

## چکیده

امروزه با ظهور مفاهیم مدیریت ریسک و پایداری و تشدید فشارهای اجتماعی برای کاهش تأثیرات منفی فعالیت صنایع بر محیط زیست و اجتماع، اتخاذ تصمیماتی مانند طراحی شبکه زنجیره تأمین (SCND) بدون توجه به این ملاحظات تقریباً ناممکن است. در این مقاله با ترکیب ملاحظات مدیریت ریسک اختلال و پایداری (با تمرکز بیشتر بر جذبه های اجتماعی)، یک مدل کلی برنامه ریزی خطی عدد صحیح آمیخته (MILP) چندهدفه برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط اختلال تأمین مواد توسعه داده شد. شبکه زنجیره تأمین طراحی شده، زنجیره ای چندسطحی و چندمحصولی با حمل و نقل چندگانه است. رخدادهای تحریم به عنوان عامل اختلال تأمین مواد اولیه به صورت سناریوهای اختلال در مبادی تأمین مواد در مسأله در نظر گرفته شد. مهمترین متغیرهای تصمیم این مدل مربوط هستند به: انتخاب تأمین کنندگان، مقدار سفارش از هر ماده اولیه، استقرار انواع تسهیلات، جریان بین تسهیلات و نوع و سیله حمل و نقل. در نهایت برای سنجش اثربخشی و کاربردی بودن مدل پیشنهادی، به عنوان یک مورد مطالعه دنیای واقعی، یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت تایر ایران طراحی گردید و روی برخی پارامترهای مهم مسأله تحلیل حساسیت صورت گرفت.

کلید واژه:

طراحی شبکه زنجیره تأمین، پایداری، اختلال، تحریم، مدل ریاضی.

## طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار در شرایط تحریم

عزت‌اله اصغری زاده

دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده

مدیریت، دانشگاه تهران

asghari@ut.ac.ir

سید علی ترابی

استاد گروه کسب و کار، دانشکده مهندسی

صنایع، دانشگاه تهران

satorabi@ut.ac.ir

علی محقر

استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده

مدیریت، دانشگاه تهران

amohaghar@ut.ac.ir

محمدعلی زارع شوریجه

دانشجوی دکتری تحقیق در عملیات،

دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران

maz.shourijeh@ut.ac.ir

## مقدمه

زنجیره تأمین دارای موضوعات و مسائل متعددی است که می‌توانند در سه سطح طبقه‌بندی شوند [۱]: الف- سطح عملیاتی (مانند زمان‌بندی)، ب- سطح تاکتیکی (مانند تصمیمات خرید و تولید) و ج- سطح استراتژیک مانند مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین.

طراحی شبکه زنجیره تأمین تأثیر بسزایی بر عملکرد و هزینه‌های آینده آن زنجیره خواهد داشت. در مسأله SCND، شبکه‌ای متشکل از واحدهای زنجیره تأمین، با توجه به الزامات طراحی محصول و فرآیند، ایجاد می‌شود. این کار شامل مجموعه‌ای از مسائل از جمله تعیین مکان و نقش واحدهای زنجیره تأمین، تخصیص محصولات، برنامه‌ریزی ظرفیت در سطح استراتژیک و برقراری ارتباطات حمل و نقلی است [۲]. اما شاید بتوان گفت کلیدی‌ترین تصمیم در SCND، مکان‌یابی تسهیلات در لایه‌های (سطوح) مختلف زنجیره تأمین باشد [۳]. به طور سنتی بیشتر مطالعات SCND بر اهداف اقتصادی (کمینه کردن هزینه‌ها و/یا بیشینه کردن سود شبکه) تمرکز داشته‌اند؛ اما امروزه تصمیمات مربوط به SCND بشدت تحت تأثیر رویکردهای توسعه پایدار و گسترش خواسته‌های اجتماعی و زیست محیطی ذینفعان، و مبحث مدیریت ریسک و حوادث پیش‌بینی نشده قرار گرفته‌اند [۳، ۴]. زنجیره تأمین سبز، زنجیره تأمین پایدار و زنجیره تأمین تاب‌آور از مهمترین واکنش‌های مطرح در پاسخ به این روندها هستند که توجه صرف به بهیمنی اقتصادی را به چالش کشیده‌اند [۳، ۵].

در زنجیره تأمین سبز بر طراحی محصول، طراحی شبکه‌های بازیابی محصول و استفاده کارا تر از ظرفیت حمل و نقل برای کاهش معضلات زیست محیطی تأکید می‌شود

[۳]. اما مفهوم پایداری، وسیع‌تر و برگرفته از تعریف کمیسیون جهانی محیط و توسعه (WCED) از توسعه پایدار می‌باشد: «توسعه‌ای که نیازهای نسل حاضر را تأمین کند بدون آنکه به توانایی نسل‌های آینده در برآوردن نیازهایشان لطمه‌ای وارد سازد» [۶]. الکینگتون (۱۹۹۴) برای اولین بار پایداری را در قالب مفهوم سه‌گانه سود و زیان (TBL) معرفی کرد. TBL ابزاری است که از طریق اندازه‌گیری تأثیر فعالیت‌های یک سازمان بر اقتصاد، اجتماع و محیط زیست، ذات پایداری را مجسم می‌کند [۷]. براساس تعریف WCED از پایداری و TBL، می‌توان زنجیره تأمین سبز و زنجیره تأمین معکوس و حلقه بسته را نیز زیرمجموعه مباحث زنجیره تأمین پایدار در نظر گرفت زیرا راهی برای حفظ محیط زیست، برآوردن انتظارات اجتماعی و برخورداری از مزایای اقتصادی اقلام بازیابی و بازسازی شده هستند [۸، ۹]. لجستیک معکوس در اصل، حرکت محصول یا مواد در جهت عکس برای خلق یا کسب مجدد ارزش یا برای دفع و انهدام صحیح پسماندها است [۱۰].

اخیراً مباحث مربوط به مدیریت ریسک و تاب‌آوری زنجیره تأمین نیز تأثیر قابل توجهی بر SCND گذاشته‌اند. به منظور اجتناب از اثرات منفی مختل شدن یک عضو بر اعضای دیگر زنجیره و ایجاد ثبات در ارزش افزوده اعضای زنجیره تأمین، باید ریسک‌ها مدیریت شوند. در یک تقسیم‌بندی مشهور، تنگ (۲۰۰۶)، ریسک‌های زنجیره تأمین را در دو نوع کلی دسته‌بندی می‌کند [۱۱]: ریسک‌های عملیاتی (مربوط به عدم قطعیت‌های ذاتی مانند تقاضای غیرقطعی مشتری) و ریسک‌های اختلال (مربوط به اختلالات ناشی از فجایع طبیعی یا انسانی هستند مانند زلزله، طوفان، حملات تروریستی و تحریم). مدیران باید وقوع اختلال‌ها در زنجیره تأمین را پیش‌بینی و خود را برای هر نوع حادثه اختلال‌آفرین، آماده کنند. اقدامات پیش‌گیرانه و پیش‌نگری در برابر اختلال‌ها از مؤلفه‌های اصلی این آمادگی است [۱۲]. در پژوهش حاضر برآن هستیم مدلی ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته با ملاحظه هم‌زمان مباحث پایداری و ریسک اختلال تحریم مواد اولیه پیشنهاد نماییم. بخش‌های بعدی مقاله بدین شرح است: در ادامه، برخی از مهمترین تحقیقات صورت گرفته در این حوزه را مرور می‌کنیم. در بخش سوم و چهارم به ترتیب مسأله توصیف می‌گردد و مدل ریاضی پیشنهادی ارائه خواهد شد و سپس به کمک تحلیل حساسیت، نتایج مورد بحث قرار می‌گیرد و در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه خواهد شد.

## ۱. مرور ادبیات

پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه SCND پیشینه‌ای طولانی دارند. در ادامه برخی از مهمترین پژوهش‌های این حوزه به طور مختصر از نظر خواهد گذشت.

کراسو و همکاران (۱۹۹۳) با استفاده از یک مدل ریاضی خطی چندهدفه، زنجیره تأمین برای یک سیستم مدیریت پسماندهای شهری را طراحی کردند [۱۳]. فلیشمن و همکاران (۲۰۰۱) یک زنجیره تأمین حلقه بسته را با استفاده از یک مدل خطی آمیخته عدد صحیح برنامه‌ریزی کردند و اثر بازیابی محصولات را بر طراحی شبکه لجستیک مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. کریک و همکاران (۲۰۰۳) در تحقیقی دیگر با استفاده از یک مدل ریاضی چند هدفه و خطی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند سطحی را طراحی کردند. در مدل مذکور هم‌زمان چند محصول مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. سالیمان و همکاران (۲۰۰۶) یک شبکه زنجیره تأمین مبتنی بر انبار با ظرفیت محدود برای یک لجستیک معکوس را طراحی نمودند. آنها از یک مدلی خطی تحت شرایط عدم قطعیت بهره بردند [۱۶]. گیلین-گسلبنز و گراسمن (۲۰۰۹) مدلی را برای طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین مواد شیمیایی ارائه و برای حل آن از روش محدودیت آپسیلون استفاده کردند. طراحی مدل مذکور به صورت چند هدفه و غیرخطی و در شرایط عدم قطعیت بود [۱۷]. در سال ۲۰۱۰ مقالات متعددی از صاحب‌نظران این حوزه منتشر گردید. از جمله، کزن، سسیکومار و بویکا (۲۰۱۰) که مدلی خطی برای طراحی زنجیره تأمین ۴ سطحی به منظور بازیافت باتری توسعه دادند و از الگوریتم ژنتیک برای حل آن بهره بردند. این مدل به صورت چند دوره‌ای و چند محصولی طراحی گردید [۱۸]. بوزمیراک و همکاران (۲۰۱۰)، مدلی خطی و چند هدفه با فرض تسهیلات با ظرفیت محدود و حمل‌ونقل چندگانه برای زنجیره تأمین بازیافت رسوبات آبراهه‌ها پیشنهاد کردند [۱۹].

چابنه و همکاران (۲۰۱۲) مدلی خطی و چند هدفه با در نظر گرفتن دوره‌های برنامه‌ریزی چندگانه برای کاهش آلاینده‌های محیطی با استفاده از طرح تجارت انتشار گازهای گلخانه‌ای در یک زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهاد کردند [۲۰]. دیابت و همکاران (۲۰۱۳) برای طراحی یک زنجیره تأمین ۴ سطحی حلقه بسته، مدلی خطی با در نظر گرفتن چند محصول پیشنهاد نمودند [۲۱]. صفار و همکاران در دو پژوهش در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ مدل‌هایی خطی و چندهدفه در شرایط عدم قطعیت برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز ارائه نمودند. آنها از ترکیب الگوریتم ژنتیک، مجموعه‌های فازی و روش محدودیت آپسیلون برای حل مدل‌های نهایی خود بهره گرفتند [۲۲، ۲۳]. گاویندن و همکاران (۲۰۱۶) برای طراحی یک شبکه لجستیک معکوس از یک مدل بهینه سازی فازی بهره گرفتند. در مدل مذکور ظرفیت

تسهیلات محدود و افق برنامه‌ریزی چند دوره‌ای فرض شده است. در این مدل شرایط محیط کار و مسئولیت اجتماعی نیز به عنوان جنبه‌هایی از پایداری در نظر گرفته شده است [۲۴].

