



Paper Type: Original Article



Development of a Robust Multi-Objective Model for Green Capacitated Location-Routing under Crisis Conditions with Time Value of Money

Shima Rusta^{1,*} , Seyed Milad Mir Najafi Zadeh², Hamid Bazargan Harandi¹

¹ Department of Industrial Engineering, Technical and Engineering Faculty, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran; shima.roosta@yahoo.com; bazarganh@yahoo.com.

² Department of Industrial Engineering, Technical and Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Iran; milad.mirnajafizadeh@gmail.com.

Citation:



Rusta, Sh., Mir Najafi Zadeh, S. M., & Bazargan Harandi, H. (2023). Development of a robust multi-objective model for green capacitated location-routing under crisis conditions with time value of money. *Journal of decisions and operations research*, 8(2), 370-390.

Received: 29/04/2022

Reviewed: 01/06/2022

Revised: 18/07/2022

Accepted: 21/08/2022

Abstract

Purpose: Location-Routing Problem (LRP) is a strategic supply chain design problem aimed at meeting customer demands. LRPs involve selecting one or more depot sites from a set of potential locations and determining the best routes to connect them to demand points. With the rising awareness about the environmental impacts of transportation over the past years, using green logistics to mitigate these impacts has become increasingly important.

Methodology: To compensative a gap in the literature, this paper presents a robust bi-objective Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model for the Green Capacitated Location-Routing Problem (G-CLRP) with demand uncertainty and the possibility of failure in depots and routes.

Findings: The final result of this robust multi-objective model is to set up the depots and select the routes that offer the highest reliability (maximizing network service) while imposing the lowest cost and environmental pollution. The paper also provides a numerical analysis and a sensitivity analysis of the solutions of the model.

Originality/Value: Determining backup depots and increasing network serviceability for LRPs.

Keywords: Mixed integer linear programming, Green capacitated location-routing, Crisis management, Robust optimization, Time value of money.





توسعه یک مدل چند هدفه استوار برای مساله مکان‌یابی-مسیریابی ظرفیت‌دار سبز تحت شرایط بحران با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول

شیما روستا^{۱*}، سید میلاد میرنجفی زاده^۲، حمید بازرگان هرندي^۱

^۱گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران.
^۲گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

چکیده

هدف: مساله مکان‌یابی-مسیریابی (LRP) یک مساله استراتژیک در طراحی زنجیره تامین برای پاسخ‌گویی به نیاز مشتری است. این گونه مسایل شامل انتخاب بهینه یک یا چند انبار از بین تعدادی نقاط بالقوه و تعیین کوتاه‌ترین مسیرهای تامین نیاز مشتری است. با توجه به نقش حمل و نقل در تولید آلاینده‌ها در طی سال‌های گذشته، اهمیت در نظر گرفتن لجستیک سبز برای کاهش اثرات زیست‌محیطی حمل و نقل بسیار مهم شده است.

روش‌شناسی پژوهش: برای جبران شکاف موجود در ادبیات، این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه (MILP) برای مساله مسیریابی مکان‌یابی ظرفیت سبز (G-CLRP) با عدم قطعیت تقاضا و احتمال شکست در انبارها و مسیرها ارائه می‌کند.

یافته‌ها: نتیجه نهایی این مدل چندهدفه استوار، راه‌اندازی انبارها و انتخاب مسیرهایی است که بالاترین قابلیت اطمینان (به حداکثر رساندن خدمات شبکه) را ارائه می‌دهند و در عین حال، کمترین هزینه و آلودگی زیست‌محیطی را تحمیل می‌کنند. این مقاله همچنین یک تحلیل عددی و یک تحلیل حساسیت راه‌حل‌های مدل را ارائه می‌کند.

اصالت/ارزش افزوده علمی: تعیین انبارهای پشتیبان و افزایش قابلیت سرویس دهی شبکه برای مشکلات مسیریابی مکان.

کلیدواژه‌ها: ارزش زمانی پول، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، بهینه‌سازی استوار، مکان‌یابی-مسیریابی ظرفیت دار سبز، مدیریت بحران.

۱- مقدمه

تشدید صحنه رقابت جهانی در محیطی که به صورت دایم در حال تغییر است؛ ضرورت واکنش‌های مناسب زنجیره تامین سازمان‌ها و شرکت‌های تولیدی و صنعتی را دوچندان کرده است. سازمان‌های امروزی به منظور کسب جایگاهی مناسب در محیط رقابتی و حفظ آن، به بهره‌گیری از الگوی مناسب مدیریت زنجیره تامین در راستای تحقق مزیت رقابتی و انتظارات مشتریان نیازمندند. طراحی زنجیره تامین مناسب و مدیریت صحیح آن از عوامل اصلی بقای سازمان‌ها بوده است و به طور کلی مدیریت زنجیره تامین بر افزایش انطباق‌پذیری و انعطاف‌پذیری شرکت‌ها تاکید داشته و دارای قابلیت واکنش و پاسخ سریع و اثربخش به تغییرات بازار است. طراحی شبکه زنجیره تامین به عنوان اصلی‌ترین و مهم‌ترین گام برای افزایش سود کسب‌شده‌ی زنجیره تامین تعریف شده است [1]. در حین طراحی یک زنجیره تامین، فاکتورهای بسیاری را

* نویسنده مسئول

shima.roosta@yahoo.com

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.25385097.1402.8.2.5.9>



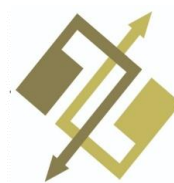


بایستی مدنظر قرار داد، از جمله فاکتورهای مهم در زمینه طراحی شبکه زنجیره تامین، تعیین مکان انبارها و چگونگی انتخاب مسیرها برای سرویس دهی به مشتریان است که یکی از مهم ترین مسایل مساله مکان یابی-مسیریابی وسایل نقلیه (*LRP*) است. این گونه مسایل، شامل دو نوع مساله مکان یابی تسهیلات (*FLP*) و مسیریابی وسیله نقلیه (*VRP*) می باشند و هدف آن حداقل کردن هزینه استقرار تسهیلات و هزینه حمل و نقل به منظور ارضای تقاضای مشتریان در یک مجموعه بالقوه از تسهیلات اند. هر کدام از جنبه های مکان یابی تسهیلات و مسیریابی در طراحی زنجیره تامین، می توانند به طور مستقل مورد بررسی قرار گیرند؛ اما این تصمیمات به طور موثری با یکدیگر در ارتباط اند و در صورت بررسی نشدن این اهداف به طور هم زمان هزینه های سیستم افزایش می یابد و امکان رسیدن به جواب های زیر بهینه بسیار زیاد است [2]. مسایل *LRP* به دلیل ترکیب شدن مسایل مکان یابی و مسیریابی جز مسایل از رده پیچیدگی *NP-Hard* محسوب می شوند [3]. مکان یابی-مسیریابی ظرفیت دار (*CLRP*) نوع خاصی از *LRP* است که در آن انبارها و وسایل نقلیه دارای ظرفیت اند و هدف آن گشودن مجموعه ای از انبارها و تعیین مسیرها برای پاسخگویی به تقاضای مشتریان به منظور حداقل سازی هزینه هاست [4].

در دنیای واقعی عدم قطعیت همواره به شیوه های مختلفی بروز می کند به عبارتی دیگر عدم قطعیت جز جدایی ناپذیری از دنیای واقعی است؛ از این رو برای انعطاف پذیری هر چه بیش تر زنجیره تامین در نیل به اهداف، باید عدم اطمینان را در تمام مسایل در نظر گرفت. نادیده گرفتن عدم اطمینان در تصمیمات طراحی زنجیره تامین می تواند منجر به عواقب شدید از جمله خطر شکست کسب و کار شود؛ بنابراین، شرکت ها به منظور حفظ سودآوری خود، مجبور به اعمال روش هایی برای ترکیب عدم اطمینان در فرایند تصمیم گیری خود می باشند. تاکنون دسته بندی های عمومی یا مرتبط با زنجیره تامین برای عدم قطعیت، از نقطه نظرات متفاوت مورد بررسی قرار گرفته اند. طبق نظر کلیبی و همکاران [5]، عدم قطعیت در زنجیره تامین را می توان به دو دسته تقسیم بندی کرد: عدم قطعیت عملیاتی، مانند نوسانات معمول در تقاضا و داده های موجودی، که غالبا شامل رخدادهایی با تاثیرات پایین تا متوسط و احتمال رویداد متوسط تا بالا هستند. عدم قطعیت بحرانی که رویدادهای نادر با تاثیرات تجاری بالا ولی با احتمال وقوع پایین، مانند عدم قطعیت در خرابی موجودی توسط منابع طبیعی (سیل و زلزله) را شامل می شود. در اینجا واژه هایی چون "خطر" و "خرابی" نیز می توانند جایگزین واژه ی "بحران" گردند. این گونه عدم قطعیت ها عموما می توانند ناشی از منابع طبیعی مانند زلزله، سیل، سونامی یا منابع انسانی نظیر جنگ، حمله تروریستی، اعتصاب کارگران، قرنطینه و ... گردند. از جمله مسایل عدم اطمینان در نظر گرفته شده در این پژوهش، خرابی تسهیلات و مسیرها به دلایل متعددی از جمله بلایای طبیعی یا غیرطبیعی است که می توانند شرایطی بحرانی را برای سازمان به وجود آورند و هم چنین عدم توانایی در برآورد دقیق پارامتر تقاضای مشتریان، حمل و نقل یکی از ارکان مهم در زنجیره تامین است و نقش مهمی را در آلودگی محیط زیست ایفا می کند. با افزایش جمعیت و صنعتی شدن جوامع، نگرانی های زیادی در مورد افزایش استفاده از سوخت های فسیلی و در نتیجه آلودگی هوا و افزایش دمای کره زمین وجود دارد؛ از این رو هرگونه تلاش در جهت کاهش استفاده از سوخت های فسیلی در راستای کمک به محیط زیست اهمیت بسیار زیادی پیدا می کند. از آن جایی که حمل و نقل تاثیر زیادی بر آلودگی محیط زیست دارد، حمل و نقل سبز در تمام سطوح مدیریت زنجیره تامین ظهور می کند [6]. این نگرش جدید، شرکت های دارای فعالیت لجستیکی را ملزم به بازنگری در فعالیت های لجستیکی خود به منظور به حداقل رساندن هزینه های خارجی خود جهت نیل به اهداف اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی می کند و در دهه های اخیر، مصرف کنندگان، تولیدکنندگان و دولت ها توجه خود را به محیط زیست افزایش داده اند. پولی که امروز در دسترس است دارای ارزش و مخاطراتی مانند نرخ بهره، تورم و هزینه فرصت است که موجب ارزش زمانی برای آن می شود. در نظر گرفتن ارزش زمانی پول برای تعیین اقتصادی بودن یک پروژه از اهمیت بالایی برخوردار است؛ لذا در نظر گرفتن ارزش زمانی پول برای تصمیماتی که صرفه اقتصادی داشته باشند از اهمیت بالایی برخوردار است در این مقاله، یک مدل *G-CLRP* به صورت یک مدل سازی دو هدفه استوار سناریو محور با فرضیه غیرقطعی بودن تقاضا و با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول مورد بررسی قرار می گیرد. در این مدل تسهیلات (انبارها) و مسیرها در معرض خطر خرابی اند، هر یک از انبارها و مسیرهایی که شانس از پیش تعیین شده ای برای خرابی دارند احتمالا از بین خواهد رفت. هر انباری در صورت خرابی ظرفیت خود را به طور کامل از دست می دهد و مشتریان آن به انبارهای پشتیبان منتقل می شوند. هدف اول کاهش هزینه مسیریابی خودروها و راه اندازی انبارها، هزینه های پشتیبان گیری و هزینه مصرف سوخت خودرو که معادل کاهش انتشار آلاینده ها است، می باشد. هم چنین با اعمال خرابی در مسایل بهینه سازی، راه حل هایی که بهترین تعامل را ایجاد می کنند، باید تا حد امکان قابل اعتماد باشند؛ لذا در نظر گرفتن تابع هدفی تحت عنوان حداکثر سازی قابلیت اطمینان به نتایج ارایه شده اهمیت پیدا می کند. در ادامه مقاله به بررسی موضوعات *LRP* می پردازد. در بخش ۳، متغیرها و پارامترهای مساله و در بخش ۴ مدل سازی انجام شده در این پژوهش مورد بحث قرار گرفته است. بخش ۵ راه حل های حل مساله را ارایه بیان می کند. در بخش ۶ به

ارزیابی مدل موردبررسی پرداخته شده و سرانجام، در بخش ۷ و ۸، آنالیز حساسیت و خلاصه‌ای از پیشنهادات برای مطالعات آینده ارائه شده است.

