

یک مدل مکان‌یابی دو هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت

وحید برادران،* زهرا صفری**

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۲/۱۶ - تاریخ پذیرش: ۹۷/۱/۱۴

چکیده

افزایش توجه به مسائل زیست محیطی اهمیت مسئله طراحی زنجیره‌های تأمین حلقه بسته را که شامل تولید و بازیافت و امحاء ضایعات است، دو چندان کرده است. مسئله طراحی یکپارچه شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته به عنوان یکی از مسائل مهم در مدیریت زنجیره‌های تأمین شامل تعیین هم‌زمان مکان و تعداد تسهیلات مورد نیاز (تولید، جمع‌آوری، بازیافت و انهدام) در زنجیره تأمین رو به جلو و معکوس، موجودی هر تسهیل و کمیت جریان ارسالی بین آن‌ها می‌باشد. در این مقاله، زنجیره تأمین حلقه بسته‌ای با محصولات متنوع (چند محصولی) مطالعه شده و یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی دو هدفه (کاهش هزینه‌های کل زنجیره و میزان آلاینده‌های زیست محیطی) به منظور تعیین متغیرهای راهبردی مسئله شامل مکان‌یابی مراکز تولید، جمع‌آوری و انهدام محصولات و متغیرهای عملیاتی در دوره‌های مختلف برنامه‌ریزی (چند دوره‌ای) شامل جریان‌های بین تسهیلات به تفکیک وسایل نقلیه مختلف و موجودی‌های هر تسهیل ارائه شده است. به دلیل وجود عدم قطعیت در پارمترهایی مانند تقاضا و میزان کالای برگشتی از مشتریان، مدل پیشنهادی در شرایط عدم قطعیت (بهینه‌سازی استوار) توسعه یافته است. ضمن بررسی اعتبارسنجی مدل، کاربرد مدل پیشنهادی برای طراحی شبکه تأمین و بازیافت بطری‌های شیشه‌ای با هدف کاهش هزینه‌های احداث مراکز و حمل و نقل‌ها برای محصولات مختلف و در کل دوره برنامه‌ریزی به اضافه کمینه‌کردن کل گاز دی‌اکسید کربن تولیدی بررسی شده است. تحلیل حساسیت مدل بهینه‌سازی استوار نیز در پایان انجام شده است.

واژگان کلیدی: طراحی شبکه زنجیره تأمین، زنجیره تأمین حلقه بسته، بهینه‌سازی استوار، زنجیره تأمین سبز.

* استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، ایران (نویسنده

مسئول) V_Baradaran@iau-tnb.ac.ir

** کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، ایران.

مقدمه

طراحی شبکه زنجیره تأمین^۱ از جمله مهم‌ترین تصمیمات مدیریت زنجیره تأمین می‌باشد که کارایی و اثربخشی زنجیره را برای سال‌های زیادی تحت تاثیر قرار می‌دهد (Melo et al., 2009). مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین مانند مکان‌یابی تسهیلات از تصمیمات راهبردی محسوب می‌شود و ادغام آن‌ها با مسائل عملیاتی مانند نحوه توزیع و انتخاب روش حمل و نقل در یک مسئله یکپارچه از زیربهنیگی‌های جداگانه جلوگیری می‌کند و بهتر است این تصمیمات به صورت یکپارچه در طراحی شبکه لحاظ شوند (Baghalian et al, 2013)؛ (Ramezani et al. 2013a). یکی از مضامین یکپارچگی در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین، طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته است که در آن شبکه‌های زنجیره تأمین مستقیم و معکوس با یکدیگر ادغام شده‌اند (Amin et al., 2017). اجزاء زنجیره تأمین مستقیم را تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و مشتریان تشکیل می‌دهند. در زنجیره مستقیم، مواد اولیه از تأمین‌کننده به تولیدکننده و سپس به مشتری بر اساس میزان نیاز آن‌ها تحویل داده می‌شود. انتخاب تأمین‌کننده مناسب با توجه به کیفیت و هزینه متفاوت محصولات آن‌ها، تعیین مکان‌های احداث مراکز تولیدی، مقدارهای تولید، نگهداری و جریان‌های مواد اولیه و محصولات تولیدی (چندمحصولی) در دوره‌های مختلف (چند دوره‌ای) در شبکه از جمله تصمیمات راهبردی و عملیاتی زنجیره‌های تأمین مستقیم می‌باشد. اما اجزای زنجیره تأمین معکوس را مشتریان، مراکز جمع‌آوری، بازیافت و انهدام محصولات مستعمل تشکیل می‌دهد. در این زنجیره، محصولات بازگشتی از مشتری پس از جمع‌آوری، بازرسی شده و برای بازیافت و انهدام به مراکز مربوطه ارسال می‌گردد. تعیین مکان احداث مراکز بازیافت (مراکز تولید می‌توانند فعالیت بازیافت را نیز انجام دهند) و انهدام به همراه متغیرهای عملیاتی مانند جریان مواد بازگشتی از متغیرهای تصمیم این نوع شبکه‌ها می‌باشد. مسئله یکپارچگی در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته، تعیین همزمان تصمیمات راهبردی و عملیاتی دو زنجیره مستقیم و معکوس می‌باشد.

1. Supply Chain Network Design (SCND)

در سال‌های اخیر همزمان با افزایش توجه بیشتر به مسائل زیست محیطی و قوانین دولتی، افزایش مسئولیت‌های اجتماعی و کاهش منابع طبیعی، توجه به مسئله بازیافت و انهدام محصولات در زنجیره‌های تأمین افزایش یافته که نتیجه آن اهمیت طراحی زنجیره‌های تأمین حلقه بسته است. (Farrokh et al., 2017) کاهش هزینه‌های شبکه و کاهش آلاینده‌های زیست محیطی در کنار اهدافی مانند برآوردن تقاضای مشتریان و پاسخ‌گویی به نیاز آن‌ها در زمان و با کیفیت مناسب می‌تواند از اهداف تصمیمات مسئله طراحی باشد (Amaro and Barbosa-Póvoa, 2009). تقریباً در بیشتر رویکردهای حل مسئله مذکور از مدل‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود که در آنها تابع (توابع) هدفی به منظور تعیین تصمیمات راهبردی و عملیاتی بهینه می‌شوند.

چالش مهم در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین، عدم قطعیت موجود در محیط ناشناخته‌ی کسب و کارهای امروزی است. در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در طراحی زنجیره‌های تأمین حلقه بسته نتایج حاصل را به مسئله دنیای واقع نزدیکتر خواهد کرد. (Farrokh et al., 2017). منظور از عدم قطعیت، عدم اطلاع دقیق از پارامترهای موثر بر طراحی مانند تقاضا، هزینه‌های تولید، هزینه‌های حمل و نقل و ... می‌باشد. به این منظور، استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی (Ramezani et al, 2013a)؛ (Pishvae et al., 2009) ، برنامه‌ریزی امکان (Vahdani et al., 2012)؛ (Pishvae and Torabi, 2010) ، فازی و بهینه‌سازی استوار (Keyvanshokoo et al., 2016) برای برخورد با این نوع عدم قطعیت‌ها پیشنهاد می‌شود. سوزانا^۱ (2013) ، گویندان و همکاران^۲ (2015) و گویندان و سلیمانی^۳ (2017) نمونه‌ای از مقالات مروری هستند که ادبیات مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته را بررسی کرده‌اند. جدول ۱، بخشی از پژوهش‌های مختلف انجام شده پیرامون مسئله طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته که مرتبط با مسئله این مقاله است را به طور خلاصه نشان می‌دهد.

-
1. Souza
 2. Govindan et al.
 3. Govindan & Soleimani

جدول ۱. مطالعات پیشین طراحی زنجیره‌های تأمین حلقه بسته

روش حل	رویکرد مدل سازی	اهداف			ویژگی‌های مدل								سال	منابع	
		تأمین	هزینه	پایداری	پارامترها			جریان کالا			دوره زمانی				
					استوار	فازی	احتمالی	قطعی	مصرفی	تولیدی	مصرفی	دوره‌ای			دوره‌ای
روش خطی سازی لاگرانژین و حل با CPLEX	MILP	*							*		*		2001	Fleischmann et al.	
حل دقیق	MILP	*							*		*		2006	Salema et al.	
الگوریتم مبتنی بر لاگرانژین	MIP	*							*		*		2007	Lu & Bostel	
حل دقیق بر مبنای روش تجزیه		*							*	*		*	2007	Üster et al.	
ابتکار بر مبنای الگوریتم ژنتیک	MINLP	*							*	*		*	2007	Ko, & Evans	
تکنیک شاخه و کران و حل با CPLEX 8.1	MILP	*						*		*		*	2007	Salema et al.	
الگوریتم ژنتیک	MIP	*							*	*		*	2008	Min & Ko	
الگوریتم جستجوی ممنوعه و سیمپلکس شبکه	MIP	*							*		*	*	2008	Lee & Dong	
الگوریتم شبیه- سازی تیرید	MINLP	*						*		*		*	2009	Lee & Dong	
ژنتیک بر مبنای درخت کوشا	ILP	*							*		*	*	2010	Wang & Hsu	
الگوریتم ممتیک بر مبنای روش اولویت دهی و وزن دهی برای نقاط ناچیره	MINLP	*		*					*		*	*	a2010	Pishvae et al.	
رویکرد حل	MOP	*					*			*	*		2010	Pishvae et al.	

فازی وحل توسط LINGO	MILP														
حل با ILOGCPLEX	MILP	*			*					*		*	2011	Pishvae et al.	
الگوریتم ژنتیک	MINLP							*	*			*	2012	Zhou et al.	
الگوریتم آزاد سازی سناریو و حل با CPLEX	MILP		*		*				*			*	b2013	Ramezani et al.	
روش جمع وزنی و CPLEX	MILP	*					*		*			*	2013	Amin & Zhang	
GAMS/BARON	MILP		*	*		*			*		*		2013	Özkır & Başlıgil	
حل دقیق	MILP	*						*		*	*		a2014	Ramezani et al.	
الگوریتم مبتنی بر سناریو و حل با CPLEX 12.2	MILP	*					*		*		*		2014	Zeballos et al.	
رویکرد حل فازی و CPLEX	FMILP		*	*		*			*		*		b2014	Ramezani et al.	
روش برنامه ریزی خطی فازی، حل با CPLEX 9.0	SPMILP	*				*	*		*			*	2015	Subulan et al.	
الگوریتم ترکیبی GA و PSO	MILP		*					*	*		*		2015	Soleimani & Kannan	
حل دقیق /GAMS	MILP		*			*				*		*	2015	Fallah et al.	
حل دقیق /GAMS	MILP		*					*		*		*	2015	Rezapour et al.	
حل دقیق	MILP	*			*				*			*	2016	Meysam et al.	
روش ترکیبی استوار-احتمالی	MILP	*			*		*			*	*		2016	Keyvanshok ooh et al.	

حل دقیق- ϵ - constraint	MILP	*	*		*				*		*		2016	Cardoso et al.
حل دقیق- ϵ - constraint	MILP	*			*	*				*		*	2016	Talaei et al.
حل دقیق /GAMS	MINLP		*					*		*	*		2017	Guar et al.
حل دقیق /GAMS	MILP		*				*		*		*		2017	Amin et al.
حل دقیق	MILP			*			*		*		*		2017	Mohammed et al.
الگوریتم دقیق ترکیبی استوار - فازی	MILP	*				*	*			*	*		2017	Farrokh et al.
حل دقیق /LINGO	MILP	*		*	*				*		*		-	مدل این تحقیق

در کنار ادبیات اشاره شده در جدول ۱ پژوهش‌های دیگری نیز اخیراً پیرامون طراحی زنجیره‌های تأمین حلقه بسته انجام شده (مانند: ما و همکاران^۱، 2016؛ زُحال و سلیمانی^۲، 2016؛ مهاجری و فلاح^۳، 2016؛ دوتا و همکاران^۴، 2016؛ امین و باکی^۵، 2017؛ مشتق و تقی‌زاده^۶، 2017؛ سرکار و همکاران^۷، (2017 اما اکثر مقالات مسئله را به صورت تک دوره‌ای (برنامه‌ریزی برای یک دوره) و تک محصولی (تولید و بازیافت یک محصول) و در شرایط قطعی (پارامترهای قطعی) مدل کرده‌اند و مقالاتی هم که تحت شرایط عدم قطعیت مسئله را مدل کرده‌اند، اکثراً از برنامه‌ریزی احتمالی و برنامه‌ریزی فازی برای مواجهه با عدم قطعیت استفاده کرده‌اند. در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای موثر بر متغیرهای طراحی (تصمیمات راهبردی و عملیاتی) به صورت برنامه‌ریزی احتمالی، نیاز به در اختیار داشتن

1. Ma et al.
2. Zohal and Soleimani
3. Mohajeri et al.
4. Dutta et al.
5. Amin and Baki
6. Moshtagh and Taleizadeh
7. Sarkar et al.