سلیمانی و همکاران (۲۰۱۷) مدلی چند هدفه و فازی با در نظر گرفتن ملاحظات محیطی و اجتماعی برای طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهاد کردند. این زنجیره شامل تأمین‌کنندگان، کارخانه تولیدی، مراکز توزیع، مشتریان، انبارها، مراکز برگشت و مراکز بازیافت بود [۲۵]. بابازاده و همکاران (۲۰۱۷) مدلی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار برای بیودیزل نسل دوم، تحت شرایط ریسک پیشنهاد کردند. آنها از برنامه‌ریزی چند هدفه امکانی برای کمینه کردن هزینه‌ها و تأثیرات منفی بر محیط زیست استفاده کردند و در نهایت از روش محدودیت اِپسیلون برای حل بهره گرفتند [۲۶]. موتا و همکاران (۲۰۱۸) مدلی برای طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه نمودند. حمل و نقل چندگانه و متغیر تصمیم انتخاب تکنولوژی در یک برنامه‌ریزی ریاضی تصادفی از ویژگی‌های این مدل است [۲۷]. زربخش‌نیا و همکاران (۲۰۱۹) به منظور طراحی لجستیک سبز مستقیم و معکوس از مدل چندهدفه و خطی جدیدی استفاده کردند. دو تابع هدف، به ترتیب هزینه‌های کل و میزان انتشار CO<sub>2</sub> را کمینه و تابع هدف سوم تعداد بهینه ماشین‌های مور نیاز خط تولید را تعیین نمودند. آنها از روش محدودیت اِپسیلون برای حل مدل استفاده کردند [۲۸].

بررسی ادبیات نشان می‌دهد متغیرهای تصمیم عمده در مدل‌های SCND، متغیرهای صفر و یک هستند که مربوط به مکان تسهیلات، تصمیمات ساینزینگ (تعیین اندازه)، انتخاب سطوح تکنولوژی مناسب و انتخاب حالات حمل و نقل بین تسهیلات می‌باشند [۴]. مدل‌های SCND معمولاً چندهدفه با اهداف اقتصادی-محیطی یا در مواردی اقتصادی-محیطی-اجتماعی هستند. مدل‌های چندهدفه، اهداف متنوع و معمولاً در تضاد با هم را در نظر می‌گیرند و لذا مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو را حاصل می‌کنند [۲۹، ۳۰]. سهم بسیار اندک ملاحظات اجتماعی در SCND آشکار است و مقالات مروری منتشر شده در این حوزه (از جمله [۳، ۴]) نیز این امر را تأیید می‌کنند. خلاصه‌ای از مرور ادبیات و جایگاه تحقیق حاضر به همراه جنبه‌های مختلف هر پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

بررسی مستقیم ادبیات و نیز بررسی مهمترین مقالات مروری انجام شده در سال‌های اخیر ([۴، ۲۴، ۲۹، ۳۱، ۳۲]) تا حدود زیادی شکاف‌ها و بخش‌های فقیر این حوزه تحقیقاتی را مشخص کرده است:

جدول (۱): خلاصه‌ای از مرور ادبیات

سال	نویسنده‌گان	تابع هدف	خطی/غیرخطی	رابطه متغیرها	قطعییت	جریان معکوس/حلقه بسته	تسهیلات با ظرفیت محدود	چندمحصولی	حمل و نقل چندگانه	ملاحظات محیطی	ملاحظات اجتماعی	رویکرد مدل‌سازی
۲۰۱۰	Bouzembrak et al. [19]	M	L	C	*	*	*	*	*	*	*	MILP
۲۰۱۰	Guillén-Gosálbez & Grossmann [33]	M	NL	UC	*	*	*	*	*	*	*	MINLP
۲۰۱۲	Chaabane et al. [20]	M	L	C	*	*	*	*	*	*	*	MILP
۲۰۱۲	Pishvae et al. [34]	M	L	UC	*	*	*	*	*	*	*	MILP
۲۰۱۳	Abdallah et al. [35]	S	L	C	*	*	*	*	*	*	*	MILP
۲۰۱۳	Bouzembrak et al. [36]	S	L	C	*	*	*	*	*	*	*	MILP
۲۰۱۳	D i a b a t	S	L	C	*	*	*	*	*	*	*	MILP
	e t a l .											

```

</key></foreign-
keys><ref-type
name="Journal
Article">17</ref-
type><contributors><au-
thors><author>Diabat,
Ali</author><author>Ab-
dallah,
Tarek</author><author
>Al-Refaie,
Abbas</author><author
>Svetinovic,
Davor</author><author
>Govindan,
Kannan</author></auth-
ors></contributors><title
s><title>Strategic closed-
loop facility location
problem with carbon
market
trading</title><secondar-
y-title>IEEE
Transactions on
engineering
Management</secondary-
title></titles><periodical
><full-title>IEEE
Transactions on
engineering
Management</full-
title></periodical><page
s>398-
408</pages><volume>7
</volume><number>2</
number><dates><year>2
013</year></dates><isb-
n>0018-
9391</isbn></url>
</record></Cite></End
N
o
t
e

```

MILP	*	*	*	UC	L	M	Saffar et al. [22]	۲۰۱۴
MINLP	*			C	NL	M	Beheshtifar & Alimoahmadi [37]	۲۰۱۵
MILP	*	*	*	UC	L	S	Torabi et al. [38]	۲۰۱۶
NLP	*	*	*	C	NL	S	Tsao et al. [39]	۲۰۱۷
MILP	*	*	*	UC	L	M	Soleimani et al. [25]	۲۰۱۷
MINLP	*	*	*	UC	NL	M	Babazadeh et al. [26]	۲۰۱۷
MILP	*	*	*	UC	NL	M	Fattahi & Govindan [40]	۲۰۱۸
MILP	*	*	*	C	L	M	Zarbakhshnia et al. [28]	۲۰۱۹
MILP	*	*	*	UC	L	M	پژوهش حاضر	

M: چند هدفه؛ S: تک هدفه؛ L: خطی، NL: غیرخطی؛ C: قطعی، UC: غیرقطعی.

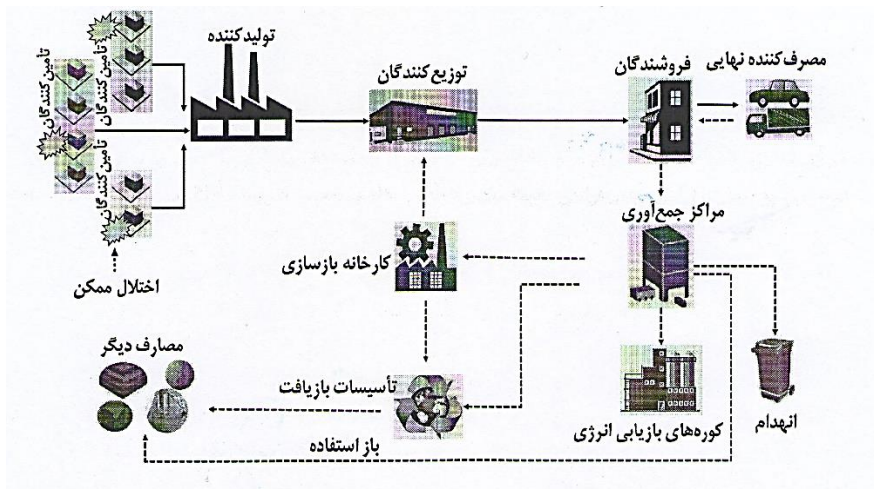
۱- با وجود تحقیقات فراوانی که تاکنون در حوزه SCND پایدار صورت گرفته است، اما هنوز تعداد تحقیقاتی که به طور ویژه به جنبه اجتماعی یا هر سه بعد پایداری پرداخته باشند بسیار اندک و بعضاً تکراری است [۳، ۴، ۲۷]؛ ۲- اکثر مطالعات انجام شده روی SCND، زنجیره‌های دو سطحی یا سه سطحی را بررسی کرده‌اند و تعداد تحقیقات دارای بالاتر از ۳ و ۴ سطح اندک است [۳]؛ ۳- در اغلب پژوهش‌های SCND، بحث تأمین و متغیرهای تصمیم انتخاب تأمین‌کنندگان درون مرز تحقیق قرار داده نشده‌اند و این قبیل تصمیمات به طور جداگانه در مسأله دیگری موسوم به «انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص (SS&OA)» مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ ۴- حوزه تحقیقاتی



SCND، از لحاظ در نظر گرفتن ریسک اختلال به ویژه در زمان طراحی شبکه زنجیره تأمین بسیار فقیر است؛ ۵- تحقیقاتی که همزمان به ریسک اختلال و ملاحظات پایداری در SCND پرداخته باشند بسیار کمیاب هستند؛ ۶- محصولات متعدد، حمل و نقل چندگانه، تعداد مواد اولیه متنوع و تأمین‌کنندگان ناهمگون و مختلف (داخلی و خارجی) از شاخصه‌های پیچیده‌کننده مدل‌های SCND است که در تحقیقات کمتری همزمان همه آنها در نظر گرفته می‌شوند؛ ۷- درصد بسیار کمی از تحقیقات انجام شده به مطالعه موردهای پژوهشی دنیای واقعی پرداخته‌اند. اکثر تحقیقات با نمونه‌های آزمایشگاهی (غیرواقعی) و گاه‌ب‌گاه بیش از حد انتزاعی آزمون شده‌اند. بر اساس آنچه گذشت، ما تحقیقی را که بتواند شکاف‌های فوق را به طور همزمان پوشش دهد، در ادبیات موضوع یافت نکردیم. همچنین تاکنون پژوهشی در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در محیط واقعی صنعت تیر (تولید، بازیافت، روکش) در ایران (و نیز خارج از کشور) با تأکید بر بعد اجتماعی پایداری انجام نشده است. در این پژوهش علیرغم ابعاد بزرگ و واقعی مسأله، برای نیل به جوابهایی با قابلیت اتکای حداکثری، مدل نهایی با الگوریتم دقیق CPLEX حل گردید.

## ۲. توصیف مسأله

در این تحقیق تلاش می‌کنیم با ترکیب ملاحظات رایج اقتصادی و ملاحظات پایداری با تمرکز بیشتر بر جنبه‌های اجتماعی، یک مدل ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط اختلال در تأمین مواد توسعه دهیم. رخداد تحریم (به عنوان عامل اختلال) می‌تواند تأمین مواد اولیه را در مقطعی مختل نماید. تحریم به صورت سناریوهای اختلال در مبادی تأمین مواد در نظر گرفته شده است. در هر سناریو امکان اختلال تأمین‌کنندگان مواد اولیه مستقل از یکدیگر وجود دارد. در سناریوی اول، عدم رخداد هر گونه اختلال در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): ساختار عمومی شبکه زنجیره تأمین مورد بررسی

همانطور که در شکل ۱ قابل مشاهده است در مسأله این پژوهش، جریان در زنجیره تأمین، از انتخاب تأمین‌کنندگان مختلف و خرید انواع مواد اولیه (تأمین چند ماده و هرکدام از چند منبع) آغاز می‌شود؛ همانطور که گفته شد امکان تحریم کارخانه تولیدی توسط هریک از تأمین‌کنندگان وجود دارد. در کارخانه تولیدی که مکانی مفروض دارد با انجام فرآیندهای لازم محصولات نهایی متعدد تولید می‌شود (چند محصولی) و به مراکز توزیع با ظرفیت‌های مختلف (چند سطح ظرفیت) ارسال می‌شود تا با توجه به تقاضای فروشندگان در پهنه جغرافیایی بازار هدف (شهرهای مختلف کل کشور) توزیع گردد. فروشندگان نقطه اتصال زنجیره تأمین رفت (مستقیم) و زنجیره تأمین برگشت هستند. آنها علاوه بر تحویل محصولات نو به مشتریان، محصولات مستعمل آنها را جمع‌آوری می‌کنند. محصولات مستعمل برگشتی به مراکز جمع‌آوری ممکن در نزدیکی فروشندگان ارسال می‌شود (این مراکز دارای ظرفیت‌های مختلف هستند) و پس از بررسی توسط کارشناسان، محصولات مستعمل فراخور شرایط برای یکی از پنج منظور بازسازی، بازیافت، بازاستفاده، بازیابی انرژی و انهدام دسته‌بندی و ارسال می‌شوند. محصولات مستعمل مناسب برای بازسازی، پس از انجام فرآیند بازسازی به عنوان محصولات بازسازی شده، مجدداً به مراکز توزیع و از آنجا به فروشندگان برای فروش به بازار ثانویه ارسال می‌شوند. محصولات مستعمل مناسب برای



بازیافت، پس از انجام فرآیند بازیافت به محصولات یا موادی تبدیل می‌شوند که برای کاربردهای دیگر قابل فروش به طرف‌های ثالث هستند. بخشی از محصولات مستعمل بدون اعمال هر گونه پردازش جدید، قابل بازاستفاده برای مصارف و کاربردهای غیر از موضوع کاربرد اصلی خود هستند. بخشی از محصولات مستعمل نیز برای بازیابی انرژی به عنوان سوخت به سایر کارخانجات (مثل کارخانجات سیمان، کاغذسازی و ...) ارسال می‌شوند. در صورت فقدان شرایط لازم برای هیچ یک از موارد فوق، محصول مستعمل جهت انهدام به مراکز انهدام ارسال خواهند شد.

