

## رویکردی استوار برای مکان‌یابی مجدد انبارهای زنجیره تامین سه سطحی در شرایط عدم قطعیت

مهدی بشیری<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا رضایی<sup>۲</sup>، امیرمسلمی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه مهندسی صنایع دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد،

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع، دانشگاه شاهد.

### چکیده:

امروزه انبارهای واحدهای تولیدی سهم قابل ملاحظه‌ای از هزینه‌های حمل و نقل کالاها در زنجیره تامین را برخوردار می‌باشند و عواملی چون عدم قطعیت در پارامترهای هزینه‌ای، ظرفیت تولید و مقدار تقاضا به علت تغییرات در محیط کسب و کار ضرورت اتخاذ تصمیمات صحیح و کارا در قبال مدیریت انبارها را دوچندان می‌نماید. در این مقاله، عدم قطعیت پارامترها به صورت پارامترهای تصادفی گسسته تحت سناریوهای مختلف بررسی می‌شود. بنابراین سعی شده است مدل جامع‌تری از مساله مکان‌یابی مجدد انبارها با در نظر گرفتن حداقل‌سازی حداکثر تابع هزینه سناریوها در یک شعاع پوششی معین برای پشتیبانی مشتریان توسط انبارها ارائه شود. رویکرد استوار<sup>۱</sup> بکار رفته در این مقاله، در قالب یک مثال تشریح شده است هزینه‌های به دست آمده با هزینه‌های مبتنی بر مدل‌سازی میانگین مقدار انتظاری مقایسه شده است. نتایج، کارایی رویکرد استوار را نسبت به رویکرد مدل‌سازی میانگین انتظاری<sup>۱</sup> نشان می‌دهند. همچنین هزینه‌ی مکان‌یابی مجدد نسبت به هزینه‌ی ادامه وضعیت کنونی شبکه تامین بررسی شده است و نتایج بهبود در هزینه‌ها را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تامین، مکان‌یابی مجدد انبارها، عدم قطعیت، رویکرد استوار.

## ۱- مقدمه

یک شبکه زنجیره تامین شامل اجزای گوناگونی، همچون تامین کننده، تولیدکننده، انبار و مراکز توزیع و مشتریان است این شبکه تامین کالا، با استفاده از مواد خام به تولید محصول می پردازد و در مرحله بعد با انتقال آن به انبارها و مراکز توزیع و در نهایت، برآورده نمودن درخواست تقاضا کنندگان کامل می گردد (درنزر و هاماجر<sup>ii</sup>، ۲۰۰۴). هزینه های یک شبکه توزیع لجستیکی در پژوهش ها، به شیوه های مختلف بررسی شده است، اما به طور کلی می توان از هزینه های احداث و نگهداری تسهیلات، حمل کالا، نگهداری موجودی و هزینه های نیروی انسانی و انرژی به عنوان بخشی از هزینه ها، نام برد.

در بسیاری از مقالات، مکان یابی اجزای یک شبکه لجستیک از جمله انبارها بررسی شده است. مباحث کاهش ریسک، مکان یابی شبکه با توجه به تقاضای احتمالی تقاضا کنندگان و انتخاب تامین کنندگان و مباحثی از این دست، در پژوهش های گذشته به چشم می خورد، اما در شرایطی که مدیریت زنجیره تامین مایل به بررسی مکان یابی مجدد، میزان بهروری سیستم توزیع خود و هزینه های انتقال آن باشند، نیاز به مدل های جامع تر مکان یابی مجدد ضروری به نظر می رسد. از آنجاکه یکی از چالش های پیش رو برای تصمیم گیری در مسائل مکان یابی و مکان یابی مجدد عدم قطعیت در پارامترهاست، بنابراین علاوه بر ارائه یک مدل کارا در حوزه مکان یابی مجدد، استفاده از رویکردهای بهینه سازی در شرایط عدم قطعیت نیز حائز اهمیت است. با توجه به بررسی انجام شده به نظر می رسد روش های بهینه سازی استوار در مساله مکان یابی مجدد انبار کمتر مورد استفاده شده است.

لذا این مقاله از یک رویکرد بهینه سازی استوار در مدل سازی و بهینه سازی مکان یابی مجدد انبارها در شرایط عدم قطعیت گسسته استفاده می نماید.

در مساله مکان یابی مجدد انبارها، عدم قطعیت در پارامترهای مساله، از قبیل هزینه ها، تقاضا و ظرفیت تولید بسیار محتمل است. در این گونه مسائل، عدم قطعیت به صورت سناریوهای گسسته می تواند مطرح گردد. سناریوهای مطرح شده، حالاتی هستند که در آینده احتمال رخ دادن آنها بیشتر است. در مسائل بهینه سازی احتمالی، احتمال رخداد هر سناریو قابل اندازه گیری است، ولی در مسائل بهینه سازی استوار این احتمال ها قابل محاسبه نیستند و از رویکردهای مانند حداقل حداکثر<sup>iv</sup> برای بهینه سازی استفاده می شود. در رویکرد حداقل حداکثر، هدف حداقل نمودن حداکثر هزینه تمام سناریوهاست و به عبارت دیگر، به دنبال بهینه سازی بدترین حالت هستیم. در ادامه مقاله، برخی پژوهش های موجود در حوزه مکان یابی، مکان یابی مجدد و رویکرد بهینه سازی استوار در مکان یابی بررسی می گردد. در این راستا، آکینک و خومالا<sup>v</sup> (۱۹۹۷) به مکان یابی انبار ساده ای که با مشتریان در ارتباط است، پرداخته و هدف کمینه سازی هزینه ها را دنبال نموده اند. همچنین، ناگی<sup>vi</sup> (۲۰۰۴) مدلی را در محدود سازی ارتباط انبارها با مشتریان مدنظر قراردادده و با افزودن محدودیت هایی، مانند ظرفیت انبار و تعداد انبارها، تابع هدفی با کمینه سازی هزینه ها ارائه نموده است.

گئورجیادیس و همکاران<sup>vii</sup> (۲۰۱۱) مدل های دوره ای و احتمالی را با یکدیگر تلفیق نمودند و در هر دوره، سناریوهای متفاوت با احتمال وقوع مشخص را مورد بحث و بررسی قرار دادند. آنها

به چشم نمی‌خورد (ملاکرینودیس و مین<sup>xiii</sup>، ۲۰۰۷).

