مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی مسئله‌ی مکان‌یابی – مسیریابی زنجیره تأمین چهار سطحی در شرایط اختلال

بهناز لله آهی‌زاده [1*]
دانشگاه آزاد تهران شمال

محسن صادق عمل نیک [2]
دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۴

چکیده

هدف این پژوهش طراحی و بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمینی تحت شرایط اختلال با در نظر گرفتن مسئله مکان‌یابی- مسیریابی است. بدین منظور یک شبکه چهار سطحی شامل سطوح تأمین، تولید، توزیع و مشتری را در نظر گرفته که ماده خام از تأمین‌کنندگان خریداری به تولیدکنندگان ارسال می‌گردد؛ محصولات توسط تولیدکنندگان تولید، به مراکز توزیع ارسال می‌شوند تا با مسیریابی بهینه به مشتریان تحویل داده شوند. اختلال در شبکه گاهی از سوی مشتریان یا تأمین‌کنندگان یا هردو است که منجر به تغییر در تقاضا یا ظرفیت می‌شود. در انتها مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی فرموله و ارتباط بین اجزای زنجیره و تعداد تسهیلات بررسی شد. بدین منظور از یک رویکرد سناریو محور برای کنترل اختلال استفاده و در ۳ سناریو شرایط بررسی شد، با این سناریوها کمترین میزان اختلال شناسایی شدند. همچنین با استفاده از این مدل می‌توان مکان بالقوه برای مراکز تولید و توزیع را مشخص و مسیر بهینه ارتباط گرفتن با مراکز تأمین و تولید و توزیع، مشتری را معین کرد. مدل با استفاده از مسئله‌ای که توسط الگوریتم شبیه‌سازی طراحی، در نرم‌افزار گمز اجرا و با سناریوهای کاهش و افزایش تقاضا تحلیل حساسیت شد. نتایج حاصل، مؤید کارایی مدل پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی: طراحی زنجیره تأمین، مسئله مکان‌یابی- مسیریابی، اختلال در زنجیره تأمین، مدل برنامه‌ریزی ریاضی

۱- مقدمه

اهمیت تغییرات عمده در محیط کسب‌وکار و همچنین بازار رقابتی کنونی مانند تقاضای موردنیاز مشتریان و ظرفیت تأمین‌کنندگان منجر به ایجاد موضوع طراحی شبکه زنجیره تأمین‌شده[3] است. همچنین تغییرات عواملی مانند افزایش تنوع محصولات و خدمات، عملکرد تأمین‌کنندگان، افزایش پیچیدگی‌ها در زنجیره تأمین را به دنبال دارند که این پیچیدگی‌ها ریسک در طراحی زنجیره تأمین را افزایش می‌دهند. از سوی دیگر مفهوم اختلال[4] نیز یک نوعی از ریسک است. یک اختلال ناچیز در یک واحد می‌تواند آثار زیانباری را در کل زنجیره به وجود آورد[۴]. در مدل این پژوهش زنجیره تأمینی با چهار سطح در نظر گرفته‌شده است که این سطوح شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان،

۱*- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، نویسنده پاسخگو، پست الکترونیک: behnaz_lelahi@yhoo.com نشانی: تهران، بزرگراه شهید بابایی، خروجی حکیمیه، بلوار شهید عباسپور، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال
۲- استاد، گروه مهندسی صنایع دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه تهران، پست الکترونیک: amalnick@ut.ac.ir

3- Network design supply chain
4-Disruption

توزیع‌کنندگان و مشتریان است؛ که در این تحقیق مسئله‌ی مکان‌یابی و مسیریابی همزمان در نظر گرفته‌شده است. در مسئله‌ی مکان‌یابی- مسیریابی[1] هدف پیدا کردن مکان و تعداد مناسب تسهیلات می‌باشد[۱]. در این پژوهش مکان‌های مشتریان و تأمین‌کنندگان از پیش تعیین و مکان‌های بالقوه برای احداث مکان‌های تولید و توزیع توسط مدل مکان‌یابی می‌شوند. مسئله‌ی موردنظر به دنبال به حداقل رساندن کل هزینه‌های شبکه در حالت وقوع اختلال که این اختلال در شبکه‌ی مدل پیشنهادی در ظرفیت تأمین‌کنندگان و تقاضای مشتریان روی می‌دهد. عواملی که باعث افزایش اختلالات در زنجیره شده‌اند، بسیار پرهزینه هستند و تأثیرات آن‌ها بسیار زیان‌بار است، ممکن است گاهی تا مدت‌های طولانی روی زنجیره اثرگذار باشند؛ بنابراین لازم است بدانیم که چگونه یک اختلال بر روی زنجیره اثر می‌گذارد تا استراتژی مناسب را برای مقابله با این اثرات اتخاذ کنیم که در تحقیق حاضر رویکرد سناریو[2]محور استفاده‌شده است. هدف از این پژوهش طراحی زنجیره تأمین چهار سطحی‌ای است که بحث مکان‌یابی و مسیریابی در آن گنجانده و اختلال نیز به‌صورت سناریوهای مختلف در نظر گرفته‌شده است و تعداد تسهیلات و اجزای زنجیره و ارتباط بین آن‌ها نیز تعیین گردید.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

اخیراً طراحی شبکه زنجیره تأمین به‌عنوان یک حوزه مهم در صنعت مطرح‌شده است. به‌طورکلی مسئله طراحی زنجیره تأمین در حوزه تصمیم‌گیری استراتژیک[3] در مدیریت زنجیره تأمین قرار می‌گیرد[۵]. طراحی شبکه زنجیره تأمین شامل تصمیمات استراتژیک است. دو سطوح تصمیم‌گیری دیگر زنجیره تأمین که برنامه‌ریزی تاکتیکی و عملیاتی[4] می‌باشد، در این مقاله بررسی‌شده است. حال به بررسی طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن مسئله‌ی وسایط نقلیه و مکان‌یابی تسهیلات در شرایط اختلال پرداخته‌شده است. دنتزیگ و رامسر برای اولین بار مسئله مسیریابی را در قالب یک مسئله در حوزه حمل‌ونقل، توزیع و تدارکات مطرح کردند. توکلی مقدم و همکاران(۱۳۹۰) مسئله‌ی مسیریابی باهدف حداقل کردن هزینه وسایط نقلیه ناهمگن و حداکثر استفاده از ظرفیت وسایل نقلیه را بررسی کردند[۲]. در ادامه قنادپور و همکاران (۲۰۱۴) یک مسئله‌ی مسیریابی چند هدفی چند سطحی[5] با در نظر گرفتن اختلال در تقاضای مشتری‌ها را ارائه دادند که در آن تعداد وسایل نقلیه را حداقل و همچنین سطح رضایت مشتری‌ها را حداکثر کردند [۶].

