

طراحی مدل زنجیره تأمین حلقه بسته با رویکرد برنامه‌ریزی فازی استوار جدید

مجتبی فرخ^۱، عادل آذر^{۲*}، غلامرضا جندقی^۳

۱- دانشجوی دکتری گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری پردیس فارابی،
دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استاد گروه مدیریت، دانشکده مدیریت پردیس فارابی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۲۵

دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۶

چکیده

در سال‌های اخیر با توجه به افزایش اهمیت رقابت‌پذیری اقتصادی و نگرانی‌های زیست‌محیطی در زمینه محصولات فرسوده، موضوع زنجیره تأمین حلقه بسته مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. تحقیق حاضر درصدد توسعه یک رویکرد برنامه‌ریزی فازی استوار برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت است. مدل پیشنهادی ویژگی‌هایی برحسب مقدار میانگین امکانی، تغییرپذیری امکانی تابع هدف و تخطی از محدودیت‌های امکانی دارد. برای توسعه رویکرد پیشنهادی از برنامه‌ریزی با محدودیت‌های اعتبار و میانگین انحراف مطلق امکانی استفاده می‌شود. با استفاده از یک مثال عددی بر پارامترهای استواری بهینگی (تغییرپذیری امکانی) و استواری شدنی تحلیل حساسیت صورت گرفت و برای اعتبارسنجی مدل و ارزیابی استواری جواب‌های به‌دست آمده از مدل پیشنهادی، پارامترهای مدل ۱۰ بار به‌طور تصادفی تولید و سپس عملکرد جواب‌های به‌دست آمده برحسب تغییرپذیری و میانگین هزینه با مدل میانگین فازی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است با صرف یک هزینه قابل قبول استواری مدل را افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی فازی، بهینه‌سازی استوار، انحراف مطلق امکانی، زنجیره تأمین حلقه بسته.

1- مقدمه

در یک دهه گذشته با توجه به افزایش اهمیت رقابت‌پذیری اقتصادی، بهبود سطوح خدمت و فشارهای قانونی و نگرانی‌های زیست‌محیطی در زمینه محصولات فرسوده، موضوع زنجیره تأمین حلقه بسته¹ مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [1]. به همین دلیل شرکت‌ها باید به فعالیت‌های زنجیره تأمین حلقه بسته مانند استفاده مجدد، بازیافت، تولید مجدد و انهدام توجه کنند. یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سیستم یکپارچه‌ای است که همزمان شامل هر دو نوع زنجیره تأمین مستقیم و معکوس است [2]. زنجیره تأمین مستقیم به شبکه‌ای از تسهیلات تولیدی و امکانات توزیع مربوط می‌شود که کار تدارک مواد، تبدیل این مواد به محصولات و توزیع این محصولات به مشتریان را انجام می‌دهد، زنجیره تأمین معکوس نیز به جریان محصولات مستعمل از مشتریان به زنجیره تأمین بالاسری برای تولید مجدد، تعمیر، بازیافت، استفاده مجدد و یا انهدام اشاره می‌کند. بنابراین زنجیره تأمین معکوس باید به صورت بخشی از زنجیره تأمین مستقیم با آن یکپارچه شود [3].

مسئله طراحی زنجیره تأمین یکی از مسائل زیرساختاری در مدیریت زنجیره تأمین است که تصمیم‌های استراتژیک و تاکتیکی را در بر می‌گیرد. در سطح استراتژیک تصمیم‌های بلندمدتی در خصوص مشخصات مهم تسهیلات جدید از قبیل تعداد، مکان، ظرفیت و تکنولوژی آنها گرفته می‌شود و در سطح تاکتیکی نیز تصمیم‌های مهمی در مورد تعیین مقدار جریان‌های بین موجودیت‌ها، مقادیر خرید، تولید و نگهداری موجودی گرفته می‌شود [4]. در این تحقیق، پیکره‌بندی شبکه در زمینه مکانیابی و انتخاب تکنولوژی تسهیلات مورد بررسی قرار می‌گیرد. از طرف دیگر، جریان‌های شبکه در سطح تاکتیکی تعیین می‌شود که تصمیم‌های تخصیص نامیده می‌شود.

امروزه بسیاری از خبرگان معتقدند با توجه به عدم قطعیت‌های متعدد موجود در زنجیره تأمین، باید بتوان عدم قطعیت را در طراحی زنجیره تأمین مدلسازی کرد. عدم

قطعیت بخش غیر قابل اجتناب محیط‌های کسب‌وکار امروزی است که از منابع مختلفی ناشی می‌شوند [5]، [6]. روش‌های مختلفی برای مدلسازی عدم قطعیت در طراحی شبکه زنجیره تأمین وجود دارد که مدل‌های تصادفی²، تئوری مجموعه فازی³ و بهینه‌سازی استوار⁴ از جمله این روش‌ها هستند. برنامه‌ریزی فازی برای مواقعی که با فقدان دانش در مورد مقادیر دقیق پارامترهای مدل رو به رو هستیم، به کار می‌رود. در این نوع برنامه‌ریزی، پارامترهای مدل ریاضی با توزیع‌های امکانی و با استفاده از دانش و تجربه ذهنی تصمیم‌گیرندگان مشخص می‌شوند [7]. از سوی دیگر، در رویکرد بهینه‌سازی استوار پارامترها به صورت سناریوهای گسسته و یا در یک دامنه پیوسته بدون تعریف تابع توزیع تعریف می‌شوند. هدف این تئوری به دست آوردن جواب بهینه‌ای است که نسبت به تقریباً تمام پارامترهای عدم قطعیت حساسیت نداشته باشد. در این تئوری یک راه‌حل برای یک مسئله بهینه‌سازی در صورتی استوار است که هم دارای استواری شدنی و هم استواری بهینگی باشد. استواری شدنی به این معنی است که راه‌حل باید برای تقریباً همه مقادیر ممکن پارامترهای عدم قطعیت موجه باقی بماند (استواری مدل)؛ استواری بهینگی نیز به معنی این است که مقدار تابع هدف برای این راه‌حل باید نزدیک به مقدار بهینه باقی بماند یا دارای حداقل انحرافات نامطلوب از مقدار بهینه برای تقریباً تمام مقادیر ممکن پارامترهای نامطمئن باشد (استواری جواب) [8].

یکی از معایب عمده روش‌های برنامه‌ریزی امکانی این است که این روش‌ها تنها مقادیر میانگین یا مورد انتظار تابع هدف را در توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی در نظر می‌گیرند. در حقیقت، به رغم تحقیقات گسترده در زمینه مسئله عدم قطعیت در حوزه‌های مختلف، کنترل عدم قطعیت و انحرافات تابع هدف تحت شرایط عدم قطعیت فازی مورد بررسی قرار نگرفته و تمام تصمیم‌های تحت شرایط متوسط وقوع پارامترهای عدم قطعیت گرفته شده‌اند [9]. در واقع، دامنه گسترده‌ای از مسائل پیچیده وجود دارد که در آنها توجه همزمان به هر دو وجه فازی و استواری مورد نیاز است [10]. با این حال هنوز در هیچ تحقیقی، به ارائه یک رویکرد استوار انعطاف‌پذیر که بتواند هر دو وجه استواری بهینگی و استواری شدنی را تحت شرایط عدم قطعیت

فازی مورد بررسی قرار دهد، پرداخته نشده است. از این رو انگیزه اصلی این تحقیق به نیاز برای برنامه‌ریزی ریاضی فازی با رویکرد بهینه‌سازی استوار برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته مربوط می‌شود.

2- مرور ادبیات

در این قسمت به بررسی ادبیات طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته و رویکردهای مدلسازی آن در شرایط عدم قطعیت به‌ویژه رویکرد استوار تمرکز خواهیم یافت. آل سید و همکاران [11] یک طراحی شبکه لجستیک حلقه بسته با هدف حداکثرسازی سود زنجیره تأمین و با سه سطح در جهت مستقیم (تأمین‌کننده، کارخانه تولیدکننده و مراکز توزیع کننده) را پیشنهاد کردند. وانگ و هسو [12] یک مدل طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته تعمیم یافته توسعه دادند. در مدل آنها جریان‌های مستقیم و معکوس از مراکز توزیع به‌عنوان تسهیلات پردازش ترکیبی استفاده می‌شد. اوستر و همکاران [13] نیز یک مدل شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند محصولی ارائه کردند. آنها تولید و بازتولید را به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار دادند و برای مشتریان از یک منبع منفرد استفاده کردند. کو و ایوانز [14] یک شبکه حلقه بسته یکپارچه پویا توسعه دادند که به صورت لجستیک‌های سه بخشی بود. رضانی و همکاران [15] یک مدل احتمالی چند هدفه برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین معکوس/مستقیم تحت عدم قطعیت معرفی کردند. عملکرد زنجیره از طریق سه شاخص سود، پاسخگویی مشتری و کیفیت تأمین‌کنندگان مورد ارزیابی قرار می‌گرفت. سلطانی تهرانی و همکاران [16] یک زنجیره تأمین حلقه بسته طراحی کردند که به‌صورت چندهدفه، چندمحصولی و چنددوره‌ای می‌باشد. توابع هدف شامل حداقل‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل بین مراکز و هزینه پردازش داخل مراکز و مراکز ساخته شده و همچنین حداقل‌سازی کربن دی‌اکسید منتشر شده در داخل مراکز و کربن دی‌اکسید منتشر شده در اثر حمل‌ونقل بین مراکز می‌باشد.

