

## اهمیت مسأله‌ی زمان‌بندی جرثقیل اسکله در افزایش بهره‌وری پایانه- های کانتینری

عبدالرضا شیخ‌الاسلامی کندلوس<sup>۱</sup>، نادر گلشن آرا<sup>۲</sup>، غلامرضا ایلاتی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استاد‌یار گروه مهندسی و برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران  
Sheikh@iust.ac.ir

<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی‌ارشد برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشگاه علم و صنعت ایران،  
nader\_golshan@CivilEng.iust.ac.ir

<sup>۳</sup>دانشجوی دکترای مهندسی و برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران  
Ilati@iust.ac.ir

### چکیده









با افزایش ابعاد کشتی‌های کانتینربر، زمان ماندن کشتی‌های کانتینری در اسکله افزایش یافته است. جرثقیل‌های اسکله وظیفه تخلیه (بارگیری) کانتینرها را از (به) کشتی بر عهده دارند. بنادر برای رقابت با یکدیگر باید بهره‌وری عملیات خود را افزایش دهند. در نتیجه بالا بردن بازدهی جرثقیل‌ها، تبدیل به یک مسأله‌ی مهم برای کارشناسان و محققان شده است. یکی از راه‌های افزایش بهره‌وری، بهبود کارایی عملیات کنار دریاست که زمان‌بندی جرثقیل اسکله یکی از آن‌هاست. در این مقاله اهمیت زمان‌بندی جرثقیل اسکله در افزایش سرعت تخلیه و بارگیری تشریح می‌شود و تحقیقات انجام شده در زمینه زمان‌بندی جرثقیل اسکله و برخی مدل‌های آن ارائه می‌شود.

**کلیدواژه:** زمان‌بندی، جرثقیل اسکله، بهره‌وری، پایانه‌ی کانتینری

اهمیت مسأله‌ی زمان‌بندی جرتقیل اسکله در افزایش بهره‌وری پایانه‌های کانتینری

## ۱. مقدمه

آخرین دهه از قرن بیستم شاهد رشد قابل توجه حمل و نقل کانتینری در سراسر جهان بود. این افزایش مداوم در ترافیک کانتینری و حمل و نقل چند وجهی بین‌المللی، منجر به تغییراتی در شیوه‌های کسب و کار برای کاربران کشتی‌های اقیانوس‌پیما و گردانندگان پایانه‌های کانتینری شده است. در حال حاضر تقاضای حمل و نقل کانتینری افزایش یافته و امکانات موجود باید پاسخ‌گوی مسیرهای جدید و سرویس‌های مکرر بر روی مسیرهای موجود باشد. به همین دلیل، گردانندگان پایانه‌های کانتینری سرمایه‌گذاری زیادی بر روی سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری‌های پیچیده و تجهیزات جدید می‌کنند. به منظور برآوردن تقاضای روزافزون حمل و نقل، کشتی‌های کانتینر بزرگ ساخته شده‌اند. امروزه ساخت کشتی‌ها با ظرفیت‌هایی به بزرگی ۱۵۰۰۰ واحد معادل کانتینر ۲۰ فوتی<sup>۱</sup> تحت عنوان کشتی‌های غول‌پیکر<sup>۲</sup>، برنامه‌ریزی شده است. بایرد<sup>۳</sup>، [۱] مرور کلی شامل آمار جزئیات افزایش اندازه‌ی کشتی‌های کانتینری و افزایش ترافیک کانتینری، ارائه داده‌است. یانگ، [۲] تأثیر کشتی‌های بزرگتر را روی بندر بررسی کرد. در شکل (۱) سیر تکامل کشتی‌های کانتینری نشان داده شده و ویژگی‌های مربوط به هر نسل کشتی ارائه شده است.

		Length	Draft	TEU
First (1956-1970)	 Converted Cargo Vessel	135 m	< 9 m	500
	 Converted Tanker	200 m	< 30 ft	800
Second (1970-1980)	 Cellular Containership	215 m	10 m 33 ft	1,000 – 2,500
Third (1980-1988)	 Panamax Class	250 m	11-12 m 36-40 ft	3,000
	 Post Panamax	290 m		4,000
Fourth (1988-2000)	 Post Panamax Plus	275 – 305 m	11-13 m 36-43 ft	4,000 – 5,000
Fifth (2000-2005)	 New Panamax	335 m	13-14 m 43-46 ft	5,000 – 8,000
Sixth (2006-)	 Ultra Large Container Ship	397 m	15.5 m 50 ft	11,000 – 14,500

شکل ۱: شش نسل کشتی‌های کانتینری تا به امروز [۳]

<sup>۱</sup> Twenty-foot equivalent unit ( TEU )

