

طراحی زنجیره تامین با در نظر گرفتن اقتصادهای مقیاس (صرفه جویی در مقیاس) و

فراوانی (تعداد) حمل و نقل

چکیده

در این مقاله، ما یک مدل طراحی زنجیره تامین چند محصولی 3-مرتبه ای را با اقتصادهای مقیاس در حمل و نقل و انبодاری در نظر می گیریم که به صراحت فراوانی حمل و نقل در آن در نظر گرفته می شود. مدل ما به طور همزمان، موقعیت ها و اندازه محوطه مخازن، جریان های موارد و فراوانی حمل و نقل را در درون این شبکه بهینه سازی می کند. ما تمام هزینه های مرتبط را در نظر می گیریم: هزینه محصول، هزینه حمل و نقل، هزینه کرایه مخزن، هزینه توان عملیاتی مخزن و هزینه موجودی. این مسئله بر اساس یک نمونه واقعی از یک شرکت شیمیایی است. نشان خواهیم داد که در نظر گرفته اقتصادهای مقیاس و فراوانی حمل و نقل در مرحله طراحی، حیاتی است و عدم موفقیت در انجام آن منجر به هزینه های قابل توجه بالاتر از هزینه های بهینه و مطلوب می شود. انواع گسترده ای از مسائل را با راه حل شاخه و کران و با ابتکارات راه حل کارآمد مبتنی بر تکنیک های خطی سازی تکراری که توسعه داده ایم، حل می نماییم. ما نشان می دهیم که این ابتکارات نسبت به تکنیک استاندارد شاخه و کران، برای مسائل بزرگی چون یکی از شرکت های شیمیایی که به تحقیق ما مرتبط هستند عالی تر هستند.

کلمات کلیدی: طراحی زنجیره تامین، اقتصادهای مقیاس، فراوانی حمل و نقل، خطی سازی تکراری

1. مقدمه

افزایش جهانی شدن و گستردگی آن به افزایش روزافزون حجم حمل و نقل ها منجر شده است. یکی از صنایعی که تغییرات زیادی را به خود دیده است، صنعت شیمیایی است. در طی دهه اخیر، بسیاری از شرکت ها در این صنعت،

سایت های تولید جهانی را تاسیس نموده اند و از این سایت ها برای برآورده سازی تقاضاهای جهانی استفاده نموده اند. به طور مثال (2007) Bayer, برای سرمایه گذاری 1.8 میلیارد دلار آمریکا در سایت تولید Toluylen-Diisocyanat (TDI) در شانگهای در سال 2009 برنامه ریزی نمود و برای این کار، ظرفیت تولید این سایت را دو برابر و به 300000 تن در هر سال رساند. سرمایه گذاری های مشابهی توسط بسیاری از شرکت های دیگر صورت گرفته است. (2007) BASF ظرفیت های کارخانه های خود را در Nanjing, Ludwigshafen, Antwerp و Pasir Gudang از 2002 تا 2006 گسترش دادند و یک کارخانه جدید را در Pudong در سال 2006 افتتاح نمودند. (2006,2007) SABIC, the Saudi Basic Industries Corporation, که یک تولیدکننده پیشرو در مواد شیمیایی، کودها، پلاستیک ها و فلزات است، شبکه جهانی خود را با تسلط بر تجارت پتروشیمی (2002) Dutch group DSM, عملیات های پتروشیمی Huntsman's UK, و عملیات های GE Plastics برای ایالات متحده (2006) گسترش داد. در سال 2006, SABIC تقریباً 500 شناور را برای حمل و نقل 8.6 میلیون تن مواد شیمیایی و گاز به بیش از 90 بندر در بیشتر از 35 کشور در سراسر دنیا استفاده نمود.

برای تطبیق تقاضای جهانی با عرضه جهانی، شرکت های شیمیایی از زنجیره های عرضه جهانی استفاده نمودند. معمولاً، محصولات در کارخانه های معدودی تولید می شوند و به محوطه های مخازن منطقه ای منتقل می شوند و در آنجا ذخیره می شوند. بنابراین تقاضای مشتری با استفاده از این محوطه های مخازن منطقه ای برآورده می شود. در بیشتر وضعیت ها، مخازن تحت مالکیت یک اپراتور محوطه قرار دارند که مخازن را به شرکت های شیمیایی کرایه می دهد. هنگام طراحی یک زنجیره تامین (عرضه)، شرکت ها باید چند تصمیم بگیرند: تصمیم گیری در مورد ترکیب محصول و کمیت هیا تولید در سایت های تولید، در موقعیت های محوطه مخازن و ظرفیت های مخازن و در مورد فراوانی تحویل ها بین کارخانه ها. این تصمیمات طراحی زنجیره تامین، تصمیمات متوسط تا بلند مدت هستند و معمولاً به صورت سالانه یا دوسالانه گرفته می شوند.

ساختار هزینه زنجیره های تامین مواد شیمیایی، چندین صرفه جویی مقیاسی (اقتصادهای مقیاس) مهم را نشان می دهد که باید در زمان طراحی زنجیره تامین در نظر گرفت. مهم ترین آنها، صرفه جویی های مقیاسی در کمیت های حمل و نقل و در ظرفیت های مخازن است. نرخ کرایه کشتی بین اروپا و آمریکای جنوبی، به عنوان نمونه، از حدود 400 USD/m^3 به 200 USD/m^3 کاهش یافته است، در حالیکه حجم حمل و نقل از 1000 به 10000 مترمکعب افزایش یافته است. هزینه های کرایه مخازن، صرفه جویی های مقیاسی مشابه را نشان می دهد. هزینه کرایه یک مخزن معمولی 500 مترمکعبی، به عنوان نمونه، $54 \text{ USD/m}^3/\text{year}$ (54 دلار آمریکا/مترمکعب/در سال) است در حالیکه هزینه کرایه یک مخزن معمولی 500 مترمکعبی، به عنوان نمونه، $24 \text{ USD/m}^3/\text{year}$ است.

تحقیقات قبلی به برخی از موضوعات پرداخته اند که در زمان طراحی زنجیره های تامین مانند موردی که ما در نظر می گیریم، به یکدیگر مرتبط هستند. هرچند، از نظر ما، رویکردی وجود ندارد که تمام این مشخصات اصلی را به طور همزمان در نظر گرفته باشد: طراحی ترکیبات محصول، مسیرهای حمل و نقل، فراوانی حمل و نقل، موقعیت های انبارش مواد، اندازه های انبارش و ذخیره، در نظر گرفتن موارد غیرخطی در حمل و نقل و هزینه های انبارش. از آنجا که تصمیمات عمدتاً بر یکدیگر تاثیر می گذارند، آنها باید به طور همزمان برای کسب یک طراحی زنجیره تامین کارآمد گرفته شوند و نمی توانند به طور مستقل از یکدیگر گرفته شوند.

لیست نمادها

	ا مجموعه کارخانه ها
i	کارخانه
P	مجموعه محصولات
p	محصول
J	مجموعه موقعیت های محوطه مخزن
j	موقعیت محوطه مخزن
K	مجموعه مشتریان

k	مشتری
t	برنامه زمانبندی حمل و نقل
$q_{ijpt}^{(1)}$	حجم حمل و نقل شده محصول p از کارخانه i به محوطه مخزن j در برنامه زمانبندی t
Cip	هزینه تولید واحد محصول p در کارخانه i
Z^p	هزینه کلی تولید
$O_t^{(1)}$	تعداد حمل و نقل برای انتقال از کارخانه ها به موقعیت های محوطه مخزن در زمانبندی t
\tilde{Z}_{ijt}^{T1}	هزینه حمل و نقل در هر سفر بین کارخانه i و محوطه مخزن j در زمانبندی t
N	مجموعه سطوح هزینه/ بخش های تابع-هزینه در \tilde{Z}_{ijt}^{T1}
n	بخش سطوح هزینه/ بخش های تابع-هزینه در \tilde{Z}_{ijt}^{T1}
$B_{ijn}^{(1)}$	کمیتی که در آن نقطه انفصال n ام در \tilde{Z}_{ijt}^{T1} رخ می دهد
$V_{ijn}^{(1)}$	هزینه متغیر/شیب بخش n ام در \tilde{Z}_{ijt}^{T1}
$F_{ijn}^{(1)}$	هزینه ثابت/ عرض- Y معادل بخش n ام در \tilde{Z}_{ijt}^{T1}
Z^{T1}	هزینه سالانه کلی برای حمل و نقل بین کارخانه ها و موقعیت های مخزن
$q_{jip}^{(3)}$	حجم محصول p ذخیره شده در محوطه مخزن j
\tilde{Z}_{jip}^{S1}	هزینه کرایه مخزن برای محصول p در موقعیت مخزن j
M	مجموع بخش های سطوح هزینه/تابع-هزینه در \tilde{Z}_{jip}^{S1}
m	بخش سطوح هزینه/تابع-هزینه در \tilde{Z}_{jip}^{S1}
$B_{jm}^{(3)}$	کمیتی که در آن نقطه انفصال n ام در \tilde{Z}_{jip}^{S1} رخ می دهد
$V_{jm}^{(3)}$	هزینه متغیر/شیب بخش n ام در \tilde{Z}_{jip}^{S1}
$F_{jm}^{(3)}$	هزینه ثابت/ عرض- Y معادل بخش n ام در \tilde{Z}_{jip}^{S1}
Z^{S1}	هزینه کلی کرایه مخزن در سراسر تمام موقعیت ها و محصولات مخزن
Rj	هزینه چرخش مخزن برای موقعیت مخزن j در هر حجم
Z^{S2}	هزینه کلی چرخش مخزن در تمام موقعیت های و محصولات

H	نرخ هزینه نگهداری موجودی سالانه
Z^{S3}	هزینه نگهداری موجودی کلی در تمام موقعیت ها و محصولات مخزن
Z^S	هزینه ذخیره کلی
$O^{(2)}$	تعداد حمل و نقل برای انتقال از موقعیت های محوطه مخزن به مشتریان
$q_{jkp}^{(2)}$	حجم حمل و نقل شده محصول p از محوطه مخزن j به مشتری k
\tilde{Z}_{jk}^{T2}	هزینه حمل و نقل در هر سفر از محوطه مخزن j به مشتری k
$V_{jk}^{(2)}$	هزینه متغیر/شیب در \tilde{Z}_{jk}^{T2}
$F_{jk}^{(2)}$	هزینه ثابت/عرض- γ در \tilde{Z}_{jk}^{T2}
Z^{T2}	هزینه سالانه کلی برای حمل و نقل بین موقعیت های مخزن و مشتریان
$Z(q)$	تابع کلی هزینه (برای هدف توضیحی)
q	کمیت (توضیحی)
Bn	کمیتی که در آن نقطه انفصال n ام در $Z(q)$ رخ می دهد
Vn	هزینه متغیر/شیب بخش n ام در $Z(q)$
Fn	هزینه ثابت/عرض- γ معادل بخش n ام در $Z(q)$
qn	کمیت در بخش n ام در $Z(q)$
xn	متغیر تصمیم گیری دودویی، 1 در صورتی که $q_n > 0$ و در غیراینصورت 0
Dkp	تقاضا برای محصول p از مشتری k
\hat{Z}^{T1}	نسخه خطی شده \tilde{Z}^{T1}
\hat{Z}^{S1}	نسخه خطی شده \tilde{Z}^{S1}
\hat{Z}^S	نسخه خطی شده \tilde{Z}^{S1}
\hat{Z}^{T2}	نسخه خطی شده \tilde{Z}^{T2}
$W_{ijt}^{(1)}$	ضریب هزینه-ترکیبی در \tilde{Z}^{T1}
$W_{jk}^{(2)}$	ضریب هزینه-ترکیبی در \hat{Z}^{T2}
$W_{jp}^{(3)}$	ضریب هزینه-ترکیبی در \tilde{Z}^{S1}
$h_{ij}^{(1)}$	جریان کلی تمام محصولات از محوطه مخزن j به مشتری k

مدل حاصل؛ یک مسئله جریان شبکه خطی تکه ای غیرمحدب است که به عنوان سخت- NP نامیده می شود (مثلاً Kim and Pardalos, 2000b). ما تکنیک (Balakrishnan and Graves (1989) را برای بیان مدل خود به عنوان برنامه ترکیبی - عدد صحیح به کار می بریم. برای حل موثر مسائلی در اندازه واقعی، روش های راه حل ابتکاری جدید را توسعه دادیم. کار ما بر اساس یک پروژه برای یک شرکت شیمیایی است که زنجیره تامین دریایی آن را دوباره طراحی نمود و ما تحلیل های عددی خود را بر اساس داده های این شرکت پایه نهادیم. با این حال، کاربرد این مدل و رویکردهای راه حل به این محیط محدود نمی شوند. آنها برای طراحی زنجیره های تامین در صنایع دیگر که مشخصات مشابه با صنعت شیمیایی دارند، مانند صنایع زغال سنگ، فلز، سنگ، نفت و گاز قابل استفاده هستند.

