



Paper Type: Original Article

# Designing of COVID-19 Vaccine Cold Supply Chain Under Operational and Disruption Risks: A Quality Driven Multi-Criteria Simulation-Optimization Model

## Citation:

Received: ----  
Revised: ----  
Accepted: ---

## Abstract

**Purpose:** The vaccine cold supply chain, as a quality-sensitive service–operational system, plays a critical role in ensuring timely delivery, maintaining vaccine efficacy, and minimizing wastage. The occurrence of operational and disruption risks intensifies process variability, undermines system reliability, and degrades service quality. The objective of this study is to develop a quality-oriented framework for the modeling and optimization of the COVID-19 vaccine cold supply chain, with a particular emphasis on quality-related performance indicators under conditions of uncertainty.

**Methodology:** In this study, a novel multi-period and multi-product simulation–optimization framework is developed to support decision-making in vaccine inventory management, allocation, and distribution under operational and disruption risks. The proposed approach integrates agent-based simulation with optimization techniques. The simulations are configured based on scenarios involving transportation disruptions and vaccine supply disruptions and are benchmarked against a disruption-free case.

**Findings:** The results are evaluated using several key performance indicators, including the expected vaccine delivery time, service level, vaccine wastage due to vehicle failures, and financial metrics. The simulation results indicate that the disruption-free scenario achieves the highest service level (0.82) and greatest degree of performance robustness, whereas transportation disruptions result in the spoilage of 8.9 million vaccine doses, and vaccine supply disruptions lead to the lowest service level (0.76). Statistical validation using the paired sign test further confirms the significance of these differences at the 95% confidence level.

**Originality/Value:** The present study adopts a quality engineering perspective to analyze the vaccine supply chain as a service system sensitive to process variability and proposes a quality-driven risk management framework. The findings provide practical insights for policymakers to enhance system reliability, reduce quality-related costs, and improve the resilience of vaccine distribution systems under crisis conditions.

**Keywords:** COVID-19 vaccine cold supply chain, Simulation-optimization, Operational and disruption risks, Quality engineering.



## نوع مقاله: پژوهشی

# طراحی زنجیره تأمین سرد واکسن کووید-۱۹ تحت ریسک‌های عملیاتی و اختلالی: مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی چند معیاره مبتنی بر کیفیت

## چکیده

هدف: زنجیره‌تأمین سرد واکسن به عنوان یک سیستم خدماتی- عملیاتی حساس به کیفیت، نقش حیاتی در تضمین تحویل به موقع، حفظ اثربخشی واکسن و کاهش ضایعات ایفا می‌کند. بروز ریسک‌های عملیاتی و اختلالی موجب افزایش نوسانات فرایندی، کاهش قابلیت اطمینان سیستم و افت کیفیت خدمت‌رسانی می‌شود. هدف این پژوهش، ارائه یک چارچوب کیفیت‌محور برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی زنجیره‌تأمین سرد واکسن کووید-۱۹ با تمرکز بر شاخص‌های عملکرد کیفیت، تحت شرایط عدم قطعیت است.

روش‌شناسی پژوهش: در این پژوهش، یک چارچوب نوین از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی چنددوره‌ای و چندکالایی برای تصمیم‌گیری در مدیریت موجودی، تخصیص و توزیع واکسن، تحت ریسک‌های عملیاتی و اختلالی توسعه یافته است. این رویکرد، شبیه‌سازی عامل‌بنیان را با تکنیک‌های بهینه‌سازی ادغام می‌کند. شبیه‌سازی‌ها بر اساس سناریوی اختلال در وسیله حمل‌ونقل و اختلال در عرضه واکسن تنظیم شده و با مساله بدون اختلال مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

یافته‌ها: نتایج با استفاده از برخی شاخص‌های کلیدی عملکرد از جمله زمان مورد انتظار تحویل واکسن، سطح خدمات، فساد واکسن به دلیل خرابی وسیله نقلیه و پارامترهای مالی ارزیابی می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سناریوی بدون اختلال، بالاترین سطح خدمات (۰/۸۲) و بیشترین پایداری عملکرد را دارا می‌باشد، در حالی که اختلالات وسیله نقلیه منجر به فساد ۸/۹ میلیون دوز واکسن گردید و اختلالات در عرضه واکسن نیز منجر به پایین‌ترین سطح خدمات (۰/۷۶) شد. اعتبارسنجی آماری نیز با استفاده از روش آزمون علامت زوجی، اهمیت این تفاوت‌ها را در سطح اطمینان ۹۵٪ تأیید کرد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: پژوهش حاضر با رویکرد مهندسی کیفیت، زنجیره‌تأمین سرد واکسن را به عنوان یک سیستم خدمت‌رسانی حساس به نوسانات فرایندی تحلیل نموده و چارچوبی برای مدیریت ریسک مبتنی بر کیفیت ارائه می‌دهد. نتایج می‌تواند در سیاست‌گذاری جهت بهبود قابلیت اطمینان، کاهش هزینه‌های کیفیت و افزایش تاب‌آوری سیستم‌های توزیع واکسن در شرایط بحرانی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: زنجیره‌تأمین سرد واکسن کووید-۱۹، شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، ریسک‌های عملیاتی و اختلالی، مهندسی کیفیت

## ۱- مقدمه

بیماری کووید-۱۹ برای اولین بار در دسامبر ۲۰۱۹ در ووهان چین شناسایی شد و به سرعت به یک بحران جهانی تبدیل گردید و پس از آنکه ۲۱۳ کشور را تحت تأثیر قرار داد، سازمان بهداشت جهانی آن را در ۱۱ مارس ۲۰۲۰ به‌طور رسمی پاندمی اعلام کرد. با وجود این که بخش زیادی از

جمعیت جهانی از اقدامات پیشگیرانه، سختگیرانه و همچنین پروتکل‌های بهداشت عمومی اولیه که توسط دولت‌ها اعمال شده بود، فاصله گرفته است، اما شواهد اپیدمیولوژیک نشان می‌دهد که ویروس‌های مسری مانند آنفولانزا همچنان پایدار هستند و به‌طور کامل ریشه‌کن نشده‌اند. این امر اهمیت مدیریت زنجیره‌تأمین واکسن کووید-۱۹ را نه تنها برای این ویروس خاص، بلکه به‌عنوان چارچوبی قابل اعمال برای سایر بیماری‌های عفونی برجسته می‌کند. علاوه بر این که ناتوانی در مهار بیماری، فشار قابل توجهی بر زیرساخت‌های بهداشت و درمان ملی وارد می‌کند، بار مالی ناشی از آن نیز ثبات اقتصادی را عمیقاً تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه، اطمینان از دسترسی زودهنگام به واکسن‌ها به یک اولویت استراتژیک برای بسیاری از دولت‌ها تبدیل شد تا بحران را به‌طور مؤثر مدیریت کنند و از تشدید بیشتر بیماری جلوگیری نمایند. جهت کاهش گسترش کووید-۱۹، دولت‌ها در سراسر جهان طیفی از اقدامات از جمله الزامات فاصله‌گذاری اجتماعی، استفاده اجباری از ماسک در مکان‌های عمومی، قرنطینه‌های موقت، ترویج کار از راه دور و کمپین‌های واکسیناسیون را اجرا کردند. در این میان، واکسیناسیون نقش حیاتی در کاهش قابل توجه نرخ عفونت، کاهش فشار بر سیستم‌های بهداشت و درمان، کاهش ابتلای افراد پرریسک نیازمند مراقبت‌های ویژه و در نهایت کاهش مرگ و میر ایفا کرده است. از منظر مهندسی کیفیت، زنجیره‌تأمین سرد واکسن را می‌توان به‌عنوان یک سیستم خدماتی- عملیاتی حساس به نوسانات فرایندی در نظر گرفت که عملکرد آن مستقیماً بر کیفیت خدمت‌رسانی، قابلیت اطمینان سیستم و میزان اتلاف منابع تأثیر می‌گذارد. در چنین سیستمی، حفظ دمای استاندارد، تحویل به موقع، تأمین پایدار و جلوگیری از کمبود یا فساد واکسن، همگی مصادیقی از ویژگی‌های بحرانی کیفیت محسوب می‌شوند. لی و همکاران [1] زنجیره‌تأمین واکسن را یک سیستم پیچیده شامل مکان‌ها، تجهیزات ذخیره‌سازی، وسایل نقلیه، مسیرهای حمل‌ونقل و افرادی که واکسن‌ها را از نقطه تولید تا توزیع مدیریت می‌کنند، تعریف کردند. به دلیل نقش مهم واکسن‌ها در جلوگیری از گسترش بیماری‌های عفونی، محققان علاقه زیادی به مطالعه زنجیره‌تأمین واکسن از دیدگاه‌های مختلف نشان داده‌اند و به دلیل حساسیت دمایی آن‌ها، زنجیره‌تأمین سرد به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفت. لمنز و همکاران [2] در یک مقاله مروری، طراحی شبکه‌های زنجیره‌تأمین واکسن را بررسی کردند. آن‌ها تصمیمات در سطوح استراتژیک و عملیاتی را بررسی نمودند که می‌توان مسائل کلیدی زنجیره‌تأمین واکسن مانند عمر مفید محدود، زنجیره‌تأمین سرد و دسترسی به مناطق دورافتاده را حل کرد. دویزر و همکاران [3] در یک مقاله مروری، ۶۵ مقاله در حوزه واکسیناسیون در سطح مدیریت عالی را تحلیل کردند. آن‌ها این مقالات را به چهار بخش دسته‌بندی کردند: ۱- محصول: واکسن‌ها برای ایجاد ایمنی در برابر یک بیماری خاص تجویز می‌شوند. قبل از تجویز واکسیناسیون، سیاست‌گذاران باید تصمیم بگیرند که کدام بیماری را هدف قرار دهند و از کدام واکسن استفاده کنند. ممکن است چندین واکسن برای یک بیماری معین موجود باشد، یا ویژگی‌های یک بیماری در زمان تولید ناشناخته باشد. ۲- تولید: مقدار تولید واکسن به تقاضا و عملکرد آن در زنجیره‌تأمین بستگی دارد. در طول یک شیوع ناگهانی، واکسن ممکن است به دلیل عدم دانش در خصوص آن و جهش‌های ژنتیکی اثربخشی خود را از دست دهد. زمان تولید نیز می‌تواند مستقیماً با مدت زمان انتظار جهت تحویل و حجم سفارشات مرتبط باشد. ۳- تخصیص: تأمین واکسن به ویژه در شرایط شیوع ناگهانی اغلب محدود است و تأمین نیازهای کل جمعیت را با چالش روبرو می‌کند. در این خصوص، افراد و گروه‌ها می‌بایست بر اساس سطوح ریسک‌شان دسته‌بندی شوند و بین جمعیت‌های پرریسک و کم‌ریسک تمایز قائل شوند تا بر این اساس، استراتژی‌های اولویت‌بندی ارائه گردد. تعیین اینکه کدام زیرمجموعه‌های جمعیت باید اولویت‌بندی شوند، نیازمند تحلیل دقیق است. ۴- توزیع: گام نهایی نیز نحوه توزیع واکسن از تولیدکننده تا گیرنده واکسن می‌باشد. کنترل موجودی، مکان‌یابی تسهیلات، کادر درمان در دسترس و غیره در این گام در نظر گرفته می‌شوند. ما در این مقاله یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی چندسطحی، چنددوره‌ای و چندکالایی برای تصمیمات کنترل موجودی، تخصیص و توزیع واکسن کووید-۱۹ با در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی و اختلالی ارائه می‌دهیم. شبکه زنجیره‌تأمین پیشنهادی شامل تأمین‌کنندگان واکسن خارجی، تولیدکننده واکسن داخلی، مراکز توزیع، مراکز درمان استانی و گیرندگان واکسن می‌باشد. واکسن کووایدان برکت به‌عنوان واکسن داخلی و واکسن‌های سینوفارم، اسپوتنیک و آسترانکا که توسط دولت ایران سفارش داده شده‌اند، به‌عنوان واکسن‌های خارجی در نظر گرفته شده است. استان‌های کاندید در ایران برای مراکز توزیع تهران، تبریز، مرکزی، فارس، اصفهان، خوزستان، خراسان رضوی، کرمانشاه و هرمزگان می‌باشند. واکسن‌ها بر اساس سفارش و با در نظر گرفتن جمعیت، با کامیون‌های یخچال‌دار به ۳۱ مراکز درمان استانی حمل می‌شوند. منطق سفارش‌دهی در مراکز درمان استانی نیز بر اساس سیاست موجودی (S, I) مورد توجه قرار گرفته است.

این مطالعه شامل ۴ نوآوری است: (۱) توسعه کاربرد ترکیبی از روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی و تعریف شاخص‌های عملکرد کیفیت جهت حداقل‌سازی هزینه‌های کیفیت، پایداری عملکرد و قابلیت اطمینان سیستم (۲) در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی (پارامترهای تصادفی) و ریسک‌های اختلالی (اختلال وسیله نقلیه و اختلال در عرضه واکسن) به‌طور هم‌زمان. (۳) در نظر گرفتن تمامی مراحل زنجیره‌تأمین واکسن شامل: محصول، تولید، تخصیص و توزیع به صورت یکپارچه. (۴) اولویت‌بندی گروه‌های جمعیتی برای کاهش نرخ مرگ و میر و به حداقل رساندن کمبود

واکسن. ساختار مقاله نیز به شرح زیر می‌باشد. بخش ۲ بررسی جامع مطالعات زنجیره‌های تأمین واکسن و روش‌های حل مربوطه را ارائه می‌دهد. بخش ۳ بررسی اجمالی روش‌شناسی تحقیق است. بخش ۴ برنامه توزیع واکسن کووید-۱۹ در ایران را معرفی نموده و مساله را توصیف خواهد کرد. بخش ۵ نیز نتایج حاصل از اعمال روش شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در سه سناریوی مجزا را گزارش می‌دهد. همچنین آزمون علامت زوجی غیرپارامتری به عنوان روش اعتبارسنجی آماری استفاده می‌شود. بخش ۶ هم به نتیجه‌گیری و پیشنهادات، جهت مطالعات آینده می‌پردازد.

## ۲- پیشینه تحقیق

زنجیره‌تأمین واکسن دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است که آن را از زنجیره‌های تأمین معمولی متمایز می‌کند، از جمله فرآیندهای تصمیم‌گیری غیرمتمرکز، تأثیر مداخلات سیاسی بر توزیع واکسن و نیاز اساسی به تصمیم‌گیری و اجرای به موقع. اطمینان از توزیع کارآمد و به موقع واکسن‌ها در سطح جهانی به‌ویژه در طول همه‌گیری کووید-۱۹، نیازمند ایجاد یک زنجیره‌تأمین قوی و انطباق‌پذیر قادر به کاهش عدم قطعیت‌ها در عرضه و تقاضا است. در طراحی شبکه‌های زنجیره‌تأمین واکسن، مطالعات متعددی برای توسعه مدل‌های کارآمد و قابل اعمال در سناریوهای واقعی جهان، مورد بررسی قرار گرفت. این بخش بررسی جامعی از پژوهش‌های موجود در این زمینه و رویکردهای روش‌شناختی به‌کاررفته در این حوزه ارائه می‌دهد و در نهایت شکاف‌های تحقیقاتی کلیدی شناسایی می‌شوند. جدول ۱ طبقه‌بندی مطالعات مرتبط در این زمینه را ارائه می‌دهد.

### جدول ۱- مروری بر مطالعات مرتبط با زنجیره‌تأمین واکسن.

Table 1-Review of related studies to vaccine supply chain.

روش‌های حل	مطالعه موردی	کووید ۱۹	ریسک‌ها							مباحث کلیدی در زنجیره‌تأمین واکسن			چند دوره ای	چند محصولی	حوزه‌های مرتبط با زنجیره‌تأمین واکسن				نویسندگان
			اختلالی		عملیاتی					کارایی واکسن	زنجیره سرد	فسادپذیری			مجموع	تولید	تخصیص	توزیع	
			بنده زنجیره‌تأمین	زیر ساخت	فازی (Fuzzy)	مقاوم (Robust)	احتمالی (Stochastic)												
×	×	✓	×	×	×	×	×	×	×	×	✓	×	✓	✓	×	✓	×	✓	آبراهامز و همکاران [5]
×	✓	×	✓	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	✓	×	×	لی و همکاران [23]
×	×	✓	✓	×	✓	×	×	×	×	×	×	×	✓	✓	×	×	✓	✓	سیب و همکاران [6]
×	✓	×	✓	×	×	×	×	×	✓	×	×	✓	×	×	✓	×	×	×	بروان و همکاران [24]
×	✓	×	✓	×	×	×	×	×	✓	×	×	×	✓	✓	✓	×	×	✓	لی و همکاران [1]
×	✓	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	×	×	لی و همکاران [25]
×	×	✓	✓	×	×	×	✓	×	×	×	×	×	✓	×	✓	×	×	×	ویچاپا و همکاران [7]
×	×	✓	✓	✓	✓	×	×	×	×	×	×	×	×	×	✓	✓	×	×	عباسی و همکاران [8]
×	×	✓	✓	✓	✓	×	✓	×	×	×	×	×	✓	×	×	✓	×	×	گوویندان و همکاران [9]
×	×	✓	✓	×	✓	×	×	×	×	×	✓	✓	×	×	✓	×	×	×	لین و همکاران [10]
×	×	✓	✓	✓	×	×	×	×	×	×	×	×	×	✓	×	✓	×	✓	بوهات و



✓	×	×	✓	✓	×	×	✓	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	×	✓	شیری و همکاران [31]
×	×	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	×	✓	×	×	✓	✓	✓	×	✓	✓	ترشیزی و همکاران [22]
×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	مطالعه حاضر

## ۲-۱- روش بهینه‌سازی برای زنجیره‌تامین واکسن

طراحی شبکه زنجیره‌تامین شامل اتخاذ تصمیمات ساختاریافته و آگاهانه در سطوح استراتژیک و تاکتیکی است. برای حمایت از این تصمیمات و بهبود کارایی عملیاتی، معمولاً مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی به کار گرفته می‌شوند. شبکه‌های زنجیره‌تامین واکسن، نه تنها برای به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی بلکه برای اطمینان از تحویل سریع واکسن‌ها به کاربران نهایی توسعه می‌یابند. بهار [4] به مدیریت موجودی محصولات فسادپذیر در زنجیره‌تامین تحت شرایط عدم قطعیت تقاضا و محدودیت‌های زیست‌محیطی می‌پردازد. در این پژوهش، پارامترهای کلیدی مانند نرخ تقاضا، هزینه نگهداری و عمر مفید محصول با استفاده از اعداد فازی مدل‌سازی شده‌اند تا عدم قطعیت‌های واقعی، بهتر منعکس شوند. تابع هزینه کل شامل هزینه سفارش، نگهداری و جریمه انتشار کربن بوده و با استفاده از روش‌های فازی بهینه‌سازی می‌شوند. آبراهام و همکاران [5] یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی زمان‌بندی تزریق واکسن ارائه دادند. آن‌ها عملکرد یک مدل نوین از برنامه‌ریزی عدد صحیح باینری و الگوریتم ژنتیک را مقایسه کردند. سیب و همکاران [6] یک نظرسنجی از ۸۰۰ ارائه‌دهنده واکسن در کالیفرنیا برای بررسی استاندارد مراقبت‌های درمانی، قدرت پاسخ‌گویی و اینکه چگونه استانداردهای مرتبط با واکسن بر قدرت پاسخ‌گویی در میان این ارائه‌دهندگان تأثیر می‌گذارد، انجام دادند. آن‌ها از رگرسیون خطی برای بررسی این موضوع استفاده کردند. ویچاپا و همکاران [7] یک مدل مسیریابی چند هدفه برای دفع زباله‌های عفونی با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی هیبریدی و الگوریتم ژنتیک هیبریدی ارائه دادند. آن‌ها معیارهای زیرساختی مانند معیارهای اجتماعی و زیست‌محیطی را در نظر گرفتند و وزن‌دهی لازم را با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی انجام دادند. عباسی و همکاران [8] یک مدل ریاضی برای پشتیبانی از تصمیمات تخصیص واکسن بر اساس ریسک بیماری، حساسیت و محدودیت‌های عملیاتی شامل ظرفیت تسهیلات پزشکی، مقدار واکسن در دسترس و ظرفیت حمل‌ونقل در استرالیا توسعه دادند. تمرکز این تحقیق بر بهینه‌سازی تخصیص واکسن در لایه‌های پایین‌دستی زنجیره‌تامین واکسن کووید-۱۹ می‌باشد. گویندیان و همکاران [9] برای اولین بار، یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری، مبتنی بر دانش پزشکی و سیستم استنتاج فازی برای کمک به مدیریت تقاضا در زنجیره‌تامین واکسن، کاهش استرس در جامعه، شکستن زنجیره انتقال کووید-۱۹ و به طور کلی کاهش شیوع همه‌گیری و ریسک‌های اختلالی زنجیره‌تامین ارائه دادند. لین و همکاران [10] یک مدل مفهومی برای مساله حمل‌ونقل در زنجیره‌تامین سرد واکسن توسعه دادند و سپس بررسی کردند که چگونه بازرسی‌های پایان حمل، بر تصمیم توزیع‌کننده تأثیر می‌گذارد. بوها و همکاران [11] از برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین درصد تخصیص بهینه کیت‌های تست کووید-۱۹ در میان مراکز تست معتبر در فیلیپین استفاده کردند تا فرصتی عادلانه برای همه افراد آلوده فراهم شود. نابرابری در دسترسی به تست، تراکم جمعیت شهرها و ظرفیت تسهیلات در این مدل گنجانده شده است. مکینتری و همکاران [12] از یک مدل ریاضی قطعی برای پاسخ به همه‌گیری، با عرضه محدود (واکسیناسیون هدفمند) و واکسیناسیون انبوه برای ایالتی در استرالیا استفاده کردند. جهت واکسیناسیون هدفمند، اثربخشی واکسیناسیون در کادر درمان، جوانان و افراد مسن مورد مقایسه قرار گرفتند. سازور و همکاران [13] یک مدل ریاضی چند هدفه برای طراحی زنجیره‌تامین تاب آور و پایدار مبتنی بر سطوح تصمیم‌گیری استراتژیک و تاکتیکی معرفی کردند. در این مقاله، زنجیره‌تامین واکسن آنفولانزا در ایران، جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مورد مطالعه قرار گرفت و یک رویکرد بهینه‌سازی فازی مقاوم نیز برای مقابله با عدم قطعیت‌ها استفاده گردید. سینها و همکاران [14] یک رویکرد نوین از مدل‌سازی نظریه بازی‌ها با در نظر گرفتن امکان اختلالات زمانی، جهت شناسایی تعداد تسهیلاتی که منجر به تخصیص موجودی اضافی (ذخایر موجودی استراتژیک) برای اطمینان از سطح حداقل خدمات می‌شود، توسعه دادند. آن‌ها استراتژی‌هایی برای اطمینان از سطح خدمات مورد نیاز برای ایمنی جمعی در برابر کووید-۱۹ در زنجیره‌تامین واکسن هند ارائه دادند. توانا و همکاران [15] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای توزیع عادلانه واکسن‌های کووید-۱۹ در کشورهای در حال توسعه ارائه دادند. در این مقاله واکسن‌ها به دسته‌های سرد، خیلی سرد و فوق‌سرد دسته‌بندی شدند که نیاز به یخچال‌های خاص برای ذخیره‌سازی و توزیع‌شان دارند. امکان ذخیره‌سازی برای دوره‌های آینده، مواجهه با کمبودها، ملاحظات بودجه، انتخاب تولیدکننده، تخصیص سفارش، ظرفیت‌های وابسته به زمان و گروه‌بندی جمعیت ناهمگن از جمله فرضیات عملی در رویکرد پیشنهادی هستند. رستگار و همکاران [16] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای توزیع عادلانه واکسن‌های آنفولانزا در کشورهای در حال توسعه در طول همه‌گیری کووید-۱۹