مقالاتی که اختلالات در مکان‌یابی را در نظر گرفته نیز در ادامه موردبررسی قرارگرفته است، در پژوهش جبارزاده و همکاران یک مسئله طراحی زنجیره تأمین سه سطحی تحت ریسک اختلالات در تسهیلات را موردمطالعه قرار داده‌اند. هدف مسئله ماکسیمم کردن سود بود و از روش آزادسازی لاگرانژ[6] استفاده کردند[۷]. ساویک (۲۰۱۵) یک مسئله تصمیم‌گیری سه سطحی چند دوره‌ای را با توجه به دو تابع هدف متضاد: هزینه و سطح سرویس‌دهی مشتریان را در حضور اختلالات زنجیره تأمین ارائه دادند و مسئله بهینه‌سازی به‌وسیله برنامه عدد صحیح مختلط فرموله می‌شود، مزیت این مدل در نظر گرفتن سناریوها برای لحاظ اختلالات می‌باشد [۸]. ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) یک مسئله مکان‌یابی– مسیریابی سه سطحی شامل سطوح تأمین، تولید و مشتری در شرایط اطمینان که ظرفیت در آن انبارها دچار اختلال می‌شوند را بررسی کردند. آن‌ها یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مبتنی بر سناریو برای پشتیبانی از انبارهای مختل شده ارائه کردند[۹]. جبارزاده و همکاران (۲۰۱۶) یک زنجیره تأمین ۳ سطحی که سطوح آن شامل تأمین‌کننده و تولیدکننده و مشتری است را تحت اختلال تقاضا و ظرفیت برای مسئله‌ی مکان‌یابی– مسیریابی موردبررسی قراردادند و از رویکرد

1-Location routing problem (LRP)
2-Scenario
3-Strategic
4-Tactical & Operational

5-Multi echelon
6-Lagrange

سناریو محور برای در نظر گرفتن اختلالات استفاده کردند. کومارپائول و همکاران (۲۰۱۷) یک زنجیره تأمین سه سطحی، با تولیدکننده، مراکز توزیع و خرده‌فروشان، در نظر گرفته و یک رویکرد برنامه‌ریزی پیش‌بینی برای مدیریت تغییرات تقاضا ارائه کردند. آن‌ها یک مدل کمی برای به حداقل رساندن هزینه کل زنجیره تأمین مطرح کردند[۱۰].

همچنین فرناز جوادی و همکاران (۱۳۹۸) یک مدل زنجیره تأمین چهار سطحی شامل سطوح تأمین‌کننده و تولید کنده و توزیع‌کننده و مشتری تحت شرایط اختلال در نظر گرفتند و مدل پیشنهادی خود را با رویکرد مبتنی بر سناریو بررسی کردند و کل هزینه‌های زنجیره را به حداقل رساندند[۳].

جدول (۱) مروری بر پیشینه‌ی پژوهش

نویسنده	روش مورداستفاده	معیارهای تحقیق											
		سطح تصمیم			چند دوره‌ای	متغیرهای در حالت اختلال				چند محصولی	مکان یابی	مسیریابی	تعداد سطوح زنجیره
		استراتژیک	تاکتیکی	عملیاتی		عرضه	تقاضا	ظرفیت	تسهیلات				
جبارزاده و همکاران (۲۰۱۲)	آزادسازی لاگرانژ	✓	✓						✓		✓		۳
آزاد و داوود پور (۲۰۱۳)	الگوریتم جستجوی ممنوعه	✓		✓					✓		✓	✓	۲
مددی و همکاران (۲۰۱۴)	الگوریتم جستجوی ممنوعه	✓	✓	✓		✓	✓					✓	۱
ژانگ و همکاران (۲۰۱۵)	رویکرد سناریو محور	✓	✓						✓	✓	✓	✓	۳
ساویک (۲۰۱۵)	رویکرد سناریو محور	✓			✓	✓	✓				✓		۳
ثریا نیک‌سیرت (۲۰۱۶)	رویکرد سناریو محور	✓		✓	✓		✓	✓		✓	✓		۳
جبارزاده و همکاران (۲۰۱۶)	رویکرد سناریو محور	✓	✓				✓	✓			✓	✓	۲
کومارپائول و همکاران (۲۰۱۷)	روش هیوریستیک و مقایسه با Lingo	✓	✓		✓		✓						۲

ادامه جدول (۱) مروری بر پیشینه‌ی پژوهش

نویسنده	روش مورداستفاده	معیارهای تحقیق										
		سطح تصمیم			چند دوره‌ای	متغیرهای در حالت اختلال				چند محصولی	مکان‌یابی	مسیریابی	تعداد سطوح زنجیره
		استراتژیک	تاکتیکی	عملیاتی		عرضه	تقاضا	ظرفیت	تسهیلات				
یو و همکاران (۲۰۱۸)	بهینه‌سازی استوار			✓			✓					✓	۲
بن محمد و همکاران (۲۰۱۹)	رویکرد سناریو محور تصادفی + روش تجزیه بندرز	✓		✓	✓		✓				✓	✓	۲
پژوهش حاضر	رویکرد سناریو محور	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	۴

با بررسی مطالعات بیان‌شده در ادبیات، مشخص می‌شود که در بیشتر مطالعات انجام‌شده در پیرامون این موضوع، توجه کمتری به استفاده از رویکرد سناریو محور در رابطه با زنجیره تأمین چهار سطحی شده است. همچنین در رابطه با موضوع پژوهش جایگاه مربوط به حمل‌ونقل و مکان‌یابی تسهیلات بسیار کمرنگ است که در این تحقیق در شرایط اختلال گنجانده‌شده، این اختلال در تقاضا و ظرفیت رخداده و در ۳سناریو بررسی‌شده است و مدل پیشنهادی بهترین سناریو را در حالت اختلال نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از آن اختلال در ظرفیت و تقاضا در زنجیره تأمین چهار سطحی را کاهش داد و بهترین مکان برای مراکز تولید و توزیع در نظر می‌گیرد و مسیر مناسب برای توزیع محصول را نشان می‌دهد. جدول ۱ مروری از تحقیقات انجام‌شده در این زمینه است.

۳- بیان مسئله

پس از ارائه مقدمه و پیشینه تحقیق ابتدا مسئله پیشنهادی تشریح، سپس فرضیات، پارامترها و متغیرهای تصمیم تعریف شد. در ادامه به ارائه مدل طراحی مسئله‌ی مکان‌یابی– مسیریابی در یک زنجیره تأمین چهار سطحی[1] در شرایط اختلال پرداخته شد. در این مقاله با زنجیره تأمینی چهار سطحی شامل سطوح تأمین، تولید، توزیع و مشتری روبه‌رو هستیم که در آن مواد اولیه از تأمین‌کنندگان خریداری و به مراکز تولید راه‌اندازی شده ارسال می‌گردد تا محصولات موردنظر از ترکیب مواد اولیه تولید گردند. سپس محصولات تولیدشده به مراکز توزیع راه‌اندازی شده ارسال می‌شوند تا از طریق مسیریابی وسایط نقلیه ناهمگن به مشتریان تحویل گردند. در مدل پیشنهادی کمینه کردن کل هزینه‌های زنجیره مدنظر است و در سطح استراتژیک و تاکتیکی و عملیاتی موردبررسی قرارگرفته است، این روش برای تصمیم‌گیرندگان نسبت به روش‌های دیگر مؤثر و کارآمدتر است.

1-Four echelon

مفروضات:

• این زنجیره تأمین چندمحصولی و چند دوره‌ای در نظر گرفته‌شده است.

• محل‌های مشتریان و تأمین‌کنندگان از پیش مشخص بوده، اما مکان‌یابی مراکز تولید و توزیع توسط مدل صورت می‌گیرد.

• تعداد وسایط نقلیه در دسترس مشخص می‌باشد، اما مدل مشخص می‌کند که از کدام وسیله نقلیه استفاده گردد.

• وسایط نقلیه به‌صورت ناهمگن هستند و این ناهمگنی مربوط به قیمت خرید وسیله نقلیه، ظرفیت و میزان مصرف سوخت آن بستگی دارد.

• وسایط نقلیه، تأمین‌کنندگان و مراکز به‌صورت ظرفیت دار در نظر گرفته‌شده‌اند.

• مسئله مسیریابی وسایط نقلیه بین سطوح توزیع و مشتریان و چند انباره[1] می‌باشد.

• فواصل بین مشتریان و مراکز توزیع تا مشتریان مشخص و قطعی است.