این ساختار می‌تواند با بسیاری از زنجیره‌های تأمین حلقه بسته دنیای واقعی که دارای محصولات قابل بازیافت، قابل بازسازی یا قابل بازاستفاده هستند (به ویژه در کشور ایران که دائماً در معرض تحریم مواد اولیه یا واسطه‌ای است) منطبق شود. مدل نهایی نیز با آنکه با الهام از شبکه زنجیره تأمین لاستیک خودرو خلق شده است، اما ماهیتی عام و عمومی دارد و می‌تواند برای زنجیره‌های تأمین حلقه بسته در صنایع مختلف استفاده شود. مدل مذکور در بردارنده ۴ سطح در زنجیره تأمین مستقیم، ۳ تا ۴ سطح در زنجیره تأمین برگشت می‌باشد. ماهیت روابط بین متغیرهای مختلف مدل از نوع خطی و به دلیل در نظر گرفتن سناریوهای مختلف اختلال، ماهیتی غیر قطعی دارد. مدل، چند محصولی با حمل و نقل چندگانه بوده و ظرفیت تسهیلات و ظرفیت و سایل حمل و نقل، محدود در نظر گرفته شده است. همچنین سطوح ظرفیتی متعددی برای تسهیلات بالقوه جمع‌آوری و توزیع در نظر گرفته شد.

در این تحقیق شاخص مهاجرت (خالص جمعیت خروجی) شهرهای بالقوه استقرار تسهیلات، که نماینده شدت عواملی مانند بیکاری، فقر، نابرابری، توسعه نیافتگی محلی، ناامنی و استانداردهای پایین زندگی است [۴۳-۴۱] به عنوان شاخصی اجتماعی برای مکان‌یابی تسهیلات در نظر گرفته شد [۴۴]. اولویت‌دهی به خرید مواد اولیه از تأمین‌کنندگان داخلی، شاخص اجتماعی دیگری است که در راستای مشارکت در توسعه اجتماعی و اقتصاد بومی [۴۵، ۴۶] مورد توجه قرار گرفت. از آنجا که دسترسی مشتری به محصول [۴۷] و کسب رضایت مشتریان از شاخص‌های اجتماعی به شمار می‌آید [۴۸، ۴۹]، افزایش پاسخ‌گویی به مشتری و کمینه کردن تقاضای پوشش داده نشده در تابع هدف دوم را نیز می‌توان از ملاحظات اجتماعی مدل دانست. لازم به ذکر است به دلیل عمومی بودن مدل امکان اضافه کردن سایر اختلالات و نیز ملاحظات اجتماعی دیگر وجود دارد.

## ۱.۲. مفروضات مسأله

هر مدل در زمان طراحی دارای مفروضاتی است که محقق را در تمرکز بر نقاط مهمتر و برجسته‌تر مدل خود یاری می‌کند و باعث انتزاع مدلی شدنی و ساده‌تر از واقعیت می‌شوند. اهم مفروضات مدل فوق به شرح زیر می‌باشند:

- از زمان‌های انتظار حمل و نقل بین لایه‌های مختلف زنجیره چشم‌پوشی شده است؛
- تعداد محصولات مستعمل برگشتی، درصدی از کل تقاضای محصولات نو هر فروشنده است؛
- سطوح اولیه موجودی‌ها در کارخانه تولیدی، مراکز توزیع و جمع‌آوری صفر فرض شده است؛
- هزینه جمع‌آوری شامل تمامی هزینه‌ها تا در اختیار قرار گرفتن محصول مستعمل اعم از خرید محصول مستعمل و حمل آن تا فروشنده می‌باشد؛
- هزینه‌های حمل از مراکز جمع‌آوری به کوره‌های بازیابی انرژی، بازارهای ثالث و هزینه حمل از مراکز بازیافت تا بازار مصارف دیگر به عهده خریدار است و در مدل در نظر گرفته نشده است و
- هزینه‌های حمل و نقل تا مراکز انهدام در هزینه‌های انهدام دیده شده است.

## ۳. مدل‌سازی ریاضی

### ۱.۳. مدل عدد صحیح آمیخته پیشنهادی

روابط زیر مدل برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهادی را که از نوع خطی عدد صحیح آمیخته (MILP) است نشان می‌دهند. نمادگذاری‌های مربوطه (شامل مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم) در پیوست ۱ قابل مشاهده هستند.



$$\begin{aligned}
 \min TCOST = & \left( \sum_f^F FF_f \cdot YF_f + \sum_d^D \sum_l^L FD_{dl} \cdot YD_{dl} + \sum_c^C \sum_l^L FC_{cl} \cdot YC_{cl} + \sum_b^B FB_b \cdot YB_b \right) + \\
 & \left( \sum_f^F OF_f \cdot YF_f + \sum_d^D \sum_l^L OD_{dl} \cdot YD_{dl} + \sum_c^C \sum_l^L OC_{cl} \cdot YC_{cl} + \sum_b^B OB_b \cdot YB_b \right) + \\
 & \left( \sum_m^M \sum_a^{A_m} \sum_v^V XSP_{mav}^s \cdot MC_{ma} \right) + \left( \sum_p^P PC_p \cdot Q_p^s \right) + \left( \sum_{p''}^{P''} \sum_f^F RC_{p''f} \cdot Q_{p''f}^s \right) \\
 & + \left( \sum_{p''}^{P''} \sum_b^B BC_{p''b} \cdot Q_{p''b}^s \right) \\
 & + \left( \sum_{p'}^{P'} \sum_d^D \sum_v^V XPD_{pdv}^s \cdot WP_p \cdot PTC_{pv} \cdot PDD_d \right. \\
 & + \sum_{p'}^{P'} \sum_d^D \sum_r^R \sum_v^V XDR_{pdvr}^s \cdot WP_p \cdot PTC_{pv} \cdot DRD_{dr} \\
 & + \sum_{p'}^{P'} \sum_d^D \sum_r^R \sum_v^V XDR_{p'drv}^s \cdot WP_{p'} \cdot PTC_{p'v} \cdot DRD_{dr} \\
 & + \sum_{p''}^{P''} \sum_r^R \sum_c^C \sum_v^V XRC_{p''rcv}^s \cdot WP_{p''} \cdot PTC_{p''v} \cdot RCD_{rc} \\
 & + \sum_{p''}^{P''} \sum_c^C \sum_b^B \sum_v^V XCB_{p''cbv}^s \cdot WP_{p''} \cdot PTC_{p''v} \cdot CBD_{cb} \\
 & + \sum_{p''}^{P''} \sum_c^C \sum_f^F \sum_v^V XCF_{p''cfv}^s \cdot WP_{p''} \cdot PTC_{p''v} \cdot CFD_{cf} \\
 & + \sum_{p'}^{P'} \sum_f^F \sum_d^D \sum_v^V XFD_{p'fdv}^s \cdot WP_{p'} \cdot PTC_{p'v} \cdot FDD_{fd} \\
 & + \sum_{p''}^{P''} \sum_f^F \sum_b^B \sum_v^V XFB_{p''fbv}^s \cdot WP_{p''} \cdot PTC_{p''v} \cdot FBD_{fb} \\
 & \left. + \sum_m^M \sum_a^{A_m} \sum_v^V XSP_{mav}^s \cdot MTC_{mv} \cdot SPD_{ma} \right) \\
 & + \left( \sum_{p''}^{P''} \sum_r^R \sum_c^C \sum_v^V XRC_{p''rcv}^s \cdot GC_{p''} \right) + \left( \sum_{p''}^{P''} \sum_r^R \sum_c^C \sum_v^V XRC_{p''rcv}^s \cdot \varphi_{p''} \cdot LFC_{p''} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\min UMD = \sum_s^S \pi_s \left( \sum_{p'}^{P'} \sum_r^R SH_{pr}^s + \sum_{p''}^{P''} \sum_r^R SH_{p''r}^s \right) \tag{2}$$

$$\min Risk = Wm \cdot \sum_m^M \sum_a^{A_m} \omega_m \cdot SNLC_{ma} \cdot YS_{ma} + Wf \cdot \sum_f^F FNLC_f \cdot YF_f + Wb \cdot \sum_b^B BNLC_b \cdot YB_b \tag{3}$$

$$\sum_a^{A_m} \sum_v^V XSP_{mav}^s \leq DM_m, \quad \forall s \in S, \forall m \in M \tag{4}$$

$$\sum_a^{A_m} \sum_v^V XSP_{mav}^s = \sum_p^P Q_p^s \cdot WP_p \cdot \gamma_{mp}, \quad \forall s \in S, \forall m \in M \tag{5}$$

$$Q_p^s = \sum_d^D \sum_v^V XPD_{pdv}^s, \quad \forall s \in S, \forall p \in P \tag{6}$$

$$\sum_v^V XPD_{pdv}^s = \sum_r^R \sum_v^V XDR_{pdvr}^s, \quad \forall s \in S, \forall p \in P, \forall d \in D \tag{7}$$



$$\sum_d^D \sum_v^V XDR^s_{pdrv} = DP_{pr} - SH^s_{pr}, \quad \forall s \in S, \forall p \in P, \forall r \in R \quad (8)$$

$$\sum_d^D \sum_v^V \alpha_p \cdot XDR^s_{pdrv} = \sum_c^C \sum_v^V XRC^s_{p'rcv}, \quad \forall s \in S, \forall r \in R, \forall p \in P, p'' \in P'', p = p' \quad (9)$$

$$\sum_r^R \sum_v^V XRC^s_{p'rcv} \beta'_{p''} = \sum_f^F \sum_v^V XCF^s_{p''cfv}, \quad \forall s \in S, \forall p'' \in P'', \forall c \in C \quad (10)$$

$$\sum_r^R \sum_v^V XRC^s_{p'rcv} \beta_{p''} = \sum_b^B \sum_v^V XCB^s_{p''cbv}, \quad \forall s \in S, \forall p'' \in P'', \forall c \in C \quad (11)$$

$$(1 - (\varphi_{p''} + \varphi'_{p''} + \beta_{p''} + \beta'_{p''})) \cdot \sum_r^R \sum_v^V XRC^s_{p'rcv} = XCK^s_{p''c}, \quad (12)$$

$$\forall s \in S, \forall p'' \in P'', \forall c \in C$$

$$(1 - (\varphi_{p''} + \varphi'_{p''} + \beta_{p''} + \beta'_{p''})) \cdot \sum_r^R \sum_v^V XRC^s_{p'rcv} = XCO^s_{p''c}, \quad \forall s \in S, \forall p'' \in P'', \forall c \in C \quad (13)$$

