

# تغییر موقعیت کانتینر خالی تحت شرایط عدم قطعیت با رویکرد ترکیبی

## بهینه‌سازی استوار و مدیریت ریسک

### (مورد مطالعاتی: شبکه بنادر دریایی ایران)

مجید عباسی، دانش آموخته کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
نسیم نهاوندی\*، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: N-Nahavandi@Modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۱۸ – پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۵

صفحه ۱۱۹-۱۳۴

#### چکیده

با ورود کانتینر به عرصه حمل و نقل کالا، این حوزه دچار تحول عظیمی شده است. اما تا به امروز همچنان مشکل عدم توازن بین ورودی و خروجی کانتینر به بنادر یا بر جاست. این ناهماهنگی بین واردات و صادرات کالا، معضلی به نام کانتینر خالی را به وجود آورده است. در این مقاله نظر به چالش‌های تئوریک و کاربردی مساله مذکور، به بررسی تغییر موقعیت کانتینر خالی در شرایط قطعی و غیرقطعی بودن برخی از پارامترهای مساله، پرداخته شده است. در ابتدا مدل جدید برنامه‌ریزی دو هدفه تغییر موقعیت کانتینر خالی در شرایط قطعی برای اولین بار در ادبیات موضوع، ارائه شده است. در گام بعدی از رویکرد ترکیبی بهینه‌سازی استوار و مدیریت ریسک به منظور کاهش اثرات نوسانات پارامترهای غیرقطعی تحت سناریوهای مختلف در دنیای واقعی استفاده شده است. مدل استوار تغییر موقعیت کانتینر خالی با در نظر گرفتن عدم قطعیت برخی از پارامترهای مساله، شامل تقاضا، عرضه، ظرفیت تخلیه و بارگیری، تحت سه سناریو مختلف، که سناریوهای محتمل با استفاده از روش مدیریت ریسک تعیین شده‌اند، ارائه شده است. به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی هر دو مدل ارائه شده، از مجموعه داده‌های مربوط به شبکه بنادر دریایی ایران استفاده شده است. نتایج محاسباتی حاصله نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل قطعی پیشنهادی و همچنین کارایی مدل استوار پیشنهادی در شرایط غیرقطعی و اهمیت استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار در ایجاد برنامه‌های استوار تغییر موقعیت کانتینر خالی در شرایط عدم قطعیت است.

واژه‌های کلیدی: تغییر موقعیت کانتینر خالی، عدم قطعیت، بهینه‌سازی استوار، مدیریت ریسک

#### ۱- مقدمه

می‌شود که بخش رو به رشدی از این حجم با توجه به فواید حمل با کانتینر از قبیل کاهش آسیب دیدگی و بالا بردن بهره‌وری در خلال مراحل جابجایی، با استفاده از کانتینر انتقال داده شده است. بدون شک یکی از عوامل توسعه حمل و نقل و افزایش سرعت آن در دنیای امروز به وجود آمدن حمل و نقل کانتینری است. جایگاه حمل و نقل کانتینری در صنعت حمل و نقل جایگاهی تثبیت شده و رو به

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 ۷.۱٪ رشد کرده است و توان ترمنال‌های کانتینری در سال ۲۰۱۱ تا ۵.۹٪ افزایش یافته است (Kaveshgar, N. and Huynh, N., 2015). درحالی‌که این روند رو به رشد تا به امروز با شدت بیشتری ادامه داشته است. بیش از ۸۰٪ تجارت جهانی از طریق دریا انجام

توسعه است. اما آنچه در عرصه حمل و نقل کانتینری به عنوان مساله‌ای 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 با هم متفاوت و بسیار کم است. مهمترین آسیب اقتصادی از این ناحیه، متوجه خطوط کشتیرانی است، از آنجایی که کانتینر جزو دارایی‌های این خطوط بوده 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، لذا ناگزیر تصمیم به ترک آن بندر می‌گیرند، که در این صورت، بازنده اصلی مناطق اطراف این بنادر یا حتی کشوری که دچار عدم توازن در صادرات و واردات است، خواهد بود. نتیجه وقوع این اتفاق در بنادر یک کشور، علاوه بر اینکه هزینه‌های واردات را افزایش می‌دهد، وابستگی به بنادر دیگر کشورها را هم در پی دارد و عملاً استقلال اقتصادی کشور نیز با مخاطره روبه رو خواهد شد. 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 که 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 سرسام آور نگه‌داری، کمبود محوطه نگه‌داری و... شود. در سال‌های اخیر با توجه به اهمیت مساله، مدل‌های مختلفی برای مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی در شرایط قطعی و غیرقطعی ارائه شده است. اولین مطالعات بر برنامه‌ریزی کانتینر خالی به اوایل ده ۱۹۷۰ برمی‌گردد. وایت، الگوریتمی برای حل مساله توزیع کانتینر خالی ارائه کرده است (White, 1972). ارمول و همکاران، به بررسی مدل شبکه‌ای برای برنامه‌ریزی کانتینرهای خالی روی کشتی با در نظر گرفتن هزینه حمل و نقل و هزینه اجاره کانتینر پرداخته است (Ermol'ev et al, 1976). شان و همکاران، یک سیستم پشتیبانی

تصمیم، برای تغییر موقعیت چند دوره‌ای کانتینرهای خالی پیشنهاد داده‌اند (Shen et al, 1995). سایر مدل‌هایی که در ده ۲۰۰۰ برای حل مسائل تغییر موقعیت کانتینر خالی ارائه شده‌اند (Wong et al, 2010 و Li et al, 2008 و Song, 2007 و Feng et al, 2008 و Olivo et al, 2005). چائو و همکاران، یک مدل ریاضی برای تغییر موقعیت کانتینر در شبکه خدمات چند محصولی شرق و شمال چین ارائه کرده‌اند (Chao et al, 2012). سانگ و دانگ، به بررسی سیاست تغییر موقعیت کانتینرهای خالی با در نظر گرفتن بنادر مقصد انعطاف‌پذیر پرداخته‌اند (Song et al, 2011). بل و همکاران، مدل تخصیص کانتینر برای به حداقل رساندن هزینه تخصیص کانتینرها به مسیرهای مختلف ارائه داده‌اند، که به روش برنامه‌نویسی خطی حل شده است (Bell et al, 2013). بریکرز و همکاران، مدلی با هدف تعیین مسیرهای بهینه حمل و نقل به منظور توزیع خدمات بین بندر اصلی و چند بندر دور دست، در زمینه تغییر موقعیت کانتینر خالی ارائه داده‌اند (Braekers et al, 2013). سایر تحقیقات منتشر شده، شامل اصول بحرانی مختلف بر شبکه خدمات، افق برنامه‌ریزی، و حمل و نقل درون مرزی، و همچنین شرایط عدم تعادل کانتینر بین بنادر است (Saeidi et al, 2013 و Yun et al, 2011 و Meng, Q. and Wang, S., 2011). اکثر تحقیقات انجام شده به بررسی مساله تغییر موقعیت کانتینرهای خالی در شرایط قطعی پرداخته‌اند. در حالی که امروزه عدم قطعیت، به عنوان چالشی اساسی برای بسیاری از شرکت‌های حمل و نقل و خطوط کشتیرانی مطرح است، به طوریکه نیاز به داشتن برنامه‌ریزی که بتواند در شرایط عدم قطعیت جواب قابل اعتمادی داشته باشد رو به افزایش است. شرایط عدم قطعیت در حالت‌های متفاوتی رخ می‌دهد، به عنوان مثال تقاضای نامعین، خرابی‌های تصادفی و... که می‌توانند منجر به عدم تحقق برنامه تعیین شده در موعد مقرر شوند. در نظر گرفتن عدم قطعیت در مسائل برنامه‌ریزی، یک فرض بسیار مهم است. به طوری که می‌توان گفت مدل‌های برنامه‌ریزی که عدم قطعیت را تشخیص نمی‌دهند، می‌توانند منجر به تصمیمات اشتباه شوند. اما در اکثر مسائلی که در این زمینه حل شده است فرض بر این بوده است که اطلاعات قطعی و از پیش تعیین شده می‌باشند. که در دنیای واقعی این فرض محدود کننده و