مدل‌سازی مسئله

مجموعه‌ی اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم برای مدل‌سازی مسئله عبارتند از :

r : مجموعه‌ی مواد خام $1 \le r \le R$

p : مجموعه‌ی محصولات $1 \le p \le P$

s : مجموعه‌ی تأمین‌کنندگان $1 \le s \le S$

m : مجموعه‌ی تولیدکنندگان $1 \le m \le M$

d :مجموعه مراکز تولید $1 \le d \le D$

c, c' : مجموعه‌ی مشتریان $1 \le c \le C$

v : مجموعه‌ی وسایل نقلیه $1 \le v \le V$

t : دوره زمانی $1 \le t \le T$

پارامترها

μ_{rst}^{SUP} : حداکثر ظرفیت تأمین‌کننده s جهت تأمین ماده خام نوع r در دوره زمانی t

μ_{pd}^{DST} : حداکثر ظرفیت مرکز توزیع d

μ_{pm}^{MNF} : حداکثر ظرفیت مرکز تولید m

μ_{v}^{VH}: حداکثر ظرفیت وسیله نقلیه v

μ_{pct} : تقاضای مشتری c از محصول p در دوره زمانی t

$\alpha_{c'c}$: فاصله‌ی مشتری c از مشتری

α'_{dc}: فاصله‌ی مشتری c از مرکز توزیع d

δ_{st}^{SUP}: هزینه ثابت سفارش دهی به تأمین‌کننده s در دوره زمانی t

δ_{d}^{DST}: هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز توزیع d

δ_{m}^{MNF}: هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز تولید m

δ_{v}^{VH}: هزینه خرید وسیله نقلیه v

ϕ_{rsmt}: هزینه حمل‌ونقل هر واحد ماده خام r از تأمین‌کننده s به تولیدکننده m در دوره زمانی t

ϕ'_{pmdt}: هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول p از تولیدکننده m به توزیع‌کننده d در دوره زمانی t

PS_{rst}: قیمت خرید هر واحد ماده خام r از تأمین‌کننده s در دوره زمانی t

PM_{pmt}: هزینه تولید هر واحد محصول p در مرکز تولید m در دوره زمانی t

PD_{pdt}: هزینه پردازش هر واحد محصول p در مرکز توزیع d در دوره زمانی t

η_{rp}: میزان ماده خام r موردنیاز به‌منظور تولید هر واحد محصول p

ϖ_p: حجم محصول p

β_v: میزان مصرف سوخت در واحد مسافت توسط وسیله نقلیه v

PT: قیمت سوخت

$M \simeq \infty$: عدد بسیار بزرگ

2- Multi depot

متغیرهای تصمیم

$\theta_{rst}^{SUP}\begin{cases}1\\0\end{cases}$: اگر ماده خام r از تأمین‌کننده s در دوره t خریداری گردد (۱) در غیر این صورت (۰)

$\theta_{d}^{DST}\begin{cases}1\\0\end{cases}$: اگر مرکز توزیع d راه‌اندازی شود (۱) در غیر این صورت (۰)

$\theta_{m}^{MNF}\begin{cases}1\\0\end{cases}$: اگر مرکز تولید m راه‌اندازی شود (۱) در غیر این صورت (۰)

$\theta_{v}^{VH}\begin{cases}1\\0\end{cases}$: اگر وسیله نقلیه v خریداری شود (۱) در غیر این صورت (۰)

$\theta_{vd}\begin{cases}1\\0\end{cases}$: اگر وسیله نقلیه v به مرکز توزیع d تخصیص داده شود (۱) در غیر این صورت (۰)

$\sigma_{vc'ct}\begin{cases}1\\0\end{cases}$: اگر وسیله نقلیه v مسیری بین مشتری و مشتری c را در دوره زمانی t بپیماید (۱) در غیر این صورت (۰)

ψ_{pvct}: میزان محصول p موجود در وسیله نقلیه v بعد از سرویس‌دهی به مشتری c در دوره زمانی t

ξ_{pvdct}: میزان محصول p تحویلی به مشتری c توسط وسیله نقلیه v متعلق به مرکز توزیع d در دوره زمانی t

X_{rsmt}: میزان ماده خام r خریداری‌شده از تأمین‌کننده s توسط مرکز تولید m در دوره زمانی t

Y_{pmdt}: میزان محصول p ارسالی از تولیدکننده m به مرکز توزیع d در دوره زمانی t

تابع هدف:

مدل ریاضی

$$Min\ Z=\sum_{r,s,t}\delta_{st}^{SUP}\times\theta_{rst}^{SUP}+\sum_{d}\delta_{d}^{DST}\times\theta_{d}^{DST}+\sum_{m}\delta_{m}^{MNF}\times\theta_{m}^{MNF}+$$
$$\sum_{v}\delta_{v}^{VH}\times\theta_{v}^{VH}+\sum_{r,s,m,t}\phi_{rsmt}\times X_{rsmt}+\sum_{p,m,d,t}\phi'_{pmdt}\times Y_{pmdt}+\sum_{r,s,m,t}PS_{rst}\times X_{rsmt}+$$
$$\sum_{p,m,d,t}PM_{pmt}\times Y_{pmdt}+\sum_{p,v,d,c,t}PD_{pdt}\times\xi_{pvdct}+$$
$$PT\times(\sum_{v,c'>1,c>1,t}\beta_{v}\times\sigma_{vc'ct}\times\alpha_{c'c}+\sum_{v,d,c>1,t}\beta_{v}\times(\sigma_{v1ct}+\sigma_{vc1t})\times\alpha'_{dc}\times\theta_{vd})$$

محدودیت‌ها

(۱)
$$\sum_{m}X_{rsmt}\le\mu_{rst}^{SUP}\times\theta_{rst}^{SUP}\qquad\forall r,s,t$$

(۲)
$$\sum_{d}Y_{pmdt}\le\mu_{pm}^{MNF}\times\theta_{m}^{MNF}\qquad\forall p,m,t$$

(۳)
$$\sum_{v,c}\xi_{pvdct}\le\mu_{pd}^{DST}\times\theta_{d}^{DST}\qquad\forall p,d,t$$

(۴)
$$\sum_{p,c}\xi_{pvdct}\times\varpi_{p}\le\mu_{v}^{VH}\times\theta_{v}^{VH}\qquad\forall v,d,t$$

(۵)
$$\frac{\sum_{s}X_{rsmt}}{\eta_{rp}}\ge\sum_{d}Y_{pmdt}\qquad\forall r,p,m,t$$

(۶)
$$\sum_{m}Y_{pmdt}\ge\sum_{v,c}\xi_{pvdct}\qquad\forall p,d,t$$

(۷)
$$\sum_{v,d}\xi_{pvdct}\ge\mu_{pct}\qquad\forall p,c,t$$

(۸)
$$\sum_{p,d,c}\xi_{pvdct}\le M\times\sum_{d}\theta_{vd}\qquad\forall v,t$$

(۹)
$$\sum_{d}\theta_{vd}\le1\qquad\forall v$$

(۱۰)
$$\sum_{c'}\sigma_{vc'ct}\le1\qquad\forall v,c,t$$

(۱۱)
$$\sum_{c'}\sigma_{vc'ct}=\sum_{c'}\sigma_{vcc't}\qquad\forall v,c,t$$

(۱۲)
$$\psi_{pvc't}+M\times(1-\sigma_{vc'ct})\ge(\psi_{pvct}+\xi_{pvdct})\qquad\forall p,v,d,c',c>1,t$$

