

## ارائه مدل ریاضی دو هدفه زنجیره تأمین پایدار مبتنی بر پارامترهای عدم قطعیت (کاهش ظرفیت در اثر اختلال، هزینه‌های ارسال و تقاضا)

معصومه نظری<sup>۱</sup>، محمود دهقان نیری<sup>۲\*</sup>، کیامرث فتحی هفشجانی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۳- استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، ایران.

پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۱۷

دریافت: ۱۴۰۳/۲/۱۵

### چکیده

**هدف:** در دنیای کنونی بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری با شرایط عدم اطمینان احاطه شده‌اند. منشاء اصلی این شرایط نقصان و بعضاً فقدان اطلاعات برای تصمیم‌گیری است و یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل و درعین حال ازجمله مهم‌ترین مسائل مدیریت زنجیره تأمین می‌باشد. لذا مطالعه حاضر با هدف ارائه مدل ریاضی دو هدفه زنجیره تأمین پایدار مبتنی بر پارامترهای عدم قطعیت، به کمینه‌سازی هزینه‌ها، آلاینده‌های زیست‌محیطی پرداخته است. الگوی پیشنهادی می‌تواند ابزار کارآمدی برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار و انعطاف‌پذیر باشد.

**روش‌شناسی:** این پژوهش از لحاظ ماهیت پژوهش، توصیفی - تحلیلی است. همچنین از نظر هدف نوعی پژوهش کاربردی می‌باشد. در این مطالعه با توجه به پارامترهای مدل ریاضی دو هدفه، با روش سناریو محور مالی با در نظر گرفتن هزینه‌های ارسال، تقاضا و کاهش ظرفیت در اثر اختلال به‌عنوان



پارامترهای عدم قطعیت توسعه داده شد. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار GAMS, EXCEL, Microsoft VISIO بهره گرفته شد.

**یافته‌ها:** نتایج مؤید آن است، استفاده از مدل ریاضی سناریو محور مالوی در شرایط عدم اطمینان در زنجیره تأمین پایدار، می‌تواند به دستیابی نتایج مطلوب و مثرتر منجر شود و مدل ریاضی توانسته به نحو مؤثری به عدم قطعیت تقاضا و هزینه‌های ارسال و کاهش ظرفیت در اثر اختلال، بپردازد درحالی‌که در مسائل با مجموعه‌های بزرگ‌تر از کارآمدی مدل کاسته شد.

**واژه‌های کلیدی:** زنجیره تأمین، زنجیره تأمین پایدار، عدم اطمینان، مدلسازی استوار.

## ۱- مقدمه

طی بیست سال گذشته، فضای بازار به‌طور روزافزونی پیچیده‌تر شده است که مشخصه آن عدم قطعیت زیادی است. هرگونه اختلال در تقاضای بازار می‌تواند سریعاً منجر به تأثیر نامطلوب قابل توجهی بر کل SC سبز شود. بدون شک، عدم اطمینان تقاضا، اعضای SC را در معرض خطرپذیری قرار می‌دهد و بر عملکرد آن‌ها تأثیر منفی می‌گذارد؛ بنابراین، فرض کلاسیک بی‌تفاوتی نسبت به خطرپذیری ممکن است برای مدیریت عملکرد SC غیر مؤثر باشد [۱، ۲]. همچنین بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری با شرایط عدم اطمینان احاطه شده‌اند. منشأ اصلی این شرایط نقصان و بعضاً فقدان اطلاعات برای تصمیم‌گیری است [۳]. به‌زعم آذر و همکاران [۸]، عدم اطمینان یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل و درعین حال ازجمله مهم‌ترین مسائل مدیریت زنجیره تأمین می‌باشد. عدم اطمینان ازجمله ویژگی‌های اصلی سیستم‌هایی است که با مشتری در ارتباط است. سطح بالای زنجیره تأمین توانایی زنجیره را در پیش‌بینی شرایط آینده با مشکل مواجه می‌کند. همچنین به‌زعم آلواپی و همکاران [۴] عدم اطمینان روزافزون تقاضا و محیط‌های اقتصادی بیانگر یک چالش پژوهشی برای طراحی زنجیره تأمین سبز و پایدار هستند.

در مدلسازی قطعی دستگاه‌های مختلف، تضمینی وجود ندارد که طرح‌های به‌دست‌آمده از این مدل‌ها، عملکرد خوبی در آینده داشته باشند؛ چون این مدل‌ها عدم اطمینان و کمبودهای اطلاعاتی را در نظر نمی‌گیرند. از همین رو لازم است عدم اطمینان، به‌خصوص عدم اطمینان‌های مرتبط با داده‌ها و روابط بین عناصر سیستم، در مدلسازی لحاظ شود. فنون مرتبط با بهینه‌سازی



دستگاه‌های تحت عدم قطعیت نسبت به فنون بهینه‌سازی‌های قطعی پیچیده‌تر است و به دانش تخصصی فراوانی در حوزه‌هایی همچون فنون بهینه‌سازی احتمالی و تصادفی، روش‌های فازی و امکان، بهینه‌سازی استوار<sup>۱</sup> و فنون دیگر نیاز دارد. در بسیاری از موقعیت‌های تصمیم‌گیری، ممکن است شناسایی صحیح توزیع پارامترها مشکل باشد. بهینه‌سازی فازی و استوار یک رویکرد محاسباتی مناسب برای مدیریت عدم اطمینان است. بهینه‌سازی استوار برای مواجهه با عدم اطمینان به داده‌های کمتری در مقایسه با رویکرد تصادفی کلاسیک نیاز دارد و درصدد ایجاد یک روش کنترل شده و متوازن برای همه پارامترهای نادقیق مسئله و پیدا کردن راه‌حلی موجه و درعین حال بهینه است [۳، ص ۴۶-۴۳].

چالش پیش‌روی طراحی یک زنجیره تأمین پایدار، یافتن راه‌حل‌های بهینه در طراحی است، زیرا هدف طراحی یک زنجیره تأمین در وهله اول جنبه اقتصادی (کاهش هزینه‌ها) است، و این در حالی است که توجه به ابعاد زیست‌محیطی و اجتماعی هزینه‌ها را افزایش خواهد داد. این مسئله ضرورت بهینه‌سازی زنجیره تأمین پایدار را به‌خوبی روشن می‌سازد [۵]. با توجه به ضرورت‌هایی مانند پیوستن به سازمان تجارت جهانی، افزایش قوانین بین‌المللی زیست‌محیطی و تأکید مشتریان بر استفاده از محصولات سبز سازگار با محیط‌زیست، ایجاد مقتضیات تحقق زنجیره تأمین پایدار در صنعت خودروسازی ایران، در ارائه محصولات و خدمات در صنایع کشور ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. به‌این‌ترتیب طراحی زنجیره تأمین پایدار در صنعت خودروسازی می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌ها بر کنترل و کاهش پیامدهای منفی توسعه‌ی صنعتی بر محیط‌زیست مؤثر باشد. لذا مطالعه حاضر با هدف ارائه مدل ریاضی زنجیره تأمین پایدار مبتنی بر پارامترهای عدم قطعیت، به کمینه‌سازی هزینه‌ها، آلاینده‌های زیست‌محیطی پرداخته است.

## ۲- پیشینه پژوهش

پس از بررسی کامل پژوهش‌های داخلی و بین‌المللی، مشخص شد که علی‌رغم مطالعات متعدد انجام شده در مورد زنجیره تأمین پایدار، کاستی‌هایی وجود دارد که نیاز به بهبود دارد.

---

1. Robust optimization



در مطالعه‌ای فروزش و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۲) یک رویکرد جدید برنامه‌ریزی احتمالی استوار با استفاده از معیار اعتبار و توابع عضویت متغیرهای فازی نوع ۲ با ارزش بازه‌ای تعمیم‌یافته برای رویارویی با عدم قطعیت‌هایی مانند ظرفیت عرضه تسهیلات، تقاضای مشتری، هزینه حمل‌ونقل و انتشار در مدل ریاضی پیشنهادی ارائه دادند [۶]. در مطالعه‌ای دیگر کاظمی و همکاران (۱۳۹۹) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط با رویکرد بهینه‌سازی استوار-ابتکاری با توجه به عدم قطعیت پارامترهای اقتصادی، تسهیلات و تقاضا ارائه دادند [۷]. در مطالعه‌ای آذر و همکاران (۱۳۸۹) به برنامه‌ریزی ریاضی خطی چندهدفه (آرمانی) در فضای عدم اطمینان و ابهام پرداختند [۸].

همچنین در پژوهشی همایونی و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۲۳) به بهینه‌سازی استوار با در نظر گرفتن پارامتر تقاضا و هزینه پرداختند [۹]. در مطالعه‌ای لی و لیو<sup>۳</sup> (۲۰۲۲) به بهینه‌سازی فازی با در نظر گرفتن پارامتر تقاضا و هزینه پرداختند [۱۰]. در مطالعه‌ای دیگر سانتیبانزاگیلار و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۲۰) به بهینه‌سازی تصادفی با در نظر گرفتن پارامتر هزینه پرداختند [۱۱]. در پژوهشی نیز شهبازیگیان و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۲۰)، خویشتندار<sup>۶</sup> (۲۰۱۹) به بهینه‌سازی فازی با در نظر گرفتن پارامتر هزینه پرداختند [۱۲، ۱۳]. در مطالعه‌ای یآوری و گرائلی<sup>۷</sup> (۲۰۱۹) به بهینه‌سازی استوار و پارامتر تقاضا پرداختند [۱۴]. در مطالعه‌ای نیز موداک و کله<sup>۸</sup> (۲۰۱۹) به بهینه‌سازی تصادفی و هزینه و تقاضا پرداختند [۱۵]. در مطالعاتی شرافتی و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۱۹)، بایرامزاده و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۸)، گنگ و یو<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۸)، دهقانی و همکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۱۸) به هزینه و بهینه‌سازی استوار پرداختند [۱۶-۱۹]. در مطالعه‌ای نیز احمد و سارکر<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۸) به بهینه‌سازی فازی و هزینه پرداختند [۲۰]. در

1. Foroozesh et al.
2. Homayouni et al.
3. Li and Liu
4. Santibañez-Aguilar et al.
5. Shahbazbegian et al.
6. Khishtandar
7. Yavari & Geraeli
8. Modak & Kelle
9. Sherafati et al.
10. Bairamzadeh et al.
11. Gong & You
12. Dehghani et al.
13. Ahmed & Sarker



مطالعه‌ای حیدری فثیان و پسندیده<sup>۱</sup> (۲۰۱۸)، یدالله‌نیا و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۸)، جبارزاده و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۸)، ظهیری و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۸) به بهینه‌سازی استوار و تقاضا پرداختند [۲۱-۲۴].