داده‌های تاریخی و مورد اطمینانی دارد که در اغلب موارد غیرقابل دستیابی‌اند. محدودیت مدل‌های ارائه شده مبتنی بر برنامه‌ریزی امکانی و استوار نیز لحاظ کردن تنها پارامترهای تقاضا و عرضه به عنوان پارامترهای غیرقطعی است که نیاز به توسعه مدل‌هایی با غیرقطعی بودن سایر پارامترهای مدل ضروری می‌باشد. در مدل‌های موجود یکپارچه طراحی شبکه، مکان‌یابی مراکز در کنار متغیرهای جریان قرار گرفته‌اند و لحاظ کردن متغیرهای موجودی در مدل یکپارچه از خلاءهای تحقیقاتی می‌باشد. نقد دیگر پیشینه تحقیق، طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین به صورت تک‌هدفه می‌باشد که در آن‌ها تنها متغیرهای تصمیم راهبردی (مانند طراحی و ظرفیت) با متغیرهای تصمیم عملیاتی (مانند تصمیمات برنامه‌ریزی تولید و موجودی و جریان‌ها در شبکه) جدا در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به خلاءهای تحقیقاتی در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، مسئله و اهداف این مقاله، ارائه یک مدل برنامه‌ریزی دو هدفه تحت شرایط عدم قطعیت (استوار) برای طراحی یکپارچه شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته که یکی از توابع هدف آن کمینه کردن کل هزینه زنجیره تأمین و دیگری کمینه کردن آلاینده‌گی زیست محیطی حاصل از میزان انتشار گاز CO_2 حاصل از تولید و توزیع در شبکه که در آن تأمین‌کنندگان دارای کیفیت‌های متفاوتی می‌باشند با فرض عدم قطعیت تقاضا، طرح‌ریزی شده است.

در بخش بعدی مروری مختصر بر مبنای نظری بهینه‌سازی چندهدفه و استوار شده است. در بخش سوم ضمن تعریف دقیق‌تر مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته با اهداف چندگانه، چند دوره‌ای، چند محصولی، مدل ریاضی مسئله در دو حالت قطعی و استوار ارائه شده است. اعتبارسنجی مدل و تحلیل حساسیت آن نسبت به تغییر در پارامترها در بخش چهارم بیان شده است. بخش پایانی به جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها و تحقیقات اختصاص یافته است.

مبانی نظری

بهینه‌سازی چندهدفه

مسائل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه (MODM) توسعه مسائل تک هدفه می‌باشد که در آنها متغیرهای تصمیم $(X=x_1, x_2, \dots, x_n)$ در فضای موجه مسئله (فضای S) به نحوی تعیین می‌شوند که بتواند به طور همزمان توابع ریاضی هدف $(f_j(x))$ را بهینه کند. فرم کلی این مسائل به فرم زیر است.

$$\text{Optimize (Min or Max) } F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)\} \quad (1)$$

subject to:

$$X \in S$$

در بسیاری از مسائل چندهدفه امکان تعیین مقدار بهینه‌ای برای متغیرهای تصمیم به نحوی که تمام اهداف را بهینه کند، غیر ممکن است. برای این مسائل مجموعه‌ای راه‌حل تحت عنوان راه‌حل‌های غیرغالب تعیین می‌شود که تصمیم‌گیرنده می‌تواند از بین آنها بر اساس اهمیت اهداف راه‌حل مناسب را انتخاب نماید $\hat{X} \in S$. یک راه‌حل غیر غالب مسئله چندهدفه با اهداف کمینه می‌باشد اگر در فضای جواب موجه راه‌حل $X \in S$ یافت نشود که $f(X) \leq f(\hat{X})$ (Bekmann and Kunzi, 1996). روش‌هایی دقیق مانند L- P متریک و ε -constraint و فراابتکاری مانند NSGA II برای یافتن راه‌حل‌های غیرغالب توسعه داده شده است.

رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو

رویکرد دیگری که در سال‌های اخیر برای مقابله با عدم قطعیت داده‌ها و یا وجود اختلالات^۱ در داده‌های ورودی به مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی توسعه داده شده، بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو است. در این روش که توسط مالوی^۲ و همکاران (۲۰۰۵) اولین بار مطرح شد، پارامترهای مدل به صورت مجموعه‌ای مقادیر با احتمال مشخص تحت عنوان سناریو برای

1. Noisy Data
2. Mulvey

بیان عدم قطعیت و اختشاشات داده‌های مربوط به پارامترها استفاده می‌شود. مدل برنامه‌ریزی خطی زیر را در نظر بگیرید که در آن دو دسته محدودیت وجود دارد: یکی با پارامترهای قطعی (محدودیت‌های ساختاری^۱ مدل، $Ax = b$) (و دیگری با پارامترهای غیرقطعی (محدودیت‌های کنترلی^۲ مدل، $Bx + Cy = e$) بردار x مجموعه متغیرهای تصمیم مسئله تعریف می‌شوند که ضرایب آن‌ها در محدودیت‌ها قطعی‌اند و بردار y مجموعه متغیرهای تصمیم با ضرایب غیرقطعی تحت عنوان متغیرهای کنترل^۳ تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Min } \xi &= c^T x + d^T y \\ \text{s.t.} \\ Ax &= b \\ Bx + Cy &= e \\ x, y &\geq 0; x \in R^{n_1}, y \in R^{n_2} \end{aligned} \quad (2)$$

به منظور لحاظ کردن عدم قطعیت پارامترها (ضرایب) متغیرهای کنترلی در مدل (۲)، مجموعه‌ای سناریو $\Omega = \{1, 2, \dots, S\}$ تعریف می‌شود. به ازای یک سناریو مانند S مجموعه مقادیر قطعی متناسب به ضرایب متغیرهای کنترلی $\{d_s, B_s, C_s, e_s\}$ تعیین می‌شود که این مجموعه دارای احتمال رخداد مشخص p_s است به طوری که $\sum_{s \in \Omega} p_s = 1$ یافتن یک جواب برای مدل (۲) که به ازای تمام سناریوها هم‌وجه و بهینه باشد، دور از انتظار است (Mulvey et al., 2005). در این صورت مدل بهینه‌سازی استوار به دنبال یافتن راه‌حل استوار^۴ است که برای تمام مقادیر سناریوها نزدیک بهینه باشد و جواب با احتمال بالا موجه نیز باشد (Leung et al, 2007) و یا به عبارت دیگر جوابی که تحت همه سناریوها نزدیک بهینه باقی بماند (یحیی‌زاده اندواری و همکاران، ۱۳۹۵). مجموعه $\{y_1, y_2, \dots, y_s\}$ از متغیرهای کنترلی به ازای سناریوهای $s \in \Omega$ تعریف می‌شود و

-
1. Structural Constraints
 2. Control Constraints
 3. Control Variables
 4. Robust Solution

مجموعه $\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s\}$ مجموعه‌ای از بردار خطاهاست که مقدار ناوجهی^۱ در محدودیت‌های کنترل تحت سناریوها را اندازه می‌گیرد. $(\delta_s = e_s - (B_s x + C_s y_s))$. مالوی و همکاران (۲۰۰۵) مدل ریاضی زیر را برای یافتن راه‌حل استوار مبتنی بر سناریو پیشنهاد دادند.

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sigma(x, y_1, y_1, \dots, y_s) + \omega \rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s) \\ & \text{s.t.} \\ & Ax = b \\ & B_s x + C_s y_s + \delta_s = e_s \quad \forall s \in \Omega \\ & x, y_s \geq 0; x \in R^{n_1}, y \in R^{n_2} \quad \forall s \in \Omega \end{aligned} \quad (3)$$

در تابع هدف مدل فوق، دو بخش قرار گرفته که یکی بیانگر مقدار بهینگی و دیگری مقدار انحراف از موجه بودن جواب بهینه استوار است. در واقع تابع هدف (۳) به دنبال یافتن جوابی است تا تبادل^۲ بین بهینگی و موجه بودن برقرار نماید. ضریب ω مقدار تبادل بین بهینگی و موجه بودن است.

یک متغیر تصادفی است زیرا به ازای هر سناریو $s \in \Omega$ ، متغیر ξ_s مقدار $\xi_s = c^T x + d^T y$ را با احتمال p_s می‌گیرد. یک رویکرد در مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی احتمالی قرار دادن میانگین (امید ریاضی) و واریانس تابع هدف (ξ_s) در تابع هدف مدل جدید است. لذا می‌توان تابع (۴) را به عنوان مقدار بهینگی جواب استوار در مدل (۳) قرار داد.

$$\sigma(x, y_1, y_1, \dots, y_s) = \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s (\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'})^2 \quad (4)$$

در رابطه (۴)، $\sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s$ معرف امید ریاضی تابع هدف مدل (۲)، متغیر تصادفی ξ_s ، و $\sum_{s \in \Omega} p_s (\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'})^2$ بیانگر واریانس متغیر تصادفی ξ_s است. ضریب ثابت λ نیز تبادل بین میانگین و واریانس تابع هدف ξ_s را بیان می‌کند.

1. Infeasibility
2. Tradeoff

عبارت $\rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s)$ معیاری برای اندازه‌گیری جریمه انحراف از موجه بودن است که به منظور جریمه کردن نقض و تخطی از محدودیت‌های کنترل با توجه به برخی از سناریوها مدنظر قرار می‌گیرد. مقدار آن را می‌توان واریانس مقادیرهای انحراف از موجه بودن زمانی که مثبت و منفی بودن انحراف مهم باشد به صورت $\sum_{s \in \Omega} p_s \delta_s^T \delta_s$ تعریف کرد و یا از میانگین قدرمطلق انحرافات $\sum_{s \in \Omega} p_s |\delta_s|$ استفاده کرد. اما زمانی که تنها انحرافات مثبت مهم باشد، استفاده از رابطه $\sum_{s \in \Omega} p_s \max\{0, \delta_s\}$ و یا $\sum_{s \in \Omega} p_s \delta_s$ توصیه می‌شود (Mulvey et al., 2005)؛ (Leung et al., 2007) اگر در رابطه (۳) مقدار ω صفر انتخاب شود، مدل تنها تابع هدف (۴) را بهینه خواهد کرد و ممکن است جواب حاصله موجه نباشد. در صورت انتخاب مقادیر بزرگتر، انحراف از بهینگی ممکن است بیشتر شود (یحیی‌زاده اندواری و همکاران، ۱۳۹۵).

با توجه به غیرخطی بودن رابطه (۴)، یو و لی^۱ (2000) از تابع قدرمطلق به جای توان دو استفاده کردند و روابط (۵) (را برای خطی کردن آن ارائه دادند. یعنی مجموعه روابط (۵) به جای رابطه (۴) در مدل قرار می‌گیرد.

