



Dynamic Resilience Analysis of the Vaccine Supply Chain Under Disruptions Caused by Viral Mutations and Outbreaks of other Epidemics

Elnaz borji-khangheshlaghi 

Ph.D. students, Department of Management, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
elnaz.borjikhangheshlaghi@mail.um.ac.ir

Alireza Pooya* 

Professor, Department of Management, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
alirezapooya@um.ac.ir

Zahra Naji-Azimi 

Professor, Department of Management, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
znajiazimi@um.ac.ir

Farzad Dehghanian 

Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
f.dehghanian@um.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Full Paper

Article history:

Received: 2025-08-11

Revised: 2025-09-15

Accepted: 2025-09-24

Keywords:

Influenza vaccine supply chain;
Demand uncertainty;
System dynamics;
Disruption;
Resiliency.

EXTENDED ABSTRACT

Background and Objectives: This study aims to investigate critical challenges in the influenza vaccine supply chain, including supply-demand imbalances, increased demand due to the COVID-19 outbreak, and the emergence of new viral strains. The research evaluates the resilience of the supply chain in Razavi Khorasan Province, Iran, focusing on disruptions caused by seasonal peaks resulting from viral mutations and the spread of new diseases. The ultimate goal is to develop and assess effective strategies to enhance supply chain resilience and ensure a stable and secure vaccine supply.

Materials and Methods: A System Dynamics modelling approach was employed to simulate supply chain disruptions and recovery processes. For the first time, resilience strategies—including the establishment of backup buffers, contracting with backup suppliers, and increasing domestic production capacity—were comprehensively analysed within the framework of budget allocation policies.

Results: The results indicate that strategies focused on increasing domestic production capacity, particularly Policy 3, which combines domestic production with backup suppliers and minimal backup buffers, significantly enhance supply chain resilience. These strategies create an optimal balance between costs and responsiveness to demand fluctuations.

Conclusion: The findings suggest that increasing domestic production capacity, alongside leveraging backup suppliers, can establish a balance

* Corresponding author.

E-mail address: <mailto:alirezapooya@um.ac.ir>

<https://orcid.org/0000-0001-6000-3535>

between vaccine costs and inventory levels, thereby ensuring the long-term resilience of the influenza vaccine supply chain even under peak demand conditions caused by viral mutations.

Cite this article as:

borji-khangheshlaghi, E. & Pooya, A. & Naji-Azimi, Z. & Dehghanian, F. (2025). Dynamic resilience analysis of the vaccine supply chain under disruptions caused by viral mutations and outbreaks of other epidemics. *Journal of Strategic Value Chain Management*, 2(5), 85-115.

DOI: <https://doi.org/10.22075/svcm.2025.38639.1038>

© 2024 authors retain the copyright and full publishing rights. Journal of Strategic Value Chain Management Published by **Semnan University Press**.

This is an open access article under the CC-BY-4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



تحلیل پویایی تاب‌آوری زنجیره تامین واکسن تحت اختلالات ناشی از جهش‌های ویروسی و شیوع سایر اپیدمی‌ها

الناز برجی خان‌قشلاقی 

دانشجوی دکترای مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

elnaz.borjikhangheshlaghi@mail.um.ac.ir

علیرضا پویا* 

استاد گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

alirezapooya@um.ac.ir

زهرناجی عظیمی 

استاد گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

znajiazimi@um.ac.ir

فرزاد دهقانیان 

دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

f.dehghanian@um.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: این مطالعه با هدف بررسی چالش‌های حیاتی در زنجیره تامین واکسن آنفلوآنزا، از جمله عدم تعادل عرضه و تقاضا، افزایش تقاضا به دلیل شیوع بیماری کووید-۱۹ و ظهور سویه‌های جدید ویروسی انجام شده است. تحقیق حاضر به ارزیابی تاب‌آوری زنجیره تامین در استان خراسان رضوی، ایران، با تمرکز بر اختلالات ناشی از پیک‌های فصلی به دلیل جهش‌های ویروسی و شیوع بیماری‌های جدید می‌پردازد. هدف نهایی این مطالعه، توسعه و ارزیابی استراتژی‌های مؤثر برای افزایش تاب‌آوری زنجیره تامین و تضمین تامین پایدار و ایمن واکسن است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴-۰۵-۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴-۰۶-۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴-۰۷-۰۲	
واژه‌های کلیدی: زنجیره تامین واکسن آنفلوآنزا؛ عدم قطعیت تقاضا؛ پویایی سیستم اختلال؛	روش: در این پژوهش از رویکرد پویایی سیستم برای شبیه‌سازی اختلالات زنجیره تامین و فرآیندهای بازایی استفاده شده است. برای نخستین بار، استراتژی‌های تاب‌آوری شامل ایجاد بافرهای پشتیبان، عقد قرارداد با تامین‌کنندگان پشتیبان و افزایش ظرفیت تولید داخلی، در چارچوب سیاست‌های تخصیص بودجه به‌صورت جامع تحلیل شده‌اند.