<sup>۲</sup> Mega Ships

<sup>۳</sup> Baird

وقتی کشتی به بندر می‌رسد ابتدا باید لنگر بیاندازد تا بتواند تخلیه و بارگیری کند. برای این منظور تعدادی پهلوگاه<sup>۱</sup> در اسکله‌های پایانه‌های کانتینری وجود دارد. پهلوگاه‌ها هزینه ساخت بسیار بالایی دارند در نتیجه تصمیم‌گیری برای تعداد و طول پهلوگاه‌های کشتی در پایانه‌های کانتینری یکی از تصمیمات مهمی است که در سطح استراتژیک اخذ می‌گردد. بهره‌وری اسکله روی بهره‌وری کلی پایانه‌ها به‌طور مستقیم اثر می‌گذارد و بنابراین اختصاص دادن فضای پهلوگیری به کشتی‌ها بسیار حساس و مهم است. بیشتر پهلوگاه‌ها در بنادر بزرگ ایالات متحده و ژاپن توسط گردانندگان کشتی اجاره می‌شود. در چنین شرایطی بهره‌برداران کشتی‌های اقیانوس پیما به‌طور مستقیم مسؤلیت تخلیه و بارگیری کانتینرها را برعهده دارند. به چنین سیستم پهلوگیری، سیستم پهلوگیری اختصاصی<sup>۲</sup> گفته می‌شود و به پایانه‌هایی که چنین سیستمی را به‌کار می‌برند پایانه‌های اختصاصی گفته می‌شود. سیستم رایج دیگر تحت عنوان سیستم پهلوگیری عمومی<sup>۳</sup> شناخته می‌شود که بسیاری از بنادر هاب و مهم مثل بندر هنگ‌کنگ، سنگاپور، رتردام و هامبورگ از این سیستم استفاده می‌کنند. سیستم پهلوگاه - عمومی در پایانه‌های چند منظوره که کشتی‌های مختلفی در آنجا سرویس‌دهی می‌شوند به‌کار برده می‌شود و معمولاً چنین پهلوگاه‌هایی طول بیشتری داشته و نرخ بهره‌وری بالاتری نسبت به پهلوگاه‌های اختصاصی دارند.

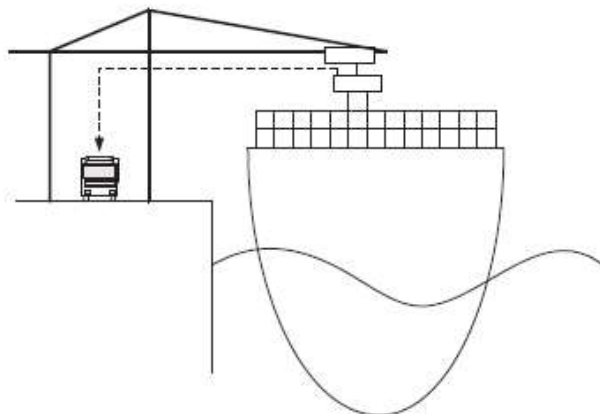
وقتی که کشتی در پهلوگاه لنگر انداخت، تخلیه و بارگیری کانتینرها آغاز می‌شود. جرثقیل‌های اسکله تجهیزات استاندارد طراحی شده‌ای برای انجام این وظیفه هستند. جرثقیل اسکله نوع خاصی از جرثقیل است که اسکلت فولادی بزرگی داشته و این اسکلت در طول اسکله و در کنار محل پهلوگیری کشتی قرار گرفته است. شکل (۲) نمایی از تخلیه کانتینرهای کشتی توسط جرثقیل اسکله را نشان می‌دهد. جرثقیل‌های اسکله بطور کلی براساس ظرفیت باربری و اندازه کشتی کانتینری که می‌توانند تخلیه و بارگیری کنند طبقه‌بندی می‌شوند. جرثقیل پاناما کس می‌تواند تمام کانتینرهای کشتی‌ای که از کانال پاناما عبور می‌کند ( کشتی‌هایی با ۱۲ تا ۱۳ ردیف کانتینر در عرض) را تخلیه و بارگیری کند. جرثقیل پست پاناما کس می‌تواند تمام کانتینرهای کشتی‌ای با ۱۸ ردیف کانتینر در عرض را تخلیه و بارگیری کند. مدرن‌ترین جرثقیل‌های کانتینر در طبقه سوپرپست پاناما کس قرار می‌گیرند و برای کشتی‌ای با ۲۲ ردیف کانتینر در عرض مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک جرثقیل اسکله با توانایی جابجایی دو کانتینر ۲۰ فوتی در یک زمان معمولاً ظرفیت بلند کردن ۴۰ تن را دارد. بعضی از جرثقیل‌های جدید

---

<sup>۱</sup> Berth  
<sup>۲</sup> Dedicated Berth systems  
<sup>۳</sup> Public Berth systems

اهمیت مسأله‌ی زمان‌بندی جرثقیل اسکله در افزایش بهره‌وری پایانه‌های کانتینری

کنونی می‌توانند ۱۲۰ تن بار را جابجا کنند که آن‌ها را قادر می‌سازد تا ۴ کانتینر ۲۰ فوتی یا ۲ کانتینر-۴۰ فوتی را در یک زمان جابجا کنند.