همان طوری که مجموعه ادبیات کنونی مرتبط با مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته نشان می‌دهد، بیشتر مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی توسعه داده شده، مدل‌های

تحت عدم قطعیت هستند که در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین، مدل‌های برنامه‌ریزی تحت عدم قطعیت از مدل‌های تصادفی [17]، فازی [18] تا مدل‌های استوار [19؛ 20] گسترده شده‌اند. با این حال در این مدل‌ها تنها حداقل‌سازی متوسط مقدار تابع هدف مورد توجه بوده و به حداقل‌سازی انحرافات تابع هدف پرداخته نمی‌شود. برای حل این مشکل، شاخص‌های مختلفی برای استواری جواب مانند واریانس، انحراف استاندارد، انحراف مطلق و نیم انحراف از مقدار آرمانی به کار گرفته شده است. مدل‌های امکانی استوار [21] و تصادفی استوار [8] از جمله مدل‌هایی هستند که در این زمینه پیشنهاد شده‌اند.

سیندر (2006) برای مسئله مکانیابی تسهیلات یک شاخص استواری معرفی کردند که در آن دو هدف حداقل‌سازی میانگین هزینه و محدود کردن تأثیر نسبی هر سناریو ترکیب شده بود [22]. رضانی و همکاران [23] یک مدل زنجیره تأمین برای یک شبکه حلقه بسته چند محصولی در شرایط عدم قطعیت پیشنهاد کردند. آنها از رویکرد بهینه‌سازی استوار بدترین مورد برای مواجهه با عدم قطعیت تقاضا و نرخ برگشت استفاده کردند و با یک مجموعه محدودی از سناریوهای ممکن مسئله خود را مدلسازی کردند. کیوانشکوه و همکاران [10] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی جدید برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهاد کردند. نوآوری اصلی آنها توسعه یک رویکرد برنامه‌ریزی استوار - تصادفی برای مدلسازی همزمان دو نوع مختلف عدم قطعیت شامل سناریوهای تصادفی برای هزینه‌های حمل‌ونقل و مجموعه‌های عدم قطعیت چندوجهی برای تقاضا و برگشت محصولات بود. با این حال در این دو تحقیق به استواری جواب مدل پرداخته نشده است.

برای در نظر گرفتن استواری در برنامه‌ریزی تصادفی، مولوی و همکاران [8] یک روش بهینه‌سازی استوار انعطاف‌پذیر را برای مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو پیشنهاد کردند. این رویکرد به‌طور گسترده‌ای در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین به کار گرفته شده است [4؛ 24]. در حوزه برنامه‌ریزی امکانی، پیشوایی و همکاران [21] تئوری برنامه‌ریزی استوار را در چارچوب برنامه‌ریزی امکانی توسعه دادند که منتج به یک رویکرد جدید موسوم به برنامه‌ریزی امکانی استوار شد.

همچنین ژانگ و همکاران [9: 25] برای بررسی استواری تصمیم، مدل‌های انتخاب سبد سهام مبتنی بر میانگین‌های امکانی فوقانی و تحتانی و واریانس‌های امکانی اعداد فازی را معرفی کردند. در مدل ژانگ و ژانگ [26] انحراف مطلق به صورت یک محدودیت تعریف می‌شود و حد فوقانی آن به وسیله ترجیحات تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌شود. در واقع، در این مدل به بهینه‌سازی مقدار انحراف مطلق در تابع هدف پرداخته نمی‌شود. علاوه بر این، در این رویکرد استواری مدل مورد بررسی قرار نگرفته و تنها به بهینه‌سازی استواری جواب پرداخته شده است.

از بازنگری ادبیات بالا و جدول 1 می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در سال‌های اخیر طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین مدل‌های امکانی و تصادفی خطرناپذیری توجه بسیاری از محققان را به خود معطوف کرده است. با این حال برخلاف مدل‌های تصادفی، در مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت فازی به مدلسازی استوار با در نظر گرفتن هر دو وجه استواری جواب و استواری مدل پرداخته نشده است؛ این مورد به مسائل بهینه‌سازی فازی استوار گسترش پیدا می‌کند که توسعه آن در یک چارچوب انعطاف‌پذیر موضوع اصلی این تحقیق است.

جدول 1 ادبیات تحقیق طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با رویکرد استواری

مقاله	شبکه حلقه بسته	رویکرد برنامه‌ریزی		شاخص استواری	استواری جواب	استواری مدل
		تصادفی	امکانی			
(Snyder, 2006)		*			*	
(Pan & Nagi, 2010)		*		انحراف مطلق	*	*
(Pishvaei et al., 2012)			*	دامنه تغییرات امکانی	*	*
(Baghalian et al., 2013)		*		انحراف مطلق	*	*
(Klibi & Martel, 2013)		*		نیم انحراف	*	
(Ramezani et al., 2013)	*	*				*
(Zhang & Zhang, 2014)			*	انحراف مطلق امکانی	*	
(Govindan & Fattahi, 2015)		*		نیم انحراف	*	
(Keyvanshokoh et al., 2016)	*	*				
تحقیق حاضر	*		*	انحراف مطلق امکانی	*	*

3- تشریح مسئله و مدلسازی

شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته‌ای که در این مقاله مدلسازی شده، یک ساختار عمومی دارد و می‌تواند در صنایعی مانند مبلمان، باتری و لاستیک که قابلیت جمع‌آوری، بازیافت و انهدام دارند و مواد بازیافتی آنها مجدد در فرایند تولید مورد استفاده قرار می‌گیرید، به کار گرفته شود. در زنجیره تأمین بررسی شده، محصولات از طریق جریان‌های مستقیم و معکوس با تأمین مواد از تأمین‌کنندگان باید در کارخانه‌های مختلفی تولید شوند که برای استقرار این کارخانه‌ها به عنوان مراکز تولیدی جدید، مکان آنها از میان مکان‌های پیشنهادی مورد ارزیابی و انتخاب قرار می‌گیرند. سپس محصولات نهایی از طریق تولیدکنندگان به توزیع‌کنندگان و سپس به مشتریان ارسال می‌شود. این توزیع‌کنندگان نیز دارای مکان‌های پیشنهادی هستند که باید برای استقرار مورد ارزیابی قرار گیرند. سپس محصولات قراضه که در مراکز جمع‌آوری اولیه جمع‌آوری می‌شوند، باید به طور سریع به مراکز جمع‌آوری متمرکز و از آنجا به مراکز بازیافت منتقل شوند. در مراکز بازیافت محصولات قابل استفاده شکسته، عناصر آنها از یکدیگر جدا و مواد آنها بازیافت می‌شوند. همچنین قسمت‌های غیرقابل استفاده محصولات جهت انهدام به مراکز انهدام منتقل می‌شوند. در نهایت مواد بازیافتی به کارخانه‌های تولید ارسال می‌شوند. فرضیه‌های عمده به صورت زیر هستند:

- هزینه حمل هر واحد محصول از تأمین‌کننده به کارخانه‌های تولیدی در هزینه خرید مواد خام لحاظ می‌شود؛
- مکان‌های تأمین‌کنندگان و مشتریان ثابت هستند؛
- مقدار تقاضا، مقدار برگشتی، ظرفیت تسهیلات و مقادیر هزینه شامل هزینه ثابت استقرار تسهیلات، هزینه‌های خرید مواد، تولید، توزیع، جمع‌آوری و بازیافت نادقیق بوده و با متغیرهای فازی بیان می‌شوند؛
- هزینه بازرسی و حمل و نقل هر واحد محصول برگشتی در هزینه جمع‌آوری لحاظ می‌شود؛
- هزینه حمل ضایعات در هزینه انهدام لحاظ می‌شود؛

• ظرفیت مراکز انهدام نامحدود است.