ارائه دادند. مدل پیشنهادی از یک تابع هدف عادلانه برای توزیع واکسن‌ها در میان کادر درمان، افراد مسن، زنان باردار و کسانی که بیماری‌های زمینه‌ای دارند، استفاده می‌کند. چادهری و همکاران [17] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چند هدفه جهت به حداقل رساندن هزینه‌های توزیع کلی، اطمینان از پایداری زیست‌محیطی و اجتماعی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و به حداکثر رساندن فرصت‌های اشتغال برای توسعه زنجیره‌تأمین واکسن فرموله کردند. برای حل مدل پیشنهادی، دو رویکرد فرا ابتکاری یعنی بهینه‌سازی اجتماعی-اقتصادی چند هدفه و بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذرات بهبودیافته با منطق فازی به کار گرفته شدند و مورد مقایسه قرار گرفتند. جهانی و همکاران [18] یک مدل صف چنددوره‌ای، با در نظر گرفتن تراکم در فرآیند واکسیناسیون، برای به حداقل رساندن دو هدف متضاد پیشنهاد کردند: (۱) میانگین زمان انتظار کاندیدهای دریافت واکسن و (۲) کل سرمایه‌گذاری در ذخیره‌سازی و سفارش واکسن. آن‌ها از الگوریتم دستیابی هدف و الگوریتم ژنتیک (*NSGA-II*) برای مسائل با مقیاس کوچک و بزرگ برای توسعه یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی دو هدفه استفاده کردند. بابایی و همکاران [19] یک برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط چند هدفه و پایدار برای توزیع واکسن کووید-۱۹ با در نظر گرفتن کنترل موجودی (*R,s,S*) و مدیریت پسماند ادغام شده با مدیریت ریسک توسعه دادند. رویکردهای *LP-metric* و برنامه‌ریزی آرمانی برای حل این مدل در یک مطالعه موردی واقعی در استان کاشان، ایران استفاده شد. سه تابع هدف در این مدل شامل هزینه کل شبکه، تأثیر زیست‌محیطی و تأخیر در توزیع عادلانه واکسن به دلیل تحریم‌ها می‌باشد. ولی زاده و همکاران [20] یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی مقاوم برای زنجیره‌تأمین واکسن در طول همه‌گیری کووید-۱۹ طراحی کردند. این مقاله از روش محدودیت اسپیلون برای حل مساله با مقیاس کوچک و سه الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک، بهینه‌ساز گرگ خاکستری و بهینه‌سازی خرس قطبی برای حل مساله با مقیاس متوسط و بزرگ بهره می‌برد. داس و همکاران [21] یک مدل موجودی سفارش اقتصادی (*EOQ*) برای سیستم دو انباره در شرایط قرنطینه ناشی از همه‌گیری کووید-۱۹ ارائه کردند. با توجه به اختلال ایجاد شده در تقاضا در دوران قرنطینه، مدل پیشنهادی با فرض تابع تقاضای وابسته به زمان خطی و نرخ فساد با توزیع ویبول دو پارامتری، به دنبال کمینه‌سازی هزینه کل سیستم می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دوره قرنطینه باعث افزایش هزینه‌های نگهداری و فساد می‌شود، در حالی که افزایش نرخ تقاضا به دلیل کاهش زمان نگهداری، هزینه کل را کاهش می‌دهد. ترشیزی و همکاران [22] یک شبکه زنجیره‌تأمین واکسن تاب آور و پایدار برای کووید-۱۹ توسعه دادند که ریسک‌های عملیاتی را مورد بررسی قرار می‌دهد. مدل پیشنهادی، چند محصولی و چند هدفه می‌باشد و هم زنجیره مستقیم (برای عرضه، تولید و توزیع واکسن) و هم زنجیره معکوس (برای مدیریت پسماند واکسن) را در نظر گرفته است. هدف مدل به حداقل رساندن هزینه‌ها و آلودگی زیست‌محیطی و از طرف دیگر به حداکثر رساندن تأثیرات اجتماعی مثبت مانند توسعه منطقه‌ای، خودکفایی واکسن داخلی و کاهش عوارض جانبی می‌باشد.

## ۲-۲- روش شبیه‌سازی برای زنجیره‌تأمین واکسن

شبیه‌سازی به دلیل اثربخشی در مقابله با نوسانات تقاضا، تغییرپذیری هزینه و عدم قطعیت کلی سیستم به عنوان ابزاری قدرتمند در تحلیل زنجیره‌های تأمین به کار گرفته می‌شود. شبیه‌سازی با ایجاد مدل‌های دیجیتال و مجازی که پیچیدگی‌های جهان واقعی را منعکس می‌کنند، می‌تواند سناریوهای عملیاتی مختلف در زنجیره‌های تأمین واکسن را ارزیابی کند. لی و همکاران [23] تأثیر استراتژی‌های ارزیابی بهینه واکسیناسیون در طول همه‌گیری ویروس آنفولانزا در مکزیک را با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مقایسه کردند. بروان و همکاران [24] تأثیر هزینه بر دسترسی واکسن را بررسی کردند. آن‌ها یک مدل شبیه‌سازی گسسته پیشامد برای زنجیره‌تأمین واکسن کشور بنین در چارچوب مدل محاسباتی *HERMES* توسعه دادند. لی و همکاران [1] در همکاری با وزارت بهداشت موزامبیک، یک فرآیند جدید برای طراحی مجدد و بهبود زنجیره‌تأمین واکسن با استفاده از مدل شبیه‌سازی محاسباتی *HERMES* اجرا کردند. لی و همکاران [25] یک روش شبیه‌سازی برای مقایسه استراتژی‌های تخصیص واکسن آنفولانزا با استفاده از اطلاعات جمعیتی و موجودی واکسن پیشنهاد کردند. آن‌ها از یک مدل عامل‌بنیان برای پیش‌بینی گسترش بیماری، هم از نظر جغرافیایی و هم از نظر زمانی استفاده نمودند. چاترودی و همکاران [26] با استفاده از یک تحلیل پیش‌بینانه، کشورهای هند، برزیل و ایالات متحده را برای تخمین تأثیر نرخ واکسیناسیون بر تسریع پایان همه‌گیری کووید-۱۹ مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از یک مدل *SIR* اصلاح‌شده برای شبیه‌سازی مساله استفاده کردند. فوی و همکاران [27] از مدل *SEIR* توسعه یافته برای ارزیابی استراتژی‌های تخصیص واکسن در هند بهره بردند. این مدل جهت کاهش نسبی مرگ‌ومیر بر اساس اولویت‌بندی گروه‌های سنی مختلف مورد استفاده قرار گرفت. مینوزا و همکاران [28] یک مدل برنامه‌ریزی خطی چند هدفه برای بهینه‌سازی توزیع واکسن فرموله کردند. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از داده‌های کووید-۱۹ در شهری در فیلیپین انجام شد و نتایج تحت سناریوهای مختلف و اولویت بندی گروه‌های سنی مختلف تحلیل گردید.

### ۲-۳- روش هوش مصنوعی برای زنجیره تامین واکسن

در سال‌های اخیر، تنها چند مطالعه کاربرد تکنیک‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در مدل‌سازی زنجیره‌های تامین واکسن را بررسی کرده‌اند. سروانان [29] به کارگیری فناوری‌های نوین مانند بلاکچین و پهپاد در زنجیره تامین سلامت را بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهد که این فناوری‌ها با افزایش شفافیت، قابلیت ردیابی و سرعت توزیع، می‌توانند کارایی و قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع اقلام پزشکی را بهبود دهند و اثرات اختلالات عملیاتی را کاهش دهند. کامران و همکاران [30] یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی تصادفی چند هدفه، چند دوره‌ای و چند کالایی نوین در زمان همه‌گیری کووید-۱۹ پیشنهاد کردند. ابتدای امر، ساختار تعاملی پویایی سیستم شیوع کووید-۱۹ در دانشگاه‌ها توصیف گردید. مقدار واکسن مورد نیاز برای دانشجویان با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی تخمین زده می‌شود، سپس به عنوان یک پارامتر تصادفی وارد مدل ریاضی می‌شود. الگوریتم‌های جستجوی همسایگی متغیر و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ برای حل مدل، مورد استفاده قرار گرفت. شیری و همکاران [31] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دو مرحله‌ای، چند دوره‌ای برای شبکه زنجیره تامین واکسن کووید-۱۹ با تقاضا و زمان تحویل احتمالی ارائه دادند. آن‌ها در گام اول بر اهداف تامین‌کنندگان تمرکز کردند و هدف به حداقل رساندن زمان تحویل می‌باشد. گام بعدی به حداقل رساندن شکاف سطح خدمات، زمان انتظار در صف و هزینه‌ها و به حداکثر رساندن تخصیص، با تمرکز بر اهداف دولت است. برای تخمین تقاضای واکسن، رویکردهای یادگیری ماشین اتخاذ گردید و برای اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی، یک مطالعه موردی از ایران ارائه شد.

### ۲-۴- ارزیابی ریسک در زنجیره تامین واکسن

ارزیابی و مدیریت ریسک‌های مرتبط در هر زنجیره تامین برای پیش‌بینی و کاهش رویدادهای بالقوه ضروری می‌باشد. زنجیره تامین به صورت بنیادی با دو دسته ریسک مواجه است: (۱) ریسک‌های عملیاتی، که از عدم قطعیت‌ها و نوسانات ذاتی در پارامترها مانند تقاضاهای انسانی مشتری، محدودیت‌های ظرفیت زنجیره تامین، زمان‌های تحویل متغیر و شرایط مالی غیرقابل پیش‌بینی ناشی می‌شوند. (۲) ریسک‌های اختلالی، که از رویدادهای طبیعی و حوادث انسانی ناشی می‌شوند. این ریسک‌ها می‌توانند تأثیر مستقیم بر تسهیلات خاص زنجیره تامین داشته باشند یا اثرات غیرمستقیم با به خطر انداختن سیستم‌های زیرساختی حیاتی، از جمله انرژی، شبکه‌های حمل‌ونقل و پلنفرم‌های ارتباطی اعمال کنند. عباسی و همکاران [8] یک مدل ریاضی برای تخصیص واکسن بر اساس ریسک در مناطق تحت پوشش مراکز درمانی توسعه دادند. گوویندان و همکاران [9] از یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر سیستم استنتاج فازی برای بهبود مدیریت تقاضا و کاهش ریسک‌های زنجیره تامین در حوزه درمان، در طول اپیدمی‌ها بهره بردند. سازور و همکاران [13] یک زنجیره تامین پایدار و تاب آور طراحی کردند و از یک رویکرد بهینه‌سازی فازی مقاوم برای مقابله با عدم قطعیت‌ها استفاده کردند. سینها و همکاران [14] یک مدل برای شناسایی تسهیلات حیاتی برای موجودی استراتژیک ذخایر واکسن برای حفظ سطوح خدمات در میان ریسک‌های اختلالی در زمان تحویل توسعه دادند. سان و همکاران [32] یک رویکرد مبتنی بر شبیه‌سازی برای زنجیره‌های تامین واکسن پیشنهاد کردند که عدم قطعیت‌ها در سرعت و وسیله نقلیه و زمان فرایند را شامل می‌شود. چادهری و همکاران [17] عمر مفید واکسن و عدم قطعیت‌ها در تقاضا و پارامترهای زنجیره تامین را برای بهبود مقاومت مدل در نظر گرفتند. بابایی و همکاران [19] یک شبکه توزیع واکسن پایدار با مدیریت پسماند طراحی کردند که مدیریت ریسک را با تصمیم‌گیری‌ها در مکان‌یابی، تخصیص و کنترل موجودی ادغام می‌کند. ولی زاده و همکاران [20] یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی مقاوم برای زنجیره تامین واکسن کووید-۱۹ توسعه دادند که عدم قطعیت تقاضا را در چندین سناریو گنجانده است. کامران و همکاران [30] یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی تصادفی برای کووید-۱۹ پیشنهاد کردند که تقاضای واکسن دانشجویان را از طریق شبیه‌سازی تخمین می‌زند و آن را به عنوان پارامتر تصادفی در نظر می‌گیرد. شیری و همکاران [31] تقاضای واکسن کووید-۱۹ را به عنوان پارامتر تصادفی مدل‌سازی کردند که توسط یادگیری ماشین تخمین زده می‌شود. ترشیزی و همکاران [22] یک مدل بهینه‌سازی برای زنجیره تامین واکسن کووید-۱۹ تاب آور و پایدار توسعه دادند که ریسک‌های عملیاتی را مورد بررسی قرار می‌دهد و استراتژی‌های تاب آور را برای اختلال در تسهیلات و حمل‌ونقل به کار می‌گیرد.

### ۲-۵- شکاف‌های تحقیقاتی

بررسی پژوهش‌های مرتبط با زنجیره تامین واکسن در حوزه بهینه‌سازی نشان می‌دهد که تمرکز اصلی بر حداقل‌سازی هزینه یا حداکثرسازی سطح خدمت‌رسانی بوده و اغلب مدل‌ها به صورت قطعی فرموله شده‌اند. در این مطالعات، نقش عدم قطعیت و نوسانات عملیاتی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در دسته دوم، شبیه‌سازی برای تحلیل رفتار سیستم در شرایط بحرانی استفاده شده است، اما در بسیاری از موارد، فرآیند تصمیم‌گیری

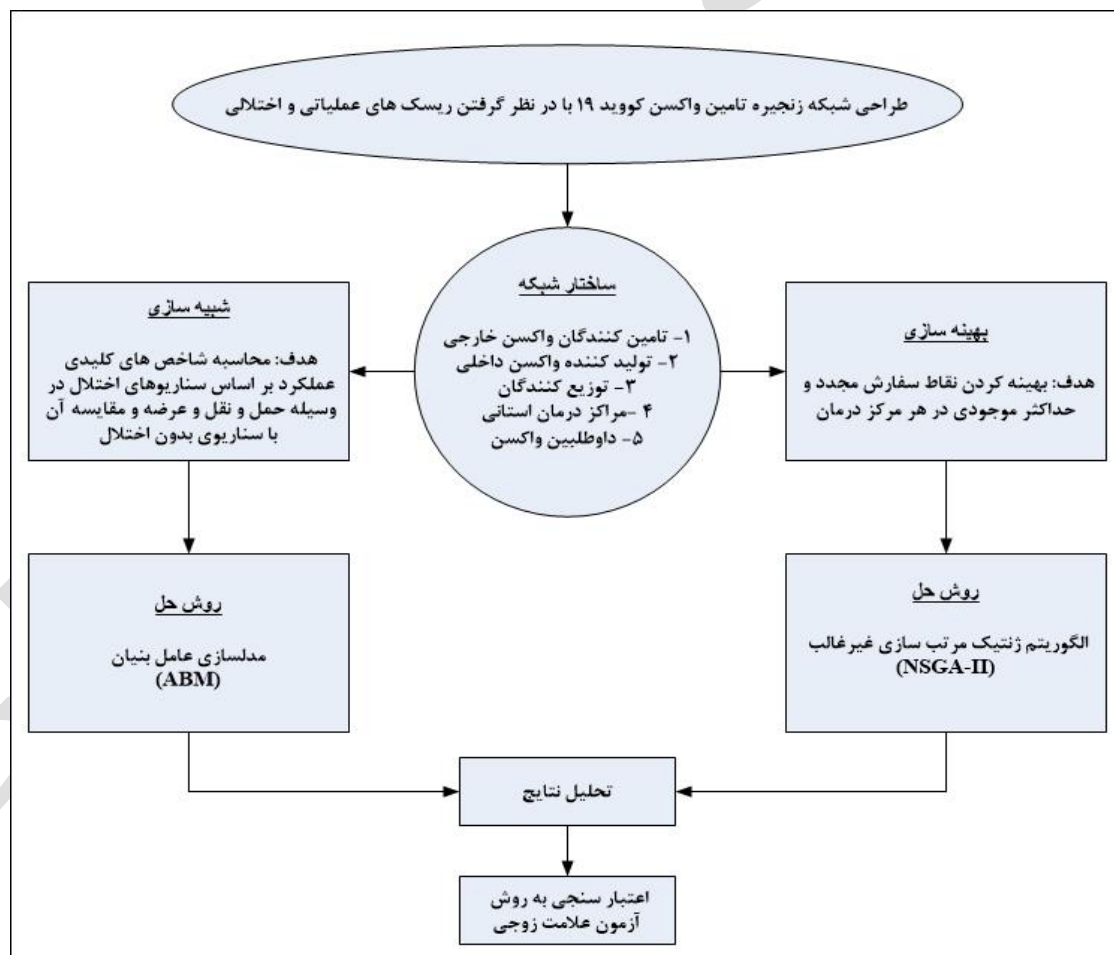
بهینه به صورت هم زمان با شبیه سازی لحاظ نشده و تعامل بین تصمیمات و عملکرد سیستم به طور کامل بررسی نشده است. بکارگیری هوش مصنوعی در این حوزه نیز محدود بوده است. تمرکز مطالعات در مدیریت ریسک و مفهوم تاب آوری، بر شاخص های هزینه ای یا سطح خدمت بوده و تحلیل آن ها از منظر مهندسی کیفیت و کنترل نوسانات فرایندی به صورت نظام مند انجام نشده است. اگرچه ساختار کلی زنجیره تامین واکسن شامل سطوح تأمین کننده، مراکز توزیع و مراکز ارائه خدمت در مطالعات پیشین نیز مورد بررسی قرار گرفته است، با این حال مدل ارائه شده در این پژوهش از چند جنبه دارای نوآوری متمایز است. در مقالات [[4]] الی [[22]] تمرکز بر تکنیک های بهینه سازی و در مقالات [[23]] الی [[28]] به شبیه سازی پرداخته شده است، که این امر با طبیعت پیچیده، پویا و نامطمئن سیستم های توزیع واکسن در دنیای واقعی مغایرت دارد. اما برخلاف مطالعات پیشین، چارچوب پیشنهادی این پژوهش با ادغام رویکردهای شبیه سازی و بهینه سازی، امکان تصمیم گیری هم زمان در شرایط عدم قطعیت و ارزیابی چندمعیاره را فراهم نموده است. در مقالاتی مانند [[30]] الی [[32]] ریسک ها را به صورت یکپارچه یا کلی مدل کرده اند، اما در این پژوهش ریسک ها به صورت سطح بندی شده، بر اساس ارکان شبکه و همچنین سطوح تصمیم گیری عملیاتی و تاکتیکی طراحی شده اند. این رویکرد امکان تحلیل تفکیکی اثر ریسک بر هر بخش از شبکه و شناسایی نقاط بحرانی آسیب پذیر را فراهم می سازد. در تحقیقات قبلی برخی از حوزه های زنجیره تامین واکسن مانند محصول، تولید، تخصیص یا توزیع را مورد مطالعه قرار دادند و مدل سازی به صورت جامع و هم جانبه صورت نگرفته است. در نهایت نیز توجه اندکی به استراتژی های اولویت بندی جمعیت با هدف کاهش نرخ مرگ و میر و کاهش کمبودهای واکسن تحت منابع محدود شده است. در این مقاله زنجیره تامین جامع واکسن کووید-۱۹ در کشور ایران، از تامین کننده تا مصرف کننده با در نظر گرفتن اولویت بندی جمعیت در تمامی حوزه ها مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین در این مطالعه تحلیل سناریوهای ریسک اختلال و ارزیابی شاخص های عملکرد کیفیت، در یک بستر تصمیم گیری یکپارچه صورت گرفته است. بدین ترتیب، مقاله حاضر علاوه بر توسعه مدل عملیاتی، سهم مفهومی در حوزه مهندسی و مدیریت کیفیت زنجیره های تامین سلامت ارائه می دهد.