شکل ۲: نمایی از فرایند تخلیه کانتینر کشتی توسط جرثقیل اسکله [۴]

از دیگر مشخصه‌های مهم جرثقیل اسکله سرعت تخلیه و بارگیری آن می‌باشد. جرثقیل‌های مدرن می‌توانند یک کانتینر پر را با سرعتی حدود ۶۰ تا ۸۰ متر بر دقیقه بلند نمایند. وقتی کانتینر خالی باشد این سرعت به ۱۴۰ متر بر دقیقه می‌رسد. با داشتن این دو سرعت و فرض یک کاربر جرثقیل با تجربه تخلیه و بارگیری یک کانتینر ۴۰ فوتی ۹۰ ثانیه به طول می‌انجامد. وزن جرثقیل‌های پست-پاناماکس تقریباً ۸۰۰ تا ۹۰۰ تن است در حالی که جرثقیل‌های جدید سوپر پست پاناماکس وزنی بین ۱۶۰۰ تا ۲۰۰۰ تن دارند. برای حرکت دادن این جرثقیل‌های بزرگ و سنگین در طول اسکله، آن‌ها را روی ریل‌هایی موازی لبه اسکله سوار می‌کنند. جرثقیل‌های اسکله بعد از پهلوگاه‌ها، گران‌ترین سازه‌های یک پایانه کانتینری هستند. یکی از عملیات کلیدی و حساس در پایانه‌های کانتینری در دسترس بودن جرثقیل اسکله است. با بهبود کارایی جرثقیل اسکله، بنادر می‌توانند زمان رسیدگی به کشتی را کاهش داده و بهره‌وری کلی پایانه‌ی کانتینری را افزایش دهند.

## ۲. مسأله‌ی زمان‌بندی جرثقیل اسکله

به لحاظ بهره‌وری ترمینال، جرثقیل‌های اسکله حساس‌ترین نقش را در بین انتقال‌دهندگان کانتینرهای بین اسکله و کشتی بازی می‌کنند. با بزرگ‌تر شدن کشتی‌های کانتینری بدلیل کاهش هزینه‌های حمل

و نقل، تخلیه و بارگیری سریع کانتینرها تبدیل به یک مسأله‌ی مهم برای کارشناسان و محققان شده است. از آنجا که جرثقیل‌های اسکله به طور معمول بر روی ریل در کنار اسکله نصب شده‌اند، جرثقیل‌های اسکله متعدد را می‌توان با انعطاف‌پذیری مناسبی در میان کشتی‌های پهلوگیری کرده، مستقر کرد. بنابراین، برخی از مطالعات تلاش کرده‌اند برای به حداقل رساندن تأخیر کشتی ورودی زمان‌بندی کارها را برای جرثقیل‌های اسکله تعیین کنند. داگانزو<sup>۱</sup> [۵] اولین کسی بود که مسأله زمان‌بندی جرثقیل اسکله را مطرح کرد. او فرض کرد که زمان حرکت جرثقیل در مقابل زمان رسیدگی به کانتینرها ناچیز است. کشتی‌های کانتینری به انبارهایی تقسیم، و به عنوان کار بررسی می‌شدند. برای بیشینه ساختن سود، داگانزو حالت استاتیک زمان‌بندی جرثقیل را به صورت برنامه‌ریزی عددصحيح مختلط<sup>۲</sup> فرموله کرد. او همچنین چند اصل ابتکاری برای زمان‌بندی پویا در واقعیت ارائه داد. در مدل او محدودیت عدم عبور جرثقیل‌ها از روی یکدیگر یا رعایت حداقل فاصله در نظر گرفته نشده بود و تنها چند مسأله با مقیاس کوچک را حل کرده بود. پتروفسکی و داگانزو [۶] مسأله زمان‌بندی جرثقیل اسکله را به دو بخش تقسیم کردند: زمان بندی حرکت و تخصیص جرثقیل. سپس مسأله را به صورت مسأله حداکثرسازی جریان فرموله کردند و آن را با روش شاخه و کران حل کردند. الگوریتم آن‌ها می‌توانست مسائل بزرگتر از مسایل داگانزو را حل کند. کیم و پارک [۷] مسأله زمان‌بندی جرثقیل اسکله را به صورت مسأله زمان‌بندی ماشین موازی حل کردند. آن‌ها محدودیت عدم عبور جرثقیل را در نظر گرفتند و از روش شاخه و کران برای حل آن استفاده کردند. زمان حل آن‌ها با افزایش ابعاد مسأله به سرعت افزایش می‌یافت در نتیجه آن‌ها روش جستجوی حریصانه‌ی تصادفی تطبیقی<sup>۳</sup> را برای کاهش زمان حل مسأله پیشنهاد دادند. لیم و همکاران [۸] مسأله زمان‌بندی جرثقیل اسکله را برای حداکثر کردن توان عملیاتی با استفاده از برنامه‌ریزی پویا حل کردند. آن‌ها محدودیت عدم عبور، محدودیت حداقل فاصله و محدودیت مجزا بودن کارها را در نظر گرفتند. آن‌ها فرض کردند هر جرثقیل می‌تواند تنها به یک کار رسیدگی کند و هر کار تنها می‌تواند به یک جرثقیل اختصاص داده شود. مثال‌های عددی نشان داد که بهینه‌سازی چرخ‌صا‌دار<sup>۴</sup> با جستجوی محلی عملکرد بهتری را در بین روش‌های ابتکاری مختلف دارد. لیم و همکاران ادعا کردند که حل آن‌ها می‌تواند با حل سریع دوباره برای رسیدگی در حالت‌های پویا که ناشی از تغییراتی مثل زودتر تمام شدن کارهای کشتی است، مورد استفاده قرار گیرد. زو و لیم [۹] مسأله زمان‌بندی جرثقیل اسکله را با هدف حداقل کردن بیشترین