غیر واقعی به نظر می‌رسد. زیرا مسائلی همچون خطای اندازه‌گیری، خطای پیش‌بینی و ... می‌توانند قطعیت پارامترهای این مساله را تحت تاثیر قرار دهند. بنابراین نیاز به مدل‌هایی که بتوانند مساله برنامه‌ریزی تغییر موقعیت کانتینر خالی را با فرض عدم قطعیت مدل نمایند احساس می‌شود. سانگ و همکاران، مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی، را با در نظر گرفتن تقاضای تصادفی در بنادر فرموله کرده‌اند (Song, D.P. and Zhang, Q., 2010). فرانسيسكو و همکاران، به بررسی مساله تغییر موقعیت کانتینرهای خالی در شبکه دریایی تحت اختلالات بندری پرداخته‌اند و به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط به داده‌های مساله از روش برنامه‌نویسی تصادفی با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف، استفاده کرده‌اند (Di Francesco et al, 2013). وانگ و همکاران، مدل بهینه‌سازی مبنی بر بازده با در نظر گرفتن تقاضای غیرقطعی برای مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی ارائه داده‌اند (Wong et al, 2015). در ادبیات رویکردهای مختلفی از قبیل برنامه‌نویسی ریاضی، رویکرد تصادفی و فازی، برای مقابله با شکل‌های مختلف عدم قطعیت استفاده شده است. اخیراً رویکرد بهینه‌سازی استوار، به‌عنوان تکنیکی قوی در مقابله با عدم قطعیت‌های مختلف دنیای واقعی در مسائل برنامه‌ریزی به کار گرفته شده است. بهینه‌سازی استوار با ایجاد راه‌حلی استوار و خوب برای هر پیش‌آمد، احتمالی از پارامترهای غیرقطعی، رویکردی بسیار کارا و مفید است. مفهوم بهینه‌سازی استوار در تحقیق در عملیات توسط مالوی و همکاران (Mulvey et al, 1995)، معرفی شده است. آنها یک رویکرد همتای استوار با یک تابع غیرخطی ارائه داده‌اند و عدم قطعیت‌ها را از طریق مجموعه سناریوهای گسسته بررسی کرده‌اند. بن-تال و نمیروفسکی، رویکرد بهینه‌سازی استوار برای فرموله کردن پارامترهای غیرقطعی پیوسته ارائه داده‌اند (Ben-Tal, A. and Nemirovski, A., 1998). بن-تال و همکاران، یک نظریه استوار از مسائل خطی، درجه دوم و مخروطی پیشنهاد داده‌اند (Ben-Tal, A. and Nemirovski, A., 2002). برتسیمس و همکاران، روش‌های استوار برای بهینه‌سازی گسسته در فضاهای پیوسته ارائه داده‌اند (Bertsimas, D. and Sim, M., 2003 و Bertsimas, D. and Thiele, A., 2004). هدف از این

مقاله، نظر به چالش‌های تئوریک و کاربردی مساله، ارائه راه‌کار و ایده‌های جدید در سطح سیستم به منظور بهبود عملکرد برنامه سیستم حمل و نقل کانتینری و کاهش شکاف بین تئوری و واقعیت با در نظر گرفتن اثر نوسانات پارامترهای غیرقطعی در دنیای واقعی است. در این مقاله در گام نخست، مدل برنامه‌ریزی جدید مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی، با دو هدف کمینه کردن هزینه کل و بیشینه کردن قابلیت دسترسی به کانتینر خالی در بنادر صادراتی و در نتیجه آن حداکثر کردن رضایت‌مندی مشتری و افزایش ارزش‌آوری اقتصادی، تحت شرایط قطعی ارائه شده است. در نظر گرفتن توأم سطح کسری و موجودی و محدودیت‌های مربوط، همچنین دو هدفه بودن مدل پیشنهادی، برای اولین بار در ادبیات موضوع انجام شده است. در گام بعدی مدل استوار مساله مذکور با در نظر گرفتن عدم قطعیت برخی از پارامترهای مساله در دنیای واقعی شامل تقاضا، عرضه، ظرفیت تخلیه و بارگیری، تحت سه سناریو مختلف در دنیای واقعی ارائه شده است. از رویکرد بهینه‌سازی استوار به عنوان رویکردی نوین و قوی به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها و کاهش اثر نوسانات پارامترهای غیرقطعی استفاده شده است. همچنین به منظور تعیین و ارزیابی سناریوهای محتمل، از رویکرد مدیریت ریسک استفاده شده است. به منظور آزمایش اثربخشی و کارایی، هر دو مدل قطعی و استوار ارائه شده از مجموعه داده‌های شبکه بنادر دریایی ایران استفاده شده است. ادامه این مقاله به صورت زیر ساختار داده شده است: در بخش ۲، تعریف و مدل‌سازی مساله در شرایط قطعی و غیرقطعی ارائه شده است. در بخش ۳، مدل‌های ارائه شده در این مقاله، با سایر تحقیقات پیشین مقایسه شده است. در بخش ۴، به آزمایش عددی و مقایسه نتایج پرداخته شده است. و در نهایت در بخش ۵، نتیجه‌گیری و پیشنهاد تحقیقات آتی بیان شده است.

## ۲- تشریح مساله

در جریان حمل و نقل کانتینری، کانتینرهای پر، از بندر مبدا 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 شده، در حالی که بنادر صادراتی با کمبود کانتینر خالی مواجه‌اند (Di Francesco et al, 2013). این عدم توازن باعث می‌شود تا بنادر وارداتی با مشکلاتی از قبیل هزینه‌های سرسام‌آور چیدمان، نگهداری، تخلیه و بارگیری، کمبود محوطه و امکانات نگهداری و غیره، مواجه باشند. در حالی که 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 هستند. بنابراین شرکت‌های حمل و نقل کانتینری برای رفع این مشکل باید بصورت دوره‌ای، کانتینرهای خالی را بین بنادر وارداتی و صادراتی انتقال دهند. در واقع هدف از مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی، انتقال کانتینر خالی بدون استفاده، از بنداری که دارای مازاد کانتینر خالی هستند به بنداری که با کسری کانتینر خالی مواجه‌اند، است. که در مقاله حاضر به بررسی آن پرداخته شده است. در این راستا به منظور کاهش شکاف بین تئوری و واقعیت، مدل برنامه‌ریزی دو هدفه جدید در شرایط قطعی برای مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی ارائه شده است. به طوری که مساله و اهداف مورد مطالعاتی (کمینه کردن هزینه کل و بیشینه کردن قابلیت دسترسی به کانتینر خالی در بنادر صادراتی)، را با در نظر گرفتن مفروضات و محدودیت‌های موجود بهینه گردد، فرمول‌بندی و حل کرد. همچنین به دلیل عدم قطعیت‌های حاکم بر مساله در دنیای واقعی، از روش بهینه‌سازی استوار و سناریو‌بندی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها و داده‌های مساله استفاده شده است. بنابراین با توجه به داده‌های گذشته مربوط به هر عدم قطعیت، سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده است. در واقع برای حل مدل استوار تغییر موقعیت کانتینر خالی، باید مقادیری از پارامترهای نامشخص، که با احتمال بیشتری رخ می‌دهند تعیین شود. در این مقاله از روش رتبه‌بندی ریسک به منظور تعیین سناریوهای محتمل استفاده شده است. مدیریت ریسک مستلزم شناسایی، ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک‌های مختلف است. ارزیابی ریسک یکی از ارکان مدیریت ریسک بوده و هدف آن اندازه‌گیری ریسک‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف از قبیل میزان تاثیر و احتمال وقوع می‌باشد و هر چه نتایج این مرحله دقیق‌تر باشد می‌توان گفت که فرایند مدیریت ریسک با درجه اطمینان بالاتری انجام می‌گیرد. در واقع روش رتبه‌بندی ریسک روشی کیفی برای سنجش اثر ریسک‌های موجود است. به طوری که تحلیل کیفی ریسک، سطح اهمیت ریسک‌های مشخص شده را برآورده کرده و اولویت‌بندی ریسک‌های موجود را ارائه می‌دهد به این منظور دو مشخصه احتمال

وقوع و احتمال تاثیر به صورت زیر تعریف می‌گردد: احتمال وقوع، هر سناریو می‌تواند با احتمال مشخصی رخ دهد. تاثیر ریسک، مولفه دوم ریسک که میزان تاثیر وقوع هر سناریو است که در صورت وقوع بر یک یا چند هدف مساله تاثیر می‌گذارد. بنابراین بر مبنای روش رتبه‌بندی ریسک، از جمله اصلی‌ترین عواملی که باعث عدم اطمینان در پارامترهای مساله مذکور شده‌اند و معمولاً در تمامی بنادر، در دنیای واقعی اتفاق می‌افتد و در این تحقیق به بررسی آنها پرداخته شده است عبارتند از:

- شرایط جوی (سیل، طوفان، ...)
- نقص فنی دستگاه و تجهیزات

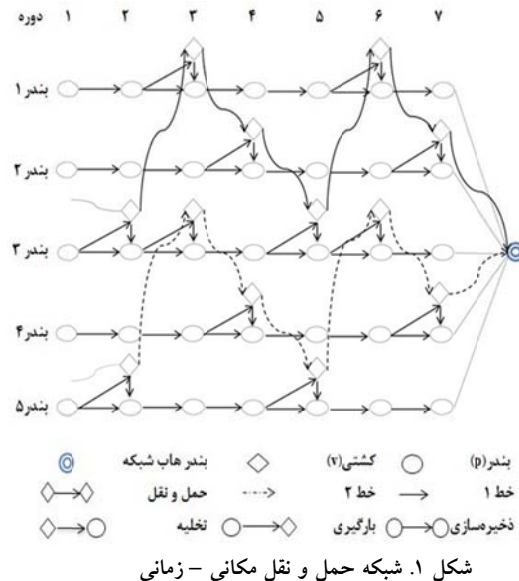
سناریو اول زمانی که عملیات بندری (تخلیه، بارگیری، انتقال کانتینر خالی و...) به صورت نرمال انجام می‌گیرند. و سناریو دیگر زمانی که عملیات بندری تحت تاثیر شرایط جوی نامناسب و نقص فنی دستگاه و تجهیزات به صورت غیر نرمال انجام می‌گیرد. بنابراین در این مقاله عدم قطعیت پارامترهای مساله تحت تاثیر سه سناریو با احتمال مشخص در دنیای واقعی بررسی شده است که برای اولین بار در ادبیات موضوع به انجام رسیده است. قابل ذکر است پارامترهایی که در این پژوهش بصورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است شامل تقاضا، عرضه و ظرفیت جابجایی (تخلیه و بارگیری)، کانتینر خالی است. در این مساله به دلیل غیرقطعی بودن برخی پارامترهای مساله از برنامه‌ریزی استوار به‌عنوان رویکردی که کارا تر از سایر روش‌های مقابله با عدم قطعیت است، برای بهینه‌سازی مساله استفاده شده است. در این مقاله به منظور توصیف مساله، یک شبکه حمل و نقل مکانی- زمان  $G(P,V)$  در نظر گرفته شده است که در آن  $P$  نشان‌دهنده مجموعه بنادر و  $V$  نشان‌دهنده مجموعه کشتی‌های موجود در شبکه است. شکل ۱، نشان‌دهنده شبکه مکانی- زمانی حمل و نقل دریایی است که به منظور تحلیل و مدل‌سازی مساله طراحی شده و متشکل از ۷ دوره زمانی، بنادر که در هر دوره تکرار، و با علامت بیضی نشان داده شده‌اند. کشتی‌ها که با لوزی در دوره‌هایی که به بنادر می‌رسند و خطوط کشتی‌رانی که با مسیرهای ۱ و ۲ در شکل ۱، مشخص شده‌اند. به عنوان مثال کشتی 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، نشان‌دهنده جریان تخلیه کانتینر خالی از کشتی هستند. و کمان‌ها از بنادر به کشتی نشان‌دهنده جریان بارگیری کانتینرها هستند. مفروضات در نظر گرفته شده در این مساله عبارتند از:

- تقاضای مشتری برای کانتینر خالی باید برآورده شود.
- عرضه برابر است با تعداد کانتینرهای که بعد از تخلیه بار یا تعمیرات نگهداری در هر دوره به چرخه حمل و نقل اضافه می‌شوند.
- موجودی برابر است با تعداد کانتینرهای خالی که در انتهای هر دوره باید ذخیره و نگهداری شود.
- فقط یک نوع از حالات حمل و نقل در نظر گرفته می‌شود (کشتی).
- محدودیتی برای خرید و اجاره کانتینر خالی به منظور برآورده کردن تقاضای مشتری وجود ندارد.

### پارامترها

بندر	$p$
کشتی	$v$
دوره زمانی	$t$
فاصله زمانی بین دو بندر متوالی	$\tau$
اندیس نشان‌دهنده هر سناریو	$s$
مجموعه سناریوها	$\Omega$
احتمال هر سناریو	$p_s$
وزن جریمه برای محدودیت‌های نشدنی	$\omega$
پارامتر تعادلی ریسک بین میانگین مقدار تابع هدف و واریانس آن	$\lambda$
مقدار جریمه برای نشدنی بودن محدودیت‌های کنترلی تحت سناریو $s$	$\delta_s$
مقدار انحراف تابع هدف از میانگین آن تحت سناریو $s$	$\theta_s$
مجموعه بنادر	$P$
مجموعه کشتی‌هایی که در دوره $t$ به بندر $p$ می‌رسند.	$\mathcal{I}(p, t)$
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 $v \in \mathcal{I}(t, p)$ در بندر $p$ سپری می‌کند.	$\alpha_{tpv}$
هزینه نگهداری کانتینر خالی در بندر $p$ در دوره $t$	$ci_{tp}$
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 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 $v \in \mathcal{V}(t, p)$	$U_{tpv}$



$$xS_{tp} = xS_{t-1p} + D_{tp} - xi_{(t-1)p} - \sum_{v \in V(p,t)} xu_{(t-\alpha_{pv})pv} \quad (5)$$

$$-S_{tp}, \forall p \in P, \forall t \in T$$

$$xr_{(t-\tau)(p-1)v} - xr_{tpv} - xu_{tpv} + xl_{tpv} = 0 \quad (6)$$

$$\forall v \in V(p,t), \forall p \in P, \forall t \in T$$

$$xl_{tpv} + xu_{tpv} \leq U_{tpv} \quad (7)$$

$$\forall v \in V(p,t), \forall p \in P, \forall t \in T$$

$$xr_{tpv} \leq Ur_{tpv} \quad (8)$$

$$\forall v \in V(p,t), \forall p \in P, \forall t \in T$$

$$xl_{tpv}, xu_{tpv}, xr_{tpv}, xS_{tp}, xi_{tp}, w_t \geq 0 \quad (9)$$

$$\forall v \in V(p,t), \forall p \in P, \forall t \in T$$

تابع هدف (۱)، عبارت است از حداقل نمودن هزینه کل، قسمت اول مربوط به مجموع هزینه حمل و نقل، تخلیه و بارگیری کانتینر خالی است و قسمت دوم مربوط به هزینه نگهداری موجودی و کسری کانتینر خالی است. تابع هدف (۲)، بیشینه کردن قابلیت دسترسی به کانتینر خالی در بنادر صادراتی و به تبع آن حداکثر کردن رضایت‌مندی مشتری و افزایش ارزآوری اقتصادی، از طریق کمینه کردن مجموع حداکثر کسری کانتینر خالی در بنادر صادراتی، در دوره‌های زمانی مختلف است.

تابع هدف (۲)، مدل ارائه شده، غیرخطی بوده که به منظور کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی به صورت زیر خطی شده است:

$$\min \sum_t w_t \quad (10)$$

$$w_t \geq xS_{tp} \quad \forall t \in T, \forall p \in P \quad (11)$$

$$w_t \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (12)$$

رابطه (۳)، 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 هر دوره تجاوز کند. محدودیت (۵)، بیانگر سطح کسری هر بندر در دوره‌های زمانی مختلف است که از مجموع کسری دوره قبل به علاوه تقاضا در هر

در مدت زمانی که در بندر  $p$  سپر می‌کند.

$Ur_{tpv}$  ظرفیت کشتی  $v$  برای انتقال کانتینر خالی از بندر  $p$  به سایر بنادر در دوره  $t$  ام

#### متغیرها

$xi_{tp}$  سطح موجودی کانتینر خالی در بندر  $p$  در انتهای دوره  $t$  ام

$xS_{tp}$  سطح کسری کانتینر خالی در بندر  $p$  در دوره  $t$  ام

$xu_{tpv}$  تعداد کانتینر خالی که باید در بندر  $p$  در دوره  $t$  از کشتی  $v \in V(p,t)$  تخلیه شوند.

$xl_{tpv}$  تعداد کانتینرهای خالی که در بندر  $p$  در دوره  $t$  که باید بر کشتی  $v \in V(p,t)$  باگیری شوند.

$xr_{tpv}$  تعداد کانتینر خالی که توسط کشتی  $v \in V(t,p)$  از بندر  $p$  در دوره  $t$  به سایر انتقال داده می‌شود.