(۱۳)
$$\psi_{pvct}\ge\sum_{c}\xi_{pvdct}\qquad\forall p,v,d,c=1,t$$

(۱۴)
$$\xi_{pvdct}\le M\times\sum_{c'}\sigma_{vcc't}\qquad\forall p,v,d,c,t$$

(۱۵)
$$\xi_{pvdct} \le M \times \theta_v^{VH} \qquad \forall p,v,d,c,t$$

(۱۶)
$$\sum_v \theta_{vd} \le M \times \theta_d^{DST} \qquad \forall d$$

(۱۷)
$$X_{rsmt} \le M \times \theta_{rst}^{SUP} \qquad \forall r,s,m,t$$

(۱۸)
$$X_{rsmt} \le M \times \theta_m^{MNF} \qquad \forall r,s,m,t$$

(۱۹)
$$Y_{pmdt} \le M \times \theta_m^{MNF} \qquad \forall p,m,d,t$$

(۲۰)
$$Y_{pmdt} \le M \times \theta_d^{DST} \qquad \forall p,m,d,t$$

(۲۱)
$$\xi_{pvdct} \le M \times \theta_d^{DST} \qquad \forall p,v,d,c,t$$

تابع هدف: به کمینه‌سازی هزینه‌ها می‌پردازد. این هزینه‌ها عبارتند از: هزینه ثابت سفارش دهی به تأمین‌کنندگان، هزینه راه‌اندازی مراکز توزیع، هزینه راه‌اندازی مراکز تولید، هزینه خرید وسایط نقلیه، هزینه حمل‌ونقل مواد خام از تأمین‌کنندگان به مراکز تولید، هزینه حمل‌ونقل محصولات از مراکز تولید به مراکز توزیع، هزینه خرید مواد خام از تأمین‌کنندگان، هزینه تولید محصولات در مراکز تولید، هزینه پردازش محصولات در مراکز توزیع و هزینه مصرف سوخت توسط وسایط نقلیه.

محدودیت (۱) و (۲) مربوط به عدم تجاوز از ظرفیت تأمین‌کننده و ظرفیت تولیدکننده است. این محدودیت به ازای هر ماده خام و محصول، هر تأمین‌کننده و مرکز تولید در هر دوره زمانی برقرار است. محدودیت (۳) مربوط به عدم تجاوز از ظرفیت توزیع‌کننده است. محدودیت (۴) مربوط به ظرفیت وسایط نقلیه است. بالانس موجودی در مراکز تولید و توزیع در محدودیت (۵) و (۶) آورده شده است. محدودیت (۷) نشان‌دهنده محدودیت ارضای تقاضا است. یکی از شروط تحویل محصولات به مشتریان آن است که وسیله نقلیه خریداری‌شده و به یک مرکز توزیع تخصیص داده شود؛ این مهم در محدودیت (۸) نشان داده‌شده است. در محدودیت (۹) نشان داده‌شده در صورت خریداری شدن وسیله نقلیه، آن وسیله باید دقیقاً به یک مرکز توزیع تخصیص داده شود. هر وسیله نقلیه هر مشتری را در هر دوره زمانی حداکثر یکبار ویزیت خواهد کرد. اما این امکان وجود دارد که یک مشتری در هر دوره زمانی توسط چند وسیله نقلیه ویزیت شود؛ محدودیت (۱۰) تضمین‌کننده این فرض است. این امکان وجود دارد که بخشی از تقاضای یک مشتری توسط یک وسیله نقلیه و بخشی دیگر توسط وسایط نقلیه دیگر تأمین گردد. در محدودیت (۱۱) این مهم آورده شده است. محدودیت حذف زیرتور و تعیین توالی بازدید از مشتریان در محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳) آورده شده است. در محدودیت‌های (۱۴) و (۱۵) مشتری باید ویزیت شود و وسیله نقلیه خریداری‌شده باشد. شرط تخصیص وسیله نقلیه به مرکز توزیع آن است که مرکز توزیع راه‌اندازی شده باشد. این شرط توسط محدودیت (۱۶) ارضا خواهد شد. محدودیت (۱۷) شرط خرید از تأمین‌کننده آن است که با آن ارتباط گرفته شود. شرط ورود ماده خام به مراکز تولید و خارج شدن محصول از آن این است که مرکز تولید راه‌اندازی شده باشد که این شروط در محدودیت (۱۸) و (۱۹) در نظر گرفته‌شده است. درنهایت، شرط ورود و خروج محصول به مراکز توزیع نیز آن است که مراکز توزیع راه‌اندازی شده باشند که این شروط هم در محدودیت‌های (۲۰) و (۲۱) آورده شده است.

فرایند خطی‌سازی عبارات غیرخطی

جهت انجام فرایند خطی‌سازی، متغیر کمکی زیر تعریف و جایگذاری می‌شود:

$$\lambda_{vdc'ct} \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \qquad \text{Binary}$$

(۲۲

$$Min\ Z = \sum_{r,s,t} \delta_{st}^{SUP} \times \theta_{rst}^{SUP} + \sum_{d} \delta_{d}^{DST} \times \theta_{d}^{DST} + \sum_{m} \delta_{m}^{MNF} \times \theta_{m}^{MNF} + \sum_{v} \delta_{v}^{VH} \times \theta_{v}^{VH} + \sum_{r,s,m,t} \phi_{rsmt} \times X_{rsmt} + \sum_{p,m,d,t} \phi'_{pmdt} \times Y_{pmdt} + \sum_{r,s,m,t} PS_{rst} \times X_{rsmt} + \sum_{p,m,d,t} PM_{pmt} \times Y_{pmdt} + \sum_{p,v,d,c,t} PD_{pdt} \times \xi_{pvdct} + PT \times \left(\sum_{v,c'>1,c>1,t} \beta_{v} \times \sigma_{vc'ct} \times \alpha_{c'c} + \sum_{v,d,c>1,t} \beta_{v} \times (\lambda_{vd1ct} + \lambda_{vdc1t}) \times \alpha'_{dc} \right)$$

(۲۳

$$\lambda_{vdc'ct} \le \theta_{vd} + (1 - \sigma_{vcc't}) \times M$$

(۲۴

$$\lambda_{vdc'ct} \le \sigma_{vcc't} + (1 - \theta_{vd}) \times M$$

(۲۵

$$\lambda_{vdc'ct} \ge 1 + (\sigma_{vcc't} + \theta_{vd} - 2) \times M$$

(۲۶

$$\lambda_{vdc'ct} \le (\sigma_{vcc't} + \theta_{vd}) \times M$$

مدل در شرایط اختلال زنجیره

یکی از عواملی که باعث اختلال در زنجیره می‌گردد مربوط به تغییر رفتار تأمین‌کنندگان و مشتریان در هر دوره زمانی است که این تغییر رفتار می‌تواند عامدانه و یا متأثر از رفتار کلی سیستم باشد، این عوامل منجر به اختلال در زنجیره خواهد شد. برای کنترل اختلال در شبکه مدل پیشنهادی، از یک رویکرد سناریو محور استفاده‌شده که در آن ظرفیت تأمین‌کنندگان و تقاضای مشتریان تحت سناریوهای مختلف متفاوت است. برای حل مسئله‌ی مبتنی بر سناریو از روش EVP استفاده‌شده است. در ادامه مجموعه‌ی اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم برای مدل‌سازی مسئله‌ی پیشنهادی آورده شده است.