اما برخی از مقالات به بررسی مکان‌یابی و طراحی زنجیره تامین در شرایط عدم قطعیت و بر پایه رویکرد استوار پرداخته‌اند. در این راستا، پن و ناگی<sup>xiv</sup> (۲۰۰۸) برای تکمیل زنجیره تامین خود در شرایط عدم قطعیت تقاضا، رویکرد بهینه‌سازی استوار را در ساختار زنجیره تامین به کار بسته‌اند. آنها عواملی چون هزینه، جریمه از دست دادن تقاضاها و قیمت‌های وابسته به تقاضا را در تابع هدف خود وارد نموده‌اند. قوش و مک لافرتی<sup>xv</sup> (۱۹۸۲)، از بهینه‌سازی بر مبنای سناریوهای مختلف برای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب مکان خرده فروشان در شرایط عدم قطعیت استفاده نمودند. مساله برنامه ریزی استوار به صورت کلاسیک توسط بن تال و نمیرووسکی<sup>xvi</sup> (۱۹۹۹)، ال قویی و لبرت<sup>xvii</sup> (۱۹۹۷)، ال قویی و همکاران<sup>xviii</sup> (۱۹۹۸) مطرح گردید.

کوولیس و یو<sup>xi</sup> (۱۹۹۷)، در مورد کاربردهای رویکرد استواری برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت بحث کردند. عامل مهمی که آنها در کتاب خود برای در نظر گرفتن استواری مطرح کرده‌اند، مساله مقدار تاسف بوده است که میزان فاصله تابع هدف از مقدار بهینه تابع هدف هر سناریو است. ولارده و همکاران<sup>xx</sup> (۲۰۰۴)، موضوع مساله تامین استوار با ظرفیت محدود منابع را مطرح کردند. آساواپکی و همکاران<sup>xxi</sup> (۲۰۰۸)، الگوریتم حلی بر مبنای مساله حداقل- حداکثر فاصله تاسف با سناریوهای گسسته را برای مساله دو سطحی با فرمولاسیون برنامه‌ریزی خطی مختلط، ارائه نمودند.

مدلی جامع با در نظر گرفتن هزینه‌های تولید، هزینه‌های انتقال بین سطوح زنجیره تامین و درون هر سطح را در نظر گرفتند. این مدل هزینه‌های انبارداری و بسیاری از هزینه‌های پرکاربرد و موجود در یک شبکه لجستیکی سه سطحی (تولید کننده، انبار و توزیع کننده) را مورد بحث و بررسی قرار داده است. اما در حوزه مکان‌یابی مجدد، ملو و همکاران<sup>viii</sup> (۲۰۰۶) مدل پویای مکان‌یابی مجدد در مساله طراحی زنجیره تامین را ارائه نموده‌اند به گونه‌ای که بهینه‌سازی محدودیت سرمایه‌گذاری در این مقاله تحت دوره‌های مختلف بررسی شده است. لو و همکاران<sup>ix</sup> (۲۰۰۲) در پژوهش خود، استراتژی‌های مختلف پیکره‌بندی شبکه را در قالب یک برنامه‌ریزی چند معیاره بررسی کرده‌اند. کارلسون و رانویس<sup>x</sup> (۲۰۰۵) مساله مکان‌یابی مجدد انبار را در قالب مطالعه موردی بررسی کرده‌اند. مین و ملاکرینودیس<sup>xi</sup> (۱۹۹۹) مساله مکان‌یابی مجدد انبار را با روش تحلیل سلسله مراتبی بررسی نموده‌اند. ملاکرینودیس و مین<sup>xii</sup> (۲۰۰۰) به ارائه یک مدل مکان‌یابی مجدد پرداخته‌اند که بریافتن مکانی با شرایط بهینه نسبت به شرایط کنونی شبکه متمرکز شده است و در یک مدل دوره ای از هزینه و زمان به عنوان اهداف مساله استفاده نموده‌اند. همچنین، در پژوهشی دیگر در همین راستا، این دو محقق به بررسی مکان‌یابی انبارها پرداخته و سیاست‌های مکان‌یابی مجدد را اصلاح نموده‌اند، اما در مدل ارائه شده، عواملی چون تنوع محصول، توجه به ظرفیت انبارهای جدید، امکان تصمیم‌گیری برای میزان موجودی و بسیاری از محدودیت‌های دیگر کاربردی

جدول ۱- مروری بر ادبیات موضوع مسائل مکان یابی مجدد و مسائل غیر قطعی

نویسندگان	نوع مساله مکان یابی	نوع پارامترهای مساله	رویکرد حل	پوشش موجودی	ظرفیت
آکینگ و خومالا (۱۹۹۷)	مکانیابی انبار	قطعی	کمیته سازی هزینه		
ناگی (۲۰۰۴)	مکانیابی انبار				
ملو و همکاران (۲۰۰۶)	مکانیابی مجدد زنجیره تامین	قطعی	کمیته سازی هزینه	✓	✓
گنورجیادیس و همکاران (۲۰۱۱)	مکانیابی زنجیره تامین	عدم قطعیت	کمیته سازی هزینه	✓	✓
لو و همکاران (۲۰۰۲)	مکانیابی مجدد انبار	قطعی	برنامه ریزی چند معیاره		
کارلسون و رانویس (۲۰۰۵)	مکانیابی مجدد انبار	قطعی	تحلیل سلسله مراتبی		
ملاکرینودیس و مین (۲۰۰۰)	مکانیابی مجدد انبار	قطعی	کمیته سازی هزینه	✓	
مین و ملاکرینودیس (۱۹۹۹)	مکانیابی مجدد انبار چند معیاره	قطعی	برنامه ریزی آرمانی	✓	
ملاکرینودیس و مین (۲۰۰۷)	مکانیابی مجدد انبار با در نظر گرفتن تولید	قطعی	کمیته سازی هزینه	✓	
پن و ناگی (۲۰۰۸)	زنجیره تامین	عدم قطعیت گسسته	بهینه سازی گسسته استوار	✓	
قوش و مک لافرتی (۱۹۸۲)	زنجیره تامین	عدم قطعیت	بهینه سازی گسسته استوار		
ولارده و همکاران (۲۰۰۴)	زنجیره تامین	عدم قطعیت	بهینه سازی گسسته استوار	✓	
آساواپکی و همکاران (۲۰۰۸)	زنجیره تامین	عدم قطعیت	بهینه سازی گسسته استوار با رویکرد حداقل- حداکثر		
اسنایدر و دسکین (۲۰۰۶)	مکان یابی	عدم قطعیت	بهینه سازی گسسته استوار با رویکرد تاسف		
مقاله پیشنهادی	مکانیابی مجدد انبار با در نظر گرفتن تولید	عدم قطعیت	بهینه سازی گسسته استوار با رویکرد حداقل- حداکثر	✓	✓

در این مساله تعدادی انبار فعال و تعدادی مکان کاندیدا برای احداث انبارهای جدید در نظر گرفته شده است. مکان انبارها و میزان کالاهای ذخیره شده و انتقال یافته آنها با حل مدل مشخص خواهد شد. در مورد مکان‌یابی مجدد انبارها می‌توان چهار سیاست تصمیم‌گیری را اتخاذ نمود:

- انبار موجود، همچنان به فعالیت خود ادامه دهد.
- انبار موجود، با یکی از انبارهای دیگر ادغام گردد.
- انبار موجود، زاید تشخیص داده و بسته شود (بدون ادغام با سایر انبارها).
- انباری جدید در یکی از مکان‌های کاندیدا احداث گردد.