### ۳- روش تحقیق

زنجیره تامین سرد واکسن مورد مطالعه در این پژوهش شامل پنج رکن اصلی و به هم پیوسته است که در قالب یک شبکه چندسطحی طراحی شده اند. هر یک از این ارکان، نقش مشخصی در حفظ کیفیت محصول، تداوم جریان تامین و تضمین سطح خدمت رسانی ایفا می کنند. این زنجیره با دو منبع متمایز تولید واکسن آغاز می شود: تامین کنندگان واکسن خارجی و تولیدکننده واکسن داخلی. تامین کنندگان خارجی شامل شرکت های تولیدکننده بین المللی هستند که مسئول تامین اولیه دوزهای واکسن می باشند. عملکرد این سطح بر قابلیت دسترسی اولیه، زمان تامین و میزان ریسک اختلال عرضه، تأثیر مستقیم دارد. هرگونه تأخیر یا کاهش ظرفیت در این سطح می تواند به کاهش قابلیت اطمینان کل سیستم منجر شود. در صورت وجود ظرفیت تولید داخلی، این رکن به عنوان منبع مکمل تامین، عمل می کند و نقش آن افزایش تاب آوری شبکه و کاهش وابستگی به منابع خارجی است. از منظر مهندسی کیفیت، ثبات تولید و انطباق با استانداردهای نگهداری دمایی از عوامل بحرانی این سطح محسوب می شود. تامین کنندگان داخلی و خارجی، واکسن ها را به مراکز توزیع تحویل می دهند. این مراکز به عنوان گره های واسط ذخیره سازی و تجمع واکسن عمل می کنند. وظیفه اصلی آن ها مدیریت موجودی، کنترل شرایط دمایی و تخصیص بهینه واکسن به سطوح پایین تر است. این سطح، نقش مهمی در کاهش نوسانات و پیشگیری از کمبود یا فساد ایفا می کند. سپس واکسن ها از مراکز توزیع به مراکز درمان استانی مختلف تخصیص داده می شوند. این رکن مسئول دریافت واکسن از مراکز توزیع و تزیق داوطلبین می باشد. عملکرد این سطح، مستقیماً بر شاخص سطح خدمت رسانی و زمان تحویل اثرگذار است. ظرفیت ذخیره سازی محدود و احتمال ریسک اختلال حمل و نقل در این سطح می تواند منجر به افزایش نرخ فساد یا کمبود شود. آخرین سطح شبکه نیز دریافت کنندگان نهایی واکسن هستند. کیفیت خدمت در این سطح از طریق شاخص هایی مانند میزان برآورده سازی تقاضا، زمان انتظار و جلوگیری از اتلاف واکسن سنجیده می شود. هرگونه ناکارآمدی در سطوح بالاتر به صورت مستقیم در این مرحله منعکس می گردد. این ساختار جریان سیستماتیک واکسن ها را از تولید و تهیه تا مصرف نهایی تضمین می کند و مسیر توزیع کنترل شده و قابل ردیابی را امکان پذیر می سازد. ریسک های زنجیره تامین عموماً به دو بخش طبقه بندی می شوند: ریسک های عملیاتی، ناشی از عدم قطعیت ها در تقاضا، ظرفیت، مدت زمان انتظار جهت تحویل و متغیرهای مالی؛ و ریسک های اختلالی، ناشی از بلایای طبیعی یا رویدادهای انسانی که می توانند مستقیماً بر اجزای زنجیره تامین تأثیر بگذارند یا به طور غیر مستقیم آن ها را از طریق اختلالات در زیرساخت های مانند انرژی، حمل و نقل یا سیستم های ارتباطی مختل کنند. از منظر دیگر، ریسک ها بر اساس افق تصمیم گیری و میزان تأثیر آن ها به دو دسته عملیاتی و تاکتیکی طبقه بندی شده اند. ریسک های عملیاتی، ماهیت کوتاه مدت داشته و عمدتاً در اجرای روزمره فرایندها بروز می کنند. این

ریسک‌ها معمولاً قابل پیش‌بینی جزئی بوده اما زمان وقوع آن‌ها نامشخص است. ریسک‌های تاکتیکی دارای افق میان‌مدت بوده و بر سیاست‌های برنامه‌ریزی و تخصیص منابع اثر می‌گذارند. این ریسک‌ها معمولاً ناشی از تغییرات ساختاری یا محیطی هستند و نیازمند بازنگری در تصمیمات مدیریتی می‌باشند. با توجه به ماهیت چندسطحی زنجیره‌تامین سرد واکسن، ریسک‌های موجود در هر رکن شبکه دارای منشأ، شدت و پیامدهای متفاوتی هستند. از این رو، در این پژوهش به جای در نظر گرفتن یک مدل ریسک کلی، چارچوبی سطح‌بندی‌شده برای تحلیل ریسک طراحی گردید که در آن، هر سطح شبکه دارای ساختار ریسک اختصاصی است. ریسک در سطح تأمین‌کنندگان (ریسک عرضه) شامل تأخیر در تحویل، کاهش ظرفیت تولید یا قطع کامل عرضه می‌باشد. پیامد این ریسک عمدتاً کاهش سطح خدمت‌رسانی و افزایش هزینه کمبود می‌باشد. ریسک حمل‌ونقل شامل خرابی وسیله نقلیه، تأخیر در انتقال یا نقص در کنترل دمایی حین حمل است. در مدل پیشنهادی، این ریسک از طریق احتمال خرابی وسیله نقلیه و فساد ناشی از اختلال دمایی لحاظ شده است. اثر مستقیم این ریسک، افزایش نرخ شکست داخلی کیفیت (فساد واکسن) و افزایش هزینه‌های مرتبط می‌باشد. ریسک مراکز توزیع به‌صورت محدودیت ظرفیت، در این مقاله در نظر گرفته شده است. این ریسک به‌صورت افزایش نرخ فساد یا محدودیت ظرفیت مؤثر انبار مدل شده است. پیامد آن افزایش نوسانات سطح موجودی و کاهش پایداری عملکرد سیستم می‌باشد. ریسک مراکز درمان هم به‌صورت عدم قطعیت در تقاضا در نظر گرفته شده است. اثر این ریسک بر شاخص سطح خدمت‌رسانی و زمان انتظار، قابل مشاهده خواهد بود. در چارچوب پیشنهادی، این ریسک‌ها به‌صورت مستقل و همچنین در قالب سناریوهای ترکیبی تحلیل شده‌اند تا اثر هم‌زمان آن‌ها بر شاخص‌های عملکرد کیفیت بررسی گردد. این رویکرد امکان ارزیابی حساسیت سیستم نسبت به هر سطح از زنجیره و شناسایی نقاط بحرانی آسیب‌پذیر را فراهم می‌سازد.

این مطالعه از یک رویکرد ترکیبی استفاده می‌کند که تکنیک‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی را ادغام نموده و از طریق نرم‌افزار AnyLogic اجرا می‌کند. این رویکرد با ترکیب نقاط قوت هر دو روش، تحلیل‌های قوی‌تر و راه‌حل‌های مؤثرتر برای چالش تصمیم‌گیری‌های پیچیده در زنجیره‌های تأمین واکسن ارائه می‌دهد. شکل ۱ تصویر مفهومی از چارچوب تحقیق را برای درک بیشتر ارائه می‌دهد.



شکل ۱- ساختار تحقیق.

Figure 1- Research structure.

## ۱-۳- الگوریتم شبیه‌سازی: مدل‌سازی عامل‌بنیان

با توجه به طبیعت پویای زنجیره‌های تأمین مانند نوسانات تقاضا، تغییرپذیری هزینه و عدم قطعیت کلی سیستم، شبیه‌سازی به عنوان ابزاری مناسب به شمار می‌آید. مدل‌های شبیه‌سازی با بازنمایی دیجیتال سیستم‌های واقعی جهان، ارزیابی چندین سناریو را امکان‌پذیر می‌سازند که این امر ممکن است به راحتی توسط روش‌های بهینه‌سازی ریاضی سنتی امکان‌پذیر نباشد. علاوه بر این، شبیه‌سازی می‌تواند در زمینه لجستیک و مدیریت زنجیره‌تأمین، به عنوان ابزاری قدرتمند برای اعتبارسنجی و تکمیل راه‌حل‌های مشتق‌شده از مدل‌های بهینه‌سازی عمل کند. مدل‌های شبیه‌سازی عمدتاً سه متد را شامل می‌شود: شبیه‌سازی گسسته پیشامد، که در پایین‌ترین سطح جزئیات عمل می‌کند و عمدتاً برای تحلیل‌های سطح عملیاتی اعمال می‌شود. پویایی سیستم، که شامل بالاترین جزئیات بوده و معمولاً برای مدل‌سازی در سطح استراتژیک استفاده می‌شود و مدل‌سازی عامل‌بنیان، که انعطاف‌پذیری بیشتر در طیف گسترده‌ای از جزئیات دارد و اغلب برای تصمیم‌گیری تاکتیکی به کار می‌رود. انتخاب سطح جزئیات مناسب برای مدل‌سازی موفق ضروری است. به‌طور کلی مدل‌سازی عامل‌بنیان برای شبیه‌سازی سیستم‌های زنجیره‌تأمین به دلیل مواردی که در ادامه به آن خواهیم پرداخت، مناسب‌تر است: (۱) درجه بالایی از انعطاف‌پذیری در بازنمایی تعاملات پیچیده و پویا ارائه می‌دهد. (۲) قابلیت اتصال به سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی دارد و دسترسی مستقیم به فاصله بین تسهیلات را امکان‌پذیر می‌سازد و (۳) ذاتاً مقیاس‌پذیر است و تغییرات آسان اجزا و تحلیل سناریوهای مختلف به راحتی در آن قابل انجام است. ما در این مطالعه، چارچوب مدل‌سازی عامل‌بنیان را برای بهره‌برداری از این مزایا اتخاذ کرده‌ایم. فرآیند توسعه مدل با شناسایی عامل‌ها و تعریف رفتار موجودیت‌ها آغاز می‌شود. سپس این عامل‌ها به یکدیگر متصل و در یک محیط پویا قرار می‌گیرند تا بتوانند تعاملات را تسهیل کنند. رفتار کلی سیستم به عنوان نتیجه تعاملات همزمان میان چندین عامل ظاهر می‌شود. در این تحقیق، چهار موجودیت تک‌عاملی به‌طور جداگانه، یعنی تأمین‌کنندگان واکسن برکت، سینوفارم، آسترانکا و اسپوتنیک در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر این، سه موجودیت چندعاملی برای بازنمایی اجزای عملیاتی کلیدی زنجیره‌تأمین یعنی مراکز توزیع، مراکز درمان استانی و ناوگان حمل‌ونقل توسعه یافتند. تعریف اجزای داخلی که رفتار و تعاملات هر عامل را کنترل می‌کنند ضروری است. اجزای اصلی "عامل" در مدل‌سازی عامل‌بنیان شامل پارامترها، متغیرها، رویدادها، مجموعه‌ها، توابع، توابع جدولی و انتقال‌های حالت هستند. این اجزا در جدول ۲ توضیح داده شده‌اند. مجموعه‌های مدل شبیه‌سازی به شرح زیر هستند:

مجموعه‌ها	
i	مجموعه ای از انواع واکسن‌ها ( $i=1, \dots, I$ )
j	مجموعه تأمین‌کنندگان ( $j=1, \dots, J$ )
k	مجموعه مراکز توزیع ( $k=1, \dots, K$ )
l	مجموعه مراکز درمان استانی ( $l=1, \dots, L$ )
v	مجموعه وسایل حمل‌ونقل ( $v=1, \dots, V$ )
t	مجموعه فازهای اجرایی واکسیناسیون ( $t=1, \dots, T$ )
r	مجموعه سناریو ریسک‌های احتمالی ( $r=1, \dots, R$ )

عامل "تأمین‌کننده" برای بازنمایی رفتارهای کلیدی بالا دستی مرتبط با تولید و ارائه واکسن طراحی شده است. ویژگی‌های این عامل، عملکرد لجستیکی (مانند مقادیر و زمان‌بندی) و تأثیرات اقتصادی آن را شبیه‌سازی می‌کند و برای ارزیابی اثربخشی و تاب‌آوری زنجیره‌های تأمین واکسن تحت شرایط مختلف حیاتی است. جدول ۳ ویژگی‌های عامل "تأمین‌کننده" را نشان می‌دهد.

## جدول ۲- اجزای "عامل" در رویکرد عامل‌بنیان.

Table 2- "Agent" components in the agent based approach.

اجزای عامل	شناسه (ID)	تعریف
------------	------------	-------

مقادیری که رفتار عامل را تعریف می کنند و معمولاً ثابت هستند.	P	پارامتر
مقادیری که می توانند در طول شبیه سازی تغییر کنند.	V	متغیر
اتفاقات یا فعالیت هایی که در زمان مشخص رخ می دهند و می توانند وضعیت عامل را تغییر دهند.	E	رویداد
لیستی از عناصر مرتبط که عامل می تواند به آن ها دسترسی داشته باشد.	C	مجموعه
قوانینی که رفتار عامل را مشخص می کنند یا محاسبات را انجام می دهند.	F	تابع
توابعی که خروجی آن ها براساس مقادیر ورودی و جدول داده ها تعیین می شود.	TF	تابع جدولی
تغییرات وضعیت عامل از یک حالت به حالت دیگر، معمولاً در مدل های حالت محور.	T	انتقال حالت

### جدول ۳- ویژگی های عامل "تامین کننده".

Table 3- Attributes of "supplier" agent.

شناسه عامل	ویژگی	تعریف
P	$sc_i$	هزینه تامین هر دور واکسن $i$ ام
P	$m_{jr}$	پارامتر باینری (اگر تامین کننده $z$ ام در سناریو $r$ ام مختل گردد برابر است با عدد یک و در غیر این صورت عدد صفر)
C	$sa_{ijt}$	مقدار عرضه واکسن $i$ ام از تامین کننده $z$ ام در فاز $t$ ام
C	$st_{it}$	زمان عرضه واکسن $i$ ام در فاز $t$ ام
V	$f_{ikt}$	مقدار واکسن $i$ ام که در فاز $t$ ام توسط مرکز توزیع $k$ ام دریافت می شود
V	$y_{ijt}$	میزان تامین واکسن $i$ ام از تامین کننده $z$ ام در فاز $t$ ام
V	$tsc$	هزینه کل تامین واکسن ها
V	$z_{jr}$	متغیر باینری (اگر تامین کننده $z$ ام در سناریو $r$ ام به کار گرفته شود برابر است با عدد یک و در غیر این صورت عدد صفر)
E	---	چک کردن تامین کننده $z$ ام در فاز $t$ ام جهت زمان عرضه

عامل "مرکز توزیع" به عنوان موجودیت لجستیکی واسطه عمل می کند که مسئول دریافت، ذخیره و توزیع واکسن ها به مراکز درمان استانی است. رفتار این عامل توسط ویژگی های عملیاتی و هزینه محور کنترل می شود. این ویژگی ها شبیه سازی پویای موجودی، محدودیت های جغرافیایی و تعاملات با تامین کننده و مراکز درمانی را امکان پذیر می سازد. ویژگی های کلیدی عامل "مرکز توزیع" در جدول ۴ نشان داده شده است.

### جدول ۴- ویژگی های عامل "مرکز توزیع".

Table 4- Attributes of "distribution center" agent.

شناسه عامل	ویژگی	تعریف
P	$DC_k$	نام مرکز توزیع
P	$la_k$	عرض جغرافیایی مرکز توزیع $k$ ام
P	$lo_k$	طول جغرافیایی مرکز توزیع $k$ ام
P	$d_{ikt}$	مقدار تقاضای واکسن $i$ ام در مرکز توزیع $k$ ام در فاز $t$ ام
V	$idc_{ikt}$	سطح موجودی واکسن $i$ ام در مرکز توزیع $k$ ام در فاز $t$ ام
V	$tide$	سطح موجودی کل واکسن ها در کل مراکز توزیع در زمان مشخص
V	$hdc_{ik}$	هزینه نگهداری واکسن $i$ ام در مرکز توزیع $k$ ام
V	$sdc_{ik}$	هزینه کمبود واکسن $i$ ام در مرکز توزیع $k$ ام
V	$tc_{ikl}$	هزینه حمل واکسن $i$ ام از مرکز توزیع $k$ ام به مرکز درمان $l$ ام
V	$thcdc$	هزینه نگهداری کل واکسن ها در مراکز توزیع

هزینه کمبود کل واکسن‌ها در مراکز توزیع	tscdc	V
هزینه حمل‌ونقل کل واکسن‌ها در مراکز توزیع	ttc	V
سهم مرکز توزیع k ام از واکسن i ام	sh <sub>ik</sub>	V
رویدادی جهت محاسبه هزینه نگهداری و کمبود واکسن i ام در مرکز توزیع k ام	---	E
مقدار سفارش مرکز درمان l ام از مرکز توزیع k ام برای واکسن i ام	oq <sub>ikl</sub>	C
زمان سفارش مرکز درمان l ام از مرکز توزیع k ام برای واکسن i ام	ot <sub>ikl</sub>	C
سفارش گذاری مرکز درمان l ام از مرکز توزیع k ام برای واکسن i ام	o <sub>ikl</sub>	C
مدت زمان انتظار جهت تحویل واکسن از مرکز توزیع k ام به مرکز درمان l ام	lthc <sub>kl</sub>	F

هر مرکز درمان توسط نام و مکان جغرافیایی خود تعریف می‌شود. ویژگی‌های عملیاتی عامل "مرکز درمان" شامل سطح موجودی هر واکسن، تقاضای روزانه و تعداد افراد واکسینه‌شده و نشده می‌باشد. سیاست سفارش دهی در این عامل از کنترل موجودی ( $s, S$ ) پیروی می‌کند، جایی که سطوح موجودی به‌طور مداوم نظارت می‌شوند. در این روش هنگامی که موجودی زیر نقطه سفارش مجدد ( $s$ ) قرار می‌گیرد، سفارشی برای پر کردن موجودی تا سطح ( $S$ ) قرار داده می‌شود. شبیه‌سازی رفتار این عامل به روش مذکور، پاسخ به ریسک‌های زنجیره‌تامین و تغییرپذیری تقاضا را امکان‌پذیر می‌سازد. جدول ۵ ویژگی‌ها و رفتارهای کلیدی عامل "مرکز درمان" در زنجیره‌تامین واکسن مدل‌سازی شده را به نمایش می‌گذارد.

#### جدول ۵- ویژگی‌های عامل "مرکز درمان".

Table 5- Attributes of "health center" agent.

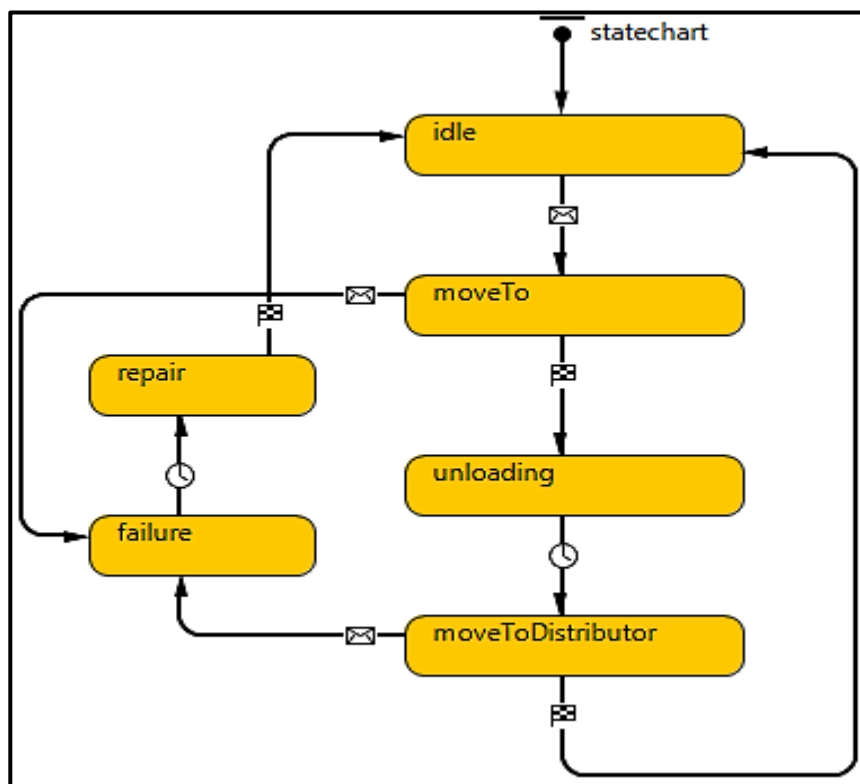
شناسه عامل	ویژگی	تعریف
P	HC <sub>i</sub>	نام مرکز درمان
P	la <sub>i</sub>	عرض جغرافیایی مرکز درمان l ام
P	lo <sub>i</sub>	طول جغرافیایی مرکز درمان l ام
P	dhc <sub>i</sub>	نسبت جمعیت مرکز درمان l ام به کل جمعیت
P	d <sub>it</sub>	مقدار تقاضای واکسن i ام در مرکز درمان l ام در فاز t ام
V	ihc <sub>it</sub>	سطح موجودی واکسن i ام در مرکز درمان l ام در فاز t ام
V	tihc	سطح موجودی کل واکسن‌ها در کل مراکز درمان در زمان مشخص
V	hchc <sub>il</sub>	هزینه نگهداری واکسن i ام در مرکز درمان l ام
V	schc <sub>il</sub>	هزینه کمبود واکسن i ام در مرکز درمان l ام
V	thchc	هزینه نگهداری کل واکسن‌ها در مراکز درمان
V	tschc	هزینه کمبود کل واکسن‌ها در مراکز درمان
V	dehc	مقدار تقاضای کل واکسن‌ها برای مراکز درمانی به صورت روزانه
V	vhc	تعداد افراد واکسینه شده در مراکز درمانی به صورت روزانه
V	uvhc	تعداد افراد غیر واکسینه شده در مراکز درمانی به صورت روزانه
V	s <sub>il</sub>	نقطه سفارش مجدد برای واکسن i ام در مرکز درمان l ام
V	S <sub>il</sub>	حداکثر موجودی جهت سفارش واکسن i ام در مرکز درمان l ام
V	spo <sub>it</sub>	مقدار واکسن i ام فاسد شده در مرکز درمان l ام در فاز t ام به دلیل خرابی وسیله حمل‌ونقل
E	---	رویدادی جهت محاسبه هزینه نگهداری و کمبود واکسن i ام در مرکز درمان l ام
E	---	رویدادی جهت ایجاد تقاضای روزانه
E	---	رویدادی جهت مانیتورینگ دائم سطح موجودی (زمانی که سطح سفارش به s رسید، به اندازه S-s سفارش صادر می‌گردد)

پارامترهای عملیاتی ضروری در عامل "وسیله نقلیه" شامل مقدار واکسن حمل شده، ظرفیت و سرعت وسیله نقلیه و زمان تخلیه است. این عامل تعداد کل خرابی‌های وسایل نقلیه، زمان‌های تعمیر و مقدار واکسن‌های فاسد شده ناشی از خرابی وسایل نقلیه را ردیابی می‌کند. جدول ۶ ویژگی‌های عامل "وسیله نقلیه" را نشان می‌دهد. برای عامل‌هایی مانند وسایل نقلیه با رفتار پیچیده‌تر، نمی‌توان تنها به ویژگی‌های آن بسنده کرد. در چنین مواردی می‌توان با استفاده از چارت‌های حالت این گونه عامل‌ها را توصیف نمود. شکل ۲ چارت حالت برای عامل "وسیله نقلیه" را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل نیز پیداست، ابتدا کامیون‌ها در مراکز توزیع مستقر هستند. بعد از دریافت سیگنال انتقال، آن‌ها به سمت مراکز درمانی اختصاص یافته، حرکت می‌کنند. پس از تحویل واکسن‌ها در یک دوره زمانی مشخص، به سمت مراکز توزیع بازمی‌گردند. وسیله نقلیه در طول حمل چه در زمان رفت و چه در زمان برگشت، ممکن است خرابی را تجربه کند. در این حالت تعمیر وسیله نقلیه می‌بایست صورت پذیرد اما واکسن‌های حمل شده به دلیل تأخیر، فاسد در نظر گرفته می‌شوند.