جدول ۱. مقایسات مطالعه حاضر با مطالعات پیشین

رویکرد عدم اطمینان			تقاضا	هزینه	کاهش ظرفیت در اثر اختلال	نویسنده
استوار	فازی	تصادفی				
	*		*			فروزش و همکاران (۲۰۲۲)
	*		*	*		لی و لیو (۲۰۲۲)
		*		*		سانتیانز و اگیلار (۲۰۲۰)
	*			*		شهبازیگیان و همکاران (۲۰۲۰)
	*			*		خویشن‌دار و همکاران (۲۰۱۹)
*			*			یاوری و گرابلی (۲۰۱۹)
		*	*	*		موداک و کله (۲۰۱۹)
*				*		شرافتی و همکاران (۲۰۱۹)
*				*		بایرام زاده و همکاران (۲۰۱۸)
*				*		گنگ و همکاران (۲۰۱۸)
			*	*		کانور و سینگ (۲۰۱۸)
*				*		دهقانی و همکاران (۲۰۱۸)
	*			*		احمد و همکاران (۲۰۱۸)
		*		*		اسدی و همکاران (۲۰۱۸)
*			*			حیدری و پسندیده (۲۰۱۸)
*			*			یدالله‌نیا و همکاران (۲۰۱۸)
*			*			جبارزاده (۲۰۱۸)
*			*			ظهیری و همکاران (۲۰۱۸)
*			*			کاظمی و همکاران (۱۳۹۹)
*			*	*		آذر و همکاران (۱۳۸۹)
*			*	*	*	پژوهش حاضر

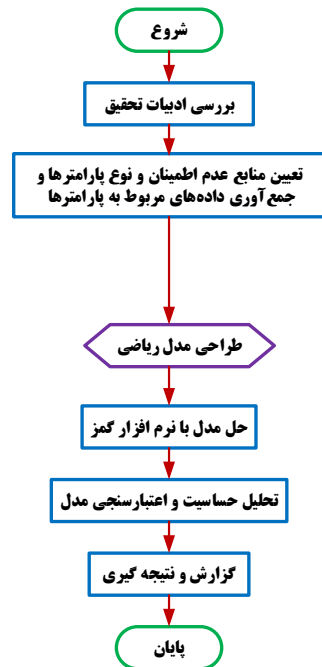
1. Heidari-Fathian & Pasandideh
2. Yadollahinia et al.
3. Jabbarzadeh et al.
4. Zahiri et al.



علی‌رغم مطالعات صورت گرفته در حوزه پایداری، هیچ‌یک از محققین کاهش ظرفیت در اثر اختلال را در نظر نگرفتند! مطالعه حاضر هم‌زمان سه پارامتر تقاضای مشتری در اثر نرخ تورم، هزینه‌ها و کاهش ظرفیت در اثر اختلال را با رویکرد استوار محور مالوی بررسی می‌کند، همچنین در مطالعه از مدل ریاضی دو هدفه در مدل مالوی بهره گرفته شده است که مسبوق به سابقه نمی‌باشد. این مدل نسبت به مدل پایه آن در بهینه‌سازی استوار (مدل برتسیمس و سیم) دارای قابلیت انعطاف‌پذیری بالایی است.

### ۳- روش‌شناسی پژوهش

مطالعه حاضر از لحاظ روش و ماهیت پژوهش، توصیفی-تحلیلی است همچنین از نظر هدف نوعی پژوهش کاربردی می‌باشد. در مطالعه حاضر به دلیل وجود پارامترهای عدم قطعیت، و رویکرد احتمال‌گرایانه، برخی داده‌های پارامترها از طریق خبرگان و کارشناسان، و برخی به صورت اسنادی گردآوری شد. مدل ریاضی ابتدا به صورت قطعی طراحی شد و اعتبارسنجی گردید سپس مدل سناریو محور اولیه و مدل اپسیلون کانسترنٹ مالوی طراحی گردید و بعد از طراحی مدل در شرکت قطعه‌سازی خودرو اجرا شد تا از درستی مدل اطمینان حاصل گردد. برای حل مدل توسعه یافته از بسته نرم‌افزاری GAMS بهره گرفته شد. نمودار (۱) مراحل اجرایی پژوهش را ارائه می‌نماید.



نمودار ۱. مراحل اجرایی پژوهش

برای طراحی مدل ریاضی پژوهش از مدل استواری مالوی [۲۵] بهره گرفته شده است. به‌زعم آذر و فرخ (۱۳۹۸)، بهینه‌سازی استوار تصادفی را که برای اولین بار مالوی<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۵) معرفی کردند، یکی از رویکردهای برنامه‌ریزی تصادفی برای کنترل تأثیر پارامترهای نادقیق مرتبط با مدل‌های بهینه‌سازی است. در واقع در این رویکرد، فرموله‌سازی برنامه‌ریزی آرمانی با داده‌های سناریو محور مسئله برای مدلسازی استوار یکپارچه شده‌اند. مدل مذکور دو نوع محدودیت‌های ساختاری و محدودیت‌های کنترل دارد؛ محدودیت‌های ساختاری، آزاد از پارامترهای عدم اطمینان و در واقع همان محدودیت‌های مدل قطعی‌اند و محدودیت‌های کنترل دارای پارامترهای عدم اطمینان هستند. براین اساس، در مدلسازی استوار تصادفی دو نوع متغیر تصمیم شامل متغیرهای ساختاری (طراحی) و متغیرهای کنترل خواهیم داشت. در مورد

1. Mullvey



متغیرهای ساختاری قبل از تحقق پارامترهای تصادفی تصمیم‌گیری می‌شود و بعد از تحقق این پارامترها نمی‌توان آن‌ها را تنظیم یا تعدیل کرد. متغیرهای کنترل نیز هنگامی که پارامترهای عدم‌اطمینان واقع می‌شوند، مورد تعدیل و تنظیم قرار می‌گیرند. جواب حاصل از این مدل جوابی است که نسبت به تغییرات داده‌های ورودی کمتر حساس است. در این نظریه یک راه‌حل برای یک مسئله بهینه‌سازی در صورتی استوار است که هم استوار موجه (استواری مدل) و هم استوار بهینه (استواری جواب) باشد. استوار موجه به این معنی است که راه‌حل باید در محدودیت‌های مسئله برای تقریباً تمامی سناریوها موجه باقی بماند؛ برای این منظور در روش مالوی و همکاران، ناموجه بودن جواب با یک تابع جریمه اندازه‌گیری می‌شود [۳].

از ویژگی‌های بارز مدل ریاضی سناریو محور مالوی، این است که از اغتشاشات تابع هدف و محدودیت‌ها جلوگیری می‌کند و جوابی که به دست می‌آید در محدوده فضای موجه و نزدیک به نقطه بهینه است و دورتر از نقطه بهینه و فضای جواب نیست، جوابی که به دست می‌آید در شرایط واقعی است و خطا ندارد. مدل مالوی از دو قسمت تابع هدف تشکیل شده است که قسمت اول حفظ بهینگی و قسمت دوم حفظ شدنی بودن نام دارد. طبق رویکرد مالوی، به قسمت دوم تابع هدف و محدودیت‌ها، جهت تبدیل مدل غیرخطی به خطی، تابع جریمه را اضافه نمودیم تا از اغتشاشات تابع هدف و محدودیت‌ها جلوگیری کرده تا با حل مدل، شدنی بودن مدل استوار، شدنی باقی بماند و به ناشدنی بودن تبدیل نشود ضمن اینکه بهینگی تابع هدف نیز حفظ می‌شود. همچنین در مدل ریاضی از اپسیلون کانسترنت که یکی از رویکردهای برخورد با توابع چندهدفه است، بهره گرفته شد. این تکنیک بیشتر برای مواردی به کار می‌رود که ارزش توابع هدف یکسان نیستند و اولویتی مطرح هست، مسلماً برای بهینه کردن اولویت پائین‌تر نباید جواب بهینه اولویت برتر که قبلاً به دست آمده را مورد چشم‌پوشی قرارداد! اما ضرورت آن برای روش محدودیت اپسیلون این است که اگر این کار انجام نشود در یک دور تسلسل خواهد افتاد و هیچ‌وقت جوابی برای مدل به دست آورده نمی‌شود و همین‌طور پیدا کردن مقادیر واقعی اپسیلون، اساس این روش می‌باشد. همچنین هدف دیگر کاربرد اپسیلون محدودیت، این است که به شناسایی مرز پارتو فرانت پاسخ‌های تابع هدف  $F_1, F_2$  و نقاط ابتدایی بهترین و بدترین جواب مدل قطعی بپردازد و در واقع هدف تعیین مرزی است که تصمیم‌گیرنده تابع هدف دلخواه را انتخاب نماید.