همچنین، وضعیت مکان تقاضاکنندگان ثابت و مشخص است، اما فرض شده است با توجه به سابقه فعالیت واحد تولیدی مورد نظر، تقاضای هر محصول در هر دوره به صورت سناریوهای گسسته قابل تعریف است. در این زنجیره تامین، به علت حفظ مشتریان، شعاع پوشش تقاضا کنندگان نیز مطرح است. در بخش بعدی به معرفی شرایط عدم قطعیت در مساله مورد بررسی و معرفی نحوه ارتباط اجزای مختلف زنجیره تامین و محدودیت‌های حاکم بر آنها پرداخته می‌شود.

**۳- رویکردهای استوار و مقدار انتظاری در مدل‌سازی مساله مکان‌یابی مجدد انبار**  
در این بخش دو رویکرد از رویکردهای عدم قطعیت را که برای حل مساله مکان‌یابی مجدد انبار در حالت عدم قطعیت مطرح می‌شود، بیان می‌نماییم.

اسنایدر و دسکین<sup>xxi</sup> (۲۰۰۶)، معیار استواری جدیدی به نام استواری  $p$  را برای حداقل کردن امید ریاضی هزینه‌ها و همچنین محدود کردن نسبت تاسف برای هر سناریو مطرح کردند. در این راستا، ملو و همکاران<sup>xxiii</sup> (۲۰۰۹) در مقاله مروری اذعان دارند که رویکرد استوار در مقالات مکان‌یابی مجدد بررسی نشده است.

در این مقاله، مدلی جامع‌تر از مدل ملاکرینودیس و مین (۲۰۰۷) با افزودن تصمیم‌گیری بر مبنای رویکرد استوار در حالت سناریوهای گسسته ظرفیت عرضه، هزینه حمل و نقل و تقاضای مشتریان ارائه شده است. برای روشنتر شدن جایگاه این پژوهش، در میان مقالات چاپ شده در این حوزه، جدول ۱ ارائه می‌گردد.

در ادامه این مقاله، در بخش ۲ مساله و فرضیات آن تبیین خواهد شد و با ارائه مفهوم عدم قطعیت و رویکرد بهینه‌سازی استوار در بخش ۳، مدل ریاضی پیشنهادی در بخش ۴ بررسی می‌گردد. در بخش ۵ با ارائه یک مثال و تکرار ۱۰ مساله، نتایج حاصل از بررسی یک مساله‌ی مکان‌یابی مجدد انبارها با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای مساله و رویکرد بهینه‌سازی استوار تشریح و تحلیل می‌گردد. بخش ۶ به بیان نتیجه‌گیری و پیشنهاد مطالعات آتی می‌پردازد.

## ۲- معرفی مساله

در این مقاله، شبکه تامین مساله شامل تولید کننده‌ها، انبارهای کاندیدا برای احداث و انبارهای موجود است که با در نظر گرفتن تقاضا کنندگان، ساختار شبکه تکمیل می‌گردد.

#### ۴-۱- مجموعه‌ها

$N$ : مجموعه نقاط کاندیدای برای احداث  $E$ :  
مجموعه انبارهای موجود  
انبارهای جدید

$G$ : مجموعه کلیه انبارهای موجود و کاندیدای  
احداث ( $G = E \cup N$ )

$P$ : مجموعه واحدهای تولیدی

$K$ : مجموعه مشتریان (نقاط تقاضا)

$R$ : مجموعه منابع مورد نیاز

$T$ : دوره‌های زمانی

$O$ : مجموعه نوع محصولات

#### ۴-۲- اندیس‌ها

$r$ : منابع تولیدی (شامل مواد خام، تجهیزات  
مصرفی، انرژی و ...) ( $r = 1, \dots, |R|$ )

$o$ : نوع محصول تولیدی ( $o = 1, \dots, |O|$ )

$t$ : دوره زمانی ( $t = 1, \dots, |T|$ )

$j$ : شمارنده انبار موجود ( $j = 1, \dots, |E|$ )

$i$ : شمارنده کلیه انبارهای موجود و ممکن  
( $i = 1, \dots, |G|$ )

$n$ : مکان انبار جدید به نحوی که این اندیس در  
مجموعه  $G$  باشد، ولی در مجموعه  $E$  نباشد.

( $n = 1, \dots, |N|$ )

این دو رویکرد نمونه‌هایی از دو رویکرد کلی  
بهینه‌سازی استوار و احتمالی هستند. رویکرد اول  
بهینه‌سازی استوار حداقل حداکثر و رویکرد دوم  
بهینه‌سازی مقدار انتظاری نام دارند.

#### ۳-۱- رویکرد استوار

عدم قطعیت در پارامترهای مساله مکان‌یابی مجدد  
انبار، از قبیل پارامترهای ظرفیت تولید، هزینه انتقال و  
تقاضا بسیار رایج است. در این مقاله عدم قطعیت به  
صورت سناریوهای گسسته مطرح می‌شود. همچنین،  
ما اطلاعاتی از احتمال وقوع هر یک از سناریوها  
نداریم. برای مدل‌سازی مساله در شرایط عدم  
قطعیت از رویکرد مدل‌سازی سناریو محور و  
مدل‌سازی استوار حداقل حداکثر استفاده می‌کنیم. در  
رویکرد حداقل حداکثر هدف اصلی حداقل نمودن  
حداکثر تابع هزینه هر یک از سناریوهاست

#### ۳-۲- رویکرد مقدار انتظاری

برای مقایسه رویکرد استوار با رویکرد احتمالی،  
رویکرد مقدار انتظاری مطرح می‌گردد که در آن  
مقدار میانگین هر یک از پارامترهای موثر در مدل  
محاسبه و سپس مدل به صورت یک مدل قطعی حل  
می‌شود، اما در بسیاری از مقالات، نتایج به دست  
آمده از این رویکرد، به خصوص در حالاتی که  
پراکندگی سناریوها از میانگین بالا باشد، از کیفیت  
مناسبی برخوردار نیست (کیونگ و همکاران<sup>xxiv</sup>،  
۲۰۱۱ و کنتراس و همکاران<sup>xxv</sup>، ۲۰۱۱).