#### جدول ۶- ویژگی‌های عامل "وسیله حمل و نقل".

Table 6- Attributes of "vehicle" agent.

شناسه عامل	ویژگی	تعریف
P	idck	انتخاب مرکز توزیع k ام به عنوان مبدا حرکت
P	nvr	پارامتر باینری (اگر وسیله حمل و نقل v ام در سناریو r ام دچار اختلال گردد برابر است با عدد یک و در غیر این صورت عدد صفر)
V	idhc <sub>l</sub>	انتخاب مرکز درمان l ام به عنوان مقصد حرکت
V	qiklvt	مقدار واکسن i ام حمل شده از مرکز توزیع k ام به مرکز درمان l ام با وسیله حمل و نقل v ام در فاز t ام
V	w <sub>vr</sub>	متغیر باینری (اگر وسیله حمل و نقل v ام در سناریو r ام به کار گرفته شود برابر است با عدد یک و در غیر این صورت عدد صفر)
V	ca <sub>v</sub>	ظرفیت وسیله حمل و نقل v ام
V	sp <sub>v</sub>	سرعت وسیله حمل و نقل v ام
V	tvm	کل مسافت طی شده توسط ناوگان حمل و نقل در طول دوره
V	tvb	میزان کل خرابی‌های وسایل حمل و نقل در طول دوره
V	thv	مقدار کل واکسن‌های سالم دریافت شده توسط مراکز درمان
V	tsv	مقدار کل واکسن‌های فاسد شده به علت خرابی ناوگان حمل و نقل
T	un <sub>v</sub>	مدت زمان تخلیه واکسن‌ها از وسیله حمل و نقل v ام در نقطه تحویل
T	re <sub>v</sub>	مدت زمان تعمیر وسیله حمل و نقل v ام مطابق نرخ خرابی
TF	b <sub>v</sub>	احتمال خرابی وسیله حمل و نقل v ام مطابق با مسافت پیموده شده
E	---	رویدادی جهت محاسبه خرابی وسیله حمل و نقل v ام مطابق با نرخ خرابی



شکل ۲- چارت حالت عامل "وسیله نقلیه".

Figure 2- State chart of "vehicle" agent.

شبیه‌سازی عامل بنیان، زنجیره‌تامین را به صورت سیستمی با استفاده از عامل‌های موجود (تامین‌کنندگان، مراکز توزیع، مراکز درمان و وسایل نقلیه) و با رفتارهای تعریف‌شده در جداول فوق مدل‌سازی می‌کند. الگوریتم شبیه‌سازی مساله به شرح زیر انجام می‌شود:

- یک راه‌حل کاندید به عنوان ورودی در مدل عامل بنیان:

$$X = \{S_{il}, S_{il}, q_{iklvt}, y_{ijt}\} \quad (1)$$

- پویایی عامل‌ها:

تامین‌کنندگان: مقدار عرضه برای هر تامین‌کننده  $z_j$  تحت تأثیر ظرفیت و وضعیت اختلال قرار دارد:

$$y_{ijt} \leq sa_{ijt} \cdot z_{jr} \quad (2)$$

$$z_{jr} = 1 - m_{jr} \quad (3)$$

مراکز توزیع: معادله به‌روزرسانی موجودی در مرکز توزیع  $k$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$idc_{ikt} = idc_{ik,t-1} + \sum_j y_{ijt} - \sum_l \sum_v q_{iklvt} \quad \forall i, k, t \quad (4)$$

هزینه‌های کمبود، نگهداری و حمل‌ونقل در مراکز توزیع به ترتیب با استفاده از روابط ۵ و ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند:

$$(hcdc_{ik} \cdot idc_{ikt}) \quad (5)$$

$$(scdc_{ik} \cdot \max(0, d_{ikt} - idc_{ikt})) \quad (6)$$

$$(tc_{ikl} \cdot q_{iklvt}) \quad (7)$$

مراکز درمان استانی: سیاست موجودی  $(s, S)$  به صورت زیر اعمال می‌شود:

$$\text{if } ihc_{ilt} \leq s_{il}, \text{ then } q_{iklvt} = S_{il} - ihc_{il,t-1} \quad (8)$$

پویایی موجودی در مرکز درمان  $l$  به شکل زیر است:

$$ihc_{ilt} = ihc_{il,t-1} + \sum_k \sum_v q_{iklvt} - d_{ilt} - spo_{ilt} \quad \forall i, l, t \quad (9)$$

هزینه‌های کمبود، نگهداری و حمل و نقل در مراکز درمان، به ترتیب با استفاده از روابط ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شوند:

$$(hchc_{il} \cdot ihc_{ilt}) \quad (10)$$

$$(schc_{il} \cdot \max(0, d_{ilt} - ihc_{ilt})) \quad (11)$$

$$(tc_{ikl} \cdot q_{iklvt}) \quad (12)$$

وسایل حمل و نقل: مقدار حمل برای هر وسیله نقلیه  $v$ ، به ظرفیت و وضعیت عملیاتی آن محدود است:

$$\text{where } w_{vr} = 1 - n_{vr} \cdot \text{if } n_{vr} = 1 \quad q_{iklvt} \leq ca_v \cdot w_{vr} \quad (13)$$

در صورت وقوع اختلال در وسیله نقلیه ( $w_{vr} = 0$ )، فساد واکسن رخ می‌دهد که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$spo_{ilt} = \sum_k \sum_v q_{iklvt} (1 - w_{vr}) \quad (14)$$

• شبیه‌سازی تحت سناریوهای ریسک

برای هر سناریوی اختلال  $r$ ، با احتمال وقوع  $p_r$  شبیه‌سازی انجام می‌شود. سپس مقادیر مورد انتظار متغیرهای کلیدی سیستم به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$E[idc_{ikt}] = \sum_r p_r \cdot idc_{ikt}^r \quad (15)$$

$$E[ihc_{ilt}] = \sum_r p_r \cdot ihc_{ilt}^r \quad (16)$$

$$E[spo_{ilt}] = \sum_r p_r \cdot spo_{ilt}^r \quad (17)$$

$$E[q_{iklvt}] = \sum_r p_r \cdot q_{iklvt}^r \quad (18)$$

• جمع خروجی‌ها و تابع هدف

تابع هدف اول: حداقل سازی هزینه کل مورد انتظار (مجموع هزینه‌های تامین، نگهداری، کمبود و حمل و نقل)

$$(19)$$

$$f_1 = \sum_t \left( \sum_i \sum_j sc_i \cdot y_{ijt} + \sum_i \sum_k hcdc_{ik} \cdot E[idc_{ikt}] + \sum_i \sum_k scdc_{ik} \cdot \max(0, d_{ikt} - E[idc_{ikt}]) \right. \\ \left. + \sum_i \sum_l hchc_{il} \cdot E[ihc_{ilt}] + \sum_i \sum_l schc_{il} \cdot \max(0, d_{ilt} - E[ihc_{ilt}]) + \sum_i \sum_k \sum_l \sum_v tc_{ikl} \cdot E[q_{iklvt}] \right)$$

تابع هدف دوم: حداقل سازی فساد مورد انتظار واکسن

$$f_2 = \sum_i \sum_l \sum_t E[spo_{ilt}] \quad (20)$$

تابع هدف سوم: حداقل سازی زمان تحویل مورد انتظار

$$f_3 = \sum_i \sum_k \sum_l \sum_v \sum_t lthc_{kl} \cdot E[q_{iklvt}] \quad (21)$$

محاسبه شاخص های کلیدی عملکرد:

$$(22) \quad \text{میانگین سطح موجودی: } \frac{1}{T} \sum_t E[ihc_{ilt}]$$

سطح خدمت رسانی: نسبت سفارش هایی که زمان تحویل آن ها در مراکز درمانی، در محدوده مجاز  $lthc_{kl}$  برآورده شده است.

### ۲-۳- الگوریتم بهینه سازی: الگوریتم ژنتیک مرتب سازی غیر غالب

برای تعیین متغیرهای تصمیم گیری بهینه در مدل زنجیره تامین سرد واکسن، یک مدل بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی طراحی و با استفاده از نرم افزار AnyLogic اجرا شد. در این مقاله، الگوریتم ژنتیک مرتب سازی غیر غالب (NSGA-II) مورد استفاده قرار گرفته است که برای حل مشکلات پیچیده در بهینه سازی زنجیره تامین مناسب می باشد. علی رغم پایبند بودن این الگوریتم به چارچوب کلی الگوریتم های ژنتیک، از طریق تکنیک های پیشرفته برای انتخاب جهش و استراتژی های بقا، خود را متمایز کرده است. در این مطالعه، مراکز درمان تحت سیاست کنترل موجودی  $(s, S)$  عمل می کنند. برای دستیابی به عملکرد بهتر، ترکیبات مختلف ممکن برای نقاط سفارش مجدد  $(s)$  و حداکثر سطوح سفارش  $(S)$  در مراکز درمانی مختلف بهینه سازی می شوند. تابع هدف مساله بهینه سازی نیز، به حداقل رساندن هزینه کل از طریق بهینه کردن  $(s)$  و  $(S)$  در هر مرکز درمان تعریف شده است. در طول آزمایش، مدل شبیه سازی به طور پویا با بهینه ساز تعامل دارد و برای هر راه حل کاندید (یعنی مجموعه خاصی از مقادیر  $(s, S)$ )، شبیه سازی اجرا می شود تا تابع هدف بر اساس شاخص های کلیدی عملکرد (KPIs) مانند سطح موجودی میانگین، زمان مورد انتظار برای تحویل واکسن، سطح خدمات، نرخ فساد واکسن و هزینه کل ارزیابی شود. بهینه ساز به طور مکرر مقادیر پارامتر را برای بهبود این شاخص ها، تحت هدف تعریف شده پالایش می کند. پارامترها و الگوریتم بهینه سازی به شرح زیر هستند:

پارامترها:

$N$ : اندازه جمعیت

$G$ : حداکثر تعداد نسل ها

$p_c$ : احتمال تقاطع

$p_m$ : احتمال جهش

$\alpha_c, \alpha_m$ : شاخص های توزیع برای عملگرهای تقاطع و جهش

• مقدار دهی اولیه:

جمعیت اولیه  $P_0$  شامل  $N$  راه حل مطابق رابطه ۲۳ و با در نظر گرفتن محدودیت ۲۴ تولید می شود:

$$X = \{s_{il}, S_{il}, q_{iklvt}, y_{ijt}\} \quad (23)$$

$$s_{il} \leq S_{il}, q_{iklvt} \leq ca_v, y_{ijt} \leq sa_{ijt} \quad (24)$$

• ارزیابی:

برای هر راه حل  $X \in P_t$ ، شبیه سازی عامل بنیان تحت سناریوی  $r$  اجرا می شود. سپس توابع هدف  $f_1, f_2, f_3$  و همچنین شاخص های کلیدی عملکرد بر اساس خروجی های تجمیع شده محاسبه می گردند.

• مرتب سازی غیر مغلوب:

راه حل  $X_1$  بر  $X_2$  غالب است اگر:

$$\forall m \in \{1,2,3\}, f_m(X_1) \leq f_m(X_2) \text{ and } \exists m, f_m(X_1) < f_m(X_2) \quad (25)$$

برای هر راه حل، فاصله ازدحام به صورت زیر محاسبه می شود:

$$CD_i = \sum_{m=1}^3 \frac{f_m^{(i+1)} - f_m^{(i-1)}}{f_m^{max} - f_m^{min}} \quad (26)$$

انتخاب:

فرآیند انتخاب با استفاده از انتخاب تورنمنتی دودویی انجام می شود، به طوری که راه حل هایی با رتبه کمتر یا در صورت تساوی رتبه، فاصله ازدحام بیشتر ترجیح داده می شوند.

تقاطع و جهش:

تقاطع دودویی شبیه سازی شده (SBX) با احتمال  $p_c$  اعمال می شود:

$$x_{child} = 0.5[(1 + \beta)x_{parent1} + (1 - \beta)x_{parent2}], \quad \beta = (2u)^{1/\alpha_c+1}, \text{ if } u \leq 0.5 \quad (27)$$

جهش چند جمله ای (polynomial) با احتمال  $p_m$  به صورت زیر اعمال می شود:

$$x_{new} = x + \delta(x_{max} - x_{min}), \quad \delta = (2u)^{1/\alpha_m+1} - 1, \text{ if } u \leq 0.5 \quad (28)$$

$$s_{il} \leq S_{il} \quad (29)$$

تکرار:

جمعیت والد  $P_t$  و جمعیت فرزند  $Q_t$  با یکدیگر ترکیب شده و از میان آن ها،  $N$  راه حل برتر برای تشکیل جمعیت نسل بعد  $P_{t+1}$  انتخاب می شوند.

معیار توقف:

الگوریتم پس از رسیدن به  $G$  نسل یا تحقق شرط همگرایی متوقف می شود.

به طور خلاصه مدل ریاضی الگوریتم بهینه سازی به شرح زیر می باشد:

$$(30)$$

$$\begin{aligned} \text{Min } f = & \sum_t \left( \sum_i \sum_j sc_{ij} \cdot y_{ijt} + \sum_i \sum_k hcdc_{ik} \cdot idc_{ikt} + \sum_i \sum_k scdc_{ik} \cdot \max(0, d_{ikt} - idc_{ikt}) \right. \\ & \left. + \sum_i \sum_l hchc_{il} \cdot ihc_{ilt} + \sum_i \sum_l schc_{il} \cdot \max(0, d_{ilt} - ihc_{ilt}) + \sum_t \sum_k \sum_l \sum_v tc_{iklv} \cdot q_{iklv} \right) \end{aligned}$$

$$idc_{ikt} = idc_{ik,t-1} + \sum_j y_{ijt} - \sum_l \sum_v q_{iklv} \quad \forall i, k, t \quad (31)$$

$$ihc_{ilt} = ihc_{il,t-1} + \sum_k \sum_v q_{iklv} - d_{ilt} - spo_{ilt} \quad \forall i, l, t \quad (32)$$

$$q_{iklv} = \begin{cases} S_{il} - ihc_{il,t-1} & \text{if } ihc_{ilt} \leq S_{il} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (33)$$

$$\text{where } w_{vr} = 1 - n_{vr}, \text{ if } n_{vr} = 1 \quad q_{iklv} \leq ca_v \cdot w_{vr} \quad (34)$$

$$s_{il} \leq S_{il} \quad \forall i, l \quad (35)$$

$$y_{ijt}, idc_{ikt}, ihc_{ilt}, q_{iklv}, s_{il}, S_{il} \geq 0 \quad (36)$$

تابع هدف با حداقل کردن هزینه ها در رابطه ۳۰ به نمایش گذاشته شده است. قیود ۳۱ و ۳۲ بالانس موجودی را به ترتیب برای مراکز توزیع و مراکز درمان نشان می دهد. محدودیت ۳۳ نشان دهنده میزان سفارش واکسن توسط مراکز درمانی تحت سیاست (S و s) می باشد. رابطه ۳۴ مربوط به محدودیت ظرفیت وسیله حمل و نقل می باشد. محدودیت ۳۵ رابطه منطقی S و s را نشان می دهد. رابطه ۳۶ نیز نامنفی بودن متغیرهای مربوطه را نشان می دهد.

شبیه‌سازی عامل بنیان پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار AnyLogic به عنوان تابع ارزیابی در الگوریتم *NSGA-II* به کار گرفته می‌شود. در این چارچوب:

- متغیرهای تصمیم هر راه‌حل تولیدشده، توسط *NSGA-II* به عنوان ورودی به مدل شبیه‌سازی منتقل می‌شوند.
- شبیه‌سازی در چندین تکرار و تحت سناریوهای مختلف ریسک اجرا شده و رفتار سیستم از طریق ویژگی‌های عوامل و نمودارهای حالت مدل‌سازی می‌گردد.
- خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی در میان سناریوها تجمیع شده و برای محاسبه توابع هدف  $f_1, f_2, f_3$  و همچنین شاخص‌های کلیدی عملکرد مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- بازخورد تکرارشونده میان الگوریتم‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، منجر به پالایش تدریجی راه‌حل‌ها شده و امکان ایجاد توازن میان شاخص‌های عملکردی مختلف در شرایط عدم قطعیت را فراهم می‌سازد.

#### ۴- مطالعه موردی

زنجیره‌تامین واکسن یک شبکه چندوجهی را نشان می‌دهد که شامل اجزایی مانند مکان‌های تولید، زیرساخت ذخیره‌سازی، ناوگان حمل‌ونقل و مسیرهای توزیع از تسهیلات تولیدی تا مراکز واکسیناسیون است. پیچیدگی آن توسط عدم قطعیت‌های ذاتی، ریسک‌های عملیاتی و اختلالی بالقوه افزایش می‌یابد و در نتیجه، برنامه‌ریزی دقیق و اجرای هماهنگ برای عملیات مؤثر آن ضروری است. سیستم زنجیره سرد برای توزیع واکسن‌های کووید-۱۹ در کشور ایران، بر اساس مدل‌های مبتنی بر تقاضا و دسترسی محدود به دوزهای واکسن می‌باشد. این سیستم برای اطمینان از تحویل به موقع و کارآمد واکسن‌ها به کاربران نهایی مشروط به شرایط عرضه، طراحی شده است. مطالعه حاضر، بر توزیع چندین نوع واکسن کووید-۱۹ تهیه شده توسط دولت ایران تمرکز دارد، از جمله اسپوتنیک، آسترانکا، سینوفارم و کووایران برکت تولید داخل. برای ایجاد مراکز توزیع، ۹ استان در ایران انتخاب شدند: تهران، تبریز، مرکزی، فارس، اصفهان، خوزستان، خراسان رضوی، کرمانشاه و هرمزگان. دوزهای واکسن به‌طور مساوی در این مراکز تخصیص داده می‌شوند و از طریق ناوگان حمل‌ونقل یخچال‌دار به مراکز درمان استانی در پاسخ به سفارشات مربوطه‌شان ارسال می‌گردند. در این مدل، تمامی ۳۱ استان در ایران، به عنوان مراکز درمانی بالقوه، جهت تزریق واکسن در نظر گرفته شده است. مقدار دوزهای واکسن موجود در هر فاز بر اساس مقدار واردات واکسن خارجی و تولید واکسن داخلی در جدول ۷ نشان داده شده است. مقدار عرضه واکسن در هر ماه، از تقسیم مقدار عرضه در هر فاز بر مدت زمان پوشش به دست می‌آید. اطلاعات مرتبط با واکسن‌های خارجی از گمرک ایران و دفتر منطقه‌ای سازمان جهانی بهداشت برای مدیریتانه شرقی و حجم تولید و عرضه واکسن برکت نیز از وزارت بهداشت ایران جمع‌آوری شده است.

جدول ۷- مقدار عرضه هر واکسن در هر فاز

Table 7- The supply amount of each vaccine in each phase ( $sa_{ijt}$ ,  $st_{it}$ ).