۲- پیشینه تحقیق



۳۷۲

مساله مکان‌یابی-مسیریابی از حوزه‌های موثر در زنجیره تامین و سودآوری سازمان‌ها است. در چند سال اخیر مقالات متعددی در این زمینه منتشر گردیده است. از تحقیقات موثر در زمینه‌ی مسایل مکان‌یابی-مسیریابی می‌توان به تحقیقات ناجی و سالی [7]، لوپس و همکاران [8]، پرادون و همکاران [9] و تحقیق مروری درکسل و همکاران [10] اشاره داشت که به طبقه‌بندی انواع مسایل LRP پرداخته‌اند. این مطالعات حاکی از پیچیدگی و اهمیت مسایل مکان‌یابی-مسیریابی است. در این بخش پژوهش‌های اخیر در زمینه مسایل زنجیره‌تأمین در قالب جدول ۱ به نمایش گذاشته شده است. در پایان نیز شکاف تحقیقاتی موجود در این زمینه شناسایی شده است. در جدول ۱ توابع اهداف از نوع مینیم‌سازی می‌باشند.

جدول ۱- پیشینه تحقیق.
Table 1- Background research.

نویسندگان	تقاضا قطعی	تقاضا غیرقطعی	متغیر تصمیم مکان‌یابی	متغیر تصمیم مسیریابی	توابع اهداف تک هدفه	توابع اهداف چند هدفه	نوع تابع هدف پژوه تکس پژوه	احتمال خرابی تسهیلات	تصادفی	فازی	روش مقابله با عدم قطعیت استوار ترکیبی
[11]		*	*	*		*					*
[12]	*		*	*	*	*					
[13]	*		*	*	*	*					
[14]	*		*	*	*	*		*	*		
[15]	*		*	*	*	*					
[16]	*		*	*	*	*					
[17]	*		*	*	*	*		*			
[18]	*		*	*	*	*					
[19]		*	*	*		*		*			*
[20]		*	*	*		*		*			*
[21]	*		*	*	*	*					
[3]	*		*	*	*	*					
[22]			*	*	*	*					
[23]	*		*	*	*	*					
[24]	*		*	*	*	*		*			
[25]		*	*	*	*	*		*		*	
[26]		*	*	*	*	*		*	*	*	
[27]		*	*	*	*	*		*	*	*	
[28]	*		*	*	*	*		*			
[29]		*	*	*		*					*
[30]		*	*	*	*	*		*		*	
[31]	*		*	*	*	*		*			
[32]	*		*	*	*	*		*	*		
[33]	*		*	*	*	*			*		
[34]	*		*	*	*	*					
[35]		*	*	*	*	*				*	
[36]		*	*	*	*	*				*	
[17]	*		*	*	*	*		*	*	*	
[9]	*		*	*	*	*		*			
[37]	*		*	*	*	*					
[38]	*		*	*	*	*					
[39]	*		*	*	*	*		*			
[34]		*	*	*	*	*					*
[40]	*		*	*	*	*					
[6]	*		*	*	*	*					
[41]	*		*	*		*					
[42]		*	*	*	*	*	*				
[43]		*	*	*	*	*		*			*
[44]	*		*	*	*	*		*		*	
[45]	*		*	*	*	*					
[46]		*	*	*		*		*	*		
[47]		*	*	*	*	*	*	*		*	*

Table 1- Continued.

نویسندگان	تقاضا		متغیر تصمیم		توابع اهداف		نوع تابع هدف			احتمال خرابی		روش مقابله با عدم قطعیت				
	قطعی	غیر قطعی	مکان یابی	مسیریابی	تک هدفه	چند هدفه	هزینه	سبز بودن	شکست	غیره	تسهیلات	مسیرها	تصادفی	فازی	استوار	ترکیبی
[48]		*	*	*	*		*									*
[49]			*	*	*		*									*
[50]		*	*	*	*								*			
[51]		*	*	*	*		*							*		
[52]		*	*	*	*		*								*	
[53]	*		*	*	*		*	*								
[5]	*		*	*	*		*									
[54]		*	*	*		*	*			*						*
[55]	*		*	*	*		*									*
[34]	*		*	*	*		*									
[35]		*	*	*	*		*						*			
[36]		*	*	*	*		*						*			
[17]	*		*	*	*		*				*		*			
[9]	*		*	*	*		*				*					
[37]	*		*	*	*		*									
[38]	*		*	*	*		*									
[39]	*		*	*	*		*				*					
[34]		*	*	*	*		*								*	
[40]	*		*	*	*		*									
[6]	*		*	*	*		*									
[41]	*		*	*		*	*									
[42]		*	*	*		*	*	*								
[43]		*	*	*		*	*			*						*
[44]	*		*	*	*		*			*					*	
[45]	*		*	*		*	*									
[46]		*	*	*		*				*	*	*				
[47]		*	*	*	*		*	*		*					*	*
[48]		*	*	*	*		*									*
[49]			*	*	*		*									*
[50]		*	*	*	*								*			
[51]		*	*	*	*		*							*		
[52]		*	*	*	*		*								*	
[53]	*		*	*	*		*	*								
[5]	*		*	*	*		*									
[54]		*	*	*		*	*			*						*
[55]	*		*	*	*		*									*
[56]	*		*	*	*		*									*
[57]	*		*	*	*		*									*
[58]	*		*	*		*	*	*		*					*	
پژوهش			*	*		*	*	*	*		*	*			*	
جاری																

باتوجه به مدل‌هایی که تاکنون توسط محققین ارائه شده است و همچنین اهمیت بحران و تامین منابع مالی مورد نیاز آن در هنگام بروز شرایط بحرانی، ضرورت توسعه یک مدل چندهدفه استوار با در نظر گرفتن احتمال خرابی و در نظر گرفتن تقاضای غیرقطعی مشاهده می‌گردد. پژوهش حاضر سعی بر انجام این مهم تا حد امکان را دارد.

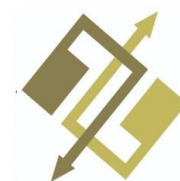
۳- شرح مساله و ارائه راه حل

۳-۱- نمادگذاری

پارامترها و متغیرهای مدل ارائه شده در این مقاله به طور خلاصه در زیر مطرح می‌شود:



I	مجموعه انبارها.
J	مجموعه مشتریان.
V	مجموعه گره‌ها $V=IJ$.



$onpv_i$	هزینه استفاده از انبارها.
w_i	ظرفیت انبار i .
$Fnpv$	هزینه استفاده از وسایل نقلیه.
Q	ظرفیت وسایل نقلیه.
D_j	تقاضای مشتری j .
c_{ij}	هزینه سفر بین گره i و j .
d_{ij}	فاصله بین گره i و j .
α_{ij}	مقدار انرژی در هر مسافت (J/km) موردنیاز وسیله نقلیه بدون بار بین گره‌های i و j .
γ_{ij}	انرژی اضافی در واحد فاصله و تن بار ($J/km-ton$) موردنیاز وسیله نقلیه بین گره‌های i و j .
$E(\$/J)$	هزینه انتشار به ازای هر واحد انرژی.
q_i	احتمال خرابی انبار i .
P_{ij}	احتمال خرابی مسیر بین گره i و j .
$fcost_k$	هزینه ثابت افزایش ظرفیت انبار k .
$v cost_k$	هزینه متغیر افزایش ظرفیت انبار k .
h_i	هزینه نگهداری کالا در انبار i .
$weight$	وزن کامیون خالی.
φ_{ij}	ضریب مازول وزن که توسط ویژگی‌های جاده (شیب)، شتاب وسایل نقلیه و ضریب مقاومت پیچشی جاده مشخص می‌شود.
β	ضریب مازول سرعت.
θ_{ij}	شیب جاده.
cr	ضریب مقاومت پیچشی جاده.
cd	ضریب کششی آیرودینامیکی وسیله نقلیه.
A	مساحت جلوی وسایل نقلیه.
ρ	چگالی هوا.
P_{ij}	مجموع انرژی مصرف‌شده در مسیر بین گره i و j .

$x_{ij} \quad j, i \in V$	متغیر باینری استفاده از مسیر بین گره‌های i و j .
$y_i \quad i \in I$	متغیر باینری برای استفاده از یک تسهیلات i .
f_{ij}	متغیر باینری که تعیین می‌کند آیا مشتری در گره $j \in J$ توسط مسیری که از تسهیلات $i \in I$ شروع می‌شود، سرویس‌دهی شود.
z_j	متغیر باینری که تعیین می‌کند آیا مشتری در گره $j \in J$ آخرین مشتری در یک مسیر است یا خیر.
a_{ij}	متغیر باینری که نشان می‌دهد آیا وسیله نقلیه از مسیر j برای بازگشت از انتهای مسیر خود (در گره j) به یک مرکز (در گره i) استفاده می‌کند یا خیر.
t_{ij}	میزان بار حمل شده بین گره‌های i و j .



متغیر باینری برای انبار پشتیبان (اگر انبار k از انبار I پشتیبان بگیرد، مقدار یک خواهد بود، در غیر این صورت صفر خواهد بود).	u_{ki}
متغیر پیوسته ظرفیت منتقل شده از انبار i به انبار پشتیبان k .	ec_{ki}
ظرفیت اضافی مورد نیاز برای انبار k برای پشتیبان گیری.	m_K
ظرفیت اضافی مورد نیاز برای انبار k برای پشتیبان گیری روی هدف.	mm_k
متغیر باینری (اگر انبار k نیاز به افزایش ظرفیت داشته باشد، مقدار یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود).	z'_k

۳-۲- محاسبه میزان انتشار کربن دی اکسید در هوا ناشی از مصرف سوخت

کربن دی اکسید یکی از مهم ترین گازهای گلخانه ای است که تاثیرات مخربی بر روی کره زمین می گذارد و بیش ترین عامل انتشار آن، صنعت حمل و نقل می باشد. از این رو کاهش انتشار کربن دی اکسید از صنعت حمل و نقل اهمیت پیدا کرده و همین موضوع سبب پیدایش زنجیره تامین سبز شده است. در همین راستا و با توجه به اهمیت مسایل زیست محیطی روش های مختلفی برای اندازه گیری میزان انتشار گازهای آلاینده کربن دی اکسید از طریق حمل و نقل در مطالعات محققین مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۲-۱- محاسبه مصرف سوخت وسایل نقلیه با استفاده از روش مدل انتشار جامع^۱

روش $CMEM$ یکی از روش های محاسبه میزان مصرف سوخت با توجه به سرعت و بار وسایل نقلیه است [63]. در این روش برای محاسبه میزان انتشار گازهای آلاینده روابط زیر تعریف می گردد:

$$\varphi_{ij} = a + g \sin \theta_{ij} + g \times cr \times \cos \theta_{ij} \quad i, j \in V. \quad (1)$$

$$\square = 0.5 \times cd \times A \times \rho \times v. \quad (2)$$

$$p_{ij} = \varphi_{ij}(weight + t_{ij})d_{ij} + \square d_{ij}v^2 \quad i, j \in V. \quad (3)$$