<sup>۱</sup> Daganzo<sup>۲</sup> Mixed Linear Integer Programing<sup>۳</sup> Greedy Randomized Adaptive Search Procedure<sup>۴</sup> Squeaky Wheel Optimization

زمان اتمام، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها فرض کردند که نرخ رسیدگی جرثقیل ثابت است، تمام کارها مستقل فرض می‌شود و جرثقیل‌ها نمی‌توانند از روی یکدیگر عبور کنند. آن‌ها مسأله را به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح فرموله کردند. بدین منظور ابتدا مسأله را با روش‌های حل دقیق حل کردند و کیفیت جواب را با روش شاخه و کران افزایش دادند. مولفان همچنین الگوریتم شبیه‌سازی تبرید<sup>۱</sup> را برای بدست آوردن جواب نزدیک بهینه پیشنهاد دادند. لیم و همکاران<sup>۲</sup> [۱۰] مسأله زمان‌بندی جرثقیل اسکله را به صورت مسأله زمان بندی  $m$  ماشین موازی بررسی کردند و چندین روش ابتکاری برای حل آن ارائه کردند. آن‌ها محدودیت عدم عبور جرثقیل‌ها از روی یکدیگر را در نظر گرفتند و فرض کردند کارها مستقل هستند. مولفان مسأله را به دو بخش تقسیم کردند: (۱) تخصیص جرثقیل به کارها، و (۲) تخصیص زمان برای هر جرثقیل. آن‌ها اثبات کردند با داشتن تخصیص بهینه جرثقیل، تخصیص زمان به هر جرثقیل به‌سادگی بدست می‌آید. در نتیجه تمرکز، روی پیدا کردن تخصیص بهینه جرثقیل قرار گرفت. مثال‌های عددی نشان داد که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید عملکرد بسیار بهتری نسبت به سایر روش‌ها از لحاظ زمان محاسبه دارد. لی و همکاران<sup>۳</sup> [۱۱] مسأله زمان‌بندی جرثقیل اسکله را با محدودیت عدم عبور جرثقیل‌ها از روی هم بررسی کردند. آن‌ها کشتی‌ها را به انبارهایی تقسیم کردند و فرض کردند که هر جرثقیل تنها می‌تواند روی یک انبار در یک زمان کار کند. آن‌ها از زمان سفر بین انبارها صرفه نظر کردند. مولفان مسأله را به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله کردند و آن را با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل نمودند. لیو و همکاران<sup>۴</sup> [۱۲] مسأله زمان-بندی پویای جرثقیل اسکله را با محدودیت‌های عدم عبور جرثقیل‌ها از روی یکدیگر و حداقل فاصله‌ی ایمن، مطالعه کردند. برای کمینه‌کردن حداکثر تأخیر در حرکت کشتی، مولفان مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را ارائه دادند. به‌دلیل اینکه زمان حل مسأله به سرعت با افزایش ابعاد مسأله طولانی می‌شد، در این مقاله مسأله را به دو بخش تقسیم شد: مسأله سطح بالا (کشتی) و مسأله سطح پایین (پهلگاه). آن‌ها سپس نتایج را با تقسیم کارها به جرثقیل‌ها بهبود بخشیدند و همچنین محاسبات را با استفاده از روش‌های ابتکاری به مقدار قابل قبولی رساندند.

جدول ۱ خلاصه‌ای از ادبیات مربوط به زمان‌بندی جرثقیل اسکله را دربر دارد. بیشتر مولفان فرض کردند که کارها از یکدیگر مستقل هستند. تنها ۳ مقاله محدودیت حداقل فاصله را در نظر گرفتند. بیروپرت و میسل<sup>۵</sup> [۱۳] مرور بسیار کاملی روی برنامه‌ریزی عملیات کنار دریا در پایانه‌های کانتینری

Simulated Annealing<sup>۱</sup>

Lim et al<sup>۲</sup>

Lee et al<sup>۳</sup>

Liu et al<sup>۴</sup>

Bierwirth & Meisel<sup>۵</sup>

داشته‌اند. مولفان مسأله را به سه بخش تقسیم کردند: مسأله تخصیص پهلوگاه، مسأله تخصیص جرثقیل اسکله و مسأله زمان‌بندی جرثقیل اسکله. آن‌ها ادبیات هر مسأله را به‌طور مفصل در مقاله خود ارائه داده‌اند.