بقیه این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. در بخش 2، نوشته های مرتبط را بررسی می نماییم. در بخش 3، مسئله طراحی زنجیره تامین را از نظر ریاضی مدلسازی می نماییم. تاکید خاص ما بر مدلسازی موارد غیرخطی در هزینه ها به طور دقیق و گنجاندن تعداد تحویل به عنوان متغیرهای تصمیم گیری می باشد. در بخش 4، چندین ابتکار را برای حل مسائل طراحی زنجیره تامین دنیای واقعی توسعه می دهیم. همچنین نشان می دهیم که چگونه راه حل های بهینه را می توان برای مسائل در اندازه کوچک تا متوسط محاسبه نمود و چگونه می توان یک حد پایین را برای عملکرد خط مشی بهینه محاسبه نمود. در بخش 5، ما تعدادی از مسائل را حل می کنیم و عملکرد ابتکارات را مقایسه می نماییم. نتایج ما نشان می دهد که این ابتکارات، راه حل هایی را تولید می کند که نزدیک به بهینگی هستند. همچنین ما مزایای مدل جامع خود را در برابر مدل های ساده شده نشان می دهیم. در بخش 6، نتیجه گیری می نماییم.

2. مرور نوشته ها

در ارتباط با تحقیقات ما، نوشته هایی در مورد مدل های طراحی زنجیره تامین با هزینه ذخیره غیرخطی و هزینه حمل و نقل خطی، مدل هایی با هزینه ذخیره خطی و هزینه حمل و نقل غیرخطی و مدل هایی با ذخیره غیرخطی و هزینه حمل و نقل غیرخطی وجود دارند. ما نوشته های مرتبط را در این بخش مرور می نماییم.

مدل‌ها با هزینه ذخیره غیرخطی و هزینه حمل و نقل خطی برای سایت‌های ظرفیت دار و بدون ظرفیت توسعه یافته‌اند. (Feldman et al (1966), یک مدل بدون ظرفیت را معرفی نمودند که با ابتکار جمع و کم کردن حل نمودند. اصلاحات این روش برای مسائل بدون ظرفیت توسط Spielberg (1969a, b), Drysdale and Sandiford (1969), Khumawala and Kelly (1974), and Whitaker (1985) توسعه یافته است. (Baxter (1984) از یک نسخه پیوسته این مسئله استفاده نمود که در آن، انبارها را می‌توان در هر جایی قرار داد و به مجموعه‌ای از موقعیت‌های بالقوه از پیش تعریف شده محدود نمی‌شوند. او این مسئله را با یک روش تخصیص-موقعیت و تشویق حل نمود. رویکردهای راه حل بهینه توسط Efroymson and Ray (1966) توسعه یافته است و آنها از روش شاخه و کران برای حل این مسئله استفاده نمود و Broek et al. (2006) نیز آن را با اتکا بر الگوریتم آزادسازی لاگرانژ توسعه داد.

یکی از اولین مدل‌های ظرفیت دار توسط Kelly and Khumawala (1982) معرفی شد. آنها این مسئله را به عنوان مسئله حمل و نقل مدلسازی نمودند و آن را به صورت تکراری با استفاده از هزینه‌های حاشیه‌ای حل نمودند که وابسته به حجم کنونی تخصیص داده شده به هر سایت است. تکنیک‌های خطی سازی تکراری توسط Klincewicz (1985) برای یک مسئله چند-محصولی و توسط (Klincewicz et al. (1988) برای یک مسئله چند-دوره‌ای استفاده شده‌اند. Holmberg (1984, 1994) and Holmberg and Ling (1984, 1994) and Holmberg and Ling تکنیک‌های راه حل مختلف را برای مسائل ظرفیت دار با توابع هزینه انبار کردن نردبانی توسعه دادند. (Correia and Captivo (2003) یک مسئله موقعیت ظرفیت دار پیمانه‌ای را با استفاده از آزادسازی لاگرانژ حل نمودند. یک مدل تصادفی که شامل هزینه موجودی نیز می‌شود توسط Romeijin et al. (2007) تحلیل شد.

مدل‌های دارای هزینه انبارش خطی و هزینه حمل و نقل غیرخطی، هزینه‌های انبارش را نسبتاً متفاوت در نظر می‌گیرند. در تعدادی از مدل‌ها، هزینه انبارش مستثنی شده است. (Klincewicz (1990) طراحی یک سیستم توزیع چند-محصولی 3-پله‌ای را تحلیل نمود و یک راه حل دقیق برای چندین مورد ویژه توسعه داد. Lapierre

(2004) et al. یک مدل موقعیت را با توابع جامع هزینه در نظر گرفت، مثلاً با در نظر گرفتن تحفیفات بار کامیون کامل و حالات حمل و نقل مختلف. آنها این مدل را با ترکیبی از الگوریتم های جستجوی همسایگی متغیر و تابو حل نمودند. (Kelley and Bryan (1998) 0' یک مسئله هاب چندپله ای تک محصول را با هزینه حمل و نقل غیرخطی بین هاب ها تحلیل نمود و یک مسئله کوچک را با حل کننده تجاری حل نمود.

(2002) Klineciewicz انواع رویکردهای راه حل، مانند شمارش، جستجوی تابو، جستجوی تطبیقی تصادفی حریصانه برای حل یک مسئله موقعیت هاب با چند هاب روی دو سطح به کار گرفت و جریان های میان-هابی را از طریق تخفیفات میسر نمود. (Kim and Pardalos (2000a) یک رویکرد قرارداد حوزه و مقیاس بندی-شیب را برای حل مسائل موقعیت هاب با توابع هزینه خطی تکه ای پیوسته توسعه داد. (2000a) این رویکرد را برای توابع ناپیوسته گسترش داد. یک مدل که شامل هزینه ثابت اما متغیر انبارش می دهد توسط Lin et al. (2006) تحلیل شده است. آنها هزینه حمل و نقل را بر اساس جریان قوس کلی تعیین نمودند و فرض نمودند که این مورد مستقل از اندازه مرتبه است. مدل هایی که هزینه انبار کردن خطی را علاوه بر یک هزینه ثابت می افزایند، توسط Gumus and Bookbinder (2004) برای یک مدل کراس-داکینگ توسعه یافته است که ترکیبی از حمل و نقل های کمتر از بار کامیون در بارهای کامیون کامل و توسط Syam (2002) برای موقعیت های ذخیره ظرفیت دار است. (2002) Syam نیز تعداد حمل و نقل را نیز بهینه سازی نمود.

مدل های دارای هزینه ذخیره غیرخطی و حمل و نقل غیرخطی در ابتدا توسط Baumol and Wolfe (1958) تحلیل شدند. آنها یک مدل را با هزینه حمل و نقل و ذخیره غیرخطی تحلیل نمودند و نشان دادند که چگونه راه حل های بهینه موضعی را می توان تعیین نمود. مدل آنها شامل هزینه موجودی یا فراوانی های جایگزینی نبود. مدل های مشابه توسط Zangwill (1968) حل شدند و او یک الگوریتم جریان شبکه هزینه مینیمم را پیشنهاد داد و (1974) Soland از یک الگوریتم شاخه و کران برای حل این مسئله استفاده نمود.

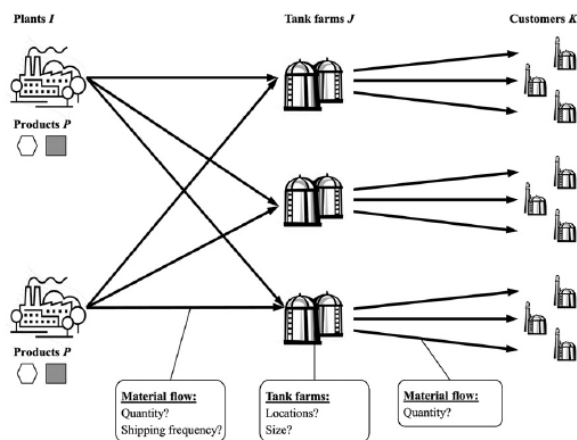
(1989) Paraschis هزینه موجودی را در مدل خود گنجانده اما فرض نمود که تعداد جایگزینی ها از منبع خارجی ارائه می شوند. (1993) Fleischmann این مدل را به یک محیط تصادفی گسترش داد. هر دوی

Paraschis (1989) and Fleischmann (1993), از مدل های جریان استفاده نمودند و این مسئله را به طور ابتکاری حل نمودند.

مرور نوشته ها نشان می دهد که تحقیقات موجود به زیرمجموعه های عواملی پرداخته اند که در زمان طراحی زنجیره های تامین برای وضعیت هایی مانند وضعیت پیش روی یک شرکت که مد نظر تحقیق ماست، مرتبط هستند. با این حال، تحقیقات قبلی به طور همزمان به تمام این موارد نپرداخته اند، یعنی بهینه سازی ترکیب محصول، موقعیت ها، جریان های مواد و فراوانی های حمل و نقل در یک محیط با صرفه جویی های مقیاسی در حمل و نقل و انبارش. در این مقاله ما این شکاف را پر می کنیم.

3. فرمولاسیون مدل

سپس، ما مدل زنجیره تامین مد نظر خود را بیان خواهیم نمود: در نظر بگیرید که I مجموعه تمام کارخانه های دارای اندیس در i باشند و P ، مجموعه تمام محصولات اندیس دار در p باشند. هر کارخانه در I می تواند یک زیرمجموعه از محصولات را از P تولید نماید که می توان آنها را توسط مجموعه ای از موقعیت های بالقوه محوطه مخزن با اندیس در J حمل و نقل نمود. از آنجا، آنها می توانند برای خدمت رسانی به تقاضای مجموعه ای از K مشتری اندیس دار در K حمل و نقل شوند. (شکل 1).

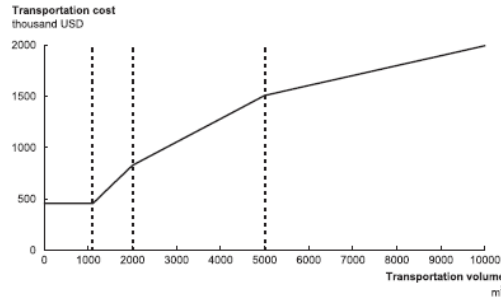


شکل 1 ساختار شماتیک زنجیره تامین

در این کاربرد که انگیزه تحقیق ماست، محوطه های مخزن توسط کارخانه ها به واسطه حمل و نقل دریایی تامین می شوند که در آن هزینه حمل و نقل بین کارخانه ها و محوطه های مخزن عمدتاً غیرخطی است. سپس محصولات در مخازن محوطه های مخزن ذخیره می شوند. هزینه کرایه واحد برای مخازن بزرگ بسیار کمتر از هزینه کرایه واحد برای مخازن کوچک است، یعنی هزینه ذخیره عمدتاً غیرخطی است. مشتریان از محوطه های مخزن توسط اپراتورهای بار کشتی دریایی منطقه ای تامین می شوند که تجربه صرفه جویی از نظر کاهش تدریجی هزینه-ثابت را البته با عوامل هزینه ثابت دارند. ما از بالانویس های (1)، (2) و (3) برای نشان دادن پارامترها و متغیرهای به ترتیب مرتبط با حمل و نقل از نیروگاه ها به موقعیت های محوطه مخزن، حمل و نقل از محوطه های مخزن به مشتریان و ذخیره در مخازن استفاده خواهیم نمود.