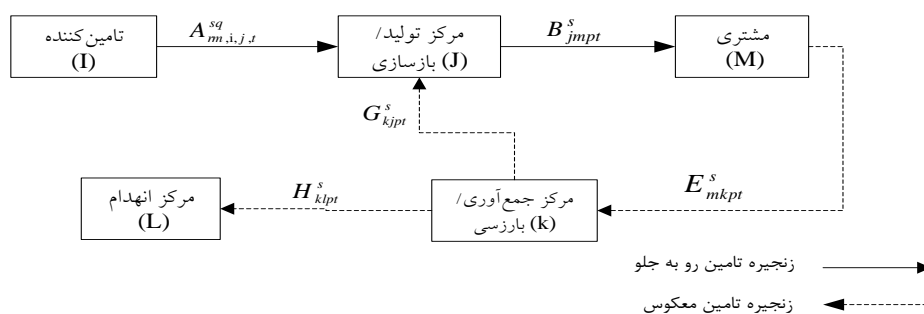
$$\begin{aligned} \min \sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) &= \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s \left[(\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'}) + 2\theta_s \right] \\ \text{s.t.} \quad \xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'} + \theta_s &\geq 0 \quad \forall s \in \Omega \\ \theta_s &\geq 0 \quad \forall s \in \Omega \end{aligned} \quad (5)$$

روش پژوهش

بیان مسئله

یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با دو جریان رو به جلو و بازگشتی را در نظر بگیرید که در آن مکان مشتریان و تأمین‌کنندگان با سطوح متفاوت کیفیت مواد اولیه در آن ثابت و معین است. در جریان رو به جلو مواد اولیه از تأمین‌کننده تهیه می‌شود و به مراکز تولید انتقال می‌یابند و محصولات (محصولات متنوع) در مراکز تولید ساخته شده و بر اساس میزان

تقاضای مشتریان که غیرقطعی است به آن‌ها تحویل داده می‌شوند. در جریان بازگشتی، محصولات بازگشتی از مشتریان جمع‌آوری شده و پس از بازرسی در مراکز جمع‌آوری/بازرسی، محصولات قابل بازیافت به مرکز تولید/بازسازی جهت بازیافت و تولید مجدد و محصولات غیر قابل بازیافت به مرکز انهدام منتقل می‌شوند. نمونه‌ای از این شبکه‌ها، شبکه توزیع و جمع‌آوری محصولات باطری (Gaur et al., 2017)، زنجیره تولید و تأمین شیشه و یا تیر خودرو (Amin et al., 2017) است. شکل ۱ پیکربندی شبکه پیشنهادی و جریان محصولات بین اجزاء مختلف در زنجیره تأمین حلقه بسته را نشان می‌دهد.



شکل ۱. پیکربندی شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه

در مرحله طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته، مکان‌هایی برای احداث مراکز جمع‌آوری، بازرسی، تولید، بازسازی و انهدام با ظرفیت‌های محدود در نظر گرفته شده است. در صورتیکه قرار باشد در این زنجیره محصولات متنوع (چندمحصولی) در چندین دوره (چند دوره‌ای) تولید و به مشتریان عرضه شود، انتخاب مراکز تولید، جمع‌آوری/بازرسی، تولید و انهدام از میان مکان‌ها بالقوه، تعیین مقدار خرید از هر تأمین‌کننده با کیفیت‌های متفاوت، مقدار حمل از مراکز تولید به مشتریان، مقدار حمل کالاهای بازگشتی به تفکیک نوع وسیله حمل در هر دوره به همراه تعیین مقدار تقاضاهای برآورده نشده و میزان موجودی در مراکز در هر دوره از جمله تصمیمات راهبردی و عملیاتی است که باید در یک مدل یکپارچه با هدف کاهش هزینه‌ها و میزان آلاینده‌های زیست محیطی تعیین شوند. بر این اساس هدف در این مقاله،

ارائه یک مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین یکپارچه با مفروضات زیر طرح‌ریزی شده است.

- مدل ارائه شده به صورت چند محصولی و چند دوره‌ای می‌باشد و تمامی محصولات بازگشتی از مشتریان باید جمع‌آوری شوند.
- کمبود مجاز و برای تقاضاهای برآورده نشده جریمه در نظر گرفته می‌شود.
- مکان تأمین‌کنندگان و مشتریان ثابت و از پیش تعیین شده است و مکان‌های بالقوه جمع‌آوری / بازرسی، تولید/بازسازی و انهدام معلوم می‌باشد. هر مرکزی (تولید، جمع‌آوری و انهدام) که باز می‌شود، دارای ظرفیت محدود است.
- میزان محصولات بازگشتی و نرخ انهدام مشخص می‌باشد.
- هزینه و میزان آلایندگی حاصل از حمل و نقل‌ها بستگی به فاصله حمل و نرخ هزینه و تولید آلایندگی وسایل نقلیه انتخابی است. همچنین تنها برای مرکز تولید محصولات زنجیره، هزینه نگهداری در نظر گرفته می‌شود.
- تأمین‌کنندگان از لحاظ کیفیت مواد اولیه و هزینه‌ها با هم متفاوت می‌باشند.

تعریف پارامترها و متغیرهای مسئله

نمادهای مورد استفاده برای مدل‌سازی به همراه پارامترهای مدل در جدول ۱ معرفی شده‌اند. متغیرهای تصمیم مسئله نیز در جدول ۲ معرفی شده‌اند.

جدول ۱. نمادها و پارامترهای مدل

نماد	تعریف نمادها
I	مجموعه مکان‌های ثابت تأمین‌کنندگان ($i = 1, \dots, I$)
J	مجموعه مکان‌های بالقوه تولید/بازسازی ($j = 1, \dots, J$)
K	مجموعه مکان‌های بالقوه جمع‌آوری/بازرسی ($k = 1, \dots, K$)
M	مجموعه مکان‌های ثابت مناطق مشتری ($m = 1, \dots, M$)
L	مجموعه مکان‌های بالقوه انهدام ($l = 1, \dots, L$)
T	مجموعه دوره‌های زمانی ($t = 1, \dots, T$)

نماد	تعریف پارامترها
P	مجموعه محصولات تولیدی در شبکه ($p=1, \dots, P$)
RM	مجموعه مواد اولیه مورد استفاده برای تولید محصولات ($rm=1, \dots, RM$)
V	مجموعه حالت‌های مختلف حمل و نقل، انواع وسایل نقلیه مورد استفاده، ($v=1, \dots, V$)
Q	مجموعه کیفیت مواد اولیه ($q=1, \dots, Q$)
$d_{m,p,t}$	تقاضای مشتری m برای محصول تولید/بازسازی شده نوع p در دوره t
$r_{m,p,t}$	میزان محصولات بازگشتی محصول نوع p از مشتری m در دوره t
α	متوسط کسر انهدام (درصدی از محصولات جمع‌آوری شده که به مراکز انهدام ارسال می‌شوند)
$wei_{m,p}$	میزان ماده اولیه نوع rm استفاده شده برای تولید یک واحد محصول نوع p
$we_{m,p}$	میزان ماده اولیه نوع rm به دست آمده از بازیافت هر واحد محصول نوع p
cam_j	ظرفیت نگهداری مواد اولیه در مرکز تولید/بازسازی z در یک دوره
cap_j	ظرفیت نگهداری محصولات نهایی در مرکز تولید/بازسازی z در یک دوره
cp_j	ظرفیت تولید در یک دوره در مرکز تولید/بازسازی z در یک دوره
cap_k	ظرفیت نگهداری محصولات بازگشتی در مرکز جمع‌آوری/بازرسی k در یک دوره
cap_l	ظرفیت نگهداری محصولات انهدامی در مرکز انهدام l در یک دوره
op_j	هزینه ثابت بازگشایی مرکز تولید/بازسازی z
oc_k	هزینه ثابت بازگشایی مرکز جمع‌آوری/بازرسی k
od_l	هزینه ثابت بازگشایی مرکز انهدام l
$c_{m,i,j,t}^{v,q}$	هزینه خرید و انتقال یک واحد ماده اولیه rm با کیفیت q از تامین‌کننده q به مرکز تولید/بازسازی z در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v
$c_{j,m,p,t}^v$	هزینه حمل یک واحد محصول نوع p از مرکز تولید/بازسازی z به مشتری m در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v
$c_{m,k,p,t}^v$	هزینه حمل یک واحد محصول بازگشتی نوع p از منطقه مشتری m به مرکز جمع‌آوری/بازرسی k در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v
$c_{k,j,p,t}^v$	هزینه حمل یک واحد محصول قابل بازیافت نوع p از مرکز جمع‌آوری/بازرسی k به مرکز تولید/بازسازی z در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v
$c_{k,l,p,t}^v$	هزینه حمل یک واحد محصول انهدامی نوع p از مرکز جمع‌آوری k به مرکز انهدام l در دوره t با وسیله

حمل و نقل نوع v	
هزینه تولید یک واحد محصول نوع p در مرکز تولید/بازسازی j از مواد اولیه در دوره t	$pcm_{j,p,t}$
هزینه تولید یک واحد محصول نوع p در مرکز تولید/بازسازی j از محصولات بازگشتی در دوره t	$pcr_{j,p,t}$
هزینه جریمه یک واحد تقاضای برآورده نشده محصول نوع p برای مشتری m در دوره t	$pen_{m,p,t}$
هزینه نگهداری یک واحد محصول نوع p در مرکز تولید/بازسازی j در دوره t	$ci_{j,p,t}$
انتشار گاز CO_2 حاصل از حمل یک واحد ماده اولیه نوع rm از تامین کننده i به مرکز تولید j در دوره t با حمل و نقل نوع v	$n_{i,j,t}^v$
انتشار گاز CO_2 حاصل از حمل هر واحد محصول نوع p از مرکز تولید/بازسازی j به مشتری m در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v	$o_{j,m,t}^v$
انتشار گاز CO_2 حاصل از حمل هر واحد محصول نوع p منتقل شده از منطقه مشتری m به مرکز جمع-آوری/بازرسی k در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v	$u_{m,k,t}^v$
انتشار گاز CO_2 حاصل از حمل یک واحد محصول نوع p منتقل شده از مرکز جمع‌آوری k به مرکز تولید/بازسازی j در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v	$v_{k,j,t}^v$
انتشار گاز CO_2 حاصل از حمل یک واحد محصول نوع p منتقل شده از مرکز جمع‌آوری/بازرسی k به مرکز انهدام l در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v	$f_{k,l,t}^v$
انتشار گاز CO_2 حاصل از تولید یک واحد محصول نوع p در مرکز تولید/بازسازی j با استفاده از مواد اولیه در دوره t	$n_{j,p,t}$
انتشار گاز CO_2 حاصل از تولید یک واحد محصول نوع p در مرکز تولید/بازسازی j با استفاده از مواد بازگشتی در دوره t	$w_{j,p,t}$

جدول ۲. تعریف نماد متغیرهای تصمیم مدل

تعریف متغیرها	نماد
۱ اگر مرکز تولید/بازسازی j باز باشد در غیر این صورت صفر	X_j
۱ اگر مرکز جمع‌آوری/بازرسی k باز باشد در غیر این صورت صفر	Y_k
۱ اگر مرکز انهدام l باز باشد در غیر این صورت صفر	Z_l
مقدار ماده اولیه نوع rm با کیفیت q منتقل شده از تامین کننده i به مرکز تولید/بازسازی j در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v	$A_{m,i,j,t}^{v,q}$
مقدار محصول نوع p منتقل شده از مرکز تولید/بازسازی j به مشتری m در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v	$B_{j,m,p,t}^v$
مقدار محصول بازگشتی نوع p منتقل شده از مشتری m به مرکز جمع‌آوری/بازرسی k در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v	$E_{m,k,p,t}^v$

مقدار محصول قابل بازیافت نوع p منتقل شده از مرکز جمع آوری k به مرکز تولید/بازسازی j در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v	$G_{k,j,p,t}^v$
مقدار محصول انهدامی نوع p منتقل شده از مرکز جمع آوری/بازرسی k به مرکز انهدام l در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v	$H_{k,l,p,t}^v$
مقدار محصول تولید شده نوع p در مرکز تولید/بازسازی j از مواد اولیه در دوره t	$QM_{j,p,t}$
مقدار محصول تولید شده نوع p در مرکز تولید/بازسازی j از محصولات بازگشتی در دوره t	$QR_{j,p,t}$
مقدار تقاضای کالای نوع p برآورده نشده مشتری m در دوره t	$\rho_{m,p,t}$
میزان موجودی کالای نوع p در مرکز تولید/بازسازی j در دوره t	$IV_{j,p,t}$