اندیس‌ها

r مجموعه‌ی مواد خام $1 \le r \le R$

p : مجموعه‌ی محصولات $1 \le p \le P$

s :جموعه‌ی تأمین‌کنندگان $1 \le s \le S$

m : مجموعه‌ی تولیدکنندگان $1 \le m \le M$

d :مجموعه مراکز تولید $1 \le d \le D$

c, c' : مجموعه‌ی مشتریان $1 \le c \le C$

v : مجموعه‌ی وسایل نقلیه $1 \le v \le V$

t : دوره زمانی $1 \le t \le T$

q : سناریو $1 \le q \le Q$

پارامترها

μ_{rstq}^{SUP}: حداکثر ظرفیت تأمین‌کننده s جهت تأمین ماده خام نوع r در دوره زمانی t تحت سناریو q

μ_{pd}^{DST} : حداکثر ظرفیت مرکز توزیع d

μ_{pm}^{MNF} : حداکثر ظرفیت مرکز تولید m

μ_{v}^{VH} : حداکثر ظرفیت وسیله نقلیه v

μ_{pctq} : تقاضای مشتری c از محصول p در دوره زمانی t تحت سناریو q

$\alpha_{c'c}$: فاصله‌ی مشتری c از مشتری

α'_{dc}: فاصله‌ی مشتری c از مرکز توزیع d

δ_{st}^{SUP}: هزینه ثابت سفارش دهی به تأمین‌کننده s در دوره زمانی t

δ_{d}^{DST}: هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز توزیع d

δ_{m}^{MNF}: هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز تولید m

δ_{v}^{VH}: هزینه خرید وسیله نقلیه v

ϕ_{rsmt}: هزینه حمل‌ونقل هر واحد ماده خام r از تأمین‌کننده s به تولیدکننده m در دوره زمانی t

ϕ'_{pmdt}: هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول p از تولیدکننده m به توزیع‌کننده d در دوره زمانی t

PS_{rst}: قیمت خرید هر واحد ماده خام r از تأمین‌کننده s در دوره زمانی t

PM_{pmt}: هزینه تولید هر واحد محصول p در مرکز تولید m در دوره زمانی t

PD_{pdt}: هزینه پردازش هر واحد محصول p در مرکز توزیع d در دوره زمانی t

η_{rp}: میزان ماده خام r موردنیاز به‌منظور تولید هر واحد محصول p

ϖ_p: حجم محصول p

PB_q: احتمال رخداد سناریو q

β_v: میزان مصرف سوخت در واحد مسافت توسط وسیله نقلیه v

PT: قیمت سوخت

$M \sim \infty$: عدد بسیار بزرگ

متغیرها

$\theta_{rstq}^{SUP}\begin{cases}1\\0\end{cases}$: اگر ماده خام r از تأمین‌کننده s تحت سناریو q در دوره t خریداری گردد (۱) در غیر این صورت (۰)

$\theta_{d}^{DST}\begin{cases}1\\0\end{cases}$: اگر مرکز توزیع d راه‌اندازی شود (۱) در غیر این صورت (۰)

$\theta_{m}^{MNF}\begin{cases}1\\0\end{cases}$: اگر مرکز تولید m راه‌اندازی شود (۱) در غیر این صورت (۰)

$\theta_{v}^{VH}\begin{cases}1\\0\end{cases}$: اگر وسیله نقلیه v خریداری شود (۱) در غیر این صورت (۰)

$\theta_{vd}\begin{cases}1\\0\end{cases}$: اگر وسیله نقلیه v به مرکز توزیع d تخصیص داده شود (۱) در غیر این صورت (۰)

$\sigma_{vc'ctq}\begin{cases}1\\0\end{cases}$: اگر وسیله نقلیه v تحت سناریو q مسیری بین مشتری و مشتری c را در دوره زمانی t بپیماید (۱) در غیر این صورت (۰)

ψ_{pvctq}: میزان محصول p موجود در وسیله نقلیه v بعد از سرویس‌دهی به مشتری c در دوره زمانی t تحت سناریو q

ξ_{pvdctq}: میزان محصول p تحویلی به مشتری c توسط وسیله نقلیه v متعلق به مرکز توزیع d در دوره زمانی t تحت سناریو q

X_{rsmtq}: میزان ماده خام r خریداری‌شده از تأمین‌کننده s توسط مرکز تولید m در دوره زمانی t تحت سناریو

Y_{pmdtq}: میزان محصول p ارسالی از تولیدکننده m به مرکز توزیع d در دوره زمانی t تحت سناریو q

مدل تحت شرایط اختلال زنجیره

$$Min\ E[z]=\sum_{v}\delta_{v}^{VH}\times\theta_{v}^{VH}+\sum_{d}\delta_{d}^{DST}\times\theta_{d}^{DST}+\sum_{m}\delta_{m}^{MNF}\times\theta_{m}^{MNF}+$$
$$\sum_{q}PB_{q}\times\left[\sum_{r,s,t}\delta_{st}^{SUP}\times\theta_{rstq}^{SUP}+\sum_{r,s,m,t}\phi_{rsmt}\times X_{rsmtq}+\sum_{p,m,d,t}\phi'_{pmdt}\times Y_{pmdtq}+\right.$$
$$\sum_{r,s,m,t}PS_{rst}\times X_{rsmtq}+\sum_{p,m,d,t}PM_{pmt}\times Y_{pmdtq}+\sum_{p,v,d,c,t}PD_{pdt}\times\xi_{pvdctq}+$$
$$\left.PT\times(\sum_{v,c'>1,c>1,t}\beta_{v}\times\sigma_{vc'ctq}\times\alpha_{c'c}+\sum_{v,d,c>1,t}\beta_{v}\times(\sigma_{v1ctq}+\sigma_{vc1tq})\times\alpha'_{dc}\times\theta_{vd})\right] \quad (۲۷$$

$$\sum_{m}X_{rsmtq}\le\mu_{rstq}^{SUP}\times\theta_{rstq}^{SUP} \qquad \forall r,s,t,q \quad (۲۸$$

$$\sum_{d}Y_{pmdtq}\le\mu_{pm}^{MNF}\times\theta_{m}^{MNF} \qquad \forall p,m,t,q \quad (۲۹$$

$$\sum_{v,c}\xi_{pvdctq}\le\mu_{pd}^{DST}\times\theta_{d}^{DST} \qquad \forall p,d,t,q \quad (۳۰$$

$$\sum_{p,c}\xi_{pvdctq}\times\varpi_{p}\le\mu_{v}^{VH}\times\theta_{v}^{VH} \qquad \forall v,d,t,q \quad (۳۱$$

$$\frac{\sum_{s}X_{rsmtq}}{\eta_{rp}}\ge\sum_{d}Y_{pmdtq} \qquad \forall r,p,m,t,q \quad (۳۲$$

$$\sum_{m}Y_{pmdtq}\ge\sum_{v,c}\xi_{pvdctq} \qquad \forall p,d,t,q \quad (۳۳$$

$$\sum_{v,d}\xi_{pvdctq}\ge\mu_{pctq} \qquad \forall p,c,t,q \quad (۳۴$$

$$\sum_{p,d,c}\xi_{pvdctq}\le M\times\sum_{d}\theta_{vd} \qquad \forall v,t,q \quad (۳۶$$

$$\sum_{p,d,c}\xi_{pvdctq}\le M\times\sum_{d}\theta_{vd} \qquad \forall v,t,q$$

$$\sum_{c'}\sigma_{vc'ctq}\le 1 \qquad \forall v,c,t,q$$

(۳۷

$$\sum_{c'}\sigma_{vc'ctq}=\sum_{c'}\sigma_{vcc'tq} \qquad \forall v,c,t,q$$

(۳۸

$$\psi_{pvc'tq}+M\times(1-\sigma_{vc'ctq})\geq(\psi_{pvctq}+\xi_{pvdctq}) \qquad \forall p,v,d,c',c>1,t,q$$