مجموعه‌ها:

i	مجموعه تأمین‌کنندگان بالقوه
c	مجموعه مواد
j	مجموعه مکان‌های بالقوه برای کارخانه‌ها
k	مجموعه مکان‌های بالقوه برای مراکز توزیع
l	مجموعه مکان‌های ثابت مشتریان
h	مجموعه مکان‌های بالقوه برای مراکز جمع‌آوری
r	مجموعه مکان‌های بالقوه برای مراکز بازیافت
s	مجموعه مکان‌های بالقوه برای مراکز انهدام
t	مجموعه تکنولوژی‌های تولید موجود برای کارخانه‌ها و مراکز بازیافت

پارامترها:

\tilde{d}_l	تقاضای مشتری l
\tilde{c}_l	درصد محصول برگشتی از مشتری l
q_c	مقدار مواد مورد نیاز c برای تولید محصول
\tilde{f}_{jt}	هزینه ثابت افتتاح مرکز تولید j با فناوری تولید t
\tilde{f}_k	هزینه ثابت افتتاح مرکز توزیع k
\tilde{f}_h	هزینه ثابت افتتاح مرکز جمع‌آوری h
\tilde{f}_r	هزینه ثابت افتتاح مرکز بازیافت r با فناوری بازیافت t
\tilde{t}_{jk}	هزینه هر واحد حمل‌ونقل محصول از مرکز تولید j به مرکز توزیع k
\tilde{t}_{kl}	هزینه هر واحد حمل‌ونقل محصول از مرکز توزیع k به ناحیه مشتری l
\tilde{t}_{hr}	هزینه هر واحد حمل‌ونقل محصول قراضه از مرکز جمع‌آوری h به مرکز بازیافت r
\tilde{t}_{rj}	هزینه حمل‌ونقل هر کیلوگرم مواد از مرکز بازیافت r به مرکز تولید j
$p\tilde{p}_{ci}$	هزینه خرید هر کیلوگرم مواد c از تأمین‌کننده i
$m\tilde{c}_{jt}$	هزینه تولید هر واحد محصول در مرکز تولید j با فناوری تولید t

هزینه توزیع هر واحد محصول از مرکز توزیع k به مرکز مشتری l	$d\tilde{c}_{kl}$
هزینه خرید هر واحد محصول قراضه از مشتری l	$p\tilde{o}_l$
هزینه جمع‌آوری هر واحد محصول قراضه از مرکز مشتری l در مرکز جمع‌آوری h	$c\tilde{c}_{lh}$
هزینه بازیافت هر کیلوگرم مواد c در مرکز بازیافت r با فناوری t	$r\tilde{c}_{ert}$
هزینه انهدام هر کیلوگرم ضایعات محصول قراضه در مراکز انهدام	$s\tilde{c}$
مقدار مواد بازیافتی c از هر واحد محصول قراضه (کیلوگرم)	a_c
مقدار ضایعات هر واحد محصول قراضه (کیلوگرم)	δ
ظرفیت تأمین‌کننده i برای مواد c	\tilde{c}_{ci}
ظرفیت مرکز تولید j با فناوری t	\tilde{c}_{jt}
ظرفیت مرکز توزیع k	\tilde{c}_k
ظرفیت مرکز جمع‌آوری h	\tilde{c}_h
ظرفیت مرکز بازیافت r برای مواد c با فناوری t	\tilde{c}_{ert}

متغیرها :

مقدار مواد اولیه c خریداری شده از تأمین‌کننده i به وسیله کارخانه j	X_{cij}
مقدار محصول تولید شده در کارخانه j با فناوری t که به مرکز توزیع k ارسال می‌شود.	X_{jkt}
مقدار محصول ارسال شده از مرکز توزیع k به مشتری l	X_{kl}
مقدار محصول قراضه که از مرکز مشتری l به مرکز جمع‌آوری h ارسال می‌شود.	Y_{lh}
مقدار محصول قراضه که از مرکز توزیع h به مرکز بازیافت r ارسال می‌شود.	Y_{hr}
مقدار مواد بازیافت شده c که از مرکز بازیافت h با تکنولوژی t به کارخانه j ارسال می‌شود.	V_{cjt}
مقدار ضایعات ارسالی از بازیافت‌کننده r به مرکز انهدام s	U_{rs}
در صورت ارسال محصول از مرکز جمع‌آوری h به ناحیه مشتری l یک و در غیر این صورت صفر	Z_{kl}
در صورت ارسال محصول قراضه از ناحیه مشتری l به مرکز جمع‌آوری h یک و در غیر این صورت صفر	Z_{lh}
در صورت باز شدن کارخانه j با فناوری t یک و در غیر این صورت صفر	W_{jt}

W_k در صورت باز شدن مرکز توزیع k یک و در غیر این صورت صفر
 W_h در صورت باز شدن مرکز جمع‌آوری h یک و در غیر این صورت صفر
 W_{rt} در صورت باز شدن مرکز بازیافت r با فناوری t یک و در غیر این صورت صفر

مدل ریاضی پیشنهادی به صورت زیر می‌باشد:

$$\min \sum_j \sum_t \tilde{f}_{jt} W_{jt} + \sum_k \tilde{f}_k W_k + \sum_h \tilde{f}_h W_h + \sum_r \sum_t \tilde{f}_{rt} W_{rt} + \sum_c \sum_i \sum_j p \tilde{p}_{ci} X_{cij} + \sum_j \sum_k \sum_t m \tilde{c}_{jt} X_{jkt} + \sum_k \sum_l \tilde{d}_{kl} X_{kl} + \sum_l \sum_h (p \tilde{o}_l + c \tilde{c}_{lh}) Y_{lh} + \sum_c \sum_r \sum_j \sum_t r \tilde{c}_{crt} V_{crt} \quad (1)$$

$$+ \sum_j \sum_k \sum_t \tilde{t}_{jk} X_{jkt} + \sum_k \sum_l \tilde{t}_{kl} X_{kl} + \sum_h \sum_r \tilde{t}_{hr} Y_{hr} + \sum_c \sum_r \sum_j \sum_t \tilde{t}_{rjt} V_{crt} + \sum_r \sum_s \delta \tilde{c} U_{rs}$$

s.t. $\sum_k \sum_t q_c X_{jkt} = \sum_i X_{cij} + \sum_r \sum_t V_{crt} \quad \forall c, j \quad (2)$

$$\sum_j \sum_t X_{jkt} = \sum_l X_{kl}, \quad \forall k \quad (3)$$

$$\sum_k X_{kl} = \sum_k \tilde{d}_l Z_{kl}, \quad \forall l \quad (4)$$

$$\sum_h Y_{lh} = \sum_h \tilde{t}_l \tilde{d}_l Z_{lh}, \quad \forall l \quad (5)$$

$$\sum_k Z_{kl} = \sum_h Z_{lh} = 1, \quad \forall l \quad (6)$$

$$\sum_r Y_{hr} = \sum_l Y_{lh}, \quad \forall h \quad (7)$$

$$\sum_h a_c Y_{hr} = \sum_j \sum_t V_{crt}, \quad \forall c, r \quad (8)$$

$$\sum_h \delta Y_{hr} = \sum_s U_{rs}, \quad \forall r \quad (9)$$

$$\sum_j X_{cij} \leq \tilde{c}_{ci} \quad \forall c, i \quad (10)$$

$$\sum_k X_{jkt} \leq \tilde{c}_{jt} W_{jt}, \quad \forall j, t \quad (11)$$

$$\sum_l X_{kl} \leq \tilde{c}_k W_k, \quad \forall k \quad (12)$$

$$\sum_l Y_{lh} \leq \tilde{c}_h W_h \quad \forall h \quad (13)$$

$$\sum_j V_{crjt} \leq \tilde{c}_{cr} W_r, \quad \forall c, r, t \quad (14)$$

$$\sum_t W_{jt} \leq 1, \quad \forall j \quad (15)$$

$$\sum_t W_r \leq 1, \quad \forall r \quad (16)$$

$$X_{jkt}, X_{kl}, Y_{lh}, Y_{hr} \geq 0, \text{integer} \quad \forall j, k, l, h, r, t \quad (17)$$

$$X_{cij}, V_{crjt} \geq 0, \quad \forall c, i, j, r, t \quad (18)$$

$$Z_{kl}, Z_{lh}, W_{jt}, W_k, W_h, W_r \in \{0,1\}, \quad \forall j, k, h, r, t \quad (19)$$