مدل ریاضی مسئله در حالت قطعی

در این بخش به مدل سازی ریاضی مسئله مورد نظر در حالت قطعی پرداخته می شود و پس از آن مسئله در حالت عدم قطعیت (بهینه سازی استوار) توسعه می یابد. دو تابع هدف یکی کمینه کردن کل هزینه های زنجیره تأمین حلقه بسته و دیگری کمینه کردن میزان گاز دی اکسید کربن تولیدی به منظور رعایت مسائل زیست محیطی به ترتیب در روابط (۶) و (۷) ارائه شده است.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } \xi_1 = & \sum_j op_j X_j + \sum_k oc_k Y_k + \sum_l od_l Z_l + \sum_m \sum_i \sum_j \sum_t \sum_v \sum_q c_{m,i,j,t}^{v,q} A_{m,i,j,t}^{v,q} \\
 & + \sum_j \sum_m \sum_p \sum_t \sum_v c_{j,m,p,t}^v B_{j,m,p,t}^v + \sum_m \sum_k \sum_p \sum_t \sum_v c_{m,k,p,t}^v E_{m,k,p,t}^v \\
 & + \sum_k \sum_j \sum_p \sum_t \sum_v c_{k,j,p,t}^v G_{k,j,p,t}^v + \sum_k \sum_l \sum_p \sum_t \sum_v c_{k,l,p,t}^v H_{k,l,p,t}^v \\
 & + \sum_j \sum_p \sum_t pcm_{j,p,t} QM_{j,p,t} + \sum_j \sum_p \sum_t pcr_{j,p,t} QR_{j,p,t} \\
 & + \sum_m \sum_p \sum_t pen_{m,p,t} \rho_{m,p,t} + \sum_j \sum_p \sum_t ci_{j,p,t} IV_{j,p,t}
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Min } \xi_2 = & \sum_m \sum_i \sum_j \sum_t \sum_v \sum_q n_{i,j,t}^v A_{m,i,j,t}^{v,q} + \sum_j \sum_m \sum_p \sum_t \sum_v o_{j,m,t}^v B_{j,m,p,t}^v \\
 & + \sum_m \sum_k \sum_p \sum_t \sum_v u_{m,k,t}^v E_{m,k,p,t}^v + \sum_k \sum_j \sum_p \sum_t \sum_v v_{k,j,t}^v G_{k,j,p,t}^v \\
 & + \sum_k \sum_l \sum_p \sum_t \sum_v f_{k,l,t}^v H_{k,l,p,t}^v + \sum_j \sum_p \sum_t n_{j,p,t} QM_{j,p,t} + \sum_j \sum_p \sum_t w_{j,p,t} QR_{j,p,t}
 \end{aligned} \tag{7}$$

تابع هدف اول مسئله (ξ_1) ، کمینه کردن هزینه‌ها را نشان می‌دهد. هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته طراحی شده شامل هزینه‌های ثابت احداث و بازگشایی مراکز، هزینه‌های حمل و نقل بین اجزای زنجیره تأمین، هزینه‌های تولید محصولات در مراکز تولید/بازسازی، جریمه تقاضاهای برآورده نشده و هزینه نگهداری موجودی در مرکز تولید/بازسازی می‌باشد. هزینه ثابت بازگشایی مراکز شامل هزینه بازگشایی تسهیلات ترکیبی تولید/بازسازی، مراکز جمع‌آوری/بازرسی و مراکز انهدام می‌باشد. هزینه‌های حمل و نقل میان سطوح مختلف شامل هزینه حمل مواد اولیه از تامین‌کننده به مرکز تولید/بازسازی، هزینه حمل محصولات از مرکز تولید/بازسازی به مشتریان، هزینه جمع‌آوری محصولات بازگشتی از مشتریان به مراکز جمع‌آوری/بازرسی، هزینه حمل محصولات بازگشتی قابل بازیافت به مرکز تولید/بازسازی و هزینه حمل محصولات انهدامی به مرکز انهدام می‌باشد. هزینه‌های تولید محصول شامل هزینه‌های تولید از مواد اولیه و هزینه‌های تولید از محصولات بازگشتی می‌باشد. تابع هدف دوم (ξ_2) میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) حاصل از حمل و نقل میان سطوح مختلف و میزان انتشار گاز CO_2 حاصل از تولید را در دو حالت تولید از مواد اولیه و مواد بازیافتی حداقل می‌نماید.

نامعادلات (۸) تا (۱۲) بخشی از محدودیت‌های ظرفیت تسهیلات با فرض قطعی بودن پارامترهای مدل است.

$$\sum_v \sum_i \sum_{rm} \sum_q A_{m,i,j,t}^{v,q} + \sum_{rm} \sum_k \sum_p \sum_v G_{k,j,p,t}^v \times we_{m,p} \leq cam_j \times X_j \quad \forall j,t \quad (8)$$

$$\sum_p IV_{j,p,t} \leq cap_j \times X_j \quad \forall j,t \quad (9)$$

$$\sum_p QM_{j,p,t} + \sum_p QR_{j,p,t} \leq cp_j \quad \forall j,t \quad (10)$$

$$\sum_v \sum_m \sum_p E_{m,k,p,t}^v \leq cap_k \times Y_k \quad \forall k,t \quad (11)$$

$$\sum_v \sum_k \sum_p H_{k,l,p,t}^v \leq cap_l \times Z_l \quad \forall l,t \quad (12)$$

محدودیت) ۸، محدودیت ظرفیت در مراکز تولید/بازسازی می‌باشد که در آن جمع مواد اولیه (نوع rm حمل شده از تمام تأمین کنندگان (i) با کیفیت‌های متفاوت (q) در یک دوره برنامه‌ریزی (t) با انواع وسایل حمل (v) به مرکز تولید/بازسازی (j) ام) $(\sum_v \sum_i \sum_m \sum_q A_{m,i,j,t}^{v,q})$ به اضافه میزان مواد اولیه بازیافتی به هر مرکز (حاصلضرب مقدار برگشتی محصولات در وزن ماده اولیه مواد برگشتی، $(G_{k,j,p,t}^v \times we_{m,p})$) باید کمتر از ظرفیت نگهداری مواد اولیه مرکز در یک دوره در صورت احداث $(cam_j \times X_j)$ باشد. محدودیت (9)، نشان می‌دهد که میزان موجودی کل محصولات مختلف تولیدی در یک مرکز تولید/بازسازی در یک دوره $(\sum_p IV_{j,p,t})$ از ظرفیت نگهداری محصولات آن مرکز در صورت احداث $(cap_j \times X_j)$ باید کمتر باشد. بر اساس محدودیت (۱۰)، جمع محصولات تولیدی از مواد اولیه $(QM_{j,p,t})$ و بازگشتی $(QR_{j,p,t})$ در هر دوره باید از ظرفیت تولید در هر مرکز تولید کمتر باشد. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲)، به ترتیب مربوط به رعایت محدودیت ظرفیت نگهداری در مراکز جمع‌آوری/بازرسی و مراکز انهدام می‌باشد. روابط (۱۳) الی (۱۷) مربوطه به برقراری تعادل جریان‌های ورودی و خروجی به تسهیلات است. روابط (13) و (۱۴) تعادل جریان را در مراکز جمع‌آوری/بازرسی را نشان می‌دهد. در رابطه (۱۳)، حداکثر مقدار بازیافتی هر محصول (p) در هر دوره (t) ، $\sum_v \sum_j G_{k,j,p,t}^v$ ، کسری $(1-\alpha)$ از مقدار کالای برگشتی به تفکیک هر مرکز جمع‌آوری/بازرسی (k) ، $\sum_v \sum_m E_{m,k,p,t}^v$ ، قرار داده شده است. اینکه مابقی محصول بازگشتی در یک دوره به یک مرکز جمع‌آوری که مورد بازیافت قرار نمی‌گیرد (به مراکز تولید ارسال نمی‌شود) باید به مراکز انهدام ارسال شود، در رابطه (۱۴) تأمین شده است. محدودیت (۱۵) بیانگر آن است که میزان هر محصول ارسالی از هر مرکز تولید به مشتریان آن مرکز $(\sum_v \sum_m B_{j,m,p,t}^v)$ باید کمتر از میزان تولید از مواد اولیه و تولید بازیافتی $(QM_{j,p,t} + QR_{j,p,t})$ به اضافه موجودی دوره قبل مرکز $(IV_{j,p,(t-1)})$ در هر دوره برنامه‌ریزی باشد. محدودیت‌های

(۱۶) و (۱۷) محدودیت میزان تولید هر محصول به تفکیک دوره‌های برنامه‌ریزی را از مواد اولیه تأمین (تأمین‌کنندگان و بازیافتی) در مراکز تولید تضمین می‌کند.

$$\sum_v \sum_j G_{k,j,p,t}^v - (1-\alpha) \times \sum_v \sum_m E_{m,k,p,t}^v \leq 0 \quad \forall k, p, t \quad (13)$$

$$\sum_v \sum_l H_{k,l,p,t}^v = \sum_v \sum_m E_{m,k,p,t}^v - \sum_v \sum_j G_{k,j,p,t}^v \quad \forall k, p, t \quad (14)$$

$$\sum_v \sum_m B_{j,m,p,t}^v \leq QM_{j,p,t} + QR_{j,p,t} + IV_{j,p,(t-1)} \quad \forall p, j, t \quad (15)$$

$$\sum_p QM_{j,p,t} \times wei_{m,p} \leq \sum_v \sum_i \sum_q A_{m,i,j,t}^{v,q} \quad \forall rm, j, t \quad (16)$$

$$\sum_p QR_{j,p,t} \times wei_{m,p} \leq \sum_v \sum_k \sum_p G_{k,j,p,t}^v \times we_{m,p} \quad \forall rm, j, t \quad (17)$$

محدودیت (۱۸) میزان موجودی در مراکز تولید/بازسازی در هر دوره را به تفکیک نوع محصول به روز می‌نماید. اختلاف جمع موجودی هر محصول در دوره قبل، مقادیر تولید از مواد اولیه تازه خریداری شده و بازیافتی و مقدار کالای ارسالی به مشتریان مرکز برابر موجودی پایان دوره مرکز مورد نظر می‌باشد.

$$IV_{j,p,t-1} + QM_{j,p,t} + QR_{j,p,t} - \sum_v \sum_m B_{j,m,p,t}^v = IV_{j,p,t} \quad \forall j, p, t \quad (18)$$

محدودیت (۱۹)، محدودیت برآورده شدن تقاضای هر مشتری می‌باشد. در این نامعادله، مقدار کالای ارسالی از تمام مراکز به هر مشتری در هر دوره $(\sum_v \sum_j B_{j,m,p,t}^v)$ به اضافه مقدار تقاضای برآورده نشده $(\rho_{m,p,t})$ بزرگتر مساوی تقاضای مشتری در آن دوره می‌باشد. چنانچه مسئله دارای جواب باشد، با توجه به توابع هدف کمینه این محدودیت انتظار می‌رود به صورت تساوی برآورده شود. محدودیت (۲۰) (نشان می‌دهد میزان تقاضاهای برآورده نشده در هر دوره باید کمتر از میزان تقاضا در آن دوره برای هر مشتری باشد).

$$\sum_v \sum_j B_{j,m,p,t}^v + \rho_{m,p,t} \geq d_{m,p,t} \quad \forall m, p, t \quad (19)$$

$$\rho_{m,p,t} \leq d_{m,p,t} \quad \forall m, p, t \quad (20)$$

محدودیت (۲۱) بیان می‌دارد که تمامی محصولات بازگشتی از مشتریان باید جمع‌آوری شوند. مجموع کالاهای نوع p که از یک مشتری (m) به تمامی مراکز جمع‌آوری (k)، $\sum_v \sum_k E_{m,k,p,t}^v$ ، منتقل می‌شوند باید برابر مقدار کالای بازگشتی نزد مشتری m ام ($r_{m,p,t}$) در دوره t باشد.

$$\sum_v \sum_k E_{m,k,p,t}^v = r_{m,p,t} \quad \forall m, p, t \quad (21)$$

محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) به عنوان محدودیت‌های ضمنی، نوع متغیرهای تصمیم را برای مدل تعریف می‌کند.

$$Y_k, X_j, Z_l \in \{0,1\} \quad \forall k, j, l \quad (22)$$

$$A_{m,i,j,t}^{v,q}, B_{j,m,p,t}^v, E_{m,k,p,t}^v, G_{k,j,p,t}^v, H_{k,l,p,t}^v, QM_{j,p,t}, QR_{j,p,t}, \rho_{m,p,t}, IV_{j,p,t} \geq 0, \quad (23)$$

$$IV_{j,p,0} = 0 \quad \forall m, i, j, m, k, l, p, t, v$$

مدل ریاضی مسئله در حالت عدم قطعیت

در مدل پیشنهادی فرض می‌شود پارامترهای تقاضا (d_{mpt}) و میزان محصولات بازگشتی (r_{mpt}) دارای ماهیت غیرقطعی هستند. مطابق رویکرد حل مسائل برنامه‌ریزی استوار مبتنی بر سناریو، برای تعریف عدم قطعیت پارامترهای مدل، مجموعه‌ای سناریو $S \in \Omega = \{1, 2, \dots, S\}$ تعریف می‌شود که به هر سناریو s احتمال رخداد p_s دارد. به ازای هر سناریو، پارامترهای $r_{m,p,t}^s$ و $d_{m,p,t}^s$ مقادیر قطعی به آنها به عنوان مقادیر محتمل اختصاص می‌یابد. همانطور که پیشتر اشاره شد، متغیرهای تصمیم مربوط به این پارامترها در رابطه (۴)، متغیرهای کنترلی مدل هستند. بنابراین متغیرهای کنترلی مدل پیشنهادی نیز به صورت جدول زیر خواهد بود.