#### ۲-۳- مدل قطعی ارائه شده

در این مقاله مدل برنامه‌ریزی تغییر موقعیت کانتینرهای خالی، با دو هدف، کمینه کردن هزینه کل شامل هزینه تخلیه و بارگیری، انتقال، کسری و هزینه نگهداری کانتینر خالی و حداکثر کردن قابلیت دسترسی به کانتینر خالی در بنادر صادراتی، با در نظر گرفتن هم‌زمان سطح موجودی و کسری کانتینر خالی و محدودیت‌های مرتبط برای اولین بار در ادبیات موضوع ارائه شده است. مدل ارائه شده برای مساله مذکور در شرایط قطعی به صورت زیر فرموله شده است:

$$\min \sum_t \sum_{p \in P} \sum_{v \in V(p,t)} (cl_{tpv} xl_{tpv} + cu_{tpv} xu_{tpv} + cr_{tpv} xr_{tpv}) \quad (1)$$

$$+ \sum_t \sum_{p \in P} cs_{tp} xS_{tp} + ci_{tp} xi_{tp}$$

$$\min \sum_t \max_p xS_{tp} \quad (2)$$

$$xi_{tp} = xi_{(t-1)p} + \sum_{v \in V(p,t)} xu_{(t-\alpha_{pv})pv} + S_{tp} \quad (3)$$

$$- \sum_{v \in V(p,t)} xl_{tpv} - xS_{(t-1)p} - D_{tp} \quad \forall p \in P, \forall t \in T$$

$$xi_{tp} \leq Ui_p \quad (4)$$

$$\forall p \in P, \forall t \in T$$

دوره منهای، مجموع موجودی دوره قبل، تعداد کانتینرهای تخلیه شده و عرضه در هر دوره می باشد.

محدودیت (۶)، تعادلی، منطقی است فرض کنید اگر از کشتی که در دوره  $t-T$  از بندر  $i-1$  حرکت و در دوره  $t$  به بندر  $i$  می رسد، هیچ کانتینر خالی تخلیه نگردد ( $xu_{tpv}=0$ )، آنگاه کانتینرهای خالی که توسط کشتی  $v(t,p)$  به بندر  $i$  منتقل می شوند بعلاوه کانتینرهای خالی که بر کشتی  $v(t,p)$  بارگیری می شوند برابر تعداد کانتینرهایی هستند که توسط کشتی  $v(t,p)$  از بندر  $i$  به بندر بعد منتقل می شوند. به همین شکل اگر بر کشتی که در دوره  $t-T$  از بندر  $i-1$  حرکت و در دوره  $t$  به بندر  $i$  می رسد، هیچ کانتینر خالی بارگیری نگردد ( $xl_{tpv}=0$ )، آنگاه کانتینرهای خالی که توسط کشتی  $v(t,p)$  به بندر  $i$  منتقل می شوند منهای کانتینرهای خالی که از کشتی  $v(t,p)$  تخلیه می شوند برابر تعداد کانتینرهایی هستند که توسط کشتی  $v(t,p)$  از بندر  $i$  به بندر بعد منتقل می شوند. محدودیت (۷)، بیان کننده ظرفیت جابجایی است بطوریکه حجم تخلیه و بارگیری کانتینر خالی بر کشتی  $v \in V(t,p)$  در مدت زمانی که در بندر سپری می کند نباید از  $U_{tpv}$  تجاوز کند. در محدودیت (۸)، حجم انتقال کانتینرهای خالی از بندر  $p$  توسط کشتی ها به سایر بنادر نباید بیشتر از ظرفیت کشتی ها باشد.

مدل ارائه شده در این مقاله، مدل دو هدفه است و به منظور تک هدفه کردن مدل ارائه شده و بدست آوردن یک مقدار جهت ارزیابی جواب ها با یکدیگر، از روش مجموع وزنی استفاده شده است. در این تحقیق با تایید نظر کارشناسان و خبرگان در تحقیقات میدانی انجام شده، نسبت به اهمیت هر کدام از توابع هدف وزن تابع هدف اول  $\omega_1=0.7$  و وزن تابع هدف دوم  $\omega_2=0.3$  در نظر گرفته شده است. در نهایت مدل پیشنهادی به مدل تک هدفه خطی تبدیل شده است. و تابع هدف مدل پیشنهادی پس از تک هدفه شدن با استفاده از روش وزن دهی به صورت زیر تغییر یافته است:

$$\min \omega_1 \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V(p,t)} (cl_{tpv} xl_{tpv} + cu_{tpv} xu_{tpv} + cr_{tpv} xr_{tpv}) + \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} cs_{tp} xs_{tp} + ci_{tp} xi_{tp} + \omega_2 \min \sum_t w_t \quad (13)$$

## ۲-۴- رویکرد بهینه سازی استوار

رویکرد بهینه سازی استوار برای به دست آوردن مجموعه ای از راه حل های استوار در مقابل نوسانات پارامترهای غیرقطعی استفاده شده است. در ادامه رویکرد بهینه سازی استوار ارائه داده شده توسط مالوی و همکاران (Mulvey et al, 1995)، به صورت خلاصه تشریح

شده است.

مدل LP بهینه سازی اولیه را در نظر بگیرید.

$$\text{Min } Cc^T + d^T y \quad (13)$$

Subject TO :

$$Ax = b \quad (14)$$

$$Bx + Cy = e \quad (15)$$

$$x, y \geq 0. \quad (16)$$

جایی که  $x$  بردار متغیرهای تصمیم و  $y$  بردار متغیرهای کنترل است. محدودیت (۱۴) محدودیت ساختاری است که ضرایب آن قطعی و بدون نقص هستند. محدودیت (۱۵) محدودیت کنترلی است که ضرایب آن تصادفی هستند.

در بهینه سازی استوار مالوی و همکاران، عدم قطعیت پارامترها با مجموعه ای از سناریوها  $\Omega$  مدل شده است. بنابراین مجموعه  $B_s, C_s, e_s, d_s$  پارامترهای غیرقطعی تحت هر سناریو هستند. و  $\sum p_s = 1$  جایی که  $p_s$  احتمال سناریو  $s$  است. رویکرد بهینه سازی استوار سناریو محور شده به شرح پیوست می باشد.

$$\text{Min } \sigma(x, y_1, \dots, y_s) + \omega \rho(\theta_1, \dots, \theta_s) \quad (17)$$

St.

$$Ax = b \quad (18)$$

$$B_s x + C_s y_s + \theta_s = e_s, \forall s \in \Omega \quad (19)$$

$$x \geq 0, y_s \geq 0, \omega_s \geq 0, \forall s \in \Omega \quad (20)$$

هدف این مدل تعادل بین تبادلات استواری مدل و استواری راه حل است. راه حل بهینه در ارتباط با بهینگی همچنان استوار است اگر برای هر سناریو  $s \in \Omega$  همچنان نزدیک به بهینه باقی بماند (استواری راه حل). از طرف دیگر راه حل همچنان در ارتباط با استواری موجه است اگر برای هر سناریو خاص همچنان تقریباً موجه باقی بماند (استواری مدل). غیرموجه بودن مدل به وسیله تابع جریمه اندازه گیری می شود. پارامتر  $\theta_s$  برای استواری مدل تعریف شده است که عدم امکان پذیری در محدودیت های کنترلی تحت سناریو  $s$  را اندازه گیری می کند.

## ۲-۵- مدل بهینه سازی استوار ارائه شده

در این مقاله از رویکرد بهینه سازی ارائه شده توسط مالوی و همکاران (Mulvey et al, 1995) و اصلاح شده توسط یو و لی (Yu,

(C.S. and Li, H.L., 2000)، برای فرموله کردن مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی تحت شرایط عدم قطعیت استفاده شده است. در ادامه به منظور مدل سازی، مدل استوار پیشنهادی مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی، مدل قطعی پیشنهادی بر مبنای مالوی و همکاران (Mulvey et al, 1995)، فرمول بندی شده است. مدل بهینه سازی استوار ارائه شده برای مساله مذکور به صورت زیر است:

$$\min \sum_{s \in \Omega} p_s \zeta_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s \left[ \left( \zeta_s - \sum_{s \in \Omega} p_s \zeta_s \right) + 2\theta_s \right] \quad (21)$$

$$+ \omega \sum_{s \in \Omega} p_s \delta_s \quad \forall s \in \Omega$$

Subject to :

$$AX \leq b \quad (22)$$

$$\zeta_s - \sum_{s \in \Omega} p_s \zeta_s + \theta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (23)$$

$$\theta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (24)$$

قسمت اول و دوم تابع هدف (۲۱)، استواری راه حل را اندازه گیری می کند. قسمت سوم در (۲۱)، استواری مدل را اندازه گیری می کند.  $\zeta_s^k$  نشان دهنده تابع هدف مدل قطعی تحت سناریو s است.  $P^s$  بیانگر احتمال رخ داد هر سناریو می باشد.  $\theta_s$  متغیر مثبتی تحت سناریو s است که در مالوی و همکاران [۲۰] و اصلاح شده توسط یو و لی [۲۶]، به منظور خطی کردن مدل، بکار گرفته شده است. رابطه (۲۲)، محدودیت ساختاری مدل استوار است که نشان دهنده محدودیت های مدل قطعی می باشد. و رابطه (۲۳)، که به منظور خطی سازی مدل توسط یو و لی (Yu, C.S. and Li, 2000, H.L.)، به مدل اضافه شده است.