3.1 هزینه حمل و نقل بین سایت های تولید و محوطه های مخزن

مخازن از سایت های تولید به محوطه های مخزن، نوعاً توسط کشتی های حمل مایع حمل و نقل می شوند. چون صرفه جویی های مقیاسی زیادی در حمل و نقل وجود دارد، هزینه حمل و نقل نشاندهنده یک ساختار عمدتاً غیرخطی است. یک مثال نوعی، هزینه حمل و نقل از روتردام به بوینوس آیرس است. فراهم کننده خدمات لجستیک که در حال حاضر توسط این شرکت شیمیایی استفاده می شود، یک قیمت ثابت $454,300 \text{ USD}$ را برای حجم حدود 110 مترمکعب و 413 USD/m^3 برای حجم های بین 110 و 2000 مترمکعب مطالبه می کند. حجم های بالای 2000 مترمکعب و زیر 5000 مترمکعب، یک تخفیف واحد اضافی را دریافت می کنند و در 227 USD/m^3 قیمت گذاری می شوند. حجم های بالای 5000 مترمکعب، یک تخفیف واحد اضافی را دریافت می کنند و هزینه آنها 97 USD/m^3 است. توجه داشته باشید که تخفیف تنها برای حجم افزایشی تدریجی اعمال می شود، مثلاً برای یک حجم حمل و نقل 2500 مترمکعب، 1100 مترمکعب در نرخ حجم $454,300 \text{ USD}$ مطالبه می شوند، 900 مترمکعب در $454,300 \text{ USD}$ مطالبه می شوند و 500 مترمکعب دارای هزینه 227 USD/m^3 است. در عمل، این نوع تخفیف معمولاً به عنوان تخفیف افزایشی نامیده می شود. برای این مثال، شکل 2 نشان می دهد که چگونه هزینه حمل و نقل به حجم حمل و نقل وابسته است.



شکل 2. هزینه حمل و نقل بین روتردام و بوینوس آیرس.

حجم در هر حمل و نقل وابسته به فراوانی حمل و نقل انتخابی است. بنابراین، گنجاندن فراوانی های قبلی در برنامه ریزی راهبردی زنجیره تامین به منظور ارزیابی درست صرفه جویی ها در مقیاس و اندازه های مورد نیاز مخزن مهم است. عدم موفقیت در گنجاندن این عوامل می تواند به طرح های زیربهدینه زنجیره تامین منجر شود، همانطور که در بخش 5.2 نشان خواهیم داد. در مدل ما، ما از نماد مجموعه T برای زمانبندی های حمل و نقل اندیس دار در t استفاده خواهیم نمود. زمانبندی حمل و نقل، یک شاخص است که فراوانی را مشخص می کند که در آن یک محوطه مخزن به یک نیروگاه خدمات رسانی می نماید. در تئوری، بیشتر از یک زمانبندی را می توان برای یک محصول در طول یک مسیر معین استفاده نمود. هرچند، در عمل می بینیم که انتخاب یک زمانبندی به طور کلی به منظور بهره برداری از اقتصادهای مقیاس، مطلوب است. جدول 1 برنامه های زمانبندی را نشان می دهد که این شرکت شیمیایی در نظر گرفته است و فراوانی های متناظر $\bar{O}_t^{(1)}$ از حمل و نقل ها را از نیروگاه ها به موقعیت های محوطه مخزن گزارش می دهد. در فرآیند بهینه سازی، فراوانی های مختلف را می توان برای محصولات، مشتریان و کارخانه های مختلف انتخاب نمود.

جدول 1. برنامه های زمانبندی تحویل

t	1	2	3	4
Frequency	Bi-weekly	Monthly	Bi-monthly	Quarterly
$\bar{O}_t^{(1)}$	26/yr	12/yr	6/yr	4/yr

حجم محصول p را که از سایت تولید i به محوطه مخزن j در یک برنامه زمانبندی t منتقل می شوند، به صورت $q_{ijpt}^{(1)}$ نشان می دهیم. چون محصولات مختلف معمولاً در مخازن جداگانه منتقل می شوند، اما روی یک وسیله نقلیه تک، نرخ کرایه کشتی بر اساس حجم کلی تمام محصولات حمل و نقل شده در هر سفر مطالبه می شود، یعنی

$$\frac{\sum_p q_{ijpt}^{(1)}}{o_t^{(1)}}.$$

ما هزینه حمل و نقل $\tilde{Z}_{ijt}^{T1}(q_{ijpt}^{(1)})$ را در هر سفر بین سایت های تولید i و j محوطه مخزن روی برنامه های زمانبندی حمل و نقل t به صورت تابع خطی تکه ای مدلسازی نموده ایم. ما کمیت هایی را نشان می دهیم که در آن نقاط انفصال در تابع هزینه برای حمل و نقل از سایت تولید i به محوطه مخزن j با $B_{ijn}^{(1)}$ رخ می دهد که در آن $n \in \{1, \dots, N\}$ به سطح هزینه اشاره می کند (یعنی، بخش تابع خطی تکه ای) و به طور پی در پی نقاط انفصال را نشان می دهد. چون ما یک مدل بدون ظرفیت را در نظر می گیریم، $B_{ijn}^{(1)}$ را برای یک Big M بزرگ تنظیم می نماییم. در نظر بگیرید که $F_{ijn}^{(1)}$ و $V_{ijn}^{(1)}$ نشاندهنده شیب و محل تقاطع بخش n ام این تابع است. در محیط ما، هزینه های حمل و نقل متغیر در هر متر مکعب از کارخانه i به محوطه مخزن j در سطح هزینه n است و $F_{ijn}^{(1)}$ را می توان به طور مستقیم از هزینه تثبیت شده متناظر استنتاج نمود. توجه داشته باشید که شرکت های کشتیداری حمل و نقل، هر برنامه زمانبندی ثبت شده دفتری را به طور جداگانه هزینه گیری می نمایند، بدین معنی که زمانی که دو زمانبندی با هم همزمان می شوند، هیچ تخفیف اضافی با توجه به حجم زیادتر این حمل و نقل خاص وجود ندارد. دو ثبت دفتری به صورت حمل و نقل های جداگانه مطالبه می شوند. هزینه حمل و نقل در هر سفر از یک سایت تولید i به محوطه مخزن j برای یک زمانبندی خاص t برابرست با

$$\tilde{Z}_{ijt}^{T1}(q_{ijpt}^{(1)}) = \begin{cases} F_{ijn}^{(1)} + V_{ijn}^{(1)} \frac{\sum_p q_{ijpt}^{(1)}}{o_t^{(1)}} & \text{if } B_{ij,n-1}^{(1)} < \frac{\sum_p q_{ijpt}^{(1)}}{o_t^{(1)}} \leq B_{ijn}^{(1)} \\ 0 & \text{if } \sum_p q_{ijpt}^{(1)} = 0 \end{cases} \quad \forall i, j, t. \quad (1)$$

هزینه کلی حمل و نقل سالانه برای تمام سایت های تولید A ، Z محوطه مخزن و زمانبندیهای حمل و نقل را می توان به صورت زیر محاسبه نمود

$$Z^{T1}(q_{ijpt}^{(1)}) = \sum_{i,j,t} \left(\tilde{Z}_{ijt}^{T1}(q_{ijpt}^{(1)}) O_t^{(1)} \right). \quad (2)$$

نشان می دهیم که چگونه معادله 1 در شکل مختلط-عدد صحیح در بخش 5 تبدیل می شوند.

3.2 هزینه تولید

حجم تولید p که در سایت تولید A تولید می شود، به صورت $\sum_{j,t} q_{ijpt}^{(1)}$ قابل محاسبه است- که حجم کلی محصول p حمل و نقل شده از کارخانه A به تمام Z محوطه مخزن برای تمام زمانبندی های t یا به بیانی دیگر، کل حمی و نقل های خارج از کران کارخانه مورد نظر است. توجه داشته باشید که در کل، تنها یک t در یک مسیر خاص برای یک محصول خاص فعال خواهد بود، به طوری که اقتصادهای مقیاس را می توان بهره برداری نمود، هرچند ما محدودیتی را برای ممانعت از بیش از یک زمانبندی حمل و نقل از مورد انتخاب شده نمی گنجانیم. ما روی تمام t جمع را انجام می دهیم، زیرا کشتی های فرستاده شده به موقعیت های مختلف Z می توانند دارای زمانبندی های مختلف باشند. از آنجا که سایت های تولید مختلف دارای هزینه های نیروی کار مختلف هستند، بازده ها، تجهیزات و غیره، هزینه تولید واحد مطابق با سایت تولید متغیر است. در نظر بگیرید که C_{ip} ، هزینه تولید واحد محصول p در سایت A باشد، بنابراین هزینه تولید کلی Z^P را می توان به صورت زیر محاسبه نمود

$$Z^P(q_{ijpt}^{(1)}) = \sum_{i,p} \left(C_{ip} \sum_{j,t} q_{ijpt}^{(1)} \right). \quad (3)$$

3.3 هزینه ذخیره

مایعات از سایت های تولید به محوطه های مخزن حمل و نقل می شوند و در آنجا قبل از توزیع به مشتریان ذخیره می شوند. یک مخزن جداگانه برای هر محصول مورد نیاز است تا از مخلوط شدن مایعات جلوگیری شود. سه نوع

هزینه برای ذخیره به میان می آیند: هزینه برای کرایه یک مخزن، هزینه برای گردش های مخزن و هزینه نگهداری موجودی.

هزینه کرایه مخزن تحت صرفه جویی مقیاس قرار دارد، زیرا مالکان محوطه مخزن، نرخ های کمتری را برای هر مترمکعب برای مخازن بزرگتر از مخازن کوچکتر مطالبه می نمایند. ساختار هزینه کرایه مخزن برای محوطه مخزن واقع در بندرگاه Durban در آفریقای جنوبی، یک نمونه نوعی است که در آن هزینه کرایه مخزن واحد در صورتی تا 50% کاهش می یابد که حجم های زیاد کافی کرایه شوند. جدول 2 نشاندهنده ساختار مفصل نرخ ها است.

جدول 2 نرخ های نمونه کرایه انبار

Quantity	Fixed rental rate	Variable rental rate
Less than 900 m ³	4800 USD	44 USD/m ³
Between 900 m ³ and 1350 m ³	4800 USD	31 USD/m ³
Greater than 1350 m ³	4800 USD	22 USD/m ³

ما میزان محصول p ذخیره شده در موقعیت محوطه مخزن j و در نتیجه اندازه مورد نیاز مخزن را با $q_{jp}^{(3)}$ نشان می دهیم. توجه داشته باشید که اینها متغیرهای کمکی هستند، زیرا میزان ذخیره شده برابر با اندازه تمام حمل و نقل

های رسیده در مخزن ظرف یک چرخه حمل و نقل است، یعنی $B_{jm}^{(3)} \cdot \sum_{i,t} (q_{ijpt}^{(1)} / O_t^{(1)})$ نشاندهنده کمیت های ذخیره ای است که در آن نقاط انفصال در تابع هزینه کرایه مخزن از محوطه مخزن j رخ می دهد که در آن $m \in \{1, \dots, M\}$ به سطح هزینه مورد نظر و تعداد پی در پی نقاط انفصال اشاره می کند. از آنجایی که ما از یک

مدل بی ظرفیت استفاده می کنیم، $B_{jm}^{(3)}$ را برای یک Big M تنظیم می نماییم. هزینه کرایه مخزن در موقعیت j شامل نرخ سالانه ثابت در هر مخزن کرایه شده، $F_{jm}^{(3)}$ و از یک بخش هزینه متغیر مطالبه شده سالانه در هر متر

مکعب مخزن کرایه شده $V_{jm}^{(3)}$ می شود. هزینه کرایه حاصل مخزن برای یک موقعیت j و محصول p توسط

$$\tilde{Z}_{jp}^{S1}(q_{jp}^{(3)}) = \begin{cases} F_{jm}^{(3)} + V_{jm}^{(3)} q_{jp}^{(3)} & \text{if } B_{j,m-1}^{(3)} < q_{jp}^{(3)} \leq B_{jm}^{(3)}, \\ 0 & \text{if } q_{jp}^{(3)} = 0, \end{cases} \quad \forall j, p. \quad (4)$$

نشان داده می شود.

در کل، هزینه کرایه مخزن در تمام موقعیت های مخزن z و p محصول به صورت زیر محاسبه می شود

$$Z^{S1} = \sum_{j,p} \tilde{Z}_{jp}^{S1}(q_{jp}^{(3)}). \quad (5)$$

ما نشان می دهیم که چگونه معادله (4) به شکل مختلط-عدد صحیح در بخش 3.5 تبدیل می شود.

هزینه گردش مخزن در بالای نرخ های کرایه مطالبه می شود. یک گردش مخزن در نرخ کرایه گنجانده می شود.