جدول ۳. تعریف نماد متغیرهای کنترلی مدل بهینه‌سازی استوار

نماد	تعریف متغیرها
$A_{m,i,j,t}^{v,q,s}$	مقدار ماده اولیه نوع m با کیفیت q منتقل شده از تامین‌کننده i به مرکز تولید/بازسازی j در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v تحت سناریو s
$B_{j,m,p,t}^{v,s}$	مقدار محصول نوع p منتقل شده از مرکز تولید/بازسازی j به مشتری m در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v تحت سناریو s

مقدار محصول بازگشتی نوع p منتقل شده از منطقه مشتری m به مرکز جمع‌آوری/بازرسی k در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v تحت سناریو s	$E_{m,k,p,t}^{v,s}$
مقدار محصول قابل بازیافت نوع p منتقل شده از مرکز جمع‌آوری/بازرسی k به مرکز تولید/بازسازی j در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v تحت سناریو s	$G_{k,j,p,t}^{v,s}$
مقدار محصول انهدامی نوع p منتقل شده از مرکز جمع‌آوری/بازرسی k به مرکز انهدام l در دوره t با وسیله حمل و نقل نوع v تحت سناریو s	$H_{k,l,p,t}^{v,s}$
مقدار محصول تولید شده نوع p در مرکز تولید/بازسازی j از مواد اولیه در دوره t تحت سناریو s	$QM_{j,p,t}^s$
مقدار محصول تولید شده نوع p در مرکز تولید/بازسازی j از محصولات بازگشتی در دوره t تحت سناریو s	$QR_{j,p,t}^s$
مقدار تقاضای کالای نوع p برآورده نشده مشتری m در دوره t تحت سناریو s	$P_{m,p,t}^s$
میزان موجودی کالای نوع p در مرکز تولید/بازسازی j در دوره t تحت سناریو s	$IV_{j,p,t}^s$

مدل پیشنهادی در حالت عدم قطعیت به صورت زیر بازنویسی شده است. بخش اول تابع هدف (۲۴)، بخش قطعی مدل است و تابع متغیرهای کنترلی نیست و شامل هزینه‌های احداث مراکز است. بخش دوم شامل امید ریاضی $(\sum_s p_s TC_s)$ و پراکندگی $(\sum_s p_s |TC_s - \sum_s p_s TC_s|)$ بخش‌های غیر قطعی تابع هدف (۶) است که با TC نمایش داده شده و در روابط (۲۶) مقدار آن تشریح شده است. معیار پراکندگی متغیر تصادفی TC ، قدرمطلق انحراف از میانگین تعریف شده تا بتوان به کمک روابط (۵) آن را خطی کرد. ثابت λ نیز وزن تبادل میان میانگین و پراکندگی متغیر TC در تابع هدف مدل استوار می‌باشد. بخش سوم تابع هدف مقدار انحراف از موجه بودن محدودیت‌هاست که خود شامل دو بخش است. یک بخش جمع قدر مطلق متغیرهای اندازه‌گیری انحراف از موجه بودن برای مجموعه محدودیت‌های مساوی $(K = \{5, 6, 11, 14\})$ و دیگری جمع متغیرهای انحراف از موجه بودن برای مجموعه محدودیت‌های کوچکتر مساوی $(K' = \{1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 12, 13\})$ می‌باشد. به دلیل عدم یکسان بودن آرگومان‌های δ در تمام محدودیت‌ها دو آرگومان اول این متغیر در روابط (۲۴) به صورت x و y نشان داده شده است. ثابت ω نیز وزن تبادل بین بهینگی و موجه بودن جواب‌های استوار مسئله است. روابط (۲۵) تنها شامل دو بخش است. بخش اول امید ریاضی متغیر تصادفی ITC_s و دیگری انحراف از

میانگین متغیر ITC_s را اندازه می‌گیرد و مقدار ITC_s در روابط (۲۷) معرفی شده است. نیازی به قرار دادن انحراف از موجه بودن در رابطه (۲۵) نیست زیرا مقدار آن مشابه رابطه (24) است و ذکر مجدد آن در تابع هدف دوم لزومی ندارد.

$$Min \xi_1 = (\sum_j op_j X_j + \sum_k oc_k Y_k + \sum_l od_l Z_l) + (\sum_s p_s ITC_s + \lambda_1 \sum_s p_s |ITC_s - \sum_s p_s ITC_s|) + \theta (\sum_x \sum_y \sum_t \sum_{k \in K} p_s |\delta_{x,y,t}^{k,s}| + \sum_x \sum_y \sum_t \sum_{k \in K'} p_s \delta_{x,y,t}^{k,s}) \quad (24)$$

$$Min \xi_2 = (\sum_s p_s ITC_s + \lambda_2 \sum_s p_s |ITC_s - \sum_s p_s ITC_s|) \quad (25)$$

$$ITC_s = \sum_m \sum_i \sum_j \sum_t \sum_v \sum_q c_{m,i,j,t}^{v,q} A_{m,i,j,t}^{v,q,s} + \sum_j \sum_m \sum_p \sum_t \sum_v c_{j,m,p,t}^v B_{j,m,p,t}^{v,s} + \sum_m \sum_k \sum_p \sum_t \sum_v c_{m,k,p,t}^v E_{m,k,p,t}^{v,s} + \sum_k \sum_j \sum_p \sum_t \sum_v c_{k,j,p,t}^v G_{k,j,p,t}^{v,s} + \sum_k \sum_l \sum_p \sum_t \sum_v c_{k,l,p,t}^v H_{k,l,p,t}^{v,s} + \sum_j \sum_p \sum_t pcm_{j,p,t} QM_{j,p,t}^s + \sum_j \sum_p \sum_t pcr_{j,p,t} QR_{j,p,t}^s + \sum_m \sum_p \sum_t pen_{m,p,t} \rho_{m,p,t}^s + \sum_j \sum_p \sum_t ci_{j,p,t} IV_{j,p,t}^s \quad (26)$$

$$ITC_s = \sum_m \sum_i \sum_j \sum_t \sum_v \sum_q n_{i,j,t}^v A_{m,i,j,t}^{v,q,s} + \sum_j \sum_m \sum_p \sum_t \sum_v o_{jmt}^v B_{jmt}^{v,s} + \sum_m \sum_k \sum_p \sum_t \sum_v u_{m,k,t}^v E_{m,k,p,t}^{v,s} + \sum_k \sum_j \sum_p \sum_t \sum_v v_{kjt}^v G_{kjp,t}^{v,s} \quad (27)$$

$$+ \sum_k \sum_l \sum_p \sum_t \sum_v f_{k,l,t}^v H_{k,l,p,t}^{v,s} + \sum_j \sum_p \sum_t n_{j,p,t} QM_{j,p,t}^s + \sum_j \sum_p \sum_t w_{j,p,t} QR_{j,p,t}^s + \sum_v \sum_i \sum_m \sum_q A_{m,i,j,t}^{v,q,s} + \sum_m \sum_k \sum_t \sum_p \sum_v G_{k,j,p,t}^{v,s} we_{m,p} \leq X_j cam_j + \delta_{j,t}^{1,s} \quad \forall j,t,s \quad (28)$$

$$\sum_p IV_{j,p,t}^s \leq cap_j X_j + \delta_{j,t}^{2,s} \quad \forall j,t,s \quad (29)$$

$$\sum_p QM_{j,p,t}^s + \sum_p QR_{j,p,t}^s \leq cp_j X_j + \delta_{j,t}^{3,s} \quad \forall j,t,s \quad (30)$$

$$\sum_v \sum_m \sum_p E_{m,k,p,t}^{v,s} \leq cap_k Y_k + \delta_{k,t}^{4,s} \quad \forall k,t,s \quad (31)$$

$$\sum_v \sum_k \sum_p H_{k,l,p,t}^{v,s} \leq cap_l Z_l + \delta_{l,t}^{5,s} \quad \forall l,t,s \quad (32)$$

$$\sum_v \sum_j G_{k,j,p,t}^{v,s} - (1-\alpha) \sum_v \sum_m E_{m,k,p,t}^{v,s} \leq \delta_{k,p,t}^{6,s} \quad \forall k,p,t,s \quad (33)$$

$$\sum_v \sum_l H_{k,l,p,t}^v + \delta_{k,p,t}^{7,s} = \sum_v \sum_m E_{m,k,p,t}^v - \sum_v \sum_j G_{k,j,p,t}^v \quad \forall k,p,t,s \quad (34)$$

$$\sum_v \sum_m B_{j,m,p,t}^{v,s} \leq QM_{j,p,t}^s + QR_{j,p,t}^s + IV_{j,p,(t-1)}^s + \delta_{p,j,t}^{8,s} \quad \forall p,j,t,s \quad (35)$$

$$\sum_p QM_{j,p,t}^s wei_{m,p} \leq \sum_v \sum_i \sum_q A_{m,i,j,t}^{v,q,s} + \delta_{m,j,t}^{9,s} \quad \forall m,j,t,s \quad (36)$$

$$\sum_p QR_{j,p,t}^s wei_{m,p} \leq \sum_v \sum_k \sum_p G_{k,j,p,t}^{v,s} we_{m,p} + \delta_{m,j,t}^{10,s} \quad \forall m,j,t,s \quad (36)$$

$$IV_{j,p,t-1}^s + QM_{j,p,t}^s + QR_{j,p,t}^s - \sum_v \sum_m B_{j,m,p,t}^{v,s} + \delta_{j,p,t}^{11,s} = IV_{j,p,t}^s \quad \forall j,p,t,s \quad (38)$$

$$\sum_v \sum_j B_{j,m,p,t}^{v,s} + \rho_{m,p,t}^s + \delta_{m,p,t}^{12,s} \geq d_{m,p,t}^s \quad \forall m,p,t,s \quad (39)$$

$$\rho_{m,p,t}^s \leq d_{m,p,t}^s + \delta_{m,p,t}^{13,s} \quad \forall m,p,t,s \quad (40)$$

$$\sum_v \sum_k E_{m,k,p,t}^{v,s} + \delta_{m,p,t}^{14,s} = r_{m,p,t}^s \quad \forall m,p,t,s \quad (50)$$

$$Y_k, X_j, Z_l \in \{0,1\} \quad \forall k,j,l \quad (51)$$

$$A_{m,i,j,t}^{v,q,s}, B_{j,m,p,t}^{v,s}, E_{m,k,p,t}^{v,s}, G_{k,j,p,t}^{v,s}, H_{k,l,p,t}^{v,s}, QM_{j,p,t}^s, QR_{j,p,t}^s, \rho_{m,p,t}^s, IV_{j,p,t}^s, \delta^k \geq 0 \mid k \in K', \delta^k \text{ is free} \mid k \in K, IV_{j,p,0}^s = 0 \quad \forall m,i,j,m,k,l,p,t,v,s \quad (52)$$

محدودیت‌های (۲۸) الی (۵۱) همان محدودیت‌های مدل پیشنهادی قطعی هستند که بر اساس متغیرهای کنترلی و پارامترهای عدم قطعیت تعدیل شده‌اند. به هر یک از محدودیت‌ها بر اساس مدل ۳ متغیرهای انحراف از موجه بودن (δ) اضافه شده‌اند. مقدار این متغیرها در محدودیت‌های مساوی (مجموعه محدودیت‌های K می‌بایست ترجیحاً برابر صفر (مقدار منفی و مثبت آنها بیانگر عدم موجه بودن جواب) و برای محدودیت‌های کوچکتر مساوی صفر باشند تا جواب استوار مسئله در آن‌ها موجه باشد. به همین دلیل، در تابع (۲۴) دو بخش به عنوان معیارهای انحراف از موجه بودن قرار داده شده‌اند. به ازای محدودیت‌های مساوی جمع قدرمطلق متغیرهای انحراف از

موجه بودن $(\sum_x \sum_y \sum_t \sum_{k \in K} \sum_s p_s |\delta_{x,y,t}^{k,s}|)$ و به ازای محدودیت‌های کوچکتر مساوی جمع متغیرهای مربوط به آن‌ها $\sum_x \sum_y \sum_t \sum_{k \in K'} \sum_s p_s \delta_{x,y,t}^{k,s}$ باید کمینه شوند.

