



Inter-Chain Competition Based on Sustainability and Resilience Indicators in the Problem of Supply Chain Network Design

Hossein Mollashahi, Mohammad Bagher Fakhrazad *, Hasan Hoseini Nasab , Hasan Khademi Zare 

* Professor, Department of Industrial Engineering, Technical and Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran

(Received: 02/01/2024, Revised: 01/02/2024, Accepted: 06/02/2024, Published: 20/05/2024)

DOR: 20.1001.1.20089198.1403.26.82.6.3


ABSTRACT

Nowadays, the issue of supply chain network design has garnered significant attention in supply chain management. Researchers have focused on the competitiveness of markets and the pursuit of greater benefits. Therefore, this article presents a multi-objective mathematical model for the design of a dynamic and integrated supply chain network, specifically addressing a competitive and sustainable closed-loop supply chain for a perishable commodity. The proposed model incorporates competition between two supply chains, considering environmental, social, and resilience factors. To solve this competitive model, a two-step approach is introduced. In this two-stage approach, the first stage involves calculating equilibrium values for competitive decisions using game theory. Then, in the second stage, an innovative multi-objective algorithm based on Pareto optimization is employed to solve the network design problem, taking into account the results from the competitive stage and addressing the complexities of the proposed model. Finally, the efficiency of the proposed model and solution approach is evaluated using a numerical example analyzed graphically and statistically. The results and graphs demonstrate that the proposed model performs well and successfully achieves the intended objectives.

Keywords: Supply Chain Network, Inter-Chain Competition, Sustainability, Resilience, Perishable Goods, Metaheuristic Optimization Algorithm, Game Theory

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



* Corresponding Author Email: mfakhrazad@yazd.ac.ir

رقابت بین زنجیره‌های براساس شاخص‌های پایداری و تاب‌آوری در مسأله طراحی شبکه زنجیره تامین

حسین ملاشاهی^۱، محمدباقر فخرزاد^{۲*}، حسن حسینی نسب^۳، حسن خادمی زارع^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. ۲ و ۳- استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

DOR:20.1001.1.20089198.1403.26.82.6.3

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۲/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۱۲

چکیده

امروزه مسأله طراحی شبکه زنجیره تامین به عنوان یکی از مهم‌ترین موضوعات در مدیریت زنجیره تامین مورد توجه واقع شده است. رقابتی بودن بازارها و تلاش برای کسب منافع بیشتر یکی از موضوعاتی است که محققان در مطالعات خود به آن توجه داشته‌اند. براین اساس در این مقاله، یک مدل ریاضی چندهدفه برای طراحی شبکه پویا و یکپارچه یک زنجیره تامین حلقه بسته رقابتی و پایدار برای کالایی زوال‌پذیر ارائه شده است. در مدل پیشنهادی، رقابت بین دو زنجیره تامین با توجه به مسأله زیست‌محیطی، اجتماعی و تاب‌آوری در نظر گرفته شده است. برای حل این مدل رقابتی، یک رویکرد دو مرحله‌ای معرفی گردیده است. در این رویکرد دومرحله‌ای، در مرحله اول با استفاده از نظریه بازی‌ها، مقادیر تعادلی برای تصمیمات رقابتی محاسبه می‌شود و سپس در مرحله دوم با توجه به نتایج مرحله رقابتی و رعایت پیچیدگی‌های مدل پیشنهادی، از یک الگوریتم فراابتکاری چندهدفه مبتنی بر پارتو برای حل مسأله طراحی شبکه به‌دست آمده، استفاده شده است. نهایتاً، برای ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی و رویکرد راه‌حل ارائه شده، با مثال عددی به صورت گرافیکی و آماری مسأله بررسی شده است. نتایج و نمودارها نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی عملکرد مناسبی داشته و اهداف مدنظر را برآورده می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: شبکه زنجیره تامین، رقابت بین زنجیره‌ای، پایداری، تاب‌آوری، کالای زوال‌پذیر، الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری، نظریه بازی‌ها

۱- مقدمه

اگرچه بسیاری از محققان مسأله رقابت درون زنجیره‌های تامین و میان اعضای آن را مورد بررسی قرار داده‌اند، اما با وجود تغییر ماهیت رقابت از حالت داخلی به حالت خارجی و میان زنجیره‌های تامین، موضوع رقابت زنجیره تامین با یکدیگر کمتر در ادبیات مدیریت زنجیره تامین مشاهده شده است [۱]. در دنیای رقابتی موجود زنجیره‌های تامین پیچیده‌تر شده و باعث آسیب‌پذیرتر شدن و در معرض خطرهای مختلف قرار گرفتن آن گردیده است. زنجیره‌های تامین با چالش‌ها و تهدیدهای بزرگی همچون حوادث طبیعی (سیل، زلزله، طوفان، آتش‌سوزی و...)، حملات سایبری، تحریم، اختلالات در سیستم تامین، تولید و توزیع و ... روبرو هستند. بنابراین، مدیران و تصمیم‌گیران زنجیره تامین همواره به دنبال یافتن راه‌هایی برای مدیریت شرایط در هنگام وقوع اختلالات جهت جلوگیری از ایجاد وقفه در زنجیره تامین بوده و همواره راهکارهایی جهت مقابله با اختلالات، پیش

تصمیم‌گیری در مورد مسأله طراحی شبکه زنجیره تامین کالاهای زوال‌پذیر به عنوان یک تصمیم بلندمدت و راهبردی با هزینه‌ها و سرمایه‌های هنگفت، بدون توجه به فضای رقابتی زنجیره تامین می‌تواند تبعات و عواقب غیرقابل جبرانی را برای کل زنجیره تامین به همراه داشته باشد. در طول سال‌های اخیر محققین، آینده رقابتی زنجیره تامین و اثرات آن را به صورت یکپارچه در مسأله طراحی شبکه زنجیره تامین مورد توجه قرار داده‌اند. از جمله عوامل رقابتی که در مطلوبیت زنجیره‌های تامین و افزایش سهم بازار آن‌ها مؤثر است، تصمیمات اقتصادی، زیست‌محیطی، کیفی و تاب‌آوری می‌باشد.

* رایانامه نویسنده مسئول: mfakhrzad@yazd.ac.ir

"زنجیره تأمین تاب‌آور - پایدار تحت رقابت" تقسیم و بررسی گردیده است.

۱-۲- زنجیره تأمین تاب‌آور و پایدار برای کالاهای زوال‌پذیر

با بررسی مقالات در حوزه‌های تاب‌آوری، پایداری و زوال‌پذیری در زنجیره تأمین در سال‌های اخیر، می‌توان دریافت که توجه به جنبه اقتصادی زنجیره تأمین بیشتر مورد توجه قرار گرفته شده است. هرچند که در این سال‌ها توجه به مسایل زیست محیطی کمتر مورد توجه محققان و صنایع قرار گرفته شده است. براین اساس وقوع برخی رخدادها و اختلالات محققان را به پیش‌بینی به منظور مدیریت شرایط و مقابله با تاثیرات ناشی از آن و افزایش انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری زنجیره‌های تأمین سوق داده است. منگیتی و مونت [۵] مدلی را برای بهینه‌سازی طراحی سیستم «ذخیره‌سازی و بازیابی خودکار» برای اقلام یخچال‌دار پیشنهاد کرده است. آن‌ها عوامل متعددی از جمله انرژی مورد نیاز تاسیسات و تجهیزات همراه با انتشار دی اکسید کربن کل و هزینه کل زنجیره تأمین را در نظر گرفته و مدل خود را با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت اپسیلون حل نموده‌اند. نتایج عددی وجود رابطه معنادار بین دمای ذخیره‌سازی و مصرف انرژی و هزینه کل را نشان می‌دهد. کولیکیا و همکاران [۶] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دو هدفه از مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین کالای زوال‌پذیر را پیشنهاد کرده‌اند. هدف آن‌ها به حداقل رساندن انتشار گاز CO₂ و هزینه توزیع و در نهایت ترکیب دو هدف در یک هدف واحد توسط میانگین وزنی دو تابع هدف بوده است. سیف و همکاران [۷] یک رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی را برای طراحی زنجیره تأمین زنجیره سازگار با محیط زیست پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را با در نظر گرفتن هزینه کل برای محصولات فاسد شدنی گوشت و واکسن را در کانادا مطالعه نموده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اثرات زیست محیطی زنجیره تا حدود ۱٪ می‌تواند حتی بدون افزایش هزینه کل کاهش یابد. بناسیک و همکاران [۸] طراحی یک زنجیره تأمین کشاورزی را با ارائه یک مدل دو هدفه مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها به طور خاص زنجیره تأمین قارچ دو طبقه را مطالعه کرده ولی به صراحت به فسادپذیری محصولات اشاره نکرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که زنجیره می‌تواند سودآوری خود را ۱۱٪ افزایش داده و اثرات زیست محیطی را تا ۲۸٪ کاهش دهد. یآوری و ذاکر [۹] طراحی شبکه زنجیره تأمین کالای زوال‌پذیر سبز را مورد بررسی قرار داده‌اند. مدل آن‌ها انعطاف‌پذیری زنجیره دو سطحی یکپارچه را با قطع برق در نظر گرفته است. هدف آن‌ها حداقل نمودن هزینه کل زنجیره و انتشار گاز CO₂ بوده است. آن‌ها مدل پیشنهادی را با استفاده از روش LP-metric حل کرده‌اند.

بینی می‌کنند. برای مثال، پاندمی COVID-19 بر عملیات زنجیره تأمین ۹۴٪ از شرکت‌های Fortune 1000 تأثیر گذاشته است [۲]. اخیراً، متخصصین، راهبردهایی مانند تاب‌آوری را برای به حداقل رساندن تأثیر چنین رویدادهای بی سابقه‌ای توسعه داده‌اند. توسعه فناوری و دیجیتالی شدن فرآیندها کمک بسیاری در این زمینه نموده است [۳]. صادقی و قیصری حسن‌آبادی [۴] توانایی یک زنجیره تأمین برای جلوگیری از وقوع یک اختلال غیرمنتظره یا بازگشت سریع به یک وضعیت عادی را انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین تعریف می‌کند. برخلاف کارهای قبلی آن‌ها بر ادغام تاب‌آوری زنجیره تأمین و اهداف توسعه پایدار (تاب‌آوری زنجیره تأمین پایدار) تاکید کرده‌اند. آن‌ها یک زنجیره تأمین چهار سطحی متشکل از تامین‌کنندگان، هاب‌های بین‌وجهی، تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان به همراه ناوگان ناهمگون وسایل نقلیه را پیشنهاد می‌کند. ایشان برای کمک به انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین، یک رویکرد رباست جدید و یک الگوریتم چندهدفه جدید برای ثبت پارامترهای نامشخص (مانند هزینه تأمین و در دسترس بودن کارکنان) ارائه می‌کنند.

در این مقاله، مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین برای کالاهای زوال‌پذیر با حساسیت نسبت به گذشت زمان، شاخص‌های کیفی، زیست محیطی و تاب‌آوری محصولات به عنوان یک عامل رقابتی اقتصادی در حالت رقابت دو زنجیره تأمین مورد توجه قرار گرفته شده است. به این منظور، مدلی چندهدفه با توجه به مفهوم زنجیره تأمین برای مسأله طراحی یکپارچه شبکه زنجیره تأمین رقابتی برای کالای زوال‌پذیر ارائه شده است. بدین منظور با توجه به پیچیدگی مسأله، از الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه^۱ (MOPSO) که در آن از رویکرد نظریه بازی‌ها بهره برده شده است، برای حل مدل چندهدفه پیشنهادی استفاده گردیده است. این مقاله در بخش ۲، ادبیات مرتبط با زنجیره تأمین، پایداری، رقابت در زنجیره‌های تأمین و تاب‌آوری بررسی می‌شود. در بخش ۳، کلیات مدل شرح داده می‌شود. بخش ۴، رویکرد راه‌حل را برای مدل پیشنهادی بیان می‌کند. بخش ۵، عملکرد مدل پیشنهادی با چندین مثال عددی ارزیابی شده است و در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهاد تحقیقاتی آتی در بخش ۶ بیان شده است.

۲- مرور ادبیات

با توجه به اهداف مسأله، موضوع ابعاد پایداری، تاب‌آوری و رقابت بین زنجیره‌ای برای کالای زوال‌پذیر مقالات به دو دسته "زنجیره تأمین تاب‌آور - پایدار برای کالاهای زوال‌پذیر" و

¹ Multi-Objective Particle Swarm Optimization

و نشان دادند که بهینه‌سازی هزینه کل، منجر به افزایش ۱۱۱٪ در زمان تحویل گردیده است. همچنین بهینه‌سازی زمان تحویل نه تنها هزینه کل را ۲۲,۶۲٪ افزایش داده، بلکه هدف انتشار کل را تا ۳۴,۵۲٪ کاهش داده است. بعلاوه آن‌ها نشان دادند که بهینه‌سازی انتشار CO₂، اهداف هزینه و زمان تحویل را به ترتیب ۲۲,۳۳٪ و ۷۰,۳۷٪ افزایش می‌دهد. جدول (۱) دسته بندی و تجزیه و تحلیل پژوهش‌های مربوط به زنجیره تامین تاب‌آور- پایدار را برای کالاهای زوال‌پذیر نشان می‌دهد.