برای حرکات اضافی مخزن در موقعیت z (یعنی جریان های داخلی و بیرونی)، یک نرخ متغیر RJ بر اساس حجم

مطالعه می شود. کمیت مرتبط در هر موقعیت z و محصول p توسط کم کردن گردش گنجانده شده مخزن (یعنی

$q_{jp}^{(3)}$ ، اندازه مخزن) از توان عملیاتی کلی، یعنی $\sum_{i,t} q_{ijpt}^{(1)}$ محاسبه می شود. هزینه حاصل برای تمام موقعیت های i

و p محصول به صورت زیر است

$$Z^{S2}(q_{ijpt}^{(1)}, q_{jp}^{(3)}) = \sum_{j,p} \left(\left(\sum_{i,t} q_{ijpt}^{(1)} - q_{jp}^{(3)} \right) R_j \right). \quad (6)$$

هزینه نگهداری موجودی بر اساس میانگین سرمایه کاری محاسبه می شود. حجم متوسط محصول ذخیره شده p

آمده از سایت تولید i برابر با $\sum_{j,t} \tilde{q}_{ijpt}^{(1)} (q_{ijpt}^{(1)} / (2O_t^{(1)}))$ است. برای محاسبه هزینه نگهداری، ما باید ارزش پولی

میانگین سطح موجودی را بر اساس هزینه محصول Cip و مطالبه یک هزینه نگهداری سالانه H به دست آوریم که

توسط هزینه سرمایه شرکت ارائه می شود:

$$Z^{S3}(q_{ijpt}^{(1)}) = \sum_{i,p} \left(\sum_{j,t} \left(q_{ijpt}^{(1)} / (2O_t^{(1)}) \right) C_{ip} \right) H. \quad (7)$$

با اضافه نمودن سه مولفه هزینه ذخیره، هزینه ذخیره کلی را به دست می آوریم

$$Z^S(q_{ijpt}^{(1)}, q_{jp}^{(3)}) = Z^{S1}(q_{jp}^{(3)}) + Z^{S2}(q_{ijpt}^{(1)}, q_{jp}^{(3)}) + Z^{S3}(q_{ijpt}^{(1)}). \quad (8)$$

3.4 هزینه حمل و نقل بین محوطه های مخزن و مشتریان

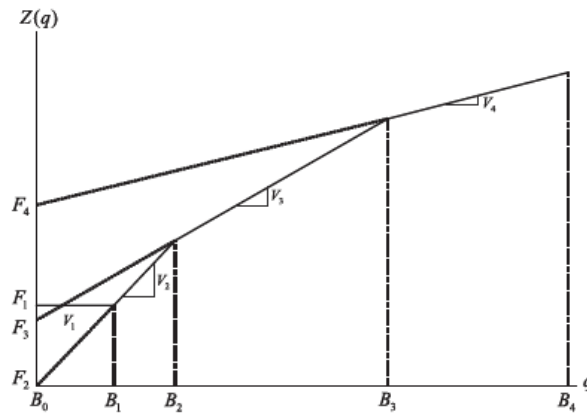
مشتریان از محوطه های مخزن بر اساس یک برنامه زمانبندی حمل و نقل ثابت تامین می شوند. این برنامه های زمانبندی حمل و نقل توسط تقاضاهای مشتری ارائه می شوند. آنها غالب تر هستند و حجم حمل و نقل در مقایسه با حمل و نقل از کارخانه ها به محوطه های مخزن کمتر هستند. ما از پارامتر $O^{(2)}$ برای نشان دادن تعداد حمل و نقل ها در هر سال استفاده می کنیم، یعنی فرض می کنیم که تمام مشتریان با یک برنامه زمانبندی به کار گرفته می شوند. این فرض برای شرکت شیمیایی مورد پژوهش ما برقرار است که در آن مشتریان تحت یک برنامه زمانبندی هفتگی خدمات رسانی می شوند. ما در بخش 6 در این مورد اظهار نظر می نماییم که چگونه این مدل تغییر می کند و چگونه می توان آن را در وضعیت هایی حل نمود که در آن این فرض برقرار نیست. ما کمیت محصول p حمل و نقل شده از محوطه مخزن z را به مشتری k با $q_{jzk}^{(2)}$ نشان می دهیم. هزینه های مختلف حمل و نقل متغیر و ثابت در هر مسیر از محوطه مخزن z به مشتریان k اعمال می شوند و ما آنها را به ترتیب با $F_{jk}^{(2)}$ و $V_{jk}^{(2)}$ نشان می دهیم. توجه داشته باشید که هیچ تخفیف حجمی در ساختار تعرفه وجود ندارد. اقتصادهای مقیاس تنها در شکل کاهش تدریجی هزینه ثابت وجود دارند. بررسی خواهیم نمود که چگونه تخفیفات حجمی برای این مرحله از حمل و نقل را می توان در بخش 6 گنجانید. چون چند محصول p را می توان روی یک کشتی با استفاده از مخازن جداگانه حمل و نقل نمود، حجم هر حمل و نقل از محوطه مخزن z به مشتری k را می توان به صورت $\sum_p \bar{q}_{jzk}^{(2)} / O^{(2)}$ محاسبه نمود. هزینه حمل و نقل حاصل از محوطه مخزن z به مشتری k برابرست با

$$\tilde{Z}_{jk}^{T2}(q_{jzk}^{(2)}) = \begin{cases} F_{jk}^{(2)} + V_{jk}^{(2)} \left(\sum_p \bar{q}_{jzk}^{(2)} / O^{(2)} \right) & \text{if } \sum_p \bar{q}_{jzk}^{(2)} > 0, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall j, k. \quad (9)$$

هزینه حمل و نقل کلی از تمام محوطه های مخزن به تمام مشتریان را می توان به صورت زیر محاسبه نمود

$$Z^{T2}(q_{jzk}^{(2)}) = \sum_{j,k} \tilde{Z}_{jk}^{T2}(q_{jzk}^{(2)}) O^{(2)}. \quad (10)$$

در بخش بعدی، ما این نماد را به شکل مختلط-عدد صحیح تبدیل خواهیم نمود و این تابع را به صورت تابع هزینه خط تکه ای با یک قسمت تفسیر می کنیم. توجه داشته باشید که ما یک مطالبه را برای یک نرخ ثابت برای استفاده از یک مسیر می گنجانیم. این ساختار هزینه به خوبی، وضعیت شرکت شیمیایی را مدلسازی می کند که از یک شرکت حمل و نقل شخص ثالث برای خدمات رسانی به مشتریان تحت یک تعرفه با یک نرخ ثابت برای هر تحویل استفاده می کند.



شکل 3. مثالی برای تکنیک مدلسازی توابع خطی تکه ای

3.5 خطی سازی هزینه حمل و نقل و ذخیره

قسمت های بیان شده هزینه های زنجیره تامین قبلی توسط توابع هزینه خطی تکه ای مشخص می شوند. ما در حال حاضر روش کلی را معرفی خواهیم نمود که برای مدلسازی این توابع هزینه خطی تکه ای در شکل عدد صحیح-مختلط استفاده می کنیم. این روش شناسی در ابتدا توسط (BalaKrishnan and Graves (1989) پیشنهاد شد. در کل، در نظر بگیرید که $Z : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ یک تابع هزینه مستقل خطی تکه ای با کمیت q باشد

که شامل N بخش خطی مختلف می شود (یعنی، سطوح هزینه) که به صورت زیر تعریف می شود

$$Z(q) = \begin{cases} F_n + V_n q & \text{if } B_{n-1} < q \leq B_n, \\ 0 & \text{if } q = 0, \end{cases} \quad (11)$$

که در آن $0 = B_0 < B_1 < \dots < B_n < \dots < B_N$ نشاندهنده نقاط انفصال بین بخش n ام و $n+1$ ام و F_n و V_n نشاندهنده عرض و شیب بخش n ام است. شکل 3، یک مثال از چنین تابعی را ارائه می دهد.

به منظور تبدیل معادله (11) در شکل عدد صحیح-مختلط، q_n را به صورت کمیت در بخش n معرفی می نماییم،
یعنی

$$q_n = \begin{cases} q & \text{if } B_{n-1} < q \leq B_n, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall n \quad (12)$$

همچنین ما یک متغیر دودویی x_n را تعریف می کنیم که در محیط ما، نشاندهنده تصمیم برای باز یا بسته شدن برخی مسیرها یا انبارها در سطح هزینه n است، یعنی

$$x_n = \begin{cases} 1 & \text{if } q_n > 0, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall n. \quad (13)$$

مدل عدد صحیح مختلط که برای یک کمیت معین q حاصل می شود عبارتست از

$$Z(q) = \sum_n (F_n x_n + V_n q_n), \quad (14)$$

$$\sum_n q_n = q, \quad (15)$$

$$\sum_n x_n \leq 1, \quad (16)$$

$$q_n \leq x_n B_n \quad \forall n, \quad (17)$$

$$q_n \geq x_n B_{n-1} \quad \forall n, \quad (18)$$

$$q_n \geq 0 \quad \forall n, \quad (19)$$

$$x_n \in \{0, 1\} \quad \forall n. \quad (20)$$

تابع (14) هزینه برای یک ساختار هزینه خطی تکه ای را وابسته به حجم محاسبه می کند. محدودیت (15) بیان می کند که کمیت کلی q باید در میان n سطوح مختلف هزینه توسط منسوب نمودن بخش های این کمیت q به q_n متفاوت توزیع شود. سطح هزینه لزوماً مشخص می کند که کدام بخش خطی تکه ای از منحنی هزینه استفاده می شود و وابسته به حجم است. محدودیت (16) بیان می کند که اکثراً یک x_n را می توان برابر با 1 تنظیم نمود.

برای توابعی که به طور پیوسته صرفه جویی ها در مقیاس را نشان می دهند، این محدودیت لازم نیست زیرا همیشه آمیختن حجم ها به منظور به دست آوردن صرفه جویی ها در مقیاس مطلوب تر است. محدودیت (17) بیان می کند که کمیت منسوب شده به q_n نمی تواند از حد بالایی B_n تابع هزینه برای سطح هزینه مورد نظر n تجاوز نماید. به طور مشابه، محدودیت (18) بیان می کند که این کمیت نمی تواند کمتر از حد پایینی B_{n-1} تابع هزینه برای سطح هزینه مورد نظر n باشد. (18) تنها برای توابع غیرمحدب لازم است. برای توابع محدب، انتخاب یک سطح هزینه کمتر از n برای کمیت ها در محدوده سطح هزینه n هرگز بهینه نیست. محدودیت های (17) و (18) نیز x_n را اجباری می کند که متناظر با $q_n > 0$ است که باید برابر با 1 تنظیم شود. محدودیت های (19) و (20) محدودیت های استاندارد غیرمنفی و انتگرالی هستند. این فرمولاسیون مدل برای توابع خطی تکه ای به طور خودکار، حجم را به بخش مناسب تابع هزینه منسوب می نماید. ما این تکنیک را برای تبدیل معادلات (1)، (4) و (9) در شکل عدد صحیح-مختلط به کار خواهیم برد. سپس ما مدل ریاضی مسئله طراحی زنجیره تامین خود را ارائه می دهیم.

3.6 مدل ریاضی

این شرکت شیمیایی با چالش یافتن موازنه درست بین چهار عامل هزینه معرفی شده بالا به منظور برآورده سازی تقاضای D_{kp} هر مشتری k برای تمام p محصول در هزینه بهینه روبرو شد. ما در حال حاضر مدل ریاضی مورد استفاده برای حل این مسئله مختلط توصیف می نمایم.

هدف، مینیمم نمودن تمام هزینه های زنجیره تامین مرتبط است:

$$\min_{q_{ijpt}^{(1)}, q_{jkp}^{(2)}, q_{jp}^{(3)}} Z^P(q_{ijpt}^{(1)}) + Z^{T1}(q_{ijpt}^{(1)}) + Z^S(q_{ijpt}^{(1)}, q_{jp}^{(3)}) + Z^{T2}(q_{jkp}^{(2)}), \quad (21)$$

تحت (3)-(10)، که در آن تمام تبدیل های توابع هزینه به شکل مختلط-عدد صحیح در طول منطق (14)-(20)

انجام می شوند و تحت

$$\sum_j q_{jkp}^{(2)} = D_{kp} \quad \forall k, p, \quad (22)$$

$$\sum_{i,t} q_{ijpt}^{(1)} = \sum_k q_{jkp}^{(2)} \quad \forall j, p, \quad (23)$$

$$q_{jp}^{(3)} = \sum_{i,t} \left(q_{ijpt}^{(1)} / O_t^{(1)} \right) \quad \forall j, p, \quad (24)$$

$$q_{ijpt}^{(1)}, q_{jkp}^{(2)}, q_{jp}^{(3)} \geq 0 \quad \forall i, j, k, p, t. \quad (25)$$

تابع هدف (21) شامل هزینه زنجیره تامین کلی می شود. محدودیت (22) اطمینان حاصل می کند که تقاضای سالانه هر مشتری برآورده می شود. این مورد به جمع تمام حمل و نقل ها برای مشتری برابر با تقاضای مورد نظر مشتری نیاز دارد. محدودیت (23) اطمینان حاصل می کند که جریان های داخلی و خارجی مواد برای هط محوطه مخزن تطبیق دارند. برای هر محوطه مخزن، میزان هر محصول حمل و نقل شده به محوطه مخزن از تمام سایت های تولید باید برابر با میزان محصول حمل و نقل شده از محوطه مخزن به تمام مشتریان (24) باشد. محدودیت (25) یک محدودیت غیرمنفی بودن استاندارد است.