رابطه های (۱) و (۲) برای محاسبه پارامترهای معرفی شده در ابتدای این بخش است. رابطه (۳) مجموع انرژی مصرف شده بر روی کمان i و j می باشد. اولین قسمت این رابطه، مستقل از سرعت وسیله نقلیه بوده و خصوصیات جاده و بار را نمایش می دهد. دومین قسمت این رابطه توان دوم سرعت را داشته و خصوصیات وسایل نقلیه را نمایش می دهد. با استفاده از روابط فوق هزینه ناشی مصرف سوخت از روش مدل انتشار جامع به صورت زیر خواهد بود:

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} cf \varphi_{ij} d_{ij} (weight + t_{ij}) \times x_{ij} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} cf \times \beta d_{ij} v^2 x_{ij}. \quad (4)$$

عبارت ارایه شده فوق غیر خطی است. برای سهولت در حل مساله، روابط غیر خطی به خطی تبدیل شده است. به منظور خطی سازی عبارت فوق از تغییر متغیر استفاده گردیده است.

$$t_{ij} x_{ij} = t'_{ij}. \quad (5)$$

در راستای خطی سازی، محدودیت های زیر به مساله افزوده خواهد شد (در صورت استفاده از این روش در مدل):

$$t'_{ij} \leq M \times x_{ij} \quad \text{for all } i, j \in V. \quad (6)$$

$$t'_{ij} \leq t_{ij} \quad \text{for all } i, j \in V. \quad (7)$$

$$t'_{ij} \geq t_{ij} - M \times (1 - x_{ij}) \quad \text{for all } i, j \in V. \quad (8)$$

$$y'_{kl} \in \{0,1\}. \quad (9)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} cf \varphi_{ij} d_{ij} (weight \times x_{ij} + t'_{ij}) + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} cf \times \beta d_{ij} v^2 x_{ij}. \quad (10)$$

از این رو مقدار تابع هدف غیر خطی فوق (هزینه انتشار کربن دی اکسید با استفاده از روش مدل انتشار جامع، رابطه (۳)) به صورت زیر خواهد بود:

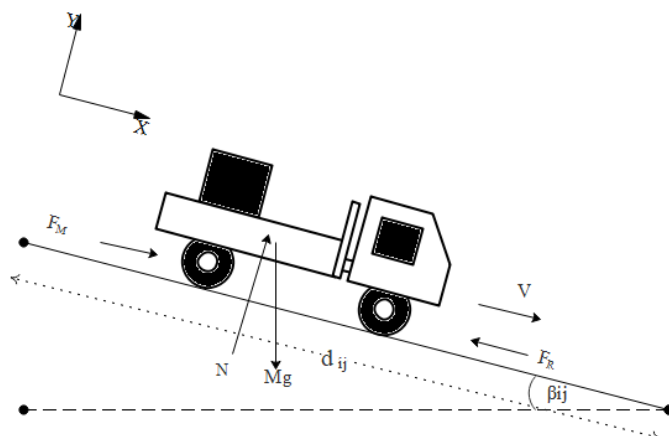
¹ Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM)



در این قسمت مدل ریاضی انتشار آلاینده (کربن دی‌اکسید) از وسایل نقلیه با توجه به قوانین فیزیکی نیروهای اعمال شده بر وسایل نقلیه در حین سفر، به تفصیل شرح داده می‌شود.

شکل ۱ یک وسیله نقلیه در حال حرکت بر روی مسیر را نمایش می‌دهد [6].

شیب مسیر بین گره i و j .	β_{ij}
نیروهای مخالف حرکت وسیله نقلیه.	\vec{F}_R
قدرت تولید شده موتور و انتقال به لاستیک‌های خودرو را نشان می‌دهد.	\vec{F}_M
وزن وسیله نقلیه را نشان می‌دهد.	$m\vec{g}$
نیروی عمودی تکیه‌گاه.	\vec{N}
سرعت حرکت وسیله نقلیه بین گره i و j .	v_{ij}



شکل ۱- نیروهای وارد شده به وسیله نقلیه.
Figure 1- Forces acting on the vehicle.

براساس قانون دوم نیوتن روابط $\sum F_x = ma_x$ و $\sum F_y = ma_y$ برقرار خواهد بود. با فرض یکنواخت بودن حرکت وسایل نقلیه‌ای که مطابق شکل ۱ به آن نیرو وارد می‌شود، خواهیم داشت:

$$\sum F_x = ma_x, a_x = 0 \Rightarrow F_M - F_R - mg \sin \beta_{ij} = 0. \quad (11)$$

$$\sum F_y = ma_y, a_y = 0 \Rightarrow N - mg \cos \beta_{ij} = 0. \quad (12)$$

نیروهای زیر، نیروهای مخالف حرکت‌اند:

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} cf \varphi_{ij} d_{ij} (weight \times x_{ij} + t'_{ij}) + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} cf \times \beta d_{ij} v^2 x_{ij}. \quad (13)$$

$F_{R,tires}$ نیروی بین چرخ‌ها، صرف نظر از کشش و نوع زمین و مخالف جهت مسیر وسیله نقلیه است.

$F_{R,wind}$ نیرویی است که توسط باد به حرکت وسیله نقلیه اعمال می‌شود.

$F_{R,internal}$ نمایانگر نیروهای داخلی می‌باشد که با حرکت وسیله نقلیه مخالف هستند.

نیروی موردنیاز برای دستیابی وسیله نقلیه به انرژی جنبشی است. مقدار انرژی موردنیاز برای به حرکت درآوردن وسیله نقلیه برابر است با میزان کاری است که باید انجام شود تا انرژی جنبشی به وسیله نقلیه منتقل شود.

$$K = \frac{1}{2}mv^2, W = F \cdot d \cos \theta \rightarrow F \cdot d \cdot \cos 0 = \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow F = \frac{mv^2}{2d}, F = \frac{mv_{ij}^2}{2d_{ij}}. \quad (14)$$

با تعریف $F_{R,tires} = Nb$ که b در آن وابسته زمین است، خواهیم داشت:

$$F_M = (mg \cos \beta_{ij})b + F_{R,wind} + F_{R,internal} + \frac{mv_{ij}^2}{2d_{ij}} + mg \sin \beta_{ij}. \quad (15)$$

هرگاه به جسمی نیرو وارد شود و جسم در راستایی که با امتداد نیرو زاویه θ می‌سازد، به اندازه d جابه‌جا شود، آن‌گاه آن نیرو کار انجام داده است ($U_{ij} = F_M d_{ij} \cos \theta$). برای نیروی F_M زاویه بین نیرو و جابه‌جایی صفر بوده؛ لذا $\cos 0 = 1$ خواهد بود و خواهیم داشت:

$$U_{ij} = \left[(m_0 + t_{ij})gb \cos \beta_{ij} + F_{M,wind} + F_{R,internal} + \frac{(m_0 + t_{ij})v_{ij}^2}{2d_{ij}} + (m_0 + t_{ij})g \sin \beta_{ij} \right] d_{ij}. \quad (16)$$

$$U_{ij} = \left[m_0 g \left(b \cos \beta_{ij} + \sin \beta_{ij} + \frac{v_{ij}^2}{2gd_{ij}} \right) + F_{R,wind} + F_{R,internal} \right] d_{ij} + \left[g \left(b \cos \beta_{ij} + \sin \beta_{ij} + \frac{v_{ij}^2}{2gd_{ij}} \right) \right] t_{ij} d_{ij}. \quad (17)$$

G و b اعداد ثابت‌اند و می‌توان رابطه فوق را به صورت زیر اصلاح و ساده‌سازی نمود:

$$U_{ij} = \alpha_{ij} d_{ij} + \frac{v_{ij}^2}{2g} + \gamma_{ij} t_{ij} d_{ij} + \frac{v_{ij}^2}{2g} t_{ij}. \quad (18)$$

ضریب α_{ij} به شیب زمین بین دو گره i و j ، وزن وسیله نقلیه خالی، انرژی برای رسیدن به سرعت ثابت، مقاومت لاستیک‌ها، مقاومت باد و تلفات داخلی وسیله نقلیه بستگی دارد. برخی از این مقادیر به سرعت وسیله نقلیه بستگی دارد. ضریب γ_{ij} به شیب جاده بین گره i و j و مقاومت لاستیک‌ها بستگی دارد [6]. با توجه به رابطه بالا، کار انجام شده از گره i به j دارای دو جز می‌باشد که یکی مربوط به وسیله نقلیه خالی $\alpha_{ij} d_{ij} + \frac{v_{ij}^2}{2g}$ و دیگری مربوط به بار حمل شده توسط وسایل نقلیه $\gamma_{ij} t_{ij} d_{ij} + \frac{v_{ij}^2}{2g} t_{ij}$ می‌باشد. کار موردنیاز برای پیمایش یک مسیر برابر با مجموع کار موردنیاز کمان‌های موجود در آن مسیر می‌باشد. برای محاسبه کار موردنیاز تعریف متغیرهای باینری x_{ij} و a_{ij} برای استفاده از هر کمان (i, j) لازم است. اگر فرض شود که β_{ij} نادیده گرفته شود (یا برای تمام کمان‌ها یکسان باشد) و سرعت برای تمام کمان‌ها یکسان باشد؛ آن‌گاه خواهیم داشت:

$$\sum_{i,j \in V} U_{ij} = \sum_{i,j \in V} \left(\alpha \times d_{ij} + \frac{v^2}{2g} \right) x_{ij} + \sum_{i,j \in V} \left(\alpha \times d_{ij} + \frac{v^2}{2g} \right) a_{ij} + \sum_{i,j \in V} \left(\gamma \times d_{ij} t_{ij} + \frac{v^2}{2g} t_{ij} \right) \rightarrow$$

$$\sum_{i,j \in V} U_{ij} = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \left(d_{ij} (\alpha_{ij} x_{ij} + \gamma_{ij} t_{ij}) + \frac{v^2}{2g} (x_{ij} + t_{ij}) \right) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left(d_{ij} \alpha_{ij} + \frac{v^2}{2g} t_{ij} \right) a_{ij} \rightarrow \quad (19)$$

$$\sum_{i,j \in V} U_{ij} = \alpha \left(\sum_{i,j \in V} d_{ij} x_{ij} + \sum_{i,j \in V} d_{ij} a_{ij} \right) + \gamma \left(\sum_{i,j \in V} d_{ij} t_{ij} \right).$$

برای محاسبه مقدار سوخت مورد نیاز برای انجام کار کل ($\sum_{i,j \in V} U_{ij}$)، به یک عامل تبدیل E_1 (gallons/l) و E_2 (kg of CO_2 /gallons) که بیانگر مقدار انتشار کربن دی‌اکسید در هر واحد سوخت می‌باشد، نیاز است. از این رو فرمول محاسبه انتشار کل به صورت زیر می‌باشد:

$$E_1 \times E_2 \times \sum_{i,j \in V} U_{ij} = E \times \sum_{i,j \in V} U_{ij}. \quad (20)$$

مدل توسعه یافته فوق یک مدل خطی و عمومی است؛ لذا اگر شیب در مسیرهای مختلف متفاوت باشد رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$\sum_{i,j \in V} U_{ij} = \sum_{i,j \in V} \alpha_{ij} d_{ij} x_{ij} + \sum_{i,j \in V} \alpha_{ij} d_{ij} a_{ij} + \sum_{i,j \in V} \gamma_{ij} d_{ij} t_{ij}. \quad (21)$$

در حالت فوق بازهم تابع خطی خواهد بود.