فازهای واکسیناسیون	واکسن برکت	واکسن سینوفارم	واکسن آسترانکا	واکسن اسپوتنیک	مجموع (دوز)
فاز اول	0	250,000	0	320,000	570,000
فاز دوم	0	2,400,000	2,150,000	400,000	4,950,000
فاز سوم	4,000,000	17,500,000	2,500,000	325,000	24,325,000
فاز چهارم	8,600,000	113,600,000	11,150,000	3,000,000	136,350,000
مجموع (دوز)	12,600,000	133,750,000	15,800,000	4,045,000	166,195,000

در جدول ۸ مختصات جغرافیایی هر مرکز توزیع به همراه تعداد کامیون‌های یخچال‌دار تخصیص‌یافته به آن‌ها ارائه شده است. مکانیسم سفارش‌دهی برای مراکز درمان بر اساس تهیه از نزدیک‌ترین مرکز توزیع که دارای موجودی می‌باشد، طراحی شده است. در مواردی که موجودی کافی نباشد، یک سفارش عقب افتاده در همان مرکز توزیع باقی می‌ماند و به محض برآورده شدن تقاضا، ارسال صورت می‌گیرد. علاوه بر این،

منطق سفارش دهی در مراکز درمان، تحت سیاست موجودی  $(s, S)$  در نظر گرفته شده است. در ابتدا مقادیر  $(s)$  و  $(S)$  برای همه مراکز درمان به ترتیب روی اعداد  $20000$  و  $50000$  تنظیم می شوند و در نهایت مقادیر بهینه این پارامترها توسط فرایند بهینه سازی به دست خواهند آمد.

#### جدول ۸- مشخصات مراکز توزیع.

Table 8- Specifications of distribution centers.

مراکز توزیع	استان	عرض $(la_k)$ جغرافیایی	طول $(lo_k)$ جغرافیایی	تعداد وسیله حمل و نقل در اختیار
DC <sub>1</sub>	تهران	35.72	51.33	4
DC <sub>2</sub>	فارس	29.1	53.04	2
DC <sub>3</sub>	خراسان رضوی	36.29	59.6	2
DC <sub>4</sub>	آذربایجان شرقی	38.07	46.28	2
DC <sub>5</sub>	اصفهان	32.65	51.66	2
DC <sub>6</sub>	کرمانشاه	34.32	47.07	2
DC <sub>7</sub>	مرکزی	34.08	49.7	2
DC <sub>8</sub>	خوزستان	31.43	49.04	2
DC <sub>9</sub>	هرمزگان	27.41	56.74	2

در جدول ۹ اطلاعات مربوط به جمعیت ایران طبق داده های مرکز آمار در سال ۲۰۲۱ نشان داده شده است. در این جدول مشخصات جغرافیایی هر مرکز درمان که در فرایند شبیه سازی با آن نیاز داریم، ذکر شده است. همچنین سهم واکسن مراکز درمان در استان ها، بر اساس نسبت جمعیت هر استان، به جمعیت کل کشور می باشد.

#### جدول ۹- تقاضای مراکز درمان بر اساس جمعیت.

Table 9- Demand of health centers based on the population.

مراکز درمان	استان	عرض $(la_i)$ جغرافیایی	طول $(lo_i)$ جغرافیایی	جمعیت	درصد سهم $(dhc_i)\%$ تقاضا
HC <sub>1</sub>	آذربایجان شرقی	38.052	46.28	4,040,400	4.81
HC <sub>2</sub>	آذربایجان غربی	37.52	45.046	3,445,500	4.1
HC <sub>3</sub>	اردبیل	38.24	48.29	1,295,200	1.54
HC <sub>4</sub>	اصفهان	32.65	51.67	5,343,800	6.36
HC <sub>5</sub>	البرز	35.49	50.57	2,922,400	3.48
HC <sub>6</sub>	ایلام	33.63	46.42	594,200	0.71
HC <sub>7</sub>	بوشهر	28.92	50.83	1,240,500	1.48
HC <sub>8</sub>	تهران	35.41	51.2	14,033,000	16.7
HC <sub>9</sub>	چهارمحال و بختیاری	32.35	50.82	983,400	1.17
HC <sub>10</sub>	خراسان جنوبی	32.84	59.29	818,300	0.97
HC <sub>11</sub>	خراسان رضوی	36.3	59.6	6,889,200	8.2
HC <sub>12</sub>	خراسان شمالی	37.45	57.32	877,200	1.04
HC <sub>13</sub>	خوزستان	31.53	49.88	4,994,000	5.94
HC <sub>14</sub>	زنجان	36.67	48.48	1,101,500	1.31

0.9	757,200	53.39	35.57	سمنان	HC <sub>15</sub>
3.67	3,085,200	60.85	29.45	سیستان و بلوچستان	HC <sub>16</sub>
6.01	5,054,700	52.5	29.46	فارس	HC <sub>17</sub>
1.58	1,326,200	50	36.26	قزوین	HC <sub>18</sub>
1.66	1,399,400	50.89	34.64	قم	HC <sub>19</sub>
1.98	1,665,700	47	35.3	کردستان	HC <sub>20</sub>
3.96	3,330,800	57.06	30.28	کرمان	HC <sub>21</sub>
2.37	1,992,300	46.42	34.34	کرمانشاه	HC <sub>22</sub>
0.89	745,300	51.36	30.39	کهگیلویه و بویراحمد	HC <sub>23</sub>
2.35	1,972,500	54.44	36.86	گلستان	HC <sub>24</sub>
3.05	2,563,000	49.63	37.22	گیلان	HC <sub>25</sub>
2.13	1,791,200	48.35	33.46	لرستان	HC <sub>26</sub>
4.02	3,375,700	53.059	36.56	مازندران	HC <sub>27</sub>
1.74	1,462,500	49.67	34.08	مرکزی	HC <sub>28</sub>
2.3	1,933,600	56.26	27.18	هرمزگان	HC <sub>29</sub>
2.1	1,766,300	48.51	34.8	همدان	HC <sub>30</sub>
1.49	1,252,500	54.36	31.89	یزد	HC <sub>31</sub>
<b>100</b>	<b>84,052,700</b>			<b>مجموع</b>	

با توجه به عدم قطعیت قابل توجه در برآورد تقاضای واکسن کووید-۱۹ در مقیاس جهانی، در کنار محدودیت‌های عملیاتی در دسترسی هم‌زمان تمامی افراد به واکسن، ضرورت طراحی و اجرای سیاست‌های اولویت‌بندی برای گروه‌های جمعیتی بیش از پیش برجسته می‌شود. چنین اولویت‌بندی، امکان تخصیص کارآتر منابع محدود را فراهم کرده و از اتلاف ظرفیت‌های موجود در زنجیره تأمین جلوگیری می‌کند. در واقع، این رویکرد با هدایت هدفمند جریان توزیع واکسن به سمت گروه‌های با ریسک بالاتر، نه تنها کارایی تخصیص را افزایش می‌دهد، بلکه اثربخشی کلان برنامه‌های واکسیناسیون را نیز بهبود می‌بخشد. تمرکز اصلی در این چارچوب، بر حفاظت از گروه‌های پرخطر و آسیب‌پذیر، از جمله سالمندان، بیماران دارای بیماری‌های زمینه‌ای و کارکنان بخش سلامت قرار دارد. شواهد تجربی نشان می‌دهد که ایمن‌سازی این گروه‌ها در مراحل اولیه، می‌تواند به طور معناداری شدت بروز بیماری، فشار وارده بر سیستم‌های بهداشتی-درمانی و نرخ مرگ‌ومیر را کاهش دهد. از این رو، اولویت‌بندی جمعیت هدف نه تنها یک انتخاب اجرایی، بلکه یک ضرورت راهبردی برای مدیریت بحران‌های بهداشتی در شرایط عدم قطعیت محسوب می‌شود و نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای تاب‌آوری سیستم سلامت ایفا می‌کند. جدول ۱۰ اولویت‌بندی گروه‌ها برای واکسیناسیون را طبق سند استراتژیک تصویب شده توسط دولت ایران نشان می‌دهد. اطلاعات مربوطه از "وزارت بهداشت" و "مرکز آمار" ایران جمع‌آوری شده است. از آنجایی که همه واکسن‌ها در دو دوز تزریق می‌شوند، ساختار تقاضا در دوره‌های زمانی مختلف به صورت پویا تعریف شده است. به عبارت دیگر، تقاضای هر دوره (از دوره دوم به بعد) شامل مجموع تقاضای دوز اول برای افراد جدید و تقاضای دوز دوم برای افرادی است که در دوره‌های پیشین دوز اول را دریافت کرده‌اند. همچنین، به منظور ساده‌سازی و همگن‌سازی تحلیل، فاصله زمانی میان دوز اول و دوم برای تمامی انواع واکسن‌ها به طور میانگین ۳۰ روز در نظر گرفته شده است. این فرض، ضمن حفظ واقع‌گرایی مدل، امکان تحلیل یکپارچه و مقایسه‌پذیر سناریوهای مختلف را فراهم می‌سازد.

جدول ۱۰- برنامه ایمن‌سازی چند فازی کووید-۱۹ در ایران.

Table 10- Iran's multi-phase COVID-19 immunization plan.

فازهای واکسیناسیون	گروه‌های اولویت دار	مدت زمان پوشش	افراد واجد شرایط (میلیون نفر)	تقاضای واکسن در هر ماه با در نظر گرفتن دو دوز (میلیون دوز)
--------------------	---------------------	---------------	-------------------------------	--

1.5	1.5	یک ماه	کادر درمان	فاز اول
$6+1.5=7.5$			افراد دارای بیماری‌های سخت بین ۱۶ تا ۶۴ سال و افراد عادی بالای ۶۵ سال	فاز دوم
$6+6=12$	12	دو ماه		
$6.4+6=12.4$			افراد دارای مشاغل حساس با روابط اجتماعی زیاد	فاز سوم
$6.4+6.4=12.8$	19.2	سه ماه		
$6.4+6.4=12.8$				
$8.55+6.4=14.95$				
$8.55+8.55=17.1$				
$8.55+8.55=17.1$				
$8.55+8.55=17.1$	51.3	شش ماه	عموم مردم	فاز چهارم
$8.55+8.55=17.1$				
$8.55+8.55=17.1$				
$8.55+8.55=17.1$				
<b>159.45</b>	<b>84</b>	<b>دوازده ماه</b>		<b>مجموع</b>

جهت تخصیص مقادیر صحیح به داده‌های ورودی در مدل شبیه‌سازی از ابزاری به نام (CIVIC) استفاده شده است که به یک پلتفرم دیجیتال و مبتنی بر جامعه اشاره دارد که برای کمک به شهروندان، دولت‌ها و سازمان‌ها برای پاسخ به همه‌گیری کووید-۱۹ طراحی شده است. در واقع ابزار (CIVIC) یک تخمین سازمان یافته و جامع از هزینه‌های عملیاتی در استقرار زنجیره تامین واکسن‌های کووید-۱۹ می‌باشد که در جدول ۱۱ به آن اشاره شده است.

جدول ۱۱- داده‌های ورودی استفاده شده در مدل شبیه‌سازی.

Table 11- Input data used in the simulation model.

ویژگی	تابع توزیع / مقدار	واحد
SC <sub>astrzeneka</sub>	Uniform [2.15,5.5]	دلار/دوز
SC <sub>sinopharm</sub>	Uniform [10,15]	دلار/دوز
SC <sub>sputnic</sub>	Uniform [12,16]	دلار/دوز
SC <sub>barakat</sub>	Uniform [2.15,5.5]	دلار/دوز
hcdc <sub>ik</sub>	Uniform [8,12]	دلار/دوز
hchc <sub>il</sub>	Uniform [10,14]	دلار/دوز
scdc <sub>ik</sub>	Uniform [2,4]	دلار/دوز
schc <sub>il</sub>	Uniform [2,4]	دلار/دوز
tc <sub>ikl</sub>	Uniform [0.32,2.3]	دلار/کیلومتر
ca <sub>v</sub>	5000	دوز
sp <sub>v</sub>	60	کیلومتر/ساعت
un <sub>v</sub>	0.5	ساعت

روز	Uniform [0.5,1]	re <sub>v</sub>
روز	اول اسفند سال ۱۳۹۹ الی اول اسفند سال ۱۴۰۰	مدت زمان اجرا

به منظور افزایش شفافیت مدل سازی و امکان ارزیابی پذیری نتایج، کلیه پارامترهای مورد استفاده در مدل بر اساس منبع و ماهیت داده ها طبقه بندی شده اند. این طبقه بندی شامل سه دسته اصلی داده های واقعی، داده های تخمینی مبتنی بر مطالعات پیشین و پارامترهای سناریویی می باشد. جدول ۱۲ منابع داده و فرضیات مدل را تشریح می کند.

جدول ۱۲- منابع داده و فرضیات مدل.

Table 12- Sources of data and model assumptions.

منبع /منطق	نوع داده	پارامتر
مرکز آمار ایران	واقعی	اطلاعات جمعیتی
سازمان گمرک ایران	واقعی	میزان عرضه واکسن های خارجی
وزارت بهداشت ایران	واقعی	میزان عرضه واکسن های داخلی
Civic tool	تخمینی	هزینه تامین، هزینه حمل، هزینه نگهداری و کمبود واکسن در مراکز توزیع و مراکز درمانی
مطالعات مشابه و نظر خبرگان	تخمینی	نرخ خرابی، زمان تعمیر، سرعت وسیله نقلیه و مدت زمان تخلیه بار
طراحی شبیه سازی	سناریویی	توزیع تقاضا

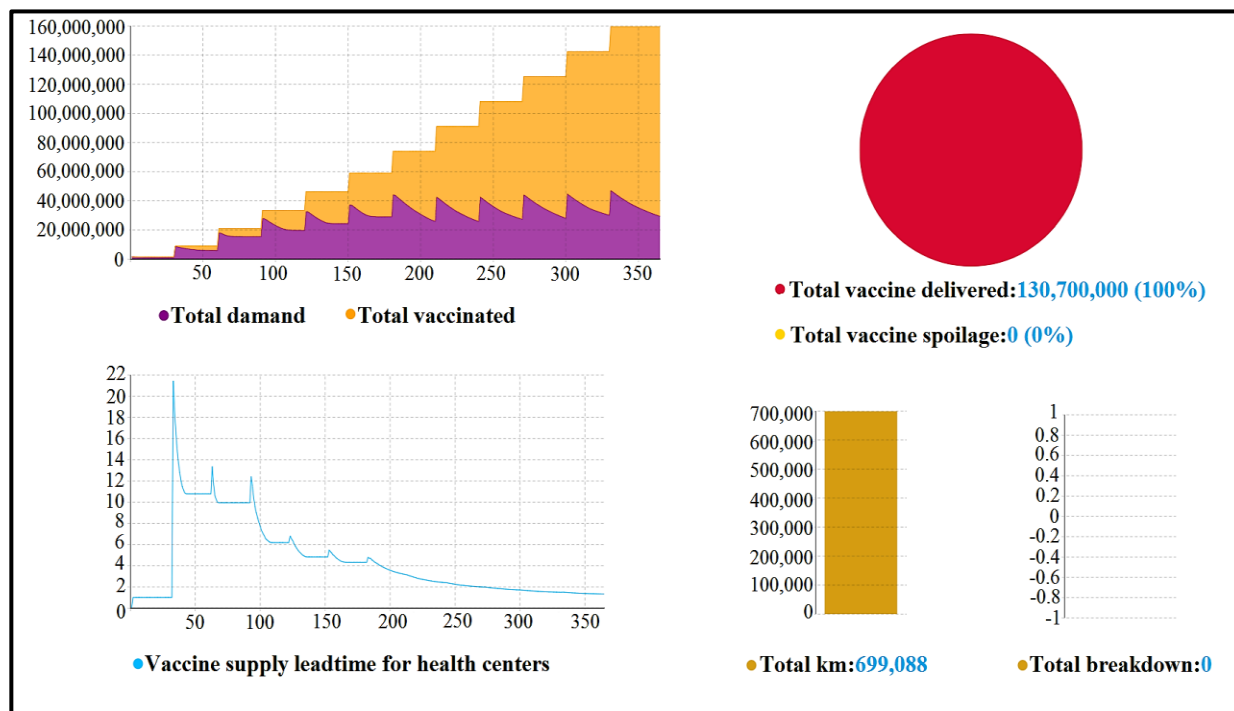
## ۵- نتایج عددی

تحلیل نتایج از منظر مهندسی کیفیت نشان می دهد که عملکرد زنجیره تامین سرد واکسن به شدت تحت تأثیر تغییرپذیری ناشی از ریسک های عملیاتی و اختلالی قرار دارد. این بخش نتایج چارچوب شبیه سازی- بهینه سازی چندمعیاره اعمال شده بر زنجیره تامین سرد واکسن کووید-۱۹ در ایران را تحت عنوان سه سناریو ارائه می دهد: (۱) سناریوی بدون اختلال (۲) سناریوی ریسک اختلال در وسیله حمل و نقل و (۳) سناریوی ریسک اختلال در عرضه واکسن. در مدل ارائه شده، هر سناریو با استفاده از شاخص های کلیدی عملکرد، مانند نزدیک ترین زمان انتظار جهت تزریق واکسن، سطح خدمات، میزان رفت و آمد کل وسایل حمل و نقل، سطوح موجودی در مراکز توزیع و مراکز درمان استانی، فساد واکسن و اجزای هزینه، مورد ارزیابی و مقایسه قرار می گیرند.

### ۵-۱- سناریوی بدون اختلال

شکل ۳ عملکرد پویای زنجیره تامین سرد واکسن را تحت شرایط ایده آل نشان می دهد، جایی که هیچ ریسک اختلالی وجود ندارد. شبیه سازی چهار فاز کمپین واکسیناسیون ملی را پوشش می دهد و چندین روند کلیدی در لجستیک و تحویل خدمات را نشان می دهد. تقاضای کل واکسن ۱۵۹/۴۵ میلیون دوز می باشد که در این سناریو ۱۳۰/۷ میلیون دوز در طول دوره یکساله به مراکز درمانی ارسال شده و از این تعداد، حدود ۱۳۰/۰۳ میلیون دوز با موفقیت تزریق شدند و سطح خدمات ۰/۸۲ را به دست آورد (جدول ۱۳). با توجه به شکل ۳، افزایش پیش رونده تعداد افراد واکسینه شده در سراسر افق شبیه سازی مشهود می باشد. نوسانات مدت زمان انتظار جهت تزریق واکسن، با دسترسی موجودی و نرخ های عرضه رابطه مستقیم دارد. در فاز دوم واکسیناسیون، شکاف قابل توجهی بین تقاضا و عرضه وجود دارد به گونه ای که میزان تقاضا ۱۹/۵ میلیون دوز بوده در حالی که تنها ۴/۹۵ میلیون عرضه صورت گرفته است. این کمبود باعث پیک موقتی در مدت زمان انتظار تزریق واکسن می شود. میانگین مدت زمان انتظار در مراکز درمان استانی، ۴ روز است، که از پیک ۲۱ روز در فاز دوم ناشی از کمبود ۱۴/۵۵ میلیون دوز، تا ۱/۳ روز در پایان دوره شبیه سازی و زمانی که عرضه پایدار می شود، متغیر است. کل فاصله پیموده شده توسط ناوگان حمل و نقل ۶۹۹۰۰۸۸ کیلومتر است و

عملیات توزیع رویتین را منعکس می کند و از آنجایی که در این سناریو هیچ اختلال حمل و نقلی در نظر گرفته نشده است، هیچ فساد واکسنی نیز رخ نمی دهد. لازم به ذکر است که مقادیر فوق، معیاری برای مقایسه با سناریوها با ریسک اختلالی محسوب می شوند.



شکل ۳- مقدار شاخص های کلیدی عملکرد (dehc, vhc, uvhc, lthc<sub>kl</sub>, tv<sub>m</sub>, tv<sub>b</sub>, th<sub>v</sub>, ts<sub>v</sub>) در سناریوی بدون ریسک اختلال.

Figure 3- KPI's value (dehc, vhc, uvhc, lthc<sub>kl</sub>, tv<sub>m</sub>, tv<sub>b</sub>, th<sub>v</sub>, ts<sub>v</sub>) in scenario without risk of disruption.

جدول ۱۳- مقایسه نتایج شبیه سازی با سناریوهای مختلف.

Table 13- Comparison of simulation results with different scenarios.