تاب آوری.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که سیاست‌های متمرکز بر افزایش ظرفیت تولید داخلی، به‌ویژه سیاست سوم که تولید داخلی را با تأمین‌کنندگان پشتیبان و حداقل بافرهای پشتیبان ترکیب می‌کند، به طور قابل توجهی پایداری زنجیره تأمین را ارتقاء می‌بخشد. این سیاست‌ها تعادلی بهینه میان هزینه‌ها و پاسخ‌گویی به نوسانات تقاضا ایجاد می‌کنند.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها حاکی از آن است که افزایش ظرفیت تولید داخلی همراه با بهره‌گیری از تأمین‌کنندگان پشتیبان، ضمن ایجاد تعادل میان هزینه‌ها و موجودی واکسن، می‌تواند پایداری بلندمدت زنجیره تأمین واکسن آنفلوانزا را حتی در شرایط اوج تقاضای ناشی از جهش‌های ویروسی تضمین کند.

استناد: برجی خان‌قشلاقی، الناز و پویا، علیرضا و ناجی عظیمی، زهرا و دهقانیان، فرزاد. (۱۴۰۴). تحلیل پویایی تاب‌آوری زنجیره تأمین واکسن تحت اختلالات ناشی از جهش‌های ویروسی و شیوع سایر اپیدمی‌ها. مجله مدیریت زنجیره ارزش راهبردی، ۲(۵)، ۸۵-۱۱۵.

DOI: <https://doi.org/10.22075/svcm.2025.38639.1038>

ناشر: دانشگاه سمنان

۱. مقدمه

در سال ۲۰۱۸، ارزش بازار جهانی واکسن آنفلوانزا به ۳.۹۶ میلیارد دلار برآورد شد و پیش‌بینی گردید که تا سال ۲۰۲۶ به ۶.۲۰ میلیارد دلار افزایش یابد (لین^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). با وجود این رشد، زنجیره تامین واکسن آنفلوانزا به دلیل عدم قطعیت‌های بالای عرضه و تقاضا، با چالش‌های پیچیده و مداوم مواجه است (آریف‌اوغلو و تانگ^۲، ۲۰۲۲). لازم است تولیدکنندگان به طور مستمر با نوسانات سالانه تقاضا، که تحت تأثیر عواملی همچون شدت فصول آنفلوانزا، جهش‌های ویروسی و ظهور سویه‌های جدید ایجاد می‌شوند، سازگار شوند. با توجه به ماهیت غیرقابل پیش‌بینی ویروس‌های آنفلوانزا، پیش‌بینی دقیق تقاضا همچنان دشوار باقی مانده است (لین و همکاران، ۲۰۲۲). عدم تطابق‌های مکرر میان عرضه و تقاضا به خوبی مستند شده است. به عنوان نمونه، در فصل آنفلوانزای ۲۰۰۵-۲۰۰۴ تنها ۶۱ میلیون دوز از ۱۰۰ میلیون دوز مورد انتظار تأمین شد، در حالی که در پایان فصل ۲۰۰۹-۲۰۰۸ حدود ۲۲.۹ میلیون دوز (معادل ۱۶.۸۵٪) استفاده نشده باقی ماند (دای^۳ و همکاران، ۲۰۱۶؛ دایجزر^۴ و همکاران، ۲۰۱۸).