در ادامه، پارامترهای مدل به همراه مدل‌سازی  
ریاضی ارائه گردیده است.

#### ۴- مدل‌سازی مساله

در مساله از نمادها و متغیرهای زیر استفاده شده

است:

### ۴-۳- پارامترهای مسئله

$P_{opta}^{Max}$ : حداکثر توان تولیدی کالای  $O$  توسط تولید

کننده  $p$  در دوره زمانی  $t$  تحت سناریوی  $a$

$C_{opt}^{EPR}$ : هزینه افزایش ظرفیت تولید هر واحد

محصول  $O$  در تولیدکننده  $p$  در دوره  $t$

$C_{okt}^{EXD}$ : جریمه کمبود در برآورده نکردن تقاضای

مشتری  $k$  از محصول  $O$  در دوره  $t$

$Re_{prt}$ : حداکثر منابع موجود از نوع  $r$  در واحد

تولیدی  $p$  در دوره  $t$

$CP_{ikt}^{TR}$ : حداکثر مقدار ممکن حمل و نقل کالاها

برای انتقال از انبار  $i$  به مشتری  $k$  در دوره  $t$  (ظرفیت

کمان)

$\alpha_{opr}$ : ضریب استفاده هر محصول تولیدی  $O$  در

واحد تولیدی  $p$  از منبع  $r$

$\eta_o$ : میزان استفاده محصول  $O$  از ظرفیت انبارها یا

کمان‌های حمل و نقل (فضای مورد نیاز کالای  $O$ )

$b_{ik}$ : ماتریس پوششی تقاضاکننده  $k$  به وسیله انبار

$i$  با توجه به شعاع پوشش معین

$NU$ : تعداد انبار مورد نیاز در کل دوره‌های

برنامه‌ریزی

### ۴-۴- متغیرهای تصمیم

$X_{opit}$ : میزان کالای  $O$  تولید و منتقل شده از تولید

کننده  $p$  به انبار  $i$  در دوره زمانی  $t$

$Y_{oikt}$ : میزان کالای  $O$  منتقل شده از انبار  $i$  به نقطه

تقاضا  $k$  در دوره زمانی  $t$

$C_{it}^{FO}$ : هزینه ثابت باز بودن انبار  $i \in G$  در دوره  $t$

$C_n^{FN}$ : هزینه ثابت بازگشایی یک انبار جدید در

مکان کاندیدای  $n \in N$

$C_j^S$ : هزینه صرفه جویی حاصل از بستن

انبار  $j \in E$

$C_i^F$ : هزینه افزودن هر واحد ظرفیت جدید از

سایر انبارها به انبار  $i$  که مازاد بر ظرفیت فعلی انبار  $i$  است.

$C_{opta}^{PR}$ : هزینه تولید و حمل و نقل کالای  $O$  از

تولیدکننده  $p$  به انبار  $i$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $a$

$C_{ji}^{RL}$ : هزینه ادغام انبار  $j$  با  $i$  با در نظر گرفتن سود

حاصل از فروش و ادغام انبار  $j$

$C_i^{CP}$ : هزینه ایجاد هر واحد ظرفیت در انبار  $i$

$C_{oikta}^{TR}$ : هزینه حمل و نقل کالای  $O$  از انبار  $i$  به

تقاضا کننده  $k$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $a$

$C_{oit}^I$ : هزینه نگهداری موجودی از نوع  $O$  در

انبار  $i$  در دوره  $t$

$CP_i^{RL}$ : حجم محصولات قابل انتقال انبار موجود

به سایر انبارها (این مقدار برای انبارهای جدید صفر

در نظر گرفته می‌شود)

$CP_i^{Max}$ : حداکثر ظرفیت ممکن برای ایجاد

ظرفیت در انبارها

$D_{okta}$ : میزان تقاضای کالای  $O$  توسط تقاضاکننده

$k$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $a$

$CP_i^N$ : میزان ظرفیت لازم در انبار  $i$  غیر از ظرفیت سایر انبارهای ادغام شده با آن  
 $D_{okt}^{EX}$ : مقدار کمبود از تقاضای محصول  $O$  برای مشتری  $k$  در دوره  $t$   
 $P_{opt}^{EX}$ : میزان افزایش ظرفیت تولید مورد نیاز از محصول  $O$  در تولید کننده  $p$  در دوره  $t$   
 $I_{oit}$  و نیز میزان موجودی کالای  $O$  در انبار  $i$  در انتهای دوره  $t$

چنانچه انبار  $j$  ( $j \in E$ ) به محل  $i$  ( $i \in G$ ) انتقال یابد ( $i \neq j$ ) و یا انبار  $j$  ( $j \in E, i=j$ ) باز بماند در غیر این صورت

$$W_{ji} = \begin{cases} 1 \\ . \end{cases}$$

چنانچه در مکان  $n$  ( $n \in N$ ) انباری جدید احداث گردد در غیر این صورت

$$W_{ji} = \begin{cases} 1 \\ . \end{cases}$$

#### ۴-۵- معرفی تابع هدف

تابع هدف مدل پیشنهادی به شرح زیر معرفی می شود.  $Z_a$  نمایانگر حل مساله بازای سناریوی  $\alpha$  است.

$$\text{Minimize } Z = \text{Max } \{ Z_a \}$$

(۱)

$a \in \text{set of scenarios}$

$$Z_a = \left[ \sum_{t \in T} \left( \sum_{o \in O} \sum_{p \in P} \sum_{i \in G} C_{opita}^{PR} X_{opit} + \sum_{o \in O} \sum_{i \in G} \sum_{k \in K} C_{oikta}^{TR} Y_{oikt} + \sum_{p \in P} \sum_{o \in O} C_{opt}^{EPR} P_{opt}^{EX} + \sum_{i \in G} C_{it}^{FO} W_{ii} \right) \right. \\ \left. + \sum_{o \in O} \sum_{i \in G} C_{oit}^I \frac{I_{oi(t-1)} + I_{oit}}{2} + \sum_{o \in O} \sum_{k \in K} C_{okt}^{EXD} D_{okt}^{EX} \right] + \sum_{n \in N} C_n^{FN} W_{nn} + \sum_{i \in G} C_i^{CP} CP_i^N + \sum_{i \in G} C_i^F \sum_j CP_j^{RL} W_{ji} \\ - \left( \sum_{j \in E} C_j^S \left( 1 - \sum_{i \in G} W_{ji} \right) \right) + \sum_{j \in E} \sum_{i \in G} C_{ji}^{RL} W_{ji} \quad (2)$$