- ❖ مشتریان در صورت عدم برآورده شدن کیفیت مورد نظر کالای خود را به مرکز بازیافت ارجاع می‌دهند.
- ❖ هر لایه دچار اختلال شود، از ظرفیت آن‌ها کم می‌شود.
- ❖ تقاضا و نرخ کاهش ظرفیت هر لایه به صورت غیرقطعی هستند.
- ❖ هزینه‌های ارسال به صورت غیرقطعی هستند.
- ❖ مقدار آلودگی محیط‌زیست براساس میزان آلاینده‌گی دود خروجی ماشین‌ها در نظر گرفته می‌شود.
- ❖ غیرخطی بودن هزینه.
- ❖ عدم مجاز بودن کمبود.
- ❖ ظرفیت و تأمین‌کننده مشخص هستند.

### ۲-۳- محدودیت‌های مدل

در ادامه محدودیت‌های در نظر گرفته شده در طراحی مدل ریاضی پژوهش حاضر مد نظر قرار می‌گیرند.

- ❖ برخی داده‌های پارامترهای پژوهش را نمی‌توان به طور دقیق تعیین و مشخص کرد و همیشه دلایلی برای عدم دسترسی به داده‌ها وجود دارد من جمله ماهیت تصادفی و متغیر پارامترها، و عدم اطمینان در پیش‌بینی و قضاوت.
- ❖ محدودیت ارسال از تأمین‌کننده به کارخانه
- ❖ محدودیت ارسال از کارخانه به توزیع‌کننده
- ❖ محدودیت ارسال از توزیع‌کننده به مشتری
- ❖ محدودیت ارسال از مشتری به بازیافت
- ❖ محدودیت ارسال از بازیافت به کارخانه
- ❖ محدودیت ظرفیت.



### ۳-۳- نوآوری مدل پژوهش

۱. زنجیره حلقه بسته مدل زنجیره پایدار پژوهش.
۲. دو هدفه کردن تابع هدف مدل روبااست (مالوی).
۳. استفاده از پارامتر کاهش ظرفیت در اثر اختلال در شرایط نا اطمینانی.
۴. کاربرد تکنیک  $\epsilon$ -constraint در مدل مالوی که این بیشتر برای مواردی به کار می‌رود. که ارزش توابع هدف یکسان نیستند و اولویتی مطرح هست.

### ۳-۴- اندیس های مدل ریاضی قطعی

- $i \in I$ : اندیس متعلق به مجموعه تأمین کنندگان
- $j \in J$ : اندیس متعلق به مجموعه کارخانه‌ها
- $k \in K$ : اندیس متعلق به مجموعه توزیع کنندگان
- $c \in C$ : اندیس متعلق به مجموعه مشتریان
- $v \in V$ : اندیس متعلق به مجموعه وسایل نقلیه
- $h \in H$ : اندیس متعلق به مجموعه مراکز بازیافت
- $t \in T$ : اندیس متعلق به مجموعه دوره‌ها
- $p \in P$ : اندیس متعلق به مجموعه محصولات
- $r \in R$ : اندیس متعلق به مجموعه مواد اولیه

### ۳-۵- متغیرهای مدل ریاضی قطعی

- $I_{jpt}$ : موجودی کالای  $p$  در کارخانه  $j$  در دوره  $t$
- $S_{jpt}$ : کمبود کالای  $p$  در کارخانه  $j$  در دوره  $t$
- $IK_{kpt}$ : موجودی کالای  $p$  در توزیع کننده  $k$  در دوره  $t$
- $IH_{hrt}$ : موجودی ماده اولیه  $r$  در مرکز بازیافت  $h$  در دوره  $t$
- $SK_{kpt}$ : کمبود کالای  $p$  در توزیع کننده  $k$  در دوره  $t$



$SH_{hrt}$ : کمبود ماده اولیه  $r$  در مرکز بازیافت  $h$  در دوره  $t$

$x_{ijrvt}$ : مقدار ارسال کالای اولیه  $r$  از تأمین‌کننده  $i$  به کارخانه  $j$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$

$ZZ_{hjrvt}$ : مقدار ارسال کالای اولیه  $r$  از محل بازیافت  $h$  به کارخانه  $j$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$

$q_{chvpt}$ : مقدار ارسال کالای برگشتی  $p$  از مشتری  $c$  به مرکز بازیافت  $h$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$

$y'_{kcpvt}$ : مقدار ارسال کالای  $p$  از مرکز توزیع‌کننده  $k$  به مشتری  $c$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$

$yy_{kcpvt}$ : اگر مقدار کالای  $p$  از مرکز توزیع‌کننده  $k$  به مشتری  $c$  در دوره  $t$  ارسال شود یک در غیر این صورت صفر

$Z_{kcpvt}$ : اگر مقدار کالای  $p$  از مرکز توزیع‌کننده  $k$  به مشتری  $c$  در دوره  $t$  از لحاظ کیفی، پایین‌تر از حداقل کیفیت بود یک در غیر این صورت صفر

$y_{jkpvt}$ : مقدار ارسال کالای  $p$  از مرکز کارخانه‌ها  $j$  به توزیع‌کننده  $k$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$

$YI_i$ : اگر تأمین‌کننده  $i$  انتخاب شود یک در غیراینصورت صفر

$YK_k$ : اگر توزیع‌کننده  $k$  انتخاب شود یک در غیر این صورت صفر

$YJ_j$ : اگر کارخانه  $j$  انتخاب شود یک در غیر این صورت صفر

$YH_h$ : اگر مرکز بازیافت  $h$  انتخاب شود یک در غیر این صورت صفر

$D'_{cpt}$ : میزان تقاضا مشتری  $c$  در دوره  $t$  براساس نرخ تورم

### ۳-۶- پارامترهای مدل ریاضی قطعی

$MM$ : عدد خیلی بزرگ

$\lambda_{rp}$ : نرخ تبدیل ماده اولیه به محصول  $p$

$CI_{jpt}$ : هزینه موجودی کالای  $p$  در کارخانه  $j$  در دوره  $t$

$CIK_{kpt}$ : هزینه موجودی کالای  $p$  در توزیع‌کننده  $k$  در دوره  $t$



- $CIH_{hrt}$ : هزینه موجودی ماده اولیه  $r$  در مرکز بازیافت  $h$  در دوره  $t$
- $\bar{D}_{ept}$ : تقاضای غیرقطعی محصول  $p$  برای مشتری  $c$  در دوره  $t$
- $\bar{C}x_{ijrvt}$ : هزینه ارسال کالای اولیه  $r$  از تأمین‌کننده  $i$  به کارخانه  $j$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$  که به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.
- $\bar{C}zz_{hjrvt}$ : هزینه ارسال کالای اولیه  $r$  از محل بازیافت  $h$  به کارخانه  $j$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$  که به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.
- $\bar{C}q_{chpvt}$ : هزینه ارسال کالای برگشتی  $p$  از مشتری  $c$  به مرکز بازیافت  $h$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$ : که به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.
- $c a p J_{jpt}$ : ظرفیت کارخانه  $j$  برای محصول  $p$  در دوره  $t$
- $capI_{irt}$ : ظرفیت تأمین‌کننده  $i$  برای ماده اولیه  $r$  در دوره  $t$
- $capK_{kpt}$ : ظرفیت توزیع‌کننده  $k$  برای محصول  $p$  در دوره  $t$
- $capH_{hpt}$ : ظرفیت مرکز بازیافت  $h$  برای محصول  $p$  در دوره  $t$
- $\varphi_{rp}$ : درصد ماده اولیه  $r$  از محصول  $p$  که قابل بازیافت هستند
- $\alpha_{cp}$ : درصدی از تقاضا محصول  $p$  از مشتری  $c$  جهت بازیافت
- $\gamma_{vp}$ : مقدار آلودگی از ماشین  $v$  به ازای هر واحد محصول  $p$
- $\gamma'_{vr}$ : مقدار آلودگی از ماشین  $v$  به ازای هر واحد ماده اولیه  $r$
- $\beta J_{jpt}$ : میزان کاهش ظرفیت کارخانه  $j$  برای محصول  $p$  در اثر اختلال در دوره  $t$
- $\beta I_{irt}$ : میزان کاهش ظرفیت تأمین‌کننده  $i$  برای ماده اولیه  $r$  در اثر اختلال در دوره  $t$
- $\beta K_{kpt}$ : میزان کاهش ظرفیت توزیع‌کننده  $k$  برای محصول  $p$  در اثر اختلال در دوره  $t$
- $\beta H_{hpt}$ : میزان کاهش ظرفیت مرکز بازیافت  $h$  برای محصول  $p$  در اثر اختلال در دوره  $t$
- $\eta_t$ : مقدار نرخ تورم در دوره  $t$
- $P_{pt}$ : قیمت فروش محصول  $p$  در دوره  $t$
- $CS_{jpt}$ : هزینه کمبود کالای  $p$  در کارخانه  $j$  در دوره  $t$



$CSK_{kpt}$ : هزینه کمبود کالای  $p$  در توزیع‌کننده  $k$  در دوره  $t$   
 $CSH_{hrt}$ : هزینه کمبود ماده اولیه  $r$  در مرکز بازیافت  $h$  در دوره  $t$   
 $Bd_t$ : میزان بودجه در هر دوره  $t$   
 $q'_{kpt}$ : کیفیت محصول  $p$  برای توزیع‌کننده  $k$  در دوره  $t$   
 $Q_{cpt}$ : حداقل کیفیت موردنظر محصول  $p$  برای مشتری  $c$  در دوره  $t$   
 $\tilde{C}y'_{kcpvt}$ : هزینه ارسال کالای  $p$  از مرکز توزیع‌کننده  $k$  به مشتری  $c$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$   
 $\tilde{C}y_{jkpvt}$ : هزینه ارسال کالای  $p$  از مرکز کارخانه‌ها  $j$  به توزیع‌کننده  $k$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$ .