این عدم قطعیت‌ها عمدتاً ناشی از طولانی بودن فرآیند تولید، پیچیدگی‌های ساخت، محدودیت زمانی برای واکسناسیون و به‌روزرسانی‌های مکرر ترکیب واکسن است (دمیرچی و ارکیپ^۵، ۲۰۲۰). علاوه بر این، نوسانات بیولوژیکی، تغییرات در نتایج آزمون‌های ایمنی و کیفیت، و تغییر سویه‌ها در بخش عرضه، پیچیدگی تولید را افزایش می‌دهند (دای و همکاران، ۲۰۱۶؛ دایجزر و همکاران، ۲۰۱۸). دورریز سالانه واکسن‌های استفاده نشده به دلیل تغییرات ویروسی نیز این چالش‌ها را تشدید می‌کند (لیستر و ویلیامز^۶، ۲۰۰۴). کمبودهای تولیدی اغلب موجب تأخیر در تحویل می‌شوند؛ به عنوان مثال، در سال ۲۰۱۹ تحویل ۷۰ میلیون دوز واکسن آنفلوانزا در ایالات متحده با تأخیر انجام شد و ۴۰٪ بازار تحت تأثیر قرار گرفت (لین و همکاران، ۲۰۲۲). همه‌گیری‌ها کمبودها را تشدید کرده و به‌ویژه کشورهای در حال توسعه را به طور نامتناسب تحت فشار قرار داده‌اند (دایجزر و همکاران، ۲۰۱۸). شیوع کووید-۱۹ موجب افزایش جهانی تقاضا برای واکسن آنفلوانزا، تشدید محدودیت‌های منابع و کاهش دسترسی کشورهای همپوشانی ایران شد (علیزاده^۷ و همکاران، ۲۰۲۱). وابستگی بالای ایران به واردات واکسن، آسیب‌پذیری این کشور را به‌ویژه در شرایط تحریم یا کمبود جهانی عرضه، افزایش می‌دهد.

از سوی دیگر، زنجیره تامین واکسن آنفلوانزا با اختلالات ناشی از تقاضا نیز مواجه است. اوج فصلی بیماری در پاییز و زمستان، جهش‌های ژنتیکی و ظهور بیماری‌های عفونی جدید می‌توانند نوسانات شدید و غیرقابل پیش‌بینی در تقاضا ایجاد کنند. این اختلالات، که با محدودیت ظرفیت تولید داخلی، وابستگی به تامین‌کنندگان خارجی و عدم قطعیت در زمان‌بندی تولید تشدید می‌شوند، فشار زیادی بر دسترسی به واکسن وارد کرده و ضرورت اتخاذ راهبردهای انعطاف‌پذیر را افزایش می‌دهند.

به دلیل غیرقابل پیش‌بینی بودن تغییرات ویروسی، پیش‌بینی تقاضا همچنان پیچیده است (دای و همکاران، ۲۰۱۶؛ دایجزر و همکاران، ۲۰۱۸). قراردادهای تامین واکسن معمولاً ماه‌ها پیش از فصل آنفلوانزا منعقد می‌شوند، در حالی که میزان

¹ Lin² Arifoğlu and Tang³ Dai⁴ Duijzer⁵ Demirci and Erkip⁶ Lister and Williams⁷ Alizadeh

تقاضای واقعی با عدم قطعیت بالایی همراه است (دای و همکاران، ۲۰۱۶). به عنوان مثال، شرکت Sanofi Pasteur پس از شیوع ناگهانی کووید-۱۹ با جهش بی سابقه‌ای در تقاضا مواجه شد.

سویه‌های جدید و ویروسی این عدم قطعیت را تشدید کرده‌اند؛ واکسن‌های فصول ۲۰۱۱-۲۰۱۲ و ۲۰۱۸-۲۰۱۷ اثربخشی قابل توجهی در برابر سویه‌های در گردش نداشتند (چانگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۰؛ ساه^۲ و همکاران، ۲۰۱۸). این شرایط، تأثیرات چشمگیری بر پوشش واکسیناسیون داشته است، چنان‌که در سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۰ کاهش ۱۶٪ پوشش گزارش شد (دمیرجی و ارکیپ، ۲۰۲۰) و در سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۱۴ کمبود واکسن همزمان با افزایش بستری و مرگ‌ومیر مشاهده گردید (زیممن^۳ و همکاران، ۲۰۱۶). پوشش واکسیناسیون بزرگسالان در فصل ۲۰۱۸-۲۰۱۷ نیز به ۳۷.۱٪ کاهش یافت که نسبت به سال پیشین ۶.۲٪ افت داشت (چانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