جدول ۱: خلاصه‌ای از ادبیات مربوط به زمان‌بندی جرثقیل اسکله

ردیف	سال	نویسنده	هدف	روش حل
۱	۱۹۸۹	داگانزو	حداکثر صرفه- جویی در هزینه	برنامه ریزی عدد صحیح مختلط
۲	۱۹۹۰	پتروفسکی و داگانزو	حداقل کردن هزینه تاخیر	الگوریتم شاخه و کران
۳	۲۰۰۴	کیم و پارک	حداقل کردن حداکثر زمان اتمام	جستجوی تصادفی حریمانه تطبیقی
۴	۲۰۰۴	لیم و همکاران	حداکثر توان عملیاتی	بهینه‌سازی چرخ صدا دار
۵	۲۰۰۶	زو و لیم	حداقل کردن حداکثر زمان اتمام	شبیه‌سازی تبرید
۶	۲۰۰۶	لیو و همکاران	حداقل کردن حداکثر تاخیر در خروج کشتی	تجزیه برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی مختلط
۷	۲۰۰۷	لیم و همکاران	حداقل کردن حداکثر زمان اتمام	شبیه‌سازی تبرید
۷	۲۰۰۸	لی و همکاران	حداقل کردن حداکثر زمان اتمام	الگوریتم ژنتیک

### ۳. انواع مدل‌سازی‌های مطرح

بیشتر تحقیقات انجام شده برای مسأله زمان‌بندی جرثقیل اسکله مربوط به حالت استاتیک آن می‌باشد. مدل‌های مختلفی برای بیان این مسأله ارائه شده‌است. در این مقاله تنها به دو مورد از این مدل‌سازی‌ها اشاره می‌شود. اولین مدل مربوط به پژوهش کیم و پارک است که برای اولین بار محدودیت عدم عبور جرثقیل‌ها را در نظر گرفت و دومی مدل ساخته شده توسط لی و همکاران است که به لحاظ سادگی مورد توجه قرار گرفته است.

مدل کیم و پارک:

کیم و پارک هدف از مطالعه مسأله برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله را تعیین توالی عملیات تخلیه و بارگیری که هر جرثقیل اسکله باید انجام دهد تا زمان اتمام عملیات کشتی کمینه شود، تعریف کردند. کانتینرهای خروجی با بندر مقصد یکسان، اندازه یکسان و بارگیری شده در کشتی یکسان را یک گروه کانتینر تعریف کردند. به منظور کارایی عملیات تخلیه و بارگیری در نقشه‌ی چیدمان کالا برای کشتی، مجموعه‌ای از شیارهای<sup>۱</sup> کنار هم در کشتی قرار داده شده‌اند که معمولاً به کانتینرهای از یک گروه اختصاص داده می‌شوند. در طرح چیدمان برای بارگیری، خوشه را به صورت مجموعه‌ای از شیارهای کنار هم که کانتینرها در گروه یکسان برای بارگیری برنامه‌ریزی شده‌اند در نظر گرفتند. آن‌ها "وظیفه"<sup>۲</sup> را به عنوان عملیات تخلیه و بارگیری برای یک خوشه تعریف کردند.

مشابه مسأله برنامه‌ریزی  $m$  وسیله موازی، برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله، زمان‌بندی چند جرثقیل-اسکله را برای انجام عملیات تخلیه و بارگیری برای کمینه کردن حداکثر زمان اتمام عملیات متوجه ساختند. محدودیت‌های در نظر گرفته شده توسط آن‌ها در عملیات جرثقیل اسکله در زیر نشان داده شده است:

- ۱- هر جرثقیل اسکله در کوتاه‌ترین زمان فعال‌سازی خود، عملیاتی می‌شود.
  - ۲- جرثقیل‌ها در یک مسیر یکسان هستند بنابراین نمی‌توانند از روی یکدیگر عبور کنند.
  - ۳- بعضی از وظایف باید قبل از دیگران انجام شوند.
  - ۴- چند وظیفه وجود دارد که نمی‌توانند همزمان انجام شوند.
- نماد گذاری زیر در فرمول ریاضی استفاده شده است:
- $(i, j)$  وظایفی که باید انجام شوند. وظایف در جهت افزایش مکان نسبی در جهت افزایش

---

Slots<sup>۱</sup>  
Task<sup>۲</sup>

شماره ردیف های کشتی مرتب شده اند.

جرثقیل های اسکله که  $k=1, \dots, K$ . جرثقیل های اسکله نیز در جهت افزایش مکان نسبی، در جهت افزایش شماره ردیف های کشتی مرتب شده اند. K

داده های مسأله:

	$P_i$	زمان مورد نیاز برای انجام وظیفه $i$ .
	$R_k$	زودترین زمان فعال سازی جرثقیل اسکله $k$ .
	$l_i$	محل وظیفه $i$ ( بر اساس شماره ردیف کشتی بیان می شود).
	$l_k^0$	موقعیت شروع جرثقیل اسکله $k$ که بر اساس شماره ردیف از کشتی بیان می-شود.
	$l_k^T$	موقعیت نهایی جرثقیل اسکله $k$ که بر اساس شماره ردیف از کشتی بیان می-شود. این موقعیت نهایی اگر کار کشتی بعدی به جرثقیل اسکله $k$ ام تخصیص داده شود، مشخص می شود.