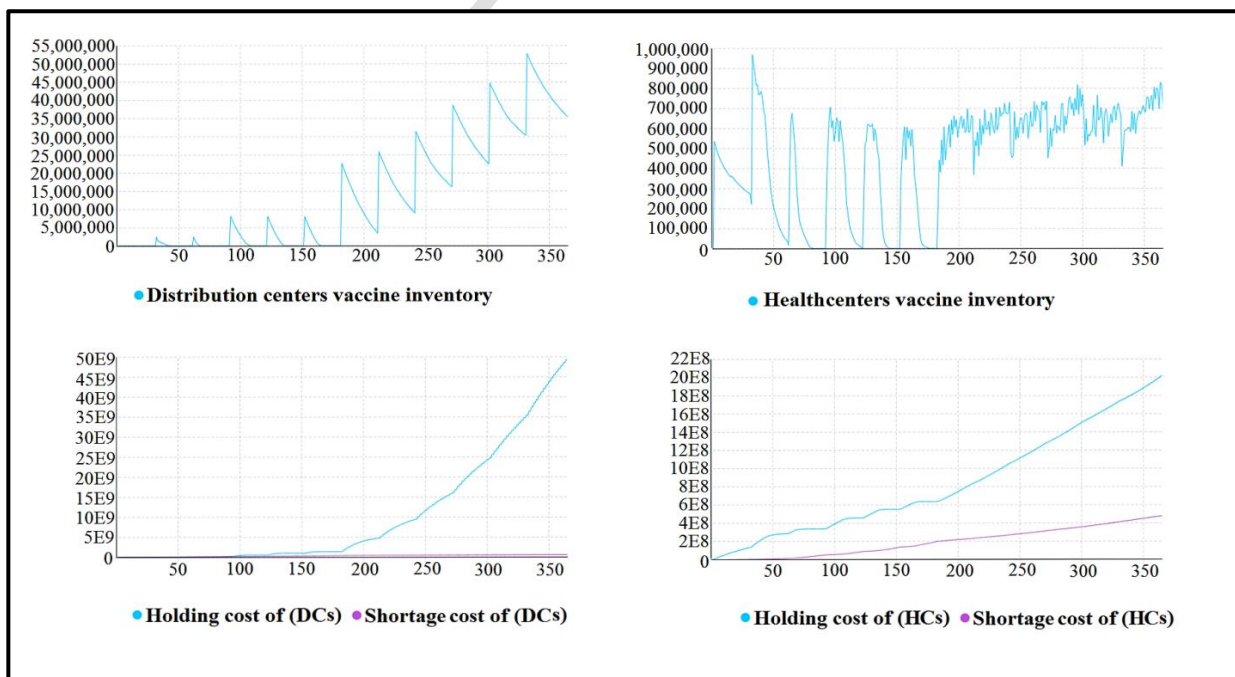
سناریوها	میانگین زمان انتظار جهت تحویل (روز)	سطح خدمات	کل مسافت پیموده شده (کیلومتر)	کل خرابی وسائل حمل و نقل (مورد)	کل واکسن فاسد شده (دوز)	میانگین موجودی واکسن در مراکز توزیع (دوز)	میانگین موجودی واکسن در مراکز درمان (دوز)
	(Avg of lthc)	[0,1]	(tvm)	(tvb)	(tsv)	(Avg of tide)	(Avg of tihc)
بدون اختلال	4	0.82	699,088	0	0	14,000,000	462,326
اختلال در وسیله حمل و نقل	4.5	0.78	648,977	442	8,901,489	12,784,992	437,775
اختلال در عرضه واکسن	4.7	0.76	666,742	0	0	10,774,831	440,173
سناریوها	هزینه کل تامین واکسن	هزینه کل حمل و نقل (دلار)	هزینه کل نگهداری در مراکز توزیع	هزینه کل نگهداری در مراکز درمان	هزینه کل کمبود در مراکز توزیع	هزینه کل کمبود در مراکز درمان	هزینه کل (دلار)

	(دلار)	(دلار)	(دلار)	(دلار)	(دلار)	(دلار)	
	(tsche)	(tsede)	(thche)	(thede)	(tte)	(tsc)	
بدون اختلال	5.47E10	4.78E8	5.97E8	2.02E9	4.96E10	932,775	1.93E9
اختلال در وسیله حمل و نقل	5.02E10	5.49E8	6.32E8	1.92E9	4.52E10	856,929	1.87E9
اختلال در عرضه واکسن	4.27E10	5.43E8	6.29E8	1.93E9	3.77E10	873,563	1.84E9

شکل ۴ موجودی واکسن را در طول زمان ردیابی می‌کند. هم مراکز توزیع و هم مراکز درمان کاهش موجودی و در برخی موارد موجودی صفر را تا پایان فاز سوم واکسیناسیون تجربه می‌کنند. با این حال، این امر با افزایش عرضه در فاز چهارم بهبود یافت. به طور کلی میانگین موجودی در مراکز توزیع به میزان قابل توجهی بالاتر از مراکز درمان است (۱۴ میلیون در مقابل ۴۶۲۰۳۲۶ دوز)، که نشان دهنده تمایل سیستم به ذخیره‌سازی مرکزی برای به حداقل رساندن هزینه‌های نگهداری است. شاخص‌های مالی شامل هزینه‌های نگهداری، کمبود، عرضه و حمل و نقل در جدول ۱۳ نشان داده شده‌اند. شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کمبودهای عرضه در فازهای اولیه واکسیناسیون، حتی در شرایط ایده‌آل می‌توانند منجر به زمان‌های انتظار طولانی و سطوح خدمات موقتاً کاهش یافته شوند. بنابراین، برنامه‌ریزی و پیش‌بینی در تهیه واکسن و ایجاد ذخیره مناسب به ویژه در فازهای اولیه، ضروری است.

## ۲-۵- سناریوی ریسک اختلال در وسیله حمل و نقل

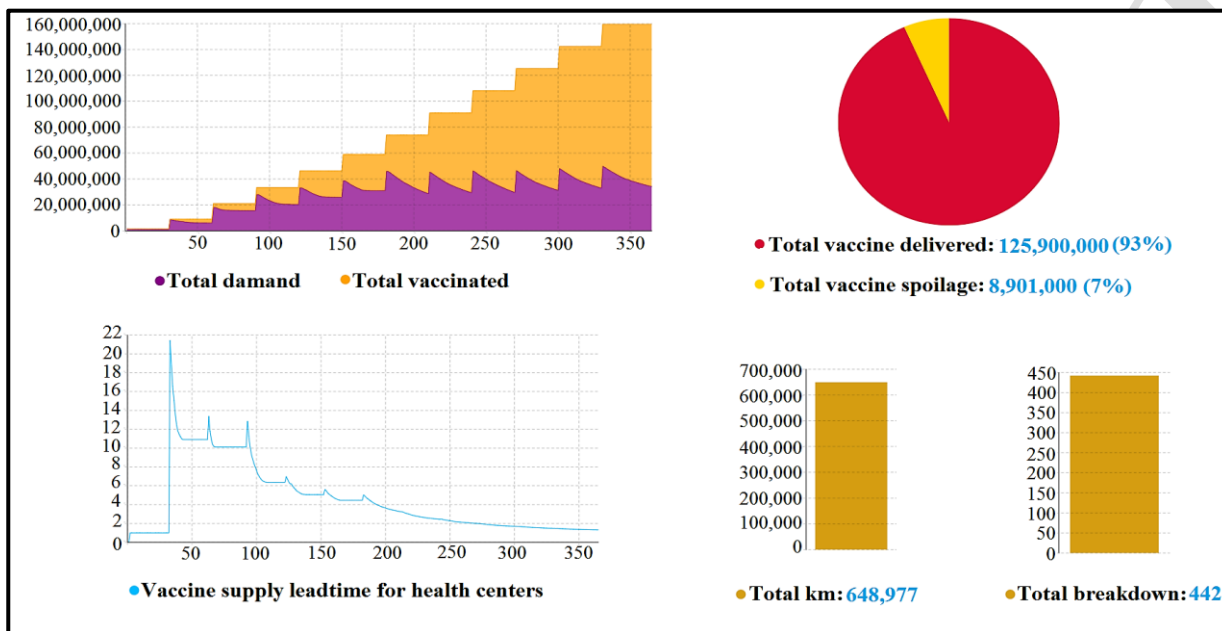
شکل ۵ بازنمایی بصری از عملکرد زنجیره تامین سرد واکسن کووید-۱۹ تحت تأثیر ریسک‌های اختلالی حمل و نقل ارائه می‌دهد. این سناریو ریسک‌های جهان واقعی مرتبط با قابلیت اطمینان وسیله نقلیه در سیستم‌های لجستیک را در نظر می‌گیرد. ابزار CIVIC نرخ خرابی وسیله نقلیه را به عنوان تابعی از فاصله طی شده (کیلومتر) در نظر گرفته است و با افزایش فاصله پیمایش، احتمال خرابی وسیله نقلیه نیز افزایش می‌یابد. برای فاصله‌های بسیار کوتاه، نرخ خرابی صفر است و هیچ ریسکی در شروع استفاده نخواهد داشت.



شکل ۴- مقدار شاخص‌های کلیدی عملکرد (tsche, thche, tsede, thede, tsc, ttc) در سناریوی بدون ریسک اختلال.

Figure 4- KPI's value (tidc, thedc, tscdc, tihc, thhc, tschc) in scenario without risk of disruption.

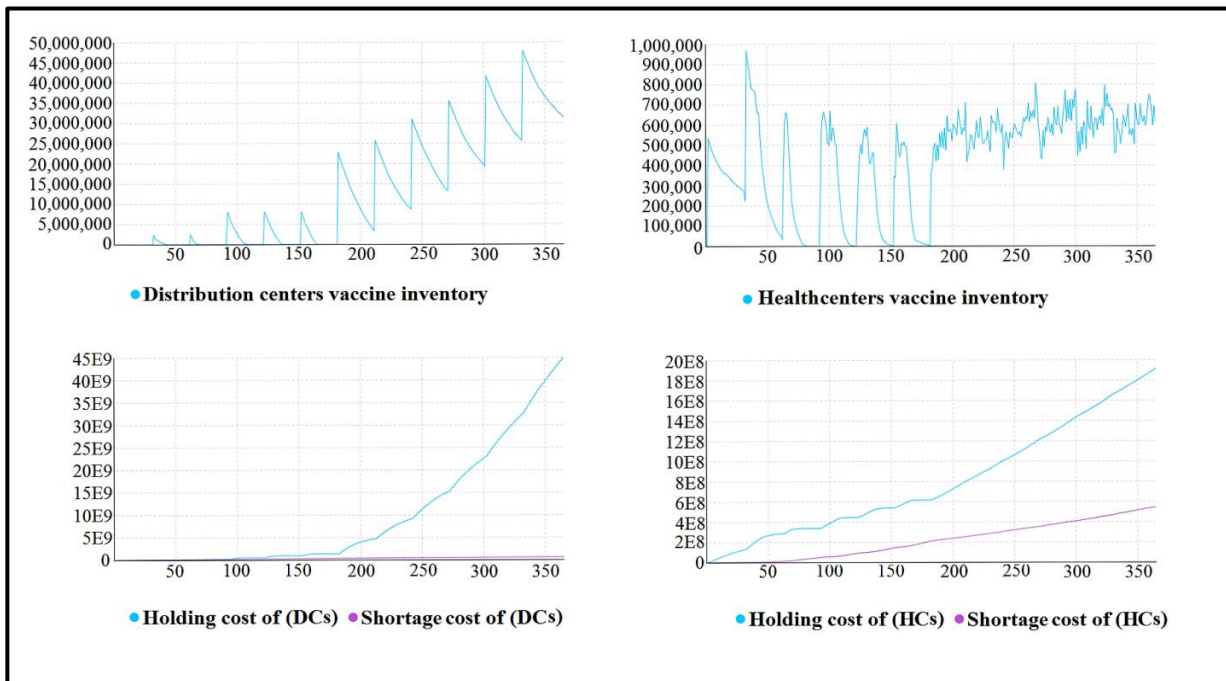
با افزایش فاصله پیمایش به ۲۰۰ کیلومتر، نرخ خرابی به ۵٪ افزایش می‌یابد. این نرخ با فاصله ادامه می‌یابد و به ۷٪ در ۵۰۰ کیلومتر، ۱۰٪ در ۱۰۰۰ کیلومتر و ۱۵٪ در ۵۰۰۰ کیلومتر می‌رسد. برای استفاده گسترده، مانند ۱۰۰۰۰ کیلومتر و ۱۰۰۰۰۰ کیلومتر، نرخ‌های خرابی به ترتیب ۲۰٪ و ۳۰٪ در نظر گرفته می‌شوند. در مجموع حدود ۱۲۵ میلیون دوز، تزریق واکسن انجام شد که نشان دهنده ۴٪ کاهش (از ۰/۸۲ به ۰/۷۸) در پوشش خدمات می‌باشد. به دلیل فواصل تحویل طولانی ناشی از خرابی‌های وسیله نقلیه، میانگین مدت زمان انتظار نیز به ۴/۵ روز افزایش یافت.



شکل ۵- مقدار شاخص‌های کلیدی عملکرد (dehc, vhc, uvhc, lthc<sub>kl</sub>, tv<sub>m</sub>, tv<sub>b</sub>, th<sub>v</sub>, ts<sub>v</sub>) در سناریوی ریسک اختلال وسیله نقلیه.

Figure 5- KPI's value (dehc, vhc, uvhc, lthc<sub>kl</sub>, tv<sub>m</sub>, tv<sub>b</sub>, th<sub>v</sub>, ts<sub>v</sub>) in vehicle disruption risk scenario.

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، پیک‌های مدت زمان انتظار به‌طور دوره‌ای با پیک‌های خرابی‌های وسیله نقلیه هم‌راستا هستند و باعث تأخیر در رسیدن واکسن به مراکز درمان می‌شوند. مدل در این سناریو، ۴۴۲ مورد خرابی وسیله نقلیه را تجربه می‌کند، که هر کدام باعث تأخیرهای بالقوه و فساد واکسن می‌شوند. نتیجه شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تعداد حدود ۸/۹ میلیون دوز واکسن به علت خرابی وسیله حمل‌ونقل فاسد شدند که حدود ۷٪ از واکسن‌های توزیع‌شده در این سناریو می‌باشد. فساد عمدتاً نتیجه شکست زنجیره سرد در طول خرابی‌ها است، جایی که واکسن‌های حساس به دما نمی‌توانستند در محدوده قابل قبول حفظ شوند. میزان کل حرکت وسایل نقلیه حدود ۷٪ کمتر از سناریوی بدون اختلال (۶۴۸۹۷۷ کیلومتر) است. این کاهش عمدتاً ناشی از مدت زمان توقف وسیله نقلیه در دوره‌های نگهداری و نیاز متعاقب به تغییر مسیر، یا تأخیر در سفرهای توزیع پیش‌برنامه‌ریزی‌شده می‌باشد. با وجود پیمایش مسافت کمتر، اثرات منفی به دلیل افزایش فساد و تأخیر خدمات در سیستم مشهود می‌باشد. به علت اثرات خرابی ناشی از شکست، میانگین سطح موجودی در مراکز توزیع به ۱۲/۷ میلیون دوز کاهش می‌یابد (از ۱۴ میلیون در سناریوی پایه)، در حالی که میانگین موجودی در مراکز درمان، کاهش ملایمی به ۴۳۷۰۷۷۵ دوز را تجربه می‌کند. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، چندین دوره کاهش موجودی به‌ویژه در سطح مراکز توزیع، ناشی از تأخیرهای تحویل واکسن یا فساد مشهود است. از دیدگاه مالی، اختلالات وسیله نقلیه منجر به کاهش جزئی در هزینه‌های حمل‌ونقل و نگهداری گردید، اما هزینه‌های کمبود را به دلیل تقاضای برآورده نشده افزایش داد.



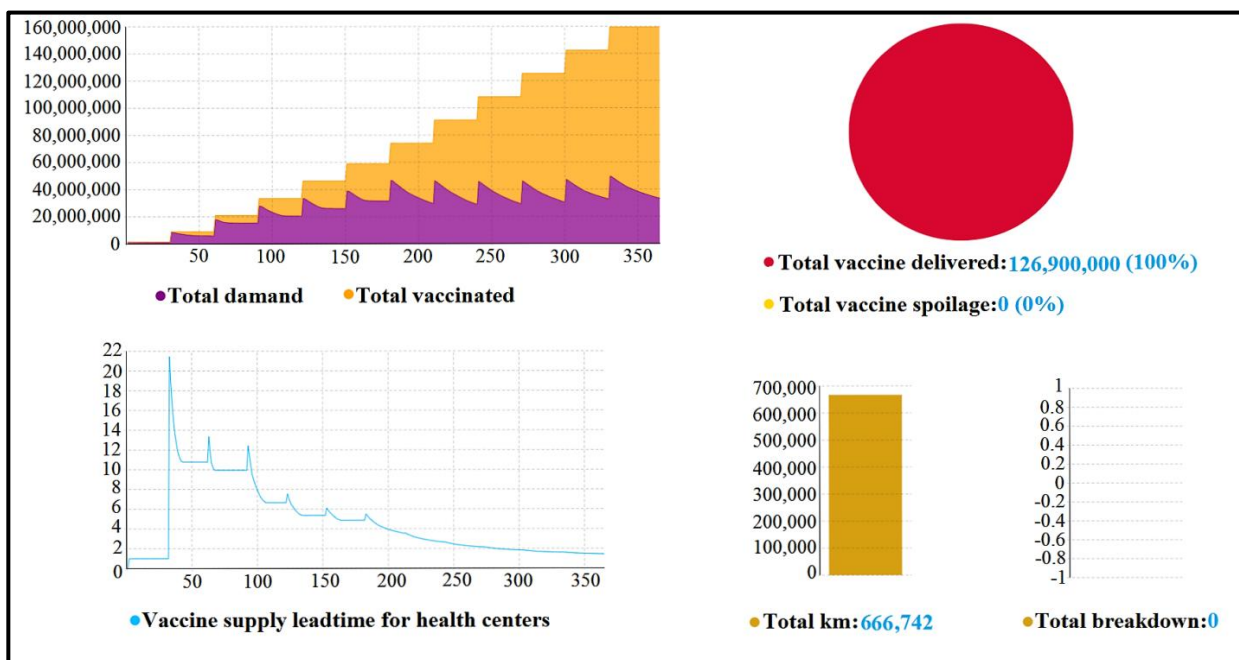
شکل ۶- مقدار شاخص‌های کلیدی عملکرد (tidc, thcdc, tscdc, tihc, thchc, tschc) در سناریوی ریسک اختلال وسیله نقلیه.

Figure 6- KPI's value (tidc, thcdc, tscdc, tihc, thchc, tschc) in vehicle disruption risk scenario.

این بخش آسیب‌پذیری ذاتی زنجیره‌های تأمین واکسن به اختلالات حمل‌ونقل را به‌ویژه هنگام مدیریت واکسن‌های حساس به دما در سیستم‌های زنجیره سرد برجسته می‌کند. حتی نرخ‌های متوسط خرابی وسیله نقلیه، می‌تواند اثرات منفی از جمله تأخیرهای تحویل، عدم تعادل موجودی، افزایش هدررفت واکسن و بروز شکست‌های کیفیت را به دنبال داشته باشند. این امر بیانگر کاهش توانایی سیستم در حفظ ویژگی‌های بحرانی کیفیت در شرایط ناپایدار محیطی است. زنجیره‌تأمین در غیاب اقدامات اضافی مانند وسایل نقلیه پشتیبان یا بافرهای ذخیره‌سازی محلی، ظرفیت محدودی برای پاسخ مؤثر به چنین ریسک‌های اختلالی نشان می‌دهد.

### ۵-۳- سناریوی ریسک اختلال در عرضه واکسن

شکل ۷ پاسخ پویای زنجیره‌تأمین سرد واکسن کووید-۱۹ تحت تاثیر ریسک اختلال در عرضه واکسن آسترزنکا، به علت توقف تولید ناشی از نگرانی‌های نظارتی و ایمنی از ابتدای فاز سوم را نشان می‌دهد. این سناریو یک چالش واقعی را که بسیاری از کشورها در طول همه‌گیری با آن مواجه بودند، منعکس می‌کند. اثر فوری این ریسک اختلال بالادستی در کاهش تعداد افراد واکسینه‌شده مشهود است، به گونه‌ای که با ارسال ۱۲۶/۹ میلیون دوز واکسن ارسالی به مراکز درمان استانی، حدود ۱۲۲/۱ میلیون دوز تزریق انجام شد. این سناریو پایین‌ترین سطح خدمات یعنی ۰/۷۶ را نشان می‌دهد و حدود ۲۵٪ از سفارش‌ها یا برآورده نشده یا تحت تأخیرهای قابل توجه قرار گرفته‌اند. بالاترین میانگین زمان انتظار را نیز، این سناریو با ۴/۷ روز به خود اختصاص داد. کل حرکت پیموده شده توسط وسایل حمل‌ونقل ۶۶۶۱۷۴۲ کیلومتر است، کمی بالاتر از سناریوی اختلال وسیله نقلیه اما همچنان پایین‌تر از مورد بدون اختلال. این نتیجه عمدتاً به کاهش فعالیت توزیع ناشی از کاهش دسترسی واکسن نسبت داده می‌شود. همچنین با توجه به فرض عدم خرابی وسایل حمل‌ونقل در این سناریو، فساد واکسن رخ نمی‌دهد.



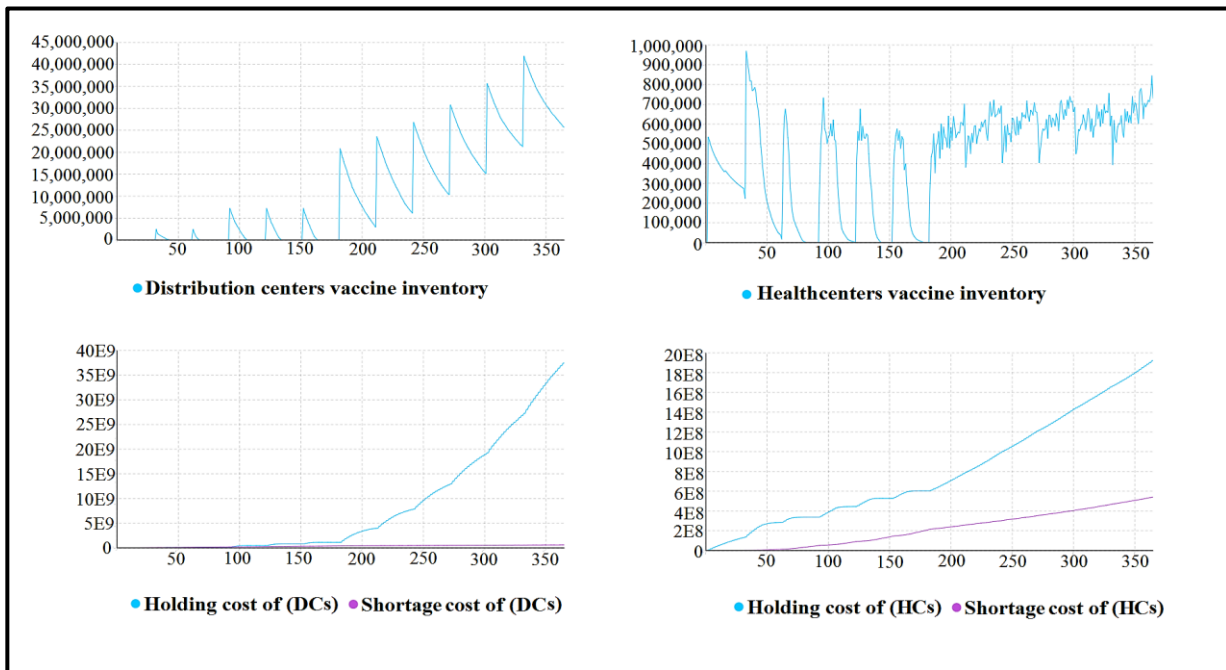
شکل ۷- مقدار شاخص کلیدی عملکرد (dehc, vhc, uvhc, lthck<sub>i</sub>, tv<sub>m</sub>, tv<sub>b</sub>, th<sub>v</sub>, ts<sub>v</sub>) در سناریوی ریسک اختلال در عرضه.