یاکاونکا و همکاران [۱۰] یک مدل طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار با اهداف چندگانه، را برای سه جنبه پایداری، پیشنهاد داده‌اند. آن‌ها یک مورد از میوه تازه را به منظور مطالعه فسادپذیری محصولات ارائه کرده‌اند. آن‌ها همچنین حمل و نقل محصولات را از طریق ظروف یخچال‌دار در نظر گرفته و مدل را با فرض پارامترهای قطعی پیشنهاد داده‌اند. در تحقیقات آن‌ها، اثرات زیست محیطی و اجتماعی با انتشار گاز CO₂ و کل زمان حمل و نقل نشان داده شده است. آن‌ها بر اساس مطالعه موردی در اروپای شرقی اثرات عوامل وزن عینی را تجزیه و تحلیل کرده

جدول (۱): پژوهش‌های مربوط زنجیره تامین تاب‌آور- پایدار برای کالاهای زوال‌پذیر

منبع	پایداری			تاب‌آوری	اختلال	متغیر تصمیم			نوع زنجیره تامین	روش حل	مطالعه موردی
	اقتصادی	زیست محیطی	اجتماعی			مکان یابی	حمل و نقل	موجودی			
[۸]	*	*				*			CLSC	نرم افزار Xpress IVE	قارچ
[۱۱]	*					*	*		SC	Cplex Solver	گل
[۱۰]	*	*	*				*		SC	Excel Solver	میوه
[۹]	*	*				*	*	*	SC	LP-metric	لبنیات
[۱۲]	*					*	*		SC	برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور	شیر
[۱۳]	*	*	*			*	*	*	SC	برنامه ریزی آرمانی چند انتخابی تجدید نظر شده (RMCGP)	لبنیات
[۱۴]	*							*	SC	برنامه ریزی تصادفی پویا	صنعت مد
[۱۵]	*	*	*				*		SC	برنامه‌ریزی ریاضی	غذاهای گوشتی آماده
[۱۶]	*	*							CLSC	LP-metric	لبنیات
[۱۷]	*		*	*			*	*	SC	نسخه بهبود یافته محدودیت اسپیلون، تاپسیس	غلات
پژوهش حاضر	*	*	*	*	*	*	*	*	CLSC	تئوری بازی‌ها، نسخه بهبود یافته محدودیت اسپیلون، الگوریتم بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذرات	کالای زوال پذیر

۲-۲- زنجیره تامین تاب‌آور و پایدار تحت رقابت

زنجیره تامین تاب‌آور و طراحی زنجیره تامین پایدار، توجه مشترک به انعطاف‌پذیری، پایداری و رقابت‌پذیری با در نظر گرفتن وقوع اختلال برای کالای زوال‌پذیر به ندرت در ادبیات طراحی زنجیره تامین بررسی شده است. براین اساس با توجه به بررسی مقالات انجام گرفته، طراحی یک شبکه زنجیره تامین برای کالاهای زوال‌پذیر با قابلیت دوام در برابر اختلالات و توجه به جنبه‌های پایداری و تاب‌آوری و توانایی رقابت با سایر زنجیره‌ها، از جمله مهمترین شکاف‌هایی است که در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته شده است. بنابراین، توجه به شاخص‌های زیست محیطی، کیفی و تاب‌آوری در شبکه زنجیره تامین می‌تواند یکی از جنبه‌های مهم و کلیدی رقابت بین زنجیره‌های

توجه به شرایط رقابتی از جنبه‌های مهم برای طراحی زنجیره تامین انعطاف‌پذیر و تاب‌آور محسوب می‌شود. قوامی فر و همکاران [۱۸، ۱۹] برنامه‌ریزی دوسطحی چندهدفه را برای طراحی شبکه زنجیره تامین در یک منطقه رقابتی مورد بررسی قرار داده‌اند. چراغعلی پور و فرساد [۲۰] برنامه‌ریزی چندهدفه را برای انتخاب تاب‌آورترین و پایدارترین تامین‌کنندگان مورد بررسی قرار داده و از بهترین و بدترین روش برای یافتن وزن معیارها استفاده کرده‌اند. جدول (۲) مطالعات انجام شده در این حوزه را با جزییات بیشتر به منظور شناسایی خلا‌های موجود نشان می‌دهد. علیرغم تلاش‌های دقیق مدل‌سازی در طراحی

تأمین باشد که به افزایش رقابت پذیری و دوام و بقاء زنجیره

جدول (۲): پژوهش های مربوط به زنجیره تأمین تاب آور- پایدار تحت رقابت

منبع	متغیر های تصمیم	نوع زنجیره تأمین	رقابت	استراتژی تاب آوری				پایداری			اختلال	روش حل	مطالعه موردی
				تأمین کنندگان پشتیبان	توزیع کنندگان پشتیبان	موجودی اضافه	ظرفیت اضافه	اقتصادی	زیست محیطی	اجتماعی			
[۲۱]	کارایی تأمین کننده، وزن اختصاص داده شده به ورودی و خروجی	CLSC	*	*	*	*	*	*	*	*	تحلیل پوششی داده‌ها، برنامه‌ریزی احتمالی تصادفی	زنجیره تأمین دارویی	
[۲۲]	شاخص های زیست محیطی، کیفی و اقتصادی	CLSC	*					*	*	*	الگوریتم بهینه سازی چند هدفه رقابت، الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب- نسخه دوم	-	
[۲۳]	تعداد و محل مراکز توزیع، قیمت رقابتی هر محصول، مقدار موجودی اضافی مرکز توزیع	SC	*	*	*	*	*	*	*	*	برنامه ریزی اعداد صحیح مختلط دو فازی	-	
[۲۴]	میزان کربن، میزان موجودی برنامه‌ریزی ظرفیت، میزان حمل و نقل	SC		*				*	*	*	برنامه‌ریزی احتمالی- تصادفی فازی	زنجیره تأمین دارو	
[۲۵]	مقدار کالای خریداری شده قبل اختلال، مقدار کالای تأمین شده از تأمین کننده اصلی و از پشتیبان	SC		*			*	*	*	*	برنامه‌ریزی ترکیبی احتمالی- تصادفی دو مرحله ای	شرکت خودروسازی	
[۲۶]	حمل و نقل، زمان و هزینه تولید، بسته بندی، تحویل، حمل و نقل، فاکتورهای اجتماعی و زیست محیطی و اقتصادی	SC				*	*	*	*	*	برنامه‌ریزی آرمانی	واکسن	
[۲۷]	هزینه ثابت، تکنولوژی، کمبود حمل و نقل	SC		*				*			برنامه ریزی آرمانی چندانتخابی	آبگرمکن	
[۲۸]	قیمت خرید، هزینه قرارداد، احتمال اختلال، هزینه حمل و نقل، ظرفیت تأمین کننده، تولید کننده و میزان بازیافت	CLSC		*				*	*	*	نسخه بهبود یافته محدودیت اپسیلون	تایر	
[۲۹]	هزینه های حمل و نقل و مسافت بین مراکز شبکه، تاثیرات زیست محیطی	SC CLSC		*	*			*	*	*	آزاد سازی لاگرانژین، الگوریتم ابتکاری	تایر	
[۳۰]	مقدار محصول تولید شده، حمل شده، میزان ظرفیت اضافی ایجاد شده، ظرفیت بازیافت	SC				*	*	*	*	*	تاپسیس فازی	زیست توده	
پژوهش حاضر	میزان کالاها و مواد اولیه جابه جا شده بین تسهیلات، کمبود و میزان شاخص های زیست محیطی، کیفی و تاب آوری	CLSC	*			*	*	*	*	*	حل دو مرحله ای تئوری بازی، نسخه بهبود یافته محدودیت اپسیلون، بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذرات	کالای زوال پذیر	

۳- کلیات مدل

شاخص‌های زیست‌محیطی، کیفی و تاب‌آوری بر سهم بازار خود در هر یک از نقاط تقاضا مؤثر باشد. زنجیره تامین مورد نظر با آگاهی از رقابت آتی با زنجیره تامین رقیب قصد دارد در یک افق برنامه‌ریزی چنددوره‌ای ساختار شبکه خود در لجستیک مستقیم و معکوس را طوری تعیین نماید که پیرو آن و همچنین در راستای مفهوم پایداری بتواند اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی، کیفی و تاب‌آوری خود را به صورت همزمان محقق سازد. در این مسأله به منظور مدل‌سازی شرایط متغیر بازار در طراحی شبکه زنجیره تامین فرض شده است که افق برنامه‌ریزی به صورت چنددوره‌ای و شامل تعدادی دوره راهبردی و بلندمدت است که ساختار شبکه در طول هر دوره راهبردی ثابت است اما برای هر دوره استراتژیک، ممکن است پیکربندی شبکه زنجیره تامین در طول افق برنامه‌ریزی و به منظور مقابله با شرایط متغیر بازار، تغییر نماید. علاوه بر این جهت حفظ یکپارچگی در مدل‌سازی مسأله، تصمیمات تاکتیکی به صورت همزمان و یکپارچه در برنامه‌ریزی راهبردی شبکه زنجیره تامین لحاظ می‌شوند، به این صورت که در طول هر دوره راهبردی، چندین دوره تاکتیکی و عملیاتی لحاظ شده است که در خلال هر یک از دوره‌ها باید تصمیم‌گیری در مورد عملکرد تاکتیکی زنجیره تامین در طول افق برنامه‌ریزی صورت گیرد.

مفروضات مدل

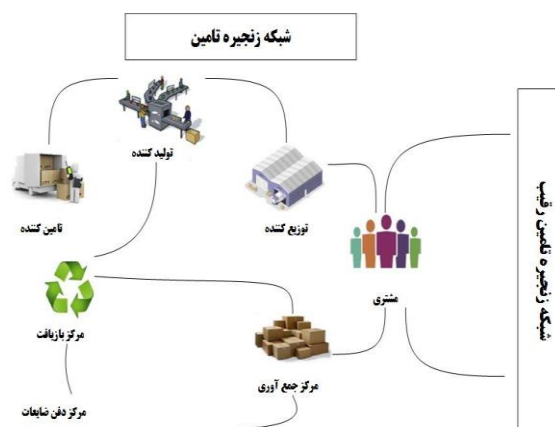
سایر مفروضات این مسأله در ادامه آمده است

- مکانهای بالقوه برای انتخاب و فعال‌سازی هر یک از تسهیلات زنجیره تامین مشخص است.
- چنانچه تسهیلی در طول یک دوره فعال گردد، باید در ادامه افق برنامه‌ریزی نیز فعال باقی بماند.
- علاوه بر دو زنجیره تامین موجود، رقیب دیگری در بازار مشغول به فعالیت نمی‌باشد.
- تابع تقاضای محصولات در هر یک از نقاط تقاضا تنها وابسته به شاخص‌های زیست‌محیطی، کیفی و تاب‌آوری محصولات و زنجیره‌های تامین آن می‌باشد.
- محصولات و مواد اولیه زوال‌پذیر بوده و دارای عمر محدودی هستند.
- کمبود به حالت فروش از دست رفته می‌تواند در طول دوره‌های برنامه‌ریزی رخ دهد.
- تمامی پارامترهای مسأله در فضای قطعی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۳-۱- علایم

در ادامه علائم و اختصارات به کار رفته در این مسأله بیان شده است.

در این مسأله، ارایه مدلی چندهدفه برای طراحی یکپارچه شبکه زنجیره تامینی پایدار و تاب‌آور با لجستیک مستقیم و معکوس در شرایط رقابت با زنجیره تامین دیگری برای کالایی زوال پذیر مورد توجه است. زنجیره تامین چندمحصولی و چندلایه ای مورد نظر در لجستیک مستقیم خود شامل تعدادی تامین‌کننده، تولیدکننده و مشتری می‌باشد، در حالی که لجستیک معکوس این زنجیره تامین متشکل از تعدادی مرکز جمع‌آوری، مرکز بازیافت و انهدام است. در لجستیک مستقیم این زنجیره تامین، تولیدکنندگان با خریداری مواد اولیه از تامین‌کنندگان محصولات مختلفی را تولید کرده و آن‌ها را از طریق مراکز توزیع به دست مشتریان نهایی می‌رسانند. در لجستیک معکوس نیز، مراکز جمع‌آوری، اقدام به بازگرداندن محصولات مصرف شده از مشتریان نموده و محصولات بازگشتی را به مراکز بازیافت و انهدام هدایت می‌کند. شکل (۱) پیکربندی زنجیره تامین مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل (۱): پیکربندی شبکه زنجیره تامین تحت رقابت بین زنجیره‌های

در این مسأله علاوه بر زنجیره تامین مورد نظر، زنجیره‌های دیگری تحت عنوان زنجیره تامین رقیب، در بازاری مشترک اقدام به خرید و فروش محصولات مشابه و جایگزین می‌نمایند. در هر نقطه تقاضا رقابتی همزمان میان دو زنجیره تامین رقیب رخ می‌دهد. از آنجا که محصولات ارایه شده توسط هر دو زنجیره تامین مشابه و جایگزین یکدیگر می‌باشد، لذا در این مسأله فرض می‌شود که زنجیره‌های تامین توان رقابت بر روی عامل اقتصادی شامل قیمت فروش محصولات نهایی ندارند؛ به این معنی که دو زنجیره تامین باید به ناچار و با توجه به شرایط بازار، محصولات خود را با قیمتی مشابه در نقاط تقاضا به فروش برسانند. اما، هر یک از این زنجیره‌های تامین به منظور کسب مزیت رقابتی و برتری نسبت به زنجیره تامین رقیب سعی دارد با ارتقای