(۳۹

$$\psi_{pvctq}\geq\sum_{c}\xi_{pvdctq} \qquad \forall p,v,d,c=1,t,q$$

(۴۰

$$\xi_{pvdctq}\leq M\times\sum_{c'}\sigma_{vcc'tq} \qquad \forall p,v,d,c,t,q$$

(۴۱

$$\xi_{pvdctq}\leq M\times\theta_{v}^{VH} \qquad \forall p,v,d,c,t,q$$

(۴۲

$$\sum_{v}\theta_{vd}\leq M\times\theta_{d}^{DST} \qquad \forall d$$

(۴۳

$$X_{rsmtq}\leq M\times\theta_{rstq}^{SUP} \qquad \forall r,s,m,t,q$$

(۴۴

$$X_{rsmtq}\leq M\times\theta_{m}^{MNF} \qquad \forall r,s,m,t,q$$

(۴۵

$$Y_{pmdtq}\leq M\times\theta_{m}^{MNF} \qquad \forall p,m,d,t,q$$

(۴۶

$$Y_{pmdtq}\leq M\times\theta_{d}^{DST} \qquad \forall p,m,d,t,q$$

(۴۷

$$\xi_{pvdctq}\leq M\times\theta_{d}^{DST} \qquad \forall p,v,d,c,t,q$$

در مدل پیشنهادی به‌طور همزمان به مکان‌یابی مراکز و مسیریابی وسایط نقلیه ناهمگن پرداخته شد. همچنین از یک مفهوم مبتنی بر سناریو برای واردکردن اختلال در شبکه بهره گرفته و محدودیت‌ها در شرایط اختلال نشان داده‌شده است.

۴- تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این قسمت به‌منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی و سنجیدن صحت نتایج آن، با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی‌شده، نتایج مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا یک الگوریتم برای شبیه‌سازی داده‌ها توسعه داده شد و سپس مسئله‌ی موردبررسی در نرم‌افزار GAMS اجراشده است. درنهایت مسئله به ازای سناریوهای مختلف، بر اساس پارامتر تقاضا، تحلیل حساسیت شده است.

مثال عددی:

در این بخش به‌منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی، ابعاد مسئله‌ی موردبررسی توسط الگوریتم شبیه‌سازی داده‌ها که ۳ ماده خام، ۳ محصول، ۴ تأمین‌کننده، ۳ مرکز تولید بالقوه، ۴ مرکز توزیع بالقوه، ۵ مشتری، ۴ نوع وسیله نقلیه، ۴ دوره زمانی و ۳ سناریو که وزن آن‌ها برابر و جمع کلی آن‌ها مساوی ۱ است تولید شد و این مسئله با استفاده از نرم‌افزار GAMSو با حل‌کننده Cplex حل گردید. بزرگترین ابعاد مدلی که می‌توان با این شیوه حل نمود همین مسئله است. حل مسئله‌ی موردنظر در ابعاد بزرگ‌تر مشکل، پیچیده است و زمان زیای برای حل مسئله‌ی پیشنهادی در نرم‌افزار GAMS موردنیاز می‌باشد، به همین علت باید از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مناسب بهره گرفته و آن را در نرم‌افزار متلب کد نویسی نمود.

با استفاده از ابعاد تولیدشده توسط الگوریتم ارائه‌شده مقادیر پارامترها تولید شد و این مقادیر، مسائل نمونه هستند. با اجرای مدل به ازای این داده‌ها در نرم‌افزار حل دقیق مقادیر بهینه تابع هدف و متغیرهای تصمیم مشخص گشت که در ادامه آورده شده است.

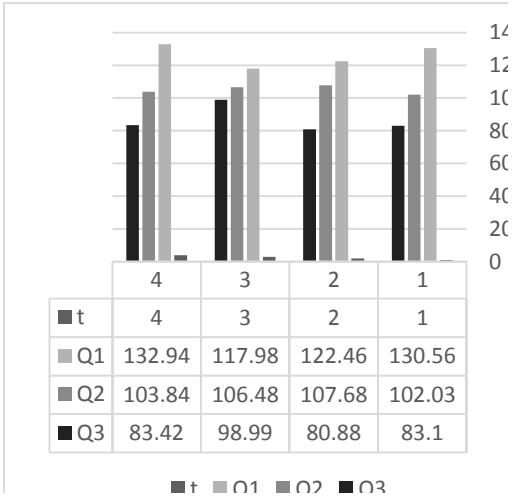
جدول ۲- مقادیر مسئله نمونه در نرم‌افزار GAMS

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
μ_{rstq}^{SUP}	$uniform(110,160)$	δ_{st}^{SUP}	$uniform(3000000,3500000)$
μ_{pd}^{DST}	$uniform(100,180)$	δ_{d}^{DST}	$uniform(150000000,180000000)$
μ_{pm}^{MNF}	$uniform(110,150)$	δ_{m}^{MNF}	$uniform(250000000,280000000)$
μ_{v}^{VH}	$uniform(100,170)$	δ_{v}^{VH}	$uniform(50000000,60000000)$
μ_{pctq}	$uniform(110,120)$	ϕ_{rsmt}	$uniform(500,550)$
$\alpha_{c'c}$	$uniform(0,50)$	ϕ'_{pmdt}	$uniform(400,450)$
α'_{dc}	$uniform(70,100)$	PS_{rst}	$uniform(15000,16000)$
PM_{pmt}	$uniform(2000,2300)$	ϖ_{p}	$uniform(0.8,0.9)$
PD_{pdt}	$uniform(300,400)$	β_{v}	$uniform(0.18,0.22)$
η_{rp}	$uniform(0.9,1.1)$	PT	1000
PB_q	$if \quad q=1 \rightarrow PB_q=0.333$		
	$if \quad q=2 \rightarrow PB_q=0.333$		
	$if \quad q=3 \rightarrow PB_q=0.333$		

مقدار تابع هدف برابر ۶۳۰۴۶۸۶۹۱ واحد پولی گردید، زمان حل مسئله‌ی بررسی‌شده در نرم‌افزار GAMS ۲۴۶۶/۸۴۳ ثانیه است و با هر چهار تأمین‌کننده ارتباط گرفته‌شده است. تنها مرکز توزیع شماره ۴ و مرکز تولید شماره ۳ راه‌اندازی گردیده است. همچنین فقط وسیله نقلیه شماره ۱ خریداری‌شده و به مرکز توزیع ۴ تخصیص داده‌شده است.

در خروجی نرم‌افزار مقادیر بهینه تحویلی به هر مشتری توسط هر وسیله نقلیه مشخص، میزان ماده خام خریداری‌شده از هر تأمین‌کننده، میزان محصول انتقالی از مراکز تولید به مراکز توزیع در هر دوره زمانی به ازای سناریوهای مختلف نمایش و در نمودارهای زیر بخشی از مقادیر آن‌ها نشان داده‌شده است.

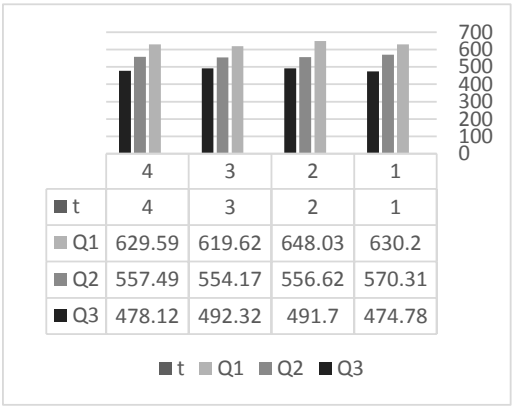
در نمودار ۱ محصول شماره ۱ توسط وسیله نقلیه ۱ که به مرکز توزیع ۴ تخصیص داده شده است به مشتری شماره ۱ در دوره زمانی (t) اول تا چهارم تحت سناریوهای اول (Q1)، دوم (Q2) و سوم (Q3) نشان داده شده، تحویل داده است. همان‌طور که در نمودار ۱، ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، مقادیر سناریوها از بالا به پایین کاهش‌یافته و بدبینانه‌ترین حالت در سناریو ۳ نمایش داده‌شده است.