$$E_2 = E \times \left(\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \alpha_{ij} d_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \alpha_{ij} d_{ij} a_{ij} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \gamma_{ij} d_{ij} t_{ij} \right). \quad (22)$$

$$E_1 = E \times \left(\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} \left(\alpha_{ij} x_{ij} + \gamma_{ij} t_{ij} \right) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} \alpha_{ij} a_{ij} \right). \quad (23)$$

همان‌گونه که پیش‌تر در مقدمه ذکر شده است؛ مدل ارائه شده در این پژوهش از نظر پیچیدگی زمانی جزو مسایل سخت دسته‌بندی می‌شود؛ لذا به منظور ساده‌سازی، مبحث لجستیک سبز به صورت تابع هدف مجزا در نظر گرفته نمی‌شود، زیرا با در نظر گرفتن لجستیک





سبز به عنوان یک تابع هدف مجزا، بر پیچیدگی مساله اضافه شده و بر زمان حل مساله تاثیر منفی خواهد گذاشت. از این رو با استفاده از رابطه (۲۴) مفهوم لجستیک سبز به مساله اعمال شده و در قالب هزینه در تابع هدف اول لحاظ می‌شود. قابل ذکر است که مینیم سازی عبارت زیر معادل مینیم سازی میزان انتشار آلاینده CO_2 است. برای برآورد هزینه انتشار گاز کربن دی اکسید از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$E_1 \times E_2 \times \frac{1}{E_2} \times U_{ij} \times E_3 = \frac{gallon}{j} \times \frac{CO_2}{gallon} \times \frac{1}{\frac{CO_2}{gallon}} \times j \times \frac{\$}{gallon} \quad (24)$$

از این رو رابطه میزان هزینه مربوط به گاز آلاینده به صورت زیر خواهد بود:

$$E_1 \times E_2 \times \frac{1}{E_2} \times E_3 = E. \quad (25)$$

$$CO_2 \text{ گاز} = E \times \left(\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} (\alpha_{ij} x_{ij} + \gamma_{ij} t_{ij}) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} \alpha_{ij} a_{ij} \right).$$

۳-۳- روابط ارزش زمانی پول

در این پژوهش انبارها و وسایل نقلیه استیجاری می‌باشند و سالانه مقدار ثابتی به عنوان اجاره بها پرداخته می‌شود. برای محاسبه ارزش فعلی در افق برنامه ریزی از روابط زیر استفاده می‌گردد:

$$P = A \left[\frac{1 - (1+i)^n}{i} \right] \quad \text{if } n \rightarrow \infty \quad P = \frac{A}{i} \quad (26)$$

$$onpv_i = o_i \left[\frac{1 - (1+i)^n}{i} \right] \quad \text{if } n \rightarrow \infty \quad P = \frac{o_i}{i} \quad (27)$$

$$Fnpv = F \left[\frac{1 - (1+i)^n}{i} \right] \quad \text{if } n \rightarrow \infty \quad P = \frac{F}{i} \quad (28)$$

۳-۴- پشتیبان‌گیری و شرایط بحران

در راستای پشتیبان‌گیری برای انبارها، هزینه‌هایی به سیستم اعمال می‌شود. در این سیاست پشتیبان‌گیری فرض بر این است تمامی مشتریان یک انبار، به انبار پشتیبان خود انتقال داده خواهند شد. در راستای پشتیبان‌گیری با این سیاست، هزینه‌هایی هم چون نگهداری، اضافه ظرفیت انبار پشتیبان و هزینه مسیریابی مجدد مشتریان به مدل اعمال خواهد شد. در رابطه (۲۹) هزینه پشتیبان‌گیری در این نوع سیاست شرح داده شده است.

$$\begin{aligned} & \sum_{k \in I} \sum_{l \in I} o_k (1 - y_k) u_{kl} q_l (1 - q_k) + \sum_{k \in I} \sum_{l \in I} \frac{h}{2} e c_{kl} (1 - q_k) q_l + \\ & + \sum_{l \in I} \sum_{k \in I} \sum_{j, i \in J} x_{ij} c_{ij} f_{li} f_{lj} q_l \\ & + \sum_{l \in I} \sum_{k \in I} \sum_{j \in J} x_{lj} c_{kj} u_{kl} (1 - q_k) q_l + \sum_{l \in I} \sum_{k \in I} \sum_{j \in J} a_{lj} c_{kj} u_{kl} (1 - q_k) q_l \\ & + \sum_{k \in I} \sum_{i \in I} ((f c e c_k \times (z'_k) + m m_k \times v c e c_k) \times (1 - q_k) q_i u_{ki}). \end{aligned} \quad (29)$$

قسمت اول رابطه (۲۹) شامل هزینه‌هایی هم چون راه‌اندازی، نگهداری، مسیریابی و تغییر ظرفیت انبار پشتیبان می‌باشد. هزینه راه‌اندازی شامل هزینه راه‌اندازی انبارهایی است که در حالت اولیه تصمیم به راه‌اندازی آن‌ها گرفته نشده است. به آن میزان از ظرفیت انبار که به صورت ذخیره اطمینان در انبار پشتیبان خود نگهداری می‌شود؛ و ممکن است مدت زمان طولانی استفاده نگردد؛ هزینه نگهداری اعمال خواهد شد. عبارت دوم رابطه (۲۹) بیانگر هزینه تغییر ظرفیت انبارهای پشتیبان در صورت لزوم است. انبار در صورتی نیاز به تغییر ظرفیت دارد که مقدار ظرفیت انبارهای خرابی که به آن انتقال داده شود بیش‌تر از ظرفیت انبار یا میزان کالای باقی مانده در آن باشد. هزینه اضافه ظرفیت در صورت لزوم شامل یک هزینه ثابت و یک هزینه متغیر است. میزان اضافه ظرفیت یک متغیر آزاد در علامت است و می‌تواند روی مجموعه اعداد حقیقی مقدار اختیار کند؛ اگر m_K مقداری مثبت باشد نشان‌دهنده نیاز انبار به اضافه ظرفیت و در نتیجه اعمال ظرفیت می‌باشد؛ لذا در رابطه هزینه پشتیبان‌گیری تعریف متغیری مانند $m m_K$ ضروری است تا هزینه واقعی را اعمال کند. از آنجایی که خرابی به صورت قطعی رخ نخواهد داد، هزینه مورد انتظار پشتیبان‌گیری محاسبه گردیده است.

هدف $G-CLRP$ انتخاب بهینه مکان‌هایی برای انبار و مسیرهایی برای اتصال آن‌ها به مشتریان به گونه‌ای که کم‌ترین آسیب به محیط زیست را داشته باشند، می‌باشد.

۴-۱- مفروضات مساله

در این تحقیق در راستای نزدیک شدن به دنیای واقعی، فرضیاتی از جمله احتمال خرابی انبارها و مسیرهای حمل و نقل و عدم قطعی بودن تقاضا برای مساله در نظر گرفته شده است. با فرض خراب شدن انبارها تمام ظرفیت انبار از بین رفته و مشتریان آن انبار به انبار پشتیبان منتقل خواهند شد. از این رو برای هر انباری که تصمیم به بازگشایی آن گرفته شود، انبار پشتیبانی تعیین خواهد شد. به دلیل در نظر گرفتن احتمال خرابی در مسیرهای حرکت، تابع هدفی به منظور انتخاب مسیرهایی با حداقل شانس خرابی در نظر گرفته شده است تا حداکثر اطمینان لازم به مسیرهای انتخابی وجود داشته باشد. هم چنین برای محاسبه میزان انتشار کربن دی اکسید از روابط محاسبه مصرف سوخت بر اساس نیروهای وارد شده بر وسیله نقلیه استفاده شده است.

۴-۲- مدل سازی با فرض قطعی بودن تقاضا

مدل سازی مساله به صورت زیر خواهد بود:

$$h_1 = \min \left(\sum_{i \in I} onpv_i y_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Fnpv a_{ij} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} a_{ij} \right. \\ + \sum_{k \in I} \sum_{l \in I} onpv_k (1 - y_k) u_{kl} q_l (1 - q_k) + \sum_{k \in I} \sum_{l \in I} \frac{h}{2} ec_{kl} (1 - q_k) q_l + \\ + \sum_{l \in I} \sum_{k \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} c_{ij} f_{li} f_{lj} q_l \\ + \sum_{l \in I} \sum_{k \in I} \sum_{j \in J} x_{lj} c_{kj} u_{kl} q_l + \sum_{l \in I} \sum_{k \in I} \sum_{j \in J} a_{lj} c_{kj} u_{kl} q_l u_{ki} \\ \left. + \sum_{k \in I} \sum_{i \in I} ((fcost_k \times (z'_k) + mm_k \times vcost_k) \times (1 - q_k) q_i) + \right) \quad (30)$$

$$E \times \left(\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \left(d_{ij} (\alpha_{ij} x_{ij} + \gamma_{ij} t_{ij}) + \frac{v^2}{2g} (x_{ij} + t_{ij}) \right) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left(d_{ij} \alpha_{ij} + \frac{v^2}{2g} \right) a_{ij} \right) \quad (31)$$

$$h_2 = \min \left(\sum_{i \in I} q_i y_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} P_{ij} x_{ij} + \sum_{k \in I} \sum_{i \in I} q_k \times U_{ki} \times q_i \right) \quad (32)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad \text{for all } j \in J. \quad (33)$$

$$\sum_{k \in J} x_{jk} + \sum_{i \in I} a_{ij} = \sum_{i \in V} x_{ij} \quad j \in J. \quad (34)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = \sum_{j \in J} a_{ij} \quad \text{for all } i \in I. \quad (35)$$

$$x_{ij} + x_{ji} \leq 1 \quad \text{for all } i, j \in V. \quad (36)$$

$$\sum_{i \in V, i \neq j} t_{ij} = \sum_{k \in V, k \neq j} t_{jk} + D_j \quad \text{for all } j \in J. \quad (37)$$

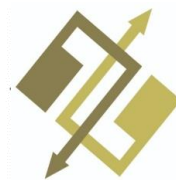
$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} x_{ij} = |J|. \quad (38)$$

$$\sum_{j \in J} f_{ij} = 1 \quad \text{for all } j \in J. \quad (39)$$

$$t_{ij} \leq Q x_{ij} \quad \text{for all } i, j \in V. \quad (40)$$

$$\sum_{j \in J} t_{ij} \leq w_i y_i \quad \text{for all } i \in I. \quad (41)$$





$$\sum_{k \in V} x_{jk} = 1 - z_j \quad \text{for all } j \in J. \quad (41)$$

$$1 + a_{ij} \geq f_{ij} + z_j \quad \text{for all } i \in I, j \in J. \quad (42)$$

$$-(1 - x_{ju} - x_{uj}) \leq f_{ij} - f_{iu} \quad \text{for all } i \in I, j, u \in V. \quad (43)$$

$$f_{ij} - f_{iu} \leq (1 - x_{ju} - x_{uj}) \quad \text{for all } i \in I, u \in V. \quad (44)$$

$$f_{ij} \geq x_{ij} \quad \text{for all } i \in I, j \in J. \quad (45)$$

$$\sum_{i \in I} y_i \geq \frac{\sum_{j \in J} D_j}{\sum_{i \in I} w_i} \quad \text{for all } i \in I. \quad (46)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq w_i / q \quad i \in I. \quad (47)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \geq \sum_{j \in J} D_j / Q. \quad (48)$$

$$u_{ki} \leq y_i \quad k, i \in I. \quad (49)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \text{for all } i \in I, j \in J. \quad (50)$$