<p>هزینه حمل محصول p از تسهیل i تا تسهیل j</p> <p>بیشترین نرخ محصولات قابل جمع آوری برای محصول p از نقطه تقاضای K</p> <p>تعداد مواد اولیه p' مورد نیاز برای تولید محصول p</p> <p>تعداد دفعات حمل و نقل از مرکز تولیدی m به مرکز توزیع d</p> <p>دوره عمر ماده اولیه</p> <p>دوره عمر محصول نهایی</p> <p>مقدار زمان باقیمانده تا انتهای دوره عمر محصول p که باید کالا به مرکز توزیع منتقل شود</p> <p>ضریب استفاده از ظرفیت تسهیل i به ازای هر واحد محصول p</p> <p>متغیرهای تصمیم:</p> <p>تعداد ماده اولیه p' خریداری شده از مرکز تأمین کننده s برای مرکز تولید کننده m در دوره تاکتیکی t از دوره استراتژیک n</p> <p>تعداد محصول p جابه جا شده بین تسهیل i و j در دوره تاکتیکی t از دوره استراتژیک n</p> <p>تعداد محصول p تولید شده در مرکز تولید m در دوره تاکتیکی t از دوره استراتژیک n</p> <p>تعداد محصول p نگهداری شده در مرکز نگهداری d در دوره تاکتیکی t از دوره استراتژیک n</p> <p>تعداد کمبود محصول p مشتری k در دوره تاکتیکی t از دوره استراتژیک n</p> <p>ظرفیت برنامه ریزی شده تسهیل i ام</p> <p>سطح کیفی مورد نظر در تولید یک واحد محصول p برای مشتری k در دوره تاکتیکی t از دوره استراتژیک n</p> <p>شاخص زیست محیطی مورد نظر در تولید یک واحد محصول p از نقطه تقاضای K در دوره تاکتیکی t از دوره استراتژیک n</p> <p>شاخص تاب آوری زنجیره تأمین در تولید یک واحد محصول p از نقطه تقاضای K در دوره تاکتیکی t از دوره استراتژیک n (برآورده کردن نیاز مشتری)</p> <p>اگر مرکز تأمین کننده s در دوره استراتژیک n فعال شود ۱ در غیر اینصورت صفر</p> <p>اگر مرکز تولیدکننده m در دوره استراتژیک n فعال شود ۱ در غیر اینصورت صفر</p> <p>اگر مرکز توزیع کننده d در دوره استراتژیک n فعال شود ۱ در غیر اینصورت صفر</p> <p>اگر مصرف کننده k در دوره استراتژیک n فعال شود ۱ در غیر اینصورت صفر</p> <p>اگر مرکز جمع آوری c در دوره استراتژیک n فعال شود ۱ در غیر اینصورت صفر</p> <p>اگر مرکز بازیافت r در دوره استراتژیک n فعال شود ۱ در غیر اینصورت صفر</p> <p>اگر مرکز دفن v در دوره استراتژیک n فعال شود ۱ در غیر اینصورت صفر</p>	<p>$tC_{i,j,p}$</p> <p>$\theta_{k,p}$</p> <p>$\rho_{p,p'}$</p> <p>$n_{m,d}$</p> <p>$EX_{p'}$</p> <p>EX_p</p> <p>l_p</p> <p>$ur_{i,p}$</p> <p>$x_{s,m,p'}^{n,t}$</p> <p>$x_{i,j,p}^{n,t}$</p> <p>$q_{m,p}^{n,t}$</p> <p>$h_{d,p}^{n,t}$</p> <p>$w_{k,p}^{n,t}$</p> <p>cap_i</p> <p>$Qu_{k,p}^{n,t}$</p> <p>$Gr_{k,p}^{n,t}$</p> <p>$Ris_{k,p}^{n,t}$</p> <p>ys_s^n</p> <p>ym_m^n</p> <p>yd_d^n</p> <p>yk_k^n</p> <p>yc_c^n</p> <p>yr_r^n</p> <p>yv_v^n</p>	<p>مجموعه ها:</p> <p>i اندیس زنجیره تأمین ($i', i \in I$)</p> <p>t مجموعه دوره های زمانی تاکتیکی در طول دوره برنامه ریزی ($t \in N, n=1,2,\dots,N$)</p> <p>n مجموعه دوره های استراتژیک در طول دوره برنامه ریزی ($n \in N, n=1,2,\dots,N$)</p> <p>s مجموعه تأمین کنندگان ($s \in S, s=1,2,\dots,S$)</p> <p>m مجموعه تولید کنندگان ($m \in M, m=1,2,\dots,M$)</p> <p>d مجموعه توزیع کنندگان ($d \in D, d=1,2,\dots,D$)</p> <p>k مجموعه مشتریان یا نقاط تقاضا ($k \in K, k=1,2,\dots,K$)</p> <p>r مجموعه بازیافت کنندگان ($r \in R, r=1,2,\dots,R$)</p> <p>c مجموعه مراکز جمع آوری ($c \in C, c=1,2,\dots,C$)</p> <p>v مجموعه مراکز دفن ($v \in V, v=1,2,\dots,V$)</p> <p>p' مجموعه مواد اولیه لازم جهت تولید ($p' \in P', p'=1,2,\dots,P'$)</p> <p>$p$ مجموعه محصولات نهایی ($p \in P, p=1,2,\dots,P$)</p> <p>پارامترها:</p> <p>$D_{k,p}^{n,t}$ تقاضا برای خرید محصول p به وسیله مشتری k در دوره تاکتیکی t از دوره استراتژیک n</p> <p>$\pi SC_{k,p}^{n,t}$ سود زنجیره تأمین از فروش محصول p به مشتری k و خرید محصول p از مشتری k در دوره تاکتیکی t از دوره استراتژیک n</p> <p>$d_{k,p}^{n,t}$ تقاضای بالقوه برای خرید محصول p به وسیله مشتری k در دوره تاکتیکی t از دوره استراتژیک n</p> <p>$\alpha_{k,p}$ ضریب کشتی وابسته به کیفیت مربوط به زنجیره تأمین برای محصول p از نقطه تقاضای K</p> <p>$\alpha'_{k,p}$ ضریب کشتی وابسته به کیفیت مربوط به زنجیره تأمین رقیب برای محصول p از نقطه تقاضای K</p> <p>$\beta_{k,p}$ ضریب کشتی وابسته به شاخص زیست محیطی مربوط به زنجیره تأمین برای محصول p از نقطه تقاضای K</p> <p>$\beta'_{k,p}$ ضریب کشتی وابسته به شاخص زیست محیطی مربوط به زنجیره تأمین رقیب برای محصول p از نقطه تقاضای K</p> <p>$\delta_{k,p}$ ضریب کشتی وابسته به شاخص تاب آوری مربوط به زنجیره تأمین برای محصول p از نقطه تقاضای K</p> <p>$\delta'_{k,p}$ ضریب کشتی وابسته به شاخص تاب آوری مربوط به زنجیره تأمین رقیب برای محصول p از نقطه تقاضای K</p> <p>μ_p ضریب هزینه کیفی ناشی از تولید هر واحد محصول p</p> <p>λ_p ضریب هزینه زیست محیطی ناشی از تولید هر واحد محصول p</p> <p>γ_p ضریب هزینه تاب آوری ناشی از افزایش ظرفیت به ازای هر واحد محصول p</p> <p>$p_{k,p}^{n,t}$ قیمت فروش هر واحد محصول p در نقطه تقاضای k در دوره تاکتیکی t از دوره استراتژیک n</p> <p>$cf_{m,p}$ هزینه تمام شده تولید هر واحد محصول p به وسیله تولید کننده m</p> <p>$sv_{c,p}$ ارزش (اسقاطی) هر واحد محصول برگشتی p در مرکز جمع آوری c</p> <p>foc_i^n هزینه عملیاتی کار با تسهیل i در دوره استراتژیک n</p> <p>$st_{k,p}$ هزینه مواجهه با کمبود محصول p جهت تأمین کالای مشتری k</p> <p>$cc_{k,p}$ هزینه جمع آوری واحد محصول p از نقطه تقاضای K</p> <p>$\Phi_{r,p}$ هزینه بازیافت محصول محصول p در مراکز بازیافت r</p> <p>$in\ c_{m,p}^{n,t}$ هزینه گسترش ظرفیت مرکز تولید m جهت تولید محصول p در دوره تاکتیکی t از دوره استراتژیک n</p> <p>$in\ c_{d,p}^{n,t}$ هزینه گسترش ظرفیت مراکز توزیع d جهت تولید محصول p در دوره تاکتیکی t از دوره استراتژیک n</p> <p>$max\ cap_i$ حداکثر ظرفیت تسهیل i</p> <p>$C_{s,p'}$ هزینه خرید ماده اولیه p' از تأمین کننده s</p> <p>$tc_{s,m,p'}$ هزینه حمل ماده اولیه p' از تأمین کننده s به تولید کننده m</p>
--	---	---

۳-۲- مدل ریاضی

در این بخش، ابتدا تابع هدف اقتصادی، زیست محیطی، کیفی و تاب آوری در مسأله طراحی شبکه بیان شده و در ادامه محدودیت های مسأله تشریح می گردند.

۳-۲-۱- توابع هدف

در این مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته بررسی شده است، بر این اساس بیشینه سازی سود حاصل از فروش

تاب‌آوری و مواجهه با اختلال احتمالی، هزینه بازیافت کالای مستعمل و هزینه جابه جایی محصولات بین هر یک از تسهیلات در نظر گرفته شده است.

در سال‌های اخیر، بسیاری از محققان در مسأله طراحی شبکه زنجیره تامین به منظور در نظر گرفتن شاخص‌های زیست‌محیطی در کنار هدف اقتصادی در مطالعات خود، از توابع هدف مبتنی بر شاخص‌های محیط زیست دوستانه استفاده نموده‌اند که از این بین می‌توان به تحقیقات صورت گرفته توسط سنورینگ [۳۱] و ژو و هی [۳۲] اشاره کرد. بر این اساس، بیشینه سازی درجه سبز بودن محصولات تولیدی توسط زنجیره تامین به عنوان دومین تابع هدف در مسأله طراحی شبکه زنجیره تامین مورد بررسی واقع شده است. رابطه (۲) تابع هدف زیست محیطی را برای این مسأله نشان می‌دهد.

محصولات نهایی در لجستیک مستقیم و محصولات بازیافتی در لجستیک معکوس به عنوان اولین تابع هدف مسأله طراحی شبکه در نظر گرفته شده است، در رابطه (۱) درآمدهای حاصل از فروش محصولات به مشتری نهایی و در آمد حاصل از مواد بازیافتی لحاظ شده است. همچنین در محاسبه هزینه زنجیره تامین، هزینه های ناشی از خرید مواد اولیه، هزینه تولید هر محصول در مراکز تولیدی، هزینه فعال‌سازی هر کدام از تسهیلات موجود در زنجیره تامین، هزینه نگهداری محصولات در مراکز توزیع، هزینه ناشی از تامین محصول با سطح کیفی، درجه سبز بودن و تاب‌آور بودن زنجیره تامین، هزینه مواجهه با کمبود جهت تامین کالای مورد نیاز مشتریان، هزینه تمام شده جمع‌آوری محصولات استفاده شده از مشتریان، هزینه ناشی از افزایش ظرفیت در مراکز تولیدی و مراکز توزیع به منظور افزایش

$$\begin{aligned}
 \max \quad OF_1 = & \sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p p_{k,p}^{n,t} x_{d,k,p}^{n,t} + \sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p sv_{r,c,p} x_{k,c,p}^{n,t} \\
 & - \left[\sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p \sum_{s,m,p'} x_{s,m,p'}^{n,t} c_{s,p'} + \sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p \sum_{m,k,p} cf_{m,p} q_{m,k,p}^{n,t} + \sum_n \sum_m foc_m^n y_m^n \right. \\
 & + \sum_n \sum_d \sum_s \sum_m \sum_{p'} foc_d^n y_d^n + \sum_n \sum_c foc_c^n y_c^n + \sum_n \sum_r \sum_k \sum_p foc_r^n y_r^n + \sum_n \sum_v \sum_p foc_v^n y_v^n \\
 & + \sum_n \sum_d \sum_k \sum_p (\mu_p Qu_{k,p}^{n,t} + \lambda_p Gr_{k,p}^{n,t} + \gamma_p Ris_{k,p}^{n,t}) y_k^n + \sum_n \sum_t \sum_k \sum_p st_{k,p} w_{k,p}^{n,t} \\
 & + \sum_n \sum_t \sum_k \sum_p cc_{k,p} x_{k,c,p}^{n,t} + \sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p inc_{m,p} cap_m^{n,t} \\
 & + \sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p inc_{d,p} cap_d^{n,t} + \sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p \varphi_{r,p} x_{c,r,p}^{n,t} \\
 & + \sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p tc_{s,m,p'} x_{s,m,p'}^{n,t} + \sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p \sum_{m,d,p} tc_{m,d,p} x_{m,d,p}^{n,t} \\
 & + \sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p tc_{d,k,p} x_{d,k,p}^{n,t} + \sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p \sum_{k,c,p} tc_{k,c,p} x_{k,c,p}^{n,t} \\
 & + \sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p \sum_{c,v,p} tc_{c,v,p} x_{c,v,p}^{n,t} + \sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p \sum_{c,r,p} tc_{c,r,p} x_{c,r,p}^{n,t} \\
 & + \sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p \sum_{r,v,p} tc_{r,v,p} x_{r,v,p}^{n,t} + \sum_n \sum_t \sum_d \sum_k \sum_p \sum_{r,m,p} tc_{r,m,p} x_{r,m,p}^{n,t} \quad (1)
 \end{aligned}$$

خود سرویس‌دهی کنند که این اختلال از نوع اختلالات جزئی بوده که تامین کننده به طور کل از بین نمی‌رود بلکه ظرفیت آن براین اساس برای پوشش شکاف ادبیاتی و نیز حل کاهش می‌یابد مشکلات اشاره شده، در این مسأله با در نظر گرفتن چندین استراتژی تاب‌آوری از قبیل افزایش ظرفیت مراکز تولید و مراکز توزیع، مفهوم تاب‌آوری در طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته به کار برده شده است. در این هدف به دنبال بیشینه نمودن شاخص تاب‌آوری زنجیره تامین بوده تا بتوان نیازهای مشتریان را پاسخ داده و در رقابت با سایر زنجیره‌های تامین بتوانند دوام آورده و مشتریان این زنجیره را به عنوان زنجیره تامین تاب‌آور و انعطاف‌پذیر بپذیرند و به عنوان مشتریان وفادار به زنجیره باشند. رابطه (۴) تابع هدف تاب‌آوری را نشان می‌دهد.