تابع هدف در مدلسازی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، تابع حداقل سازی کل هزینه‌ها شامل هزینه‌های ثابت افتتاح تسهیلات، تولید، بازیافت، جمع‌آوری، انهدام، خرید و حمل‌ونقل می‌باشد. تمام این هزینه‌ها به صورت فازی می‌باشند. محدودیت (2) توازن جریان مواد کارخانه‌ها را تضمین می‌کند. محدودیت

(3) تضمین می‌کند که تمامی محصولات تولید شده باید به مراکز توزیع منتقل شوند. محدودیت (4) اطمینان می‌دهد که تقاضای مشتریان هر منطقه تأمین شود. محدودیت (5) مقدار محصولات قراضه ارسالی از مناطق مشتری به مراکز جمع‌آوری را تضمین می‌کند. محدودیت (6) اطمینان می‌دهد که تقاضای هر مشتری تنها از طریق یک توزیع‌کننده و محصولات قراضه خریداری شده به وسیله هر مرکز جمع‌آوری نیز از یک ناحیه مشتری تأمین شوند. محدودیت‌های (7) و (8) به ترتیب توازن جریان محصولات قراضه در مراکز جمع‌آوری و مراکز بازیافت را تضمین می‌کند. محدودیت (9) اطمینان می‌دهد که ضایعات مراکز بازیافت باید به مراکز انهدام منتقل شوند. محدودیت‌های (10) تا (14) به ترتیب محدودیت ظرفیت مراکز عرضه، تولید، توزیع، جمع‌آوری و بازیافت را نشان می‌دهند. محدودیت‌های (15) و (16) اطمینان می‌دهند که برای هر مرکز تولید و بازیافت تنها می‌توان حداکثر یک نوع تکنولوژی اختصاص داد. در نهایت محدودیت‌های (17) تا (19) محدودیت‌های عدد صحیح، غیرمنفی و صفر و یک متغیرهای تصمیم متناظر با آنها را نشان می‌دهد. به دلیل عدم دسترسی به داده‌ها در وضعیت‌های واقعی، بیشتر پارامترها مورد نظر در چنین مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین دارای یک ماهیت فازی هستند.

4- رویکرد برنامه‌ریزی فازی استوار پیشنهادی

در مدل زنجیره تأمین حلقه بسته مورد بررسی هزینه‌ها و خطرپذیری به ترتیب به وسیله مقدار میانگین امکانی و انحراف مطلق امکانی مربوط به هزینه‌های فازی اندازه‌گیری می‌شود. کارلسون و فولر [29] مقدار میانگین امکانی تحتانی و فوقانی یک عدد فازی را معرفی کردند که به صورت توزیع‌های امکانی است. این تعریف با اصل گسترش‌زاده [30] سازگار بوده و مبتنی بر مجموعه برش است. همچنین برای کنترل محدودیت‌های امکانی، از بین رویکردهای برنامه‌ریزی امکانی رایج، رویکرد برنامه‌ریزی با محدودیت‌های اعتبار⁵ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در قسمت زیر برخی از تعاریف و نتایج مورد نیاز را به صورت مختصر یادآوری می‌کنیم.

تعریف 1. عدد فازی \tilde{A} یک عدد فازی از نوع LR، $\tilde{A} = (\underline{a}, \bar{a}, \alpha, \beta)_{LR}$ ، بوده که دارای تابع عضویت زیر است [31]:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} L\left(\frac{\underline{a}-x}{\alpha}\right) & \underline{a}-\alpha \leq x \leq \underline{a} \\ 1 & \underline{a} \leq x \leq \bar{a} \\ R\left(\frac{\bar{a}-x}{\beta}\right) & \bar{a} \leq x \leq \bar{a}+\beta \end{cases}$$

تجمیع ترکیب خطی مثبت اعداد فازی LR زمانی که توابع ارجاع آنها خطی یا همگی دارای شکل مشابهی برای L و R هستند، به طور گسترده ای مورد بررسی قرار گرفته است [32].

تعریف 2. مقادیر میانگین امکانی تحتانی و فوقانی عدد فازی \tilde{A} به صورت زیر تعریف می شود [29]:

$$M_*(\tilde{A}) = 2 \int_0^1 \rho(\inf \tilde{A}_\rho) d\rho$$

$$M^*(\tilde{A}) = 2 \int_0^1 \rho(\sup \tilde{A}_\rho) d\rho$$

$\inf \tilde{A}_\rho$ و $\sup \tilde{A}_\rho$ به ترتیب نقاط انتهایی چپ و راست برش سطح ρ را برای $\rho \in [0,1]$ نشان می دهند. با این تعریف میانگین های امکانی تحتانی و فوقانی به ترتیب به صورت زیر بیان می شوند:

$$\begin{aligned} M_*(A) &= \underline{a} - \alpha / 3, \\ M^*(A) &= \bar{a} + \beta / 3, \end{aligned} \tag{20}$$

میانگین امکانی با ارزش بازه ای به صورت فاصله زیر می باشد [29]:

$$M(\tilde{A}) = [M_*(\tilde{A}), M^*(\tilde{A})] \quad (21)$$

تعریف 3. \tilde{A} را یک عدد فازی در نظر بگیرید. سپس، میانگین امکانی قطعی به صورت زیر تعریف می‌شود [29]:

$$\bar{M}(A) = (M^*(A) + M_*(A)) / 2 = \int_0^1 \rho (\inf \tilde{A}_\rho + \sup \tilde{A}_\rho) d\rho \quad (22)$$

با این تعریف، مقدار میانگین امکانی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\bar{M}(A) = \frac{a + \bar{a}}{2} + \frac{\beta - \alpha}{6} \quad (23)$$

تعریف 4. برای دو عدد حقیقی \tilde{A} و \tilde{B} ، انحراف مطلق امکانی بین آنها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v(\tilde{A}, \tilde{B}) = \frac{1}{2} (\bar{M}(\tilde{A} + \tilde{B}) - \bar{M}(\tilde{A}) - \bar{M}(\tilde{B})) \quad (24)$$

انحراف مطلق امکانی می‌تواند برای عدد نوزنقه‌ای \tilde{A} به صورت زیر تعریف شود [26]:

$$v(\tilde{A}) = \bar{a} - \underline{a} + \frac{\alpha + \beta}{3} \quad (25)$$

تعریف 5. \tilde{A} را یک عدد فازی LR با تابع عضویت $\mu(x)$ و r را یک عدد حقیقی در نظر بگیرید. اندازه اعتبار⁶ به صورت زیر تعریف می‌شود [33]:

$$Cr\{\tilde{A} * r\} = \frac{1}{2} (Pos\{\tilde{A} * r\} + Nec\{\tilde{A} * r\})$$

* می‌تواند هر یک از روابط \leq, \geq باشد. اندازه اعتبار به صورت زیر خواهند بود:

$$Cr(\bar{A} \geq r) = \begin{cases} 1 & -\infty \leq r \leq \underline{a} - \alpha \\ \frac{\underline{a} + \alpha - r}{2\alpha} & \underline{a} - \alpha \leq r \leq \underline{a} \\ \frac{1}{2} & \underline{a} \leq r \leq \bar{a} \\ \frac{\bar{a} + \beta - r}{2\beta} & \bar{a} \leq r \leq \bar{a} + \beta \\ 0 & \bar{a} + \beta \leq r \leq +\infty \end{cases} \quad (27)$$

$$Cr(\bar{A} \leq r) = \begin{cases} 0 & -\infty \leq r \leq \underline{a} - \alpha \\ \frac{r - \underline{a} + \alpha}{2\alpha} & \underline{a} - \alpha \leq r \leq \underline{a} \\ \frac{1}{2} & \underline{a} \leq r \leq \bar{a} \\ \frac{r - \bar{a} + \beta}{2\beta} & \bar{a} \leq r \leq \bar{a} + \beta \\ 1 & \bar{a} + \beta \leq r \leq +\infty \end{cases} \quad (26)$$

براساس روابط (26) و (27)، برای مقادیر بحرانی بزرگتر از 0/5، از جایگزین‌های زیر می‌توان استفاده کرد:

$$\begin{aligned} Cr\{\bar{A} \leq r\} \geq \rho &\Leftrightarrow r \geq (2-2\rho)\bar{a} + (2\rho-1)(\bar{a} + \beta) \\ Cr\{\bar{A} \geq r\} \geq \rho &\Leftrightarrow r \leq (2\rho-1)(\underline{a} - \alpha) + (2-2\rho)\underline{a} \end{aligned} \quad (28)$$

دو رابطه فوق می‌تواند به طور مستقیم برای تبدیل محدودیت‌های شانس فازی به محدودیت‌های معادل قطعی مورد استفاده قرار گیرد [34].