بنابراین، تقویت تاب آوری زنجیره تأمین واکسن آنفلوانزا برای حفظ پوشش مؤثر واکسیناسیون، به‌ویژه تحت شرایط عدم قطعیت تشدیدشده، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. بحران‌های اخیر سلامت جهانی، ضرورت برخورداری از زنجیره‌های تأمین واکسن سازگار و تاب‌آور را برجسته کرده‌اند. کشورهای در حال توسعه مانند ایران، به دلیل وابستگی به واردات و محدودیت ظرفیت تولید داخلی، در برابر این بحران‌ها آسیب‌پذیری بیشتری دارند. برای رفع این آسیب‌پذیری‌ها، در این مطالعه از یک تحلیل شبیه‌سازی با رویکرد پویایی سیستم برای ارزیابی زنجیره تأمین واکسن آنفلوانزا در سناریوهای اختلال واقع‌بینانه، شامل اوج تقاضای فصلی، جهش‌های ویروسی و ظهور بیماری‌های جدید، استفاده شده است.

تحقیقات موجود در زمینه زنجیره‌های تأمین واکسن شامل چارچوب‌های کیفی (دایجزر و همکاران، ۲۰۱۸؛ زفران^۴ و همکاران، ۲۰۱۳؛ واترز^۵ و همکاران، ۲۰۲۱) و مدل‌های کمی (گئورگیادیس^۶ و همکاران، ۲۰۲۱؛ محمدی^۷ و همکاران، ۲۰۲۲). است، که شامل کاربردهای محدود رویکرد پویایی سیستم در زمینه‌های بهداشتی می‌شود (سنسون^۸ و همکاران، ۲۰۲۲؛ سی^۹ و همکاران، ۲۰۲۰). با این حال، مطالعات کمی رفتار دینامیکی زنجیره‌های تأمین واکسن آنفلوانزا را تحت شوک‌های ترکیبی عرضه و تقاضا، یا اثرات یکپارچه چندین استراتژی انعطاف‌پذیری عملیاتی بررسی کرده‌اند.

در این مطالعه، تعامل میان سه استراتژی «ایجاد ذخایر بافر پشتیبان»، «افزایش ظرفیت تولید داخلی» و «انعقاد قرارداد با تأمین‌کنندگان پشتیبان» مدل‌سازی و تحلیل شده است. تمایز اصلی این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین، نه صرفاً انتخاب این استراتژی‌ها، بلکه شبیه‌سازی صریح تعاملات دینامیکی، حلقه‌های بازخورد و بده‌بستان‌های آن‌ها در طول زمان تحت اختلالات بهداشتی واقع‌بینانه است. این رویکرد، درک عمیق‌تری از تأثیر سیاست‌های انعطاف‌پذیری بر پوشش واکسیناسیون، عملکرد سیستم و پایداری بلندمدت در شرایط عدم قطعیت، به‌ویژه در کشورهای با درآمد پایین و متوسط، ارائه می‌دهد.

علاوه بر این، این مطالعه با ارزیابی اینکه چگونه سناریوهای مختلف تخصیص منابع در میان این استراتژی‌های انعطاف‌پذیری بر رفتار سیستم، هزینه‌ها و نتایج واکسیناسیون تأثیر می‌گذارند، یک دیدگاه بودجه‌بندی را معرفی می‌کند.