$$\sum_r^R \sum_v^V XRC^s_{p'rcv} = \sum_b^B \sum_v^V XCB^s_{p''cbv} + \sum_f^F \sum_v^V XCF^s_{p''cfv} + \varphi_{p''} \cdot \sum_r^R \sum_v^V XRC^s_{p'rcv} \quad (14)$$

$$+ XCK^s_{p''c} + XCO^s_{p''c}, \quad \forall s \in S, \forall p'' \in P'', \forall c \in C$$

$$Q^s_{p''f} = \mu_{p''f} \cdot \sum_c^C \sum_v^V XCF^s_{p''cfv}, \quad \forall s \in S, \forall p'' \in P'', \forall f \in F \quad (15)$$

$$\sum_d^D \sum_v^V XFD^s_{p'fdv} = Q^s_{p''f}, \quad \forall s \in S, \forall p'' \in P'', \forall p' \in P', p'' = p', \forall f \in F \quad (16)$$

$$\sum_f^F \sum_v^V XFD^s_{p'fdv} = \sum_r^R \sum_v^V XDR^s_{p'drv}, \quad \forall s \in S, \forall p' \in P', \forall d \in D \quad (17)$$

$$\sum_d^D \sum_v^V XDR^s_{p'drv} = DP'_{p'r} - SH^s_{p'r}, \quad \forall s \in S, \forall p' \in P', \forall r \in R \quad (18)$$

$$\sum_b^B \sum_v^V XFB^s_{p''fbv} = (1 - \mu_{p''f}) \cdot \sum_c^C \sum_v^V XCF^s_{p''cfv}, \quad \forall s \in S, \forall p'' \in P'', \forall f \in F \quad (19)$$

$$Q^s_{p''b} = \sum_c^C \sum_v^V XCB^s_{p''cbv} + \sum_f^F \sum_v^V XFB^s_{p''fbv}, \quad \forall s \in S, \forall p'' \in P'', \forall b \in B \quad (20)$$

$$XBO^s_{hb} = \sum_{p''}^{P''} Q^s_{p''b} \cdot WP^s_{p''} \cdot \psi_{hp''}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H, \forall b \in B \quad (21)$$

$$\sum_l^L YD_{dl} \leq 1, \quad \forall d \in D \quad (22)$$

$$\sum_l^L YC_{cl} \leq 1, \quad \forall c \in C \quad (23)$$

$$Q^s_p \leq PCp_p, \quad \forall p \in P, \forall s \in S \quad (24)$$

$$\sum_v^V XSP^s_{mav} \leq (1 - sbp^s_{ma}) \cdot SCP_{ma} \cdot YS_{ma}, \quad \forall s \in S, \forall m \in M, \forall a \in A_m \quad (25)$$

$$\sum_{p''}^{P''} Q^s_{p''f} \leq FCP_f \cdot YF_f, \quad \forall s \in S, \forall f \in F \quad (26)$$

$$\sum_{p''}^{P''} Q^s_{p''b} \leq BCP_b \cdot YB_b, \quad \forall s \in S, \forall b \in B \quad (27)$$

$$\sum_v^V \sum_p^P XPD^s_{pdv} + \sum_f^F \sum_v^V \sum_{p'}^{P'} XFD^s_{p'fdv} \leq \sum_l^L HDC_{dl} \cdot YD_{dl}, \quad \forall s \in S, \forall d \in D \quad (28)$$





$$\sum_r^R \sum_v^V \sum_{p''}^{P''} XRC_{p''rcv}^s \leq \sum_l^L HCC_{p_l YC_{cl}}, \quad \forall s \in S, \forall c \in C \quad (29)$$

$$\sum_v^V \sum_p^P XPD_{pdv}^s + \sum_f^F \sum_v^V \sum_{p'}^{P'} XFD_{p'fdv}^s \geq \sum_l^L DMT_d YD_{dl}, \quad \forall s \in S, \forall d \in D \quad (30)$$

$$\sum_r^R \sum_v^V \sum_{p''}^{P''} XRC_{p''rcv}^s \geq \sum_l^L CMT_c YC_{cl}, \quad \forall s \in S, \forall c \in C \quad (31)$$

$$\sum_{p'}^{P'} \sum_d^D \sum_v^V XFD_{p'fdv}^s \geq FMT_f YF_f, \quad \forall s \in S, \forall f \in F \quad (32)$$

$$\sum_h^H XBO_{hb}^s \geq BMT_b YB_b, \quad \forall s \in S, \forall b \in B \quad (33)$$

$$Q_p^s \geq MNPRO_p, \quad \forall s \in S, \forall p \in P \quad (34)$$

$$\sum_p^P \sum_d^D XPD_{pdv}^s WP_p \leq VCP_v \cdot NVP_v, \quad \forall s \in S, \forall v \in V \quad (35)$$

$$\sum_p^P \sum_r^R XDR_{pdrv}^s WP_p + \sum_{p'}^{P'} \sum_r^R XDR_{p'drv}^s WP_{p'} \leq VCP_v \cdot NVD_{dv}, \quad \forall s \in S, \forall d \in D, \forall v \in V \quad (36)$$

$$\sum_{p''}^{P''} \sum_c^C XRC_{p''rcv}^s WP_{p''} \leq VCP_v \cdot NVR_{rv}, \quad \forall r \in R, \forall v \in V \quad (37)$$

$$\sum_{p''}^{P''} \sum_b^B XCB_{p''cbv}^s WP_{p''} + \sum_{p''}^{P''} \sum_f^F XCF_{p''cfv}^s WP_{p''} \leq VCP_v \cdot NVC_{cv}, \quad \forall c \in C, \forall v \in V \quad (38)$$

$$\sum_{p'}^{P'} \sum_d^D XFD_{p'fdv}^s WP_{p'} + \sum_{p''}^{P''} \sum_b^B XFB_{p''fbv}^s WP_{p''} \leq VCP_v \cdot NVF_{fv}, \quad \forall f \in F, \forall v \in V \quad (39)$$

$$XSP_{mas}^s \leq VCP_v \cdot NVS_{mav}, \quad \forall m \in M, \forall a \in A_m, \forall v \in V \quad (40)$$

$$\begin{cases} YF_f + YF_{f'} \leq 2 + N \cdot fu_{ff'} \\ YF_{f'} + YF_{f''} < 2 + N \cdot fu'_{ff''} \end{cases}, \quad \forall f \in F, f' \in F, f < f' \quad (41)$$

$$(fu_{ff'} - fu'_{ff'}) \left( (FFD_{ff'} - FFAD) + \varepsilon \right) < 0$$

$$\begin{cases} YB_b + YB_{b'} \leq 2 + N \cdot bu_{bb'} \\ YB_b + YB_{b''} < 2 + N \cdot bu'_{bb''} \end{cases}, \quad \forall b \in B, b' \in B, b < b' \quad (42)$$

$$(bu_{bb'} - bu'_{bb'}) \left( (BBD_{bb'} - BBAD) + \varepsilon \right) < 0$$

$$\begin{cases} \sum_s^S \sum_v^V XSP_{mav}^s \leq YS_{ma} \cdot \sum_s^S DM_m \\ \sum_s^S \sum_v^V XSP_{mav}^s \geq \varepsilon \cdot YS_{ma} \cdot \sum_s^S DM_m \end{cases}, \quad \forall m \in M, \forall a \in A_m \quad (43)$$

$$\sum_a^{A_m} YS_{ma} \geq MNS_m, \quad \forall s \in S, \forall m \in M \quad (44)$$

$$\sum_v^V XSP_{mav}^s \leq MQS_{ma} \cdot (DM_m), \quad \forall s \in S, \forall m \in M, \forall a \in A_m \quad (45)$$

$$YF_f, YD_{dl}, YC_{cl}, YB_b, YS_{ma}, fu_{ff'}, fu'_{ff''}, bu_{bb'}, bu'_{bb''} \in \{0,1\} \quad (46)$$



$$\begin{aligned} & XPD^S_{pdv}, XDR^S_{pdv}, XDR^S_{p'drv}, XRC^S_{p'rcv}, XCK^S_{p'c}, \\ & XCB^S_{p'cbv}, XCF^S_{p'cfv}, XFD^S_{p'fdv}, XFB^S_{p'fbv}, XSP^S_{p'mav}, \\ & XBO^S_{hb}, XCO^S_{p'c}, Q^S_{p'f}, Q^S_{p'b}, SH^S_{pr}, SH^S_{p'r} \geq 0 \end{aligned} \quad (47)$$

در مدل ریاضی فوق، رابطه (۱) تابع هدف نخست می‌باشد که هزینه کل (برحسب ریال) را کمینه می‌کند. عبارت موجود در پرانتز اول، معرف هزینه‌های ثابت کارخانجات بازسازی، مراکز توزیع، مراکز جمع‌آوری و تأسیسات بازیافت و عبارت موجود در پرانتز دوم، معرف هزینه‌های عملیاتی موارد مذکور است. پرانتز سوم، خود شامل ۷ پرانتز است که به ترتیب معرف هزینه تأمین مواد اولیه، هزینه تولید، هزینه بازسازی محصول مستعمل، هزینه بازیافت، هزینه حمل‌ونقل محصولات (نو، مستعمل، بازسازی شده و مواد)، هزینه جمع‌آوری محصول مستعمل و هزینه انهدام می‌باشند. رابطه (۲) تابع هدف دوم می‌باشد که مقدار تقاضای پاسخ داده نشده (برحسب واحد محصول) برای محصولات نو و محصولات بازسازی شده را کمینه می‌کند. این تابع از منظر بُعد اجتماعی پایداری که توجهی خاص به مبحث پاسخ به نیاز مشتری دارد اهمیت دارد [۴۸، ۴۹]. گزاره اول از رابطه (۳)، ریسک اختلال (تحریم) و ریسک خرید مواد اولیه غیر بومی (به عنوان عامل تضعیف‌کننده پایداری و تاب‌آوری ملی) را کمینه می‌نماید. گزاره دوم و سوم رابطه (۳)، ریسک انتخاب نقاط بالقوه برای تسهیلات بازسازی و بازیافت را بر اساس ملاحظات اجتماعی (خالص مهاجرت به عنوان ریسک اجتماعی) کمینه می‌کند. ضرایب موجود در این تابع پس از نرمال‌سازی و بی‌مقیاس‌سازی خطی از طریق تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MADM) استخراج می‌شوند [۵۰]. روابط (۴) تا (۲۱)، مجموعه محدودیت‌های تضمین‌کننده حفظ جریان مستقیم و معکوس هستند که با بازسازی و بازیافت محصولات مستعمل یا بازیابی انرژی آنها، موجب کاهش رهاسازی یا انهدام پسماند در محیط و حفظ مقاصد زیست محیطی مدل خواهند شد و این همان مقصودی است که براساس تعریف توسعه پایدار و تأکید امین و ژنگ (۲۰۱۲) در روح و ذات مدل‌های زنجیره‌های تأمین معکوس و حلقه بسته مستتر است و تلاشی برای پایداری محسوب می‌شوند [۱۰، ۵۱]. روابط (۲۲) و (۲۳)، بیان می‌کنند که در هر مکان بالقوه بیش از یک توزیع‌کننده و یا مرکز جمع‌آوری با ظرفیتی خاص نمی‌تواند استقرار یابد. ظرفیت عملیات تولید، تأمین مواد، بازسازی، و بازیافت از طریق محدودیت‌های (۲۴) تا (۲۷) محدود گردیده است. هریک از مراکز توزیع و مراکز جمع‌آوری نیز دارای محدودیت ظرفیت هستند که این امر به ترتیب با روابط (۲۸) و (۲۹) تضمین می‌شود. روابط (۳۰) تا (۳۳)، حداقل توان عملیاتی لازم می‌باشند که باز کردن تسهیلات (به ترتیب توزیع، جمع‌آوری، بازسازی و بازیافت) را در زمان تجاوز از سطوح از پیش تعیین شده ممکن می‌سازند. حداقل تعداد تولید از هر نوع محصول با محدودیت (۳۴) نشان داده شده است. روابط (۳۵) تا (۴۰) نشان‌دهنده محدودیت حداکثر تعداد موجود از هر نوع وسیله حمل‌ونقل، در محل هر یک از اعضای زنجیره می‌باشند. دو دسته محدودیت (۴۱) و (۴۲) به منظور ایجاد فرصت‌های برابر توسعه محلی (از ابعاد پایداری اجتماعی)، اجازه استقرار بیش از یک تسهیل همسان در شعاعی کمتر از مسافتی معین (بر حسب کیلومتر) را نمی‌دهد و به ترتیب مربوط به تسهیلات بازسازی و بازیافت هستند. دسته محدودیت منطقی (۴۳) به طور همزمان تضمین می‌کنند که اگر از تأمین‌کننده‌ای مواد خریداری شد انتخاب می‌گردد و بالعکس. روابط (۴۴) و (۴۵) محدودیت‌های رفع انحصار خرید از تأمین‌کنندگان هستند و تضمین می‌کنند که تأمین هر ماده اولیه مشخص، از بیش از یک تأمین‌کننده مواد صورت پذیرد. این دو محدودیت با توزیع تقاضای مواد بین تأمین‌کنندگان متعدد موجب کاهش ریسک تحریم تأمین می‌گردند و در نهایت روابط (۴۶) و (۴۷) معرف نوع متغیرهای تصمیم هستند.