زمان سفر جرثقیل اسکله از محل  $(l_i)$  از وظیفه  $i$  به محل  $(l_j)$  از وظیفه  $j$ .  $t_{0j}^k$  و  $t_{ij}^k$  به ترتیب نشان دهنده ی زمان سفر جرثقیل اسکله از محل اولیه  $(l_k^0)$  به محل  $(l_i)$  از وظیفه  $i$ ، و از محل  $(l_j)$  از وظیفه  $j$  به مقصد نهایی  $(l_k^T)$  جرثقیل اسکله  $k$  می باشند.

	$M$	عدد ثابت به اندازه کافی بزرگ.
	$\alpha_1$	وزن برای حداکثر زمان اتمام.
	$\alpha_2$	وزن برای زمان کل اتمام.

نماد های مجموعه ها:

	$\Omega$	مجموعه همه وظایف.
	$\Psi$	مجموعه جفت وظایفی که نمی توانند همزمان انجام شوند. وقتی وظیفه $i$ و $j$ نتوانند همزمان انجام شوند، $(i, j) \in \Psi$ .
	$\Phi$	مجموعه جفت وظایفی که دارای رابطه اولویت دار نسبت به دیگری هستند. وقتی وظیفه $i$ باید نسبت به وظیفه $j$ اولویت داشته باشد، $(i, j) \in \Phi$ .

متغیر های تصمیم:

اهمیت مسأله‌ی زمان‌بندی جرثقیل اسکله در افزایش بهره‌وری پایانه‌های کانتینری

اگر جرثقیل اسکله  $k$ ام وظیفه  $j$  را بلافاصله بعد از وظیفه  $i$  ام انجام دهد،  $X_{ij}^k$  و در غیر این صورت  $0$  است. وظایف  $0$  و  $T$  به ترتیب به عنوان اولین و آخرین وظیفه برای هر جرثقیل اسکله بررسی می‌شود. بنابراین، وقتی وظیفه  $j$  اولین وظیفه از جرثقیل اسکله  $k$ ام باشد،  $X_{0j}^k = 1$ . همچنین وقتی وظیفه  $j$  آخرین وظیفه جرثقیل اسکله  $k$ ام باشد،  $X_{jT}^k = 1$ .

$Y_k$  زمان اتمام جرثقیل اسکله  $k$ .

$D_i$  زمان اتمام وظیفه  $i$ .

$Z_{ij}$  اگر وظیفه  $j$  دیرتر از زمان اتمام وظیفه  $i$  شروع شود مقدار آن  $1$ ، و در غیر این صورت  $0$  می‌باشد.

در نهایت کیم و پارک مسأله زمان‌بندی جرثقیل اسکله را به صورت برنامه ریزی عدد صحیح مختلط به صورت زیر فرموله کردند:

$$\text{Minimize } \alpha_1 W + \alpha_2 \sum_{k=1}^K Y_k \quad (1)$$

منوط به :

$$Y_k \leq W \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \Omega} X_{0j}^k = 1 \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \Omega} X_{iT}^k = 1 \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (4)$$

$$\sum_k \sum_{i \in \Omega} X_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in \Omega \quad (5)$$

$$\sum_j X_{ij}^k - \sum_j X_{ji}^k = 0 \quad \forall j \in \Omega \quad (6)$$

$$\forall k = 1, \dots, K$$

$$D_i + t_{ij} + p_j - D_j \leq M(1 - X_{ij}^k) \quad \forall i, j \in \Omega \quad (7)$$

$$\forall k = 1, \dots, K$$

$$D_i + p_j \leq D_j \quad \forall (i, j) \in \Phi \quad (8)$$

$$D_i - D_j + p_j \leq M(1 - Z_{ij}) \quad \forall i, j \in \Omega \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 & Z_{ij} + Z_{ji} = 1 && \forall (i, j) \in \Psi && (10) \\
 & \sum_{v=1}^k \sum_{u \in \Omega} X_{uj}^v \leq \sum_{v=1}^k \sum_{u \in \Omega} X_{ui}^v && \forall i, j \in \Omega, i_1 < i_2 && (11) \\
 & && M(Z_{ij} + Z_{ji}) && \forall k = 1, \dots, K \\
 & D_j + t_{jT}^k - Y_k \leq M(1 - X_{jT}^k) && \forall j \in \Omega && (12) \\
 & && \forall k = 1, \dots, K \\
 & r_k - D_j + t_{0j}^k + p_j \leq M(1 - X_{oj}^k) && \forall j \in \Omega && (13) \\
 & && \forall k = 1, \dots, K \\
 & X_{ij}^k, Z_{ij} \in \{1, 0\} && \forall i, j \in \Omega && (14) \\
 & && \forall k = 1, \dots, K \\
 & Y_k, D_i \geq 0 && \forall j \in \Omega && (15) \\
 & && \forall k = 1, \dots, K
 \end{aligned}$$