و روش حل مورد مقایسه قرار گرفته اند. در جدول ۶، ویژگی هایی که با علامت \* مشخص شده اند برای اولین بار در ادبیات موضوع تغییر موقعیت کانتینر خالی، در هر دو مدل قطعی و استوار پیشنهادی در تحقیق حاضر ارائه شده اند.

#### ۴- آزمایش عددی

در این مقاله به منظور آزمایش عددی و اعتبارسنجی کارایی مدل قطعی و مدل استوار ارائه شده برای مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی، یک شبکه مکانی - زمانی حمل و نقل از بنادر دریایی ایران، به عنوان یک مورد مطالعاتی واقعی و ملموس در نظر گرفته شده است. شبکه مورد مطالعه، متشکل از ۵ بندر، ۲ خط کشتیرانی و ۴ کشتی است که در هفت دوره زمانی با هدف انتقال کانتینرهای خالی از بنداری که دارای مازاد کانتینر خالی هستند، به بنداری که با کسری کانتینر خالی مواجه اند و همچنین به تعادل رساندن مساله، طراحی و در نظر گرفته شده است. داده های مورد استفاده در این مقاله، مربوط به بنادر ایرانی موجود در شبکه می باشد که برای پارامترهای مساله تحت سه سناریو مختلف در دنیای واقعی، از طریق تحقیقات میدانی و کتابخانه ای بدست آمده اند. (قابل ذکر است که مقادیر مربوط به پارامترهای هزینه بر مبنای تعرفه های سازمان بنادر و دریانوردی در تمام بنادر و دوره های زمانی مختلف شبکه، یکسان در نظر گرفته شده اند، و مقادیرشان در بخش ضمایم آمده است. همچنین جداول مربوط به سایر داده ها، در جداول ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۳، در بخش ضمایم آمده اند). لازم به ذکر است که به منظور حل هر مدل از نرم افزار Gams 24.1.3 که نرم افزاری پرکاربرد در حل مسائل برنامه ریزی ریاضی است، استفاده شده است.

#### ۴-۱- نتایج حاصل از حل مدل

در این بخش، نتایج محاسباتی حاصل از آزمایش های عددی به منظور ارزیابی اثربخشی و کارایی مدل استوار تغییر موقعیت کانتینر خالی ارائه شده، در مقایسه با مقادیر به دست آمده برای متغیرهای مساله در دنیای واقعی تحت سناریوهای مختلف، که از طریق تحقیقات میدانی و کتابخانه ای، تحت نظر کارشناسان مربوطه به دست آمده اند. با احتمالات ۰.۵۵ و ۰.۲۶ و ۰.۱۹، بیان شده است. در جدول (۱)، مقادیر موجودی کانتینر خالی بنادر شبکه، تحت سناریوهای مختلف در دنیای واقعی نشان داده شده است. براساس

#### ۳- مقایسه با تحقیقات پیشین

در این بخش به مقایسه مدل قطعی و استوار ارائه شده در این مقاله، با سایر مدل های ارائه شده در زمینه تغییر موقعیت کانتینر خالی، پرداخته شده است. به منظور مقایسه مد نظر مشخصه های اصلی در مدل های ارائه شده، استخراج شده است. و وجود یا عدم وجود این مشخصه ها در مدل ها در جدول ۶ (بخش پیوست ها)، مورد مقایسه گرفته شده است. در جدول ۶، مشخصه هایی نظیر: تعداد و نوع توابع هدف، در نظر گرفتن یا ننگرفتن سطح کسری و موجودی، افق برنامه ریزی، به تعادل رساندن سطح کسری و مازاد کانتینر خالی



۳ و ۵، نشان‌دهنده وارداتی این بنادر می‌باشد. در حالی‌که مقادیر صفر در بنادر ۱ و ۲ و ۴ در دوره‌های زمانی مختلف و همچنین بنابر جدول (۹)، که نشان‌دهنده کمبود کانتینر خالی نسبت به برآورده کردن تقاضای موجود در این بنادر، و مساله عدم تعادل سطح کسری کانتینر خالی در دنیای واقعی است.

مقادیر سطح موجودی در جدول فوق، تحت سناریو ۲، همه‌ی بنادر شبکه دارای موجودی کانتینر خالی هستند که این موضوع به دلیل سطح بسیار پایین تقاضا (جدول ۷)، برای کانتینر خالی و در نتیجه آن انباشته شدن کانتینرهای خالی در همه بنادر، تحت سناریو ۲ است. اما تحت سناریو ۱ و ۳، مقادیر موجودی کانتینر خالی در بنادر

جدول ۱. سطح موجودی در بنادر شبکه تحت سناریوهای مختلف (دنیای واقعی)

دوره							$xi_{ip}^s$	
۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	بنادر	سناریو
۰	۰	۰	۳	۰	۰	۸	۱	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۲	
۳۰۰	۲۷۷	۲۴۵	۲۱۵	۱۹۳	۱۶۹	۱۴۷	۳	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	
۳۵۲	۳۱۵	۳۱۳	۲۳۹	۲۱۳	۲۰۷	۱۷۹	۵	
۵۹	۴۵	۳۱	۲۳	۴۱	۲۷	۱۸	۱	۲
۵۷	۵۴	۴۸	۳۲	۳۸	۲۷	۸	۲	
۳۱۶	۲۸۸	۲۷۶	۲۵۸	۲۳۵	۲۳۷	۲۱۵	۳	
۴۵	۳۷	۲۴	۳۰	۱۶	۱۹	۶	۴	
۳۱۹	۳۱۷	۳۱۰	۳۰۱	۲۹۳	۲۷۴	۲۶۸	۵	
۸	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۱	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	
۲۷۴	۲۶۰	۲۴۷	۲۴۱	۲۱۲	۱۸۸	۱۷۳	۳	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۴	
۲۴۰	۲۴۸	۲۵۱	۲۲۱	۲۱۳	۲۱۲	۲۱۰	۵	

جدول ۲. سطح کسری تحت سناریوهای مختلف (دنیای واقعی)

دوره							$xs_{ip}^s$	
۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	بنادر	سناریو
۱۰	۱۴	۴	۰	۵	۸	۰	۱	۱
۲۳	۲۰	۷	۱۹	۱۳	۷	۰	۲	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	
۴۶	۴۲	۲۰	۱۹	۱۳	۶	۹	۴	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵	
۰	۵	۷	۱۰	۵	۰	۲	۱	۳
۱۸	۱۰	۹	۵	۱۱	۲	۵	۲	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	
۲۱	۹	۱۷	۱۴	۸	۹	۰	۴	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵	

در جدول (۲)، مقادیر سطح کسری در دنیای واقعی تحت سناریوهای مختلف آورده شده است.

براساس مقادیر موجود در جدول فوق، سطح کسری تحت سناریو ۲، در همه بنادر، در تمام دوره‌های زمانی صفر است که کاملاً منطقی می‌باشد زیرا تحت سناریو ۲، به علت پایین بودن سطح تقاضا، معمولاً کانتینرهای خالی هم در بنادر صادراتی و هم در بنادر وارداتی انباشته شده و هیچ مشکلی به جهت پاسخ دادن به تقاضای کم ندارند. علاوه بر این، سطح کسری در بنادر ۳ و ۵، تحت سناریوهای مختلف صفر

است که این نیز بنا بر سطح موجودی بندر ۳ و ۵، در دنیای واقعی تحت سناریوهای مختلف (جدول ۱)، با وارداتی بودن این بنادر در دنیای واقعی مطابقت دارد. اما مساله اصلی مقادیر غیر صفر در بنادر ۱ و ۲ و ۴ در دوره‌های مختلف زمانی، تحت سناریو ۱ و ۳ می‌باشد که این نیز به دلیل سطح تقاضای بالا در این بنادر (بنادر صادراتی شبکه)، می‌باشد. که هدف از تحقیق حاضر حل این مساله و در نتیجه آن به تعادل رساندن سطح کسری کانتینر خالی در بنادر شبکه است.