1-4- فرمول‌بندی میانگین هزینه فازی

برای اینکه بتوانیم راحت‌تر کار کنیم، فرم فشرده مدل زنجیره تأمین حلقه بسته به صورت زیر بیان شود:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \tilde{f}x + \tilde{c}y \\
 & \text{s.t. } Ay \geq \tilde{d} \\
 & \quad Bx = 0 \\
 & \quad Dy \leq \tilde{E}x \\
 & \quad x \in \{0,1\}, y \geq 0
 \end{aligned} \tag{29}$$

در این تحقیق f, c و d بردار پارامترها و A, B, D و E ماتریس پارامترهای ضرایب فنی مدل هستند. پارامترهای A, B, D به صورت قطعی مشخص هستند در حالی که f, c, d و E به ترتیب متغیرهای فازی مرتبط با هزینه افتتاح تسهیلات، سایر هزینه‌ها، تقاضای مشتریان و ظرفیت هر یک از این تسهیلات هستند. پارامترهای فازی به صورت $\tilde{f}, \tilde{c}, \tilde{d}$ و \tilde{E} نشان داده می‌شوند.

برای تشکیل مدل برنامه‌ریزی با محدودیت شانس امکانی اولیه، از عملگرهای مقدار میانگین امکانی مبتنی بر میانگین کارلسون و فولر [29] برای فرمول‌بندی تابع هدف و از شاخص اعتبار لیمو و ایوامورا [35] برای کنترل محدودیت‌های شانس دارای پارامترهای نادقیق استفاده شده است. براساس توضیحاتی که در فوق به آنها اشاره شد، مدل برنامه‌ریزی فازی اولیه⁷ (OFP) به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \bar{M}[\tilde{f}]x + \bar{M}[\tilde{c}]y \\
 & \text{s.t. } Cr(\tilde{A}y \geq \tilde{d}) \geq \rho \\
 & \quad Bx = 0 \\
 & \quad Cr(Dy \leq \tilde{E}x) \geq \varphi \\
 & \quad x \in \{0,1\}, y \geq 0
 \end{aligned} \tag{30}$$

$\bar{F}(x, y) = \tilde{f}x + \tilde{c}y$ یک هزینه فازی برای جواب (x, y) است. فرض خواهیم کرد که هزینه‌های مسئله شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، $\tilde{f}_i = (\underline{f}_i, \bar{f}_i, \alpha_i, \beta_i)_{LR}$ و $\tilde{c}_j = (\underline{c}_j, \bar{c}_j, \alpha_j, \beta_j)_{LR}$ با اعداد فازی نوزنقه‌ای مشخص می‌شوند. همچنین فرض می‌کنیم که توابع ارجاع چپ و راست همگی شکل‌های مشابهی دارند. اگر همه هزینه‌ها به صورت فواصل فازی نوزنقه‌ای باشند، ترکیب خطی زیر کل هزینه فازی را بیان

می‌کند و به صورت $\bar{F}(x, y)$ نشان داده می‌شود. بعد از این برای اینکه راحت‌تر کار کنیم $\tilde{F}(x, y)$ را به صورت \bar{F} نشان می‌دهیم، خواهیم داشت:

$$\tilde{F} = \left(\begin{array}{c} \sum_i \underline{f}_i x_i + \sum_j \underline{c}_j y_j, \sum_i \bar{f}_i x_i + \sum_j \bar{c}_j y_j, \\ \sum_i \alpha_i x_i + \sum_j \alpha_j y_j, \sum_i \beta_i x_i + \sum_j \beta_j y_j \end{array} \right)_{LR} = (\underline{E}, \bar{F}, M, N)_{LR} \quad (31)$$

پس بنابراین، \bar{F} یک بازه فازی دوزنقه‌ای است. براساس تعریف (3)، مقدار میانگین موزون تابع هدف (F) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned} F = \bar{M}(\tilde{F}) &= \sum_i \bar{M}(\tilde{f}_i) x_i + \sum_j \bar{M}(\tilde{c}_j) y_j \\ &= \sum_i \left(\frac{\underline{f}_i + \bar{f}_i}{2} + \frac{\beta_i - \alpha_i}{6} \right) x_i + \sum_j \left(\frac{\underline{c}_j + \bar{c}_j}{2} + \frac{\beta_j - \alpha_j}{6} \right) y_j \end{aligned} \quad (32)$$

براساس توضیحاتی که در بالا بیان شد و با فرض $\vec{d} = (\underline{d}, \bar{d}, \alpha, \beta)_{LR}$ و $\vec{E} = (\underline{E}, \bar{E}, \alpha, \beta)_{LR}$ ، مدل برنامه‌ریزی فازی قطعی اولیه را می‌توان به صورت زیر فرموله کرد:

$$\text{Min } F \quad (33)$$

$$\text{s.t. } Ay \geq (2-2\rho)\bar{d} + (2\rho-1)(\bar{d} + \beta) \quad (34)$$

$$Bx = 0 \quad (35)$$

$$Dy \leq [(2\varphi-1)(\underline{E} - \alpha) + (2-2\varphi)\underline{E}]x \quad (36)$$

$$x \in \{0,1\}, y \geq 0 \quad (37)$$

در مدل فوق ρ و φ حداقل سطح اطمینان تصمیم‌گیرندگان برای اقناع محدودیت‌های شانس امکانی را نشان می‌دهند. منطقی است که محدودیت‌ها باید با سطح اطمینان بزرگ‌تر از 0/5 اقناع شوند؛ یعنی $\rho, \varphi > 0.5$ باشد. در این رویکرد، تصمیم‌گیرندگان باید حداقل سطح اطمینان محدودیت‌های شانس را تعیین کنند. روشن است که در این رویکرد مقدار نهایی به صورت ذهنی انتخاب می‌شوند و قادر نیستیم تشخیص دهیم که مقدار انتخاب شده برای سطح اطمینان بهترین انتخاب ممکن است.

4-2- فرمول‌بندی استوار

در این قسمت، یک مدل برنامه‌ریزی فازی استوار⁸ جدید (RFP) برای در نظر گرفتن استواری مدل تحت عدم قطعیت و حذف مشکلات مرتبط با تعیین حداقل سطح اطمینان فرمول‌بندی می‌شود. براساس تعاریف و اصولی که در قسمت‌های قبلی به آنها اشاره شد، مدل پیشنهادی به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } & F + \lambda v (\bar{F}) + \omega[(\bar{d} + \beta) - (2 - 2\rho)\bar{d} - (2\rho - 1)(\bar{d} + \beta)] + \\ & \phi[(2\varphi - 1)(\underline{E} - \alpha) + (2 - 2\varphi)\underline{E} - (\underline{E} - \alpha)]x \end{aligned} \quad (38)$$

s.t. Constraints (34-37)

عبارت اول مقدار میانگین تابع هدف⁹ را نشان می‌دهد. عبارت دوم نیز استواری بهینگی را بیان می‌کند. واریانس بالا برای تابع هدف به معنی این است که یک تغییر کوچک در مقادیر پارامترهای نادقیق می‌تواند تغییرپذیری بزرگی را در مقدار تابع هدف ایجاد کند. این عبارت را به صورت تغییرپذیری امکانی¹⁰ تابع هدف تعریف می‌کنیم. کاهش مقدار تغییرپذیری که با افزایش ضرایب آنها صورت می‌گیرد، می‌تواند استواری بهینگی را افزایش دهد. در اینجا، λ به صورت ضرایب اهمیت (وزن) تغییرپذیری امکانی تعریف می‌شوند. در نهایت عبارت‌های سوم و چهارم جریمه تخطی ممکن هر محدودیتی (یعنی تقاضای ارضا نشده¹¹ و کمبود ظرفیت) را در تابع هدف بیان می‌کند. این عبارت‌ها با مقادیر ω و ϕ می‌توانند تعدیل شوند. براساس مباحث بالا می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی درصدد رسیدن به یک بده‌وبستان منطقی بین این سه قسمت در تابع هدف است: (1) متوسط هزینه‌ها

(عبارت اول)؛ (2) استواری بهینگی (عبارات دوم) و (3) استواری شدنی (عبارت‌های سوم و چهارم). تصمیم‌گیرندگان می‌توانند تصمیم بگیرند که با توجه به اهمیتی که هزینه و خطرپذیری برای آنها دارد، کدام مقدار برای این چهار ضریب برای مسئله آنها مناسب‌تر است. در زیر عبارت‌های دوم تا چهارم با جزئیات خود مورد بررسی قرار می‌گیرند.