ظرفیت به منظور دربرگیری ظرفیت انبارهای منتقل شده ارائه گردیده است. همچنین، دو عبارت پایانی به سود حاصل از بستن انبار(ها) و هزینه یکپارچگی انبارها اشاره دارد

قسمت نخست تابع هدف که وابسته به دوره زمانی است، هزینه های تولید و توزیع محصول، نگهداری انبارها و موجودی را در نظر می گیرد. در قسمت دوم، هزینه های بازگشایی انبار(های) جدید، ایجاد ظرفیت در انبارها و همچنین هزینه افزایش



## ۴-۶- محدودیت‌ها

در این بخش به معرفی محدودیت‌های مدل می‌پردازیم:

$$\sum_{i \in G} X_{opit} \leq P_{opta}^{Max} + P_{opt}^{EX}, \quad \forall o \in O, p \in P, t \in T \quad (۳)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{i \in G} \alpha_{opr} X_{opit} \leq Re_{prt}, \quad \forall p \in P, r \in R, t \in T \quad (۴)$$

$$I_{oit} = \sum_{p \in P} X_{opit} - \sum_{k \in K} Y_{oikt} + I_{oi(t-1)}, \quad \forall o \in O, i \in G, t \in T \quad (۵)$$

$$\left( \sum_{o \in O} \sum_{p \in P} X_{opit} \right) \eta_o \leq \sum_{j \in E} CP_j^{RL} W_{ji} + CP_i^N, \quad \forall i \in G, t \in T \quad (۶)$$

$$\sum_{j \in E} CP_j^{RL} W_{ji} + CP_i^N \leq CP_i^{Max} W_{ii}, \quad \forall i \in G \quad (۷)$$

$$\sum_{o \in O} Y_{oikt} \eta_o \leq Cp_{ikt}^{TR}, \quad \forall i \in G, k \in K, t \in T \quad (۸)$$

$$\sum_{i \in G} b_{ik} Y_{oikt} + D_{okt}^{EX} \geq D_{okta}, \quad \forall o \in O, k \in K, t \in T \quad (۹)$$

$$\sum_{j \in E} W_{ji} \leq |E| W_{ii}, \quad \forall i \in E \quad (۱۰)$$

$$\sum_{j \in E} W_{ji} \leq |E| W_{ii}, \quad \forall i \in N \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i \in G} W_{ji} \leq 1, \quad \forall j \in E \quad (۱۲)$$

$$\sum_{i \in G} W_{ii} \leq NU, \quad (۱۳)$$

$$X_{opit}, Y_{oikt}, CP_i^N, P_{opt}^{EX}, I_{oit}, D_{okt}^{EX} \geq 0 \quad (۱۴)$$

$$W_{ii} = \{0, 1\}, \quad (۱۵)$$

تعداد موجودی هر انبار برای هر دوره و هر محصول است.

محدودیت (۶) تضمین می‌کند که میزان محصولات منتقل شده به یک انبار حداکثر برابر با ظرفیت آن انبار است. همچنین حداکثر ظرفیت هر انبار از مجموع ظرفیت بهینه‌ی مساله و ظرفیت انتقال یافته حاصل از یکپارچه سازی انبارها محاسبه می‌گردد.

محدودیت (۳) تضمین می‌کند که میزان کلیه محصولات ورودی به انبارها که توسط یک واحد تولیدی خاص تولید شده است، برابر میزان تولید آن واحد تولیدی و افزایش ظرفیت آن (در صورت نیاز) خواهد بود. محدودیت (۴) تضمین می‌کند که منابع مورد نیاز برای هر محصول و در هر دوره کمتر از مقدار در دسترس آن منبع باشد. محدودیت (۵)

است. در نهایت، مساله الف با نرم افزار GAMS (CPLEX Solver) حل و بررسی شده است. شکل ۱ نمای کلی مساله الف را نشان می دهد. برای تحلیل نتایج ابتدا هزینه های شبکه تامین در دو حالت بررسی می گردد:

۱- حالتی که روند تولید و توزیع در دوره های آتی با چهار انبار موجود ادامه یابد (به طور اختصار پیکره بندی اولیه). ۲- حالتی که شبکه فعالیت خود را با مکان یابی مجدد انبارها انجام دهد و در ادامه، با آمایش جدید ادامه فعالیت دهد (به طور اختصار مکان یابی مجدد). در حالت ۲، دو رویکرد محاسبه پیکره بندی شبکه از امید ریاضی سناریوها و روش استوار حداقل حداکثر امکان پذیر است. در این بخش، ابتدا نشان می دهیم مکان یابی مجدد زنجیره تامین (در سطح انبارها) روی هزینه ها اثربخش است و مدل پیشنهادی کاراست. سپس نشان خواهیم داد که رویکرد استوار در شرایط عدم قطعیت، جواب هایی با ریسک و ضرر کمتری نسبت به رویکرد میانگین انتظاری ارائه می نماید. جدول ۲ اطلاعات هزینه ای مربوط به مساله فوق الذکر را ارائه می کند. در این جدول، ابتدا هزینه بهینه وقوع هر سناریو در شرایطی که هر چهار انبار موجود به فعالیت خود ادامه دهند محاسبه شده است و سپس جواب بهینه مدل پیشنهادی مکان یابی مجدد به ازای هر سناریو ارائه شده است.