در مسأله طراحی شبکه زنجیره های تامین پایدار رفاه اجتماعی که طبق تعریف دولگوف و فلداشتاین [۳۳] اهدافی غیر اقتصادی را شامل شده و به دنبال تامین نیازهای مشتریان می‌باشد، در راستای این مفهوم، در این مسأله برای محاسبه میزان مسئولیت و عدالت اجتماعی زنجیره تامین مورد نظر از سطح کیفی محصولات ارایه شده بهره برداری می‌شود. به این منظور، کمیته سازی اختلاف بین سطح کیفی مورد نظر مشتریان و محصولات ارائه شده به آن‌ها با استفاده از رابطه (۳) فرموله می‌شود. این هدف از طریق رابطه (۳) به عنوان تابع هدف کیفی تعریف می‌گردد.

در این مسئله فرض شده است که تامین کننده به دلایل بلایای طبیعی مختلف و یا حوادث دست ساخته انسان ممکن است دچار اختلال شوند و نتواند در زمان مناسب به مشتریان

تأمین کننده خریداری می‌کند. رابطه (۶) نشان می‌دهد که نگهداری امکان‌پذیر نبوده و تمامی محصولات تولیدی توسط هر مرکز تولید به همراه کالاهای بازیافت شده که از مراکز بازیافت به مرکز تولیدی وارد می‌شود، بلافاصله به مراکز توزیع ارسال می‌گردد. رابطه (۷) نشان می‌دهد که ارسال محصولات به مشتریان زمانی صورت می‌گیرد که زنجیره تأمین با توجه به شرایط رقابتی قصد تأمین تقاضای آن مشتری را دارد. رابطه (۸) نشان می‌دهد که میزان سهم بازار برای هر مشتری با تقاضای تأمین شده و کمبود برابر است. رابطه (۹) نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که میزان محصول جمع‌آوری شده از هر مشتری توسط مراکز جمع‌آوری محدود به حداکثر نرخ قابل جمع‌آوری محصولات می‌باشد. رابطه (۱۰) تعادل جریان کالاهای مصرف شده و بازگشتی را در مراکز جمع‌آوری نشان می‌دهد به این صورت که بخشی از کالاهای جمع‌آوری شده جهت بازیافت به مراکز بازیافت منتقل شده و بخشی که قابلیت بازیافت ندارند به منظور معدوم سازی به مراکز دفن منتقل می‌شود. روابط (۱۱) و (۱۲) تعداد کالاهای بازیافت شده که به مراکز تولیدی منتقل می‌شود را نشان می‌دهد، به این صورت که از کالاهایی که به مراکز بازیافت منتقل شده است بخشی که قابلیت بازیافت ندارند و یا در حین بازیافت قابلیت عملکردی خود را از دست می‌دهند به منظور معدوم سازی به مراکز دفن منتقل می‌شود. روابط (۱۳) تا (۱۶) نشان می‌دهند که تسهیلات فعال شده باید تا انتهای افق برنامه‌ریزی فعال بمانند. روابط (۱۷) و (۱۸) عملکرد هر یک از تولیدکنندگان و مراکز توزیع را به ماکزیمم ظرفیت تسهیلات وابسته می‌سازد. رابطه (۱۹) نشان می‌دهد که مواد اولیه خریداری شده از تأمین کنندگان باید در دوره عمر خود تبدیل به کالای نهایی شوند. در واقع سیستم باید به گونه‌ای برنامه‌ریزی کند که دورریز و از بین رفتن کالا وجود نداشته باشد. رابطه (۲۰) نشان می‌دهد که کالاهای نهایی تولید شده باید حداکثر تا t دوره قبل از اتمام دوره مصرف خود، به مراکز توزیع منتقل شوند تا امکان انتقال آن در زمان مناسب به مشتری وجود داشته باشد. رابطه (۲۱) حداکثر ظرفیت مراکز تولیدی را نشان می‌دهد. رابطه (۲۲) حداکثر ظرفیت مراکز توزیع را نشان می‌دهد. روابط (۲۳) و (۲۴) نشان‌دهنده تعداد کالای ارسالی از مراکز تولید و توزیع کمتر از حداکثر ظرفیت این مراکز است و رابطه (۲۵) نوع متغیرهای مسأله را مشخص می‌کند.

۳-۳- رقابت زیست‌محیطی، کیفی و تاب‌آوری میان

زنجیره‌های تأمین

در تحقیقات انجام شده در زمینه طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین رقابتی، فرض بر این است که عوامل اقتصادی

$$\max OF_2 = \sum_n \sum_t \sum_k \sum_p Gr_{k,p}^{n,t} yk_{k,p}^n \quad (2)$$

$$\max OF_3 = \sum_n \sum_t \sum_k \sum_p (1 - Qu_{k,p}^{n,t}) yk_{k,p}^n \quad (3)$$

$$\max OF_4 = \sum_n \sum_t \sum_k \sum_p Ris_{k,p}^{n,t} yk_{k,p}^n \quad (4)$$

۳-۲- محدودیت‌ها

روابط ۵ تا ۲۵ نشان دهنده محدودیت‌هایی است که برای طراحی مدل در نظر گرفته شده است

$$\sum_s x_{s,m,p'}^{n,t} = \sum_p \rho_{p,p'} q_{m,p}^{n,t} \quad (5)$$

$$\sum_d x_{d,k,p}^{n,t} = \sum_r x_{r,m,p}^{n,t} + q_{m,p}^{n,t} \quad (6)$$

$$\sum_d x_{d,k,p}^{n,t} \leq D_{k,p}^{n,t} yk_{k,p}^n \quad (7)$$

$$\sum_d x_{d,k,p}^{n,t} + \phi_{k,p}^{n,t} = D_{k,p}^{n,t} \quad (8)$$

$$\sum_d x_{d,k,p}^{n,t} \leq \theta_{k,p} \sum_d x_{d,k,p}^{n,t} \quad (9)$$

$$\sum_k x_{k,c,p}^{n,t} = \sum_r x_{c,r,p}^{n,t} + \sum_v x_{c,v,p}^{n,t} \quad (10)$$

$$\sum_k x_{c,r,p}^{n,t-1} = \sum_r x_{r,m,p}^{n,t} + \sum_v x_{r,v,p}^{n,t} \quad (11)$$

$$\sum_c x_{c,r,p}^{n-1,t} = \sum_m x_{r,m,p}^{n,t} + \sum_v x_{r,v,p}^{n,t} \quad (12)$$

$$ym_m^n \geq ym_m^{n-1} \quad (13)$$

$$yd_d^n \geq yd_d^{n-1} \quad (14)$$

$$yc_c^n \geq yc_c^{n-1} \quad (15)$$

$$yr_r^n \geq yr_r^{n-1} \quad (16)$$

$$\sum_p ur_{m,p} h_{d,p}^{n,t} + \sum_m \sum_p ur_{m,p} \frac{x_{m,d,p}^{n,t}}{n_{m,d}} \leq yd_d^n \max cap_d \quad (17)$$

$$ur_{m,p} cap_m \leq ym_m^n \max cap_m \quad (18)$$

$$\sum_t \sum_m \sum_p \rho_{p,p'} q_{m,p}^{n,t} - \sum_t \sum_s \sum_m x_{s,m,p'}^{n,t} \geq 0 \quad (19)$$

$$\sum_t \sum_m \sum_d \sum_p x_{m,d,p}^{n,t} - \sum_t \sum_m \sum_p q_{m,p}^{n,t} \geq 0 \quad (20)$$

$$cap_m \leq \max cap_m \quad (21)$$

$$cap_d \leq \max cap_d \quad (22)$$

$$\sum_n \sum_t \sum_p \sum_d x_{m,d,p}^{n,t} \leq \max cap_m \quad (23)$$

$$\sum_n \sum_t \sum_p \sum_k x_{d,k,p}^{n,t} \leq \max cap_d \quad (24)$$

$$x_{s,m,p'}^{n,t}, x_{i,j,p}^{n,t}, q_{m,p}^{n,t}, w_{k,p}^{n,t}, cap_i \geq 0 \quad (25)$$

$$ys_s^n, ym_m^n, yd_d^n, yc_c^n, yr_r^n, yv_v^n = \{0,1\}$$

در این محدودیت‌ها رابطه (۵) نشان می‌دهد که هر مرکز تولیدی مواد اولیه لازم جهت تولید محصول نهایی را از مرکز

$Ris_{i,k,p}^{n,t}$ و $Ris_{i,k,p}^{n,t}$ نشان دهنده میزان تاب‌آوری زنجیره تامین توسط هر یک از دو زنجیره تامین رقیب می‌باشد. لازم به ذکر است که سطح کیفی محصولات با توجه به میزان نزدیکی محصولات به انتظارات مشتریان تعریف می‌گردد و ارایه محصول با سطح کیفی بالاتر و نزدیکتر به تمایلات مشتری، هزینه‌ای اضافی را به زنجیره تامین تحمیل می‌کند. درجه سبز بودن محصولات، شاخصی است که عمدتاً بر اساس تعاریف و قوانین دولتی برای محصولات تولیدی کارخانجات مشخص می‌گردد. در این راستا، برطرف کردن انتظارات دولت برای تولید محصولاتی با درجه سبز بودن بالاتر که آسیب کمتری به محیط زیست وارد می‌کند مستلزم هزینه‌هایی می‌باشد. همچنین توجه به تاب‌آوری و بالابردن انعطاف‌پذیری زنجیره تامین در جهت ارایه کالا و خدمات در زمان مناسب در هنگام وقوع اختلالات و حوادث پیش بینی نشده نیاز به اتخاذ تصمیمات مختلفی توسط مدیران زنجیره تامین می‌باشد که تصمیم‌گیری و پیاده‌سازی این استراتژی‌ها منجر به تحمیل هزینه‌هایی به زنجیره تامین می‌نماید. همانطور که در رابطه (۲۶) مشخص است، افزایش درجه کیفیت در تولید و درجه سبز بودن محصولات تولیدی و تاب‌آوری برای هر زنجیره تامین سبب افزایش سهم بازار آن زنجیره تامین و در عین حال کاهش سهم بازار زنجیره تامین رقیب می‌گردد.

۳-۳-۲- تابع سود رقابتی

بر اساس تحقیق گش و شاه [۳۷] ارتقای درجه سبز بودن محصولات تولیدی هزینه‌ای اضافی بر زنجیره تامین تحمیل می‌نماید. در این مسأله مطابق تحقیق یان و پی [۳۵] فرض شده است که این هزینه تابعی درجه دوم از میزان سبز بودن محصولات تولیدی می‌باشد که با استفاده از رابطه $(Gr_{i,k,p})^2$ $\lambda_{i,k,p}$ می‌گردد. ارایه محصولات با کیفیت بالاتر، قطعاً هزینه‌ای اضافی در فرآیند تولید محصولات به همراه خواهد داشت. گیری و روی [۳۶] طی تحقیقی نشان دادند که هزینه ناشی از ارتقای سطح کیفی محصولات تولیدی به صورت تابعی درجه دو از سطح کیفیت محصولات ارائه شده است. از این رو، در این مسأله از رابطه $(Qu_{i,k,p})^2$ $\mu_{i,k,p}$ به منظور فرموله کردن هزینه اضافی ناشی از بهبود سطح کیفیت تولید بهره برده شده است. همچنین، افزایش تاب‌آوری زنجیره تامین و بالابردن قابلیت اطمینان در ارایه خدمات و محصولات منجر به ایجاد هزینه‌های اضافی می‌گردد، در این مسأله از رابطه $(Ris_{i,k,p})^2$ $\gamma_{i,k,p}$ به منظور فرموله کردن هزینه اضافی ناشی از افزایش تاب‌آوری زنجیره تامین بهره برده شده است. از آنجا که در ادبیات مربوط به این موضوع بررسی نشده است لذا در این مقاله تاثیر همزمان این موضوع با موضوعاتی همچون ارتقای درجه سبز بودن

تصمیم‌گیرندگان را به رقابت سوق می‌دهند و شاخص‌هایی مانند قیمت به عنوان تصمیمات رقابتی مدنظر قرار می‌گیرد [۳۴]. اما امروزه، بازارهای مختلفی وجود دارند که معیار انتخاب مشتریان برای خرید محصولات مورد نیازشان تنها قیمت نیست و عوامل دیگری هم در انتخاب کالا و خدمات نقش دارند. به عنوان مثال، کیفیت محصولات که وابسته به روش تولید و طراحی آن‌هاست، به عنوان یک معیار اساسی در تقاضای مشتریان بیشتر از قیمت تأثیرگذار است. توجه بیشتر به مسائل زیست‌محیطی باعث شده که مصرف‌کنندگان به دنبال انتخاب محصولاتی با کمترین آثار منفی بر محیط زیست باشند. همچنین، حوادث و وقوع اختلالات مختلف امروزی جزئی از هر کسب و کاری هستند و می‌توانند بر عملکرد و ارائه خدمات به مشتریان تأثیر بگذارند. بنابراین، سازمان‌ها اکنون تمایل دارند با در نظر گرفتن عوامل غیر اقتصادی مانند محیط‌زیست، رفاه کیفی، و استفاده از استراتژی‌های انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری، در مقایسه با رقبای جایگاه و طرفیت بیشتری در نظر مشتریان خود به دست آورند.