عبارت دوم جمع انحرافات مطلق موزون امکانی برای \bar{F} را نشان می‌دهد. براساس تعریف (4)، انحراف مطلق موزون امکانی تابع هدف (\bar{F}) مسئله می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$v(\bar{F}) = (\bar{M} | \bar{F} - \bar{M}(\bar{F}) |) = \bar{F} - \underline{F} + \frac{M + N}{3} \quad (39)$$

$$= \sum_i \left(\bar{f}_i - \underline{f}_i + \frac{\alpha_i + \beta_i}{3} \right) x_i + \sum_j \left(\bar{c}_j - \underline{c}_j + \frac{\alpha_j + \beta_j}{3} \right) y_j$$

این عبارت‌ها می‌توانند استواری بهینگی را تحت عدم قطعیت کنترل کنند. عبارت‌های سوم و چهارم سطح اطمینان هریک از محدودیت‌های شانس را تعیین می‌کنند. در این عبارات، عبارات درون براکت‌ها تفاوت بین بدترین مورد پارامترهای نادقیق و مقداری را که در محدودیت‌های شانس مورد استفاده قرار می‌گیرد، بیان می‌کنند. درحقیقت، این عبارات استواری شدنی بودن بردار جواب‌ها را کنترل می‌کنند. قابل توجه است که در صورتی که ماتریس ضرایب فنی E دارای قطعیت فازی باشند، مدل پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی خواهد بود. این عبارت غیرخطی را می‌توان با تعریف یک متغیر جدید و افزودن چند محدودیت به این مدل به عبارت خطی تبدیل کرد. برای این منظور، u را یک متغیر جدید به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$u = \varphi x \quad (40)$$

سپس مدل غیر خطی فوق را به صورت زیر به یک مدل معادل خطی تبدیل می‌کنیم:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } F + \lambda v (\bar{F}) + \omega[(\bar{d} + \beta) - (2 - 2\rho)\bar{d} - (2\rho - 1)(\bar{d} + \beta)] + \\
 & \phi[(2\varphi - 1)(\underline{E} - \alpha) + (2 - 2\varphi)\underline{E} - (\underline{E} - \alpha)]x \\
 \text{s.t. } & Ay \geq (2 - 2\rho)\bar{d} + (2\rho - 1)(\bar{d} + \beta) \\
 & Bx = 0 \\
 & Dy \leq (2u - x)(\underline{E} - \alpha) + (2x - 2u)\underline{E} \\
 & u \leq Mx \\
 & u \geq M(x - 1) + \varphi \\
 & u \leq \varphi \\
 & x \in \{0, 1\}, y, u \geq 0, 0.5 \leq \rho, \varphi \leq 1
 \end{aligned} \tag{41}$$

به طوری که M یک عدد بزرگ است. همچنین، سه محدودیت اضافه شده اطمینان می‌دهند که متغیر جدید برابر با صفر است اگر $x = 0$ و برابر با φ است اگر $x = 1$.

5- نتایج محاسباتی و ارزیابی

برای نشان دادن عملکرد و کاربرد مدل پیشنهادی، یک مثال عددی برای یک مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه، مسئله زنجیره تأمین دارای هفت مکان پیشنهادی برای استقرار کارخانه‌های جدید، هشت مکان بالقوه برای مراکز توزیع، هفت مکان بالقوه برای مراکز جمع‌آوری و شش مکان برای تسهیلات بازیافت است. همچنین یک محصول و یک نوع مواد را با 14 مرکز مشتری که هر یک دارای تقاضای با توزیع یکنواخت هستند، مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای تولید مجموعه پارامترهای فازی، اعداد فازی LR را برای نمونه عددی خود در نظر می‌گیریم. چهار مقدار، یعنی مقادیر محتمل تحتانی و فوقانی \underline{a} و \bar{a} ، و مقادیر بازه سمت راست و چپ α و β برای هر پارامتر نادقیق از طریق یک توزیع احتمال مناسب تخمین زده می‌شود. برای این منظور یکی از محتمل‌ترین مقادیر هر پارامتر (در اینجا \underline{a}) نخست به صورت تصادفی با استفاده از توزیع احتمال یکنواخت تولید می‌شود که در جدول 2 مشخص شده‌اند ($\underline{a} = \text{uniform}(a, b)$). سپس، سه عدد تصادفی دیگر با استفاده از توزیع یکنواخت بین صفر و 0/4 برای r_1 ، صفر و 0/2 برای r_2 و صفر و 0/2 برای r_3 تولید می‌شود. در نهایت مقادیر محتمل فوقانی، بازه سمت راست و چپ با استفاده از این مقادیر به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} \bar{a} &= (1+r_1)a \\ \alpha &= r_2a \\ \beta &= r_3a \end{aligned} \tag{42}$$

جدول 2 مقادیر اسمی پارامترهای مدل در بازه توزیع یکنواخت

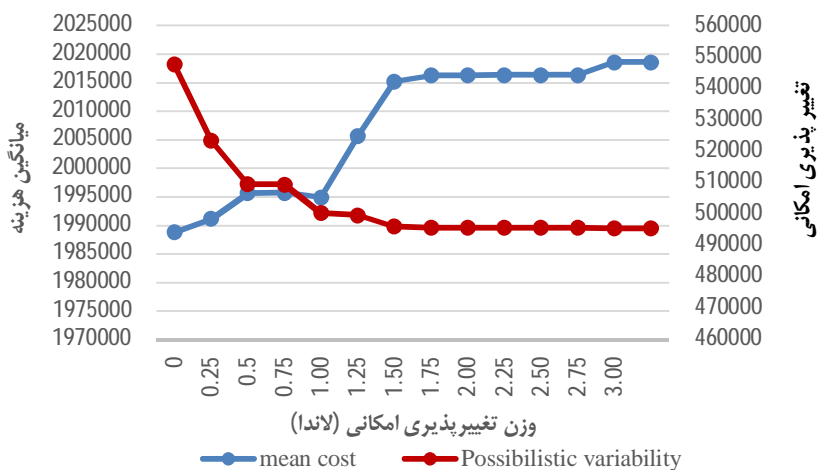
پارامترها	مقادیر محتمل تحتانی (\underline{a})	پارامترها	مقادیر محتمل تحتانی (\underline{a})
\tilde{f}_{jt}	(225000 ,240000)	$m\tilde{c}_{jt}$	(55 ,60)
\tilde{f}_k	(12000 ,13000)	$c\tilde{c}_{lh}$	(14 ,19)
\tilde{f}_h	(10000 ,12000)	$r\tilde{c}_{cr}$	(36 ,41)
\tilde{f}_n	(100000 ,120000)	$p\tilde{p}_{ci}$	(66 ,72)
\tilde{t}_{jk}	(8 ,10)	$p\tilde{o}_l$	(24 ,28)
\tilde{t}_{kl}	(7 ,9)	\tilde{d}_l	(445 ,465)
\tilde{t}_{hr}	(6 ,8)	π_l	10
\tilde{t}_{ij}	(4 ,5)	\tilde{t}_l	(0/8 ,1/4)
\tilde{c}_{ci}	(2500 ,2700)	W_c	(2 ,2/3)
\tilde{c}_j	(2200 ,2300)	q_c	(1/6 ,2/1)
\tilde{c}_k	(1100 ,11500)	δ	0/3
\tilde{c}_h	(1500 ,1700)	a_c	(0/ ,5/9)
\tilde{c}_n	(2000 ,2300)		

مسئله با استفاده از نرم‌افزار GAMS 23.5/CPLEX 12.2 روی یک کامپیوتر dual- core 2.10 GHz با 3 GB RAM حل می‌شود.