$$\sum_{k \in I} u_{ki} = y_i \quad \text{for all } i \in I. \quad (51)$$

$$\sum_{k \in I} ec_{ki} = \sum_{j \in J} D_j f_{ij} \quad i \in I. \quad (52)$$

$$ec_{kl} \leq u_{kl} \times M \quad k, l \in I. \quad (53)$$

$$m_K = \sum_{j \in J} t_{kj} + \sum_{l=1}^l ec_{kl} - w_k. \quad (54)$$

$$mm_K \geq m_K \quad \text{for all } K \in K. \quad (55)$$

$$mm_K \leq m_K + M * (1 - z_k') \quad \text{for all } k \in K. \quad (56)$$

$$mm_K \leq M * (z_k'). \quad (57)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \text{for all } i, j \in V. \quad (58)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \text{for all } i \in I. \quad (59)$$

$$f_{ij} \in \{0,1\} \quad \text{for all } i \in I, j \in V. \quad (60)$$

$$z_j \in \{0,1\} \quad \text{for all } j \in J. \quad (61)$$

$$a_{ij} \in \{0,1\} \quad \text{for all } i \in I, j \in J. \quad (62)$$

$$z'_k \in \{0,1\} \quad \text{for all } k \in I. \quad (63)$$

$$t_{ij} \geq 0, \in \mathbb{R}. \quad (64)$$

$$m_k \in \mathbb{R} \quad \text{for all } K \in I. \quad (65)$$

$$mm_k \geq 0 \quad \text{for all } k \in I. \quad (66)$$

در مدل‌سازی فوق، تابع هدف اول هزینه کل سیستم از جمله هزینه مسیریابی، مکان‌یابی، هزینه پشتیبان‌گیری و هزینه مصرف سوخت (که منجر به کاهش آلاینده‌های هوا نیز می‌باشد) را به حداقل می‌رساند. تابع هدف دوم تضمین می‌نماید که مسیرهای انتخاب‌شده برای حرکت وسایل نقلیه کم‌ترین شانس خرابی را خواهند داشت به عبارتی حداکثرسازی اعتماد به راه‌های باز شده را تضمین می‌کند. رابطه (۳۲) بیان می‌کند که به هر گره دقیقاً یک کمان وارد خواهد شد. رابطه (۳۳) بیان می‌کند که اگر به هر گره کمانی وارد شد حتماً از آن گره کمانی خارج خواهد شد. رابطه (۳۴) تأکید می‌کند که مجموع کمان‌های ورودی به هر انبار i برابر با مجموع کمان‌های خروجی از آن انبار خواهد بود. رابطه (۳۵) بین دو گره متوالی در یک مسیر تنها یک کمان وجود دارد و به عبارتی وسیله نقلیه مسیر رفته را باز نمی‌گردد. تعادل جریان برای یک گره توسط رابطه (۳۶) فرموله شده است. تعداد کمان‌های فعال برای اتصال تمام مشتریان به انبارها توسط رابطه (۳۷) فرموله شده است؛ بنابراین، اطمینان حاصل می‌شود که مسیرها شعاعی هستند و چرخه‌ای ندارند. رابطه (۳۸) تضمین می‌کند که هر تقاضا به یک انبار متصل است. رابطه (۳۹) جریان در هر مسیر را به ظرفیت وسایل نقلیه محدود می‌کند. رابطه (۴۰) جریان خارجی از هر تسهیل را به ظرفیت انبار محدود می‌کند. رابطه (۴۱) آخرین گره هر مسیر را مشخص می‌نماید. رابطه (۴۲) تضمین می‌نماید که اگر گره‌ای آخرین گره مسیر باشد کمانی از آن به انبار الزامی است. رابطه‌های (۴۳) و (۴۴) نشان می‌دهد که کمان فعال به انبار یکسان متصل می‌شوند.



رابطه (۴۵) تضمین می‌نماید که اگر کمان بین گره i و j فعال باشند آن‌گاه به انبارهای یکسان متصل خواهند شد. با **رابطه (۴۶)** حد پایین تعداد تسهیلاتی که برای پاسخ‌گویی به تقاضای مشتریان نیاز است مشخص می‌شود. با **رابطه (۴۷)** نیز تعداد مسیرهایی که از یک انبار می‌تواند خارج شوند مشخص می‌شود. **محدودیت (۴۸)** تضمین می‌کند که تعداد مسیرها برای پاسخ‌گویی به تقاضای تمام مشتریان کافی است. **رابطه (۴۹)** مشخص می‌نماید که فقط برای انبارهای باز پشتیبان تعیین می‌شود. **رابطه (۵۰)** تضمین می‌نماید اگر انباری باز باشد باید کمائی از آن خارج گردد. **رابطه (۵۱)** مشخص می‌نماید برای هر انبار باز تنها یک انبار پشتیبان باید ایجاد گردد. **رابطه (۵۲)** تا **(۵۴)** میزان تقاضاهای انتقال‌یافته از انبارها به انبار پشتیبان خود را مطرح می‌کند. **رابطه (۵۵)** تا **رابطه (۵۷)** تعیین می‌کنند که آیا انبار پشتیبان نیاز به اضافه ظرفیت خواهد داشت یا خیر. **رابطه (۵۸)** تا **رابطه (۶۳)** صفر و یک بودن متغیرها را مشخص می‌کند. پیوسته‌بودن بار حمل شده توسط وسایل نقلیه با **رابطه (۶۴)** مشخص می‌گردد. در راستای سیاست پشتیبان‌گیری متغیرهایی به مدل تحمیل می‌شود که علامت آن‌ها در **محدودیت‌های (۶۵)** و **(۶۶)** مشخص می‌گردد. مدل ارائه‌شده فوق یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیر خطی آمیخته است. مدل مطرح شده در این پژوهش غیر خطی است و با استفاده از روش‌های خطی‌سازی به یک مساله برنامه‌ریزی خطی تبدیل خواهد شد [59].

۳-۴- بهینه‌سازی استوار

در برنامه‌ریزی ریاضی معمولاً مسایل با پیش‌فرض قطعی بودن داده‌ها از قبل حل می‌شوند. حال آن‌که در دنیای واقعی اکثر داده‌ها دارای عدم قطعیت‌اند. به عبارتی پیش‌فرض اصلی برنامه‌ریزی‌های ریاضی توسعه مدل براساس داده‌های معین است. حال آن‌که در این‌گونه از مدل‌ها اثر عدم قطعیت داده‌ها در کیفیت و امکان‌پذیر بودن جواب‌ها اثری ندارد. در نتیجه در مسایل دنیای واقعی ممکن است با تغییر یکی از داده‌ها تعداد زیادی از محدودیت‌ها نقض شده و جواب به‌دست‌آمده غیر بهینه یا حتی غیرممکن باشد. در نتیجه سوال اصلی، ساخت جوابی برای مساله است که در مقابل این عدم قطعیت داده‌ها مقاوم باشد که اصطلاحاً این پاسخ‌ها را استوار و این دسته از بهینه‌سازی را بهینه‌سازی استوار می‌نامند. پارامتر تقاضا در این پژوهش دارای عدم قطعیت است؛ برای مقابله با عدم قطعیت در تقاضا از رویکرد برنامه‌ریزی استوار سناریو محور استفاده گردیده است [60]، [61]؛ از این‌رو مجموعه‌ای از سناریوها به‌صورت $s = \{1, 2, \dots, S\}$ تعریف می‌شود که شامل حالات مختلفی از تقاضا است و احتمال وقوع آن‌ها مشخص می‌باشد. احتمال رخداد هر کدام از سناریوها را با p_s نمایش داده می‌شود و باید $\sum_s p_s = 1$ باشد.

hh_s	تابع هدف به ازای هر سناریو.
t_{ijs}	متغیر پیوسته‌ای که نشان‌دهنده مقدار بار حمل‌شده بین گره i و j در سناریوی s است.
D_{js}	تقاضای مشتری j در سناریوی s .
ε_{is}	متغیر جریمه که در راستای استوارسازی به محدودیت‌ها اضافه خواهد شد.
ε_{1is}	متغیر جریمه که در راستای استوارسازی به محدودیت‌ها اضافه خواهد شد.

سایر اندیس‌ها، پارامترها، هزینه‌ها و متغیرهای تصمیم مشابه مدل قطعی می‌باشند.

۳-۴-۱- طراحی توابع اهداف بهینه‌سازی استوار

با استناد به مقاله‌های [60]، [62] توابع اهداف مدل‌سازی استوار به‌صورت زیر تعریف خواهند شد:

$$\min \sum_s p_s (hh_s) + \lambda \sum_s p_s \left[hh_s - \sum_s (p_s \times hh_s) + 2\theta_s \right] + w \sum_s p_s \left(\sum_{i \in I} (\varepsilon_{is} + \varepsilon_{1is}) \right). \quad (67)$$

$$\min \sum_{i \in I} q_i y_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} Pr_{ij} x_{ij} + \sum_{k \in I} \sum_{i \in I} q_k \times U_{ki} \times q_i. \quad (68)$$

۳-۴-۲- طراحی محدودیت‌های استوار

در راستای مدل‌سازی استوار محدودیت‌های مدل مطابق زیر به مساله افزوده خواهند شد:

$$(hh_s) - \sum_s (p_s hh_s) + \theta_s \geq 0. \quad (69)$$



$$\begin{aligned}
 hh_s = & \sum_{i \in I} onpv_i y_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Fnpv a_{ij} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} a_{ij} \\
 & + \sum_{k \in I} \sum_{i \in I} (onpv_k u_{ki} - onpv_k y_{ki}') (1 - q_k) q_i + \sum_{k \in I} \sum_{i \in I} \frac{h}{2} ec_{ki} (1 - q_k) q_i \\
 & + \sum_{i \in I} \sum_{i' \in I} \sum_{j \in J} x_{ijl}''' c_{ij} q_l \\
 & + \sum_{i \in I} \sum_{k \in I} \sum_{j \in J} xx_{ljk} c_{kj} (1 - q_k) q_l \\
 & + \sum_{i \in I} \sum_{k \in I} \sum_{j \in J} a_{ljk}''' c_{kj} (1 - q_k) q_l \\
 & + \sum_{k \in I} (mm''_{ki} \times vcost_k + fcost_k \times u''_{ki}) (1 - q_k) q_i + E \\
 & \times \left(\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \left(d_{ij} (\alpha x_{ij} + \gamma t_{ijs}) + \frac{v^2}{2g} (x_{ij} + t_{ijs}) \right) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left(d_{ij} \alpha + \frac{v^2}{2g} \right) a_{ij} \right).
 \end{aligned} \tag{۷۰}$$

در راستای استوارسازی مساله با رویکرد سخت‌گیرانه و ریسک‌ناپذیری تصمیم‌گیرنده، به برخی از محدودیت‌های مساله قطعی، متغیر جریمه مطابق زیر اضافه خواهد شد که این تغییرات در زیر نشان داده شده است:

$$\sum_{k \in I} ec_{ki} - \varepsilon_{is} = \sum_{j \in J} D_{js} f_{ij} \quad \text{for all } i \in I, s \in S. \tag{۷۱}$$

$$m_K - \varepsilon_{1ks} = \sum_{j \in J} t_{kjs} + \sum_{l=1}^l ec_{kl} - w_k \quad \text{for all } k \in I, s \in S. \tag{۷۲}$$

$$t_{ijs} \geq 0, \varepsilon_{is} \geq 0, \varepsilon_{1ks} \geq 0 \quad \text{for all } s \in S. \tag{۷۳}$$

۵- روش حل

روش‌های متفاوتی برای حل مسایل چندهدفه وجود دارد. در این پژوهش به منظور دستیابی به جبهه پارتو روش‌های محدودیت اسپیلون (ε -محدودیت) و ال پی متریک وزنی مورد استفاده قرار گرفته است. اسپیلون (ε -محدودیت) برای حل مسایل چندهدفه به خوبی شناخته شده است و تمام راه حل‌های بهینه پارتو را تولید می‌کند [63]. قابل ذکر است که به دلیل NP -Hard بودن مدل ارایه شده در این پژوهش، برای حل در ابعاد پایین (بدون تغییر در نوع متغیرهای مساله و محدودیت‌ها) از نرم‌افزار گمز و حل‌کننده $CPLEX$ (solver) استفاده شده است. جواب‌های حاصل توسط نرم‌افزار گمز مقادیر بهینه خواهند بود.