4. رویکرد راه حل

ما سه نوع رویکرد راه حل را پیاده سازی می کنیم: یک روش راه حل دقیق و دو رویکرد ابتکاری مبتنی بر تکنیک های خطی سازی مختلف. برای رویکردهای ابتکاری، از روش قطعی و یک متغیر تصادفی شده استفاده می کنیم. برای قابل مقایسه نمودن عملکرد رویکردهای مختلف، آزمون ها به یک زمان اجرای یک ساعت محدود می شوند.

4.1 راه حل مستقیم با کد استاندارد شاخه و کران

امکان اول برای حل این مسئله، استفاده از یک حل کننده عدد صحیح-مختلط تجاری است. بعد از بهترین راه حل عدد صحیح یافت شده در چارچوب زمانی معین یک ساعت، کران پایین تر تامین شده توسط حل کننده را به عنوان یک معیار برای تمام روش های راه حل ثبت می کنیم. در سراسر فرآیند بهینه سازی، کران های پایین توسط حل کننده عدد صحیح-مختلط با آزادسازی های LP برای مسائل فرعی درخت شاخه و کران تعیین می شوند. کران

پایین که ما به آن اشاره می کنیم، کران پایینی ارائه شده توسط حل کننده MIP بعد از زمان اجرای 1 ساعته است، یعنی هرس کردن درخت شاخه و کران

4.2 خطی سازی توسط آزادسازی انتگرالیتنه

اولین نوع تکنیک خطی سازی، تمام محدودیت های انتگرالیتنه را در فرمولاسیون عدد صحیح-مختلط به محدودیت (20) آزاد می کند و محدودیت های جعبه ای شکل (26) را معرفی می کند؛ تمام اجزای دیگر مدل بدون تغییر باقی می ماند.

$$0 \leq x_n \leq 1 \quad \forall n. \quad (26)$$

اشکال مختلف تخصیص های مجدد حجم و مکانیزم های کاهش برای بهبود راه حل استفاده می شوند. ما یک ابتکار قطعی (D1) و یک ابتکار را با عنصر تصادفی (R1) پیاده سازی می نماییم.

D1- ابتکار کاهش MIP آزاد شده قطعی: مدل عدد صحیح-مختلط آزاد شده با حل کننده CPLEX LP حل می شود. به دلیل آزادسازی، حل کننده LP، راه حل هایی را تعیین می کند که مستلزم کسرها بازکننده مخازن در یک موقعیت است. این منجر به انتخاب های نامعتبر و زیربهبینه از نظر بخش توابع هزینه خطی تکه ای استفاده شده می شود. برای بازیابی امکان سنجی و انتگرالیتنه، هزینه های صحیح را محاسبه می کنیم تا اطمینان حاصل نماییم که توابع هزینه غیرخطی با معادلات (10) - (8) and (5) - (1) استفاده می شوند.

چون کسرهایی از مخازن در مدل آزاد شده مجاز هستند، که باز نمودن مخازن را ارزان تر می سازد، بسیاری از مخازن باز در راه حل اولیه وجود دارند. یک ابتکار کاهش برای بهبود راه حل به کار گرفته می شود. محوطه های مخزن در مرتبه صعودی به واسطه توان عملیات دسته بندی می شوند. بنابراین، محل به محل، تمام مخازن باز در محوطه مخزن مورد نظر در مسئله آزاد شده اصلاح شده و بسته شده که دوباره حل می شود تثبیت می شوند. در تجربه ما، بستن محل های کلی به جای مخازن تک منجر به نتایج بهتر می شود و سریع تر است. بار دیگر، تخصیص های دوباره به بخش بهینه هر تابع هزینه خطی تکه ای مطابق با معادلات (1) - (5) و (8) - (10) انجام می شوند که در نتیجه انتگرالیتنه را دسته بندی می نمایند. اگر بستن محوطه مخزن راه حل را بهبود بخشیده باشد، بسته

نگهداشته می شود. اگر هیچ بهبودی وجود نداشته باشد، مرحله کاهش انجام نمی شود و ما با محوطه مخزن بعدی اقدام می کنیم. زمانی که تمام محل های محوطه مخزن در این روش تحلیل شده باشند، یک فهرست دسته بندی شده جدید با محوطه های مخزن باز باقیمانده تولید می شود و فرآیند کلی تا زمانی تکرار می شود که هیچ بهبودی به دست نیاید. الگوریتم 1، این رویه را خلاصه سازی نموده است.

الگوریتم 1: ابتکار کاهش MIP آزاد شده قطعی

```
1: Relax integrality constraints
2: Solve LP
3: Calculate correct cost of original mixed-integer model
   before relaxation
4: repeat
5:   Sort open tank locations by throughput volume in
   ascending order
6:   for all Tank locations in list do
7:     Close location
8:     Solve LP
9:     Calculate correct cost of original mixed-integer
   model before relaxation
10:    if Current solution < best solution then
11:      Fix location to be closed
12:    else
13:      Re-open tank location
14:    end if
15:  end for
16: until No improvement or runtime > 1 hour
```

ابتکار کاهش MIP آزاد شده تصادفی: این ابتکار مانند یک همتای قطعی آن D1 کار می کند، به جز اینکه محوطه های مخازن در ابتکار کاهش در مرتبه صعودی دسته بندی نمی شوند. در عوض، آنها به صورت تصادفی دسته بندی می شوند: به هر محوطه مخزن یک احتمال متناسب با سهم آن از توان عملیاتی کلی تمام مخازن منسوب می شود. بنابراین، تمام محوطه های مخزن مطابق با احتمال آنها دسته بندی می شوند و ما احتمال تجمعی را محاسبه می نماییم. ما یک عدد تصادفی u را از توزیع یکنواخت روی بازه $[0,1]$ تولید می کنیم و اولین محوطه مخزن را در فهرستی جستجو می کنیم که احتمال تجمعی آن بزرگتر یا برابر با u است. این محوطه مخزن به فهرست دسته بندی شده نهایی اضافه می شود و احتمال آن برابر با 0 تنظیم می شود. احتمالات تجمعی به روزسازی می شوند و

این رویه تا زمانی تکرار می شود که تمام محوطه های مخزن به فهرست نهایی اضافه شده باشند. این عنصر احتمالاتی موجب کاهش احتمال افتادن در مینیمم های محلی می شود. این ابتکار تا زمانی تکرار می شود که زمان اجرای یک ساعت فرا رسد.

4.3 خطی سازی توسط فرمولاسیون دوباره مدل

برای نوع دوم تکنیک خطی سازی، تمام متغیرهای عدد صحیح را از فرمولاسیون مسئله حذف می کنیم و از ضرایب هزینه-مختلط استفاده می کنیم که ترکیبی از بخش های هزینه متغیر و ثابت در یک ضریب است. آزادسازی های LP حاصل را می توان بسیار سریع حل نمود. در رویکرد ما، مسائل LP متوالی را حل می کنیم و به طور تکراری، این ضرایب هزینه را بر اساس حجم اختصاص داده شده به یک مسیر معین یا مخزن در راه حل LP کنونی به روزسازی می نماییم. این تکنیک مشابه با تکنیک مورد استفاده در (Kim and Pardalos (2000a, b) است که آن را برای مسائل موقعیت هاب اعمال نمودند.

برای فرمولاسیون مسئله اقتباس شده، تمام متغیرهای تصمیم گیری دودویی متناظر با x_n در مدل (14)-(20) از این مسئله حذف شدند. توابع هزینه خطی تکه ای معادلات (1)-(5) و (8)-(10) توسط توابع خطی (28)-(31) با ضرایب $W_{ij}^{(1)}$ ، $W_{jk}^{(2)}$ و $W_{jp}^{(3)}$ جایگزین می شوند. ما از $\widehat{Z}^{T1}(q_{ijpt}^{(1)})$ ، $\widehat{Z}^{S1}(q_{jp}^{(3)})$ ، $\widehat{Z}^S(q_{ijpt}^{(1)}, q_{jp}^{(3)})$ و $\widehat{Z}^{T2}(q_{jkp}^{(2)})$ برای نشان دادن مولفه های هزینه مدل خطی شده استفاده می نماییم.

تابع هدف اصلاح شده بدین صورت خوانده می شوند

$$\min_{q_{ijpt}^{(1)}, q_{jkp}^{(2)}, q_{jp}^{(3)}} Z^P(q_{ijpt}^{(1)}) + \widehat{Z}^{T1}(q_{ijpt}^{(1)}) + \widehat{Z}^S(q_{ijpt}^{(1)}, q_{jp}^{(3)}) + \widehat{Z}^{T2}(q_{jkp}^{(2)}), \quad (27)$$

که در آن

$$\widehat{Z}^{T1}(q_{ijpt}^{(1)}) = \sum_{i,j,p,t} (q_{ijpt}^{(1)} W_{ij}^{(1)}), \quad (28)$$

$$\widehat{Z}^{S1}(q_{jp}^{(3)}) = \sum_{j,p} (q_{jp}^{(3)} W_{jp}^{(3)}), \quad (29)$$

$$\widehat{Z}^S(q_{ijpt}^{(1)}, q_{jp}^{(3)}) = \widehat{Z}^{S1}(q_{jp}^{(3)}) + Z^{S2}(q_{ijpt}^{(1)}, q_{jp}^{(3)}) + Z^{S3}(q_{ijpt}^{(1)}), \quad (30)$$

$$\widehat{Z}^{T2}(q_{jkp}^{(2)}) = \sum_{j,k,p} (q_{jkp}^{(2)} W_{jk}^{(2)}). \quad (31)$$

توابع هزینه (3)، (6) و (7) بدون تغییر باقی می ماند. ما در حال حاضر دیگر نیازی به خطی سازی با کمک مدل (14)–(20) نداریم، زیرا تمام توابع هزینه قبلاً خطی هستند. محدودیت های (22)–(25) بدون تغییر باقی می ماند. مشاهده کنید که پارامترهای هزینه ثابت و متغیر $V_{jm}^{(3)}$ ، $F_{ijn}^{(1)}$ ، $F_{jk}^{(2)}$ ، $V_{ijn}^{(1)}$ ، $V_{jk}^{(2)}$ و دیگر در فرمولاسیون مدل استفاده نمی شوند. هرچند ما در زمان تعیین مقادیر پارامترهای خطی شده متناظر $\bar{W}_{jk}^{(2)}$ ، $W_{ijt}^{(1)}$ و $W_{jp}^{(3)}$ به آنها نیاز داریم. آنها شامل عامل هزینه متغیر به علاوه یک بخش از هزینه تثبیت شده حاصل از گسترش هزینه ثابت به طور یکسان در سراسر حجم های کنونی می شوند. آنها بعد از هر اجرای بهینه سازی مبتنی بر حجم ها در راه حل LP کنونی به روزسازی می شوند. ما اندیس t را در $W_{ijt}^{(1)}$ می گنجانیم، زیرا ردیابی پارامترهای هزینه-مختلط جداگانه برای هر برنامه زمانبندی حمل و نقل در این ابتکار لازم است. به طور مشابه، از اندیس p در $W_{jp}^{(3)}$ استفاده می کنیم، زیرا سطوح هزینه-مختلط مختلف برای کرایه های مخزن برای محصولات مختلف، وابسته به کمیت ذخیره شده هر محصول صدق می کنند.

بر اساس این روش، دو ابتکار را پیاده سازی می کنیم. D2، قطعی است، در حالیکه R2 دارای یک عنصر تصادفی است.