### ۳-۷- مدل ریاضی قطعی توسعه یافته

$$F1_t = \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} (I_{jpt} \cdot CI_{jpt} + S_{jpt} \cdot CS_{jpt}) + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (IK_{kpt} \cdot CIK_{kpt} + SK_{kpt} \cdot CSK_{kpt})$$

$$+ \sum_{h \in H} \sum_{r \in R} (IH_{hrt} \cdot CIH_{hrt} + SH_{hrt} \cdot CSH_{hrt}) + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} x_{ijrvt} \cdot \tilde{C}x_{ijrvt}$$

$$+ \sum_{j \in J} \sum_{h \in H} \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} zz_{hjrvt} \cdot \tilde{C}zz_{hjrvt} + \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} q_{chvpt} \cdot \tilde{C}q_{chvpt}$$

$$+ \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} y_{jkpvt} \cdot \tilde{C}y_{jkpvt} + \sum_{c \in C} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} y'_{kcpvt} \cdot \tilde{C}y'_{kcpvt}$$

تابع هدف F1، هزینه‌های موجودی و کمبود در کارخانه، توزیع‌کنندگان، مراکز بازیافت همچنین هزینه ارسال کالا به کارخانه، توزیع‌کننده، مشتری، مراکز بازیافت را در هر دوره محاسبه می‌کند.

$$F2 = \sum_{j \in J} \sum_{h \in H} \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \gamma'_{vr} \cdot z_{ijrvt} + \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \gamma_{vp} \cdot q_{chvpt} + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \gamma'_{vr} \cdot x_{ijrvt}$$

$$+ \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \gamma_{vp} \cdot y_{jkpvt} + \sum_{c \in C} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \gamma'_{vp} \cdot y'_{kcpvt}$$

تابع هدف F2، مقدار آلودگی محیط‌زیست را به ازای ارسال کالا مشخص می‌کند.

$$Min(AI) = \sum_{t \in T} (F1_t)$$



به طور کلی تابع هدف اول، مقدار هزینه سیستم را محاسبه می کند.

$$Min(A2) = F2$$

به طور کلی تابع هدف دوم، مقدار آلودگی محیط زیست را مینیمم می کند.

$$I_{jpt} - S_{jpt} = I_{jpt-1} - S_{jpt-1} + \sum_{r \in R} \sum_{v \in V'} \sum_{i \in I} x_{ijrvt} \cdot \lambda_{rp} - \sum_{k \in K} \sum_{v \in V'} y_{jkpvt} + \sum_{r \in R} \sum_{v \in V'} \sum_{h \in H} z_{hjrvt-1} \cdot \lambda_{rp} \quad (1)$$

$$\forall j \in J, p \in P, t \in T$$

این محدودیت موجودی، کمبود، دریافت و ارسال در کارخانه را محاسبه می کند.

$$\sum_{v \in V'} \sum_{j \in J} x_{ijrvt} \leq (1 - \beta I_{irt}) \cdot capI_{irt} \cdot YI_i \quad \forall i \in I, t \in T, r \in R \quad (2)$$

این محدودیت ظرفیت تأمین کننده را برحسب اختلال محاسبه می کند.

$$\sum_{v \in V'} \sum_{k \in K} y_{jkpvt} \leq (1 - \beta J_{jpt}) \cdot capJ_{jpt} \cdot YJ_j \quad \forall j \in J, t \in T, p \in P \quad (3)$$

این محدودیت ظرفیت کارخانه را برحسب اختلال محاسبه می کند.

$$\sum_{c \in C} \sum_{v \in V'} y'_{kcpvt} \leq (1 - \beta K_{kpt}) \cdot capK_{kpt} \cdot YK_k \quad \forall k \in K, t \in T, p \in P \quad (4)$$

این محدودیت ظرفیت توزیع کننده را برحسب اختلال محاسبه می کند.

$$\sum_{v \in V'} \sum_{c \in C} q_{chnpt} \leq (1 - \beta H_{hpt}) \cdot capH_{hpt} \cdot YH_h \quad \forall h \in H, t \in T, p \in P, s \in S \quad (5)$$

این محدودیت حداکثر ارسال به مراکز بازیافت برحسب اختلال را محاسبه می کند.

$$IK_{kpt} - SK_{kpt} = IK_{kpt-1} - SK_{kpt-1} + \sum_{j \in J} \sum_{v \in V'} y_{jkpvt} - \sum_{c \in C} \sum_{v \in V'} y'_{kcpvt} \quad \forall k \in K, p \in P, t \in T \quad (6)$$

این محدودیت موجودی، کمبود، دریافت و ارسال در توزیع کننده را محاسبه می کند.

$$\sum_{k \in K} \sum_{v \in V'} y'_{kcpvt} = D'_{cpt} \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T \quad (7)$$

این محدودیت مقدار ارسال به مشتریان را محاسبه می کند.

$$IH_{hrt} - SH_{hrt} = IH_{hrt-1} - SH_{hrt-1} - \sum_{v \in V'} \sum_{j \in J} z_{hjrvt} + \sum_{c \in C} \sum_{v \in V'} \sum_{p \in P} \varphi_{rp} \cdot q_{chnpt} \quad \forall h \in H, t \in T, r \in R \quad (8)$$

این محدودیت موجودی، کمبود و ارسال ماده اولیه  $\Gamma$  در مرکز بازیافت را محاسبه می کند.

$$D'_{cpt} = \tilde{D}_{cpt} - (1 + \eta_t) \cdot P_{pt} \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T \quad (9)$$



این محدودیت میزان تقاضا را برحسب نرخ تورم و قیمت محاسبه می‌کند.

$$F1_t \leq Bd_t \quad (10)$$

این محدودیت هزینه‌ها براساس بودجه محاسبه می‌کند.

$$yy_{kcp t} \leq \sum_{v \in V'} y'_{kcpvt} \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T \quad (11)$$

$$yy_{kcp t} \cdot MM \geq \sum_{v \in V'} y'_{kcpvt} \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T \quad (12)$$

این دو محدودیت متغیر صفر و یک را  $y_{kcp t}$  محاسبه می‌کند.

$$(Q_{cpt} - q'_{kpt}) \cdot yy_{kcp t} \geq (z_{kcp t} - 1) \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T \quad (13)$$

$$(Q_{cpt} - q'_{kpt}) \cdot yy_{kcp t} \leq z_{kcp t} \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T \quad (14)$$

این دو محدودیت تعیین می‌کنند اگر کیفیت کالای ارسالی از حداقل کیفیت پایین‌تر بود اجازه ارسال به محل بازیافت را دارد.

$$\sum_{h \in H} \sum_{v \in V'} q_{chpvt} \geq \alpha_{cp} \cdot \sum_{v \in V'} y'_{kcpvt} - (1 - z_{kcp t}) \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{v \in V'} q_{chpvt} \leq \alpha_{cp} \cdot \sum_{v \in V'} y'_{kcpvt} + (1 - z_{kcp t}) \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T \quad (16)$$

این دو محدودیت بر اساس محصولات بی‌کیفیت، مقدار ارسالی از مشتریان به مرکز بازیافت را محاسبه می‌کند.

$$I_{jpt}, S_{jpt}, IK_{kpt}, IH_{hrt}, SK_{kpt}, SH_{hrt}, x_{ijvt}, zz_{hjrvt}, q_{chvpt}, y'_{kcpvt}, D_{cpt}, y_{jkpvt} \geq 0$$

$$yy_{kcp t}, zz_{kcp t}, YI_i, YK_k, YJ_j, YH_h \in \{0, 1\}$$

در ذیل پارامترها، متغیرهای مدل سناریو محور (مالوی) مدل پژوهش آورده شده است:





### ۳-۸- پارامترها سناریو محور

$\lambda_{rp}$ : نرخ تبدیل ماده اولیه به محصول  $p$

$C I_{jpt}$ : هزینه موجودی کالای  $p$  در کارخانه  $j$  در دوره  $t$

$CIK_{kpt}$ : هزینه موجودی کالای  $p$  در توزیع کننده  $k$  در دوره  $t$

$CIH_{hrt}$ : هزینه موجودی ماده اولیه  $r$  در مرکز بازیافت  $h$  در دوره  $t$

$D_{cptS}$ : تقاضای غیرقطعی محصول  $p$  برای مشتری  $c$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$

$Cx_{ijrvt}$ : هزینه ارسال کالای اولیه  $r$  از تأمین کننده  $i$  به کارخانه  $j$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$

$Czz_{hprvt}$ : هزینه ارسال کالای اولیه  $r$  از محل بازیافت  $h$  به کارخانه  $j$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$

$v$  پس از قطعی سازی

$Cq_{chprvt}$ : هزینه ارسال کالای برگشتی  $p$  از مشتری  $c$  به مرکز بازیافت  $h$  در دوره  $t$  با

ماشین  $v$  پس از قطعی سازی

$capJ_{jpt}$ : ظرفیت کارخانه  $j$  برای محصول  $p$  در دوره  $t$

$capI_{irt}$ : ظرفیت تأمین کننده  $i$  برای ماده اولیه  $r$  در دوره  $t$

$capK_{kpt}$ : ظرفیت توزیع کننده  $k$  برای محصول  $p$  در دوره  $t$

$capH_{hpt}$ : ظرفیت مرکز بازیافت  $h$  برای محصول  $p$  در دوره  $t$

$\rho_{rp}$ : درصد ماده اولیه  $r$  از محصول  $p$  که قابل بازیافت هستند

$\alpha_{cp}$ : درصدی از تقاضا محصول  $p$  از مشتری  $c$  جهت بازیافت

$\gamma_{vp}$ : مقدار آلودگی از ماشین  $v$  به ازای هر واحد محصول  $p$

$\gamma'_{vr}$ : مقدار آلودگی از ماشین  $v$  به ازای هر واحد مواد اولیه  $r$

$\beta J_{jpts}$ : میزان کاهش ظرفیت کارخانه  $j$  برای محصول  $p$  در اثر اختلال در دوره  $t$  تحت