لازم به ذکر است، بی‌مقیاس‌سازی و نرمال‌سازی ضرایب گزاره دوم و سوم در تابع هدف سوم از طریق رابطه (۴۸) انجام می‌گیرد.  $mig_b$  و  $mig_f$  به ترتیب آمار مهاجرت خالص خروجی شهرهای بالقوه  $f$  و  $b$  است که از مرکز آمار ایران [۵۲] استخراج شده است.

$$FNLC_f = \frac{\left( \frac{1}{mig_f} \right)}{\left( \sum_f \left( \frac{1}{mig_f} \right) \right)} \quad \text{و} \quad BNLC_b = \frac{\left( \frac{1}{mig_b} \right)}{\left( \sum_b \left( \frac{1}{mig_b} \right) \right)} \quad (48)$$



در مورد ضریب  $SNLC_{ma}$  نیز به طور مشابه عمل می‌شود. ابتدا احتمال تحریم مواد توسط مبادی تأمین با استفاده از نظر خبرگان (با توجه به عواملی چون میزان وابستگی سیاسی به امریکا) و نیز بومی بودن مواد (تولید داخلی) استخراج می‌شود و سپس بی‌مقیاس‌سازی و نرمال‌سازی شده و متوسط موزون سطری دو معیار به عنوان ضریب نهایی در تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش برای استخراج ضرایب و اوزان از نظرات ۷ تن از خبرگان صنعت لاستیک کشور (از شرکت‌های بارز، دنا، ایران‌تایر، مهندسی لاستیک و نیکرو گسترش) بهره گرفتیم.

### ۲.۳. مورد مطالعه و حل مدل

برای سنجش صحت مدل پیشنهادی، حل یک مسأله دنیای واقعی بر مبنای داده‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شد. در این تحقیق طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته لاستیک خودرو به عنوان نمونه‌ای از زنجیره تأمین محصولات قابل بازیافت و بازسازی انتخاب گردید و داده‌های بدست آمده از صنعت لاستیک ایران و به طور خاص یکی از شرکت‌های تولیدی تایر داخلی به عنوان پارامترهای مدل مورد استفاده قرار گرفت. ۱۶ سناریوی اختلال تحریم مواد اولیه از سوی شرکت‌های تأمین‌کننده در نظر گرفته شد. در سناریوی اول عدم رخداد تحریم پیش‌بینی شد. برای حل مدل چند هدفه مورد نظر از روش مقیاس جهانی جهت تجمیع توابع هدف در یک تابع (رابطه (۴۹)) استفاده گردید [۵۳]. در این روش، تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min Z = \sum_{i=1}^k \left( \frac{f_i^* - f_i}{f_i^*} \right)^p \quad (49)$$

که در آن  $f_i^*$  مقدار بهینه تابع هدف نام است. پیشنهادهای مختلفی برای مقدار  $P$  وجود دارد. بسیاری از محققان ۱ را مناسب می‌دانند و برخی نیز ۲ را مناسب‌تر می‌دانند [۵۴]. مزیت انتخاب مقدار ۱ این است که در صورت خطی بودن توابع هدف، تابع هدف جامع نیز همچنان خطی باقی می‌ماند. لذا در اینجا پس از محاسبه مقدار بهینه هر تابع هدف به طور جداگانه، با استفاده از روش مذکور و با در نظر گرفتن عدد ۱ برای  $P$ ، فاصله هر کدام از توابع هدف از مقدار بهینه متناظرشان کمینه گردید.

جدول (۲): مهمترین مشخصه‌های مرتبط با مورد مطالعه

کمیت	مشخصه
۴	تعداد مواد اصلی
۴+۴	تعداد محصولات اصلی و بازسازی شده
۴	تعداد محصولات بازیافتی
<=۷	تعداد لایه (سطوح) زنجیره رفت و برگشت
۳۱	تعداد تأمین‌کنندگان
۴	تعداد حالات حمل و نقل
۵	تعداد انواع تسهیلات بالقوه
۲۰	تعداد محل‌های بالقوه برای توزیع‌کنندگان
۱۷	تعداد محل‌های بالقوه برای مراکز جمع‌آوری
۱۰	تعداد محل‌های بالقوه برای مراکز بازیافت
۱۰	تعداد محل‌های بالقوه برای کارخانجات روکش
۱۶	تعداد سناریو
محدود	ظرفیت تسهیلات

جدول (۳): ابعاد مسأله واقعی مورد مطالعه

تعداد	اجزای مدل
۵۰	تعداد بلوک‌های محدودیت (و توابع هدف)



۳۰	تعداد بلوک‌های متغیرها
۶۶۴۳۶۹۲	تعداد عناصر غیرصفر
۳۵۸۹۳	تعداد کل محدودیت‌ها (و توابع هدف)
۱۱۶۱۶۵۳	تعداد کل متغیرهای تصمیم
۳۰۵	تعداد متغیرهای گسسته

جدول ۲ و ۳ ابعاد مسأله شامل مهمترین مشخصه‌های مرتبط با مورد مطالعه دنیای واقعی و تعداد متغیرها و محدودیت‌ها را نشان می‌دهد. جهت حل دقیق مدل از حل کننده ۱۲,۰۶,۳۰۰ IBM ILOG CPLEX، نرم‌افزار ۲۴,۰۸۰ GAMS و رایانه شخصی با مشخصات GB RAM ۴ و Intel(R) Core(TM) i۵ ۲,۴۰ GHz و سیستم عامل Windows ۷ استفاده شد. زمان اجرای مدل روی رایانه فوق ۲۸۲۷ ثانیه است. جدول ۴ مقادیر تابع هدف قابل مشاهده است.

جدول (۴): مقادیر نهایی توابع هدف مسأله واقعی مورد مطالعه

مقدار تابع هدف	توابع هدف	تابع هدف سوم
$1/0.1049 \times 10^{13}$	<i>TCOST</i>	تابع هدف اول
$3/559576 \times 10^6$	<i>UMD</i>	تابع هدف دوم
$0.762488149$	<i>Risk</i>	تابع هدف سوم

شکل ۲ محل استقرار تسهیلات شبکه زنجیره تأمین نهایی منتج از حل مدل دنیای واقعی را نشان می‌دهد که در اصل پاسخ نهایی متغیرهای تصمیم صفر و یک هستند که مقدار یک را اختیار کرده‌اند. بدلیل اشغال فضای بسیار زیاد، از نمایش پاسخ متغیرهای جریان صرفه نظر شد و فقط یک نمونه در پیوست ۲ قابل مشاهده است.



شکل (۲): پراکندگی اجزاء مختلف شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه در جغرافیای کشور

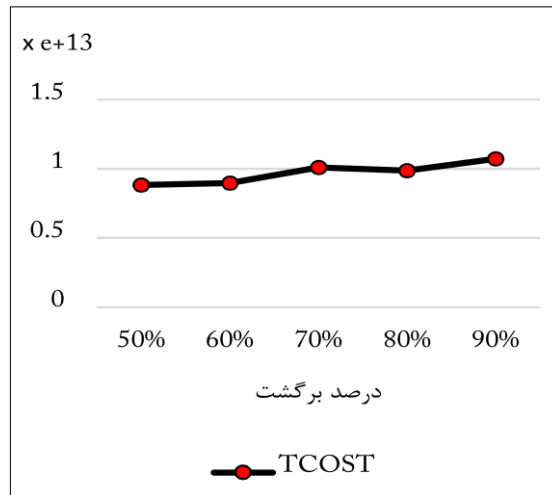
### ۳.۳. تحلیل حساسیت

برای سنجش صحت مدل پیشنهادی در این بخش، برای بررسی حساسیت خروجی‌های مدل نسبت به تغییر برخی پارامترهای مهم مسأله، مورد مطالعه را مجدداً مورد تحقیق قرار می‌دهیم. تلاش می‌کنیم نشان دهیم چگونه تغییر این پارامترها ممکن است بر هزینه‌ها و تقاضای پاسخ داده نشده شبکه زنجیره تأمین اثر بگذارد. این تحلیل همچنین درستی و کاربردپذیری مدل پیشنهادی را تأیید خواهد کرد زیرا مدل به نحوی منطقی نسبت به تغییرات پارامترها واکنش نشان می‌دهد.

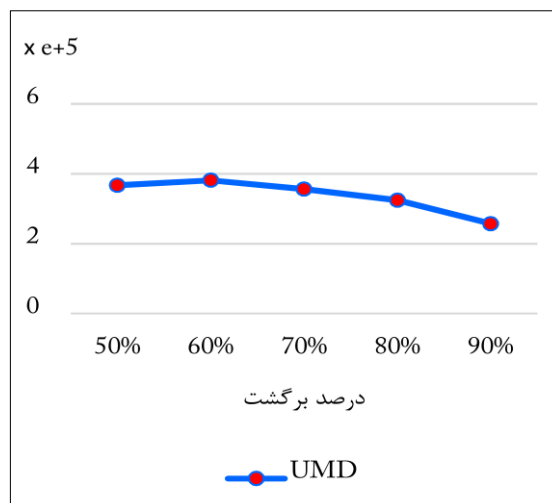
در ابتدا اثر تغییر پارامتر درصد برگشت تایرهای مستعمل ( $\alpha_p$ ) روی تابع هزینه کل و همچنین بر تقاضای پاسخ داده نشده بررسی شده است. نمودارهای مربوطه نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر مذکور تابع هدف هزینه روندی افزایشی دارد (شکل‌های ۳ و ۴ را



ببینید). این روند صعودی کاملاً منطقی است؛ زیرا افزایش تعداد محصولات برگشتی موجب افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل جریان برگشتی بین تسهیلات مختلف، افزایش تعداد مورد نیاز تسهیلات برای بازیافت و بازسازی و در نتیجه افزایش هزینه‌های راه‌اندازی و عملیاتی این تسهیلات و در نهایت بالا رفتن مقدار تابع هزینه خواهد شد. همچنین با افزایش پارامتر مذکور تعداد تولید تایر روکش شده بالا رفته و در نتیجه بدلیل ثابت بودن تقاضای کل برای انواع تایر بازسازی شده، تقاضای پاسخ داده نشده محصولات روکش شده و به تبع آن تابع هدف مربوطه کاهش خواهد یافت.