D2- ابتکار کاهش مقیاس بندی-شیب دینامیک قطعی. برای دستیابی به یک راه حل اولیه، ضرایب هزینه-ثابت برابر با مقادیر اولیه مطابق با معادلات (32)–(34) تنظیم می شوند و مدل خطی حل می شود. ما هزینه ثابت را در سراسر بزرگترین حجم ممکن نظری در مسیر یا مخزن مورد نظر گسترش می دهیم. این حجم نظری بر اساس تقاضای کلی است. برای حمل و نقل از سایت های تولید به محوطه های مخزن، این حجم به صورت تقاضای کلی

مشتری تقسیم بر تعداد حمل و نقل ها $\sum_{kp} D_{kp}/O_t^{(1)}$ محاسبه می شود. برای حمل و نقل از محوطه های مخزن به مشتریان، حجم ماکزیمم ممکن، تقاضای مورد نظر مشتری در تمام محصولات، $\sum_p D_{kp}$ است. برای ذخیره در محوطه های مخزن، بزرگ حجم ممکن در هر محصول، تقاضای کلی برای محصول مورد نظر تقسیم بر کمترین تعداد ممکن حمل و نقل ها، $\sum_k D_{kp}/\min_t(O_t^{(1)})$ است. توجه داشته باشید که تابع هزینه حمل و نقل از محوطه مخزن به مشتری تنها دارای یک قسمت است.

$$W_{ijt}^{(1)} = V_{ijN}^{(1)} + \frac{F_{ijN}^{(1)}}{\sum_{kp} D_{kp}/O_t^{(1)}} \quad \forall i, j, t, \quad (32)$$

$$W_{jk}^{(2)} = V_{jk}^{(2)} + \frac{F_{jk}^{(2)}}{\sum_p D_{kp}} \quad \forall j, k, \quad (33)$$

$$W_{jp}^{(3)} = V_{jM}^{(3)} + \frac{F_{jM}^{(3)}}{\sum_k D_{kp}/\min_t(O_t^{(1)})} \quad \forall j, p. \quad (34)$$

بعد از حل LP، ضرایب هزینه-مختلط وابسته به حجم اختصاص داده شده به هر مسیر و به اندازه مخازن کرایه شده در هر موقعیت محوطه مخزن مطابق با معادلات (35)–(37) به روزسازی می شوند. این معادلات لزوماً، حجم کلی تخصیص داده شده به مسیر یا مخزن را محاسبه می کنند و سپس هزینه ثابت را به طور معادل در سراسر این حجم گسترش می دهند و این بخش هزینه-ثابت را به هزینه متغیر می افزایند. نتیجه، یک ضریب هزینه متغیر است که در واقع شامل بخش هزینه ثابت مرتبط برای حجم کنونی می شود. توجه داشته باشید که ضرایب هزینه برای آن مسیریها و مخازنی که هیچ حجمی در دور کنونی به آنها اختصاص داده نشده است بدون تغییر باقی می ماند، یعنی ضریب هزینه از دور کنونی نیز برای دور بعدی استفاده می شود.

هنگام تعیین ضریب هزینه $W_{ijt}^{(1)}$ برای حمل و نقل از کارخانه ها به محوطه های مخزن، بین برنامه های زمانبندی استفاده شده و استفاده نشده برای آن دسته از مسیریهایی که در حال حاضر مورد استفاده هستند، تمایز قائل می شویم. برای برنامه های زمانبندی کنونی مورد استفاده $(\sum_p q_{ijpt}^{(1)} > 0)$ ، از حجم حمل و نقل شده روی این مسیر در هر سفر $\sum_p q_{ijpt}^{(1)}/O_t^{(1)}$ ، برای تعیین سطح هزینه صحیح استفاده می نماییم. برای تسهیل سویچ کردن (تغییر حالت) از یک برنامه زمانبندی حمل و نقل به دیگری در فرآیند بهینه سازی، تمام برنامه های زمانبندی استفاده

نشده روی یک مسیر $(\sum_p q_{ijpt}^{(1)} = 0)$ را با هزینه تئوری برای آن مسیر را منسوب می نماییم که در صورتی قابل کاربرد هستند که تمام حجم روی مسیر در تمام برنامه های زمانبندی به برنامه زمانبندی مورد نظر اختصاص داده شده باشند. ما از متغیر کمکی $h_{ij}^{(1)} = \sum_{p,t} q_{ijpt}^{(1)}$ برای محاسبه جریان کلی ماده در تمام p محصول از i کارخانه به j محوطه مخزن، صرفه نظر از زمانبندی t استفاده می کنیم. برای ارزیابی سطح هزینه، حجم نظری در هر سفر $h_{ij}^{(1)} / O_t^{(1)}$ را برای هر برنامه زمانبندی استفاده نشده محاسبه می نماییم. این کار توزیع حجم ها موجب تسهیل سویچ کردن به زمانبندی دیگر در تکرار بعدی می شود، زیرا برنامه های زمانبندی جایگزین کنونی استفاده نشده نیز دارای هزینه های مطلوبی هستند. تمایز قائل شدن بین زمانبندی های استفاده شده و استفاده نشده مهم است، زیرا باید اطمینان حاصل نمود که هزینه حمل و نقل صحیح در زمان محاسبه هزینه برای مسیرهای واقعی مورد استفاده، استفاده می شود.

$$W_{ijt}^{(1)} = \begin{cases} V_{ijn}^{(1)} + \frac{F_{ijn}^{(1)}}{\sum_p q_{ijpt}^{(1)} / O_t^{(1)}} & \text{if } \sum_p q_{ijpt}^{(1)} > 0 \text{ and } B_{ij,n-1}^{(1)} < \sum_p q_{ijpt}^{(1)} / O_t^{(1)} \leq B_{ijn}^{(1)} \\ V_{ijn}^{(1)} + \frac{F_{ijn}^{(1)}}{h_{ij}^{(1)} / O_t^{(1)}} & \text{if } \sum_p q_{ijpt}^{(1)} = 0 \text{ and } B_{ij,n-1}^{(1)} < h_{ij}^{(1)} / O_t^{(1)} \leq B_{ijn}^{(1)} \\ \text{unchanged} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i, j, t, \quad (35)$$

برای تعیین ضریب هزینه $W_{jk}^{(2)}$ ، برای حمل و نقل از محوطه های مخزن به مشتریان، ابتدا کنترل می نماییم که کدام مسیرها در راه حل $(\sum_p q_{jkp}^{(2)} > 0)$ مورد استفاده هستند. برای این مسیرها، هزینه ثابت را در سراسر حجم کلی در هر حمل نقل، $\sum_p q_{jkp}^{(2)} / O^{(2)}$ پخش می نماییم

$$W_{jk}^{(2)} = \begin{cases} V_{jk}^{(2)} + \frac{F_{jk}^{(2)}}{\sum_p q_{jkp}^{(2)} / O^{(2)}} & \text{if } \sum_p q_{jkp}^{(2)} > 0 \\ \text{unchanged} & \text{if } \sum_p q_{jkp}^{(2)} = 0 \end{cases} \quad \forall j, k, \quad (36)$$

برای محاسبه ضریب هزینه $W_{jp}^{(3)}$ ، سطح هزینه صحیح را برای حجم ذخیره $q_{jp}^{(3)}$ تعیین می کنیم و هزینه ثابت متناظر در سراسر این حجم پخش می نماییم.

$$W_{jp}^{(3)} = \begin{cases} V_{jm}^{(3)} + \frac{F_{jm}^{(3)}}{q_{jp}^{(3)}} & \text{if } B_{j,m-1}^{(3)} < q_{jp}^{(3)} \leq B_{jm}^{(3)} \\ \text{unchanged} & \text{if } q_{jp}^{(3)} = 0 \end{cases} \quad \forall j, p. \quad (37)$$

بعد از هر تکرار، محوطه های باز مخزن به صورت صعودی به واسطه حجم توان عملیاتی دسته بندی می شوند. محل به محل، تمام مخزن ها در محوطه مخزن بسته می شوند و این مسئله دوباره حل می شود. ضرایب هزینه-مختلط مطابق با طرح توصیف شده بالا به روزسازی می شوند. اگر یک بهبود وجود داشته باشد، محوطه مخزن به صورت بسته تثبیت می شود و ضرایب هزینه به روزسازی شده حفظ می شوند. در غیراینصورت، مرحله کاهش انجام نمی شود، ضرایب هزینه قبلی بازیابی می شوند و با محوطه مخزن بعدی در فهرست شروع می کنیم. زمانی که تمام محوطه های مخزن به این روش کنترل شده باشند، یک فهرست دسته بندی شده جدید با محوطه های مخزن باز باقیمانده و فرآیند کلی تکرار می شوند، تا زمانی که هیچ بهبود دیگری قابل دستیابی نباشد. بعد از خاتمه مکانیزم کاهش، تمام متغیرها آزاد می شوند (یعنی، هیچ محوطه مخزن دیگری به صورت بسته تثبیت نمی شود) و این مدل یک بار دیگر حل می شود. دوباره، اگر یک بهبود در هزینه وجود داشته باشد، راه حل و ضرایب هزینه به روزرسانی شده حفظ می شوند. این فرآیند تا زمانی تکرار می شود که راه حل دیگر تغییر ننماید یا تا زمانی که از زمان اجرای یک ساعته تجاوز شود. الگوریتم 2، یک مرور بر این رویه را فراهم می کند.

الگوریتم 2: ابتکار کاهش مقیاس بندی-شیب دینامیک قطعی

```

1: Initialize coefficients, i.e.  $W_{ijt}^{(1)}, W_{jk}^{(2)}, W_{jp}^{(3)}$ 
2: Solve LP
3: Update coefficients
4: repeat
5:   repeat
6:     Sort open tank locations by throughput volume in
       ascending order
7:     for all Tank locations in list do
8:       Close location
9:       Solve LP
10:      Update coefficients
11:      if Current solution < best solution then
12:        Fix location to be closed
13:      else
14:        Re-open tank location
15:        Restore coefficients
16:      end if
17:    end for
18:  until No improvement or runtime > 1 hour
19:  Unfix all tank locations
20:  Solve LP
21:  Update coefficients
22: until No improvement or runtime > 1 hour

```

R2- ابتکار کاهش مقیاس بندی-شیب دینامیک قطعی: این رویکرد مانند ابتکار قطعی D2 کار می کند، اما راه حل های موقعیتی که هزینه ها را افزایش می دهند در ابتکار کاهش به منظور داشتن نقاط بهینه محلی در جستجوی نقطه بهینه کلی حفظ می شوند. این رویکرد با الهام از بازپخت شبیه سازی شده صورت گرفته است (Kirkpatrick et al., 1983).

تفاوت بین راه حل کنونی Z^{cur} و بهترین راه حل را که $\Delta = Z^{cur} - Z^{min}$ در نظر بگیرید. احتمال اینکه یک راه حل پذیرفته شود، برابرست با

$$prob(accept) = \begin{cases} 1 & \text{if } \Delta < 0, \\ e^{-\Delta/g} & \text{if } \Delta \geq 0, \end{cases} \quad (38)$$

که در آن g یک پارامتر کنترل است. این تابع، احتمال راه حل های غیربهبود دهنده پذیرفته شده را تعیین می کند. ما مقادیر مختلف را برای g آزمایش نمودیم و 0.06% را برای بهترین راه حل کنونی به عنوان راه حل موثر یافتیم. دریافتیم که ثابت گذاشتن پارامتر g به خوبی جواب می دهد.



شکل 4. مرور کلی بر موقعیت های زنجیره تامین در حالت واقعی

بعد از هر مرحله کاهش، Δ محاسبه می شود و احتمال پذیرفتن تعیین می شود. تصمیم گیری در مورد پذیرش با کمک عدد تصادفی تولید شده صورت می گیرد. اگر یک راه حل پذیرفته شود، ضرایب هزینه مختلط همراه با آن حفظ می شوند و محوطه مخزن بسته شده در مرحله کاهش به صورت بسته تثبیت می شود. این ابتکار بعد از زمان اجزای یک ساعته خاتمه می یابد.

5. نتایج محاسباتی

ما تمام محاسبات را بر اساس داده ها از شرکت شیمیایی پایه گذاری نمودیم. این شرکت با 2 کارخانه عمل می کند، از 35 محوطه مخزن بالقوه استفاده می کند، 57 محل مشتری را خدمت رسانی می نماید و 38 محصول را ارائه می دهد. شکل 4، مروری کلی بر موقعیت های مرتبط را ارائه می دهد. بر اساس مشخصات داده های و ساختار داده ها در مسئله حالت واقعی، می توانیم انواع زیادی از مسائل آزمون با اندازه های مختلف را خلق کنیم. ما مدل ها و الگوریتم های خود را در CPLEX 12.1 کدنویسی نمودیم و این کد را روی پردازنده Intel Xeon 5500 که با 2.66 GHz و 4 گیگابایت حافظه کار می کند اجرا می نماییم. در بخش 5.1، رویکرد های راه حل خود را روی مسائل با اندازه های مختلف، با انجام آزمون های گسترده روی عملکرد ابتکار خود آزمایش می نماییم. ما مدل جامع خود را فرمولاسیون های ساده شده برای اندازه های مختلف مسئله مقایسه می نماییم.