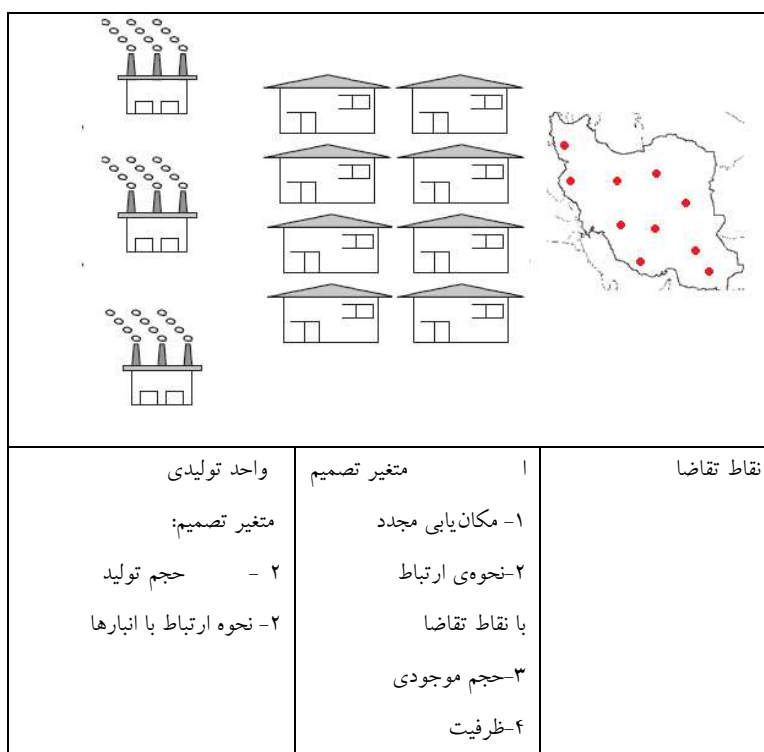
همچنین، نتایج حاصل از رویکرد امید ریاضی و استوار حداقل - حداکثر ارائه گردیده است. جدول ۲ نشان می دهد هزینه مساله با استفاده از مدل پیشنهادی به ازای رخداد تمامی سناریوها کمتر از پیکره بندی اولیه است. همچنین، با مدل سازی مساله مکان یابی مجدد در شرایط عدم قطعیت و حل آن با رویکرد استوار، هزینه هر سناریو از مقدار بهینه هر سناریو بیشتر خواهد بود که امری طبیعی است.

محدودیت (۷) تضمین می نماید که ظرفیت بهینه هر انبار از مقدار حداکثری خود تجاوز نکند. محدودیت (۸) میزان حداکثری محصول قابل حمل در هر دوره برنامه ریزی را از انبار به یک مشتری خاص مشخص می کند.

محدودیت (۹) تضمین می نماید که میزان کالای مورد نیاز مشتریان از انبارهای پوشش دهنده آن مشتری تامین گردد. همچنین، محدودیت (۱۰) و (۱۱) به این موضوع اشاره دارند که انبارهای موجود امکان ادغام با سایر انبارها را دارند، به شرطی که انبار مقصد وجود داشته باشد. محدودیت (۱۲) تضمین می نماید که هر انبار تنها با یک انبار دیگر امکان یکپارچه شدن دارد و محدودیت (۱۳) تضمین می کند که تعداد انبارها در دوره های مختلف حداکثر به تعداد مشخص شده توسط سیاست گذار باشد. سایر محدودیت ها نوع متغیرهای تصمیم را مشخص می کنند.

### ۵- مثال عددی

در این بخش، یک مثال عددی (با عنوان مساله الف) متناسب با مدل پیشنهادی ارائه شده است: این مساله شامل سه واحد تولیدی است که انبار محصولات از دو نوع انبارهای موجود و کاندیدای احداث هستند، که از هر کدام به ترتیب چهار انبار موجود و چهار انبار کاندیدا مدنظر قرار دارد. ۱۰ تقاضا کننده نیز با شرایط مکان های قطعی، اما تقاضاهای دوره ای (دو دوره) در نظر گرفته شده اند. هدف از حل این مساله، تصمیم گیری در باره میزان تولید هر واحد تولیدی، ارتباط آنها با انبارها، انتخاب یکی از سیاست های چهارگانه در خصوص ارتباط انبارها، میزان موجودی ها و نحوه ارتباط انبارها با نقاط تقاضاست. همچنین، مساله در شرایط عدم قطعیت در رخداد سناریوهای ظرفیت تولید، هزینه های حمل و نقل و تقاضای مشتریان بررسی شده



شکل ۱- شبکه زنجیره تامین مسئله الف

جدول ۲. هزینه مساله مکان‌یابی مجدد در حالت‌های قطعی و عدم قطعیت

سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳	سناریوی ۴	سناریوی ۵	هزینه
۱۴۱۶۵۵۱۰۰	۱۲۳۱۹۷۳۰۰	۱۴۶۷۴۸۴۰۰	۱۳۸۲۷۹۳۰۰	۱۱۷۸۳۲۵۰۰	۱
۱۱۴۷۴۲۹۰۰	۹۶۲۷۳۵۰۰	۱۱۹۹۷۴۱۰۰	۱۱۱۳۸۱۴۰۰	۸۷۸۴۹۰۶۰	۲
۱۲۳۷۲۵۵۰۰	۱۲۳۷۲۵۸۰۰	۱۲۳۷۳۰۲۰۰	۱۲۳۷۲۵۷۰۰	۱۲۳۷۲۷۹۰۰	۳
۱۵۷۹۷۳۵۰۰	۱۴۰۲۱۸۳۰۰	۱۶۳۶۰۴۴۰۰	۱۵۳۶۴۳۲۰۰	۱۳۳۷۴۸۱۰۰	۴
%۲۱/۶۸	%۱۱/۷۶	%۲۴/۳۷	%۱۹/۴۷	%۷/۴۹	۵

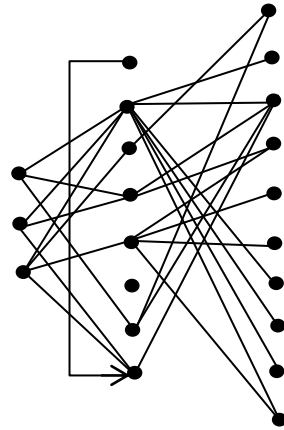
۱- هزینه بهینه هر سناریو با پیکره‌بندی اولی  
 ۲- هزینه بهینه هر سناریو با مکان‌یابی مجدد  
 ۳- هزینه رویکرد استوار حداقل حداکثر  
 ۴- هزینه رویکرد مقدار میانگین انتظاری  
 ۵- درصد بهبود رویکرد استوار نسبت به میانگین انتظاری

هم مقایسه شده است. همان طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، هزینه هر سناریو در حالت حل استوار نسبت به رویکرد مقدار میانگین انتظاری کمتر