شکل (۳): تغییرات هزینه نسبت به تغییرات درصد برگشت



شکل (۴): تغییرات تقاضای پاسخ داده نشده نسبت به تغییرات درصد برگشت

یکی دیگر از پارامترهای مورد بررسی میزان تقاضای بازار برای محصولات (اعم از نو و بازسازی شده) است. جدول ۵ نشان می‌دهد با افزایش تقاضای محصولات، هزینه‌های کل و تقاضای پاسخ داده نشده با شیب ملایمی افزایش می‌یابند که نشان از منطقی بودن روند و صحت مدل دارد.

جدول (۵): تغییرات هزینه زنجیره و تقاضای پاسخ داده نشده نسبت به تغییرات تقاضای بازار

تغییرات تقاضا	UMD*10E+5	TCOST*10E+13
---------------	-----------	--------------



۰,۹۸۵۲۶۹	۲,۰۹۶۹۴۷	۰,۹ تقاضای فعلی
۱,۰۹۱۲۷	۲,۷۴۸۴۷۱	۰,۹۵ تقاضای فعلی
۱,۰۱۰۴۹	۳,۵۵۹۵۷۶	تقاضای فعلی
۰,۹۶۶۶۳۴	۳,۹۶۶۱۱۳۷	۱,۰۵ تقاضای فعلی
۰,۹۶۲۰۸۸	۴,۴۴۳۹۵۴	۱,۱ تقاضای فعلی

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به شکاف‌های موجود در پیشینه موضوع و ریسک تحریم مواد موجود در دنیای واقعی، یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی و رویکردهای پایداری (با تأکید بر ملاحظات اجتماعی)، طراحی و براساس داده‌های یک مورد مطالعه واقعی در صنعت تایر آزمون شد. منطقی بودن نتایج مدل و انطباق آن با ادراک خبرگان از دنیای واقعی نشان از اعتبار مدل ساخته شده دارد. با توجه به نتایج تحقیق، انجام پژوهش‌های بیشتر در حوزه‌های زیر به محققان پیشنهاد می‌گردد:

۱. به طور کلی هنوز تعداد مدل‌های SCND که مباحث مدیریت ریسک، تاب‌آوری و پایداری را ترکیب کرده باشند اندک است؛ بنابراین اضافه کردن سایر معیارهای اجتماعی و اختلال‌های ممکن به مدل پیشنهاد می‌گردد؛

۲. در بحث پایداری و ریسک، انجام مطالعات با تأکید ویژه بر بوم خاص کشور و الزامات ملی، زیست محیطی، اجتماعی و ریسک خاص ایران، ضروری به نظر می‌رسد؛ در نظر گرفتن چالش‌های اقتصادی کشور (به عنوان مثال نوسانات غیرطبیعی نرخ ارز)، می‌تواند موضوعی کاربردی برای ادامه این تحقیق باشد؛

۳. برای یکپارچه سازی صحیح ملاحظات اجتماعی در تحقیقات کمی SCND، بهره‌گیری از متدولوژی‌های تحقیق در عملیات نرم مثل فهم انتقادی سیستم‌ها (CSH) بسیار مفید است؛

۴. توسعه مدل حاضر با ملاحظه دوره‌های متعدد (مدل چند دوره‌ای) توصیه می‌شود؛

۵. گزینه‌های متنوع تکنولوژیک در تسهیلات مختلف می‌تواند به عنوان یک ملاحظه جدید به متغیرهای تصمیم مدل حاضر اضافه گردد؛

۶. در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی مانند نوسانات تقاضا و غیره با کمک انواع روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی از دیگر پیشنهادات ممکن برای توسعه مدل است و

۷. با توجه به زمان تقریباً طولانی الگوریتم‌های دقیق در حل مسائل پیچیده، استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری یا روش‌های حل ترکیبی نیز پیشنهاد می‌شود.

## تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بدینوسیله از تمام کارشناسان و خبرگانی که در فرایند گردآوری داده‌های واقعی و شناخت شبکه زنجیره تأمین این تحقیق کمک نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

پیوست ۱

نمادگذاری:

مجموعه‌ها:



$m$ : مجموعه انواع مواد اولیه  $m = \{1, \dots, M\}$

$A_m$ : تعداد کل تأمین‌کنندگان بالقوه ماده اولیه  $m$

$a$ : مجموعه کل تأمین‌کنندگان ماده اولیه  $m$ ،  $a = \{1, \dots, A_m\}$

$\Delta$ : مجموعه کل تأمین‌کنندگان بالقوه تمامی انواع مواد اولیه  $\Delta = \{\{1, \dots, A_1\}, \dots, \{1, \dots, A_M\}\}$

$b$ : مجموعه مکان‌های بالقوه برای استقرار تأسیسات بازیافت  $b = \{1, \dots, B\}$

$c$ : مجموعه مکان‌های بالقوه برای استقرار مراکز جمع‌آوری  $c = \{1, \dots, C\}$

$d$ : مجموعه مکان‌های بالقوه برای استقرار مراکز توزیع  $d = \{1, \dots, D\}$

$f$ : مجموعه مکان‌های بالقوه برای استقرار کارخانه‌های بازسازی  $f = \{1, \dots, F\}$

$r$ : مجموعه فروشندگان (نمایندگی‌های فروش)  $r = \{1, \dots, R\}$

$p$ : مجموعه انواع محصولات نو  $p = \{1, \dots, P\}$

$p'$ : مجموعه انواع محصولات بازسازی شده  $p' = \{1, \dots, P'\}$

$p''$ : مجموعه انواع محصولات مستعمل  $p'' = \{1, \dots, P''\}$

$h$ : مجموعه انواع محصولات بازیافتی  $h = \{1, \dots, H\}$

$v$ : مجموعه انواع روش‌های حمل‌ونقل  $v = \{1, \dots, V\}$

$l$ : سطوح مختلف ظرفیت برای تسهیلات توزیع و جمع‌آوری  $l = \{1, \dots, L\}$

$s$ : مجموعه سناریوهای ممکن  $s = \{1, \dots, S\}$

پارامترها:

$FF_f$ : هزینه ثابت راه‌اندازی کارخانه بازسازی  $f$

$FD_{dl}$ : هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز توزیع  $d$  با سطح ظرفیت  $l$  در طول دوره برنامه‌ریزی

$FC_{cl}$ : هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز جمع‌آوری  $c$

$FB_b$ : هزینه ثابت راه‌اندازی تأسیسات بازیافت  $b$

$OF_f$ : هزینه عملیاتی کارخانه بازسازی  $f$  در طول دوره برنامه‌ریزی

$OD_{dl}$ : هزینه عملیاتی مرکز توزیع  $d$  با سطح ظرفیت  $l$  در طول دوره برنامه‌ریزی

$OC_{cl}$ : هزینه عملیاتی مرکز جمع‌آوری  $c$  با سطح ظرفیت  $l$  در طول دوره برنامه‌ریزی

$OB_b$ : هزینه عملیاتی تأسیسات بازیافت  $b$  در طول دوره برنامه‌ریزی

$PC_p$ : هزینه تولید هر محصول  $p$  در کارخانه تولید محصول نو

$RC_{p''f}$ : هزینه بازسازی هر محصول مستعمل  $p''$  در کارخانه بازسازی  $f$

$BC_{p''b}$ : هزینه بازیافت هر محصول مستعمل  $p''$  در تأسیسات بازیافت  $b$

$GC_{p''}$ : هزینه جمع‌آوری هر محصول مستعمل  $p''$  از طریق فروشنده‌ها



$$\begin{aligned}
 & PTC_{pv} : \text{هزینه حمل هر محموله محصول نو } p \text{ به ازای هر کیلومتر با روش حمل } V \\
 & PTC'_{p'v} : \text{هزینه حمل هر محموله محصول بازسازی شده } p' \text{ به ازای هر کیلومتر با روش حمل } V \\
 & PTC''_{p''v} : \text{هزینه حمل هر محموله محصول مستعمل } p'' \text{ به ازای هر کیلومتر با روش حمل } V \\
 & MTC_{mv} : \text{هزینه حمل هر محموله ماده/اولیه } m \text{ به ازای هر کیلومتر با روش حمل } V \\
 & MC_{ma} : \text{هزینه خرید هر واحد (کیلوگرم) ماده } m \text{ از تأمین‌کننده } C \text{ توسط کارخانه تولیدکننده محصول نو} \\
 & MINPRO_p : \text{حداقل تعداد محصول لازم برای } p \\
 & LFC_p'' : \text{هزینه انهدام به ازای هر محصول مستعمل } p'' \\
 & DP_{pr} : \text{تقاضای فروشنده } r \text{ برای محصول نو } p \\
 & DP'_{p'r} : \text{تقاضای فروشنده } r \text{ برای محصول بازسازی شده } p' \\
 & \alpha_p : \text{درصد برگشت محصول نو } p \text{ مستعمل شده و تحویل شده به فروشنده‌ها} \\
 & \beta_p'' : \text{درصد محصول مستعمل } p'' \text{ ورودی به مراکز جمع‌آوری که خصوصیات کیفی برای فرآیند بازیافت را دارا هستند.} \\
 & \beta'_{p'} : \text{درصد محصول مستعمل } p' \text{ ورودی به مراکز جمع‌آوری که خصوصیات کیفی برای فرآیند بازسازی را دارا هستند.} \\
 & \Phi_p'' : \text{درصد محصولات مستعمل } p'' \text{ ورودی به مراکز جمع‌آوری که قابلیت بازسازی و بازیافت را ندارند و به سایت‌های انهدام منتقل می‌شوند.} \\
 & \Phi'_{p'} : \text{درصد محصولات مستعمل } p' \text{ ورودی به مراکز جمع‌آوری که قابلیت بازسازی و بازیافت را ندارند و آماده فروش به مراکز بازیابی انرژی هستند.} \\
 & \Phi''_p : \text{درصد محصولات مستعمل } p'' \text{ ورودی به مراکز جمع‌آوری که قابلیت بازسازی و بازیافت را ندارند و آماده فروش به منظور مصارف دیگر هستند.} \\
 & \mu_p'' f : \text{درصد قابلیت بازسازی محصولات مستعمل } p'' \text{ ورودی به کارخانه بازسازی } f \\
 & WP_p : \text{وزن محصول نو } p \\
 & WP'_{p'} : \text{وزن محصول بازسازی شده } p' \\
 & WP''_p : \text{وزن محصول مستعمل } p'' \\
 & \gamma_{mp} : \text{درصد وزنی سهم ماده } m \text{ برای محصول نو } p \\
 & \psi_{hp}'' : \text{درصد وزنی میزان بازیافت محصول بازیافتی } h \text{ از محصول مستعمل } p'' \\
 & DM_m : \text{تقاضای کارخانه محصول نو برای ماده اولیه } m \text{ در طول افق برنامه‌ریزی:} \\
 & DM_m = \sum_p \sum_r WP_p \cdot \gamma_{mp} \cdot DP_{pr}, \quad \forall m \in M \\
 & PCp_p : \text{ظرفیت کل تولید کارخانه برای محصول نو (واحد محصول)} \\
 & FCp_f : \text{ظرفیت کل بازسازی کارخانه بازسازی } f \text{ (واحد محصول)} \\
 & BCp_b : \text{ظرفیت کل بازیافت تأسیسات بازیافت } b \text{ (واحد محصول)} \\
 & SCp_{ma} : \text{ظرفیت تأمین‌کننده } a \text{ برای ماده } m \\
 & HDCp_{dl} : \text{سقف ظرفیت مرکز توزیع } l \text{ سطح } d \text{ (واحد محصول)} \\
 & HCCp_l : \text{سقف ظرفیت مراکز جمع‌آوری سطح } l \text{ (واحد محصول)} \\
 & DMT_d : \text{حداقل توان عملیاتی موردنیاز برای باز کردن مرکز توزیع } d \text{ (واحد محصول)} \\
 & CMT_c : \text{حداقل توان عملیاتی موردنیاز برای باز کردن مرکز جمع‌آوری } c \text{ (واحد محصول)}
 \end{aligned}$$