5-1- تحلیل استواری

در این مرحله، تحلیل حساسیت روی استواری بهیجگی (تغییرپذیری امکانی) و استواری‌شدنی صورت می‌گیرد. برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، این مدل به صورت جداگانه برای مقادیر مختلف ضرایب استواری بهیجگی و استواری‌شدنی (یعنی λ ، ω و ϕ) حل می‌شود. شکل 1 نتایج را برای میانگین هزینه و تغییرپذیری امکانی تابع هدف نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار λ

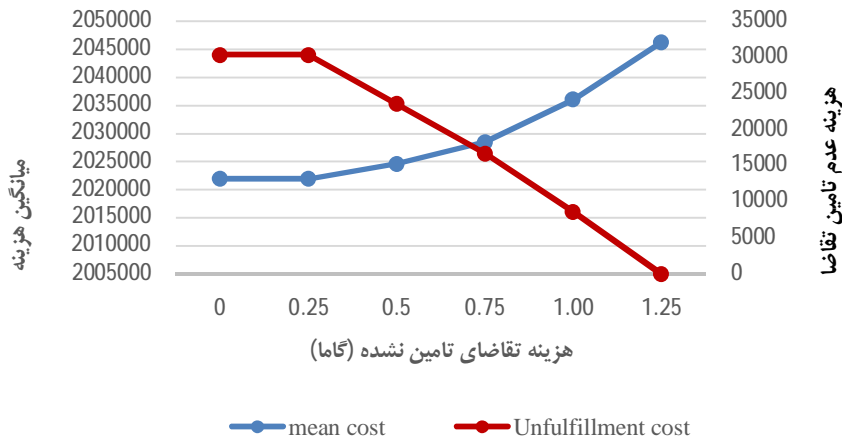
(فاکتور خطرپذیری) در تابع هدف، میانگین هزینه افزایش و در مقابل مقدار تغییرپذیری امکانی کاهش پیدا می‌کند.



شکل 1 مقدار میانگین امکانی هزینه و تغییرپذیری امکانی برای مقادیر مختلف λ

با تعیین مقدار این ضریب (λ)، می‌توان به‌طور مناسبی استواری بهینگی را براساس ترجیحات تصمیم‌گیرندگان کنترل کرد. شکل 1 نشان می‌دهد که با استفاده از رویکرد میانگین ($\lambda = 0$)، با توجه به بالا بودن تغییرپذیری امکانی، خطرپذیری تصمیم‌گیری خیلی بالا است. تصمیم‌گیرندگان می‌توانند مقدار λ را متناسب با اهمیت خطرپذیری و هزینه، با انجام یک بده‌وبستان بین میانگین هزینه و استواری بهینگی تعیین کنند.

شکل 2 نشان می‌دهد که با افزایش ω ، هزینه عدم ارضای تقاضا کاهش پیدا می‌کند و درنهایت به صفر می‌رسد. برای یک مقدار معین λ ، یک مقدار بزرگ برای ω به یک مقدار بزرگ برای میانگین هزینه و یک استواری شدنی بالا منجر می‌شود. روشن است که عملکرد ظرفیت که با ضریب ϕ تعدیل می‌شود نیز مشابه عملکرد هزینه عدم ارضای تقاضا است. در حقیقت با افزایش ω و ϕ استواری شدنی مدل افزایش پیدا می‌کند.



شکل 2 مقدار میانگین امکانی هزینه و هزینه عدم ارضای تقاضای مشتریان برای مقادیر مختلف ω

2-5- ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی

برای ارزیابی عملکرد و استواری جواب‌های به‌دست آمده از مدل پیشنهادی تحت داده‌های اسمی، پارامترهای مدل 10 بار به‌طور تصادفی تولید می‌شوند و سپس عملکرد جواب‌های به‌دست آمده تحت هر بار تولید پارامترها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. برای نمونه اگر $\tilde{A} = (\underline{a}, \bar{a}, \alpha, \beta)_{LR}$ یک پارامتر نادقیق با تابع توزیع امکانی نوزنقه‌ای باشد، در هر بار اعداد تصادفی با تولید یک عدد تصادفی به صورت $(a^{real} \square [\underline{a} - \alpha, \bar{a} + \beta])$ (یعنی) متناظر (تولید می‌شوند. سپس جواب‌های به دست آمده مدل پیشنهادی (x^*, y^*) در یک مدل برنامه‌ریزی خطی جایگذاری می‌شود که فرم فشرده آن به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } f^{real} x^* + c^{real} y^* + \omega S^{dem} + \phi S^{cap} \\
 & \text{s.t. } Ay^* + S^{dem} \geq d^{real} \\
 & Bx^* = 0 \\
 & Dy^* - S^{cap} \leq E^{real} x^* \\
 & S^{dem}, S^{cap} \geq 0
 \end{aligned} \tag{43}$$

در مدل برنامه‌ریزی فوق، S^{cap} و S^{dem} تنها متغیرهای تصمیمی هستند که به ترتیب تخطی از محدودیت‌های شانس تقاضا و ظرفیت را تحت تولید تصادفی نشان می‌دهند. برای ارزیابی استواری بهینگی مدل پیشنهادی، نتایج این مدل با نتایج مدل اولیه (OFP) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه مدل اولیه قادر به تعیین حداقل سطح اطمینان محدودیت‌های شانس نیست، نتایج این مدل تحت سه سطح اطمینان مختلف (یعنی، 0/5، 0/75 و 1) به دست آورده می‌شوند. برای اینکه نشان دهیم کاهش تغییرپذیری امکانی می‌تواند تغییرپذیری تابع هدف را کاهش دهد، از جوابی که از طریق مدل پیشنهادی تحت سه مقدار مختلف برای λ (یعنی 0/1، 0/5 و 3) به دست آمده است را در مدل (43) قرار می‌دهیم تا مقدار تابع هدف را در این 10 بار به دست آوریم. سپس، مقدار متوسط و انحراف استاندارد مقادیر تابع هدف در این 10 بار محاسبه می‌شوند تا عملکرد مدل پیشنهادی را مورد ارزیابی قرار دهیم. نتایج در جدول 3 نشان داده شده است.

جدول 3 عملکرد مدل RFP و OFP تحت 10 بار آزمایش

شماره آزمایش	OFP $\rho, \varphi = 0.5$	OFP $\rho, \varphi = 0.75$	OFP $\rho, \varphi = 1$	RFP $\lambda = 0.1$	RFP $\lambda = 0.5$	RFP $\lambda = 3$
1	2088405	2068102	2119768	1986767	2137096	2057271
2	2109693	2126322	2120315	2069262	2045353	2143981
3	1984297	1996554	2135644	2030147	2040926	2042393
4	2070464	2152918	2057367	2081166	2083986	2133245
5	2053239	2071494	2019960	2114677	2057036	2099525
6	2046211	2020798	2040428	2045480	2118917	2091625
7	2172347	2106525	2073650	2032806	2151502	2122526
8	2070666	2095523	2062019	2013193	2096882	2108345
9	2021985	2072780	2169751	2064546	2116999	2143715
10	2029302	2021131	2043566	2117218	2068883	2120759
متوسط هزینه	2064661	2073215	2084247	2055526	2091758	2106339
انحراف استاندارد	49253	47060	46424	40017	36814	32820

همان طوری که در جدول 2 دیده می‌شود، مدل پیشنهادی با $\lambda = 3$ دارای حداقل انحرافات استاندارد و همزمان دارای یک میانگین قابل قبول در مقایسه با مدل‌های

دیگر است. روشن است که اگر تنها از مقدار میانگین هزینه‌های نادقیق در تابع هدف استفاده شود (یعنی $\lambda = 0$)، هزینه کل در مقایسه با مدل پیشنهادی پایین‌تر خواهد بود. با این حال، تغییرات هزینه کل تحت این 10 بار آزمایش افزایش پیدا می‌کند، به عبارت دیگر، استواری بهیگی جواب با در نظر گرفتن تنها مقادیر میانگین پارامترهای نادقیق در تابع هدف، تحت کنترل قرار نمی‌گیرد در حالی که رویکرد پیشنهادی استواری جواب را با توجه به ترجیحات تصمیم‌گیرندگان کنترل می‌کند. بیشتر مدیران تمایل دارند میانگین هزینه‌ها را برای یک طولانی مدت حداقل سازند، و در عین حال تغییرپذیری هزینه‌های فازی را برای کاهش خطرپذیری‌های کوتاه‌مدت تحت کنترل داشته باشند. همان گونه که در دو سطر آخر جدول 2 دیده می‌شود، مدل پیشنهادی با λ های مختلف دارای یک هزینه متوسط پایین و یک انحراف استاندارد مناسب‌تر نسبت به مدل اولیه است.

نتایج حاکی از برتری غالب مدل پیشنهادی بر مدل اولیه است. مدل پیشنهادی به طور مناسبی استواری مدل زنجیره تأمین حلقه بسته را کنترل می‌کند. روشن است که مدل پیشنهادی یک مدل خطرناپذیر است و انتظار می‌رود که متوسط عملکرد آن در مقایسه با مدل اولیه دارای کیفیت پایین‌تری باشد. باید ذکر کنیم که تصمیم‌گیرندگان می‌توانند مقدار این سه ضریب را با توجه به درجه خطرناپذیری و اهمیتی که به هزینه‌ها می‌دهند، تعیین کنند. با توجه به متفاوت بودن ترجیحات تصمیم‌گیرندگان و درجه مورد نیاز محافظه‌کاری، باید این نکته به عنوان یک فاکتور مهم برای تعیین مناسب‌ترین مقدار برای این ضرایب در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شوند.