توابع هدف مدل استوار، دارای توابع قدر مطلق هستند و حل آن‌ها نیاز به روش‌های بهینه‌ساز غیرخطی دارد. برای پرهیز از غیرخطی بودن توابع، از تبدیل (۵) کمک گرفته شده است. به این ترتیب روابط زیر جایگزین (۲۴) و (۲۵) در مدل بهینه‌سازی استوار خواهند شد تا تمام روابط مدل خطی شوند.

$$\begin{aligned} \text{Min } \xi_1 = & (\sum_k oc_k Y_k + \sum_j op_j X_j + \sum_l od_l Z_l) \\ & + (\sum_s p_s TC_s + \lambda_1 \sum_s p_s (TC_s - \sum_s p_s TC_s) + 2\theta_s) \\ & + \omega (\sum_x \sum_y \sum_t \sum_{k \in K} \sum_s p_s (\delta_{x,y,t}^{k,s} + 2\theta'_s) + \sum_x \sum_y \sum_t \sum_{k \in K'} \sum_s p_s \delta_{x,y,t}^{k,s}) \end{aligned} \quad (53)$$

$$\text{s.t. } TC_s - \sum_s p_s TC_s + \theta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega$$

$$\delta_{x,y,t}^{k,s} + \theta'_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega, x, y, k \in K'$$

$$\theta_s, \theta'_s, \delta_{x,y,t}^{k,s}, \delta_{x,y,t}^{k',s} \geq 0$$

$$\text{Min } \xi_2 = (\sum_s p_s ITC_s + \lambda_2 \sum_s p_s (ITC_s - \sum_s p_s ITC_s) + 2\theta''_s)$$

$$\text{s.t. } ITC_s - \sum_s p_s ITC_s + \theta''_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (54)$$

$$\theta''_s \geq 0$$

مدل فوق یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه است که باید به روش‌های حل مدل‌های چندهدفه حل شوند. یکی از روش‌های حل مسائل چندهدفه در حالت قطعی که نیازی به کسب اطلاعات از تصمیم‌گیرنده نیست، روش ارزش متریک (L-P) می‌باشد (اصغرپور، ۱۳۷۷). در این روش، جمع انحراف توابع هدف از مقدار هدف ایده‌آل خودشان زمانی که به تنهایی در مدل باشند، مینیمم می‌شود. با توجه به اینکه اهداف مسئله طراحی شده هم واحد و هم مقیاس نیستند، لذا

قراردادن آنها در یک تابع هدف به فرم روش ارزش متریک مناسب نمی‌باشد. بدین منظور تابع هدفی به فرم رابطه (۵۵) در نظر گرفته شده که علاوه بر تبدیل مسئله چندهدفه به مسئله تک هدفه، امکان هم مقیاس و واحدسازی توابع هدف را فراهم کرده است.

$$F = \sum_{i=1}^2 W_i \left(\frac{z_i - z_i^*}{z_i^{\sim} - z_i^*} \right) \quad (55)$$

در رابطه فوق، تابع F تابع یکپارچه می‌باشد که ترکیب وزنی از توابع نرمال شده اهداف مسئله می‌باشد. همچنین z_i معرف تابع هدف i ام (حداکثر i برابر تعداد اهداف مسئله)، z_i^* مقدار بهینه تابع i ام در صورتیکه به تنهایی در مسئله باشد (در مسئله مورد نظر مینیمم هر تابع هدف به تنهایی)، z_i^{\sim} مقدار ایده‌آل منفی برای تابع هدف i بیشینه مقدار هر تابع هدف به تنهایی، W_i درجه اهمیت هر تابع هدف در تابع یکپارچه جدید می‌باشد. با تغییر وزن اهداف در مسئله، یکی از جواب‌ها غیر غالب حاصل می‌شود.

اعتبارسنجی مدل و یافته‌های پژوهش

در این بخش، اعتبارسنجی مدل پیشنهادی و قابلیت اجرای آن در یک مطالعه موردی به همراه تحلیل حساسیت مدل ارائه شده است.

اعتبارسنجی مدل

اعتبار مدل با بررسی متعدد روابط و استفاده از نظرات اساتید دانشگاه تایید شده است. برای اطمینان از عملکرد قابل انتظار مدل، مسئله در بُعد کوچک

عددی در حالت قطعی حل شده تا با تغییر پارامترها در مثال عددی، نتایج قابل انتظار از مدل ریاضی مشاهده و از اعتبار مدل ساخته شده اطمینان حاصل شود.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود در آزمایش‌های طراحی شده هر بار وزن یکی از دو تابع هدف ثابت در نظر گرفته شده و وزن تابع هدف دیگر تغییر کرده است. مقادیر تابع هدف‌های بدست آمده نشان‌دهنده وجود تضاد در بین توابع هدف می‌باشد به نحوی که افزایش وزن در هر یک از توابع هدف موجب بهبود همان تابع هدف و بدتر شدن مقدار تابع هدف دیگر شده است.

جدول ۴. مقایسه توابع مختلف با وزن‌های متفاوت

شماره آزمایش	w_1	w_2	Min Z_1	Min Z_2
1	1/0	9/0	40762650	927/183
2	4/0	6/0	36739170	959/1439
3	5/0	5/0	24386620	530/17929
4	6/0	4/0	12892340	846/36066
5	7/0	3/0	12892340	846/36066
6	8/0	4/0	12892340	846/36066

همچنین برای اطمینان از اعتبار و درستی مدل بر روی پارامتر هزینه نگهداری نیز تحلیلی صورت گرفته است. همان‌طور که مورد انتظار بوده و نتایج در جدول ۵ نشان داده شده، با افزایش واحد هزینه نگهداری میزان مجموع کالای نگهداری شده کاهش یافته که نشان از درستی روند اجرای مدل دارد.

جدول ۵. اثر افزایش هزینه نگهداری در مدل

شماره آزمایش	هزینه نگهداری	کالای نگهداری شده
1	11	58
2	110	34
3	1100	17
4	11000	0

تحلیل دیگر بر روی هزینه حمل و نقل مسیر مشتری-جمع‌آوری می‌باشد. با کاهش هزینه حمل و نقل مسیر، مسیری که در ابتدا در جواب بهینه قرار نداشت با کاهش هزینه به جزئی از جواب بهینه مسئله تبدیل گشت به طوری که اگر از مسیری انتقالی صورت نگرفته باشد با

کاهش هزینه حمل و نقل آن مسیر شاهد انتقال محصول از آن هستیم که این نشان از درستی مدل می‌باشد.

مطالعه موردی

شیشه یکی از مصنوعات پرکاربرد به خصوص در صنایع بسته‌بندی است. استفاده از انواع بطری‌های شیشه‌ای جهت نگهداری و عرضه انواع نوشیدنی‌ها در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است. بطری‌های شیشه‌ای از جمله مواد قابل بازیافتی است که چندین مرتبه می‌توان از آن در چرخه تولید به کار گرفت. فرایند تولید، مصرف و بازیافت این محصول شیشه مسئله این پژوهش می‌باشد. مطابق با شکل ۱، مواد اولیه تولید شیشه پس از فراوری در معادن یا واحدهای تولیدی نزدیک به آن‌ها (به عنوان تامین‌کننده مواد اولیه) به کارخانجات تولید بطری‌های شیشه‌ای حمل می‌شوند. بطری‌های تولید شده در ابعاد مختلف در این کارخانه‌ها برای استفاده به واحدهای تولیدی انواع نوشیدنی (مشتریان) منتقل می‌شوند. بطری‌ها ضایعاتی و بطری‌های جمع‌آوری شده از مصرف‌کنندگان در مراکز تولید نوشیدنی برای بازیافت به مراکز بازیافت ارسال می‌شوند. بخشی از بطری‌ها پس از جداسازی به دلایلی مانند مسائل بهداشتی غیرقابل استفاده هستند که آن‌ها را برای انهدام به مراکز انهدام ارسال می‌کنند اما بخش اعظمی از آن‌ها مجدد برای استفاده به مراکز تولید بطری شیشه‌ای ارسال می‌شوند. جهت ارزیابی و تحلیل نتایج مدل پیشنهادی در این بخش مثال عددی بر اساس شرایط زنجیره تأمین حلقه بسته محصولات بطری‌های شیشه‌ای ارائه شده است. زنجیره تأمین مورد مطالعه برای تولید سه محصول مختلف، سه نوع بطری نوسابه با ابعاد مختلف ($p = 1, 2, 3$ در چهار دوره سه ماهه ($t = 1, 2, 3, 4$) طراحی شده است. چهار شهر کشور برای احداث مراکز تولید بطری، چهار شهر برای احداث مراکز جمع‌آوری و بازیافت و سه شهر برای احداث مراکز انهدام با اطلاعات جدول زیر انتخاب شده است.

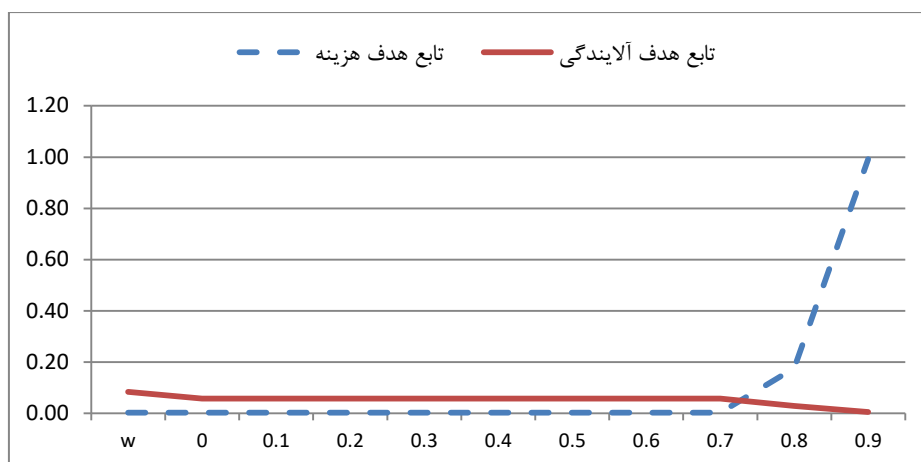
جدول ۱.۶ اطلاعات مربوط به مراکز تولید، بازیافت و انهدام

مراکز انهدام		مراکز جمع‌آوری و بازرسی			مراکز تولید و بازیافت					
هزینه	ظرفیت	مراکز	هزینه	ظرفیت	مراکز	هزینه	ظرفیت	ظرفیت	ظرفیت	مراکز
احداث	نگهداری	منتخب	احداث	نگهداری	منتخب	احداث	تولید (تن)	نگهداری	نگهداری	منتخب
واحد	محصولات		واحد	محصولات		واحد	(در فصل)	محصول	مواد اولیه	
(پولی)	بازگشتی		(پولی)	بازگشتی		(پولی)		نهایی	تن در	
	(تن در)			(فصل)				(فصل)	(فصل)	
8/0	50000	کرمان	5/3	10000	اصفهان	50	5000	6000	8000	تهران
4/0	4000	زاهدان	3	8000	تبریز	25	3500	5000	4000	شیراز
4/0	7000	ایلام	5/2	15000	ساری	30	4000	4500	4500	مشهد
			2/5	7000	مشهد	25	4500	4000	4000	تبریز