۳-۳-۱- تابع تقاضای رقابتی

رقابت بین دو زنجیره تامین بر اساس عوامل زیست‌محیطی و کیفی و تاب‌آوری در اینجا مورد بررسی واقع شده است. از این رو، فرض بر این است که دو زنجیره تامین با قیمت‌های فروش مشابه، سعی دارند از سه راه بر تأثیرگذاری در سهم بازار و تقاضای مشتریان خود اثر بگذارند:

- ارتقای درجه سبز بودن محصولات تولیدی به منظور دستیابی به معیارهای زیست‌محیطی
- بهبود کیفیت تولید به منظور رعایت مسائل اجتماعی و ارائه خدمات به مشتریان
- بالابردن انعطاف‌پذیری به منظور ارایه خدمات به مشتریان در هنگام وقوع اختلال و حوادث

از رابطه ۲۶ براساس مطالعات یان و پی [۳۵] و گیری و روی [۳۶]، به منظور فرموله کردن عوامل رقابتی مذکور در مسأله طراحی شبکه استفاده می‌شود.

$$D_{i,k,p}^{n,t} = a_{i,k,p}^{n,t} + \alpha_{i,k,p} Qu_{i,k,p}^{n,t} - \alpha'_{i',k,p} Qu_{i',k,p}^{n,t} + \beta_{i,k,p} Gr_{i,k,p}^{n,t} - \beta'_{i',k,p} Gr_{i',k,p}^{n,t} + \delta_{i,k,p} Ris_{i,k,p}^{n,t} - \delta'_{i',k,p} Ris_{i',k,p}^{n,t} \quad (26)$$

در این رابطه $D_{i,k,p}^{n,t}$ تابع تقاضا زنجیره تامین i ، $Qu_{i,k,p}^{n,t}$ نشان‌دهنده سطح کیفی محصولات ارائه شده به ترتیب توسط زنجیره تامین i و زنجیره تامین رقیب i' ، $Gr_{i,k,p}^{n,t}$ و $Gr_{i',k,p}^{n,t}$ نشان‌دهنده درجه سبز بودن محصولات تولیدی و همچنین

در طول زمان بهره‌برداری، به واسطه اتخاذ تصمیمات منطقی و مبتنی بر عملکرد رقیب در مورد این سه عامل، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. براین اساس رویکرد نظریه بازی‌ها برای حل این مسئله رقابتی مورد استفاده قرار گرفته شده است. در این راستا، هر یک از زنجیره‌های تأمین به عنوان بازیکنان یک بازی همزمان در نظر گرفته می‌شوند. آن‌ها باید بدون اولویت در تصمیم‌گیری و تنها با داشتن آگاهی از عکس‌العمل رقیب، استراتژی‌های خود را طوری تعیین کنند که بیشترین میزان سود در شرایط رقابتی بدست آورند. اگرچه این سود ممکن است بیشترین میزان سود ممکن برای بازیکنان نباشد، اما منطقی و عقلانی بودن سود در شرایط رقابتی را به دنبال دارد. در اینجا نیز دیدگاهی پویا از رقابت بین دو زنجیره تأمین مورد نظر وجود دارد، که هر یک از زنجیره‌های تأمین قادر به تغییر خصوصیت‌های رقابتی خود هستند. فراهانی و همکاران [۱] با در نظر گرفتن همزمانی بازی، بین دو زنجیره تأمین (بازیکن) می‌توان به تعادل نش رسید که برای یافتن آن نیاز است ابتدا شرایط مقعر بودن تابع سود رقابتی هر یک از بازیکنان (رابطه ۲۷) نسبت به استراتژی‌های مورد بررسی، به عنوان مثال سطح کیفیت محصولات تولیدی، درجه سبز بودن محصولات و تاب‌آوری زنجیره، ارزیابی شود. روابط (۲۸) تا (۳۹) مشتقات اول و دوم تابع سود رقابتی نسبت به سه متغیر تصمیمی مورد نظر را نمایش می‌دهند.

$$\frac{\partial \pi_{sc_{i,k,p}}^{n,t}}{\partial Qu_{i,k,p}} = (p_{i,k,p}^{n,t} - cf_{i,k,p})\alpha_{i,k,p} - 2\mu_{i,k,p}Qu_{i,k,p} \quad (28)$$

$$\frac{\partial \pi_{sc_{i,k,p}}^{n,t}}{\partial Gr_{i,k,p}} = (p_{i,k,p}^{n,t} - cf_{i,k,p})\beta_{i,k,p} - 2\lambda_{i,k,p}Gr_{i,k,p} \quad (29)$$

$$\frac{\partial \pi_{sc_{i,k,p}}^{n,t}}{\partial Ris_{i,k,p}} = (p_{i,k,p}^{n,t} - cf_{i,k,p})\delta_{i,k,p} - 2\gamma_{i,k,p}Ris_{i,k,p} \quad (30)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{sc_{i,k,p}}^{n,t}}{\partial Qu_{i,k,p}^2} = -2\mu_{i,k,p} \quad (31)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{sc_{i,k,p}}^{n,t}}{\partial Qu_{i,k,p} \partial Gr_{i,k,p}} = 0 \quad (32)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{sc_{i,k,p}}^{n,t}}{\partial Qu_{i,k,p} \partial Ris_{i,k,p}} = 0 \quad (33)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{sc_{i,k,p}}^{n,t}}{\partial Gr_{i,k,p} \partial Qu_{i,k,p}} = 0 \quad (34)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{sc_{i,k,p}}^{n,t}}{\partial Gr_{i,k,p}^2} = -2\lambda_{i,k,p} \quad (35)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{sc_{i,k,p}}^{n,t}}{\partial Gr_{i,k,p} \partial Ris_{i,k,p}} = 0 \quad (36)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{sc_{i,k,p}}^{n,t}}{\partial Ris_{i,k,p} \partial Gr_{i,k,p}} = 0 \quad (37)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{sc_{i,k,p}}^{n,t}}{\partial Ris_{i,k,p} \partial Qu_{i,k,p}} = 0 \quad (38)$$

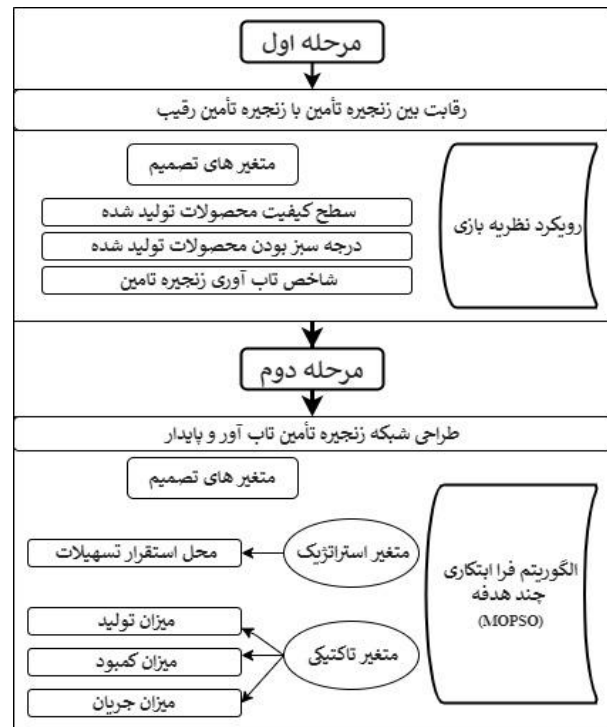
$$\frac{\partial^2 \pi_{sc_{i,k,p}}^{n,t}}{\partial Ris_{i,k,p} \partial Gr_{i,k,p}} = 0 \quad (39)$$

محصولات تولیدی و آرایه محصولات با کیفیت بالاتر بررسی می‌شود. توجه به این عوامل هزینه‌های اضافی به زنجیره تأمین اضافه می‌کند و بر روی سودآوری آن تأثیر می‌گذارد. تابع سود رقابتی زنجیره تأمین با استفاده از رابطه (۲۷) محاسبه می‌گردد.

$$\begin{aligned} \pi_{sc_{i,k,p}}^{n,t} = & (p_{i,k,p}^{n,t} - cf_{i,k,p}) \left(a_{i,k,p}^{n,t} + \alpha_{i,k,p} Qu_{i,k,p}^{n,t} \right. \\ & - \alpha'_{i,k,p} Qu_{i,k,p}^{n,t} + \beta_{i,k,p} Gr_{i,k,p}^{n,t} \\ & - \beta'_{i,k,p} Gr_{i,k,p}^{n,t} + \delta_{i,k,p} Ris_{i,k,p}^{n,t} \\ & - \delta'_{i,k,p} Ris_{i,k,p}^{n,t} \left. \right) - \mu_{i,k,p} (Qu_{i,k,p})^2 \\ & - \lambda_{i,k,p} (Gr_{i,k,p})^2 - \gamma_{i,k,p} (Ris_{i,k,p})^2 \end{aligned} \quad (27)$$

۴- روش حل مدل

رویکرد حل مدل پیشنهادی شامل دو مرحله زیر است. شکل (۲) رویکرد راه حل پیشنهادی را نشان می‌دهد. در ابتدا، بخش رقابتی مدل، (بخش ۳-۳)، بررسی می‌شود. سپس، با جایگزینی خروجی‌های بخش رقابتی به مدل (بخش ۳-۲)، از الگوریتم فراابتکاری MOPSO استفاده شده است. رویکرد دو مرحله‌ای جهت حل مدل در زیر توضیح داده شده است.



شکل (۲): مراحل رویکرد حل پیشنهادی

۴-۱- زنجیره تأمین رقابتی

رقابت بین دو زنجیره تأمین مورد نظر در این مسئله بر اساس سه عامل اصلی، یعنی کیفیت محصولات تولید شده، درجه سبز بودن محصولات و تاب‌آوری زنجیره انجام می‌شود. لذا، جستجو برای بدست آوردن سهم بازار و به تبعیت سودآوری هر زنجیره تأمین

روابط ۴۴ تا ۴۶ حاصل حل دستگاه سه معادله- سه مجهول را نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Qu_{i,k,p}} = 0, \quad (p_{i,k,p}^{n,t} - cf_{i,k,p})\alpha_{i,k,p} - 2\mu_{i,k,p}Qu_{i,k,p} = 0 \quad (44)$$

$$\Rightarrow Qu_{i,k,p} = \frac{\alpha_{i,k,p}}{2\mu_{i,k,p}} (p_{i,k,p}^{n,t} - cf_{i,k,p})$$

$$\frac{\partial \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Gr_{i,k,p}} = 0, \quad (p_{i,k,p}^{n,t} - cf_{i,k,p})\beta_{i,k,p} - 2\lambda_{i,k,p}Gr_{i,k,p} = 0 \quad (45)$$

$$\Rightarrow Gr_{i,k,p} = \frac{\beta_{i,k,p}}{2\lambda_{i,k,p}} (p_{i,k,p}^{n,t} - cf_{i,k,p})$$

$$\frac{\partial \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Ris_{i,k,p}} = 0, \quad (p_{i,k,p}^{n,t} - cf_{i,k,p})\delta_{i,k,p} - 2\gamma_{i,k,p}Ris_{i,k,p} = 0 \quad (46)$$

$$\Rightarrow Ris_{i,k,p} = \frac{\delta_{i,k,p}}{2\gamma_{i,k,p}} (p_{i,k,p}^{n,t} - cf_{i,k,p})$$

به این ترتیب، با جایگذاری مقادیر حاصل از روابط ۴۴ تا ۴۶ به عنوان مقدار بهینه این متغیرهای تصمیم در شرایط رقابتی در نظر گرفته شده که باید به عنوان مقادیر ورودی در مدل ریاضی پیشنهادی روابط ۲۵ تا ۲۸ قرار گیرند.

۲-۴- پایدار-تاب‌آور - طراحی یکپارچه شبکه زنجیره تأمین

پس از محاسبه و جایگزینی شاخص‌های زیست محیطی، اجتماعی و تاب‌آوری، که در مرحله رقابتی به دست آمده است. مدل مذکور یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد مختلط می‌گردد. از آن جا که مسأله چندهدفه طراحی شبکه به صورت NP-hard است. در این مسأله به منظور حل مدل حاصل، از روش بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است.

۲-۴-۱- الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه

الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) یک الگوریتم بهینه‌سازی پویا است که برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه استفاده می‌شود. در این الگوریتم هر ذره به عنوان یک نقطه در فضای چند بعدی نمایش داده می‌شود. برای پیدا کردن نقاط بهینه، معیارهایی مانند فاصله اقلیدسی، فاصله چند جمله‌ای، و فاصله هاوکینگ بین نقاط محاسبه می‌شود. با استفاده از این معیارها، مجموعه بهینه پارامترها به عنوان خروجی الگوریتم تولید می‌شود. این فضای چند بعدی، به عنوان فضای هدف شناخته می‌شود. بهینگی یک نقطه به معنی فاصله آن نسبت به نقاط بهترین نقطه در فضای هدف است. بهینگی یک نقطه به ترتیب اولویت بر اساس معیارهای تعریف شده برای هدف‌های مختلف محاسبه می‌گردد و به عنوان امتیازی برای هر نقطه در فضای هدف در نظر گرفته می‌شود. در الگوریتم MOPSO، برای جستجوی بهینه، پارامترهایی مانند اندازه جمعیت، تعداد نسل‌ها، اندازه حافظه، و جهت حرکت ذره‌ها بهینه‌سازی می‌شوند. هر ذره در الگوریتم ازدحام ذرات از سه

$$\frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Ris_{i,k,p}^2} = -2\gamma_{i,k,p} \quad (39)$$

در نتیجه، با توجه به روابط ۳۱ تا ۳۹ ماتریس هیشین برای این مسأله رقابتی مطابق رابطه ۴۰ محاسبه می‌گردد.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Qu_{i,k,p}^2} & \frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Qu_{i,k,p} \partial Gr_{i,k,p}} & \frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Qu_{i,k,p} \partial Ris_{i,k,p}} \\ \frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Gr_{i,k,p} \partial Qu_{i,k,p}} & \frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Gr_{i,k,p}^2} & \frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Gr_{i,k,p} \partial Ris_{i,k,p}} \\ \frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Ris_{i,k,p} \partial Qu_{i,k,p}} & \frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Ris_{i,k,p} \partial Gr_{i,k,p}} & \frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Ris_{i,k,p}^2} \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$= \begin{bmatrix} -2\mu_{i,k,p} & 0 & 0 \\ 0 & -2\lambda_{i,k,p} & 0 \\ 0 & 0 & -2\gamma_{i,k,p} \end{bmatrix}$$

روابط ۴۱ تا ۴۳ اکیدا منفی بودن ماتریس هیشین و اینکه تابع سود رقابتی نسبت به هر یک از متغیرهای تصمیم مقعر است را نشان می‌دهد.