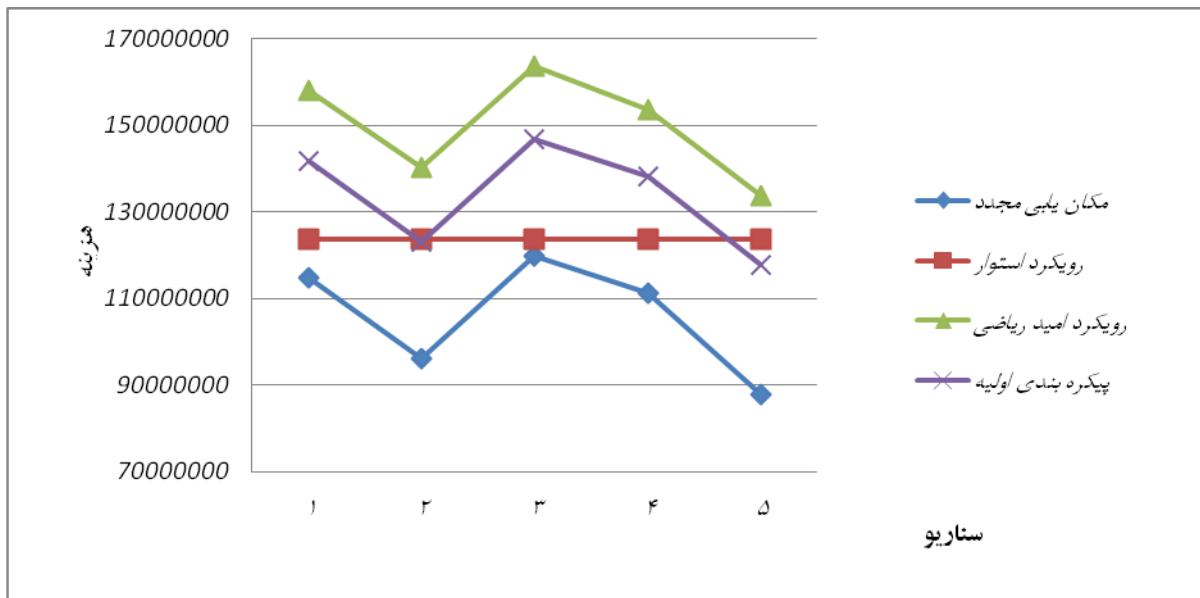
مساله در شرایط عدم قطعیت با رویکرد مقدار میانگین انتظاری نیز حل شده است. هزینه هر سناریو در حالت استوار و مقدار میانگین انتظاری با

میان انبارها، انبار ۱ موجود با انبار اندیس ۸ و از نوع جدید ادغام می‌گردد. همچنین، همان طور که در شکل مشهود است، انبارهای جدید با اندیس ۷ و ۵ از میان انبارهای کاندیدا بازگشایی شده‌اند. همچنین، انبار با اندیس ۶ که از انبارهای کاندیداست، توجیهی برای بازگشایی نداشته است.

بوده است. درصد بهبود تابع هزینه در پنج سناریو برای مثال اول در جدول ۲ بررسی شده است در شکل ۲، ۸ انبار در سطح میانی. در نظر گرفته شده است که چهار انبار بالایی به انبارهای موجود (انبار ۱ تا ۴) و چهار انبار پایینی به انبارهای جدید (انبار ۵ تا ۸) اشاره دارد. با توجه به شکل ۲، در مساله الف، هر سه تولیدکننده به کار گرفته شده‌اند و از



شکل ۲. مکان‌یابی مجدد انبارها و ارتباط با سایر سطوح در مساله الف



شکل ۳. کارایی مدل مکان‌یابی مجدد و رویکرد بهینه‌سازی استوار در مساله الف

جدول ۳. میزان درصد بهبود در هزینه هر سناریو در ۱۰ مساله

بهبود	بهبود	بهبود	بهبود	بهبود	مساله
سناریوی	سناریوی	سناریوی	سناریوی	سناریوی	
۱	۲	۳	۴	۵	
۲۱/۶۸	۱۱/۷۶	۲۴/۳۷	۱۹/۴۷	۷/۴۹	۱
۲۱/۹۱	۱۱/۸۱	۲۱/۵۴	۲۱/۵۴	۵/۰۶	۲
۲۳/۹	۱۲/۹۸	۱۴/۹	۱۷/۰۲	۳/۴۵	۳
۳/۸	۱۲/۹۳	۱۶/۴۷	۱۸/۹۸	۱۲/۰۹	۴
۲۲/۲۳	۱۱/۰۸	۲۱/۲	۱۴/۷۱	۴/۲۷	۵
۲۸/۰۳	۱۳/۳۴	۱۳/۸۷	۱۵/۷۶	۵/۱۶	۶
۱۸/۱۹	۱۳/۰۳	۱۱/۰۹	۱۸/۲۳	۶/۵۱	۷
۱۶/۳۱	۹/۷۱	۶/۹۸	۱۹/۸۷	۱۰/۷۴	۸
۲۱/۵۱	۱۲/۱	۱۲/۶۵	۲۰/۳۱	۳/۱۶	۹
۲۰/۰۳	۶/۶	۱۹/۳۳	۱۶/۹۸	۲/۳۴	۱۰

۲۴/۲۷، ۱۹/۴۷، و ۷/۴۹ با توجه به جدول ۲ مشخص گردد. در بقیه مسائل ۲ تا ۱۰ نیز روندی مشابه برای محاسبه در نظر گرفته شده است.

جدول ۳ نشان می‌دهد که در هر ۱۰ مساله، با تصمیم‌گیری بر مبنای رویکرد استوار در شرایط عدم قطعیت، هزینه مساله نسبت به رویکرد امید ریاضی کاهش می‌یابد.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شد با استفاده از مفاهیم مکان‌یابی مجدد، مدلی جامع‌تر برای مکان‌یابی مجدد انبارها در ساختار یک شبکه زنجیره تامین ارائه گردد. این مدل می‌تواند به عنوان یک ابزار کارا برای سنجش میزان بهروری وضعیت کنونی سیستم تولید و توزیع شبکه‌های لجستیکی و پیشنهادهای بهینه

برای اطمینان بیشتر از نتیجه تحقیق به دست آمده و بررسی تعمیم‌پذیری آن، ۱۰ مساله غیر قطعی با رویکرد پیشنهادی نیز بررسی و تحلیل گردید. تعداد انبارهای موجود، کاندیدا، تولیدکنندگان و به طور کلی، پیکره‌بندی زنجیره تامین مشابه مساله (الف) است؛ با این تفاوت که برای تقاضاهای هر سناریو و میزان تولید از توزیع لگ نرمال و برای هزینه‌های حمل و نقل از توزیع یکنواخت استفاده شده است. نتایج حاصل از ۱۰ مساله با سناریوهای تصادفی و میزان درصد بهبود توابع هدف هر سناریو با رویکرد استوار نسبت به روش نسبت میانگین انتظاری نیز در جدول ۳ ارائه شده است. برای مثال، مساله ۱ در جدول ۳ همان مساله (الف) انتخاب شده است تا جزئیات محاسبه درصد‌های بهبود، ۲۱/۶۸، ۱۱/۷۶،

