتی و همچنین کاهش هزینه کمبود و هزینه فرصت از دست رفته در بنادر صادراتی، به میزان چشمگیری رخ داده است. همچنین به صفر رساندن سطح کسری بنادر موجود در شبکه مورد مطالعه که از نتایج اصلی حاصل از حل مدل پیشنهادی است، پاسخ‌گویی به تقاضا در زمان مناسب، افزایش رضایت‌مندی مشتری و ارزش‌آوری به لحاظ اقتصاد