سناریو  $S$

$\beta I_{irits}$ : میزان کاهش ظرفیت تأمین کننده  $i$  برای ماده اولیه  $r$  در اثر اختلال در دوره  $t$

تحت سناریو  $S$



$\beta K_{kpts}$ : میزان کاهش ظرفیت توزیع‌کننده  $k$  برای محصول  $p$  در اثر اختلال در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$

$\beta H_{hpts}$ : میزان کاهش ظرفیت مرکز بازیافت  $h$  برای محصول  $p$  در اثر اختلال در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$

$\eta_t$ : مقدار نرخ تورم در دوره  $t$

$P_{pt}$ : قیمت فروش محصول  $p$  در دوره  $t$

$CS_{jpt}$ : هزینه کمبود کالای  $p$  در کارخانه  $j$  در دوره  $t$

$CSK_{kpt}$ : هزینه کمبود کالای  $p$  در توزیع‌کننده  $k$  در دوره  $t$

$CSH_{hrt}$ : هزینه کمبود ماده اولیه  $r$  در مرکز بازیافت  $h$  در دوره  $t$

$Bd_t$ : میزان بودجه در هر دوره  $t$

$q'_{kpt}$ : کیفیت محصول  $p$  برای توزیع‌کننده  $k$  در دوره  $t$

$Q_{qt}$ : حداقل کیفیت موردنظر محصول  $p$  برای مشتری  $c$  در دوره  $t$

$Cy'_{kcpvt}$ : هزینه ارسال کالای  $p$  از مرکز توزیع‌کننده  $k$  به مشتری  $c$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$  پس از قطعی‌سازی

$Cy_{jkpvt}$ : هزینه ارسال کالای  $p$  از مرکز کارخانه‌ها  $j$  به توزیع‌کننده  $k$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$  پس از قطعی‌سازی

### ۳-۹- متغیرهای سناریو محور

$I_{jpts}$ : موجودی کالای  $p$  در کارخانه  $j$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$

$S_{jpts}$ : کمبود کالای  $p$  در کارخانه  $j$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$

$IK_{kpts}$ : موجودی کالای  $p$  در توزیع‌کننده  $k$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$

$IH_{hpts}$ : موجودی ماده اولیه  $r$  در مرکز بازیافت  $h$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$

$SK_{kpts}$ : کمبود کالای  $p$  در توزیع‌کننده  $k$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$



$SH_{hrtS}$ : کمبود ماده اولیه  $r$  در مرکز بازیافت  $h$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$

$x_{ijrvts}$ : مقدار ارسال کالای اولیه  $r$  از تأمین کننده  $i$  به کارخانه  $j$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$  تحت سناریو  $S$

$zz_{hjrvtS}$ : مقدار ارسال کالای اولیه  $r$  از محل بازیافت  $h$  به کارخانه  $j$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$  تحت سناریو  $S$

$q_{chvptS}$ : مقدار ارسال کالای برگشتی  $p$  از مشتری  $c$  به مرکز بازیافت  $h$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$  تحت سناریو  $S$

$y'_{kcpvts}$ : مقدار ارسال کالای  $p$  از مرکز توزیع کننده  $k$  به مشتری  $c$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$  تحت سناریو  $S$

$y_{jkpvtS}$ : مقدار ارسال کالای  $p$  از مرکز کارخانه ها  $j$  به توزیع کننده  $k$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$  تحت سناریو  $S$

$D'_{cptS}$ : میزان تقاضا مشتری  $c$  در دوره  $t$  بر اساس نرخ تورم تحت سناریو  $S$

$\xi_s$ : مقدار کل تابع هدف به ازای هر سناریو بدون دخالت احتمال آن .

### ۳-۱۰- متغیرهای عدم قطعیت

$\tilde{C}y'_{kcpvt}$ : هزینه ارسال کالای  $p$  از مرکز توزیع کننده  $k$  به مشتری  $c$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$  که به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.

$\tilde{C}y_{jkpvt}$ : هزینه ارسال کالای  $p$  از مرکز کارخانه ها  $j$  به توزیع کننده  $k$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$  که به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.

$\tilde{D}_{cptS}$ : تقاضای غیرقطعی محصول  $p$  برای مشتری  $c$  در دوره  $t$  تحت تأثیر سناریو  $S$  که به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.

$\tilde{C}x_{ijrvt}$ : هزینه ارسال کالای اولیه  $r$  از تأمین کننده  $i$  به کارخانه  $j$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$  که به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.



$\tilde{C}z_{hjvt}$ : هزینه ارسال کالای اولیه  $r$  از محل بازیافت  $h$  به کارخانه  $j$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$  که به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.

$\tilde{C}q_{chpvt}$ : هزینه ارسال کالای برگشتی  $p$  از مشتری  $c$  به مرکز بازیافت  $h$  در دوره  $t$  با ماشین  $v$  که به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.

$\beta J_{jpts}$ : میزان کاهش ظرفیت کارخانه  $j$  برای محصول  $p$  در اثر اختلال در دوره  $t$  و تحت تأثیر سناریو  $S$  که به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.

$\beta I_{irts}$ : میزان کاهش ظرفیت تأمین‌کننده  $i$  برای ماده اولیه  $r$  در اثر اختلال در دوره  $t$  و تحت تأثیر سناریو  $S$  که به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.

$\beta K_{kpts}$ : میزان کاهش ظرفیت توزیع‌کننده  $k$

برای محصول  $p$  در اثر اختلال در دوره  $t$  و تحت تأثیر سناریو  $S$  که به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.

$\beta H_{hpts}$ : میزان کاهش ظرفیت مرکز بازیافت  $h$  برای محصول  $p$  در اثر اختلال در دوره  $t$  و تحت تأثیر سناریو  $S$  که به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.

### ۳-۱۱- مدل ریاضی سناریو محور

پس از آن که مدل قطعی ارائه گردید، به دلیل عدم وجود پارامترهای نرخ کاهش ظرفیت و تقاضا، پارامترها به صورت غیرقطعی وارد مدل شده و از طریق مدل رویاست سناریو محور (مدل مالوی و همکاران، ۱۹۹۵) بررسی گردیدند. مدل ریاضی زیر را در نظر بگیرید که مقادیر  $B, C, e, d^T$  دارای عدم قطعیت می‌باشند:

$$\text{Min}(Z) = C^T \cdot X + d^T \cdot Y$$

$$Ax = b$$

$$Bx + cy = e$$

$$X, Y \geq 0$$

همچنین می‌توان مدل بالا بر اساس سناریوهای متفاوت به صورت زیر نوشت:

$$\text{Min}(Z) = \sigma(x, y_1, \dots, y_{s'}) + \omega \cdot \rho(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)$$



$$Ax = b$$

$$B_{s'}X + C_{s'}Y + \eta_{s'} = e_{s'}$$

$$X, Y, \eta_{s'} \geq 0$$

$$\forall s' \in SS$$

مالوی و همکاران برای مواجهه با این نوع عدم قطعیت، مدل بالا را به صورت ذیل بازنویسی

کردند:

$$Ax = b$$

$$B_{s'}X + C_{s'}Y + \eta_{s'} = e_{s'}$$

$$\varepsilon_{s'} - \sum_{ss \in SS} pp_{ss} \varepsilon_{ss} + \theta_{s'} \geq 0$$

$$X, Y, \eta_{s'} \geq 0$$

$$\forall s' \in SS$$

$$\forall s' \in SS$$

### ۳-۱۱-۱- مدل سازی توابع هدف و محدودیت های غیرقطعی استوار مالوی

$$F1_{ts} = \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} (I_{jpts} \cdot CI_{jpt} + S_{jpts} \cdot CS_{jpt}) + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (IK_{kpts} \cdot CIK_{kpt} + SK_{kpts} \cdot CSK_{kpt})$$

$$+ \sum_{h \in H} \sum_{r \in R} (IH_{hrts} \cdot CIH_{hrt} + SH_{hrts} \cdot CSH_{hrt}) + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} x_{ijrvts} \cdot Cx_{ijrvt}$$

$$+ \sum_{j \in J} \sum_{h \in H} \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} zz_{hjrvt} \cdot Czz_{hjrvt} + \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} q_{chvpts} \cdot Cq_{chvpt}$$

$$+ \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} y_{jkpvts} \cdot Cy_{jkpvt} + \sum_{c \in C} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} y'_{kcpvts} \cdot Cy'_{kcpvt} \quad \forall s \in S, t \in T$$

قسمت اول تابع هدف (حفظ بهینگی) هزینه های موجودی و کمبود در کارخانه،

توزیع کنندگان، مراکز بازیافت همچنین هزینه ارسال کالا به کارخانه، توزیع کننده، مشتری، مراکز

بازیافت را در هر دوره محاسبه می کند.

$$F2_s = \sum_{j \in J} \sum_{h \in H} \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \gamma'_{vr} \cdot zz_{hjrvt} + \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \gamma_{vp} \cdot q_{chvpts}$$

$$+ \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \gamma'_{vr} \cdot x_{ijrvts} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} y_{jkpvts} \cdot \gamma_{vp}$$

$$+ \sum_{c \in C} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} y'_{kcpvts} \cdot \gamma_{vp} \quad \forall s \in S$$