۶- ارزیابی

تجزیه و تحلیل، خلاصه‌سازی مطالب و چارچوب‌بندی نتایج به دست آمده در یک تحقیق مهم‌ترین قسمت آن بوده و از حساسیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش پس از جمع‌آوری اطلاعات مرتبط با موضوع مورد بررسی با محوریت قرار دادن مدل‌سازی یک مساله فرضی مکان‌یابی-مسیریابی، مثال‌هایی عددی به منظور حل و آزمون مدل ارایه شده و پس از آن نتایج حاصل تجزیه و تحلیل شده است. به منظور حل و آنالیز مدل بایستی داده‌های ورودی شامل پارامترها و اسکالرها را تعیین نمود، در این بخش پارامترهای مورد نیاز برای حل مساله شرح داده می‌شوند.

جدول ۲- تابع احتمال پارامترها.

Table 2- Probability function of parameters.

منابع	تابع احتمال	نوع پارامتر
[30]	Uniform (0.2, 0.8)	احتمال خرابی انبارها
[64]	Uniform (1, 3)	احتمال خرابی مسیرها
[64]	Uniform (300, 600)	هزینه متغیر اضافه ظرفیت انبارها
[64]	Uniform (300, 600)	هزینه ثابت اضافه ظرفیت انبارها
[64]	Uniform (1, 5)	هزینه نگهداری موجودی در انبارها

هم‌چنین احتمال خرابی مسیرها و هزینه بازگشایی انبارها به ترتیب از توابع احتمال یکنواخت در بازه $(0/5, 0/۲)$ و یکنواخت در بازه



(۱۰۰۰، ۵۰۰) در نظر گرفته شده است. در این پژوهش نرخ بهره ۲۰٪ و افق زمانی ۵ ساله در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ پارامترهای مرتبط با وسایل نقلیه اولیه و میزان نشر گاز دی اکسید کربن متناظر با آن‌ها بیان شده است. قابل ذکر است مقادیر این پارامترها کاملاً وابسته به نوع و ظرفیت وسایل نقلیه است و این مقادیر از جدیدترین گزارش دپارتمان مشاغل، انرژی و صنایع دولت بریتانیا مبتنی بر متدها، جداول و استانداردهای نشر آلاینده‌های زیست محیطی مربوط به سال ۲۰۱۶ میلادی استخراج شده‌اند. ناوگان حمل و نقل در این مساله از نوع همگن و با تعداد نامحدود در نظر گرفته شده است. محاسبه مصرف وسیله نقلیه از گزارش تحقیقات حمل و نقل دانشگاه میشیگان صورت گرفته است که در آن مشخص شده میانگین مصرف سوخت یک وسیله نقلیه با این ویژگی‌ها ۱ گالن در هر ۸۱/۱۵ کیلومتر سفر می‌باشد [6].

جدول ۳- پارامترهای وسایل نقلیه.
Table 3- Vehicles parameters.

سرعت حرکت وسایل نقلیه v	انرژی مورد نیاز برای کامیون خالی α	انرژی اضافی کامیون (انرژی بار) γ
80	0.0635	0.001004

۱-۶- تعریف سناریو بر روی پارامتر تقاضا

سناریوهای تعریف شده بر روی تقاضا با اقتباس از مقاله [64] به سه صورت خوشبینانه، محتمل و بدبینانه تعریف شده است. استراتژی مورد استفاده برای تعریف سناریو بر روی تقاضا با اقتباس از مقاله [65] بدین صورت است که تقاضای مشتریان کم‌تر از ظرفیت کامیون‌ها می‌باشد. جدول ۴ پارامترهای مورد نیاز برای بهینه‌سازی استوار را نشان می‌دهد.

جدول ۴- پارامترهای بهینه‌سازی استوار.
Table 4- Robust optimization parameters.

سناریوها	احتمال وقوع سناریو
سناریو اول (خوشبینانه)	0.25
تقاضا بدون تغییر	
سناریو دوم (محتمل)	0.5
تقاضاها ۲۰٪ افزایش داشته‌اند.	
سناریو سوم (بدبینانه)	0.25
تقاضاها ۲ برابر افزایش داشته‌اند.	
پارامترهای استوار سازی	
λ	1.75
ω	0.25

در این قسمت چند مساله در فضای کوچک و متوسط حل شده است و نتایج آن در جدول ۵ قابل مشاهده است. به دلیل $NP-Hard$ بودن مساله و در نظر گرفتن محدودیت ۷۲۰۰ ثانیه برای حل مسایل توسط نرم‌افزار گمز، اجرای مثال‌ها در ابعاد بالا به منظور دست‌یابی به جواب بهینه بر روی رایانه شخصی امکان‌پذیر نیست و با علامت *** در جدول ۵ نشان داده شده است [69]–[66]. این امر حاکی از این است که نرم‌افزار گمز به زمان بیش‌تری برای دست‌یابی به جواب بهینه نیاز داشته است.

به منظور حل دقیق این مثال‌ها از نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز نسخه ۲۴.۱.۲ در ابعاد پایین استفاده شده است. آزمایشات محاسباتی بر روی رایانه شخصی با مشخصات *Intel Core 5, 4GB RAM and GEFOCE 2GB* انجام شده است. سایر پارامترهای مورد نیاز در این بخش ۶ از [70] استخراج شده است. قابل ذکر است که نمونه‌های موجود در این سایت جز مسائل استاندارد در حوزه LRP هستند و توسط سایر محققین به منظور بررسی کارایی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

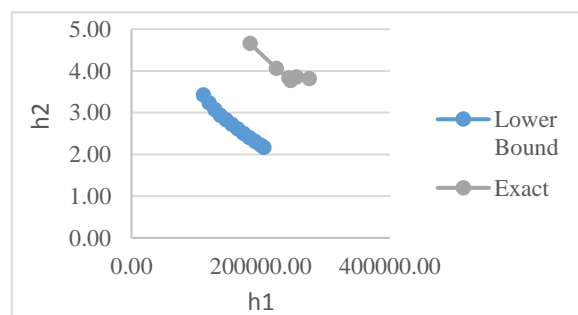
جدول ۵- نتایج.
Table 5- Results.

روش های حل			روش ال پی متریک			روش اپسیلون محدودیت			کران پایین		
زمان	h_2	h_1	زمان	h_2	h_1	زمان	h_2	h_1	زمان	h_2	h_1
140	3.718	254293.129	165	3.83	243404.85	115	2.61	164387.78	15-5		
198	3.6	383992.4	204	4.94	343992.4	198	2.40	187391.15	20-5		
***	***	***	***	***	***	1427	4.69	399593.13	35-5		
***	***	***	***	***	***	2760	3.28	1081484.58	50-5		
***	***	***	***	***	***	3764	1.81	1035200.66	85-5		
***	***	***	***	***	***	4567	1.92	815963.07	100-5		
***	***	***	***	***	***	***	***	***	100-10	***	***

* زمان ها بر حسب ثانیه می باشد.

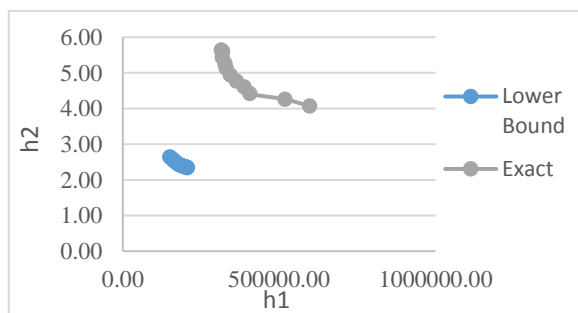
* قابل ذکر است که کران های پایین در این مساله با آزادسازی متغیرهای صفر و یک مساله به دست آمده است.

در شکل ۲ تا شکل ۹ نمودارهای پارتو به دست آمده از روش های اپسیلون محدودیت و ال پی متریک، قابل مشاهده می باشد.



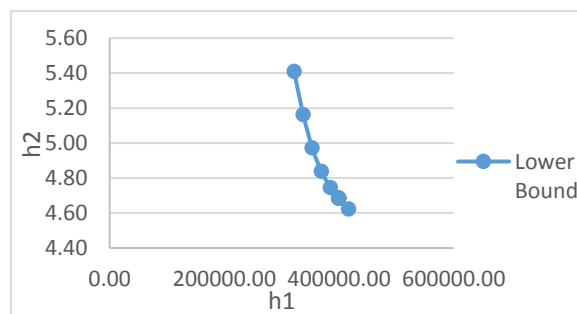
شکل ۲- مساله با اندازه ۱۵-۵.

Figure 2- Problem with size 5-15.



شکل ۳- مساله با اندازه ۲۰-۵.

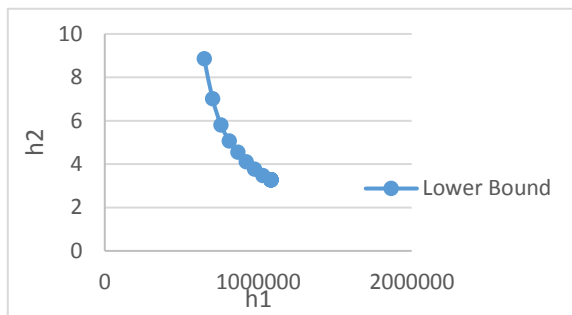
Figure 3- Problem with size 5-20.



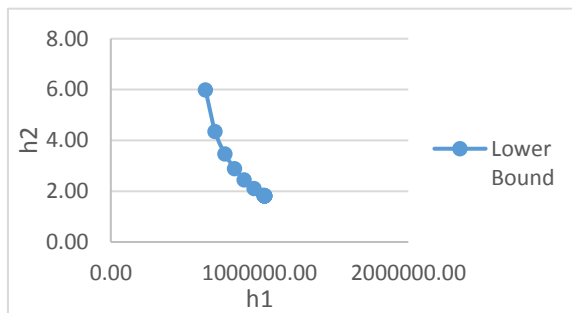
شکل ۴- مساله با اندازه ۳۵-۵.

Figure 4- Problem with size 5-35.

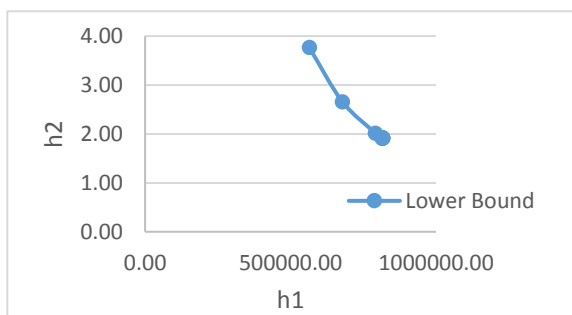




شکل ۵- مساله با اندازه ۵-۵۰.
Figure 5- Problem with size 5-50.

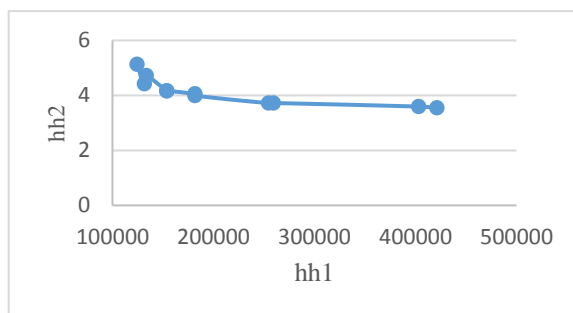


شکل ۶- مساله با اندازه ۵-۱۰۰.
Figure 6- Problem with size 5-100.