حدود ۹۰ درصد شیشه‌های بطری برگشتی به کارخانجات بازیافت قابلیت تبدیل به مواد اولیه را دارند و کسر انهدام آن ۱۰ درصد ($\alpha = 0.1$) برآورد می‌شود. مواد اصلی تشکیل دهنده شیشه را ماسه و سایر ترکیبات مانند آهک و کربنات سدیم به طور متوسط با نسبت ۷۵ و ۲۵ درصد تشکیل می‌دهند. لذا دو ماده اولیه ($m = 1, 2$) برای تولید هر واحد محصول (مستقل از نوع آن) با نسبت ۷۵ به ۲۵ ($wei_{m=1,p} = 0.75, wei_{m=2,p} = 0.25$) در نظر گرفته شده است. از طرفی هر تن شیشه برگشتی تقریباً به یک تن مواد اولیه (ضریب تبدیل یک) تبدیل می‌شود (عمرانی و همکاران، ۱۳۸۸). بنابراین میزان تبدیل محصول برگشتی به مواد اولیه برابر است با $we_{m=1,p} = 0.75, we_{m=2,p} = 0.25$. مواد اولیه از سه تأمین کننده ($i = 1, 2, 3$) با دو سطح متفاوت کیفیت عالی و متوسط ($q = 1, 2$) برای هر نوع ماده اولیه در نظر گرفته شده است. فرض می‌شود تأمین کنندگان در شهرهای تهران، اصفهان و مشهد مستقر هستند و هر تأمین کننده که تاجران این عرصه می‌باشند امکان ارائه مواد اولیه مورد نیاز را از انبارهای خود داشته باشند. حمل و نقل مواد در زنجیره تأمین با دو نوع وسیله نقلیه با ظرفیت‌های حمل ۱۰ و ۲۰ تن انجام می‌شود. همچنین مشتریان سه محصول شبکه در چهار

شهر تهران، شیراز، مشهد و تبریز ($m = 1, 2, 3, 4$) در نظر گرفته شده‌اند. برای محاسبه هزینه واحد حمل (تن) بین هر دو نقطه در شبکه تأمین، مسافت واقعی بین دو شهر بر حسب کیلومتر اندازه‌گیری شده و در هزینه سوخت خودروی مورد نظر به ازای یک تن-کیلومتر (عامری و زاهد، ۱۳۹۲) ضرب شده است. به همین ترتیب مسافت بین دو شهر در میزان تولید گاز دی اکسید کربن خودرو به ازای یک تن-کیلومتر (عامری و زاهد، ۱۳۹۲) ضرب شده تا پارامترهای میزان آلایندگی گاز دی اکسید کربن حاصل از حمل یک تن (شیشه یا مواد اولیه) بین نقاط مختلف و به تفکیک وسایل نقلیه حاصل شود. سایر پارامترهای هزینه‌ای در مدل مانند قیمت تمام شده هر محصول تولیدی از مواد اولیه و بازیافتی و یا هزینه‌های نگهداری کسری از قیمت یک تن محصول در نظر گرفته شده و هزینه‌ها در هر فصل ۵ درصد نسبت به فصل قبل متورم شده‌اند. میزان آلایندگی حاصل از تولید یک تن شیشه از مواد اولیه ۴۵۳ گرم در تمام دوره‌ها و برای همه محصولات در نظر گرفته شده و ۸۰ درصد آن برای حالتی که محصولات از مواد بازیافتی تولید شوند، در نظر گرفته شده است (عمرانی و همکاران، ۱۳۸۸).

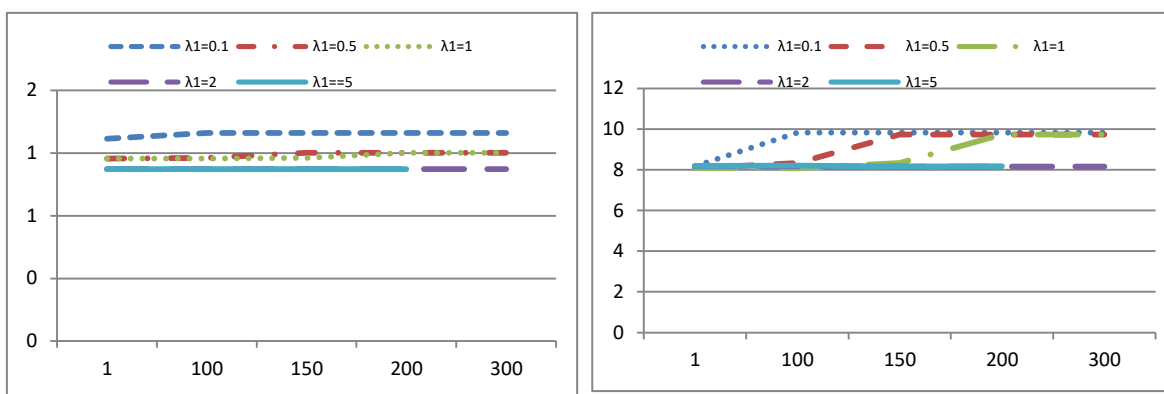
ابتدا مسئله برای اساس داده‌ها در حالت قطعی بازنویسی شده است. مقادیر تقاضا و برگشتی از هر مشتری در هر دوره و به تفکیک نوع محصول به صورت قطعی در نظر گرفته شده‌اند. جهت یکسان‌سازی مقیاس بخش‌های مختلف تابع هدف، مسئله تنها با یک جزء تابع هدف و با تابع ماکزیمم‌سازی حل شده و بر اساس رابطه (۵۵)، جزء مورد نظر در مدل پیشنهادی استاندارد شده است. جهت تبدیل مسئله تک هدفه به چند هدفه از روش L-P متریک (رابطه (۵۵)) استفاده شده تا مسئله به یک مدل ریاضی تک هدفه تبدیل شود. شکل زیر مقدار دو تابع هدف هزینه و میزان آلایندگی را به ازای درجه اهمیت مختلف اهداف نشان می‌دهد.



شکل ۲. تبادل مقدار توابع هدف نرمال شده

همانطور که در شکل ۲ مشخص است با افزایش ضریب اهمیت تابع هدف آلاینده‌گی، مقدار تابع هدف استاندارد شده آلاینده‌گی کاهش یافته است. به ازای مقدار ضریب $w = 0.75$ تابع هدف هزینه‌های زنجیره تأمین برابر مقدار تابع هدف میزان انتشار آلودگی است و به ازای مقادیر کمتر از آن، تابع هزینه کمتر بوده است. به منظور بیان عدم قطعیت، سه سناریو طرح شده که در آن‌ها مقادیر تقاضا و برگشتی هر مشتری به ازای هر دوره و محصول مقادیر قطعی و در سه سطح زیاد، متوسط و کم در نظر گرفته شده است و احتمال رخ داد هر سناریو 0.25 ، 0.5 و 0.25 می‌باشد. به این معنی که سه مقدار برای تقاضای یک مشتری خاص به یک محصول در یک دوره تحت عنوان مقدار کم، متوسط و زیاد با احتمالات بیان شده تعریف شده است. به طور مشابه سه مقدار برگشتی از مشتری به مراکز بازیافت در یک دوره و یک محصول خاص تحت عنوان سه سناریو تعریف شده است. مدل در حالت عدم قطعیت با داده‌های مطالعه موردی در نرم افزار لینگو و واسط کاربری اکسل کدنویسی و اجرا شده است. نتایج حل مدل با پارامترهای $w = 0.8$ و $\lambda_1 = \lambda_2 = w = 1$ بیانگر آن است که تمام مراکز منتخب تولید باید احداث شوند و تنها مرکز جمع‌آوری در تبریز و مرکز انهدام در شهر زاهدان نیاز به احداث دارند. با توجه به

کمتربودن هزینه‌های احداث در این دو شهر نسبت به موارد مشابه و هزینه‌ها و تواتر حمل و نقل بین مراکز تولید و مشتریان بین آنها نتایج حاصل شده منطقی به نظر می‌رسند. در این شرایط مقدار امید ریاضی بهینه توابع هدف اول و دوم به ترتیب $۸/۰۷$ و $۱/۱۲$ میلیارد ریال و گرم تعیین شده است. نمودارهای شکل ۳ اثر پارامترهای مدل را با ثابت در نظر گرفتن $w = 0.8$ و $\lambda_2 = 1$ بر جواب‌های بهینه تابع هدف اول و دوم نشان می‌دهند.



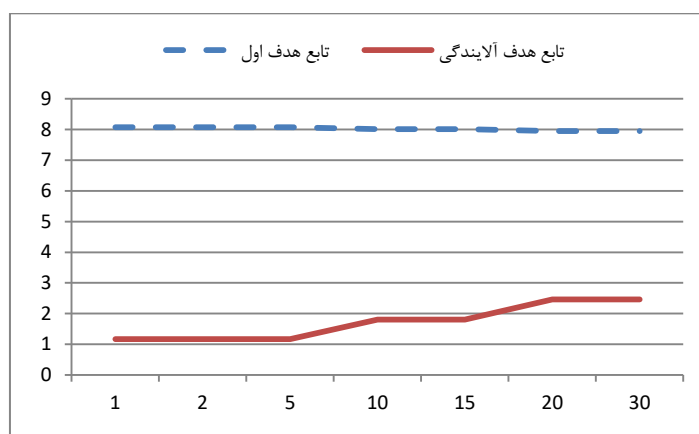
نمودار الف- تغییرات تابع هدف اول

نمودار ب- تغییرات تابع هدف دوم

شکل ۳. تحلیل حساسیت توابع هدف بر اساس پارامترهای w و λ_1

نمودار الف، تغییرات تابع هدف اول را به ازای تغییرات پارامترهای w و λ_1 نشان می‌دهد. به ازای λ_1 های بزرگتر از ۲ همانطور که مشخص است مقدار تابع هدف اول تغییری ندارد زیرا با افزایش λ_1 و افزایش اهمیت بخش واریانس تابع هدف اول، مقدار پراکندگی تابع هدف در رابطه (۲۴) صفر می‌شود. در نمودار الف، به ازای هر یک از λ_1 های کوچکتر از ۲، با افزایش مقدار w (محور افقی نمودار) مقدار تابع هدف افزایش یافته است. ضریب w در تابع هدف (۲۴)، توازن بین بهینگی و موجه بودن را نشان می‌دهد. با افزایش مقدار آن، اهمیت موجه بودن نسبت به بهینگی بیشتر می‌شود و قاعدتاً باید مقدار انتظاری تابع هدف در این حالت افزایش یابد. همانطور که در این شکل مشخص است، مدل در تابع هدف اول

نسبت به مقادیر ω های بزرگتر از ۲۰۰ حساسیت ندارد. زیرا جریمه انحراف از موجه بودن در محدودیت‌ها به صفر میل می‌کند. از نمودار ب در شکل ۳ مشخص است همانطور که انتظار می‌رود (تابع هدف دوم وابسته به ω نیست)، تابع هدف دوم نسبت به مقدار ω حساسیت چندانی ندارد. اما با کاهش مقدار λ_1 ، مقدار تابع هدف دوم نیز تاثیر می‌پذیرد و مقدار آن افزایش می‌یابد.



شکل ۴. تحلیل حساسیت توابع هدف بر اساس پارامتر λ_2

شکل ۴، تغیی‌رات تابع هدف نسبت به تغیی‌ر پارامتر λ_2 را در شرایطی که سایر پارامترها $w = 0.8$ و $(\lambda_1 = \omega = 1)$ ثابت باشند، نشان می‌دهد. تا λ_2 برابر ۵ تغییری در مقدار امید ریاضی توابع هدف ایجاد نمی‌شود. اما در فاصله ۵ تا ۲۰، با افزایش مقدار λ_2 (درجه اهمیت بخش پراکندگی تابع هدف دوم) مقدار تابع هدف دوم افزایش می‌یابد. زیرا باید به مقدار امید ریاضی تابع هدف دوم اضافه شود تا بخش پراکندگی کاهش یابد. همانطور که مشخص است، تغییر این پارامتر همانطور که انتظار می‌رود، تاثیری بر مقدار امید ریاضی تابع هدف اول ندارد.