$$a_1 = \frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Qu_{i,k,p}^2} = -2\mu_{i,k,p} < 0 \quad (41)$$

$$a_2 = \left(\frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Qu_{i,k,p}^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Gr_{i,k,p}^2} \right) - \left(\frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Qu_{i,k,p} \partial Gr_{i,k,p}} \right)^2 = (-2\mu_{i,k,p})(-2\lambda_{i,k,p}) - (0) = 4\mu_{i,k,p}\lambda_{i,k,p} > 0 \quad (42)$$

$$a_3 = \left(\frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Qu_{i,k,p}^2} \right) \left[\frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Gr_{i,k,p}^2} \quad \frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Gr_{i,k,p} \partial Ris_{i,k,p}} \right] - \left(\frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Qu_{i,k,p} \partial Gr_{i,k,p}} \right) \left[\frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Ris_{i,k,p} \partial Qu_{i,k,p}} \quad \frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Ris_{i,k,p}^2} \right] + \left(\frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Qu_{i,k,p} \partial Ris_{i,k,p}} \right) \left[\frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Gr_{i,k,p} \partial Qu_{i,k,p}} \quad \frac{\partial^2 \pi_{i,k,p}^{n,t}}{\partial Gr_{i,k,p} \partial Ris_{i,k,p}} \right] = (-2\mu_{i,k,p}) \begin{bmatrix} -2\lambda_{i,k,p} & 0 \\ 0 & -2\gamma_{i,k,p} \end{bmatrix} - (0) \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -2\lambda_{i,k,p} \end{bmatrix} + (0) \begin{bmatrix} 0 & -2\lambda_{i,k,p} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = (-2\mu_{i,k,p})(4\lambda_{i,k,p}\gamma_{i,k,p}) = -8\mu_{i,k,p}\lambda_{i,k,p}\gamma_{i,k,p} < 0 \quad (43)$$

بنابراین، از آن جا که این ماتریس اکیدا منفی است، (det(H) > 0) می‌توان نتیجه گرفت که تابع سود رقابتی نسبت به سطح کیفی محصولات تولیدی مقعر است. از این رو، مقادیر تعادلی برای هر یک از این متغیرهای تصمیم رقابتی می‌تواند با برابر صفر قرار دادن مشتق‌های مرتبه اول تابع سود نسبت به هر یک از آن‌ها و حل دستگاه سه معادله - سه مجهول حاصل، محاسبه گردد.

$$\max z = f_1(x) + \delta \left(\frac{sl_2}{Range_2} + \frac{sl_3}{Range_3} + \frac{sl_4}{Range_4} \right)$$

$$\text{st}$$

$$f_2(x) \leq e_2$$

$$f_3(x) \leq e_3$$

$$f_4(x) \leq e_4$$

$$sl_i \geq 0$$

(۴۷)

در این رابطه $Range_i$ دامنه تغییرات هر یک از توابع هدف را با توجه به بیشترین و کمترین مقدار ممکن برای تابع هدف مربوطه نشان می‌دهد. sl_i نیز نشان‌دهنده متغیرهای کمبود (برای توابع هدف کمینه‌سازی) و یا مازاد (برای توابع هدف بیشینه‌سازی) مربوط به هر یک از توابع هدف می‌باشند. استفاده از رابطه (۴۷) در رویکرد محدودیت اپسیلون منجر به ایجاد جواب‌های نامغلوب خواهد شد. در نهایت، با حل مدل رابطه (۴۷) به ازای مقادیر مختلف e_i مجموعه جواب‌های نامغلوبی ایجاد می‌شود که تصمیم‌گیرنده را قادر می‌سازد از میان آن‌ها، مقدار دلخواه را انتخاب نماید. از آن‌جا که مدل پیشنهادی بخش ۶، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ($MILP^1$) است، در نتیجه، به منظور حل مسائل کوچک با استفاده از روش محدودیت اپسیلون توسعه یافته از نرم‌افزار گمز استفاده می‌شود.

۵- تحلیل عددی

به منظور بررسی مدل و رویکرد حل پیشنهادی، از مسأله‌های تصادفی تولید شده استفاده می‌گردد. بر این اساس، پارامترهای موجود در مسائل با توجه به این مقادیر و بر اساس توابع توزیع یکنواخت مطابق جدول پیوست به صورت تصادفی تولید شده‌اند (جدول ۳). ویژگی‌های اصلی مسائل تولیدی، شامل تعداد تسهیلات موجود در لایه‌های مختلف زنجیره تأمین مورد نظر در جدول (۴) نشان داده شده است.

به منظور حل هر یک از مثال‌های عددی بر اساس رویکرد بهینه‌سازی پیشنهادی، ابتدا تعیین متغیرهای تصمیم رقابتی شامل سطح کیفیت محصولات تولید شده، درجه سبز بودن آن‌ها و میزان تاب‌آوری زنجیره تأمین در نظر گرفته می‌شود. به منظور تعیین مقدار بهینه این متغیرهای تصمیم رقابتی، از رویکرد نظریه بازی‌ها بیان شده در بخش ۴-۱، استفاده شده است. خروجی حاصل از این مرحله، سطوح بهینه کیفی، درجه سبز بودن و شاخص تاب‌آوری را در دوره برنامه‌ریزی، برای هر محصول و در هر نقطه تقاضا مشخص می‌نماید.

بردار d بعدی تشکیل شده است که d بعد فضای جستجو می‌باشد. برای ذره i این سه بردار عبارت است از: X^i موقعیت فعلی ذره، V^i سرعت حرکت ذره، X^{ibest} بهترین موقعیتی که ذره تا کنون تجربه کرده است. در هر مرحله از تکرار الگوریتم X^i به عنوان جواب مسأله محاسبه می‌شود و اگر از جواب‌های پیشین بهتر باشد در X^{ibest} ذخیره می‌شود. f^i مقدار تابع هدف در X^i و f^{ibest} مقدار تابع هدف در X^{ibest} است. ذخیره کردن f^{ibest} برای مقایسات بعدی ضروری می‌باشد و هدف از اجرای الگوریتم بهتر کردن X^{ibest} است. هیچکدام از ذرات قدرت حل هیچ مسأله‌ای را ندارند بلکه هنگامی می‌توان به حل مسأله امیدوار شد که آن‌ها با همدیگر ارتباط و تعامل داشته باشند. در واقع برای انبوه ذرات، حل مسأله، یک مفهوم اجتماعی است که از رفتار تک تک ذرات و تعامل میان آن‌ها به وجود می‌آید. بهترین موقعیتی که به وسیله همه ذرات پیدا شده است، به صورت X^{gbest} نشان داده می‌شود. و از میان X^{ibest} ها انتخاب می‌شود. مقدار تابع هدف در این‌جا به صورت f^{gbest} نشان داده می‌شود. مراحل این الگوریتم به شرح زیر می‌باشد: [۳۸]

- تولید جمعیت اولیه به صورت تصادفی و ارزیابی کردن آن‌ها.
 - تا زمانی که شرایط خاتمه محقق نشده‌اند مقدار تابع هدف را به ازای هر ذره محاسبه کنید.
 - محاسبه X^{ibest} و X^{gbest} برای هر ذره
 - به روز رسانی بردار سرعت و موقعیت برای تمامی ذرات
- شرایط خاتمه عبارت است از:

- رسیدن به حد قابل قبولی از پاس و بررسی تعداد خاصی از پاس‌ها
- سپری شدن تعداد تکرار/ زمان مشخص و سپری شدن تعداد تکرار/ زمان مشخص بدون مشاهده بهبود خاصی در پاس‌ها
- سیاست برخورد با محدودیت‌های مسأله در هر دو الگوریتم ارایه شده پیشنهادی، تولید جواب‌های شدنی است و در صورت ارایه جواب نشدنی، جواب جدیدی تولید شده و شرط شدنی بودن برای آن جواب بررسی می‌گردد.

۴-۲-۲- روش محدودیت اپسیلون توسعه یافته

به منظور بهبود رویکرد حل مسأله از روش محدودیت اپسیلون تکامل یافته [۳۹] استفاده می‌شود. از این‌رو، مدل چندهدفه پیشنهادی در قالب یک مدل ریاضی تک هدفه مطابق رابطه (۴۷) فرموله می‌گردد.

¹ Multi Integer Linear Programming

جدول (۳): تابع توزیع تصادفی پارامترها

پارامتر	توزیع	پارامتر	توزیع
FOC _i (i)	یکنواخت(۱۰۰۰و۲۰۰۰)	θ (k,p)	یکنواخت(۲و۵)
P(k,p)	یکنواخت(۱۰و۱۵۰)	Ur(l,p)	یکنواخت(۱و۳)
CC(k,p)	یکنواخت(۴۰و۶۰)	N(m,d)	یکنواخت(۱و۳)
Ex_PP(pp)	یکنواخت(۱۱و۲۰)	ρ (pp,p)	یکنواخت(۱و۳)
Ex_P(p)	یکنواخت(۱۰و۲۰)	Alpha(k,p)	یکنواخت(۰/۳۹و۰/۱۶)
L_P(p)	یکنواخت(۱۰و۲۰)	Beta(k,p)	یکنواخت(۹و۲۰)
Ca(s,pp)	یکنواخت(۲و۵)	delta(k,p)	یکنواخت(۰/۱۵و۰/۹)
CF	یکنواخت(۱۰و۲۰)	D_Max	یکنواخت(۲۰۰۰و۳۰۰۰)
RC(r,p)	یکنواخت(۵و۱۰)	E_Max	یکنواخت(۱۰۰۰و۲۰۰۰)
ST(k,p)	یکنواخت(۵و۱۰)	INC_M(m,p)	یکنواخت(۱۰۰و۱۵۰)
TC _{ij} (i,j,pp)	یکنواخت(۱و۳)	INC_D(d,p)	یکنواخت(۱۰۰و۱۵۰)
TC _{ijz} (i,j,p)	یکنواخت(۱و۳)	SV(p)	یکنواخت(۱و۳)

نتایج حاصل از مرحله رقابتی برای هر یک از مثال‌های عددی با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی پیشنهادی در جدول (۵) نشان داده شده است. با توجه به اینکه این مقادیر به ازای دوره‌های تاکتیکی متفاوت و برای محصولات و نقاط تقاضای متفاوت محاسبه می‌شود، در نتیجه، مقدار متوسط آن‌ها در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول (۴): ویژگی‌های مسایل تولیدی

شماره مسأله	S	M	D	K	C	R	V	P'	P	N	T
مسأله ۱	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۲	۳
مسأله ۲	۲	۳	۲	۳	۲	۲	۱	۴	۲	۲	۳
مسأله ۳	۳	۴	۴	۵	۴	۳	۲	۵	۴	۳	۴
مسأله ۴	۵	۵	۵	۷	۵	۴	۲	۱۰	۵	۳	۴
مسأله ۵	۷	۶	۶	۷	۵	۴	۲	۱۱	۵	۳	۴
مسأله ۶	۱۰	۷	۷	۸	۵	۴	۲	۱۲	۶	۴	۴
مسأله ۷	۱۱	۹	۷	۹	۵	۵	۲	۱۴	۷	۴	۴
مسأله ۸	۱۵	۱۰	۷	۱۰	۶	۵	۳	۱۵	۸	۵	۴

جدول (۵): مقادیر متوسط متغیرهای تصمیم در زنجیره تامین و

زنجیره تامین رقیب

شماره مسأله	زنجیره تامین	Gr	Qu	Ris	D	سود
۱	زنجیره تامین	۱۴/۹۲	۰/۵۶	۰/۹	۵۰۴	۸۱۳۰۰۳
	زنجیره رقیب	۱۶/۱۲	۰/۷۳	۰/۸۳	۸۶۳	۲۴۸۷۳۸
۲	زنجیره تامین	۱۹/۷۵	۰/۶۲	۰/۷۹	۹۳۵	۲۵۲۲۷۶
	زنجیره رقیب	۲۱/۱۴	۰/۶۴	۰/۸۷	۶۴۵	۲۱۶۲۶۷
۳	زنجیره تامین	۲۱/۶۳	۰/۶۸	۰/۶۵	۱۱۱۵	۱۴۷۲۷۶
	زنجیره رقیب	۱۹/۸۱	۰/۸۹	۰/۶۸	۱۰۵۹	۱۳۵۵۴۷
۴	زنجیره تامین	۱۹/۷۳	۰/۶۶	۰/۸۳	۱۱۳۹	۱۳۱۴۹۵
	زنجیره رقیب	۱۹/۰۶	۰/۷۵	۰/۶۲	۱۰۶۲	۱۱۵۶۳۷
۵	زنجیره تامین	۱۸/۷۷	۰/۸۲	۰/۸	۱۴۵۸	۲۲۸۸۲۲
	زنجیره رقیب	۱۵/۸۱	۰/۶۹	۰/۹۲	۱۰۸۰	۱۱۴۲۸۴
۶	زنجیره تامین	۱۸/۴۶	۰/۶۵	۰/۸۲	۱۰۱۹	۱۰۸۰۴۷
	زنجیره رقیب	۱۷/۴۶	۰/۷۹	۰/۹۱	۱۵۴۸	۱۵۹۲۷۰
۷	زنجیره تامین	۱۹/۳۸	۰/۷۱	۰/۹۵	۱۲۳۷	۱۸۴۸۵۴
	زنجیره رقیب	۱۶/۴۹	۰/۶۵	۰/۸۷	۸۸۲	۱۳۴۷۲۵
۸	زنجیره تامین	۱۸/۲۴	۰/۶۶	۰/۶۳	۱۱۸۲	۱۵۷۸۶۸
	زنجیره رقیب	۲۷/۲۵	۰/۶۲	۰/۸	۹۱۶	۱۳۶۴۹۴

با جایگزینی مقادیر حاصل از مرحله رقابتی در مدل چندهدفه پیشنهادی، مدل جدیدی برای مسأله طراحی پویا و یکپارچه شبکه زنجیره تامین پایدار و تاب‌آور حاصل می‌گردد. به منظور حل آن می‌توان از مرحله دوم رویکرد بهینه‌سازی، اشاره شده در بخش ۴-۲-۱، استفاده نمود. برای حل دقیق مدل چند هدفه، مسأله طراحی شبکه یک زنجیره تامین حلقه بسته، از رویکرد محدودیت اِپسیلون تکامل یافته استفاده می‌گردد بطوریکه ابتدا مسأله با استفاده از رابطه (۴۷) در قالب یک مسأله تک هدفه فرموله می‌شود.