$FMT_f$ : حداقل توان عملیاتی موردنیاز برای باز کردن کارخانه بازسازی  $f$  (واحد محصول)

$BMT_b$ : حداقل توان عملیاتی موردنیاز برای باز کردن تأسیسات بازیافت  $b$  (واحد محصول)

$VCp_v$ : ظرفیت حمل کل روش حمل  $v$  (به کیلوگرم)

$NVP_v$ : کل تعداد موجود برای روش حمل  $v$  برای عملیات حمل از کارخانه تولید محصول نو

$NVD_{dv}$ : کل تعداد موجود برای روش حمل  $v$  برای عملیات حمل از مرکز توزیع  $d$

$NVR_{rv}$ : کل تعداد موجود برای روش حمل  $v$  برای عملیات حمل از فروشنده  $r$

$NVC_{cv}$ : کل تعداد موجود برای روش حمل  $v$  برای عملیات حمل از مرکز جمع‌آوری  $c$

$NVF_{fv}$ : کل تعداد موجود برای روش حمل  $v$  برای عملیات حمل از کارخانه بازسازی  $f$

$NVS_{mav}$ : کل تعداد موجود برای روش حمل  $v$  برای عملیات حمل از تأمین‌کننده  $a$  ماده اولیه  $m$

$PDD_d$ : مسافت از کارخانه تولید محصول نو تا مرکز توزیع  $d$

$DRD_{dr}$ : مسافت از مرکز توزیع  $d$  تا فروشنده  $r$

$RCD_{rc}$ : مسافت از فروشنده  $r$  تا مرکز جمع‌آوری  $c$

$CBD_{cb}$ : مسافت از مرکز جمع‌آوری  $c$  تا تأسیسات بازیافت  $b$

$CFD_{cf}$ : مسافت از مرکز جمع‌آوری  $c$  تا کارخانه بازسازی  $f$

$FDD_{fd}$ : مسافت از کارخانه بازسازی  $f$  تا مرکز توزیع  $d$

$FBD_{fb}$ : مسافت از کارخانه بازسازی  $f$  تا تأسیسات بازیافت  $b$

$SPD_{ma}$ : مسافت از تأمین‌کننده  $a$  ماده  $m$  تا کارخانه تولید محصول نو

$FFAD$ : حداقل فاصله اقلیدسی مجاز بین دو کارخانه بازسازی

$BBAD$ : حداقل فاصله اقلیدسی مجاز بین دو تأسیسات بازیافت

$BBD_{bb'}$ : فاصله اقلیدسی بین دو مکان بالقوه استقرار تأسیسات بازیافت

$FFD_{ff'}$ : فاصله اقلیدسی بین دو مکان بالقوه استقرار کارخانجات بازسازی

$\mathcal{E}$ : یک عدد مثبت بسیار کوچک نزدیک به صفر

$\mathcal{N}$ : یک عدد مثبت بسیار بزرگ

$MNS_m$ : حداقل تعداد تأمین‌کننده برای تأمین ماده  $m$  تعیین شده از سوی مدیریت زنجیره به منظور اجتناب از انحصار و نیز افزایش قدرت تاب‌آوری در مقابل اختلالات ممکن

$MQS_{ma}$ : حداکثر کسر تأمین ماده  $m$  از تأمین‌کننده  $a$  تعیین شده از سوی مدیریت زنجیره به منظور اجتناب از انحصار و نیز افزایش قدرت تاب‌آوری در مقابل اختلالات ممکن (برحسب درصد)

$FNLC_f$ : ضریب حاصل از نرمال‌سازی و بی‌مقیاس‌سازی ریسک‌ها در مکان بالقوه  $f$  برای استقرار کارخانه بازسازی

$BNLC_b$ : ضریب حاصل از نرمال‌سازی و بی‌مقیاس‌سازی ریسک‌ها در مکان بالقوه  $b$  برای استقرار تأسیسات بازیافت

$SNLC_{ma}$ : ضریب حاصل از نرمال‌سازی و بی‌مقیاس‌سازی ریسک‌ها در مکان بالقوه  $a$  برای انتخاب تأمین‌کننده ماده  $m$

$\pi_s$ : احتمال رخداد سناریو  $S$



$Wf$ : وزن اهمیت (اولویت) کارخانجات بازسازی در کمینه سازی ریسک‌های جانمایی آنها

$Wb$ : وزن اهمیت (اولویت) مراکز بازیافت در کمینه سازی ریسک‌های جانمایی آنها

$Wm$ : وزن اهمیت (اولویت) تأمین‌کنندگان در کمینه سازی ریسک‌های جانمایی آنها

$\omega_m$ : وزن اهمیت ماده  $m$  در کمینه‌سازی ریسک‌های اختلال جانمایی تأمین‌کنندگان (اولویت پیش از اختلال)

$sbp_{ma}^S$ : پارامتر صفر و یک (۱ در صورتیکه تأمین‌کننده  $a$  ام ماده اولیه  $m$  تحت سناریو  $S$  دچار اختلال شود؛ صفر در غیر اینصورت).

متغیرهای تصمیم:

$YF_f$ : ۱ اگر یک کارخانه بازسازی در مکان  $f$  باز شود؛ صفر در غیر اینصورت

$YD_{dl}$ : ۱ اگر یک مرکز توزیع در مکان  $d$  با سطح ظرفیت  $l$  باز شود؛ صفر در غیر اینصورت

$YC_{cl}$ : ۱ اگر یک مرکز جمع‌آوری در مکان  $c$  با سطح ظرفیت  $l$  باز شود؛ صفر در غیر اینصورت

$YB_b$ : ۱ اگر تأسیسات بازیافت در مکان  $b$  باز شود؛ صفر در غیر اینصورت

$YS_{ma}$ : ۱ اگر برای تأمین ماده اولیه  $m$  تأمین‌کننده مکان  $a$  انتخاب شود؛ صفر در غیر اینصورت

$Q_p^S$ : میزان محصول نو  $p$  تولید شده در کارخانه تولید محصول نو تحت سناریو  $S$

$Q_p^{1S} f$ : میزان محصول مستعمل  $p$  که در کارخانه بازسازی  $f$  بازسازی شده است

$Q_p^{1S} b$ : میزان محصول مستعمل  $p$  که در تأسیسات بازیافت  $b$  بازیافت شده است تحت سناریو  $S$

$XPD_{pdv}^S$ : میزان محصول نو  $p$  منتقل شده از کارخانه به مرکز توزیع  $d$  با روش حمل  $v$  تحت سناریو  $S$

$XDR_{pdv}^S$ : میزان محصول نو  $p$  منتقل شده از مرکز توزیع  $d$  به فروشنده  $r$  با روش حمل  $v$  تحت سناریو  $S$

$XDR_p^{1S} drv$ : میزان محصول بازسازی شده  $p$  منتقل شده از مرکز توزیع  $d$  به فروشنده  $r$  با روش حمل  $v$  تحت سناریو  $S$

$XRC_p^{1S} rcv$ : تعداد محصول مستعمل  $p$  منتقل شده از فروشنده  $r$  به مرکز جمع‌آوری  $c$  با روش حمل  $v$  تحت سناریو  $S$

$XCB_p^{1S} cbv$ : میزان محصول مستعمل  $p$  منتقل شده از مرکز جمع‌آوری  $c$  به تأسیسات بازیافت  $b$  با روش حمل  $v$  تحت سناریو  $S$

$XCF_p^{1S} cfv$ : میزان محصول مستعمل  $p$  منتقل شده از مرکز جمع‌آوری  $c$  به کارخانه بازسازی  $f$  با روش حمل  $v$  تحت سناریو  $S$

$XFD_p^{1S} fdv$ : میزان محصول بازسازی شده  $p$  منتقل شده از کارخانه بازسازی  $f$  به مرکز توزیع  $d$  با روش حمل  $v$  تحت سناریو  $S$

$XFB_p^{1S} fbv$ : میزان محصول غیرقابل بازسازی  $p$  منتقل شده از کارخانه بازسازی  $f$  به تأسیسات بازیافت  $b$  با روش حمل  $v$  تحت سناریو  $S$

$XSP_{mav}^S$ : میزان ماده اولیه خریداری شده  $m$  منتقل شده از تأمین‌کننده  $a$  به کارخانه تولید محصول نو با روش حمل  $v$  تحت سناریو  $S$

$XCK_p^{1S} c$ : میزان محصول مستعمل  $p$  فروخته شده مرکز جمع‌آوری  $c$  به مراکز بازیابی انرژی تحت سناریو  $S$

$XCO_p^{1S} c$ : میزان محصول مستعمل  $p$  فروخته شده مرکز جمع‌آوری  $c$  برای سایر مصارف تحت سناریو  $S$

$XBO_{hb}^S$ : وزن محصولات بازیافتی  $h$  فروخته شده از بازیافت  $b$  برای سایر مصارف تحت سناریو  $S$

$SH_{pr}^S$ : تقاضای از دست رفته فروشنده  $r$  برای محصول نو  $p$  تحت سناریو  $S$  (تعداد)

$SH_p^{1S} r$ : تقاضای از دست رفته فروشنده  $r$  برای محصول بازسازی شده  $p$  تحت سناریو  $S$  (تعداد)

$fu_{ff}$ : ۱ اگر محدودیت مورد نظر زائد شود، صفر اعمال محدودیت موردنظر

$fu'_{ff}$ : ۱ اگر محدودیت مورد نظر زائد شود، صفر اعمال محدودیت موردنظر

$bu_{bb}$ : ۱ اگر محدودیت مورد نظر زائد شود، صفر اعمال محدودیت موردنظر

پیوست ۲:

نمونه نمایش خروجی نرم افزار GAMS برای متغیر جریان XPD برای محصول دوم ( $p=2$ ) به ازای تمام سناریوها (s) و تمام مراکز توزیع (d) و تمام حالات حمل و نقل (v) (فضاهای خالی نشان دهنده مقدار صفر است).