6- نتیجه‌گیری

برای استفاده از منافع بازیافت محصولات مستعمل در زنجیره‌های تأمین رقابتی کنونی، تحقیق حاضر مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت را مورد بررسی قرار داده است. برای این منظور، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای طراحی مسئله زنجیره تأمین توسعه داده شده است که تصمیم‌های مکانیابی و تخصیص را تعیین می‌کند. برای مواجهه با عدم قطعیت، یک رویکرد برنامه‌ریزی جدید موسوم به برنامه‌ریزی فازی استوار پیشنهاد می‌شود.

برای تشریح رفتار مدل پیشنهادی، نتایج این مدل تحت ضرایب خطرپذیری‌های مختلف با مدل میانگین فازی مورد مقایسه قرار گرفت. تحلیل هزینه‌ها و سطح خطرپذیری مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که برای کاهش خطرپذیری ناشی از پارامترهای عدم قطعیت و بهبود سطح استواری باید هزینه‌های بیشتری را متحمل شویم. در واقع، یک بده‌وبستان بین هزینه‌ها و سطح خطرپذیری براساس ترجیحات تصمیم‌گیرندگان می‌تواند صورت گیرد. علاوه بر این با بررسی عملکرد هریک از مدل‌ها به این نتیجه رسیدیم که رویکرد میانگین فازی با توجه به عدم در نظر گرفتن تغییرپذیری هزینه‌ها نمی‌تواند رویکرد مناسبی برای بهینه‌سازی مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته باشد.

در تحقیقات آینده می‌توان مدل برنامه‌ریزی استوار پیشنهادی را در توسعه مدل‌های زنجیره تأمین حلقه بسته برای کنترل استواری بهیجگی و استواری شدنی تحت شرایط عدم قطعیت به کار برد. همچنین تعریف عبارات استواری بهیجگی و استواری شدنی در توابع هدف مختلف و سپس استفاده از رویکرد فازی برای بررسی تعامل بین آنها می‌تواند در تحقیقات آتی مورد توجه قرار گیرد. در نهایت می‌توان از روش‌های حل فراابتکاری برای حل مسائل با اندازه بزرگ استفاده کرد.

7- پی‌نوشت‌ها

1. Closed-loop supply chain
2. Stochastic models
3. Fuzzy set theory
4. Robust optimization
5. Credibility Constraint Programming (CCP)
6. Credibility measure
7. Original fuzzy programming
8. Robust fuzzy programming
9. Mean cost
10. Possibilistic variability
11. Unfulfillment demand

8- منابع

- [1] Devika K., Jafarian A., Nourbakhsh V. (2014) "Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison

- of metaheuristics hybridization techniques", *European Journal of Operational Research*, 235(3): 594-615.
- [2] Beamon B. M. (1999) Designing the green supply chain. *Logistics information management*, 12(4): 332-342.
- [3] Hatefi S. M., Jolai F. (2014) "Robust and reliable forward–reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions", *Applied Mathematical Modelling*, 38(9): 2630-2647.
- [4] Baghalian A., Rezapour S., Farahani R. Z. (2013) "Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case", *European Journal of Operational Research*, 227(1): 199-215.
- [5] Tabrizi B. H., Razmi J. (2013) "Introducing a mixed-integer non-linear fuzzy model for risk management in designing supply chain networks", *Journal of Manufacturing Systems*, 32(2): 295-307.
- [6] Tang C. S. (2006) "Perspectives in supply chain risk management", *International Journal of Production Economics*, 103(2): 451-488.
- [7] Torabi S. A., Hassini E. (2008) "An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning", *Fuzzy Sets and Systems*, 159(2): 193-214.
- [8] Mulvey J. M., Vanderbei R. J., Zenios S. A. (1995) "Robust optimization of large-scale systems", *Operations Research*, 43(2): 264-281.
- [9] Zhang W. G., Wang Y. L., Chen Z. P., Nie Z. K. (2007) "Possibilistic mean–variance models and efficient frontiers for portfolio selection problem", *Information Sciences*, 177(13): 2787-2801.
- [10] Keyvanshokoh E., Ryan S. M., Kabir E. (2016) "Hybrid robust and stochastic optimization for closed-loop supply chain network design using accelerated Benders decomposition", *European Journal of Operational Research*, 249(1): 76-92.
- [11] El-Sayed M., Afia, N., El-Kharbotly A. (2010) "A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk", *Computers & Industrial Engineering*, 58(3): 423-431.

- [12] Wang H. F., Hsu, H. W. (2010) "A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm", *Computers & Operations research*, 37(2): 376-389.
- [13] Üster H., Easwaran G., Akçali E., Cetinkaya S. (2007) "Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model", *Naval Research Logistics (NRL)*, 54(8): 890-907.
- [14] Ko H. J., Evans G. W. (2007) "A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs", *Computers & Operations Research*, 34(2): 346-366.
- [15] Ramezani M., Bashiri M., Tavakkoli-Moghaddam R. (2013) "A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level", *Applied Mathematical Modelling*, 37(1): 328-344.
- [16] Tehrani M. S., Hassanpour H., Ramezani S. (2015) "Cost and carbon dioxide two objective optimization model in closed loop supply chain", *Journal of Management Researches in Iran*.19: 169-189.(in Persian).
- [17] Zeballos L. J., Méndez C. A., Barbosa-Povoa A. P., Novais A. Q. (2014) "Multi-period design and planning of closed-loop supply chains with uncertain supply and demand", *Computers & Chemical Engineering*, 66: 151-164.
- [18] Pishvae M. S., Torabi S. A. (2010) "A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Fuzzy Sets and Systems*, 161(20): 2668-2683.
- [19] Azar A., Hassanpour H., Rabieh M., Modarresyazdi M., Fetanatfard M. (2011) "Fuzzy-robust multi objective sourcing mathematical model in supply chain risk management of Iran Khodro", *Journal of Management Researches in Iran*.15: 51-76, (in Persian).
- [20] Pishvae M. S., Rabbani M., Torabi S. A. (2011) "A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Applied Mathematical Modelling*, 35(2): 637-649.

- [21] Pishvae M. S., Razmi J., Torabi S. A. (2012) "Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach", *Fuzzy Sets and Systems*, 206: 1-20.
- [22] Snyder L. V. (2006) "Facility location under uncertainty: a review", *IIE Transactions*, 38(7): 547-564.
- [23] Ramezani M., Bashiri M., Tavakkoli-Moghaddam R. (2013) "A robust design for a closed-loop supply chain network under an uncertain environment", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(5-8): 825-843.
- [24] Pan F., Nagi R. (2010) "Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing", *Computers & Operations Research*, 37(4): 668-683.
- [25] Zhang W. G., Xiao W. L. (2009) "On weighted lower and upper possibilistic means and variances of fuzzy numbers and its application in decision", *Knowledge and Information Systems*, 18(3): 311-330.
- [26] Zhang P., Zhang W. G. (2014) "Multiperiod mean absolute deviation fuzzy portfolio selection model with risk control and cardinality constraints", *Fuzzy Sets and Systems*, 255: 74-91.
- [27] Klibi W., Martel A. (2013) "The design of robust value-creating supply chain networks", *OR Spectrum*, 35(4): 867-903.
- [28] Govindan K., Fattahi M. (2015) "Investigating risk and robustness measures for supply chain network design under demand uncertainty: A case study of glass supply chain", *International Journal of Production Economics*.
- [29] Carlsson C., Fullér R. (2001) "On possibilistic mean value and variance of fuzzy numbers", *Fuzzy sets and Systems*, 122(2): 315-326.
- [30] Zadeh L. A. (1978) "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility", *Fuzzy Sets and Systems*, 1(1): 3-28.
- [31] Dubois D., Prade H. (1980) "Systems of linear fuzzy constraints", *Fuzzy Sets and Systems*, 3(1): 37-48.
- [32] Inuiguchi M., Ichihashi H., Tanaka H. (1990) "Fuzzy programming: A survey of recent developments", In *Stochastic Versus Fuzzy Approaches to Multi*

Objective Mathematical Programming Under Uncertainty (pp. 45-68), Springer Netherlands.

- [33] Liu B., Liu Y. K. (2002) "Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models", *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 10(4): 445-450.
- [34] Liu B. (2004) *Uncertainty theory: An introduction to its axiomatic foundations*.
- [35] Liu B., Iwamura K. (1998) "Chance constrained programming with fuzzy parameters", *Fuzzy Sets and Systems*, 94(2): 227-237.