- Drezner, Z., Hamacher, H.W., (2004) "Facility Location: Applications and Theory", *Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K.*
- El-Ghaoui, L., and Lebret, H., (1997) "Robust solutions to least-square problems to uncertain data matrices", *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 18., 1035–1064.
- El-Ghaoui, L., F. Oustry, and H. Lebret, (1998) "Robust solutions to uncertain semi-definite programs", *SIAM Journal on Optimization*, 9(1), . 33– 52.
- Georgiadis, M.C., Tsiakis, P., Longinidis, P. and Sofioglou, M. K., (2011) "Optimal design of supply chain networks under uncertain transient demand variations", *Omega*, 39(3), . 254-272.
- Ghosh, A., and McLaerty, S.L, (1982) "Locating stores in uncertain environments: A scenario planning approach", *Journal of Retailing*, 58(4), . 5–22.
- Kung-Jeng, W., Bunjira, M. and Liu, S.Y. (2011) "Location and allocation decisions in a two echelon supply chain with stochastic demand-A genetic-algorithm based solution", *Expert Systems with Applications*, 38(5),. 6125-6131.
- Lowe, T.J., Wendell, R.E., and Gang, H., (2002) "Screening location strategies to reduce exchange rate risk", *European Journal of Operational Research*, 136(3), . 573-590.
- Melo, M.T., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F.C., (2006) "Dynamic multi-commodity capacitated facility location: A mathematical modeling framework for strategic supply chain planning", *Computers & Operations Research*, 33(4), . 181–208.
- Melachrinoudis, E. and Min H., (2000) "The dynamic relocation and phase-out of a hybrid, two-echelon plant/warehouse facility: A multiple objective approach", *European Journal of Operational Research*, 123(1), . 1-15.
- Melachrinoudis, E. and Min, H., (2007) "Redesigning a warehouse network", *European Journal of Operational Research*, 176 (1), . 210-299.
- Melo, M.T., Nickel S., Saldanha-da-Gama, F.C., (2009) "Facility location and supply chain management – A review", *European Journal of Operational Research*, 196(2), 401–412.
- برای پیکره‌بندی جدید و نحوه و میزان ارتباط سایر سطوح شبکه با آنها عمل نماید. این مقاله، با توجه به ماهیت عدم قطعیت در سناریوهای ظرفیت تولید، هزینه حمل و نقل و میزان تقاضاها، رویکرد استوار پاسخی با ضرر و ریسک کمتر به ازای هر سناریو پیشنهاد نمود. همچنین، نشان داده شد که مکان‌یابی مجدد قادر به ارائه پیکره‌بندی با هزینه کمتر نسبت به ادامه شرایط فعلی است. به عنوان پیشنهاد برای مطالعاتی آتی، می‌توان به بررسی مدل‌های مکان‌یابی مجدد در حالت پارامترهای تصادفی و با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای اشاره نمود. همچنین، مدل پیشنهادی در این مقاله، امکان توسعه با افزودن تامین کنندگان و مدل‌سازی شبکه با حلقه بسته را نیز دارد.
- منابع:**
- Akinc, U., Khumawala, B. M., (1997) "An efficient branch and bound algorithm for the capacitated warehouse location problem", *Management Science*, 23(6),.585-594.
- Assavapokee, T., Realf, M., Ammons, J., and Hong, I., (2008) "Scenario relaxation algorithm for finite scenario based min-max regret and min-max relative regret robust optimization", *Computer and operation research*, 35,. 154-163.
- Ben-Tal, A., and Nemirovski, A., (1999) "Robust solutions to uncertain programs", *Operation Research Letters*, 25,. 1–13.
- Carlsson, D., and Ronnqvist, M., (2005) "Supply chain management in forestry–case studies at Sodra Cell AB" *European Journal of Operational Research*, 163(3), 589–616.
- Contreras, I., Cordeau, J. F. and Laporte, G. (2011) "Stochastic uncapacitated hub location", *European Journal of Operational Research*, 212(3),. 518–528.

- Kouvelis, P., and Yu G., (1997) "Robust Discrete Optimization and Its Applications", *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*.
- Snyder, V.L., and Daskin, M.S., (2006) "Stochastic p-robust location problems", *IIE Transactions*, 38, . 971–985.
- Velarde, J.L.G., and Laguna, M. A., (2004) "Benders-based heuristic for the robust capacitated international sourcing problem", *IIE Transactions*, 36, . 1125–1133.
- Min, H., and Melachrinoudis, E., (1999) "The relocation of a hybrid manufacturing/distribution facility from supply chain perspectives: a case study" *Omega*, 27(1), . 75-85.
- Nagy, T., (2004) "Warehouse location problem", Available online at <http://www.freehackers.org>.
- Pan, F., and Nagi R., (2008) "Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing", *Computers and Operations Research*, 189(3) .822-40.

پینوشت:

- <sup>i</sup> Robust
- <sup>ii</sup> Mean Expected Value
- <sup>iii</sup> Drezner and Hamacher
- <sup>iv</sup> Min-Max
- <sup>v</sup> Akinc and Khumawala
- <sup>vi</sup> Nagy
- <sup>vii</sup> Georgiadis et al.
- <sup>viii</sup> Melo et al.
- <sup>ix</sup> Lowe et al.
- <sup>x</sup> Carlsson and Ronnqvist
- <sup>xi</sup> Min and Melachrinoudis
- <sup>xii</sup> Melachrinoudis and Min
- <sup>xiii</sup> Melachrinoudis and Min
- <sup>xiv</sup> Pan and Nagi
- <sup>xv</sup> Ghosh and McLaerty
- <sup>xvi</sup> Ben-Tal and Nemirovski
- <sup>xvii</sup> El-Ghaoui and Lebret
- <sup>xviii</sup> El-Ghaoui et al.
- <sup>xix</sup> Kouvelis and Yu
- <sup>xx</sup> Velarde et al.
- <sup>xxi</sup> Assavapokee et al.
- <sup>xxii</sup> Snyder and Daskin
- <sup>xxiii</sup> Melo et al.
- <sup>xxiv</sup> Kung-Jeng et al.
- <sup>xxv</sup> Contreras et al.