5.1. مقایسه رویکردهای راه حل ابتکاری و دقیق

مسائل با اندازه های متوسط و کوچک را می توان به خوبی با استفاده از یک حل کننده MIP حل نمود. هرچند با بیشتر شدن مسائل، حل کننده MIP کمتر موثر می شود. برخی از مسائل بسیار بزرگ را نمی توان با استفاده از این حل کننده حل نمود و این ناشی از محدودیت های حافظه است. از اینرو، ابتکاراتی مانند موارد معرفی شده در بخش 4 مورد نیاز هستند. برای تحلیل عملکرد رویکردهای مختلف، تعدادی از مسائل آزمون را خلق می کنیم که بر اساس داده های شرکت شیمیایی هستند. مشخصات این مسائل در جدول 3 خلاصه شده اند. ما 20 مسئله آزمون را در هر اندازه مسئله تولید می کنیم و در نتیجه 240 مجموعه داده مختلف را به طور کلی تولید می نماییم.

جدول 3 مشخصات مسائل آزمون تصادفی برای آزمون ها روی عملکرد ابتکاری

Problem #	Number of variables	Thereof binary	PL	TF	CU	PR	T	B1	B3
1	73,232	4324	2	23	40	28	8	4	3
2	121,626	6264	2	29	50	34	8	4	3
3	186,340	8540	2	35	60	40	8	4	3
4	329,120	12,320	3	40	65	45	9	4	3
5	541,350	17,100	4	45	70	50	10	4	3
6	912,500	24,250	5	50	80	55	12	4	3
7	1,580,760	36,360	7	60	90	60	12	4	3
8	2,912,000	55,300	10	70	100	70	12	4	3
9	4,794,720	77,920	13	80	110	80	12	4	3
10	7,689,600	102,600	15	90	120	100	12	4	3

ما هر مسئله را با حل کننده MP و با تمام ابتکارات، با محدود کردن زمان اجرا به یک ساعت برای تمام رویکردها حل می نماییم. نتایج در جدول 4 خلاصه شده اند. حد پایین تری که ما در این جدول به آن اشاره می کنیم، حد پایین ارائه شده توسط حل کننده بعد از یک ساعت زمان اجراست، یعنی بعد از هرس کردن درخت شاخه و کران. این حل کننده از LP آزادسازی استفاده می کند. توجه داشته باشید که برای مسئله 10، حل کننده MIP نمی تواند به علت محدودیت های حافظه این مسئله را تولید نماید. بنابراین ما از آزادسازی LP اولیه مسئله بدون هرس کردن درخت به عنوان حد پایینی استفاده نمودیم. زمان اشاره شده، زمان همگرایی است (یعنی زمان اجرایی که در آن بهترین راه حل به دست می آید).

جدول 4 فاصله متوسط راه حل ها با حل پایینی و بهترین راه حل شناخته شده و متوسط زمان همگرایی. نتایج برای بهترین رویکرد راه حل به صورت ضخیم نشان داده شده اند.

Problem	MIP solver			D1			R1		
	Gap to LB [%]	Gap to best sol. [%]	Time [seconds]	Gap to LB [%]	Gap to best sol. [%]	Time [seconds]	Gap to LB [%]	Gap to best sol. [%]	Time [seconds]
1	0.05	0.00	3583	0.24	0.19	9	0.21	0.15	2213
2	0.10	0.00	3600	0.27	0.17	20	0.23	0.12	2244
3	0.16	0.00	3600	0.28	0.12	39	0.26	0.10	2169
4	0.22	0.00	3600	0.46	0.23	73	0.41	0.19	2260
5	0.38	0.00	3600	0.71	0.33	161	0.63	0.25	2349
6	0.45	0.00	3600	0.80	0.35	250	0.72	0.27	2405
7	1.60	0.90	3600	1.03	0.34	492	0.95	0.25	2516
8	1.72	0.97	3600	1.17	0.43	1190	1.10	0.35	2798
9	3.54	2.71	3600	1.31	0.50	2378	1.26	0.45	2891
10	n/a	n/a	n/a	1.33	0.50	3600	1.27	0.44	3591
	D2			R2					
	Gap to LB [%]	Gap to best sol. [%]	Time [seconds]	Gap to LB [%]	Gap to best sol. [%]	Time [seconds]			
1	0.16	0.11	3062	0.17	0.12	3600			
2	0.20	0.09	2885	0.20	0.10	3600			
3	0.25	0.10	3068	0.27	0.12	3600			
4	0.33	0.11	2911	0.35	0.12	3600			
5	0.50	0.12	3274	0.53	0.14	3600			
6	0.56	0.11	3271	0.59	0.14	3600			
7	0.70	0.01	3477	0.72	0.03	3600			
8	0.75	0.01	3484	0.77	0.02	3600			
9	0.81	0.01	3600	0.81	0.01	3600			
10	0.87	0.04	3600	0.83	0.00	3600			

برای ارزیابی کیفیت ابتکار، ما آنها را از نظر کیفیت و سرعت مقایسه می نماییم. از نظر کیفیت راه حل، حل کننده MP بهترین راه حل های تمام رویکردهای تحلیل شده را برای مسائل در اندازه متوسط و کوچک می یابد (مسائل 1-6). برای مسائل بزرگتر، ابتکارات D2 و R2، راه حل های هزینه پایین تر از حل کننده MIP می یابند. به دلیل محدودیت های حافظه، بزرگترین مسئله، مسئله 10 را نمی توان با استفاده از حل کننده MIP حل نمود. تحلیل های عددی نشان می دهد که حل کننده MIP بهترین انتخاب برای مسائل اندازه کوچک و متوسط است، اما این ابتکارات یک انتخاب بهتر برای مسائل بزرگ هستند.

همچنین ما عملکردهای چهار ابتکار را مقایسه نمودیم. نتایج عددی نشان می دهند که ابتکارهای D2 و R2 به راه حل هایی با کیفیت بالاتر نسبت به ابتکارهای D1 و R1 دست می یابند. این نتیجه شگفت آور نیست. زیرا آثار صرفه جویی مقیاس مدل D2 و R2 از ابتکارهای D1 و R1 بیشتر است. نتایج عددی ما نشان می دهند که تفاوت های عملکرد بین هر دو ابتکار کوچک هستند، اما معمولاً تنها به صورت جزئی بهتر از R2 عمل می کند. هرچند ابتکار D1 می توان در وضعیت هایی سودمند باشد که در آن اندازه های مسئله کوچک و زمان های اجرا مهم هستند. برای مسائل در اندازه های کوچک و متوسط، D1 به طور معقولی در زمان اجرای کم به راه حل های خوب می رسد.

برای استنتاج دیدگاه های خود در مورد تحلیل های عددی: برای مسائل در اندازه متوسط و کم، حل کننده MIP بهترین انتخاب به نظر می رسد، اما برای مسائل بزرگتر، D2 برتر است.

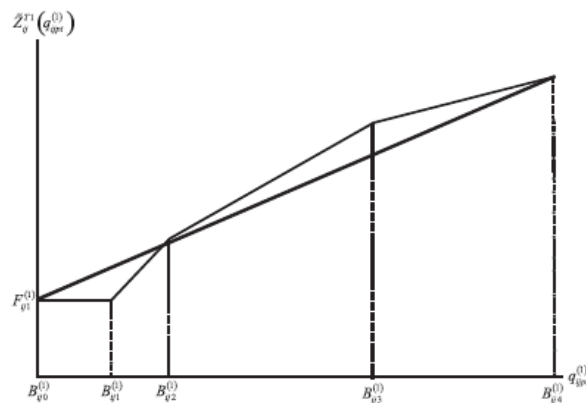
جدول 5 مقایسه مدل های مختلف برای مسائل آزمون تصادفی

Prob. #	No. of variables	Thereof binary	PL	TF	CU	PR	T	B1	B3	Opt. gap (%)	Solution w/ M1	Δ M2 vs M1	Δ M3 vs M1
1	9220	970	2	10	20	15	4	4	3	0.0	388 (million dollar)	+0.7 (million dollar) (0.18%)	+2.1 (million dollar) (0.54%)
2	51,888	3588	2	23	40	28	4	4	3	0.2	1579 (million dollar)	+1.1 (million dollar) (0.07%)	+3.4 (million dollar) (0.22%)
3	140,420	7420	2	35	60	40	4	4	3	0.2	3464 (million dollar)	+1.5 (million dollar) (0.04%)	+5.0 (million dollar) (0.14%)
4	218,720	9920	3	40	65	45	4	4	3	0.4	4300 (million dollar)	+1.4 (million dollar) (0.03%)	+7.1 (million dollar) (0.16%)
5	321,030	12,780	4	45	70	50	4	4	3	0.4	4903 (million dollar)	+1.9 (million dollar) (0.04%)	+10.1 (million dollar) (0.21%)

5.2 اثر فرمولاسیون مسئله بر عملکرد زنجیره تامین

در این بخش، ما منفعت استفاده از یک مدل را که شامل فراوانی های حمل و نقل و توابع هزینه غیرخطی می شود، در مقابل مدل هایی که برخی از این جنبه ها را نادیده می گیرند، تحلیل می نماییم. ما این مدل جامع خود را به صورت M1 می نامیم. ما از دو مدل مقایسه ساده M2 و M3 استفاده می نماییم. مدل M2 شامل توابع هزینه می شود که تخفیفات کمیت را نادیده می گیرند (یعنی، با همان ضریب هزینه متغیر و ثابت صرفه نظر از حجم). فراوانی های حمل و نقل در این مدل بهینه سازی می شوند. مدل M3، تخفیفات کمیت را نادیده می گیرد و فراوانی های حمل و نقل را بهینه سازی می کند. در M3، تنها یک تعداد حمل و نقل ممکن است. ما فراوانی حمل و نقلی را که به شدت در این راه حل به دست آمده توسط مدل M1 در زمان آزمایش M3 استفاده شده است را انتخاب می کنیم. هر دوی M2 و M3، تخفیفات کمیت را در نظر نمی گیرند. بنابراین کاربرد برخی از تخمین های خطی برای توابع هزینه ضروری است. ما توابع هزینه خطی تکه ای اصلی $Z(q)$ را با استفاده از نقاط $(0; F_1)$ و $(B_N; Z(B_N))$ تخمین زدیم، یعنی با متوسط گیری از بخش هزینه متغیر روی حوزه کامل. برای یک تکنیک مشابه، به Geoffrion (1977) مراجعه کنید. ما چندین روش خطی سازی ساده دیگر را آزمایش نمودیم، اما مشخص شد که این مورد به بهترین شکل عمل می کند. شکل 5، نمونه ای از این تکنیک را برای Z_{III}^n ، هزینه حمل و نقل از

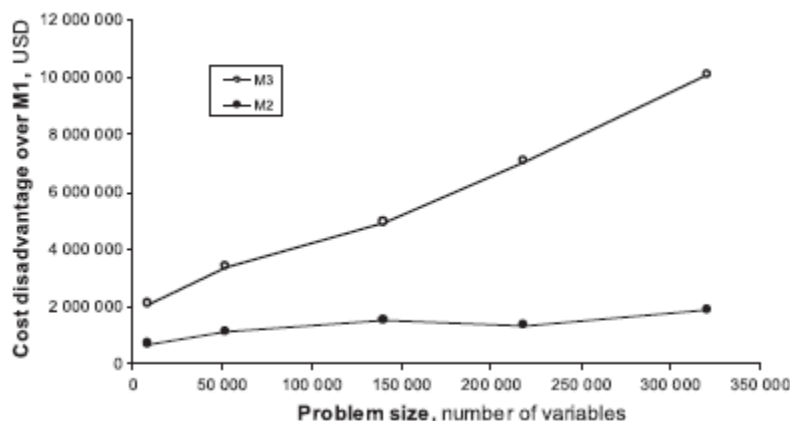
کارخانه ها به موقعیت های مخزن فراهم می کند. از اینرو ما این مدل را دوباره با استفاده از این توابع هزینه به جای نسخه های غیرخطی مختلط معرفی شده در بخش 3 فرموله می نماییم.



شکل 5. تکنیک خطی سازی برای هزینه حمل و نقل از کارخانه ها به محوطه های مخزن

ما پنج مجموعه داده را برای هر پنج اندازه مختلف مسئله آزمایش نمودیم که در گستره کوچک تا بزرگ قرار دارد. هدف ما، تحلیل اثر پیچیدگی مدل بر عملکرد است. برای جداسازی این اثر از دیگر آثار، تمام مسائل را با یک کد شاخه و کران استاندارد حل می نماییم. به دلیل اندازه مسائل، حل نمودن برای بهینگی در زمان معقول برای تمام اندازه های مسئله عملی نیست. جدول 5، یک مرور کلی بر اندازه های تحلیل شده مسئله، فاصله بهینگی که ما برای محاسبات خود قابل قبول تلقی می نماییم، هزینه بهترین راه حل به دست آمده با M1 و عیب هزینه نسبی و مطلق به دست آمده با M2 و M3 را ارائه می دهد.