جدول ۳. سطح موجودی در بنادر شبکه (مدل استوار)

دوره‌ها							$x_{itp}^s$	
۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	بندر	سناریو
۱۰۶	۱۰۲	۱۱۲	۱۱۹	۶۲	۰	۸	۱	۱
۸۱	۸۳	۴۳	۰	۰	۰	۴	۲	
۱۵۵	۲۱۳	۱۸۱	۱۵۱	۱۰۴	۵۴	۸۵	۳	
۷۸	۸۲	۴۶	۰	۰	۰	۰	۴	
۱۴۷	۱۵۲	۱۵۰	۱۱۴	۸۸	۸۲	۱۱۵	۵	
۶۶	۵۲	۳۸	۳۰	۴۸	۲۷	۱۸	۱	۲
۹۶	۹۳	۶۵	۳۲	۳۸	۲۷	۸	۲	
۲۹۳	۲۶۵	۲۵۳	۲۳۵	۲۱۲	۲۱۴	۲۰۵	۳	
۷۸	۷۰	۴۳	۳۰	۱۶	۱۹	۶	۴	
۳۰۱	۲۹۹	۲۹۲	۲۸۳	۲۷۵	۲۵۶	۲۵۸	۵	
۹۶	۸۳	۸۱	۷۸	۴۷	۲	۰	۱	۳
۸۴	۹۲	۴۹	۰	۰	۰	۰	۲	
۱۲۸	۱۷۸	۱۶۵	۱۵۹	۱۳۰	۸۳	۱۱۵	۳	
۱۰۱	۱۱۳	۴۸	۰	۰	۰	۲	۴	
۹۷	۱۵۲	۱۵۵	۱۲۵	۱۱۷	۱۱۶	۱۵۰	۵	

بعد، و ۲ و ۴ (از دوره ۴ به بعد)، به‌واسطه تخلیه کانتینرهای خالی منتقل شده توسط کشتی‌ها، افزایش یافته است.

میزان حجم این تغییرات نسبت به دنیای واقعی جدول (۱)، کاملاً مشهود است. اما در این بین با توجه به مقادیر قابل مشاهده در جدول فوق، در سناریو ۲ نسبت به سناریو ۱ و ۳، کاهش سطح موجودی در بنادر ۳ و ۵، و همچنین افزایش سطح موجودی در بنادر ۱ و ۲ و ۴، از طریق انتقال کانتینرهای خالی موجودی توسط کشتی از بنادر وارداتی به بنادر صادراتی، نمود کمتری دارد، که این امر نیز کاملاً منطقی می‌باشد زیرا تحت سناریو ۲، زمانی که عملیات تخلیه، بارگیری و ... تحت تاثیر شرایط نامناسب جوی بصورت نرمال انجام نمی‌گیرد. حجم تخلیه، بارگیری و انتقال کانتینرهای خالی به شدت کاهش می‌یابد که مقادیر به دست آمده در قسمت سناریو ۲، جدول نیز تصدیق کننده

بر مبنای مقادیر بدست آمده برای سطح موجودی تحت سناریوهای مختلف حاصل از حل مدل استوار، جدول (۳)، می‌توان گفت که سطح موجودی کانتینر خالی در بنادر ۳ و ۵، در دوره‌های ابتدایی افق برنامه‌ریزی، در تمام سناریوها بیشتر از حجم موجودی در بنادر ۱ و ۲ و ۴، می‌باشد. که با وارداتی یا صادراتی بودن این بنادر در دنیای واقعی کاملاً قابل تطابق است.

در ادامه در همان دوره‌های ابتدایی افق برنامه‌ریزی (دوره ۱ و ۲)، با انتقال کانتینرهای خالی موجودی از طریق بارگیری از بنادر ۳ و ۵، (مطابق برنامه حرکتی کشتی‌ها)، به بنادر ۱ و ۲ و ۴، تحت سناریوهای مختلف، حجم کانتینرهای خالی موجودی در بنادر ۳ و ۵، کاهش یافته است و در نتیجه آن سطح موجودی در بنادر ۱ (از دوره ۳ به

این امر است. بنابراین می‌توان گفت که مدل استوار ارائه شده با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مساله تحت سناریوهای مختلف، در به تعادل رساندن و حل مساله در دنیای واقعی کارایی لازم را داشته است.

در جدول (۴)، مقادیر بدست آمده برای سطح کسری کانتینر خالی تحت سناریوهای مختلف، در بنادر شبکه در افق برنامه‌ریزی، نشان داده شده است. در جدول فوق، مقادیر سطح کسری در بنادر ۳ و ۵، تحت سناریوهای مختلف صفر بدست آمده که با تعریف بنادر وارداتی که دارای موجودی کانتینر خالی در دنیای واقعی هستند کاملا همخوانی دارد. به علاوه در بنادر ۱ و ۲، تحت سناریو ۲، مقادیر کسری صفر بدست آمده زیرا تحت سناریو ۲، زمانی که شرایط جوی نامناسب وجود داشته باشد حجم تقاضا حتی در بنادر صادراتی به شدت کاهش یافته و در نتیجه کاهش یا نبود تقاضا، به خودی خود در این بنادر هیچ کسری برای کانتینر خالی وجود ندارد.

اما در بنادر ۱ و ۲ و ۴، تحت سناریو ۱ و ۳، سطح کسری در دوره‌های زمانی ۱ و ۲، مطابق با دنیای واقعی (جدول ۲)، است و از دوره ۳ به بعد به بعد صفر شده است. همچنین در بنادر ۲ و ۴، سطح کسری از دوره ۱ تا دوره ۴، مطابق با سطح کسری در دنیای واقعی است اما از دوره زمانی ۵ به بعد سطح کسری در این بنادر به صفر رسیده است که این کاهش سطح کسری و به صفر رسیدن آن به دلیل تغییر موقعیت کانتینرهای خالی موجودی از بنادر ۳ و ۵، توسط کشتی‌های موجود در شبکه به بنادر ۱ و ۲ و ۳ صورت گرفته است، به‌طوری‌که در سه دوره انتهایی افق برنامه‌ریزی سطح کسری کانتینر خالی در همه بنادر به صفر رسیده است. که این امر نشان‌دهنده کارایی مدل استوار ارائه شده با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مساله در به تعادل رساندن سطح کسری کانتینر خالی در بنادر شبکه مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۴. مقادیر به دست آمده سطح کسری (مدل استوار)

دوره							$xs_{ip}^s$	
۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	بنادر	سناریو
۰	۰	۰	۰	۰	۸	۰	۱	۱
۰	۰	۰	۱۹	۱۳	۷	۰	۲	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	
۰	۰	۰	۱۹	۱۳	۶	۹	۴	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۳
۰	۰	۰	۵	۱۱	۲	۵	۲	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	
۰	۰	۰	۱۴	۸	۹	۰	۴	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵	

#### ۴-۵- مقایسه نتایج حاصل از حل مدل قطعی، استوار ارائه شده و دنیای واقعی

مذکور کاهش هزینه انبارداری، جابجایی، 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 ارزآوری اقتصادی در بنادر صادراتی، رخ می‌دهد. که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل قطعی ارائه شده در به تعادل رساندن سطح کسری در مساله و بهینگی اهداف تعیین شده است. علاوه بر مدل قطعی، مدل استوار ارائه شده، در تحقیق حاضر نیز با در نظر گرفتن فرض عدم قطعیت پارامترهای مساله شامل تقاضا، عرضه و ظرفیت تخلیه و بارگیری، تحت سناریوهای مختلف منطبق با دنیای واقعی، با به تعادل رساندن سطح کسری کانتینر خالی در بنادر صادراتی و کاهش اثر نوسانات پارامترهای غیرقطعی تحت سناریوهای مختلف، کاهش قابل ملاحظه هزینه کل را نسبت به دنیای واقعی دربر داشته است. همچنین کاهش هزینه کل مساله توسط مدل استوار ارائه شده، نسبت به مدل قطعی پیشنهادی نشان‌دهنده عملکرد مناسب‌تر مدل استوار نسبت به مدل قطعی است. که به علت کاهش اثر نوسانات پارامترهای غیرقطعی تحت سناریوهای مختلف با احتمال مشخص، توسط مدل استوار ارائه شده، رخ داده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل استوار پیشنهادی تغییر موقعیت کانتینر خالی، در این مقاله می‌تواند روشی موثر، کارآمد و انعطاف‌پذیرتر از مدل‌های قطعی برای مساله تغییر موقعیت کانتینرهای خالی در دنیای واقعی باشد.