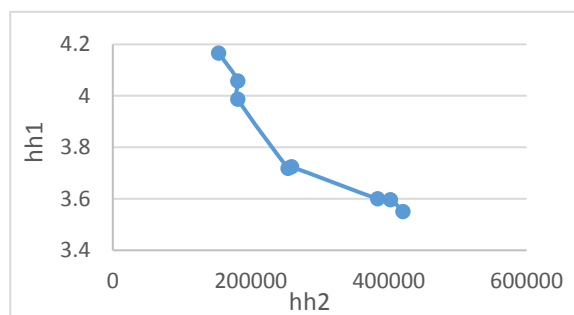


شکل ۷- مساله با اندازه ۵-۸۵.
Figure 7- Problem with size 5-85.

به منظور نمایش بهتر جبهه پارتو روش ال پی متریک، جبهه پارتو به دست آمده توسط این روش به صورت مجزا در شکل ۸ و ۹ ارایه شده است.



شکل ۸- روش ال پی متریک-مساله با اندازه ۵-۱۵.
Figure 8- LP metric method-problem with size 5-15.



شکل ۹- روش ال پی متریک-مساله با اندازه ۵۰-۵۰.

Figure 9- LP metric method-Problem with size 5-20.

۷- آنالیز حساسیت

یکی از روش‌های مقابله با عدم قطعیت، رویکرد آنالیز حساسیت می‌باشد. در این بخش به منظور بررسی بیش‌تر مدل و تاثیرپذیری جواب‌های بهینه به داده‌های ورودی، آنالیز حساسیت بر روی پارامترهایی هم‌چون ظرفیت کامیون‌ها، ظرفیت انبارها، تقاضای مشتریان و پارامترهای بهینه‌سازی استوار ارایه شده است. خلاصه اطلاعات مربوط به تحلیل حساسیت در جدول ۶ قابل مشاهده است.

جدول ۶- نتایج تحلیل حساسیت.

Table 6- Sensitivity analysis results.

توضیحات	محدوده تغییرات	نوع تغییرات
با افزایش ظرفیت وسایل نقلیه هزینه‌ها کاهش می‌یابد.	(+30, +90)	ظرفیت وسایل نقلیه
با افزایش تقاضای مشتریان هزینه‌ها افزایش می‌یابد.	(-25%, +50%)	تقاضای مشتریان
با افزایش ظرفیت انبارها هزینه‌ها کاهش می‌یابد.	(-30%, +50%)	ظرفیت انبارها
با افزایش (ω) مدل به سمت راه حل‌های شدنی پیش می‌رود و در نتیجه هزینه‌ها افزایش می‌یابد.	(0,3)	پارامتر استوارسازی (ω)
با کاهش λ مدل از راه حل‌های بهینه فاصله می‌گیرد در نتیجه هزینه‌ها افزایش می‌یابد.	(0,4)	پارامتر استوارسازی (λ)

**مقادیر مثبت به معنای افزایش مقدار پارامتر و مقادیر منفی به معنای کاهش مقدار پارامتر خواهد بود.

**تضاد دو تابع هدف در نمودارهای تحلیل حساسیت به خوبی مشخص است.

تصاویر مربوط به نتایج تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مدل در شکل ۱۰ تا شکل ۱۴ قابل مشاهده است. در این تصاویر مربوط به خطوط تیره مربوط به تابع هدف اول و خط چین‌ها مربوط به تابع هدف دوم می‌باشند.

۸- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مساله مکان‌یابی-مسیریابی ظرفیت‌دار سبز تک رده‌ای قابل اعتماد در شرایط بحرانی به گونه‌ای که در این شرایط عملکرد شبکه دچار اختلال نمی‌شود؛ ارایه شده است. وجه تمایز این مدل با سایر کارهای پیشین اعمال خرابی در مسیر و تسهیلات، تعیین انبار پشتیبان برای انبارها و حداکثرسازی سرویس دهی شبکه است، به گونه‌ای یک شبکه را تا حد امکان قابل اعتماد می‌سازد؛ می‌باشد. به منظور حداکثرسازی سرویس دهی شبکه و حداقل‌سازی هزینه‌های سیستم، مساله به صورت دو هدفه مدل‌سازی شده است. به عبارتی، تابع هدف اول به منظور حداقل‌سازی هزینه‌های مربوط به مسیریابی و هزینه‌های سوخت به منظور کاهش انتشار کربن دی‌اکسید ناشی از حمل و نقل در هوا و تابع هدف دوم برای حداکثرسازی سرویس دهی شبکه ارایه شده‌اند. مدل‌های پیشنهادی با استفاده از نمونه‌های استاندارد حل گردیده است. نتایج حاصل از حل مدل‌ها و تفاوت در جواب‌های بهینه به دست آمده، برای هر یک از توابع اهداف، بیانگر در تضاد بودن اهداف به کار برده شده در مدل می‌باشد؛ لذا بهینه‌سازی توام دو هدف ذکر شده در این پژوهش در قالب یک هدف امکان‌پذیر نیست و به منظور تبادل بین اهداف مساله و نیز قابلیت تصمیم‌گیری کارشناسان و تصمیم‌گیرندگان در شرایط تبادل بین اهداف متعارض، بایستی از یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه به منظور ایجاد جبهه پارتو به عنوان ابزاری کمکی برای تصمیم‌گیری استفاده کنند. در این پژوهش از روش اپسیلون-محدودیت و ال پی متریک در حل روش دقیق استفاده شده است. نتایج حاصل از نمودار پارتو نشان می‌دهد که نظم و پراکندگی نقاط در جبهه پارتو روش ال پی متریک بیش‌تر از روش اپسیلون محدودیت بوده است. مدل ارایه شده در پژوهش جاری، در دسته مسایل $NP-Hard$ طبقه‌بندی شده و از این رو حل دقیق این گونه مسایل با استفاده از تجهیزات کامپیوتری ذکر شده در قسمت نتایج، فقط



در ابعاد پایین امکان پذیر بوده است. همان گونه که در پیش تر در بخش ارزیابی و تحلیل حساسیت دارای جواب بهینه بودن مدل مطرح شده در این پژوهش به اثبات رسیده و هم چنین با وجود دست یافتن به کران های مناسب برای مساله در ابعاد متوسط و بزرگ، لذا می توان اطمینان خاطر داشت که مدل ارایه شده در این تحقیق در ابعاد وسیع نیز دارای اشکال محاسباتی نخواهد بود و تضمین خواهد شد که مساله ارایه شده در این پژوهش برای مسایلی با داده های قابل قبول، همواره دارای جواب شدنی می باشد. عمده هدف این پژوهش ایجاد مدلی برای ایجاد حداکثر قابلیت اطمینان در شرایط حساس می باشد. از این رو مدل مطرح شده، قادر به بازگشایی انبارها و مسیرهایی با کمترین شانس خرابی، کمترین هزینه (حداکثر سرویس رسانی) و کمترین میزان آلاینده خواهد بود. هم چنین به منظور مدیریت مطلوب بحران و پیشگیری از سردرگمی در شرایط وقوع بحران برای انبارهایی که بازگشایی می شوند انبار پشتیبان مشخص می گردد. به عبارت کلی با در نظر گرفتن افزایش قابلیت سرویس دهی شبکه به صورت یک تابع هدف مجزا و هم چنین تعیین انبار پشتیبان برای انبارهای گشایش یافته می توان گفت مدل ارایه شده در این پژوهش دارای قابلیت اطمینان حداکثری خواهد بود و از موارد کاربرد آن می توان به استفاده در مشاغل حساس که نیاز به تیم پشتیبانی قوی و مدیریت صحیح بحران دارند، یا برای شرکت ها یا سازمان که دارای ریسک پذیری کمی می باشند، اشاره کرد؛ زیرا در سازمان هایی با این رویکرد، قابلیت اطمینان سیستم در مقایسه با هزینه الویت بالاتری خواهد داشت. هم چنین مدل ارایه شده با در نظر گرفتن تقاضا به صورت غیر قطعی سعی بر نزدیک کردن مدل به دنیای واقعی داشته و با در نظر گرفتن رویکرد بهینه سازی استوار برای مقابله با عدم قطعیت سعی بر کاهش ریسک و افزایش قابلیت اطمینان سیستم نموده است زیرا در رویکرد استوار سازی استفاده شده در این پژوهش نیز هدف کاهش ریسک و خطر پذیری بوده و سعی بر ارایه جواب هایی نموده است که تا حد امکان در تمامی شرایط امکان پذیر باشد. قابل ذکر است که در راستای استوار سازی مساله با رویکرد سخت گیرانه و ریسک ناپذیری تصمیم گیرنده، جواب های حاصل شده در تمام سناریوهای ممکن، شدنی و لذا از این رو کمی از بهینگی به دور می باشد. به منظور تحقیقات بیش تر در آینده می توان بررسی مواردی از قبیل زنجیره تامین سه مرحله ای، مشتری های متمایز، استفاده از داده های فازی، تعیین چندین انبار پشتیبان، تعیین سیاست پشتیبان گیری، محاسبه کران پایین از طریق روش های آزاد سازی لاگرانژ و تجزیه بندرز، مقایسه مدل های ارایه شده در مصرف سوخت و در نظر گرفتن لجستیک سبز به صورت تابع هدف مجزا و حل مساله به صورت سه هدفه و روش بهینه سازی استوار بازه ای استفاده از رویکردهایی به منظور تضمین شدنی بودن مساله در ابعاد وسیع را پیشنهاد نمود.

توافقنامه نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که نسخه نهایی را قبل از ارسال مشاهده و تایید کرده اند. هم چنین تضمین می نمایم که این مقاله اثر چاپ نشده یا در حال حاضر تحت انتشار نمی باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان تمایل دارند تا مراتب تقدیر و تشکر خویش را از داوران محترم که با نظرات سازنده خویش موجب افزایش کیفیت مقاله شدند، ابراز نمایند.

تعارض با منافع

نویسندگان اعلام می دارند که هیچ تضادی در منافع در مورد انتشار این نسخه وجود ندارد.

منابع

- [1] Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., Simchi-Levi, E. (2004). *Managing the supply chain: the definitive guide for the business professional*. https://digital.library.tu.ac.th/tu_dc/frontend/Info/item/dc:272468.
- [2] Rand, G. K. (1976). Methodological choices in depot location studies. *Journal of the operational research society*, 27, 241-249.
- [3] Contardo, C., Hemmelmayr, V., & Crainic, T. G. (2012). Lower and upper bounds for the two-echelon capacitated location-routing problem. *Computers & operations research*, 39(12), 3185-3199.
- [4] Prodhon, C., & Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. *European journal of operational research*, 238(1), 1-17.
- [5] Mohamed, I. B., Klibi, W., Sadykov, R., Sen, H., & Vanderbeck, F. (2023). The two-echelon stochastic multi-period capacitated location-routing problem. *European journal of operational research*, 306(2), 645-667.