لازم به ذکر است، برای حل مدل MILP حاصل، نرم افزار گمز (GAMS 25.1) مورد استفاده قرار گرفته و Solver مورد نظر برای حل مدل پیشنهادی، CPLEX در نظر گرفته شده است. جدول (۶) نتایج حاصل از حل مدل تک هدفه مورد نظر برای هر یک از مثال‌های عددی را نشان می‌دهد.

جدول (۶): نتایج حاصل از حل مدل با رویکرد محدودیت اپسیلون تکامل یافته

شماره جواب	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف سوم	مقدار تابع هدف چهارم
۱	۱۲۵۴۷۸۵	۲۰۱۶۵	۳۹/۷۵	۸۹/۶۵
۲	۱۲۶۸۷۸۴	۲۳۲۷	۴۵/۹۱	۹۴/۷۲
۳	۱۲۷۵۱۴۵	۲۴۱۸	۴۷/۴۴	۱۰۲/۷۳
۴	۱۳۰۱۴۴۲	۲۴۹۴	۵۳/۶۲	۱۰۴/۲۵
۵	۱۲۹۲۸۵	۲۵۳۴	۴۹/۸۶	۹۷/۶۳
۶	۱۳۱۲۶۹۸	۲۶۱۲	۵۲/۳۵	۱۰۷/۹۶
۷	*	*	*	*
۸	*	*	*	*

* نرم افزار Gams در مدت زمان ۱۰۰۰۰ ثانیه به جواب نرسیده است.

تصمیم گیرنده می تواند بر اساس نظر شخصی جواب مطلوب خود را برگزیند.

جدول (۸): راه حل های پارتو برای مسأله شماره ۷

ردیف	تابع هدف اقتصادی	تابع هدف زیست محیطی	تابع هدف کیفی	تابع هدف تاب آوری
۱	۱۳۱۴۵۲۶/۸۵	۲۸۶۵/۶۲	۵۲/۶۹	۱۰۷/۵۵
۲	۱۳۲۵۶۲۵/۶۴	۲۸۷۰/۳۶	۵۲/۷۵	۱۰۷/۹۶
۳	۱۳۳۸۱۴۶/۵۲	۲۹۷۵/۱۵	۵۳/۱۲	۱۰۸/۴۲
۴	۱۳۳۲۶۹۴/۲۴	۲۹۹۲/۹۸	۵۳/۱۷	۱۰۸/۶۲
۵	۱۳۳۸۸۵۲/۱۲	۳۰۱۹/۷۸	۵۲/۸۸	۱۰۸/۳۴
۶	۱۳۳۹۹۷۱/۶۳	۲۹۵۶/۱۴	۵۲/۶۸	۱۰۸/۵۸
۷	۱۴۰۱۱۱۲/۷۵	۳۰۲۷/۲۶	۵۳/۲۶	۱۰۸/۶۹
۸	۱۴۰۰۶۹۸/۶۶	۳۰۶۹/۱۱	۵۳/۴۸	۱۰۷/۸۴
۹	۱۴۰۰۹۸۵/۳۸	۳۰۱۷/۳۷	۵۳/۳۷	۱۰۸/۹۱
۱۰	۱۴۰۱۲۵۷/۷۱	۳۱۰۵/۲۴	۵۳/۲۱	۱۰۸/۷۵

۵-۱- تجزیه و تحلیل مسأله

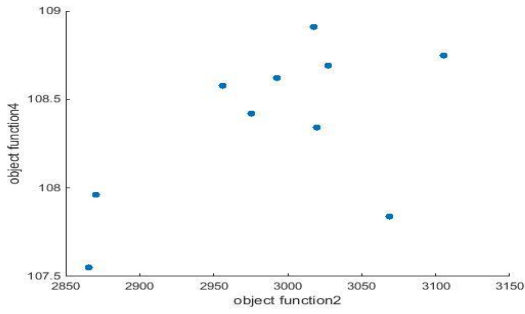
در اغلب موارد، اهدافی که در مدلسازی ریاضی مد نظر قرار می گیرند با همدیگر متناقض هستند، از این رو پیدا کردن یک جواب بهینه که به طور همزمان تمام توابع را بیشینه کند، تقریباً غیرممکن است. با این حال می توان مجموعه ای از جواب ها را یافت که بهترین تعامل را بین اهداف برقرار کرده ولی بهبود حاصل نمی شود، مگر اینکه سبب بدتر شدن اهداف دیگر شود. براین اساس یکی از مهمترین مزیت های الگوریتم های تکاملی ارائه جواب های بهینه پارتو است. بدین ترتیب تصمیم گیران می توانند از میان مجموعه جواب های بهینه پارتو یکی را بررسی و انتخاب نمایند. این کار در واقع همان مفهوم سازش بین اهداف مدل است که دست تصمیم گیر را برای انتخاب یک راه حل و اتخاذ تصمیم باز می گذارد. در این مقاله، با پیادسازی الگوریتم MOPSO در مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی و حل آن توسط نرم افزار متلب، مجموعه راه حل های جبهه پارتو برای مسأله شماره ۷ حاصل شده است. بدین ترتیب ۱۰ جواب حاصل شده برای هر چهار تابع هدف در جدول ۸ قابل مشاهده است. همچنین جواب های بهینه پارتو برای توابع هدف به صورت دو به دو در نمودارهای دوبعدی و به صورت سه به سه در نمودارهای سه بعدی در شکل (۳) تا شکل (۷) نمایش داده شده است. در وهله اول، آنچه مشهود است، با تنظیم پارامترهای مناسب برای MOPSO و در زمان حل مناسب پاسخ ها از نگاه معیارهای مغلوبیت و فاصله ازدحامی یک دست بوده و کیفیت قابل قبولی دارند. در ادامه این نمودارها شرح داده می شوند.

به منظور حل مسأله در مقیاس بزرگ تر از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه بیان شده در بخش ۴-۲-۱ استفاده شده است. همچنین برای تنظیم پارامتر از روش تاگوچی استفاده شده است. بعد از تعیین سطح و تعداد پارامترهای الگوریتم، از نرم افزار Minitab برای حل و تنظیم سطح پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه استفاده گردیده است. جدول (۷) سطوح مختلف و سطح منتخب برای پارامترهای هر الگوریتم را نشان می دهد.

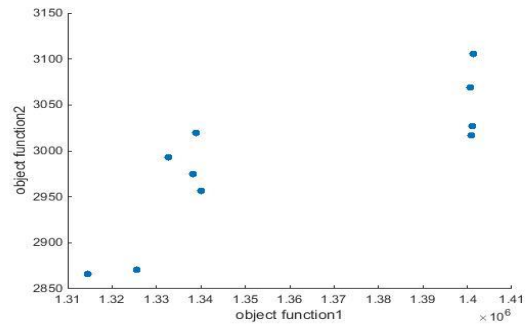
جدول (۷): سطوح مختلف برای پارامترهای الگوریتم

سطح منتخب	سطح پارامتر			پارامتر
	زیاد	متوسط	کم	
۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	تعداد تکرار (maxit)
۵۰	۵۰	۴۰	۲۵	تعداد جمعیت (nPop)
۱۰۰	۱۰۰	۸۵	۶۰	اندازه مخزن (nRep)
۰/۳	۰/۸	۰/۵	۰/۳	ضریب اینرسی (w)
۰/۸	۰/۹۹	۰/۹	۰/۸	نرخ کاهش وزن اینرسی (wdamp)
۷	۷	۵	۳	تعداد گرید برای هر بعد (nGrde)
۰/۲	۰/۳	۰/۲	۰/۱	نرخ افزایش گرید (alpha)
۲	۵	۴	۲	فشار انتخاب لیدر (beta)
۵	۵	۴	۲	فشار حذف لیدر (gamma)
۱	۴	۲	۱	ضریب یادگیری فردی (c1)
۲	۵	۳	۲	ضریب یادگیری جمعی (c2)
۰/۱۵	۰/۲	۰/۱۵	۰/۱	احتمال جهش (mu)

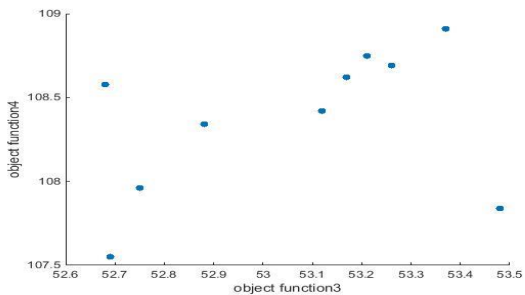
جدول (۸) مقدار بهینه توابع هدف به ازای تمامی جواب های موجود در سطح پارتو برای مسأله شماره ۷ با استفاده از الگوریتم پیشنهادی را نشان می دهد. بر اساس این جدول الگوریتم بهینه سازی ازحام ذرات چندهدفه برای این مسأله، ۱۰ جواب پارتو ارائه کرده است بطوری که هیچ کدام بر دیگری غلبه نداشته و



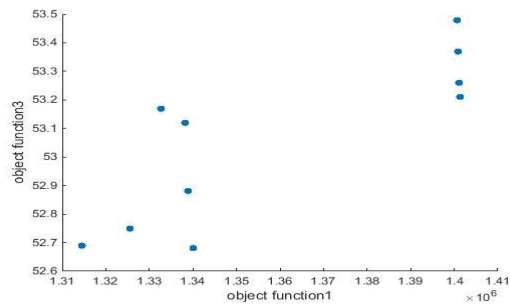
شکل (۷): نمودارهای جبهه پارتو: زیست‌محیطی - تاب‌آوری



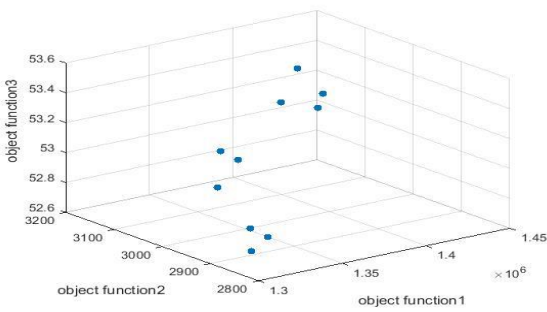
شکل (۳): نمودارهای جبهه پارتو: اقتصادی - زیست‌محیطی



شکل (۸): نمودارهای جبهه پارتو: کیفی - تاب‌آوری

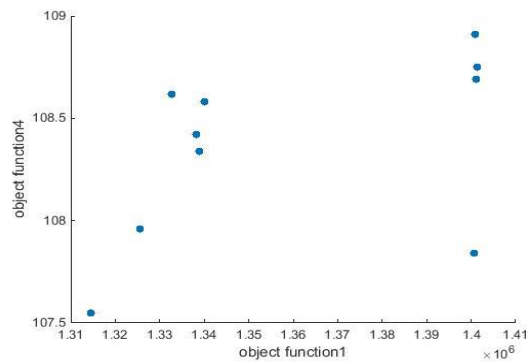


شکل (۴): نمودارهای جبهه پارتو: اقتصادی - کیفی

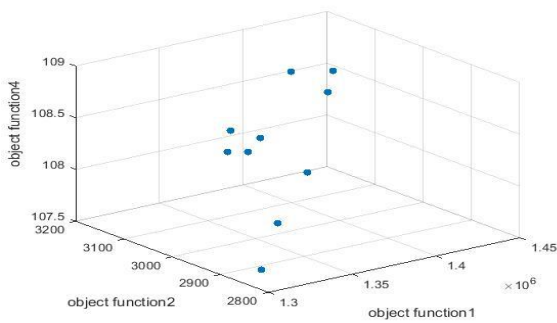


شکل (۹): نمودارهای جبهه پارتو در فضای سه بعدی:

اقتصادی - زیست‌محیطی - کیفی

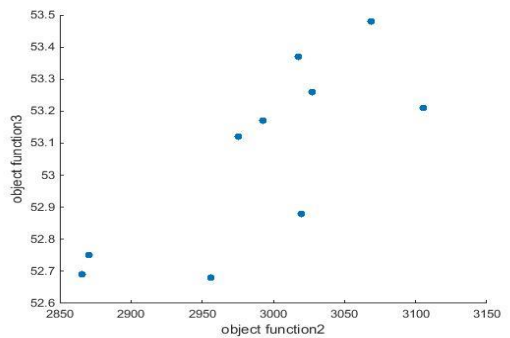


شکل (۵): نمودارهای جبهه پارتو: اقتصادی - تاب‌آوری



شکل (۱۰): نمودارهای جبهه پارتو در فضای سه بعدی:

اقتصادی - زیست‌محیطی - تاب‌آوری



شکل (۶): نمودارهای جبهه پارتو: زیست‌محیطی - کیفی

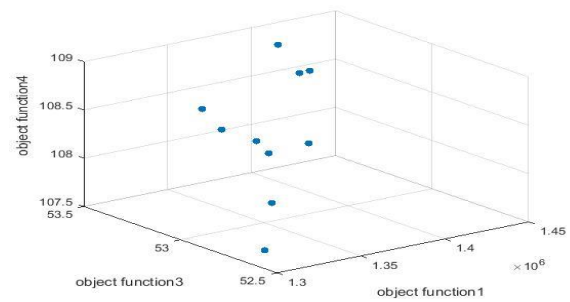
نظریه بازی‌ها و با توجه به بازی همزمان و متقارن میان زنجیره‌های تأمین، نقطه تعادل نش برای متغیرهای تصمیم رقابتی حاصل گردیده است. در ادامه در مرحله دوم از رویکرد پیشنهادی، مقدار متغیرهای تصمیم رقابتی در مدل چندهدفه اصلی جایگزین شده و مدل کلاسیک حاصل برای مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه حل شده است. به منظور ارزیابی مدل پیشنهادی و رویکرد حل ارائه شده، از چندین مسأله آزمایشی بهره برداری گردیده است.