INDEX 1 = p2						
	s1	s2	s3	s4	s5	s6
d2.v1	6.240000E+2	1.092000E+3	2.262000E+3			
d10.v3	5.694000E+3			1.400000E+4	3.900000E+2	1.068800E+4
d15.v1	1.988000E+3	3.434000E+3			1.037600E+4	3.120000E+2
d15.v3			1.173800E+4			
d18.v1	5.694000E+3				2.340000E+2	
d18.v3		6.474000E+3				
	+ s7	s8	s9	s10	s11	s12
d2.v1	5.616000E+3	2.028000E+3	2.184000E+3			
d2.v2				2.360000E+2		
d10.v3	4.680000E+2	1.197200E+4	8.816000E+3	1.068600E+4	4.682000E+3	1.100000E+4
d15.v1				78.00000000	3.354000E+3	
d18.v1	4.916000E+3					
d						
1						
8 +	s13	s14	s15	s16		
.						
d2.v2				7.488000E+3		
d10.v2				2.730000E+3		
d10.v3	1.271400E+4	9.596000E+3	1.400000E+4			
d15.v1	78.00000000	1.404000E+3				
d18.v1				7.820000E+2		

منابع:

- [۱] Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., Simchi-Levi, E. (۲۰۰۰). *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies*. McGraw-Hill/Irwin.
- [۲] Chandra, C., Grabis, J. (۲۰۰۷). *Supply chain configuration*. Springer.
- [۳] Farahani, R. Z., Rezapour, S., Drezner, T., Fallah, S. (۲۰۱۴). Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution techniques and applications, *Omega*, ۴۵: ۹۲-۱۱۸.
- [۴] Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., Péton, O. (۲۰۱۵). Sustainable supply chain network design: an optimization-oriented review, *Omega*, ۵۴: ۱۱-۳۲.
- [۵] Christopher, M., Peck, H. (۲۰۰۴). Building the resilient supply chain, *The international journal of logistics management*, ۱۵: ۱-۱۴.
- [۶] WCED. (1987). *Our Common Future*, World Commission on Environment and Development, Oxford.
- [۷] Slaper, T. F., Hall, T. J. (۲۰۱۱). The triple bottom line: What is it and how does it work, *Indiana business review*, ۸۶: ۴-۸.
- [۸] Das, K., Chowdhury, A. H. (۲۰۱۲). Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning, *International Journal of Production Economics*, ۱۳۵: ۲۰۹-۲۲۱.
- [۹] Özkır, V., Başlıgil, H. (۲۰۱۳). Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment, *Journal of Cleaner Production*, ۴۱: ۱۱۴-۱۲۵.
- [۱۰] Amin, S. H., Zhang, G. (۲۰۱۲). An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach, *Expert Systems with Applications*, ۳۹: ۶۷۸۲-۶۷۹۱.
- [۱۱] Tang, C. S. (۲۰۰۶). Perspectives in supply chain risk management, *International journal of production economics*, ۱۰۳: ۴۵۱-۴۸۸.
- [۱۲] Kamalahmadi, M., Parast, M. M. (۲۰۱۶). A review of the literature on the principles of enterprise and supply chain resilience: Major findings and directions for future research, *International Journal of Production Economics*, ۱۷۱: ۱۱۶-۱۳۳.
- [۱۳] Caruso, C., Colomi, A., Paruccini, M. (۱۹۹۳). The regional urban solid waste management system: A modelling approach, *European Journal of Operational Research*, ۷۰: ۱۶-۳۰.
- [۱۴] Fleischmann, M., Beullens, P., BLOEMHOF-RUWAARD, J. M., Van Wassenhove, L. N. (۲۰۰۱). The impact of product recovery on logistics network design, *Production and operations management*, ۱۰: ۱۵۶-۱۷۳.



- [۱۵] Krikke, H., Bloemhof-Ruwaard, J., Van Wassenhove, L. N. (۲۰۰۲). Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators, *International journal of production research*, ۴۱:۳۶۸۹-۳۷۱۹.
- [۱۶] Salema, M., Póvoa, A., Novais, A. Q. (۲۰۰۶). A warehouse-based design model for reverse logistics, *Journal of the Operational Research Society*, ۵۷:۶۱۵-۶۲۹.
- [۱۷] Guillén-Gosálbez, G., Grossmann, I. E. (۲۰۰۹). Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty, *AIChE Journal*, ۵۵:۹۹-۱۲۱.
- [۱۸] Kannan, G., Sasikumar, P., Devika, K. (۲۰۱۰). A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling, *Applied Mathematical Modelling*, ۳۴:۶۵۵-۶۷۰.
- [۱۹] Bouzembrak, Y., Allaoui, H., Goncalves, G., Masson, E., Bouchriha, H., Baklouti, M. (۲۰۱۰). Sustainable multimodal supply chain design for recycling waterways sediments, ۸th International Conference of Modeling and Simulation-MOSIM'۱۰, May.
- [۲۰] Chaabane, A., Ramudhin, A., Paquet, M. (۲۰۱۲). Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme, *International Journal of Production Economics*, ۱۳۵:۳۷-۴۹.
- [۲۱] Diabat, A., Abdallah, T., Al-Refaie, A., Svetinovic, D., Govindan, K. (۲۰۱۳). Strategic closed-loop facility location problem with carbon market trading, *IEEE Transactions on engineering Management*, ۶۰:۳۹۸-۴۰۸.
- [۲۲] Saffar, M., Razmi, J. (۲۰۱۴). A new bi-objective mixed integer linear programming for designing a supply chain considering CO<sub>2</sub> emission, *Uncertain Supply Chain Management*, ۲:۲۷۵-۲۹۲.
- [۲۳] Saffar, M., Razmi, J. (۲۰۱۵). A new multi objective optimization model for designing a green supply chain network under uncertainty, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, ۶:۱۵-۳۲.
- [۲۴] Govindan, K., Paam, P., Abtahi, A.-R. (۲۰۱۶). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design, *Ecological indicators*, ۶۷:۷۵۳-۷۶۸.
- [۲۵] Soleimani, H., Govindan, K., Saghafi, H., Jafari, H. (۲۰۱۷). Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design, *Computers & Industrial Engineering*, ۱۰۹:۱۹۱-۲۰۳.
- [۲۶] Babazadeh, R., Razmi, J., Pishvae, M. S., Rabbani, M. (۲۰۱۷). A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk, *Omega*, ۶۶:۲۵۸-۲۷۷.
- [۲۷] Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., Barbosa-Povoa, A. P. (۲۰۱۸). Sustainable supply chains: An integrated modeling approach under uncertainty, *Omega*, ۷۷:۳۲-۵۷.
- [۲۸] Zarbakhshnia, N., Soleimani, H., Goh, M., Razavi, S. S. (۲۰۱۹). A novel multi-objective model for green forward and reverse logistics network design, *Journal of Cleaner Production*, ۲۰۸:۱۳۰۴-۱۳۱۶.
- [۲۹] Ghaderi, H., Pishvae, M. S., Moini, A. (۲۰۱۶). Biomass supply chain network design: an optimization-oriented review and analysis, *Industrial crops and products*, ۹۴:۹۷۲-۱۰۰۰.
- [۳۰] Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghahi-Keshteli, M. (۲۰۱۸). Sustainable tire closed-loop supply chain network design: Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks, *Journal of cleaner production*, ۱۹۶:۲۷۲-۲۹۶.
- [۳۱] Ansari, Z. N., Kant, R. (۲۰۱۷). A state-of-art literature review reflecting ۱۵ years of focus on sustainable supply chain management, *Journal of cleaner production*, ۱۴۲:۲۵۲۴-۲۵۴۳.
- [۳۲] Heckmann, I., Comes, T., Nickel, S. (۲۰۱۵). A critical review on supply chain risk-Definition, measure and modeling, *Omega*, ۵۲:۱۱۹-۱۳۲.
- [۳۳] Guillén-Gosálbez, G., Grossmann, I. (۲۰۱۰). A global optimization strategy for the environmentally conscious design of chemical supply chains under uncertainty in the damage assessment model, *Computers & Chemical Engineering*, ۳۴:۴۲-۵۸.
- [۳۴] Pishvae, M. S., Razmi, J., Torabi, S. A. (۲۰۱۲). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach, *Fuzzy sets and systems*, ۲۰۶:۱-۲۰.
- [۳۵] Abdallah, T., Diabat, A., Rigter, J. (۲۰۱۳). Investigating the option of installing small scale PVs on facility rooftops in a green supply chain, *International Journal of Production Economics*, ۱۴۶:۴۶۵-۴۷۷.
- [۳۶] Bouzembrak, Y., Allaoui, H., Goncalves, G., Bouchriha, H. (۲۰۱۳). A multi-modal supply chain network design for recycling waterway sediments, *International Journal of Environment and Pollution*, ۵۱:۱۵-۳۱.
- [۳۷] Beheshtifar, S., Alimoahmadi, A. (۲۰۱۵). A multiobjective optimization approach for location-allocation of clinics, *International Transactions in Operational Research*, ۲۲:۳۱۳-۳۲۸.
- [۳۸] Torabi, S., Namdar, J., Hatefi, S., Jolai, F. (۲۰۱۶). An enhanced possibilistic programming approach for reliable closed-loop supply chain network design, *International Journal of Production Research*, ۵۴:۱۳۵۸-۱۳۸۷.
- [۳۹] Tsao, Y.-C., Linh, V.-T., Lu, J.-C. (۲۰۱۷). Closed-loop supply chain network designs considering RFID adoption, *Computers & Industrial Engineering*, ۱۱۳:۷۱۶-۷۲۶.
- [۴۰] Fattahi, M., Govindan, K. (۲۰۱۸). A multi-stage stochastic program for the sustainable design of biofuel supply chain networks under biomass supply uncertainty and disruption risk: A real-life case study, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, ۱۱۸:۵۳۴-۵۶۷.
- [۴۱] Grant, S., Solicitors, H. G. (۲۰۰۵). *International migration and human rights*. Global Commission on International Migration (GCIM).
- [۴۲] UNHCR. (۲۰۰۹). Migration and Development: a Human Rights Approach, Switzerland.
- [۴۳] Shayan, H., Kohnepushi, S. H. (۲۰۱۳). Analysis of the causes of rural-urban migration (Case study: Khav and Myrabad District, Marivan County), *Journal of Research and Rural Planning*, ۲:۱۱۵-۱۴۱.
- [۴۴] Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., Dikshit, A. K. (۲۰۱۲). An overview of sustainability assessment methodologies, *Ecological indicators*, ۱۵:۲۸۱-۲۹۹.
- [۴۵] Andrews, E. S., Barthel, L.-P., Beck, T., Benoit, C., Ciroth, A., Cucuzzella, C., Gensch, C.-O., Julie, F., Lesage, P., Manhart, A., Mazeau, P., Mazijn, B., Methot, A.-L., Moberg, A., Norris, G., Parent, J., Prakash, S., Reveret, J.-P.,



- Spillemaeckers, S., Ugaya, C. M. L., Valdivia, S., Weidema, B. (۲۰۰۹). *Guidelines for social life cycle assessment of products*. United Nations Environment Programme (UNEP)/Earthprint.
- [۴۶] Dehghanian, F., Mansour, S. (۲۰۰۹). Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm, *Resources, Conservation and Recycling*, ۵۳: ۵۵۹-۵۷۰.
- [۴۷] Hassini, E., Surti, C., Searcy, C. (۲۰۱۲). A literature review and a case study of sustainable supply chains with a focus on metrics, *International Journal of Production Economics*, ۱۴۰: ۶۹-۸۲.
- [۴۸] Global Reporting Initiative (GRI). (۲۰۱۳). Sustainability reporting guidelines, Amsterdam, The Netherlands.
- [۴۹] Simões, M., Carvalho, A., de Freitas, C. L., Barbósa-Póvoa, A., "How to assess social aspects in supply chains?," in *Computer Aided Chemical Engineering*. vol. ۳۴, ed: Elsevier, ۲۰۱۴, pp. ۸۰۱-۸۰۶.
- [۵۰] قدسی پور، ح. (۱۳۹۲). فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، دانشگاه امیرکبیر، تهران.
- [۵۱] Amin, S. H., Zhang, G. (۲۰۱۲). A proposed mathematical model for closed-loop network configuration based on product life cycle, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, ۵۸: ۷۹۱-۸۰۱.
- [۵۲] ایران تهران: مرکز آمار. ایران. (۱۳۹۰). مهاجرت‌های داخلی کشور: در سطح شهرستان مرکز آمار.
- [۵۳] Hwang, C.-L., Masud, A. S. M. (۱۹۷۹). *Multiple objective decision making—methods and applications: a state-of-the-art survey*, vol. ۱۶۴. Springer-Verlag, New York.
- [۵۴] Boychuk, L., Ovchinnikov, V. (۱۹۷۳). Principal methods of solution of multicriterial optimization problems (survey), *Soviet Automatic Control*, ۶: ۱-۴.