- [6] Toro, E. M., Franco, J. F., Echeverri, M. G., & Guimarães, F. G. (2017). A multi-objective model for the green capacitated location-routing problem considering environmental impact. *Computers & industrial engineering*, 110, 114–125.
- [7] Nagy, G., & Salhi, S. (2007). Location-routing: Issues, models and methods. *European journal of operational research*, 177(2), 649–672.
- [8] Lopes, R. B., Ferreira, C., Santos, B. S., & Barreto, S. (2013). A taxonomical analysis, current methods and objectives on location-routing problems. *International transactions in operational research*, 20(6), 795–822.
- [9] Ponboon, S., Qureshi, A. G., & Taniguchi, E. (2016). Branch-and-price algorithm for the location-routing problem with time windows. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 86, 1–19.
- [10] Drexl, M., & Schneider, M. (2015). A survey of variants and extensions of the location-routing problem. *European journal of operational research*, 241(2), 283–308.
- [11] Bent, R. W., & Van Hentenryck, P. (2004). Scenario-based planning for partially dynamic vehicle routing with stochastic customers. *Operations research*, 52(6), 977–987.
- [12] Prins, C., Prodhon, C., & Calvo, R. W. (2006). Solving the capacitated location-routing problem by a GRASP complemented by a learning process and a path relinking. *4or*, 4, 221–238.
- [13] Barreto, S., Ferreira, C., Paixao, J., & Santos, B. S. (2007). Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem. *European journal of operational research*, 179(3), 968–977.
- [14] Balcik, B., & Beamon, B. M. (2008). Facility location in humanitarian relief. *International journal of logistics*, 11(2), 101–121.
- [15] Vincent, F. Y., Lin, S. W., Lee, W., & Ting, C.-J. (2010). A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem. *Computers & industrial engineering*, 58(2), 288–299.
- [16] Duhamel, C., Lacomme, P., Prins, C., & Prodhon, C. (2010). A GRASP×ELS approach for the capacitated location-routing problem. *Computers & operations research*, 37(11), 1912–1923.
- [17] Li, X., & Ouyang, Y. (2010). A continuum approximation approach to reliable facility location design under correlated probabilistic disruptions. *Transportation research part B: methodological*, 44(4), 535–548.
- [18] Peng, P., Snyder, L. V., Lim, A., & Liu, Z. (2011). Reliable logistics networks design with facility disruptions. *Transportation research part B: methodological*, 45(8), 1190–1211.
- [19] Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M. S., & Mirzapour Al-e-Hashem, S. M. J. (2013). A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty. *OR spectrum*, 35, 905–933.
- [20] Cardona-Valdés, Y., Álvarez, A., & Ozdemir, D. (2011). A bi-objective supply chain design problem with uncertainty. *Transportation research part C: emerging technologies*, 19(5), 821–832.
- [21] Jokar, A., & Sahraeian, R. (2012). A heuristic based approach to solve a capacitated location-routing problem. *Journal of management & sustainability*, 2, 219.
<https://heinonline.org/HOL/LandingPage?handle=hein.journals/jms2&div=44&id=&page=>
- [22] Cui, T., Ouyang, Y., & Shen, Z. J. M. (2010). Reliable facility location design under the risk of disruptions. *Operations research*, 58(4-part-1), 998–1011.
- [23] Escobar, J. W., Linfati, R., & Toth, P. (2013). A two-phase hybrid heuristic algorithm for the capacitated location-routing problem. *Computers & operations research*, 40(1), 70–79.
- [24] Ghaffari-Nasab, N., Jabalameli, M. S., Aryanezhad, M. B., & Makui, A. (2013). Modeling and solving the bi-objective capacitated location-routing problem with probabilistic travel times. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 67, 2007–2019.
- [25] Golozari, F., Jafari, A., & Amiri, M. (2013). Application of a hybrid simulated annealing-mutation operator to solve fuzzy capacitated location-routing problem. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 67, 1791–1807.
- [26] Zarandi, M. H. F., Hemmati, A., Davari, S., & Turksen, I. B. (2013). Capacitated location-routing problem with time windows under uncertainty. *Knowledge-based systems*, 37, 480–489.
- [27] Mehrjerdi, Y. Z., & Nadizadeh, A. (2013). Using greedy clustering method to solve capacitated location-routing problem with fuzzy demands. *European journal of operational research*, 229(1), 75–84.
- [28] Ahmadi-Javid, A., & Seddighi, A. H. (2013). A location-routing problem with disruption risk. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 53, 63–82.
- [29] Gounaris, C. E., Wiesemann, W., & Floudas, C. A. (2013). The robust capacitated vehicle routing problem under demand uncertainty. *Operations research*, 61(3), 677–693.
- [30] Azad, N., Davoudpour, H., Saharidis, G. K. D., & Shiripour, M. (2014). A new model to mitigating random disruption risks of facility and transportation in supply chain network design. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 70, 1757–1774.
- [31] Rennemo, S. J., Rø, K. F., Hvattum, L. M., & Tirado, G. (2014). A three-stage stochastic facility routing model for disaster response planning. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 62, 116–135.
- [32] An, Y., Zeng, B., Zhang, Y., & Zhao, L. (2014). Reliable p-median facility location problem: two-stage robust models and algorithms. *Transportation research part B: methodological*, 64, 54–72.
- [33] Karaoglan, I., & Altıparmak, F. (2015). A memetic algorithm for the capacitated location-routing problem with mixed backhauls. *Computers & operations research*, 55, 200–216.
- [34] Peng, Z., Manier, H., & Manier, M. A. (2017). Particle swarm optimization for capacitated location-routing problem. *IFAC-papersonline*, 50(1), 14668–14673.
- [35] Huang, S. H. (2015). Solving the multi-compartment capacitated location routing problem with pickup--delivery routes and stochastic demands. *Computers & industrial engineering*, 87, 104–113.



- [36] Zhang, Y., Qi, M., Lin, W. H., & Miao, L. (2015). A metaheuristic approach to the reliable location routing problem under disruptions. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 83, 90–110.
- [37] Lopes, R. B., Ferreira, C., & Santos, B. S. (2016). A simple and effective evolutionary algorithm for the capacitated location-routing problem. *Computers & operations research*, 70, 155–162.
- [38] Tang, L., Zhu, C., Lin, Z., Shi, J., & Zhang, W. (2016). Reliable facility location problem with facility protection. *PloS one*, 11(9), e0161532. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161532>
- [39] de Queiroz, T. A., Oliveira, J. F., Carravilla, M. A., & Miyazawa, F. K. (2016). *Demand uncertainty for the location-routing problem with two-dimensional loading constraints* [presentation]. Computational management science: state of the art 2014 (pp. 47–53).
- [40] Quintero-Araujo, C. L., Caballero-Villalobos, J. P., Juan, A. A., & Montoya-Torres, J. R. (2017). A biased-randomized metaheuristic for the capacitated location routing problem. *International transactions in operational research*, 24(5), 1079–1098.
- [41] Sadegheih, A. (2017). A hybrid heuristic algorithm to solve capacitated location-routing problem with fuzzy demands. *International journal of industrial mathematics*, 9(1), 1–20.
- [42] Chang, K., Zhou, H., Chen, G., & Chen, H. (2017). Multiobjective location routing problem considering uncertain data after disasters. *Discrete dynamics in nature and society*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1703608>
- [43] Farham, M. S., Süral, H., & Iyigun, C. (2018). A column generation approach for the location-routing problem with time windows. *Computers & operations research*, 90, 249–263.
- [44] Madani, S. R., Nookabadi, A. S., & Hejazi, S. R. (2018). A bi-objective, reliable single allocation p-hub maximal covering location problem: Mathematical formulation and solution approach. *Journal of air transport management*, 68, 118–136.
- [45] Zhang, B., Li, H., Li, S., & Peng, J. (2018). Sustainable multi-depot emergency facilities location-routing problem with uncertain information. *Applied mathematics and computation*, 333, 506–520.
- [46] Ghaderi, A. (2018). A robust optimization model for the single-depot capacitated location-routing problem. *International journal of computer and information engineering*, 12(7), 504–508.
- [47] Zhao, Q., Wang, W., & De Souza, R. (2018). A heterogeneous fleet two-echelon capacitated location-routing model for joint delivery arising in city logistics. *International journal of production research*, 56(15), 5062–5080.
- [48] Hosseini, M. B., Dehghanian, F., & Salari, M. (2019). Selective capacitated location-routing problem with incentive-dependent returns in designing used products collection network. *European journal of operational research*, 272(2), 655–673.
- [49] Pekel, E., & Kara, S. S. (2019). Solving fuzzy capacitated location routing problem using hybrid variable neighborhood search and evolutionary local search. *Applied soft computing*, 83, 105665. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105665>
- [50] Tirkolaee, E. B., Mahmoodkhani, J., Bourani, M. R., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). A self-learning particle swarm optimization for robust multi-echelon capacitated location-allocation-inventory problem. *Journal of advanced manufacturing systems*, 18(04), 677–694.
- [51] Oudouar, F., Lazaar, M., & El Miloud, Z. (2020). A novel approach based on heuristics and a neural network to solve a capacitated location routing problem. *Simulation modelling practice and theory*, 100, 102064. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.102064>.
- [52] Zhang, H., Liu, F., Ma, L., & Zhang, Z. (2020). A hybrid heuristic based on a particle swarm algorithm to solve the capacitated location-routing problem with fuzzy demands. *IEEE access*, 8, 153671–153691.
- [53] Wang, M., Bell, M. G. H., & Miao, L. (2020). *A branch-and-price algorithm for a green two-echelon capacitated location routing problem*. <https://ses.library.usyd.edu.au/handle/2123/21882>
- [54] Akpunar, Ö. S., & Akpinar, S. (2021). A hybrid adaptive large neighbourhood search algorithm for the capacitated location routing problem. *Expert systems with applications*, 168, 114304. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114304>.
- [55] Negrotto, D., & Loiseau, I. (2021). A branch & cut algorithm for the prize-collecting capacitated location routing problem. *Top*, 29(1), 34–57.
- [56] Vincent, F. Y., Normasari, N. M. E., & Chen, W. H. (2021). Location-routing problem with time-dependent demands. *Computers & industrial engineering*, 151, 106936. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106936>.
- [57] Ziaei, Z., & Jabbarzadeh, A. (2021). A multi-objective robust optimization approach for green location-routing planning of multi-modal transportation systems under uncertainty. *Journal of cleaner production*, 291, 125293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125293>.
- [58] Turkensteen, M. (2017). The accuracy of carbon emission and fuel consumption computations in green vehicle routing. *European journal of operational research*, 262(2), 647–659.
- [59] Chen, D. S., Batson, R. G., & Dang, Y. (2011). *Applied integer programming: modeling and solution*. John Wiley & Sons.
- [60] Mulvey, J. M., & Ruszczyński, A. (1995). A new scenario decomposition method for large-scale stochastic optimization. *Operations research*, 43(3), 477–490.
- [61] Pan, F., & Nagi, R. (2010). Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing. *Computers & operations research*, 37(4), 668–683.
- [62] Yu, C. S., & Li, H. L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International journal of production economics*, 64(1–3), 385–397.
- [63] Haimes, Y. (1971). On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (3), 296–297.

- [64] Fan, J., & Wang, G. (2018). Joint optimization of dynamic lot and warehouse sizing problems. *European journal of operational research*, 267(3), 849–854.
- [65] Cao, E., Lai, M., & Yang, H. (2014). Open vehicle routing problem with demand uncertainty and its robust strategies. *Expert systems with applications*, 41(7), 3569–3575.
- [66] Ruiz, E., Soto-Mendoza, V., Barbosa, A. E. R., & Reyes, R. (2019). Solving the open vehicle routing problem with capacity and distance constraints with a biased random key genetic algorithm. *Computers & industrial engineering*, 133, 207–219.
- [67] Shiripour, S., Mahdavi-Amiri, N., & Mahdavi, I. (2017). A transportation network model with intelligent probabilistic travel times and two hybrid algorithms. *Transportation letters*, 9(2), 90–122.
- [68] Fazayeli, S., Eydi, A., & Kamalabadi, I. N. (2018). Location-routing problem in multimodal transportation network with time windows and fuzzy demands: Presenting a two-part genetic algorithm. *Computers & industrial engineering*, 119, 233–246.
- [69] Cardoso, S. R., Barbosa-Póvoa, A. P. F. D., & Relvas, S. (2013). Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty. *European journal of operational research*, 226(3), 436–451.
- [70] Université Paris-Nord. (2010). *Classical instances for LRP*. http://prodhonc.free.fr/Instances/instances_us.htm