قسمت دوم تابع هدف (حفظ شدنی بودن مدل) مقدار آلودگی محیط‌زیست را به ازای ارسال کالا تحت هر سناریو مشخص می‌کند.

$$Min(A1_s) = \sum_{t \in T} (F1_{ts}) \quad \forall s \in S$$

به‌طورکلی تابع هدف اول، مقدار هزینه سیستم را به ازای هر سناریو مینماید می‌کند. و به‌طورکلی تابع هدف دوم، مقدار آلودگی محیط‌زیست را به ازای هر سناریو مینماید می‌کند.

$$Min(A2_s) = F2_s$$

اگر تابع هدف اول و دوم را به‌صورت روش وزنی جمع کنیم به‌صورت زیر خواهد شد:

$$\xi_s = (w_1 \cdot A1_s + w_2 \cdot A2_s) \quad \forall s \in S$$

$$I_{jpts} - S_{jpts} = I_{jpt-1s} - S_{jpt-1s} + \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} \sum_{i \in I} x_{ijrvts} \cdot \lambda_{rp} - \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} y_{jkpvts} + \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} \sum_{h \in H} z z_{hjrvt-1s} \cdot \lambda_{rp} \quad \forall j \in J, p \in P, t \in T, s \in S \quad (1)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in J} x_{ijrvts} - \eta_{irts}^1 \leq (1 - \beta I_{irts}) \cdot cap I_{irt} \cdot YI_{is} \quad \forall i \in I, t \in T, r \in R, s \in S \quad (2)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{k \in K} y_{jkpvts} - \eta_{jpts}^2 \leq (1 - \beta J_{jpts}) \cdot cap J_{jpt} \cdot YJ_j \quad \forall j \in J, t \in T, p \in P, s \in S \quad (3)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{c \in C} y'_{ckpvts} - \eta_{kpts}^3 \leq (1 - \beta K_{kpts}) \cdot cap K_{kpt} \cdot YK_k \quad \forall k \in K, t \in T, p \in P, s \in S \quad (4)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{c \in C} q_{chpvts} - \eta_{hpts}^4 \leq (1 - \beta H_{hpts}) \cdot cap H_{hpt} \cdot YH_h \quad \forall h \in H, t \in T, p \in P, s \in S \quad (5)$$

$$IK_{kpts} - SK_{kpts} = IK_{kpt-1s} - SK_{kpt-1s} + \sum_{j \in J} \sum_{v \in V} y_{jkpvts} - \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} y'_{ckpvts} \quad \forall k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{v \in V} y'_{ckpvts} = D_{cpt} \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T, s \in S \quad (7)$$

$$IH_{hrts} - SH_{hrts} = IH_{hrt-1s} - SH_{hrt-1s} - \sum_{v \in V} \sum_{j \in J} z z_{hjrvt} + \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \varphi_{rp} \cdot q_{chvpts} \quad (8)$$

$$\forall h \in H, t \in T, r \in R, s \in S$$

(9)



$$F1_{ts} \leq Bd_t \quad (10)$$

$$yy_{kcpts} \leq \sum_{v \in V} y'_{kcvts} \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (11)$$

$$yy_{kcpts} \cdot MM \geq \sum_{v \in V} y'_{kcvts} \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (12)$$

$$(Q_{cpt} - q'_{kpt}) \cdot yy_{kcpts} \geq (z_{kcpts} - 1) \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (13)$$

$$(Q_{cpt} - q'_{kpt}) \cdot yy_{kcpts} \leq z_{kcpts} \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (14)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{v \in V} q_{chpvs} \geq \alpha_{cp} \cdot \sum_{v \in V} y'_{kcvts} - (1 - Z_{kcpts}) \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (15)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{v \in V} q_{chpvs} \leq \alpha_{cp} \cdot \sum_{v \in V} y'_{kcvts} + (1 - Z_{kcpts}) \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (16)$$

$$I_{jpts}, S_{jp ts}, IK_{kpts}, IH_{hrts}, SK_{kpts}, SH_{hrts}, x_{ijrvts}, zz_{hjrvt}, q_{chpvs}, y'_{kcvts}, D'_{cpts}, y_{jkvpts} \geq 0$$

$$yy_{kcpts}, Z_{kcpts}, YI_i, YK_k, YJ_j, YH_h \in \{0, 1\}$$

محدودیت اول، به ازای هر سناریو موجودی، کمبود، دریافت و ارسال در کارخانه را محاسبه می‌کند. محدودیت دوم، به ازای هر سناریو ظرفیت تأمین‌کننده را برحسب اختلال محاسبه می‌کند. محدودیت سوم، به ازای هر سناریو ظرفیت کارخانه را برحسب اختلال محاسبه می‌کند. محدودیت چهارم، به ازای هر سناریو ظرفیت توزیع‌کننده را برحسب اختلال محاسبه می‌کند. محدودیت پنجم، به ازای هر سناریو ظرفیت مراکز بازیافت را برحسب اختلال محاسبه می‌کند. محدودیت ششم، به ازای هر سناریو موجودی، کمبود، دریافت و ارسال در توزیع‌کننده را محاسبه می‌کند. محدودیت هفتم، به ازای هر سناریو مقدار ارسال به مشتریان را محاسبه می‌کند. محدودیت هشتم، به ازای هر سناریو موجودی، کمبود و ارسال ماده اولیه  $\Gamma$  در مرکز بازیافت را محاسبه می‌کند. محدودیت نهم، به ازای هر سناریو میزان تقاضا را برحسب نرخ تورم



و قیمت محاسبه می‌کند. محدودیت دهم، هزینه‌ها به ازای هر سناریو بر اساس بودجه تأمین می‌شود. محدودیت یازده و دوازده، به ازای هر سناریو متغیر صفر و یک  $y_{kcpst}$  را محاسبه می‌کند. محدودیت سیزده و چهارده، به ازای هر سناریو تعیین می‌کند اگر کیفیت کالای ارسالی از حداقل کیفیت پایین‌تر بود اجازه ارسال به محل بازیافت را دارد. محدودیت پانزده و شانزده، به ازای هر سناریو بر اساس محصولات بی‌کیفیت، مقدار ارسالی از مشتریان به مرکز بازیافت را محاسبه می‌کند.

### ۳-۱۱-۲- مدل نهایی غیرقطعی سناریو محور (استوار مالوی)

مالوی و همکاران برای مواجهه با این نوع عدم قطعیت، مدل‌بالا را به صورت زیر بازنویسی کردند:

❖ پارامترهای مالوی مدل:

$pp_s$ : مقدار احتمال وقوع هر سناریو

$\omega$ : وزن غیرموجه بودن مدل

❖ متغیرهای مثبت مدل:

$\theta_s$ : اختلاف تابع هدف از میانگین آن به ازای هر سناریو.

$\eta_{irts}^1, \eta_{jpts}^2, \eta_{kpts}^3, \eta_{hpts}^4, \eta_{cpts}^5$ : مقدار تخطی محدودیت از پارامتری که عدم قطعیت دارد (ناموجه بودن مدل را نشان می‌دهد).

### ➤ مدل ریاضی طراحی شده سناریو محور (مالوی)

$$\begin{aligned} \text{Min}(Z) = & \sum_{s \in S} pp_s \xi_s + \gamma \cdot \sum_{s \in S} pp_s [(\xi_s - pp_s \xi_s) + 2\theta_s] \\ & + \omega \cdot \sum_{s \in S} pp_s \cdot (\sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \eta_{irts}^1 + \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \eta_{jpts}^2 + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \eta_{kpts}^3 + \sum_{h \in H} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \eta_{hpts}^4 + \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \eta_{cpts}^5) \\ \sum_{v \in V'} \sum_{j \in J} x_{ijrvts} - \eta_{irts}^1 \leq & (1 - \beta I_{irts}) \cdot \text{cap} I_{irt} \cdot YI_{is} \quad \forall i \in I, t \in T, r \in R, s \in S \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{v \in V'} \sum_{k \in K} y_{jkqvts} - \eta_{jpts}^2 \leq (1 - \beta J_{jpts}) \cdot \text{cap} J_{jpt} \cdot YJ_j \quad \forall j \in J, t \in T, p \in P, s \in S \quad (2)$$





$$\sum_{v \in V'} \sum_{c \in C} y'_{kcpvts} - \eta_{kpts}^3 \leq (1 - \beta K_{kpts}) \cdot cap K_{kpt} \cdot YK_k \quad \forall k \in K, t \in T, p \in P, s \in S \quad (3)$$

$$\sum_{v \in V'} \sum_{c \in C} q_{chpvts} - \eta_{hpts}^4 \leq (1 - \beta H_{hpts}) \cdot cap H_{hpt} \cdot YH_h \quad \forall h \in H, t \in T, p \in P, s \in S \quad (4)$$

$$D'_{cpts} + \eta_{cpts}^5 = D_{cpts} - (1 + \eta_t) \cdot P_{pt} \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T, s \in S \quad (5)$$

$$\xi_{s'} - \sum_{s \in S} pp_s \xi_s + \theta_{s'} \geq 0 \quad \forall s' \in S \quad (6)$$

$$I_{jpts} - S_{jpts} = I_{jpt-1s} - S_{jpt-1s} + \sum_{r \in R} \sum_{v \in V'} \sum_{t \in T} x_{jrvts} \cdot \lambda_{rp} - \sum_{k \in K} \sum_{v \in V'} y_{jkvts} + \sum_{r \in R} \sum_{v \in V'} \sum_{h \in H} z_{hjrvts-1s} \cdot \lambda_{rp} \quad (7)$$