در تابع هدف (۱) فرض شده است که  $\alpha_1 \gg \alpha_2$  چون کمینه کردن حداکثر زمان اتمام، مهم‌تر از کمینه کردن زمان اتمام کلی است. محدودیت (۲) حداکثر زمان شروع تا پایان عملیات را ارزیابی می‌کند. محدودیت‌های (۳) و (۴) به ترتیب اولین و آخرین وظیفه را برای هر جرثقیل انتخاب می‌کنند. محدودیت (۵) تضمین می‌کند که هر وظیفه دقیقاً با یک جرثقیل انجام می‌شود. محدودیت (۶) تضمین می‌کند که کارها در یک توالی مناسب انجام می‌گیرند. محدودیت (۷) به‌طور همزمان زمان اتمام هر وظیفه را تعیین می‌کند. محدودیت (۸) نشان می‌دهد که وظیفه  $i$  باید تمام شود تا وظیفه  $j$  بتواند آغاز شود. محدودیت (۹)  $Z_{ij}$  را تعریف می‌کند به طوری که  $Z_{ij} = 1$  است وقتی که وظیفه  $j$  بعد از اتمام وظیفه  $i$  شروع شود و در غیر این صورت مقدار آن ۰ است. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که وظایف  $i$  و  $j$  در صورتی که  $(i, j) \in \Psi$  باشد نمی‌توانند همزمان انجام شوند. محدودیت (۱۱) از تداخل میان جرثقیل‌های اسکله جلوگیری می‌کند. زمان اتمام هر جرثقیل اسکله توسط محدودیت (۱۲) تعیین می‌شود و محدودیت (۱۳) زودترین زمان شروع عملیات هر جرثقیل اسکله را محدود می‌کند.

مدل لی و همکاران :

اهمیت مسأله‌ی زمان‌بندی جرثقیل اسکله در افزایش بهره‌وری پایانه‌های کانتینری

لی و همکاران کشتی را در امتداد طول به انبار هایی تقسیم کردند و عملیات تخلیه و بارگیری در این انبارها صورت می‌گرفت. آن‌ها برای مدل‌سازی فرضیات زیر را در نظر گرفتند.

- ۱- جرثقیل‌های اسکله روی یک ریل حرکت می‌کنند پس نمی‌توانند از روی یکدیگر عبور کنند.
  - ۲- در هر زمان تنها یک جرثقیل اسکله می‌تواند روی یک انبار مشغول به کار باشد.
  - ۳- زمان جابجایی جرثقیل اسکله بین انبارها در برابر زمان رسیدگی جرثقیل اسکله به انبار ناچیز است پس این زمان را برابر صفر فرض می‌شود.
- نمادگذاری زیر در فرموله کردن مدل استفاده شده است:

$K$	تعداد جرثقیل‌های اسکله.
$H$	تعداد انبارهای کشتی.
$P_h$	زمان رسیدگی به انبار $h$ توسط یک جرثقیل اسکله $(1 \leq h \leq H)$ .
$M$	عدد ثابت به اندازه کافی بزرگ.
$X_{h,k}$	اگر انبار $h$ توسط جرثقیل $k$ رسیدگی شود، ۱ و در غیر این صورت ۰ می‌باشد.
$Y_{h,h'}$	اگر انبار $h$ قبل از انبار $h'$ رسیدگی شود، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ می‌باشد.
$C_h$	زمان اتمام رسیدگی به انبار $h$ $(1 \leq h \leq H)$ .

مدل ریاضی لی و همکاران به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize :} \\ & \max_h C_h \end{aligned} \quad (16)$$

منوط به:

$$C_h - P_h \geq 0 \quad \forall 1 \leq h \leq H \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{h,k} = 1 \quad \forall 1 \leq h \leq H \quad (18)$$

$$C_h - (C_{h'} - P_{h'}) + Y_{h,h'} M \geq 0 \quad \forall 1 \leq h, h' \leq H \quad (19)$$

$$C_h - (C_{h'} - P_{h'}) - (1 - Y_{h,h'}) M \leq 0 \quad \forall 1 \leq h, h' \leq H \quad (20)$$

$$M(Y_{h,h'} + Y_{h',h}) \geq \sum_{k=1}^K kX_{h,k} - \sum_{l=1}^K lX_{h',l} + 1 \quad \forall 1 \leq h < h' \leq H \quad (21)$$

$$X_{h,k}, Y_{h,h'} \in \{1,0\} \quad \forall 1 \leq h, h' \leq H \\ \forall 1 \leq k \leq K \quad (22)$$