بر این اساس تصمیم گیرنده با توجه به ارجحیت‌های خود نسبت به پارامترهای اهمیت نسبی اهداف (w)، اهمیت پراکندگی مقدار توابع هدف (λ_1) و (λ_2) و انحراف از موجه بودن

محدودیت‌ها (ω) قادر خواهد بود، مقادیر مناسب برای مسئله را انتخاب و بر اساس آن مسئله را حل و مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم را برگزیند.

نتیجه‌گیری

توجه به مسائل زیست محیطی در سال‌های اخیر موضوع طراحی زنجیره‌های تأمین سبز را دو چندان کرده است. توجه به مسئله بازیافت محصولات پس از پایان عمر مفید خود، تولید و انتشار انواع آلاینده‌های زیست محیطی با منشاء تولید و حمل و نقل در موضوع طراحی زنجیره‌های تأمین حلقه بسته اهمیت پیدا کرده است. زنجیره‌های تأمین حلقه بسته شامل دو جریان رو به جلو و معکوس می‌باشد که در جریان رو به جلو مواد اولیه از تأمین‌کنندگان با کیفیت‌های متفاوت خریداری و به مراکز تولید حمل می‌شوند. با توجه تقاضای مشتریان برای محصولات مختلف در دوره‌های مختلف برنامه‌ریزی، کالاهای مورد نیاز به مشتریان ارسال می‌گردد. کالاهای بازگشتی از مشتریان جمع‌آوری به مراکز بازرسی ارسال می‌شوند. درصدی از کالاهای بازگشتی برای استفاده مجدد (بازیافت) به مراکز تولید ارسال می‌شوند و مابقی برای انهدام به مراکز انهدام ارسال می‌گردند. تعیین مکان احداث مراکز تولید، بازرسی و انهدام در زنجیره تأمین حلقه بسته با محصولات متنوع برای چندین دوره برنامه‌ریزی از جمله تصمیم‌های راهبردی مسئله طراحی زنجیره تأمین است. تصمیمات بهینه راهبردی وابسته به تصمیمات عملیاتی مانند میزان جریان‌های بین مراکز، موجودی‌های هر مرکز، مقدار سفارشات از دست رفته و غیره دارد. این تصمیمات باید با توجه به کاهش هزینه‌ها و درنظر گرفتن مسائل زیست محیطی اتخاذ شوند. در این مقاله، مدل برنامه‌ریزی خطی دو هدفه‌ای برای تعیین متغیرهای راهبردی و عملیاتی زنجیره‌های تأمین حلقه بسته پیشنهاد شده است. تولید، تأمین و بازیافت چندین نوع محصول در زنجیره و در نظر گرفتن افق برنامه‌ریزی بلند مدت (چند دوره‌ای) به همراه لحاظ کردن اهداف هزینه‌های تولید، نگهداری و حمل و نقل و میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن در کل دوره‌های برنامه‌ریزی از ویژگی‌های مدل پیشنهادی است. از آنجا که عدم قطعیت به خصوص در تقاضا و میزان کالای برگشتی بر جواب‌های

بهینه مسئله تاثیر می‌گذارد، مدل پیشنهادی در حالت غیر قطعی پارامترها توسعه داده شده است. مدل بهینه‌سازی استوار دو هدفه‌ای ارائه شده قادر است با تبادل بین اهداف، بهینگی و موجه بودن جواب‌های بهینه مورد نظر تصمیم‌گیرنده را تعیین نماید. زنجیره‌تأمین و بازیافت انواع بطری‌های شیشه‌ای که در کارخانجات محصولات نوشیدنی استفاده می‌شوند مشابه زنجیره تأمین مورد مطالعه این مقاله است. ضمن تعریف دقیق مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته شیشه، مسئله با داده‌های واقعی مدل‌سازی و حل شده است. دستیابی به جواب‌ها و خروجی‌های قابل انتظار و انجام تحلیل حساسیت روی پارامترهای مدل در کنار تایید اساتید و خبرگان همه بیانگر اعتبار کافی مدل پیشنهادی است. اضافه کردن اهداف دیگر زیست محیطی به همراه لحاظ کردن ریسک حمل مواد خطرناک به مدل، بررسی درجه پیچیدگی مسئله و توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل آن می‌تواند پیشنهاد‌های آتی این پژوهش باشد.

منابع

اصغریپور، محمد جواد (۱۳۸۸)، *تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره*، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران .

عامری، محمود، زاهد، فاطمه (۱۳۹۲)، «برآورد هزینه خارجی گرمایش جهانی ناشی از بهره برداری آزادراه‌های کشور»، *محیط‌شناسی*، سال سی و نهم، شماره ۳، ص ۲۱۲-۲۰۱.

عمرانی، قاسم علی، منوری، سید مسعود، جوزی، سید علی، زمانی، ندا (۱۳۸۸)، «مدیریت بازیافت شیشه در شهر تهران»، *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، دوره یازدهم، شماره ۴، ص. ۵۰-۴۱.

یحیی‌زاده اندواری، یلدا، الفت، لعیبا و امیری، مقصود (۱۳۹۵)، «رویکرد بهینه‌سازی استوار در انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش»، *مطالعات مدیریت صنعتی*، سال چهاردهم، شماره ۴۰، ص ۵۲-۲۵.

Amaro, A. and Barbosa-Póvoa, A.P.F (2009), "The effect of uncertainty on the optimal closed-loop supply chain planning under different partnerships structure", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 33, No. 12, PP: 2144-2158.

Amin, S. H. and Baki, F (2017), "A facility location model for global closed-loop supply chain network design", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 41, PP: 316-330.

Amin, S.H. and Zhang, G (2013), "A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 6, PP: 4165-4176.

Amin, S.H., Zhang, G. and Akhtar, P (2017), "Effects of Uncertainty on a Tire Closed-loop Supply Chain Network", *Expert Systems with Applications*, Vol. 73, No. 1, PP: 81-91.

Baghalian, A., Rezapour, S. and 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*, Vol. 227, No.1, PP: 199-215.

Bekmann M. and Kunzi H. P (1996), *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems Theories and Applications*, Springer, (Multi-Objective Programming and Goal Programming).

Cardoso, S.R., Barbsosa-Plvoa, A.P. and Revas, S (2016), "Integrating financial risk measures into the design and planning of closed-loop supply chains", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 85, PP: 105-123.

Dutta, P., Das, D., Schultmann, F. and Frohling, M (2016), "Design and planning of a closed-loop supply chain with three way recovery and buy-back offer", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 135, PP: 604-619.

Fallah, H., Eskandari, H. and Pishvaei, M.S (2015), "Competitive closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 37, No. 3, PP:649-661.

Farrokh, M., Azar, A., Janaghi, G. and Ahmadi, E (2017), "A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty", *Fuzzy Sets and Systems*, In Press.

Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J.M. and Wassenhove, L.N. (2001), "The impact of product recovery on logistics network design", *Production and Operations Management*, Vol. 10, No. 2, PP:156-173.

Gaur, J., Amini, M. and Rao, A. K (2017). "Closed-loop supply chain configuration for new and recinditioned products", An integrated optimization model, *Omega*, Vol. 66, Part B, PP: 212-223.

Govindan, K. and Soleimani, H (2017), "A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a Journal of Cleaner Production focus", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 142, Part 1, PP: 371-384.

Govindan, K., Soleimani, H. and Kannan, D (2015), "Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future", *European Journal of Operational Research*, Vol. 240, No. 3, PP: 603-626.

Keyvanshokoo, E., Ryan, S.M. and Kabir, E (2016), "Hybrid robust and stochastic optimization for closed loop supply chain network design

using accelerated Benders decomposition”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 249, No. 1, PP: 76-92.

Ko, H.J. and Evans G.W (2007), “A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs”, *Computers & Operations Research*, Vol. 34, No. 2, PP: 346-366.

Lee, D.H. and Dong M (2009), “Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 45, No. 1, PP: 61-71.

Lee, D.H. and Dong, M (2008), “A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 44, No. 3, PP: 455-474.

Leung, S., Tsang, S., Ng, W.L. and Wu, Y (2007), A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 181, PP: 224-238.

Lu, Z. and Bostel N (2007), “A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities”, *Computers & Operations Research*, Vol. 34, No.2, PP: 299-323.

Ma, R., Yao, L., Jin, M., Ren, P. and Lv, Z (2016), “Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty”, *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 89, PP: 195-202.

Melo, M.T., Nickel, S., and Saldanha-da-Gama, F (2009), "Facility location and supply chain management—A review", *European Journal of Operational Research*, Vol.196, No.2, PP: 401-412.

Meysam, S.K., Maghsud, S., Ali, D (2016) “An integrated supply chain configuration model and procurement management under uncertainty: a set-based robust optimization methodology”, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 40, No. 117-18, PP: 7928-7947.

Min, H. and Ko, H.-J (2008), “The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 113, No. 1, PP: 176-192.

Mohajeri, A. and Fallah, M (2016), "A carbon footprint-based closed-loop supply chain model under uncertainty with risk analysis: A case study", *Transportation Research Part D*, Vol. 48, PP: 425-450.

Mohammed, F., Selim, S. Z., Hassan, A. and Syed, M.N (2017), "Multi-period planning of closed-loop supply chain with carbon policies under uncertainty", *Transportation Research Part D*, Vol. 51, PP: 146-172.

Moshtagh, M.S. and Taleizadeh, A.A (2017), "Stochastic integrated manufacturing and remanufacturing model with shortage, rework and quality based return rate in a closed loop supply chain", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 141, PP: 1548-1573.

Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J., and Zenios, S.A (2005), "Robust optimization of large-scale systems", *Operations research*, Vol. 43, No. 2, PP: 264-281.

Özkır, V. and Başlıgil, H (2013), "Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 41, PP: 114-125.

Pishvae, M. and Torabi, S (2010), "A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Fuzzy sets and systems*, Vol. 161, No. 20, PP: 2668-2683.

Pishvae, M.S., Farahani, R.Z. and Dullaert, W (2010a), "A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design", *Computers & Operations Research*, Vol. 37, No. 6, PP: 1100-1112.

Pishvae, M.S., Jolai, F., and Razmi, J (2009), "A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 28, No.4, PP. 107-114.

Pishvae, M.S., Rabbani, M., and Torabi S.A (2011), "A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 35, No. 2, PP: 637-649.

Ramezani, M., Bashiri, M. and Tavakkoli-Moghaddam, R (2013a), "A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic

network design with responsiveness and quality level", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 1, PP: 328-344.

Ramezani, M., Bashiri, M. and Tavakkoli-Moghaddam, R (2013b), "A robust design for a closed-loop supply chain network under an uncertain environment", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 5-8, PP: 825-843.

Ramezani, M., Kimiagari, A.M. and Karimi, B (2014a), "Closed-loop supply chain network design: A financial approach", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 38, No. 15-16, PP:4099-4119.

Ramezani, M., Kimiagari, A.M., Karimi, B. and Hejazi, T.H (2014b), "Closed-loop supply chain network design under a fuzzy environment", *Knowledge-Based Systems*, Vol. 59, PP: 108-120.

Rezapour, S., Farahani, R.Z., Fahimnia, B., Govindan, K. and Mansouri, Y. (2015), "Competitive closed-loop supply chain network design with price-dependent demands", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 93, PP: 251-272.

Salema, M., Póvoa, A. and Novais A (2006), "A warehouse-based design model for reverse logistics", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 57, No.6, PP: 615-629.

Salema, M.I.G., Barbosa-Povoa, A.P. and Novais, A.Q (2007), "An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty", *European Journal of Operational Research*, Vol. 179, No. 3, PP: 1063-1077.

Sarkar, B., Ullah, M. and Kim, N (2017), "Environmental and economic assessment of closed-loop supply chain with remanufacturing and returnable transport items", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 111, PP: 148-163.

Soleimani, H. and Kannan G (2015), "A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed-loop supply chain network design in large-scale networks", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 39, No. 14, PP: 3990-4012.

Souza, G. C (2013), "Closed-Loop Supply Chains: A Critical Review, and Future Research", *Decision Sciences*, Vol. 44, No. 1, PP: 7-38.