$$\forall j \in J, p \in P, t \in T, s \in S$$

$$IK_{kpts} - SK_{kpts} = IK_{kpt-1s} - SK_{kpt-1s} + \sum_{j \in J} \sum_{v \in V'} y_{jkvts} - \sum_{c \in C} \sum_{v \in V'} y'_{kcpvts} \quad \forall k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{v \in V'} y'_{kcpvts} = D_{cpts} \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T, s \in S \quad (9)$$

$$IH_{hrts} - SH_{hrts} = IH_{hrt-1s} - SH_{hrt-1s} - \sum_{v \in V} \sum_{j \in J} z_{hjrvts} + \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \varphi_{rp} \cdot q_{chvpts} \quad (10)$$

$$\forall h \in H, t \in T, r \in R, s \in S$$

$$Fl_{ts} \leq Bd_t \quad (11)$$

$$yy_{kcpvts} \leq \sum_{v \in V'} y'_{kcpvts} \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (12)$$

$$yy_{kcpvts} \cdot MM \geq \sum_{v \in V'} y'_{kcpvts} \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (13)$$

$$(Q_{cpt} - q'_{kpt}) \cdot yy_{kcpvts} \geq (z_{kcpvts} - 1) \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (14)$$

$$(Q_{cpt} - q'_{kpt}) \cdot yy_{kcpvts} \leq z_{kcpvts} \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (15)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{v \in V'} q_{chpvts} \geq \alpha_{cp} \sum_{v \in V'} y'_{kcpvts} - (1 - Z_{kcpvts}) \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (16)$$



$$\sum_{h \in H} \sum_{v \in V'} q_{chpnts} \leq \alpha_{cp} \cdot \sum_{v \in V'} y'_{kcpnts} + (1 - Z_{kcpnts}) \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (17)$$

$$\xi_s = (w_1 \cdot A1_s + w_2 \cdot A2_s) \quad \forall s \in S \quad (18)$$

$$I_{jps} \geq S_{jpts}, IK_{kpts}, IH_{hrts}, SK_{kpts}, SH_{hrts}, x_{ijrvts}, z_{hjrvts}, q_{chvpts}, y'_{kcpnts}, D'_{cpt} \\ y_{jkp vts} \geq 0 \\ y_{kcpnts}, z_{kcpnts}, YI_i, YK_k, YJ_j, YH_h \in \{0, 1\} \\ \theta_{s'}^1, \eta_{irts}^1, \eta_{jpts}^2, \eta_{kpts}^3, \eta_{hpts}^4, \eta_{cpt}^5 \geq 0$$

#### ۴- تحلیل حساسیت مدل ریاضی

سپس به تحلیل حساسیت مدل غیرقطعی براساس هزینه‌های کمبود در مرکز توزیع‌کننده  $CSK_{kpt}$  به دلیل نقش از دست دادن مشتری و اعتبار مراکز توزیع‌کننده پرداخته و پارامتر  $CSK_{kpt}$  برای دوره سوم ( $t=3$ ) و توزیع‌کننده  $k_1$  و محصول  $p_1$  موردبررسی قرار گرفته شد.

جدول ۲. تحلیل حساسیت مدل غیرقطعی

پارامتر	میزان تغییرات هزینه کمبود $CSK_{k_1 p_1 t_3}$	میزان کمبود $SK_{k_1 p_1 t_3}$	A1	A2	مجموع وزنی تابع هدف
	+/.۵۰	۰	۹۶۷۵۴۰۰	۵۴۰۹/۹۸۳	۴۸۳۵۰۰۰
$CSK_{k_1 p_1 t_3}$	۰	۴۲۶/۹۶۲	۹۶۶۳۰۰۰	۵۳۹۲/۴۶۸	۴۸۲۸۸۰۰
	-/.۵۰	۶۵۲/۹۴۳	۹۵۱۶۲۰۰	۵۳۱۴/۸۱۷	۴۷۵۵۵۰۰
	-/.۷۰	۱۰۷۴/۵۳۷	۹۴۲۳۹۰۰	۴۹۳۰/۲۷۲	۴۷۰۹۵۰۰

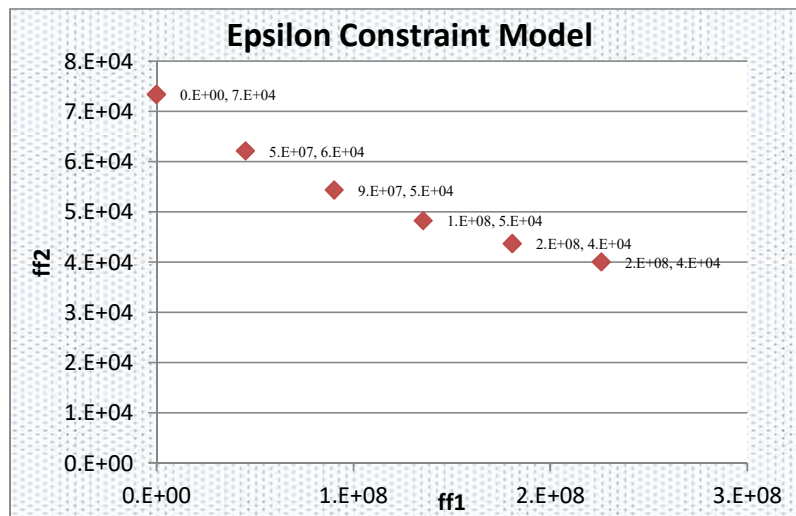
با توجه به پارامترهای تعریف شده و با افزایش هزینه‌های کمبود، به دلیل افزایش هزینه‌ها، انتظار کمبود برای آن مرکز توزیع باید کاهش پیدا کند که میزان کمبود صفر گردیده است و با کاهش هزینه‌های کمبود میران کمبود به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. پس بهینه‌ترین حالت به دلیل کاهش میزان کمبود برای مرکز توزیع  $k_1$ ، افزایش هزینه کمبود برای آن دوره و



توزیع‌کننده است. در نتیجه این نکته مؤید آن است که میزان تغییرات در متغیر و توابع هدف منطبق با رفتار تشریح شده است.

#### ۴-۱ پیاده سازی و تحلیل مدل

مدل ریاضی طراحی شده در شرکت تأمین‌کننده قطعات خودرو پیاده‌سازی شد تا از درستی کارکرد مدل طراحی شده در سیستم اطمینان کاملی حاصل گردد که نتایج آن متعاقباً آورده شده است. همان‌طور که در نمودار (۳) مشاهده می‌شود، تابع هدف دوم با  $(4.0031/748)$  در بهترین و در مینم‌ترین حالت تابع هدف قرار دارد و در مورد تابع هدف اول مینم‌ترین حالت برابر با (صفر) است و بهترین حالتی ندارد و نقطه پارتو فرانت  $(4.0031/748)$  بر دیگر نقاط پارتو غلبه دارد و این نشان می‌دهد که این نقطه خاص بهترین راه‌حل‌های مبادله‌ای بین اهداف متضاد مسئله بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. با تسلط بر سایر نقاط در جبهه پارتو، این نقطه از نظر دستیابی به تعادل بهتر، بین دو هدف برتر تلقی می‌شوند.



نمودار ۳. نقاط پارتو فرانت تابع هدف FF1, FF2 در اکسل



جدول ۳. بهترین و بدترین جواب توابع هدف گمز

	FF1	FF2
بهترین جواب	-	۴۰۰۳۱/۷۴۸
بدترین جواب	۲/۲۵۷۴۳۲۵+۸	۷۳۳۹۴/۸۷۶

به‌طور کلی، تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد، درحالی‌که تابع هدف دوم، حالت‌های بهینه واضحی را نشان می‌دهد، تابع هدف اول ممکن است به ارزیابی بیشتر برای تعیین بهترین جواب نیاز داشته باشد. نقطه فرعی پارتو (۴۰۰۳۱/۷۴۸) به‌عنوان جواب کلیدی ظاهر می‌شود که مطلوب‌ترین مبادلات را بین اهداف موردبررسی ارائه می‌دهد.

در پاسخ به سؤالات مطالعه باید متذکر شد پارامترهای عدم قطعیت در مدل ریاضی زنجیره تأمین پایدار هزینه‌های ارسال، کاهش ظرفیت در اثر اختلال و تقاضای مشتری بر اثر نرخ تورم می‌باشد و پارامترهای استوار محور مطالعه که تحت تأثیر سناریو محور مالوی بودند، کاهش ظرفیت در اثر اختلال و تقاضای مشتری بر اثر نرخ تورم می‌باشد.

## ۵- یافته‌های پژوهش

مطالعه حاضر، با توجه به محدودیت‌های غیرخطی ناشی از پارامترهای غیرقطعی، با ارائه مدل ریاضی زنجیره تأمین پایدار مبتنی بر پارامترهای عدم قطعیت (کاهش ظرفیت در اثر اختلال، هزینه‌های ارسال و تقاضا) به کمینه‌سازی هزینه‌ها، آلاینده‌های زیست‌محیطی پرداخته است. مدل پیشنهادی می‌تواند ابزار کارآمدی برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار و انعطاف‌پذیر باشد. این مطالعه می‌تواند جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد. مدل مبتنی بر سناریو محور به‌طور مؤثر با عدم قطعیت‌های تقاضا، هزینه‌های ارسال و اختلالاتی که ظرفیت را کاهش می‌دهد، مقابله می‌کند. این پژوهش از لحاظ ماهیت پژوهش، توصیفی-تحلیلی است. همچنین از نظر هدف نوعی پژوهش کاربردی می‌باشد که به حل مسئله رویکرد بهینه‌سازی استوار پرداخته است.