در این بخش به مقایسه هزینه کل حاصل از حل هر دو مدل قطعی و استوار ارائه شده در قیاس با دنیای واقعی پرداخته شده است. در جدول (۵)، مقادیر هزینه کل مربوط به دنیای واقعی (قابل ذکر است که هزینه کل در دنیای واقعی بر مبنای هزینه‌های آشکار شامل هزینه موجودی و هزینه کسری کانتینر خالی و چیدمان، که مقادیرشان مشخص بوده، محاسبه شده است و هزینه‌های نهان یا نامشخص، از قبیل هزینه استهلاک، هزینه فرصت از دست رفته، هزینه وابستگی اقتصادی و عدم رضایت‌مندی مشتری، در محاسبه هزینه کل لحاظ نشده‌اند. که در صورت محاسبه مقادیر این نوع هزینه‌های نهان، هزینه کل مربوط به دنیای واقعی بیشتر از مقدار فعلی و لحاظ شده می‌باشد)، مدل قطعی پیشنهادی و همچنین مدل استوار ارائه شده برای مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی، آمده است. همانطور که از مقادیر جدول (۵)، قابل مشاهده است، استفاده از مدل قطعی ارائه شده، با دو هدف کاهش هزینه کل و حداکثر قابلیت دسترسی به کانتینر خالی در بنادر صادراتی، با کاهش هزینه قابل توجه برای مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی نسبت به دنیای واقعی همراه است. بنابراین می‌توان گفت این مقدار کاهش هزینه چشم‌گیر در نتایج بدست آمده از حل مدل قطعی نسبت به دنیای واقعی، به دو دلیل عمده است: (۱) به تعادل رساندن سطح کسری کانتینر خالی در بنادر شبکه مورد مطالعه. (۲) پیشینه کردن قابلیت دسترس‌پذیری در بنادر صادراتی است که در نتیجه دو علت

جدول ۵. مقایسه هزینه کل حاصل از حل مدل قطعی، استوار و دنیای واقعی

هزینه کل محاسبه شده در دنیای واقعی	\$ ۸۷۱۸۹۵
هزینه کل حاصل از حل مدل قطعی	\$ ۲۹۵۸۷۲/۸
هزینه کل حاصل از حل مدل استوار	\$ ۲۱۱۱۰۸/۲۹

#### ۵- نتیجه‌گیری

است. که در این راستا مدل برنامه‌ریزی جدید، با دو هدف کمینه کردن هزینه کل و پیشینه کردن قابلیت دسترسی به کانتینر خالی در

هدف از این مقاله بررسی مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی با در نظر گرفتن شکاف‌های تئوریک و انطباق آن با دنیای واقعی بوده

بنادر صادراتی و در نتیجه آن حداکثر کردن رضایت‌مندی مشتری و افزایش ارزآوری اقتصادی، تحت شرایط قطعی ارائه شده است. از نقاط قوت مدل قطعی پیشنهادی بیشینه کردن قابلیت دسترسی به کانتینر خالی در بنادر صادراتی به‌عنوان هدفی که شرکت‌های حمل و نقل کانتینری بر آن تاکید فراوان دارند است. که در نتیجه آن کاهش هزینه کسری و هزینه فرصت از دست رفته در بنادر صادراتی و کاهش هزینه انبارداری، جابجایی، استهلاک و چیدمان کانتینر خالی در بنادر وارداتی اتفاق می‌افتد. که در ادبیات موضوع برای اولین بار انجام شده است. از جهت دیگر با این منطق که مدل‌های برنامه‌ریزی کارا باید انعطاف‌پذیری و انطباق‌پذیری لازم را با دنیای واقعی داشته باشند. در این مقاله از رویکرد بهینه‌سازی استوار به‌عنوان رویکردی نوین و قوی به منظور مقابله با عدم قطعیت پارامترها و کاهش اثر نوسانات پارامترهای غیرقطعی، استفاده شده است. مدل استوار مساله تغییر موقعیت کانتینرهای خالی با در نظر گرفتن عدم قطعیت برخی پارامترهای مساله تحت سناریوهای واقعی و با استفاده از رویکرد مدیریت ریسک به منظور تعیین سناریوهای محتمل ارائه شده است. به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی دو مدل قطعی و استوار ارائه شده برای مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی در این مقاله، از داده‌های مربوط به شبکه بنادر دریایی ایران استفاده شده است. نتایج محاسباتی بدست آمده نشان‌دهنده آن است که استفاده از مدل قطعی پیشنهادی با کاهش هزینه قابل توجه برای مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی نسبت به دنیای واقعی همراه است.

به‌طوری‌که این کاهش هزینه نسبت به هزینه محاسبه شده در دنیای واقعی، به علت به تعادل رساندن سطح کسری در بنادر مختلف و همچنین حداکثر کردن قابلیت دسترسی به کانتینر خالی در بنادر صادراتی بوده است.

که در نتیجه آن کاهش هزینه انبارداری، جابجایی، 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 قطعی می‌باشد، پاسخگویی به تقاضا در زمان مناسب، افزایش رضایت‌مندی مشتری و ارزآوری به لحاظ اقتصاد کشوری، در این بنادر را در پی دارد. که

نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل قطعی ارائه شده در به تعادل رساندن سطح کسری کانتینر خالی در بنادر مختلف شبکه و بهینگی اهداف تعیین شده در شرایط قطعی است.

همچنین نتایج آزمایشات عددی انجام شده، بیانگر آن است که مدل استوار ارائه شده در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مساله شامل تقاضا، عرضه و ظرفیت تخلیه و بارگیری، هزینه کل مساله تغییر موقعیت کانتینرهای خالی را نسبت به هزینه کل در دنیای واقعی و نسبت به مدل قطعی، کاهش داده است. که این امر به علت کاهش اثر نوسانات پارامترهای غیرقطعی در شرایط عدم قطعیت تحت سناریوهای مختلف منطبق با دنیای واقعی، و به تعادل رساندن سطح کسری کانتینر خالی در بنادر شبکه که در نتیجه آن کاهش هزینه کسری در بنادر صادراتی، انبارداری و چیدمان در بنادر وارداتی رخ داده، محقق شده است. در واقع مقایسه نتایج حاصل از هر دو مدل نشان‌دهنده کاهش حساسیت خروجی مدل نسبت به نوسانات پارامترهای غیرقطعی توسط مدل استوار پیشنهادی بوده است. به‌گونه‌ای که به‌عنوان رویکردی با قابلیت در نظر گرفتن مجموعه عدم قطعیت‌های اثر گذار موجود در دنیای واقعی، توانسته عملکرد مدل قطعی برنامه‌ریزی تغییر موقعیت کانتینر خالی ارائه شده را بهبود دهد، تا به مدلی انعطاف‌پذیر و انطباق‌پذیرتر با دنیای واقعی مبدل گردد.

در نهایت براساس نتایج حاصل از آزمایش‌های عددی و تایید خبرگان و کارشناسان حوزه مذکور، می‌توان نتیجه گرفت که مدل استوار ارائه شده مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی، در این مقاله می‌تواند روشی موثر و برای مساله تغییر موقعیت کانتینرهای خالی در دنیای واقعی و کاهش فاصله بین تئوری و واقعیت باشد. در همین راستا به عنوان تحقیقات آتی، حل مساله مذکور با استفاده از سایر روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه، و ارائه مدل بهینه‌سازی مساله تغییر موقعیت کانتینر خالی با در نظر گرفتن عدم قطعیت سایر پارامترهای مساله، پیشنهاد می‌شود.