Figure 7- KPI's value (dehc, vhc, uvhc, lthck<sub>i</sub>, tv<sub>m</sub>, tv<sub>b</sub>, th<sub>v</sub>, ts<sub>v</sub>) in supply-side disruption risk scenario.

شکل ۸ کاهش سطوح موجودی را به عنوان نتیجه قطع عرضه منعکس می‌کند. میانگین موجودی واکسن در مراکز توزیع به ۱۰/۷ میلیون دوز کاهش می‌یابد و نشان می‌دهد که انبارهای مرکزی نمی‌توانستند موجودی را در سطح بالایی نگه دارند و سطح موجودی در مراکز درمان کمی پایدارتر باقی ماند (میانگین: ۴۴۰۱۷۳ دوز). پیامدهای مالی این سناریو نیز کاهش هزینه کل را نشان می‌دهد که ناشی از کاهش شدید هزینه‌های نگهداری موجودی در مراکز توزیع است. با توجه به کمبود عرضه، هزینه‌های حمل و نقل و عرضه کاهش یافته است اما هزینه‌های کمبود را با افزایش مواجه کرده است و این امر ناتوانی سیستم در برآورده کردن تقاضا را، هم در مراکز توزیع و هم مراکز درمان برجسته می‌کند.

#### ۵-۴ نتایج بهینه‌سازی

در این مقاله پارامترهای کنترل موجودی، به طور خاص نقطه سفارش مجدد (s) و سطح موجودی حداکثر (S)، برای هر مرکز درمان با استفاده از الگوریتم (NSGA-II) بهینه‌سازی می‌شوند. این بهینه‌سازی در بیش از ۵۰۰ تکرار انجام شد و تعادل بین به حداقل رساندن هزینه کل و اطمینان از سطح خدمات بالا و دسترسی واکسن در سراسر شبکه در سناریوی بدون اختلال را هدف قرار داد. جدول ۱۴ مقادیر بهینه‌شده پارامترهای (s,S) را برای ۳۱ مرکز درمان استانی ارائه می‌دهد. با این پارامترهای بهینه‌شده، هزینه کل از  $5.47E10$  به  $4.35E10$  کاهش یافت. همچنین نتایج آزمایش، اختلاف قابل توجه در موجودی بهینه در مراکز درمانی مختلف را نشان می‌دهد. این وجه تمایزها می‌تواند ناشی از تفاوت‌ها در تراکم جمعیت، مکان جغرافیایی، تقاضای واکسن و نزدیکی به مراکز توزیع باشد. برای مثال،  $HC_2$  و  $HC_{25}$  نقاط سفارش مجدد نسبتاً بالایی ۷۴۳۰ و ۹۴۴۰ دوز به ترتیب دارند که احتمالاً به دلیل تقاضای بالا یا زمان‌های انتظار طولانی‌تر می‌باشد. در مقابل، مراکز درمانی مانند  $HC_6$  و  $HC_1$  نقاط سفارش



شکل ۸- مقدار شاخص‌های کلیدی عملکرد ( $t_{idc}$ ,  $th_{dc}$ ,  $ts_{dc}$ ,  $t_{ihc}$ ,  $th_{hc}$ ,  $ts_{hc}$ ) در سناریوی ریسک اختلال در عرضه.

Figure 8- KPI's value ( $t_{idc}$ ,  $th_{dc}$ ,  $ts_{dc}$ ,  $t_{ihc}$ ,  $th_{hc}$ ,  $ts_{hc}$ ) in supply-side disruption risk scenario.

مجدد پایین (۳۹۰ و ۳۸۰ دوز به ترتیب) را دارا می‌باشند، که نشان‌دهنده نزدیکی بیشتر به گره‌های عرضه یا نرخ‌های تقاضای روزانه پایین‌تر است. مدل بهینه‌سازی به صورت پویا سقف‌های موجودی ( $S$ ) را برای جلوگیری از ذخیره بیش از حد و کاهش فساد به گونه‌ای تنظیم می‌کند که اطمینان کافی برای تضمین سطح ذخیره احتیاطی در مواجهه با افزایش تقاضای غیرقابل پیش‌بینی داشته باشد. برای مثال، حداکثر سطوح موجودی در  $HC_8$  و  $HC_{16}$  به ترتیب ۹۴۱۰ و ۹۶۴۰ دوز می‌باشد، که نیاز به موجودی بافر بیشتر در آن مناطق پیشنهاد می‌شود.

جدول ۱۴- نتایج بهینه‌سازی.

Table 14- Optimization results.

حداکثر موجودی در مراکز درمان (دوز)		نقطه سفارش مجدد در مراکز درمان (دوز)		حداکثر موجودی در مراکز درمان (دوز)		نقطه سفارش مجدد در مراکز درمان (دوز)	
تعداد (دوز)	(S)	تعداد (دوز)	(s)	تعداد (دوز)	(S)	تعداد (دوز)	(s)
3,420	SHC <sub>17</sub>	520	sHC <sub>17</sub>	4,660	SHC <sub>1</sub>	390	sHC <sub>1</sub>
5,160	SHC <sub>18</sub>	4,810	sHC <sub>18</sub>	7,430	SHC <sub>2</sub>	7,430	sHC <sub>2</sub>
990	SHC <sub>19</sub>	260	sHC <sub>19</sub>	4,780	SHC <sub>3</sub>	4,670	sHC <sub>3</sub>
9,390	SHC <sub>20</sub>	2,740	sHC <sub>20</sub>	7,400	SHC <sub>4</sub>	4,520	sHC <sub>4</sub>
9,030	SHC <sub>21</sub>	7,960	sHC <sub>21</sub>	3,750	SHC <sub>5</sub>	2,960	sHC <sub>5</sub>
4,870	SHC <sub>22</sub>	4,520	sHC <sub>22</sub>	6,850	SHC <sub>6</sub>	380	sHC <sub>6</sub>
6,030	SHC <sub>23</sub>	5,110	sHC <sub>23</sub>	7,200	SHC <sub>7</sub>	3,660	sHC <sub>7</sub>
3,020	SHC <sub>24</sub>	2,940	sHC <sub>24</sub>	9,410	SHC <sub>8</sub>	2,060	sHC <sub>8</sub>
9,810	SHC <sub>25</sub>	9,440	sHC <sub>25</sub>	2,520	SHC <sub>9</sub>	710	sHC <sub>9</sub>
4,890	SHC <sub>26</sub>	4,860	sHC <sub>26</sub>	5,880	SHC <sub>10</sub>	5,830	sHC <sub>10</sub>
8,670	SHC <sub>27</sub>	800	sHC <sub>27</sub>	7,220	SHC <sub>11</sub>	4,910	sHC <sub>11</sub>
7,910	SHC <sub>28</sub>	6,190	sHC <sub>28</sub>	4,600	SHC <sub>12</sub>	830	sHC <sub>12</sub>
8,840	SHC <sub>29</sub>	8,730	sHC <sub>29</sub>	6,950	SHC <sub>13</sub>	4,430	sHC <sub>13</sub>
6,600	SHC <sub>30</sub>	5,840	sHC <sub>30</sub>	9,010	SHC <sub>14</sub>	6,010	sHC <sub>14</sub>
9,820	SHC <sub>31</sub>	1,170	sHC <sub>31</sub>	8,430	SHC <sub>15</sub>	1,760	sHC <sub>15</sub>

9,640

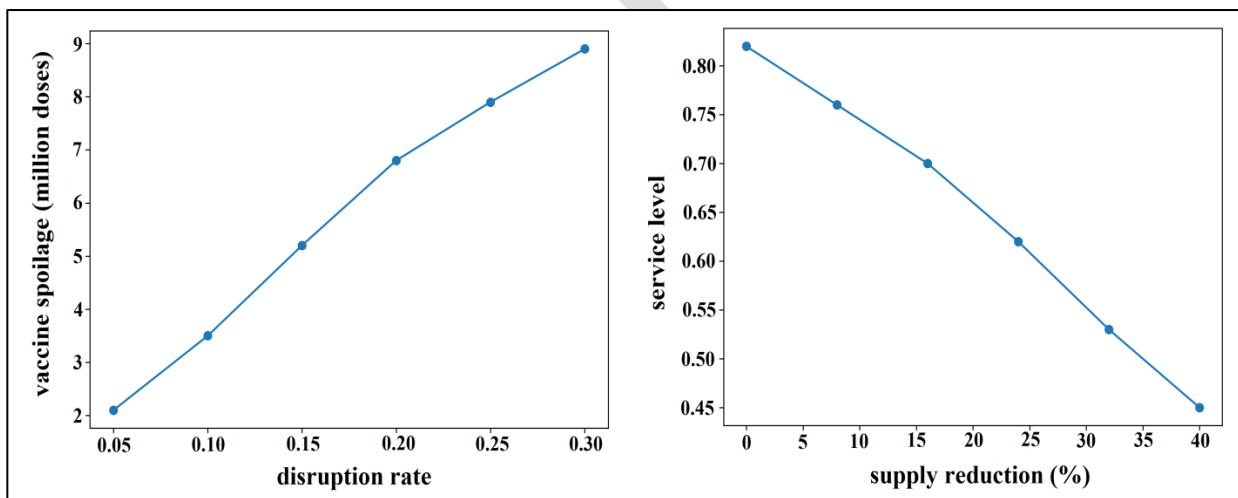
SHC<sub>16</sub>

2,650

sHC<sub>16</sub>

## ۵-۵- تحلیل حساسیت

به منظور بررسی پایداری مدل و شناسایی پارامترهای بحرانی مؤثر بر عملکرد زنجیره تامین، تحلیل حساسیت به صورت تک متغیره و چندمتغیره انجام شد. در این راستا، پارامترهای کلیدی شامل اختلال در وسیله حمل و نقل، اختلال در عرضه واکسن، میزان فساد واکسن و زمان تحویل به عنوان متغیرهای کنترلی انتخاب شدند تا رفتار سیستم در مواجهه با تغییرات محیطی و عملیاتی به صورت نظام مند مورد بررسی قرار گیرد. این تحلیل امکان درک عمیق تری از میزان تاب آوری سیستم و نقاط آسیب پذیر آن را فراهم می سازد. شکل ۹ نشان می دهد که با افزایش نرخ اختلال در وسیله حمل و نقل از ۰/۰۵ به ۰/۳۰، میزان فساد واکسن از حدود ۲/۱ میلیون دوز به بیش از ۸/۹ میلیون دوز افزایش یافته است. این رشد نشان دهنده یک رابطه غیر خطی و فزاینده است، به طوری که در سطوح بالاتر اختلال، افزایش های کوچک در این پارامتر منجر به جهش قابل توجه در فساد می شود. چنین رفتاری را می توان به حساسیت بالای زنجیره سرد نسبت به وقفه های عملیاتی نسبت داد، به طوری که اختلال در حمل و نقل نه تنها زمان تحویل را افزایش می دهد، بلکه مدت نگهداری واکسن ها در شرایط غیربهبوده را نیز طولانی تر کرده و در نتیجه احتمال فساد را به صورت تصاعدی افزایش می دهد. این یافته ها اهمیت به کارگیری راهکارهای کاهش ریسک در لجستیک حمل و نقل، از جمله بهینه سازی مسیرها، استفاده از ناوگان پشتیبان و پایش دائمی شرایط دمایی را برجسته می سازد. همچنین بررسی اثر کمبود عرضه بر عملکرد سیستم در شکل ۹ نشان می دهد که کاهش ظرفیت تامین به میزان ۸٪، موجب کاهش سطح خدمت از حدود ۰/۸۲ به ۰/۷۶ شده است. این روند نزولی با افزایش بیشتر کمبود عرضه ادامه یافته و در سطح کاهش ۴۰٪، سطح خدمت به حدود ۰/۴۵ می رسد. در این شرایط، میزان کمبود تقاضا، افزایش یافته و هزینه های کمبود به عنوان بخش اصلی هزینه های شکست کیفیت، رشد چشمگیری داشته اند. (در مرکز توزیع از 5.97E8 به 6.29E8 دلار و در مراکز درمان از 4.78E8 به 5.43E8 دلار). در مجموع، نتایج تحلیل حساسیت نشان می دهد که سیستم نسبت به ریسک اختلالات در حمل و نقل و محدودیت های عرضه، دارای حساسیت بالایی است و این دو عامل می توانند به عنوان اهرم های کلیدی در طراحی سیاست های کنترلی و بهبود تاب آوری زنجیره تامین واکسن مورد توجه قرار گیرند.

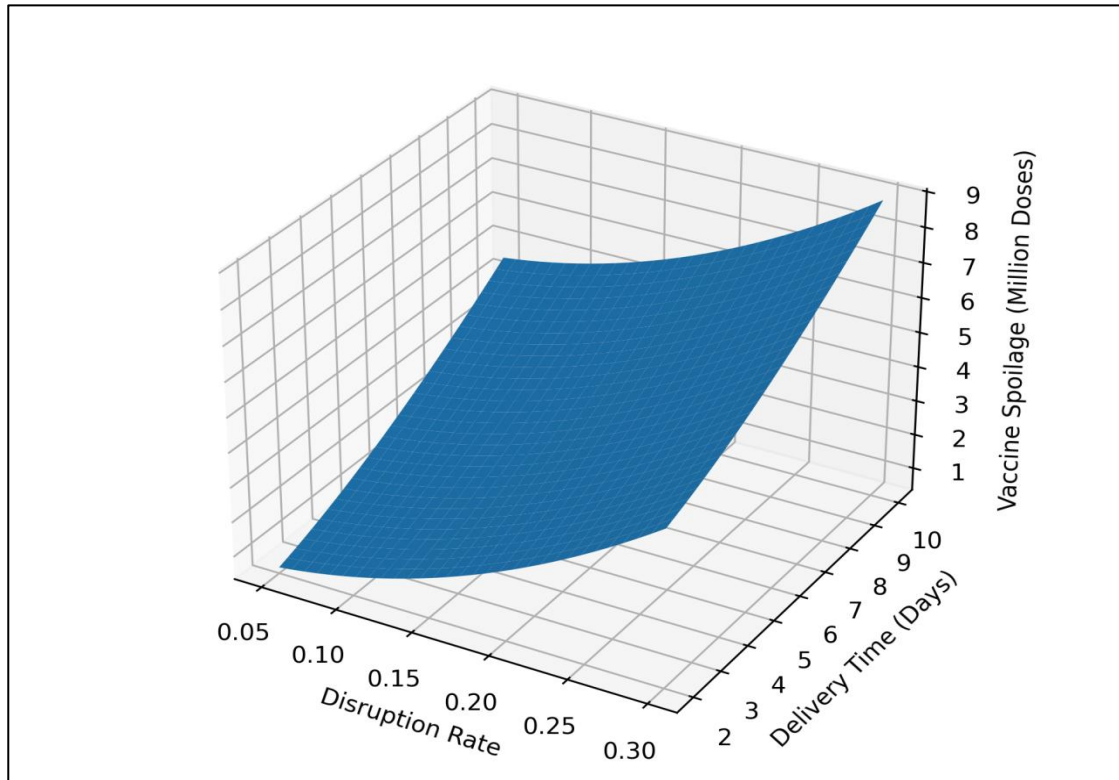


شکل ۹- تاثیر نرخ ریسک اختلال وسیله حمل و نقل بر میزان فساد واکسن و تاثیر میزان کمبود عرضه بر سطح خدمات.

Figure 9-Impact of vehicle disruption risk rate on vaccine spoilage and impact of supply shortage on service level.

شکل ۱۰ تحلیل سه بعدی اثر زمان تحویل و نرخ ریسک اختلال در وسیله حمل و نقل بر میزان فساد واکسن را نشان می دهد. با توجه به این شکل، میزان فساد واکسن به صورت هم زمان تحت تأثیر زمان تحویل و نرخ ریسک اختلال در وسیله حمل و نقل قرار دارد. در نواحی با نرخ اختلال پایین و زمان تحویل کوتاه، میزان فساد در حداقل مقدار خود (حدود ۲ میلیون دوز) قرار دارد. در مقابل، در شرایطی که نرخ اختلال به حدود ۰/۳۰ و زمان تحویل به بیش از ۸ روز می رسد، میزان فساد به بیش از ۸/۹ میلیون دوز افزایش می یابد. نتایج نشان می دهد که با افزایش زمان تحویل، روند افزایش فساد به صورت غیرخطی تشدید می شود. همچنین، افزایش نرخ ریسک اختلال موجب افزایش شیب این روند شده و اثر زمان تحویل را تقویت می کند. به عبارت دیگر، در سطوح بالاتر زمان تحویل، سیستم حساسیت بیشتری نسبت به ریسک اختلالات نشان

می‌دهد. این نمودار با حفظ مقادیر واقعی پارامترهای مدل و تنظیم مجموع فساد، امکان تحلیل بصری توزیع ریسک کیفیت در شرایط مختلف را فراهم می‌سازد.



شکل ۱۰- تاثیر زمان تحویل و نرخ ریسک اختلال حمل‌ونقل بر میزان فساد واکسن.

Figure 10- Impact of delivery time and vehicle disruption risk rate on vaccine spoilage.

#### ۵-۶- اعتبارسنجی

به منظور اطمینان از صحت و قابلیت اتکای نتایج، فرآیند اعتباربخشی داده‌ها و مدل در چند مرحله انجام گرفت. در گام نخست ساختار مدل از نظر انطباق با واقعیت عملیاتی زنجیره تامین واکسن مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، منطق جریان مواد، ساختار شبکه، روابط بین سطوح مختلف (تامین‌کننده، حمل‌ونقل، مراکز توزیع و درمان) و نحوه تعریف ریسک‌ها با استفاده از بازبینی خبرگان حوزه زنجیره تامین سلامت ارزیابی شد. نتایج این بررسی نشان داد که ساختار پیشنهادی از نظر مفهومی با رفتار واقعی سیستم سازگار بوده و روابط علت و معلولی به درستی در مدل بازنمایی شده‌اند. داده‌های ورودی از منابع رسمی، گزارش‌های منتشرشده و مستندات سازمان‌های مرتبط استخراج گردید. اولویت‌بندی گروه‌ها برای واکسیناسیون مطابق با سند استراتژیک تصویب‌شده توسط دولت ایران طراحی شد. اطلاعات جمعیتی از آخرین سرشماری ایران که توسط مرکز آمار در سال ۲۰۲۱ انجام شده است، اخذ گردید. اطلاعات مرتبط با واکسن‌های خارجی از گمرک ایران و دفتر منطقه‌ای سازمان جهانی بهداشت برای مدیران شرقی و حجم تولید و عرضه واکسن برکت نیز از وزارت بهداشت ایران جمع‌آوری شده است. جهت تخصیص مقادیر صحیح به برخی از داده‌های ورودی در مدل شبیه‌سازی مانند هزینه تامین، هزینه حمل، هزینه نگهداری و کمبود واکسن در مراکز توزیع و درمان، از ابزاری به نام (CIVIC) که یک تخمین سازمان یافته و جامع از هزینه‌های عملیاتی در استقرار زنجیره تامین واکسن‌های کووید-۱۹ در سطح دنیا می‌باشد، استفاده شده است. برای برخی پارامترها مانند نرخ خرابی، زمان تعمیر و توزیع تقاضا از برآوردهای مبتنی بر مطالعات پیشین و نظر خبرگان حوزه زنجیره تامین سلامت استفاده شد. در گام دوم، سازگاری و منطقی بودن داده‌ها از طریق تحلیل توصیفی و بررسی دامنه تغییرات، کنترل گردید تا از عدم وجود مقادیر غیرواقعی یا ناسازگار اطمینان حاصل شود. در مرحله بعد، اعتبار مدل از طریق مقایسه رفتار خروجی سیستم با انتظارات نظری و شواهد تجربی بررسی شد. به عبارت دیگر، روند تغییر سطح خدمت‌رسانی، میزان فساد و هزینه‌ها در سناریوهای مختلف با منطق عملیاتی سیستم و یافته‌های مطالعات پیشین تطبیق داده شد. علاوه بر این، آزمون‌های آماری برای بررسی معناداری تفاوت نتایج بین

سناریوها اجرا گردید که نشان‌دهنده پایداری و قابلیت اتکای خروجی‌های مدل است. در این مقاله از روش آزمون علامت زوجی که یک روش آماری غیرپارامتری است، جهت اعتبارسنجی تحلیل مقایسه‌ای میان سه سناریوی ارزیابی‌شده، استفاده شده است. این روش اغلب در مطالعات مبتنی بر شبیه‌سازی که شامل متغیرهای تصادفی است و همچنین زمانی که فرضیات آزمون‌های پارامتری (مانند نرمال بودن) تضمین نشود، به کار گرفته می‌شود. هدف آزمون این است که آیا اختلاف معناداری بین سطح خدمات (به عنوان شاخص کلیدی عملکرد مهم در مدل) در سناریوی بدون ریسک اختلال با سناریوهای دارای ریسک اختلال وجود دارد یا خیر. جدول ۱۳ قبلاً نشان داده بود که میانگین سطح خدمات تحت سناریوی بدون ریسک اختلال ۰/۸۲ بوده است، در حالی که این مقدار تحت سناریوی ریسک اختلال در وسیله نقلیه به ۰/۷۸ کاهش یافت. برای اعتبارسنجی اینکه آیا تفاوت مشاهده‌شده معنادار است، سطح خدمات را در ۱۰ تکرار یکسان تحت هر دو سناریو مقایسه کردیم. سناریوی بدون اختلال در کل تکرارها، سطح خدمات بالاتری نسبت به سناریوی دارای ریسک اختلال وسیله نقلیه ارائه کرده است. برای این آزمون، از توزیع دو جمله‌ای به شکل زیر استفاده شده است:

$$P(X = x) = \binom{n}{x} \cdot p^x \cdot (1 - p)^{n-x} \quad (37)$$

فرض صفر  $H_0$ : احتمال برتری هر دو سناریو یکسان است. ( $p = 0.5$ )

فرض مقابل  $H_1$ : سناریوی بدون ریسک اختلال عملکرد بهتری نسبت به سناریوی دارای ریسک اختلال در وسیله نقلیه دارد. ( $p > 0.5$ )

$$p - \text{value} = p(X \geq 10) \text{ where } X \sim \text{Binomial} (n = 10, p = 0.5) \quad (38)$$

$$p - \text{value} = \sum_{k=10}^{10} \binom{10}{k} \cdot 0.5^k \cdot 0.5^{10-k} = \binom{10}{10} \cdot 0.5^{10} \quad (39)$$

$$p - \text{value} = 0.00098 \quad (40)$$

از آن جایی که  $p - \text{value} < 0.05$ ، بنابراین فرض صفر رد می‌شود.