	4	3	2	1
t	4	3	2	1
Q1	132.94	117.98	122.46	130.56
Q2	103.84	106.48	107.68	102.03
Q3	83.42	98.99	80.88	83.1

نمودار ۱- میزان محصول تحویلی به مشتریان توسط وسایط نقلیه در هر دوره زمانی تحت هر سناریو

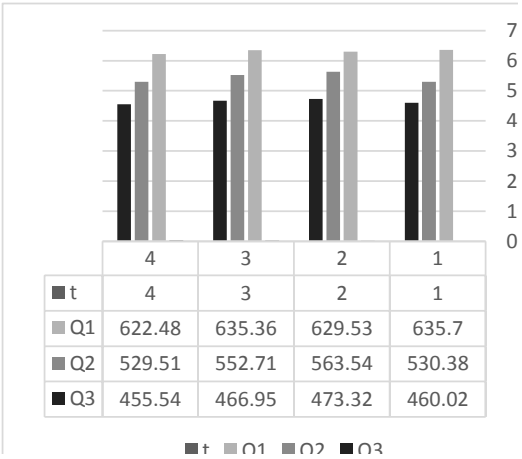
در نمودار ۲ ماده خام نوع ۱ از تأمین‌کننده مرکز تولید شماره ۳ در دوره‌های زمانی اول تا چهارم به ازای سناریوهای ۱، ۲ و ۳ واحدهای نشان داده‌شده خریداری‌شده است.



	4	3	2	1
t	4	3	2	1
Q1	629.59	619.62	648.03	630.2
Q2	557.49	554.17	556.62	570.31
Q3	478.12	492.32	491.7	474.78

نمودار ۲- میزان ماده خام خریداری‌شده از هر تأمین‌کننده در هر دوره زمانی به ازای هر سناریو

در نمودار ۳ میزان محصول انتقالی از مراکز تولید به مراکز توزیع در هر دوره به ازای هر سناریو (واحدهای نشان داده‌شده) ارائه‌شده است.



	4	3	2	1
t	4	3	2	1
Q1	622.48	635.36	629.53	635.7
Q2	529.51	552.71	563.54	530.38
Q3	455.54	466.95	473.32	460.02

نمودار ۳- میزان محصول انتقالی از مراکز تولید به مراکز توزیع در هر دوره زمانی به ازای سناریوهای مختلف

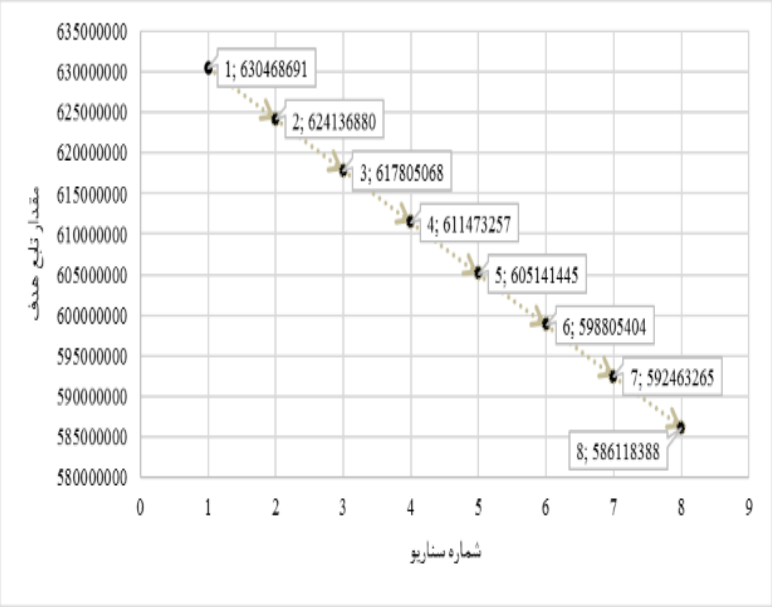
بدین ترتیب با اجرای مدل به ازای داده‌های تولیدشده، تعداد تسهیلات بهینه و مقادیر متغیرهای تصمیم حاصل گردید. حال به‌منظور بررسی صحت عملکرد مدل، به تحلیل حساسیت پارامترهای مدل پیشنهادی با استفاده از فرایند تحلیل حساسیت، دو دسته سناریو مبتنی بر کاهش و افزایش مقادیر تقاضا استفاده شده است که در ادامه این سناریوها مورد بررسی قرار گرفته شده است.

سناریوهای کاهش مقادیر تقاضا

در این سناریو با کاهش مقادیر تقاضا انتظار داریم که مقدار تابع هدف که از جنس کمینه‌سازی است کاهش یابد. در جدول ۳ و به صورت شماتیک در شکل مقادیر تابع هدف به ازای سناریوهای کاهشی نشان داده شده است.

جدول ۳- روند تغییرات تابع هدف به ازای سناریوهای کاهش مقادیر تقاضا

شماره سناریو	مقدار تقاضا	تابع هدف
۱	μ_{pct}	۶۳۰۴۶۸۶۹۱
۲	$0.95\times\mu_{pct}$	۶۲۴۱۳۶۸۸۰
۳	$0.9\times\mu_{pct}$	۶۱۷۸۰۵۰۶۸
۴	$0.85\times\mu_{pct}$	۶۱۱۴۷۳۲۵۷
۵	$0.8\times\mu_{pct}$	۶۰۵۱۴۱۴۴۵
۶	$0.75\times\mu_{pct}$	۵۹۸۸۰۵۴۰۴
۷	$0.7\times\mu_{pct}$	۵۹۲۴۶۳۲۶۵
۸	$0.65\times\mu_{pct}$	۵۸۶۱۱۸۳۸۸



نمودار ۴- روند تغییرات تابع هدف به ازای سناریوهای کاهش تقاضا

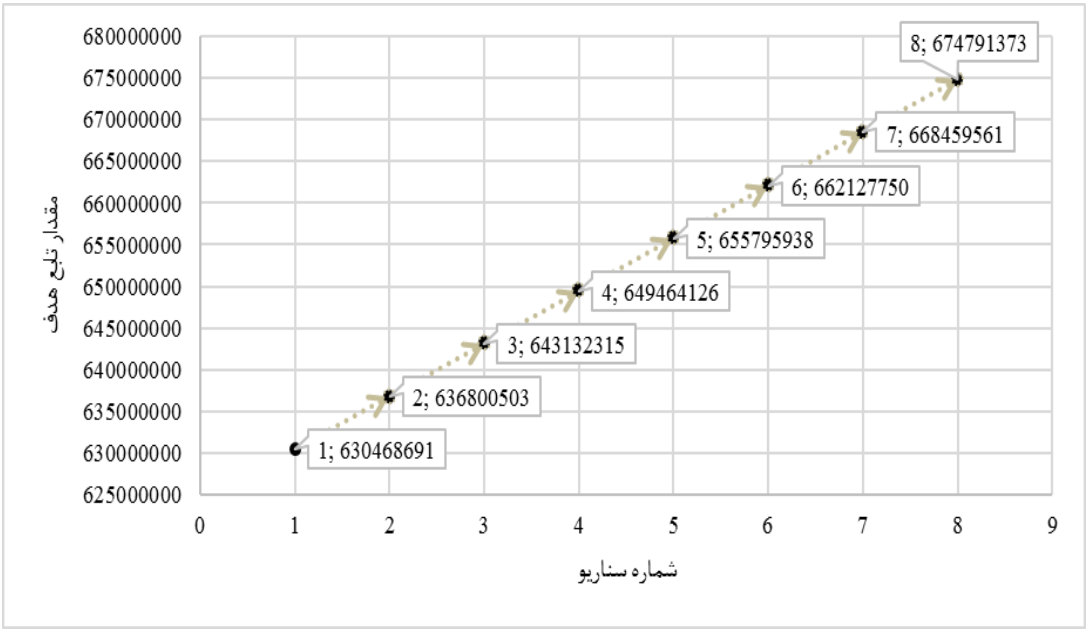
در جدول ۳ و نمودار ۴ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت دقیقا منطبق با انتظاری بود که از مدل داشتیم؛ یعنی با کاهش میزان تقاضا، مقدار تابع هدف کاهش یافت که این خود دلیلی بر صحت عملکرد مدل است.