- Bell, M.G., Liu, X., Rioult, J. and Angeloudis, P., (2013), "A cost-based maritime container assignment model". *Transportation Research Part B: Methodological*, 58, pp.58-70.
- Braekers, K., Caris, A. and Janssens, G.K., (2013), "Optimal shipping routes and vessel size for intermodal barge transport with empty container repositioning". *Computers in industry*, 64(2), pp.155-164.
- Meng, Q. and Wang, S., (2011), "Liner shipping service network design with empty container repositioning". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(5), pp.695-708.
- Yun, W.Y., Lee, Y.M. and Choi, Y.S., (2011), "Optimal inventory control of empty containers in inland transportation system". *International Journal of Production Economics*, 133(1), pp.451-457.
- Saeidi, N., Jafari, H., Ameli, A. and Zaersoleymani, N., (2013), "Container repositioning management in liner shipping industry. *Management Science Letters*, 3(6), pp.1795-1804.
- Song, D.P. and 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(5), pp.3623-3642.
- Wong, E.Y., Tai, A. and Raman, M., (2015), "A maritime container repositioning yield-based optimization model with uncertain upsurge demand". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 82, pp.147-161.
- Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J. and Zenios, S.A., (1995), "Robust optimization of large-scale systems". *Operations research*, 43(2), pp.264-281.
- Ben-Tal, A. and Nemirovski, A., (1998), "Robust convex optimization. *Mathematics of operations research*", 23(4), pp.769-805.
- Ben-Tal, A. and Nemirovski, A., (2002), "Robust optimization—methodology and applications". *Mathematical Programming*, 92(3), pp.453-480.
- Ben-Tal, A., Nemirovski, A. and Roos, C., (2002), "Robust solutions of uncertain quadratic and conic-quadratic problems". *SIAM Journal on Optimization*, 13(2), pp.535-560.
- Bertsimas, D. and Sim, M., (2003), "Robust discrete optimization and network flows". *Mathematical programming*, 98(1-3), pp.49-71.
- Bertsimas, D. and Thiele, A., (2004), June. "A robust optimization approach to supply chain management. In *International Conference on Integer Programming and Combinatorial Optimization* (pp. 86-100)". Springer Berlin Heidelberg.
- Yu, C.S. and Li, H.L., (2000), "A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International*
- Kaveshgar, N. and Huynh, N., (2015), "Integrated quay crane and yard truck scheduling for unloading inbound containers". *International Journal of Production Economics*, 159, pp.168-177.
- Di Francesco, M., Lai, M. and Zuddas, P., (2013), "Maritime repositioning of empty containers under uncertain port disruptions. *Computers & Industrial Engineering*, 64(3), pp.827-837.
- White, W.W., 1972. Dynamic transshipment networks: An algorithm and its application to the distribution of empty containers. *Networks*, 2(3), pp.211-236.
- Ermol'ev, Y.M., Krivets, T.A. and Petukhov, V.S., (1976), "Planning of shipping empty seaborne containers. *Cybernetics and Systems Analysis*", 12(4), pp.644-646.
- Shen, W.S. and Khoong, C.M., (1995), "A DSS for empty container distribution planning". *Decision Support Systems*, 15(1), pp.75-82.
- Li, J.A., Liu, K., Leung, S.C. and Lai, K.K., (2004), "Empty container management in a port with long-run average criterion". *Mathematical and Computer Modelling*, 40(1), pp.85-100.
- Olivo, A., Zuddas, P., Di Francesco, M. and Manca, A., (2005), "An operational model for empty container management". *Maritime Economics & Logistics*, 7(3), pp.199-222.
- Song, D.P., (2007), June. "Analysis of a collaborative strategy in container fleet management". In the 11th world conference on transport research, University of California, Berkeley.
- Feng, C.M. and Chang, C.H., (2008), "Empty container reposition planning for intra-Asia liner shipping". *Maritime Policy & Management*, 35(5), pp.469-489.
- Wong, E.Y., Lau, H.Y. and Mak, K.L., (2010), "Immunity-based evolutionary algorithm for optimal global container repositioning in liner shipping Or Spectrum", 32(3), pp.739-763.
- Chao, S.L. and Yu, H.C., (2012), "Repositioning empty containers in East and North China ports". *Maritime Economics & Logistics*, 14(4), pp.435-454.
- Song, D.P. and Dong, J.X., (2011), "Effectiveness of an empty container repositioning policy with flexible destination ports". *Transport Policy*, 18(1), pp.92-101.

Journal of Production Economics”, 64(1), pp.385-397.

-Hjortnaes, T., Wiegmans, B., Negenborn, R.R., Zuidwijk, R.A. and Klijnhout, R., (2017). Minimizing cost of empty container repositioning in port hinterlands, while taking repair operations into account. Journal of Transport Geography, 58, pp.209-219.

-Tuncel, G., Alpan, G., (2010), “Risk assessment and management for supply chain networks: A case study”. Computers in Industry, 61 (3), pp.250-259.

-You, F., Wassick, J. M., Grossmann, I. E., (2009), “Risk Management for a Global Supply Chain Planning under Uncertainty: Models and Algorithm”. American Institute of Chemical Engineers, 55 (4), pp.931-946

جدول ۱. مقایسه مدل قطعی و غیرقطعی پیشنهادی، با مدل‌های پیشین

مدل استوار پیشنهادی	مدل قطعی پیشنهادی	Francesco et al. 2013	Song et al. 2010	Moon et al. 2010	Feng et al. 2008	Jula et al. 2006	مدل مشخصه
غیرقطعی	قطعی	غیرقطعی	غیرقطعی	قطعی	قطعی	قطعی	نوع مدل
تقاضا- عرضه ظرفیت تخلیه و بارگیری	-	تقاضا- عرضه	تقاضا	-	-	-	پارامتر غیرقطعی
چند دوره‌ای	چند دوره‌ای	چند دوره‌ای	چند دوره‌ای	چند دوره‌ای	چند دوره‌ای	چند دوره‌ای	افق برنامه‌ریزی
*کسری- موجودی	*کسری- موجودی	موجودی	موجودی	موجودی	موجودی	موجودی -	سطح کسری و موجودی
* تعادل	* تعادل	کاهش عدم تعادل	کاهش عدم تعادل	-	کاهش عدم تعادل	-	تعادل در مساله
تک هدفه	* دو هدفه،	تک هدفه	تک هدفه	تک-هدفه	تک هدفه	تک هدفه	توابع هدف
*بهینه‌سازی استوار	-	بهینه‌سازی تصادفی	سناریویی	-	-	-	رویکرد عدم قطعیت
*واقعی	-	فرضی	فرضی	-	-	-	سناریو بندی
LP	LP	LP	NLP	GA	LP	LP	روش حل

جدول ۲. تقاضای کانتینر خالی

دوره							$D_{stp}$	
۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	بندر	سناریو
۳۱	۲۶	۳۶	۲۹	۲۵	۳۴	۲۸	۱	۱
۳۳	۳۷	۳۴	۴۶	۳۸	۳۱	۳۵	۲	
۲۰	۰	۱۷	۱۳	۲۱	۱۶	۰	۳	
۳۶	۴۷	۴۱	۳۹	۴۲	۲۴	۲۹	۴	
۳۲	۵۱	۴۲	۲۹	۵۶	۴۵	۳۹	۵	
۱۳	۰	۸	۱۸	۱۱	۶	۰	۱	۲
۲۷	۱۳	۱۹	۲۳	۱۷	۱۲	۱۶	۲	
۰	۵	۸	۱۱	۲	۷	۳	۳	
۱۵	۲۰	۲۴	۲۱	۲۵	۹	۱۳	۴	
۳۲	۲۶	۳۴	۱۶	۱۹	۲۹	۱۸	۵	
۱۸	۲۸	۳۶	۳۲	۲۹	۲۱	۲۲	۱	۳
۳۱	۴۲	۳۹	۲۴	۳۵	۳۳	۲۹	۲	
۲۰	۱۹	۱۳	۰	۱۰	۷	۱۲	۳	
۳۴	۱۹	۴۱	۳۸	۲۷	۳۶	۳۱	۴	
۴۸	۳۶	۲۱	۳۴	۴۶	۳۷	۳۳	۵	

جدول ۳. عرضه کانتینر خالی

دوره							$S_{tp}$	
۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	بندر	سناریو
۳۵	۱۶	۲۹	۳۷	۲۸	۱۸	۳۶	۱	۱
۳۱	۲۴	۴۶	۴۰	۳۲	۲۰	۳۹	۲	
۴۳	۳۲	۴۷	۳۵	۴۵	۳۸	۴۷	۳	
۳۲	۲۵	۴۰	۳۳	۳۵	۲۷	۲۰	۴	



۶۹	۵۳	۷۸	۵۵	۶۲	۷۳	۶۸	۵	۲
۲۷	۱۴	۱۶	۰	۲۵	۱۵	۱۸	۱	
۳۰	۱۹	۳۵	۱۷	۲۸	۳۱	۲۴	۲	
۲۸	۱۷	۲۶	۳۴	۰	۲۹	۱۸	۳	
۲۳	۳۳	۱۸	۳۵	۲۲	۲۶	۱۹	۴	
۳۴	۳۳	۴۳	۲۴	۳۸	۳۵	۳۶	۵	
۳۱	۳۰	۳۹	۲۷	۲۲	۲۵	۲۰	۱	۳
۲۳	۴۱	۳۵	۳۰	۲۶	۳۶	۲۴	۲	
۳۴	۳۲	۱۹	۲۹	۳۴	۲۲	۳۵	۳	
۲۲	۲۷	۳۸	۳۲	۲۸	۲۵	۳۳	۴	
۴۰	۳۳	۵۱	۴۲	۴۷	۳۹	۴۳	۵	

جدول ۴. موجودی اولیه کانتینر خالی در بنادر تحت سناریوهای مختلف

سناریو	بندر	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۱۵۰
۲	۰	۰	۲۰۰	۰	۰	۲۵۰
۳	۰	۰	۱۵۰	۰	۰	۲۰۰

جدول ۵. ظرفیت کشتی‌ها برای انتقال کانتینر خالی بین بنادر در دوره‌های مختلف

کشتی	۱	۲	۳	۴
$Ur_{ip}$	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰	۱۳۰۰

جدول ۶. ظرفیت نگهداری کانتینر خالی در بنادر

بندر	۱	۲	۳	۴	۵
$ui_p$	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۰۰۰۰۰

جدول ۷. هزینه‌های ثابت بر اساس تعرفه‌های مقرر

Cs	Ci	Cr	Cu	Cl
\$۳۰۰۰	\$۵	۰	\$۹۷	\$۹۷

تعداد کانتینرهای خالی که در ابتدای افق برنامه‌ریزی بر عرشه کشتی‌ها موجود است

$V_4$	$V_3$	$V_2$	$V_1$
۲۰۰	۱۲۰	۲۳۰	۱۶۰