این نتیجه شواهد قوی علیه فرض صفر ارائه می‌دهد و تأیید می‌کند که در سطح اطمینان ۹۵٪ و از لحاظ سطح خدمات، سناریوی بدون ریسک اختلال به صورت معناداری بهتر از سناریوی دارای ریسک اختلال در وسیله نقلیه عمل می‌کند. رویه مشابهی برای مقایسه سناریوهای بدون ریسک اختلال و ریسک اختلال در عرضه واکسن انجام شد. همان‌طور که قبلاً در جدول ۱۳ نیز گزارش شد، سطح خدمات در این سناریو ۰/۷۶ بوده است. برای تأیید آماری این کاهش عملکرد، مجدداً در ۱۰ تکرار آزمون را انجام دادیم و نتایج را ثبت کردیم. اعمال آزمون مشابه با فرضیات ذکر شده، فرض صفر را رد نموده و نشان‌دهنده تفاوت آماری معنادار بین دو سناریو می‌باشد. نتایج هر دو آزمون علامت زوجی، نقش حیاتی پایداری و قابلیت اطمینان سیستم در توزیع زنجیره سرد واکسن را تقویت می‌کند. کاهش عملکرد سیستم، تحت سناریوی ریسک اختلال در وسیله نقلیه به صورت آماری معنادار بود. خرابی‌های وسیله نقلیه نه تنها تحویل‌ها را به تأخیر انداختند، بلکه باعث فساد واکسن به دلیل شکست زنجیره سرد شدند و در نتیجه سطوح خدمات را کاهش دادند و هدررفت را افزایش دادند. همچنین سناریوی ریسک اختلال در عرضه واکسن، مشخصاً توقف تولید واکسن آسترانکا، سطح خدمات به مراتب ضعیف‌تری را به نمایش گذاشت. این امر آسیب‌پذیری سیستماتیک در وابستگی زیاد به تعداد محدود تأمین‌کنندگان یا انواع واکسن را منعکس می‌کند.

## ۶- بحث و نتیجه‌گیری

همه‌گیری بیماری کووید-۱۹ عواقب شدید جهانی را به همراه داشته است و منجر به مرگ‌ومیرهای گسترده، فشار بیش از حد بر سیستم‌های درمانی و ریسک اختلالات اقتصادی قابل توجه شده است. علاوه بر این، اعمال اقدامات مهار بیماری مانند قرنطینه گسترده شهرها، ممنوعیت‌های سفر و یادگیری از راه دور، زندگی روزمره را عمیقاً تغییر شکل داده است. در میان تمامی استراتژی‌های مقابله با همه‌گیری، واکسیناسیون انبوه به عنوان مطمئن‌ترین ابزار برای کنترل انتقال ویروس و تسهیل بازگشت به شرایط پیش از همه‌گیری، برجسته است. با این حال، طراحی یک شبکه توزیع واکسن کارآمد و انطباق‌پذیر، به دلیل عواملی مانند عدم قطعیت‌های زنجیره‌تأمین، سیاست‌های تغییرپذیر دولتی و منابع

لجستیکی محدود، چالش‌های قابل توجهی ایجاد می‌کند. در این مطالعه، ما یک چارچوب ترکیبی از شبیه‌سازی-بهبودسازی برای پشتیبانی از توزیع استراتژیک واکسن‌های کووید-۱۹ در سراسر ایران تحت سناریوها با ریسک اختلالات مختلف پیشنهاد دادیم و رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان، جهت ساخت مدل شبیه‌سازی پویا به کار گرفته شد. این مدل در یک محیط شبیه‌سازی واقعی اعتبارسنجی گردید. همچنین برای بهبود عملکرد در ذخیره‌سازی موجودی، از الگوریتم *NSGA-II* برای تعیین نقطه سفارش مجدد بهینه ( $s$ ) و سطح موجودی حداکثر ( $S$ ) برای هر مرکز درمان بهره گرفته شد. یافته‌ها نشان داد که در سناریوی ریسک اختلال وسیله نقلیه، تعداد کل دوزهای واکسن تزریق شده عمدتاً به دلیل تأخیرهای حمل‌ونقل کاهش یافت. در نتیجه، سطح خدمات نیز کاهش گردید و حدود ۷٪ از واکسن‌ها به دلیل این خرابی‌ها از دست رفتند. علاوه بر این، پس از اذعان جهانی به پتانسیل عوارض جانبی نادر اما شدید لخته‌شدن خون توسط واکسن آسترانکا، توزیع آن از ابتدای فاز سوم واکسیناسیون صفر در نظر گرفته شد. این تصمیم منجر به محدودیت‌های عرضه بیشتر شد و کاهش سطح خدمات و افزایش میانگین زمان انتظار برای تزریق واکسن در مراکز درمانی را به همراه داشت. در هر دو سناریوی، هزینه‌های حمل‌ونقل کاهش یافت، که به حجم‌های تحویل کاهش‌یافته، نسبت داده می‌شود. به‌طور مشابه، هزینه‌های نگهداری نیز در مراکز توزیع و درمان به دلیل سطوح موجودی پایین‌تر، کاهش یافت. با این حال، این امر با افزایش هزینه‌های کمبود همراه بود و عدم توازن مرتبط با عملیات زنجیره‌تأمین را برجسته می‌کند. مقایسه سناریوها حاکی از آن است که ریسک اختلالات نه تنها هزینه‌های مستقیم را افزایش می‌دهند، بلکه موجب افت پایداری عملکرد و کاهش قابلیت اطمینان سیستم می‌شوند. از این رو، طراحی سیاست‌های تصمیم‌گیری که بتوانند تغییرپذیری را کنترل کرده و شاخص‌های عملکرد کیفیت را در سطح قابل قبول حفظ نمایند، از منظر مهندسی کیفیت ضروری است. به‌طور کلی تحلیل مقایسه‌ای در سناریوهای مذکور، به اشکال زیر مشهود بود:

۱- موازنه بهره‌وری و تاب‌آوری: سناریو بدون ریسک اختلال بهترین سطح خدمات و بالاترین هزینه را به دلیل عملیات کامل ارائه نمود. در سناریوها با ریسک اختلالی، عمدتاً از محل کاهش فعالیت‌های نگهداری و حمل‌ونقل با کاهش هزینه‌ها، اما به قیمت کاهش سطح خدمات و هدررفت واکسن مواجه هستیم. توازن این امور می‌بایست مد نظر قرار گیرد.

۲- آسیب‌پذیری در حمل‌ونقل: خرابی‌های وسیله نقلیه به‌طور قابل توجهی بر سطح خدمات و فساد واکسن تأثیر می‌گذارد. بنابراین قابلیت اطمینان و مسائل نقلیه برای محصولات حساس به دما مانند واکسن، یک عامل کلیدی در زنجیره‌های سرد محسوب می‌شود.

۳- تأثیر طراحی زنجیره‌تأمین: وابستگی به تأمین‌کنندگان محدود، ریسک سیستماتیک ایجاد خواهد کرد. تنوع بخشی به تأمین‌کننده و ادغام استراتژی‌های کاهش ریسک، مانند سیاست‌های ذخیره احتیاطی و مسیریابی پویا، می‌تواند مقاومت مدل را در مقابل ریسک‌ها بهبود بخشد.

۴- تخصیص موجودی: ترجیح مدل برای ذخیره واکسن‌ها در مراکز توزیع بیش از مراکز درمان، به دلیل هزینه‌های نگهداری پایین‌تر، نشان‌دهنده تمایل سیستم به استراتژی‌های ذخیره موجودی مرکزی است. با این حال ممکن است در سناریوها با ریسک اختلالی، تسهیلات غیر متمرکز پاسخ‌دهی بهتری ارائه دهند.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که بهبود عملکرد زنجیره‌تأمین سرد واکسن صرفاً از طریق کاهش هزینه‌ها امکان‌پذیر نیست، بلکه نیازمند مدیریت یکپارچه ریسک، کنترل نوسانات فرایندی و طراحی سیاست‌های تصمیم‌گیری در سطوح مختلف سازمانی می‌باشد. اتخاذ رویکرد کیفیت‌محور در تصمیم‌گیری می‌تواند موجب افزایش قابلیت اطمینان سیستم و کاهش هزینه‌های ناشی از شکست کیفیت گردد. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل سناریوها و ارزیابی شاخص‌های عملکرد کیفیت، رهنمودهای مدیریتی در سه سطح تصمیم‌گیری قابل ارائه است. در سطح راهبردی، تصمیم‌گیرندگان کلان حوزه سلامت می‌بایست بر طراحی ساختار شبکه و افزایش تاب‌آوری تمرکز نمایند. نتایج نشان داد که وابستگی بالا به یک منبع تأمین خارجی، ریسک کاهش سطح خدمات‌رسانی را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد. بنابراین تنوع‌بخشی به منابع تأمین واکسن و توسعه ظرفیت تولید داخلی، می‌تواند قابلیت اطمینان سیستم را ارتقا دهد. طراحی شبکه با در نظر گرفتن ذخایر راهبردی می‌تواند اثر ریسک اختلالات شدید را تعدیل نماید. در سطح تاکتیکی، تمرکز بر سیاست‌های موجودی، تخصیص منابع و مدیریت ریسک دوره‌ای اهمیت دارد. نتایج مدل نشان داد که اجرای مناسب سیاست موجودی ( $s, S$ ) می‌تواند نوسانات سطح موجودی و احتمال کمبود را کاهش دهد. بر این اساس بازتنظیم دوره‌ای پارامترهای سفارش‌دهی متناسب با شدت ریسک اختلال ضروری است. همچنین برنامه‌ریزی حمل‌ونقل با در نظر گرفتن سناریوهای خرابی و مسیرهای جایگزین، سطح خدمات‌رسانی را تثبیت می‌کند. در این سطح، هدف اصلی حفظ تعادل بین هزینه‌های کیفیت و سطح خدمات‌رسانی است. در سطح عملیاتی نیز، تصمیمات روزمره بر اجرای دقیق فرایندها و کنترل نوسانات تمرکز دارد. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت و سناریوهای مختلف، ریسک‌های زنجیره‌تأمین از نظر میزان اثرگذاری یکسان نیستند. یافته‌ها نشان می‌دهد که ریسک اختلالات حمل‌ونقل بیشترین تأثیر را بر افزایش نرخ فساد واکسن دارند، زیرا این اختلالات مستقیماً زنجیره سرد را تحت تأثیر قرار داده و منجر به شکست داخلی کیفیت می‌شوند. در مقابل ریسک اختلالات تأمین، بیشترین اثر را بر کاهش سطح خدمات‌رسانی دارند، چرا که موجب عدم تأمین به‌موقع

تقاضا و افزایش کمبود می‌شوند. مخرب بودن ریسک اختلالات حمل‌ونقل به این دلیل است که این نوع ریسک علاوه بر تأخیر، مستقیماً بر کیفیت فیزیکی محصول اثر گذاشته و منجر به فساد غیرقابل جبران می‌شود. در مقابل، ریسک اختلالات تأمین اگرچه موجب کمبود می‌شوند، اما در برخی موارد می‌توان با سیاست‌های جایگزین مانند تخصیص مجدد یا استفاده از موجودی بافر، اثر آن را تا حدی جبران نمود. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بهبود عملکرد زنجیره‌تأمین واکسن نیازمند رویکردی یکپارچه است که در آن، علاوه بر تأمین کافی، کنترل فرایندهای عملیاتی و مدیریت ریسک‌های کیفیت‌محور نیز مورد توجه قرار گیرد.

تحقیقات آینده می‌تواند با هدف افزایش مقاومت زنجیره‌تأمین واکسن و گنجاندن چندین افزونه، بر اساس مدل فعلی بنا شوند. یک مورد بالقوه می‌تواند انطباق شبکه زنجیره‌تأمین با واکسن‌هایی مانند فایزر و مدرنا باشد که نیازمند زنجیره‌های سرد منحصربه‌فرد و پروتکل‌های نگهداری متفاوتی هستند. علاوه بر این، می‌توان از روش شبیه‌سازی گسسته پیشامد برای پویایی بهتر عملیاتی، تحت شرایط همه‌گیری استفاده نمود. سایر حوزه تحقیقاتی می‌تواند شامل بررسی سناریوهای اختلالی دیگر مانند کاهش تعداد مراکز توزیع فعال یا دسترسی محدود به منابع حمل‌ونقل برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم باشد.

## تشکر و قدردانی

از داوران نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت که در بهبود کیفی این پژوهش به نویسندگان مقاله کمک نمودند، قدردانی می‌شود.

## منابع مالی

در طول انجام این پژوهش، هیچ‌گونه کمک هزینه خاصی از بخش‌های مختلف عمومی، خصوصی، تجاری یا غیر انتفاعی دریافت نشده است.

## تعارض با منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تعارض منافی در مورد انتشار این نسخه وجود ندارد.

## منابع

- [1] Lee, B.Y., Haidari, L.A., Prosser, W., Connor, D.L., Bechtel, R., Dipuve, A., Kassim, H., Khanlawia, B., Brown, S.T. (2016). Re-designing the mozambique vaccine supply chain to improve access to vaccines. *Vaccine* 34 (41), 4998–5004 <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2016.08.036>
- [2] Lemmens, S., Decouttere, C., Vandaele, N., & Bernuzzi, M. (2016). A review of integrated supply chain network design models: Key issues for vaccine supply chains. *Chemical Engineering Research & Design*, 109, 366–384. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.02.015>
- [3] Duijzer, L. E., Jaarsveld, W. V., & Dekker, R. (2018). Literature review: the vaccine supply chain. *European Journal of Operational Research*, 268(1), 174–192. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.015>
- [4] Behara, J. (2025). A fuzzy inventory model for perishable products under demand uncertainty and carbon sensitivity. *Uncertainty discourse and applications*, 2(2), 99–110. <https://doi.org/10.48313/uda.v2i2.69>
- [5] Abrahams, A.S., Ragsdale, C.T. (2012). A decision support system for patient scheduling in travel vaccine administration. *Decision Support Systems*. 54 (1), 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.007>
- [6] Seib, K., Barnett, D.J., Weiss, P.S., Omer, S.B. (2012). Vaccine-related standard of care and willingness to respond to public health emergencies: A cross-sectional survey of California vaccine providers. *Vaccine* 31 (1), 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2012.10.066>
- [7] Wichapa, N., Khokhajaikiat, P. (2018). Solving a multi-objective location routing problem for infectious waste disposal using hybrid goal programming and hybrid genetic algorithm. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 9 (1), 75–98. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.4.003>
- [8] Abbasi, B., Fadaki, M., Kokshagina, O., Saeed, N., Chhetri, P. (2020). Modeling vaccine allocations in the COVID-19 pandemic: A case study in Australia. Available at SSRN 3744520.
- [9] Govindan, K., Mina, H., Alavi, B. (2020). A decision support system for demand management in healthcare supply chains considering the epidemic outbreaks: A case study of coronavirus disease 2019 (COVID-19). *Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev.* 138, 101967. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101967>
- [10] Lin, Q., Zhao, Q., Lev, B. (2020). Cold chain transportation decision in the vaccine supply chain. *European Journal of Operational Research*. 283 (1), 182–195. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.11.005>
- [11] Buhat, C.A.H., Duero, J.C.C., Felix, E.F.O., Rabajante, J.F., Mamplata, J.B. (2021). Optimal allocation of COVID-19 test kits among accredited testing centers in the Philippines. *J. Healthc. Inform. Res.* 5 (1), 54–69. 10.1007/s41666-020-00081-5

- [12] MacIntyre, C.R., Costantino, V., Trent, M. (2021). Modelling of COVID-19 vaccination strategies and herd immunity, in scenarios of limited and full vaccine supply in NSW, Australia. *Vaccine*. 40, 2506-2513. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2021.04.042>
- [13] Sazvar, Z., Tafakkori, K., Oladzad, N., Nayeri, S.(2021). A capacity planning approach for sustainable-resilient supply chain network design under uncertainty:A case study of vaccine supply chain. *Computers & Industrial Engineering*. 159, 107406. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107406>
- [14] Sinha, P., Kumar, S., Chandra, C.(2021). Strategies for ensuring required service level for COVID-19 herd immunity in Indian vaccine supply chain. *European Journal of Operational Research*. 304, 339-352. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.03.030>
- [15] Tavana, M., Govindan, K., Nasr, A.K., Heidary, M.S., Mina, H.(2021). A mathematical programming approach for equitable COVID-19 vaccine distribution in developing countries. *Annals of Operations Research*. 1–34. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04130-z>
- [16] Rastegar, M., Tavana, M., Meraj, A., Mina, H.(2021). An inventory-location optimization model for equitable influenza vaccine distribution in developing countries during the COVID-19 pandemic. *Vaccine* 39 (3), 495–504. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2020.12.022>
- [17] Chowdhury,N.R., Ahmed,M.,Mahmud,P.,Paul, S.K.(2022). Modeling a sustainable vaccine supply chain for a healthcare system. *Journal of Cleaner Production*. 370,133423. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133423>
- [18] Jahani, H., Chaleshtori,A.E., Khaksar,S.M.S., Aghaie,A., Sheu,J. (2022). COVID-19 vaccine distribution planning using a congested queuing system—A real case from Australia. *Transportation Research Part E* ,163,102749. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102749>
- [19] Babaei,Y.S., Malekhouyan,S., Rabbani,M. (2023). A multi-objective multi-criteria decision-making approach for sustainable vaccine distribution, inventory control (R,s,S policy), and waste management considering risk assessment, a case study. *Sustainable cities and society*. 96 , 104670. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104670>
- [20] Valizadeh, J., Boloukifar, S., Soltani, S., Hookerd, E. J., Fouladi, F., Rushchtc, A. A., Shen, J. (2023). Designing an optimization model for the vaccine supply chain during the COVID-19 pandemic. *Expert Systems with Applications*. 214, 119009. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119009>
- [21] Das, D., & Samanta, G. Ch. (2024). An EOQ model for two warehouse system during lock-down considering linear time dependent demand. *Transactions on quantitative finance and beyond*, 1(1), 15-28. <https://doi.org/10.22105/tqfb.v1i1.52>
- [22] Torshizi, E., Bozorgi-Amiri, A., Sabouhi, F. (2024). Resilient and sustainable global COVID-19 vaccine supply chain design considering reverse logistics. *Applied Soft Computing*. 151, 111041. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111041>
- [23] Lee, S., Golinski, M., Chowell, G.(2012). Modeling optimal age-specific vaccination strategies against pandemic influenza. *Bull. Math. Biol.* 74 (4), 958–980. 10.1007/s11538-011-9704-y
- [24] Brown, S.T., Schreiber, B., Cakouros, B.E., Wateska, A.R., Dicko, H.M., Connor, D.L., Jaillard, P., Mvundura, M., Norman, B.A., Levin, C., et al.(2014). The benefits of redesigning Benin’s vaccine supply chain. *Vaccine* 32 (32), 4097–4103. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2014.04.090>
- [25] Li, Z., Swann, J.L., Keskinocak, P.(2018). Value of inventory information in allocating a limited supply of influenza vaccine during a pandemic. *PLoS One* 13(10), e0206293. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206293>. eCollection 2018.
- [26] Chaturvedi, D., Chakravarty, U. (2021). Predictive analysis of COVID-19 eradication with vaccination in India, Brazil, and USA. *Infection, Genetics and Evolution*. 92, 104834. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2021.104834>
- [27] Foy, B.H., Wahl, B., Mehta, K., Shet, A., Menon, G.I., Britto, C. (2021). Comparing COVID-19 vaccine allocation strategies in India: A mathematical modeling study. *Int. J. Infect. Dis.* 103, 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.12.075>
- [28] Minoza, J.M.A., Bongolan, V.P., Rayo, J.F.(2021). COVID-19 Agent-based model with multiobjective optimization for vaccine distribution. *arXiv preprint arXiv:2101.11400*.
- [29] Saravanan, S. (2024). Revolutionizing healthcare delivery with blockchain technology. *Big data and computing visions*, 4(3), 227-235. <https://doi.org/10.22105/bdcv.2024.482121.1211>
- [30] Kamran, M. A., Kia, R., Goodarzian, F., & Ghasemi, P. (2023). A new vaccine supply chain network under COVID-19 conditions considering system dynamic: Artificial intelligence algorithms. *Socio-Economic Planning Sciences*. 85, 101378. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101378>
- [31] Shiri, M., Fattahi, P., Sogandi, F. (2024). Two-stage approach for COVID-19 vaccine supply chain network under uncertainty using the machine learning algorithms: A case study. *Engineering applications of artificial intelligence*. 135, 108837. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108837>
- [32] Sun, x., Andoh,E.A., Yu,H.(2021). A simulation-based analysis for effective distribution of COVID-19 vaccines: A case study in Norway. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*,11, 100453. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100453>

آماده است