پارامترها در دوره‌های زمانی کوتاهی تغییر پیدا می‌کنند. بنابراین تصمیم‌گیری برای یک بازه‌ی طولانی مدت امری غیرواقع‌بینانه و به‌عبارتی دیگر غیرمنطقی می‌باشد. عدم در نظر گرفتن عدم اطمینان در پارامترهای مدل، خروجی‌های به‌دست‌آمده را بی‌کیفیت می‌کند و نتایج



به دست آمده چندان قابل اطمینان نیستند. بنابراین، عدم اطمینانی که در پارامترهای مسئله وجود دارد باید تا حد زیادی در مدل دیده شود تا نتایج به دست آمده قابلیت اطمینان بیشتری پیدا کند. کاهش ظرفیت در اثر اختلال در شرایط عدم قطعیت موجب اختلال در مراکز زنجیره تأمین پایدار می شود و شرایط را به گونه ای بحرانی قرار می دهد و یافته ها حاکی از آن است که با مدل طراحی شده حاضر، استراتژی مناسبی می توان تدوین نمود که بر راحتی از این شرایط گذر شود. یافته ها نشان داد توجه به ابعاد اجتماعی، افزایش هزینه ها را در بر دارد اما نگاه مدل حاضر به ابعاد زیست محیطی و اقتصادی به طور هم زمان، کاهش آلودگی زیست محیطی و کاهش هزینه ها را با سودآوری به همراه دارد. همچنین یافته ها مؤید آن است که مدل پیشنهادی اهمیت زیادی در تضمین پایداری زنجیره تأمین دارد. بر اساس تجزیه و تحلیل حساسیت، سطح پاسخگویی به شدت بر اهداف یک زنجیره تأمین پایدار تأثیر می گذارد همچنین نتایج مؤید آن است، استفاده از این مدل ریاضی سناریو محور مالوی در شرایط عدم اطمینان در زنجیره تأمین پایدار، می تواند به دستیابی به نتایج مطلوب و مثمر منجر شود. مدل ریاضی به نحو مؤثری به عدم قطعیت تقاضا و هزینه های ارسال و کاهش ظرفیت در اثر اختلال، پرداخته است در حالی که در مسائل با مجموعه های بزرگ تر از کارآمدی مدل کاسته شد.

سپس پیشنهادهایی برای دستیابی به نتایج بهتر ارائه گردید:

۱. با تغییر به مواد سبز، شرکت ها می توانند اثرات کربنی خود را کاهش داده و تأثیر منفی تولید و دفع پلاستیک را در محیط زیست کاهش دهند.
۲. برای داشتن تأثیر قابل توجه در جامعه جهانی و بهبود کیفیت هوای محیطی، هدف نهایی باید کاهش گازهای گلخانه ای و ترویج شیوه های پایدار در صنایع مختلف باشد. این می تواند شامل تغییر به منابع انرژی تجدیدپذیر، اجرای مقررات محیط زیستی سخت گیرانه تر و ترویج استفاده از مواد سبز در فرآیندهای تولید باشد.
۳. برای کاهش آلودگی زیست محیطی ناشی از شرکت ها، می توان اقدامات مختلفی را انجام داد. این اقدامات شامل اجرای شیوه های پایدار، استفاده از فناوری های تمیز، کاهش تولید پسماندها، بازیافت، تصفیه فاضلاب قبل از دفع و رعایت مقررات و استانداردهای زیست محیطی است. به علاوه، شرکت ها می توانند آگاهی زیست محیطی



را افزایش دهند، به شیوه‌های مسئولانه در کسب‌وکار خود عمل کنند و در منابع انرژی تجدیدپذیر سرمایه‌گذاری کنند تا تأثیر زیست‌محیطی خود را کاهش دهند. همچنین محقق با موانع و محدودیت‌های ذیل مواجه بود:

۱. از آنجایی که مدل حاوی ۱۰ پارامتر غیرقطعی بود محقق نتوانست پارامترهای بیشتری را در شرایط نااطمینانی بررسی نماید چرا که مدل در حل آن خطا می‌داد و جواب درستی نمی‌داد!
۲. از آنجایی که مدل از نوع NP-Hard بود و برای حل مجموعه‌های بزرگ با لپ‌تاپ خانگی محقق نمی‌توانست که مدل را به راحتی Run بگیرد، دانشگاه‌هایی که مجهز به ابررایانه و فضای ابری بودند به سختی تعامل و همکاری کردند.

## ۶- قدردانی و یادبود

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از زحمات و راهنمایی استاد اندیشمند و فقید، زنده‌یاد دکتر عادل آذر که در طول حیات پرخیر و برکت خویش، همواره در راستای ارتقا علم و دانش کوشیدند قدردانی نمایند.

## ۷- منابع

- [1] Qin J, Zhao Y, Xia L. Carbon emission reduction with capital constraint under greening financing and cost sharing contract. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(4):750.
- [2] Wang W, Zhang Y, Zhang W, Gao G, Zhang H. Incentive mechanisms in a green supply chain under demand uncertainty. *Journal of cleaner production*. 2021;279:123636.
- [۳] آذر، ع.، فرخ، م.، « برنامه‌ریزی ریاضی در شرایط عدم‌اطمینان (رویکردهای تصادفی، فازی و استوار) »، سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها (سمت)، ۱۳۹۸.
- [4] Allaoui H, Guo Y, Sarkis J. Decision support for collaboration planning in sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*. 2019;229:761-74.



- [5] قربانخانی، ا.، مروتی شریف‌آبادی، ع.، میر غفوری، س.ح.، میر فخرالدینی، س.ح.، «طراحی مدل احتمالاتی زنجیره تأمین پایدار در صنعت برق با نفوذ تولیدات تجدیدپذیر»، *پژوهش‌های مدیریت منابع سازمانی*، ۱۱(۱)، ۱۴۰۰.
- [6] Foroozesh N, Karimi B, Mousavi S. Green-resilient supply chain network design for perishable products considering route risk and horizontal collaboration under robust interval-valued type-2 fuzzy uncertainty: A case study in food industry. *Journal of environmental management*. 2022;307:114470.
- [7] کاظمی، ع.، شفیعی، ف.، جعفر نژاد چقوشی، ا.، سازور، ز.، عموزاده مهدیرجی، ح.، «ارائه یک مدل بهینه‌سازی استوار زنجیره تأمین پایدار برای محصولات فسادپذیر لبنی»، *فصلنامه مدیریت تولید و عملیات*، دوره ۱۱(۳)، ۱۳۹۹: ۱۷-۴۶.
- [8] آذر، ع.، مدرس یزدی، م.، فطانت فرد حقیقی، م.، ربیعه، م.، «طراحی مدل ریاضی استوار زنجیره تأمین» *دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس*، ۱۳۸۹.
- [9] Homayouni Z, Pishvae MS, Jahani H, Ivanov D. A robust-heuristic optimization approach to a green supply chain design with consideration of assorted vehicle types and carbon policies under uncertainty. *Annals of Operations Research*. 2023:1-41.
- [10] Li J, Liu P. Modeling green supply chain games with governmental interventions and risk preferences under fuzzy uncertainties. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2022;192:182-200.
- [11] Santibañez-Aguilar JE, Castellanos S, Flores-Tlacuahuac A, Shapiro BB, Powell DM, Buonassisi T, et al. Design of domestic photovoltaics manufacturing systems under global constraints and uncertainty. *Renewable Energy*. 2020;148:1174-89.
- [12] Shahbazbegian V, Hosseini-Motlagh S-M, Haeri A. Integrated forward/reverse logistics thin-film photovoltaic power plant supply chain network design with uncertain data. *Applied Energy*. 2020;277:115538.
- [13] Khishtandar S. Simulation based evolutionary algorithms for fuzzy chance-constrained biogas supply chain design. *Applied Energy*. 2019;236:183-95.
- [14] Yavari M, Geraeli M. Heuristic method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods. *Journal of Cleaner Production*. 2019;226:282-305.

- [15] Modak NM, Kelle P. Managing a dual-channel supply chain under price and delivery-time dependent stochastic demand. *European Journal of Operational Research*. 2019;272(1):147-61.
- [16] Sherafati M, Bashiri M, Tavakkoli-Moghaddam R, Pishvae MS. Supply chain network design considering sustainable development paradigm: A case study in cable industry. *Journal of cleaner production*. 2019;234:366-80.
- [17] Bairamzadeh S, Saidi-Mehrabad M, Pishvae MS. Modelling different types of uncertainty in biofuel supply network design and planning: A robust optimization approach. *Renewable energy*. 2018;116:500-17.
- [18] Gong J, You F. Resilient design and operations of process systems: Nonlinear adaptive robust optimization model and algorithm for resilience analysis and enhancement. *Computers & chemical engineering*. 2018;116:231-52.
- [19] Dehghani E, Jabalameli MS, Jabbarzadeh A, Pishvae MS. Resilient solar photovoltaic supply chain network design under business-as-usual and hazard uncertainties. *Computers & Chemical Engineering*. 2018;111:288-310.
- [20] Ahmed W, Sarkar B. Impact of carbon emissions in a sustainable supply chain management for a second generation biofuel. *Journal of cleaner production*. 2018;186:807-20.
- [21] Heidari-Fathian H, Pasandideh SHR. Green-blood supply chain network design: Robust optimization, bounded objective function & Lagrangian relaxation. *Computers & Industrial Engineering*. 2018;122:95-105.
- [22] Yadollahinia M, Teimoury E, Paydar MM. Tire forward and reverse supply chain design considering customer relationship management. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018;138:215-28.
- [23] Jabbarzadeh A, Fahimnia B, Sabouhi F. Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks. *International Journal of Production Research*. 2018;56(17):5945-68.
- [24] Zahiri B, Jula P, Tavakkoli-Moghaddam R. Design of a pharmaceutical supply chain network under uncertainty considering perishability and substitutability of products. *Information sciences*. 2018;423:257-83.
- [25] Mulvey JM, Vanderbei RJ, Zenios SA. Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*. 1995;43(2):264-81.