تابع هدف (۱۶) زمان اتمام رسیدگی به آخرین انبار را در بین همه انبارها کمینه می‌کند. محدودیت (۱۷) متغیر تصمیم‌گیری  $C_h$  را تعیین می‌کند. محدودیت (۱۸) تضمین می‌کند که هر انبار تنها می‌تواند توسط یک جرثقیل اسکله رسیدگی شود. محدودیت (۱۹) نشان می‌دهد که اگر رابطه  $C_h > C_{h'} - P_{h'}$  برقرار باشد،  $Y_{h,h'} = 1$  خواهد بود که در این صورت انبار  $h$  زودتر از انبار  $h'$  رسیدگی می‌شود. محدودیت (۲۰) نشان می‌دهد که اگر رابطه  $C_h > C_{h'} - P_{h'}$  برقرار باشد،  $Y_{h,h'} = 0$  خواهد بود. محدودیت عدم عبور جرثقیل‌ها از روی یکدیگر در محدودیت (۲۱) آورده شده است.

هر دو مدل بالا به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی مختلط فرموله شده‌اند. زمان حل این مدل‌ها را نمی‌توان به صورت یک چند جمله‌ای بیان کرد، [۷] و [۱۱]. در نتیجه زمان حل آن‌ها با افزایش ابعاد مسأله به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند. به همین دلیل از روش‌های ابتکاری برای حل آن‌ها استفاده می‌شود. کیم و بارک از روش جستجوی تصادفی تطبیقی حریصانه برای حل مدل خود استفاده کردند و آن را با روش شاخه و کران مقایسه کردند. لی و همکاران نیز ابتدا اثبات کردند که زمان حل مسأله با افزایش ابعاد آن به صورت نمایی افزایش می‌یابد در نتیجه برای حل مسأله از الگوریتم ژنتیک بهره جستند.

#### ۴. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با افزایش ترافیک کانتینری و ورود کشتی‌های غول‌پیکر برای حمل و نقل، نیاز به تخلیه و بارگیری حجم زیادی از کانتینرها احساس می‌شود. جرثقیل‌های اسکله جزء گران‌ترین تجهیزات هر پایانه‌ی کانتینری محسوب می‌شوند. یک راه برای استفاده‌ی کاراتر از منابع زمان‌بندی جرثقیل‌هاست. پژوهش‌های کمی در زمینه زمان‌بندی جرثقیل‌های اسکله انجام شده است. مدل‌های زمان‌بندی جرثقیل اسکله‌ی ساخته شده توسط محققین عموماً مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی می‌باشند. زمان حل این مدل‌ها با افزایش تعداد جرثقیل‌ها و اندازه کشتی‌ها به‌شدت افزایش می‌یابد. در نتیجه برای بدست آوردن زمان‌بندی مناسب از روش‌های فرا ابتکاری استفاده می‌شود. با بکارگیری این مدل‌ها می‌توان زمان تخلیه و بارگیری کانتینرها را کاهش، در نتیجه بهره‌وری پایانه‌ی کانتینری افزایش را افزایش داد.

#### منابع:

- [1] Baird, A.J., 2006. "Optimising the container transshipment hub location in northern europe" *Journal of Transport Geography* 14, pp. 195-214.
- [2] Yang, C. H., 2004. "The impact of bigger vessels on shipping and ports". Shipping, Logistic and Port Research Center, Korea Maritime Institute.
- [3] Rodrigue, J.P., 2011. Six Generations of Containerships, On the WWW, Accessed June 2011. URL <http://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch3en/conc3en/containerships.html>.
- [4] Chao, S.-L., Lin, Y.-J. 2011. "Evaluating advanced quay cranes in container terminals". *Transportation Research Part E* 47, pp. 432-445.
- [5] Daganzo, C.F., 1989. "The crane scheduling problem". *Transportation Research Part B* 23, pp. 159-175.
- [6] Peterkofsky, R.I., C.F. Daganzo. 1990. "A branch and bound solution method for the crane scheduling problem". *Transportation Research Part B* 24, pp. 139-172.
- [7] Kim, K.H., Park, Y.M., 2004. "A crane scheduling method for port container terminals". *European Journal of Operation Research* 156, pp. 752-768.
- [8] Lim, A., B. Rodrigues, F. Xiao, Y. Zhu. 2004. "crane scheduling with spatial constraints". *Naval Res. Logist.* 51(3). pp. 386-406.
- [9] Zhu, Y., A. Lim. 2006. "crane scheduling with non-crossing constraint". *Journal of the Operational Research Society* . 57, pp. 1464-1471.
- [10] Lim, A., B. Rodrigues, Z. Xu. 2007. "A m-parallel crane scheduling problem with non-crossing constraint". *Naval Res. Logist.* 54, pp. 115-127.
- [11] Lee, D.-H., H.Q. Wang, L. Miao. 2008. "quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals". *Transportation Research Part E* 44, pp. 124-135.

- [12] Liu, J., Y. Wan, L. Wang. 2006. "Quay crane scheduling at container terminals to minimize the maximum relative tardiness of vessel departures". *Naval Res. Logist.* 53, pp. 60-74.
- [13] Bierwirth, C., F.Meisel. 2009. "A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals". *European Journal of Operation Research* 202(3), pp. 615-627.