از جهت دیگر در این مسأله نگاه تازه‌ای به مسأله رقابت میان زنجیره‌های تأمین صورت گرفته شده است. به طوری که برخلاف مطالعات انجام شده که تنها بر عوامل اقتصادی و وابسته به سطح تقاضا نظیر قیمت، نزدیکی به مشتری نهایی و غیره به عنوان عامل رقابتی تمرکز داشته اند، در مدل پیشنهادی این مقاله مسأله رقابت از چشم‌انداز نوینی مورد بررسی قرار گرفته شده است. بر اساس این نگرش، رقابت میان زنجیره‌های تأمین تنها وابسته به عوامل اقتصادی نبوده و عوامل دیگری نظیر اثرات زیست‌محیطی، عملکرد اجتماعی و تاب‌آوری زنجیره تأمین که می‌تواند در دنیای امروز، نقش تعیین‌کننده‌ای در نظر مشتریان برای انتخاب یک کالا یا خدمت از زنجیره تأمین داشته باشد. در حقیقت، نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد که توجه به این عوامل رقابتی وابسته به شاخص‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و تاب‌آوری می‌تواند تصمیم‌گیری پیرامون ساختار شبکه یک زنجیره تأمین را تحت تأثیر قرار داده و موفقیت آتی زنجیره تأمین را تضمین نماید.

با توجه به ماهیت مدل‌های پیشنهادی، این پژوهش می‌تواند برای زنجیره‌های تأمین موجودی و فعالیت در یک بازار رقابتی و بهبود وضعیت رقابت‌پذیری نسبت به سایر رقبای در پی اعمال تغییرات در ساختار شبکه و محل قرارگیری تسهیلات، مورد استفاده قرار گیرد. به عبارت دیگر از مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش می‌توان به منظور طراحی مجدد شبکه زنجیره تأمین در حالت رقابتی بهره برداری کرد. از آنجا که تمامی پارامترهای مورد استفاده در این مقاله به صورت قطعی در نظر گرفته شده است استفاده و بکارگیری داده‌های غیر قطعی می‌تواند تا حدود زیادی بر کارایی و نزدیکی مدل پیشنهادی با واقعیت اثر گذار باشد، این دیدگاه می‌تواند به عنوان پژوهش آتی مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد.

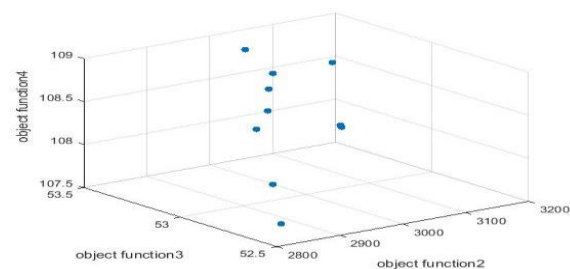
۷- مراجع

- [1] R. Z. Farahani, S. Rezapour, T. Drezner, and S. Fallah, "Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution techniques and applications," *Omega*, vol. 45, pp. 92-118, 2014.
- [2] M. Sharma, S. Luthra, S. Joshi, and A. Kumar, "Developing a framework for enhancing survivability of sustainable supply chains during and post-COVID-19 pandemic," *International Journal of Logistics Research and Applications*, pp. 1-21, 2020.
- [3] G. Singh, S. Singh, Y. Daultani, and M. Chouhan, "Measuring the influence of digital twins on the sustainability of manufacturing supply chain: A mediating role of supply chain



شکل (۱۱): نمودارهای جبهه پارتو در فضای سه بعدی:

اقتصادی-کیفی - تاب‌آوری



شکل (۱۲): نمودارهای جبهه پارتو در فضای سه بعدی:

زیست محیطی - کیفی - تاب‌آوری

شکل (۳) نشان می‌دهد که تابع هدف اقتصادی و تابع هدف زیست‌محیطی چگونه با یکدیگر در ارتباط هستند. تابع هدف زیست‌محیطی به دنبال بیشینه‌سازی ضریب و معیارهای زیست‌محیطی است. بنابراین، مقادیر تابع هدف زیست‌محیطی به صورت مستقیم در نمودارها نمایش داده می‌شوند. به عبارت دیگر، اگر تابع هدف روند صعودی داشته باشد، این به معنای بهبود مقادیر تابع است و برعکس. همچنین، روند تغییرات در این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش جزئی درآمد، میزان شاخص زیست‌محیطی افزایش می‌یابد. این الگو به طور مشابه در نمودارهای شکل (۴) تا (۸) برای اهداف اقتصادی-کیفی و اقتصادی-تاب‌آوری نیز رخ می‌دهد. همچنین، در نمودارهای سه‌بعدی شکل (۹) تا (۱۲)، بهینه‌های جبهه پارتو به صورت مقایسه سه‌تایی از توابع هدف نمایش داده شده است و مشاهده می‌شود که این بهینه‌ها با تمامی اهداف سازش دارند و هم جهت هستند. در نتیجه، نمودارها با یکدیگر سازش دارند.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به وجود رقابت میان زنجیره‌های تأمین در مسأله طراحی شبکه از یک رویکرد دو مرحله‌ای، استفاده شده است، در این مسأله رقابت بر روی عوامل زیست‌محیطی، اجتماعی و تاب‌آوری بوده، که در اولین قدم از رویکرد حل پیشنهادی با بهره‌گیری از

- [21] F. Sabouhi, M. S. Jabalameli, and A. Jabbarzadeh, "An optimization approach for sustainable and resilient supply chain design with regional considerations," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 159, p. 107510, 2021.
- [22] A. Nobari, A. Kheirkhah, and M. Esmaceli, "Considering chain-to-chain competition on environmental and social concerns in a supply chain network design problem," *International Journal of Management Science and Engineering Management*, vol. 14, no. 1, pp. 33-46, 2019.
- [23] A. A. Taleizadeh, A. Ghavamifar, and A. Khosrojerdi, "Resilient network design of two supply chains under price competition: game theoretic and decomposition algorithm approach," *Operational Research*, pp. 1-33, 2020.
- [24] S. H. Amin and F. Baki, "A facility location model for global closed-loop supply chain network design," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 41, pp. 316-330, 2017/01/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.08.030>.
- [25] F. Vahidi, S. A. Torabi, and M. Ramezankhani, "Sustainable supplier selection and order allocation under operational and disruption risks," *Journal of Cleaner Production*, vol. 174, pp. 1351-1365, 2018.
- [26] Z. Sazvar, K. Tafakkori, N. Oladfad, and S. Nayeri, "A capacity planning approach for sustainable-resilient supply chain network design under uncertainty: A case study of vaccine supply chain," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 159, p. 107406, 2021.
- [27] S. Nayeri, S. Ali Torabi, M. Tavakoli, and Z. Sazvar, "A multi-objective fuzzy robust stochastic model for designing a sustainable-resilient-responsive supply chain network," *Journal of Cleaner Production*, vol. 311, p. 127691, 2021/08/15/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127691>.
- [28] Y. Z. Mehrjerdi and M. Shafiee, "A resilient and sustainable closed-loop supply chain using multiple sourcing and information sharing strategies," *Journal of Cleaner Production*, vol. 289, p. 125141, 2021/03/20/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125141>.
- [29] M. M. Vali-Siar and E. Roghanian, "Sustainable, resilient and responsive mixed supply chain network design under hybrid uncertainty with considering COVID-19 pandemic disruption," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 30, pp. 278-300, 2022.
- [30] S. Salehi, Y. Zare Mehrjerdi, A. Sadegheih, and H. Hoseini Nasab, "A Mathematical Model for Designing a Resilient and Sustainable Biomass Supply Chain Under Uncertainty and Disruption," *Iranian Journal Of Supply Chain Management*, vol. 24, no. 76, pp. 1-21, 2023. [Online]. Available: https://scmj.ihu.ac.ir/article_207491_c459d75ea7c0038a79dd307707b6609e.pdf. (In Persian)
- [31] S. Seuring, "A review of modeling approaches for sustainable supply chain management," *Decision support systems*, vol. 54, no. 4, pp. 15, 2013, 13-1520.
- [32] W. Zhu and Y. He, "Green product design in supply chains under competition," *European Journal of Operational Research*, vol. 258, no. 1, pp. 165-180, 2017.
- [33] R. Dolgoff, & Feldstein, D., *Understanding social welfare*, Harper and Row .New York, 1980.
- [34] X. Li and Y. Li, "Chain-to-chain competition on product sustainability," *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 2058-2065, 2016.
- [35] R. Yan and Z. Pei, "Retail services and firm profit in a dual-channel market," *Journal of retailing and consumer services*, vol. 16, no. 4, pp. 306-314, 2009.
- [36] B. C. Giri, B. Roy, and T. Maiti, "Multi-manufacturer pricing and quality management strategies in the presence of brand differentiation and return policy," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 105, pp. 146-157, 2017.
- [37] D. Ghosh and J. Shah, "A comparative analysis of greening policies across supply chain structures," *International Journal of Production Economics*, vol. 135, no. 2, pp. 568-583, 2012.
- [38] D. Sha and H. Hung Lin, "A particle swarm optimization for multi-objective flowshop scheduling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 45, pp. 749-758, 2009.
- [39] G. Mavrotas, "Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems," *Applied mathematics and computation*, vol. 213, no. 2, pp. 455-465, 2009.
- resilience and performance," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 186, p. 109711, 2023/12/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109711>.
- [4] K. Sadeghi R and M. Qaisari Hasan Abadi, "Sustainable supply chain resilience for logistics problems: Empirical validation using robust and computational intelligence methods," *Journal of Cleaner Production*, vol. 437, p. 14/15/01/2024, 0267 doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140267>.
- [5] A. Meneghetti and L. Monti, "Greening the food supply chain: an optimisation model for sustainable design of refrigerated automated warehouses," *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 21, pp. 6567-6587, 2015.
- [6] C. Colicchia, A. Creazza, F. Dallari, and M. Melacini, "Eco-efficient supply chain networks: development of a design framework and application to a real case study," *Production planning & control*, vol. 27, no. 3, pp. 157-168, 2016.
- [7] A. Saif and S. Elhedhli, "Cold supply chain design with environmental considerations: A simulation-optimization approach," *European Journal of Operational Research*, vol. 251, no. 1, pp. 274-287, 2016.
- [8] A. Banasik, A. Kanellopoulos, G. Claassen, J. M. Bloemhof-Ruwaard, and J. G. van der Vorst, "Closing loops in agricultural supply chains using multi-objective optimization: A case study of an industrial mushroom supply chain," *International Journal of Production Economics*, vol. 183, pp. 409-420, 2017.
- [9] M. Yavari and H. Zaker, "An integrated two-layer network model for designing a resilient green-closed loop supply chain of perishable products under disruption," *Journal of Cleaner Production*, vol. 230, pp. 198-218, 2019, 01/09/2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.130>.
- [10] V. Yakavenka, I. Mallidis, D. Vlachos, E. Iakovou, and Z. Eleni, "Development of a multi-objective model for the design of sustainable supply chains: The case of perishable food products," *Annals of Operations Research*, vol. 294, no. 1, pp. 593-621, 2020.
- [11] G. Behzadi, M. J. O'Sullivan, T. L. Olsen, F. Scrimgeour, and A. Zhang, "Robust and resilient strategies for managing supply disruptions in an agribusiness supply chain," *International Journal of Production Economics*, vol. 191, pp. 207-220, 2017.
- [12] P. Dutta and H. Shrivastava, "The design and planning of an integrated supply chain for perishable products under uncertainties: A case study in milk industry," *Journal of Modelling in Management*, 2020.
- [13] J. Jozdani and K. Govindan, "On the sustainable perishable food supply chain network design: A dairy products case to achieve sustainable development goals," *Journal of Cleaner Production*, vol. 278, p. 123060, 2021.
- [14] F. Fang, T.-D. Nguyen, and C. S. Currie, "Joint pricing and inventory decisions for substitutable and perishable products under demand uncertainty," *European Journal of Operational Research*, vol. 293, no. 2, pp. 594-602, 2021.
- [15] S. Tavakkoli Moghaddam, M. Javadi, and S. M. Hadji Molana, "A reverse logistics chain mathematical model for a sustainable production system of perishable goods based on demand optimization," *Journal of Industrial Engineering International*, vol. 15, no. 4, pp. 709-721, 2019.
- [16] M. Alinezhad, I. Mahdavi, M. Hematian, and E. B. Tirkolaee, "A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable closed-loop supply chain network design in food industries," *Environment, Development and Sustainability*, pp. 1-28, 2021.
- [17] M. Mousazadeh and S. Pirtaj, "Resilient Distribution Network Design in Sustainable Grain Supply Chain: a Robust-Possibilistic Approach," *Iranian Journal Of Supply Chain Management*, vol. 24, no. 77, pp. 9-21, 2023. [Online]. Available: https://scmj.ihu.ac.ir/article_207795_3f8eaada8b08b95c2ce2ff9c07ef95ed.pdf. (In Persian)
- [18] A. Ghavamifar, A. Makui, and A. A. Taleizadeh, "Designing a resilient competitive supply chain network under disruption risks: A real-world application," *Transportation research part E: logistics and transportation review*, vol. 115, pp. 87-109, 2018.
- [19] A. Ghavamifar, F. Sabouhi, and A. Makui, "An integrated model for designing a distribution network of products under facility and transportation link disruptions," *Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 113-126, 2018.
- [20] A. Cheraghalipour and S. Farsad, "A bi-objective sustainable supplier selection and order allocation considering quantity discounts under disruption risks: A case study in plastic industry," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 118, pp. 237-250, 2018.