سناریوهای افزایش مقادیر تقاضا

در این سناریو انتظار داریم با افزایش مقادیر تقاضا، مقدار تابع هدف که از جنس کمینه‌سازی است افزایش یابد.

جدول ۴- روند تغییرات تابع هدف به ازای سناریوهای افزایش مقادیر تقاضا

شماره سناریو	مقدار تقاضا	تابع هدف
۱	μ_{pct}	۶۳۰۴۶۸۶۹۱
۲	$1.05\times\mu_{pct}$	۶۳۶۸۰۰۵۰۳
۳	$1.1\times\mu_{pct}$	۶۴۳۱۳۲۳۱۵
۴	$1.15\times\mu_{pct}$	۶۴۹۴۴۱۲۶۲
۵	$1.2\times\mu_{pct}$	۶۵۵۷۹۵۹۳۸
۶	$1.25\times\mu_{pct}$	۶۶۲۱۲۷۷۵۰
۷	$1.3\times\mu_{pct}$	۶۶۸۴۵۹۵۶۱
۸	$1.35\times\mu_{pct}$	۶۷۴۷۹۱۳۷۳



نمودار ۵- روند تغییرات تابع هدف به ازای سناریوهای افزایش تقاضا

همان‌طور که در جدول ۴ و نمودار ۵ نشان داده شده است، نتایج حاصل از تحلیل حساسیت افزایش مقادیر تقاضا دقیقاً منطبق با انتظاری بود که از اجرای مدل داشتیم؛ یعنی با افزایش میزان تقاضا، مقدار تابع هدف افزایش یافت که این نیز دلیل دیگری بر صحت عملکرد مدل است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌منظور طراحی یک شبکه زنجیره تأمین چهار سطحی با امکان اختلال در شبکه، یک مدل ریاضی با در نظر گرفتن مفروضات مکان‌یابی- مسیریابی توأمان توسعه داده شد. در این تحقیق طرح بهینه‌ای به‌منظور استفاده هرچه بهتر از امکانات و تسهیلات موجود در راستای توزیع محصولات و تأمین تقاضای مشتریان با امکان اختلال در شبکه ارائه شد. به‌منظور تحقق اهداف پژوهش از ابزار برنامه‌ریزی ریاضی و تکنیک‌های بهینه‌سازی بهره گرفته‌شده است. ابتدا مجموعه مفروضات، اهداف و محدودیت‌های این مسئله به‌صورت یکپارچه فرموله گردید. به دلیل غیرخطی بودن مدل، با استفاده از تکنیک‌های خطی‌سازی، عبارات غیرخطی، خطی‌سازی شدند. مدل نهایی قطعی این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار GAMS/Cplex و با در نظر گرفتن داده‌های شبیه‌سازی‌شده حل شد. اعتبار سنجی و صحت عملکرد مدل موردنظر با استفاده از سناریوهایی مبتنی بر کاهش و افزایش تقاضا سنجیده شده که نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامتر تقاضا، منطبق بر انتظار منطقی ما از مدل بوده و اعتبار مدل پیشنهادی را تأیید می‌نماید. جهت پیشنهادهای آتی پیشنهاد می‌شود که یک زنجیره تأمین معکوس برای آن طراحی گردد و مسئله در ابعاد بزرگ توسط یک الگوریتم فرا ابتکاری مناسب جهت حل مسئله ارائه شود. همچنین می‌توان مفروضات مربوط به موجودی از قبیل انبارش و مواجه با کمبود در مدل در نظر گرفته و تابع هدف دیگری جهت کمینه‌سازی مواجه با کمبود طراحی شود. مشخص گردید، مدل پیشنهادی یک مدل کاربردی است و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کمکی به مدیران و تصمیم‌گیرندگان در تصمیم‌گیری‌ها یاری رساند.

۶- منابع و مآخذ

[۱] حسین ستاک، مصطفی عزیزی، وحیدکریمی، ***"مسئله مکان‌یابی- مسیریابی چند سطحی ظرفیت دار با برداشت و تحویل هم‌زمان و بارش‌های برش یافته: مدل‌سازی و حل ابتکاری"***، مجله پژوهش مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، سال دوم، شماره ۴، ص ۶۷-۶۱، ۱۳۹۳.

[۲] توکلی مقدم، رضا. نوروزی، نرگس. سلامت بخش، علیرضا. علینقیان، مهدی. "***مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن ایجاد توازن در توزیع کالاها با استفاده از الگوریتم بهبودیافته بهینه‌سازی انبوه ذرات"***، پژوهشنامه حمل‌ونقل، شماره ۴، ص ۳۷۵-۳۶۳، ۱۳۹۰.

[۳] جوادی گرگری، فرناز، صیاد، محجوبه، پشت مشهدی، علی. "***مدل زنجیره تأمین ۴ سطحی تحت شرایط اختلال با رویکرد سناریو محور"***، سومین کنفرانس بین‌المللی مدیریت، مهندسی صنایع، اقتصاد و حسابداری، صوفیه- بلغارستان. دبیرخانه دائمی کنفرانس، ۱۳۹۸.

[4] Baghalian, A., Rezapour, Sh., Zanjirani Farahani, R. " ***Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case"***, European Journal of Operational Research, vol 227, pp 199–215. 2013.

[5]sharma,M.J.,Moon,I.,Bae,H."***Analytic hierarchy process to assess and optimize distribution network"***, Applied Mathematics and Computation,Vol 202 ,PP 256-265.2008.

[6] Ghannadpour, S.F., Noori, S., Tavakkoli., Moghaddam, R. "***A multi echelon vehicle routing and scheduling problem with uncertainty in customers' request and priority"***, Journal of Combinatorial Optimization,Vol 28, PP 414-446. 2014.

[7]Jabbarzadeh, A., Jalali Nain,A., Davoudpour,H.,Azad,N. "***Designing a supply chain network three level under the risk of disruptions"***, Journal of Mathematical Problems in Engineering,Vol 23. 2012.

[8] Sawik, T. "***Supplier selection in make-to-order environment with risks***", Journal of Mathematical and Computer Modelling, Vol 53, No, PP 1670-1679. 2015.

[9] Zhang, Y., Qi, M., Lin, W., Miao, L. "***A three echelon metaheuristic approach to the reliable location routing problem under disruptions***", Transportation Research Part E, Vol 83, PP 90 -110. 2015.

[12]Azad, N., Davoudpour, H. "***Designing a stochastic distribution network model under risk***", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 64, No (14), PP 4-23. 2013.

[13] Madadi,A., Kurz, M., Mason, S., Taaffe, K."***Supply chain design under quality disruptions and tainted materials delivery"***, Transportation Research Part E, Logistics and transportation review, Vol 67, PP.105–123. 2014.

[10] Kumar Paul, S., Sarker, R., Essam, D. "***A quantitative model for disruption mitigation in a supply chain"***, manufacturing and Logistics, European Journal of Operational Research, vol 257, No 3, PP 881- 895. 2017.

[11] Imen, B.M.,Walid, k., Ruslan, S., Francios, V. "***A Benders Decomposition Approach for the Two-Echelon stochastic***"