راه حل های به دست آمده را با مدل M2 و M3 با استفاده از ساختارهای هزینه اصلی مدل M1 ارزیابی می نماییم. آزمایشات ما نشان می دهد که مدل M1 منجر به صرفه جویی های اساسی در هزینه نسبت به مدل های ساده شده می شود. به طور مثال، برای یک مسئله با 4 کارخانه، 45 محوطه مخزن، 70 مشتری، 50 محصول و 4 برنامه زمانبندی حمل و نقل، M1 دارای مزایای هزینه به میزان حدود 10 میلیون دلار آمریکا در هر سال نسبت به M3 است. مزایای هزینه نسبت به مدل M2 هنوز به میزان 2 میلیون دلار در هر سال باقی می ماند. شکل 6 یک مرور کلی بر نتایج متوسط را ارائه می دهد.



شکل 6. عیب هزینه متوسط مدل های M2 و M3 نسبت به M1

6. نتیجه گیری

در این مقاله، ما یک مدل طراحی زنجیره تامین را توسعه داده ایم که نشاندهنده صرفه جویی ها در مقیاس برای حمل و نقل و انبار کردن است که به صراحت، فراوانی های حمل و نقل را در نظر می گیرد. همانطور که آزمون های روی داده های واقعی نشان می دهند، در نظر نگرفتن صرفه جویی های مقیاس و فراوانی های حمل و نقل منجر به هزینه های حمل و نقل واقعاً بالاتر می شود. به دلیل ماهیت عدد صحیح-مختلط آنها، حل مسائل با اندازه واقعی به طور بهینه بسیار زمانبر می باشد. برای نمونه های مسئله بسیار بزرگ، حل آنها با نرم افزار بهینه سازی استاندارد تقریباً غیرممکن است. ما دو ابتکار راه حل را با متغیرهای تصادفی و قطعی مبتنی بر تکنیک های خطی سازی تکراری، با بهره‌گیری از روش های بهینه سازی موثر در دسترس برای مسائل خطی توسعه داده ایم. در حالیکه کدهای شاخه و کران استاندارد در مسائل با اندازه کم و متوسط بهتر عمل می کنند، مانند مسئله ای که مورد پژوهشی ماست، ابتکارات ما موجب عملکرد بهتر آنها از نظر کیفیت راه حل برای مسائل بزرگ در حدود زمانی تنظیم شده می شوند. با در نظر گرفتن زمان راه حل، ابتکارات ما حتی برای مسائل کوچک نیز بهتر می باشند.

در حالیکه ما یک زنجیره تامین بدون ظرفیت را فرض نمودیم، حدود ظرفیت روی خروجی تولید، اندازه کشتی، اندازه مخزن در وضعیت های واقعی وجود دارد. مورد ظرفیت دار به آسانی قابل پیاده سازی است. فرمولاسیون این مدل به هیچ انطباقی نیاز ندارد. حد بالایی توابع هزینه مورد نظر به جای یک BIG M، به سادگی برابر با حد ظرفیت

تنظیم می شوند. این ابتکار می تواند با مسائل ظرفیت دار با برخی تغییرات به کاربرده شود تا اطمینان حاصل شود که این مسئله توسط کاهش محوطه های مخزن از راه حل غیرعملی نمی شود.

ساختارهای مختلف زنجیره تامین با عناصری مانند باراندازهای عرضی یا امکان تحویل های مستقیم از کارخانه ها به مشتریان نیز می توانند در این مدل گنجانده شوند. هر دوی اینها به محدودیت های اضافی نیاز دارند. در مورد باراندازهای عرضی، ما باید اطمینان حاصل نماییم که برنامه های زمانبندی حمل و نقل از کارخانه ها به باراندازهای عرضی همانند برنامه ها از باراندازهای عرضی به مشتریان هستند. برای تحویل های مستقیم، یک محدودیت برای مستثنی نمودن برنامه های زمانبندی حمل و نقل مورد نیاز است که با تقاضاهای مشتری مطابقت ندارد.

در برخی از وضعیت ها، تخفیفات حجمی نیز برای مرحله حمل و نقل دوم از محوطه مخزن به مشتری اعمال می شوند. به طور مثال، این مورد برای مسائلی وجود دارد که در آن این مرحله حمل و نقل با استفاده از کامیون ها انجام می شود و در آن تخفیفات نقشی را در کمیت های کمتر از حمل و نقل دریایی ایفا می کنند. در این مورد، تابع هزینه در فرمولاسیون مدل با یک تابع تکه ای خطی جایگزین می شود. در کل، بسیاری از انواع مختلف توابع هزینه را می توانیم در مدلمان استفاده نماییم، زیرا محدب بودن مورد نیاز نیست. این کار شامل توابع نردبانی، توابع نمایش دهنده عدم صرفه جویی های مقیاس و غیره می شود.

در مدل ما، فراوانی های حمل و نقل برای حمل و نقل های از محوطه های مخزن به مشتریان در همان برنامه زمانبندی برای تمام مشتریان تثبیت می شوند. هرچند، این مدل و رویکردهای راه حل پیشنهادی را می توان برای حالاتی با زمانبندی های مختلف حمل و نقل برای مشتریان مختلف توسط جایگزینی پارامتر $O_k^{(2)}$ با $O_k^{(2)}$ تنظیم نمود، بنابراین یک برنامه زمانبندی متفاوت در مدل برای مشتری قابل استفاده است. محدودیت های اضافی برای اطمینان از اینکه زمانبندی های حمل و نقل از کارخانه ها به محوطه های مخزن، همزمان با برنامه ها از محوطه های مخزن به مشتریان هستند، مورد نیاز می باشند. برنامه های زمانبندی، زمانی همزمان هستند که فراوانی های حمل و نقل از محوطه های مخزن به مشتریان، چند فراوانی از کارخانه ها به محوطه های مخزن باشد (مثلاً، تحویل از محوطه های مخزن به مشتریان در هر هفته؛ تحویل از کارخانه ها به محوطه های مخزن در هر چهار هفته). در

غیراینصورت، وضعیت هایی ممکن است رخ دهند که در آن یک کمیت ناکافی از مواد شیمیایی در محوطه مخزن، در زمان حمل و نقل به مشتریان از این محوطه در دسترس است. با یک گام فراتر رفتن، می بینیم که بهینه سازی فراوانی های حمل و نقل برای مرحله حمل و نقل دوم نیز ممکن است: از محوطه های مخزن به مشتریان. در این مورد، شاخص t به متغیرهای تصمیم گیری برای این مرحله حمل و نقل اضافه می شود. دوباره، محدودیت های برای حصول اطمینان از همزمانی برنامه های زمانبندی بین حمل و نقل از کارخانه ها به محوطه های مخزن و از محوطه های مخزن به مشتریان لازم می باشند.

References

- Balakrishnan, A., Graves, S.C., 1989. A composite algorithm for a concave-cost network flow problem. *Networks* 19, 175–202.
- BASF, 2007. Company website – News and Media Relations. <http://corporate.basf.com/de/presse/?id=WGK-HBY8Wbcp*xP> (accessed 15.03.08).
- Baumol, W.J., Wolfe, P., 1958. A warehouse-location problem. *Operations Research* 6, 252–263.
- Baxter, J., 1984. Depot location: A technique for the avoidance of local optima. *European Journal of Operational Research* 18, 208–214.
- Bayer, 2007. Bayer will Kapazität der geplanten TDI-Produktion in Shanghai auf 300.000 Jahrestonnen erweitern (February 6, 2007). <<http://www.investor.bayer.de/de/news/investor-news/investor-news/showNewsItem/738/1170745507/5dc1abb86f/>> (accessed 15.03.08).
- Broek, J., Schütz, P., Stougie, L., Tomasgard, A., 2006. Location of slaughterhouses under economies of scale. *European Journal of Operational Research* 175, 740–750.
- Correia, I., Captivo, M.E., 2003. A Lagrangian heuristic for a modular capacitated location problem. *Annals of Operations Research* 122, 141–161.
- Drysdale, J.K., Sandiford, P.J., 1969. Heuristic warehouse location – A case history using a new method. *INFOR* 7, 45–61.
- Efroymsen, M.A., Ray, T.L., 1966. A branch-bound algorithm for plant location. *Operations Research* 14, 361–368.
- Feldman, E., Lehrer, F.A., Ray, T.L., 1966. Warehouse location under continuous economies of scale. *Management Science* 12, 670–684.
- Fleischmann, B., 1993. Designing distribution systems with transport economies of scale. *European Journal of Operational Research* 70, 31–42.
- Geoffrion, A.M., 1977. Objective function approximations in mathematical programming. *Mathematical Programming* 13, 23–37.
- Gümüş, M., Bookbinder, J.H., 2004. Cross-docking and its implications in location-distribution systems. *Journal of Business Logistics* 25, 199–228.
- Holmberg, K., 1984. Capacitated facility location with staircase costs. Research Report LiTH-MAT-R-1984-26, Department of Mathematics, Linköping Institute of Technology, Sweden.
- Holmberg, K., 1994. Solving the staircase cost facility location problem with decomposition and piecewise linearization. *European Journal of Operational Research* 75, 41–61.
- Holmberg, K., Ling, J., 1997. A Lagrange heuristic for the facility location problem with staircase costs. *European Journal of Operational Research* 97, 63–74.
- Kelly, D.L., Khumawala, B.M., 1982. Capacitated warehouse location with concave costs. *The Journal of the Operational Research Society* 33, 817–826.
- Khumawala, B.M., Kelly, D.L., 1974. Warehouse location with concave costs. *INFOR* 12, 55–65.
- Kim, D., Pardalos, P.M., 2000a. Dynamic slope scaling and trust interval techniques for solving concave piecewise linear network flow problems. *Networks* 35, 216–222.
- Kim, D., Pardalos, P.M., 2000b. A dynamic domain contraction algorithm for nonconvex piecewise linear network flow problems. *Journal of Global Optimization* 17, 225–234.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P., 1983. Optimization by simulated annealing. *Science* 220, 671–680.
- Klincewicz, J.G., 1985. A large-scale distribution and location model. *AT&T Technical Journal* 64, 1705–1730.
- Klincewicz, J.G., 1990. Solving a freight transport problem using facility location techniques. *Operations Research* 38, 99–109.
- Klincewicz, J.G., 2002. Enumeration and search procedures for a hub location problem with economies of scale. *Annals of Operations Research* 110, 107–122.
- Klincewicz, J.G., Luss, H., Yu, C.S., 1988. A large-scale multilocation capacity planning model. *European Journal of Operational Research* 34, 178–190.
- Lapierre, S.D., Ruiz, A.B., Soriano, P., 2004. Designing distribution networks: Formulations and solution heuristics. *Transportation Science* 38, 174–187.
- Lin, J.R., Nozick, L.K., Turnquist, M.A., 2006. Strategic design of distribution systems with economies of scale in transportation. *Annals of Operations Research* 144, 161–180.
- O'Kelley, M.E., Bryan, D.L., 1998. Hub location with flow economies of scale. *Transportation Research Part B* 8, 605–616.
- Paraschis, I.N., 1989. Optimale Gestaltung von Mehrprodukt-Distributionssystemen: Modelle – Methoden – Anwendungen. Physica-Verlag, Heidelberg.
- Romeijn, H.E., Shu, J., Teo, C.P., 2007. Designing two-echelon supply networks. *European Journal of Operational Research* 178, 449–462.
- SABIC, 2006. Annual Report 2006.
- SABIC, 2007. Company website – News and Media Relations. <<http://www.sabic.com/corporate/en/newsandmediarelations/news/default.aspx>> (accessed 15.03.08).
- Soland, R.M., 1974. Optimal facility location with concave costs. *Operations Research* 22, 373–382.
- Spielberg, K., 1969a. An algorithm for the simple plant location problem with some side conditions. *Operations Research* 17, 85–111.
- Spielberg, K., 1969b. Plant location with generalized search origin. *Management Science* 16, 165–178.
- Syam, S.S., 2002. A model and methodologies for the location problem with logistical components. *Computers and Operations Research* 29, 1173–1193.
- Whitaker, R.A., 1985. Some add-drop and drop-add interchange heuristics for non-linear warehouse location. *Journal of the Operational Research Society* 36, 61–70.
- Zangwill, W.I., 1968. Minimum concave cost flows in certain networks. *Management Science* 14, 429–450.