¹ Chung

² Sah

³ Zimmerman

⁴ Zeferan

⁵ Waters

⁶ Georgiadis

⁷ Mohammadi

⁸ Sansone

⁹ Sy

در حالی که مطالعات اخیر مانند مطالعه دایجزر و همکاران (2017) برخی جنبه‌های انعطاف‌پذیری زنجیره تامین واکسن را بررسی کرده‌اند، تحلیل ترکیبی بده‌بستان‌های عملیاتی، اقتصادی و پویا در یک چارچوب واحد رویکرد پویایی سیستم در ادبیات محدود است. با پرداختن به این شکاف‌ها، این تحقیق بینش‌های عملی را برای سیاست‌گذاران و مدیران زنجیره تامین فراهم می‌کند تا انعطاف‌پذیری را افزایش دهند، تخصیص منابع را بهینه کنند و در دسترس بودن به موقع واکسن را در میان عدم قطعیت تضمین کنند. افزون بر این، این مطالعه با ارائه یک چارچوب پویایی سیستم که سه استراتژی کلیدی تاب‌آوری—ایجاد ذخایر پشتیبان، افزایش ظرفیت تولید داخلی، و انعقاد قرارداد با تامین‌کنندگان پشتیبان—را به صورت یکپارچه در زنجیره تامین واکسن آنفلوانزا ادغام می‌کند، به شکاف‌های موجود در ادبیات می‌پردازد. برخلاف مطالعات پیشین مانند ژو و همکاران (۲۰۲۱) که عمدتاً بر مدل‌سازی پویایی همه‌گیری‌ها تمرکز داشتند یا دیابات و همکاران (۲۰۱۹) که بهینه‌سازی توزیع را بررسی کردند، پژوهش حاضر با شبیه‌سازی صریح تعاملات دینامیکی، اثرات ترکیبی نوسانات تقاضا، کمبود عرضه، جهش‌های ویروسی و محدودیت‌های مالی را در یک مدل بازخوردی-رفتاری تحلیل می‌کند. همچنین، در مقایسه با مطالعاتی که تنها به بخش‌هایی از زنجیره تامین پرداخته یا استراتژی‌های تاب‌آوری را جداگانه بررسی کرده‌اند، این پژوهش نوآورانه به تحلیل بده‌بستان‌های بودجه‌ای میان استراتژی‌های مختلف تاب‌آوری می‌پردازد و بدین ترتیب بینش‌های عملی تازه‌ای برای سیاست‌گذاران، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، فراهم می‌آورد.

این مقاله به شرح زیر ساختار یافته است: بخش ۲ یک بررسی جامع از ادبیات مرتبط ارائه می‌دهد و شکاف‌های نظری کلیدی را شناسایی می‌کند. بخش ۳ روش تحقیق به کار گرفته شده در مطالعه را تشریح می‌کند. بخش ۴ یک توصیف دقیق از سیستم و طراحی مدل ارائه می‌دهد که به عنوان یک کاربرد عملی از چارچوب مفهومی عمل می‌کند. بخش‌های ۵ و ۶ به اجرای مدل در یک مطالعه موردی واقعی، شامل اعتبارسنجی مدل و تحلیل سناریوها و سیاست‌های مختلف، اختصاص یافته‌اند. در نهایت، بخش ۷ مقاله را با خلاصه‌ای از یافته‌ها و مفاهیم به نتیجه می‌رساند.

۲. پیشینه پژوهش

این تحقیق بر پایه دو جریان اصلی از ادبیات علمی بنا شده است. جریان نخست، به چالش‌های مدیریت عملیاتی در زنجیره تامین واکسن آنفلوانزا می‌پردازد. از آنجا که واکسن‌های آنفلوانزا باید سالانه برای مقابله با سویه‌های ویروسی در حال تکامل به‌روزرسانی شوند، این فرآیند تأثیر مستقیم و قابل توجهی بر کارایی تولید دارد (لین و همکاران، ۲۰۲۲). در این زمینه، پژوهشگران متعددی رویکردهای متنوعی ارائه کرده‌اند: چو^۱ (۲۰۱۰) رویکردی پویا معرفی کرد که با هدف کاهش عدم قطعیت‌ها در بازدهی پایین، ضمن حفظ ترکیب واکسن، ایمنی را از طریق فرمولاسیون‌های به‌روز شده افزایش می‌دهد. اوزالتین^۲ و همکاران (۲۰۱۱) نیز یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح تصادفی چندمرحله‌ای طراحی کردند که به دو تصمیم کلیدی یعنی انتخاب ترکیب واکسن و زمان‌بندی به‌روزرسانی فرمولاسیون می‌پردازد. در پی آن، اوزالتین و همکاران (۲۰۱۸) مدل تصادفی دومرحله‌ای را توسعه دادند که تصمیمات فرمولاسیون و تولید را در یک محیط پویا و نامشخص به طور یکپارچه ترکیب می‌کند. در ادامه، دای و همکاران (۲۰۱۶) با تمرکز بر تأثیر اعلامیه‌های طراحی واکسن، تصمیمات مربوط به فازهای تولید اولیه و عادی را تحلیل کردند. چیک^۳ و همکاران (۲۰۱۷) نیز با استفاده از دیدگاه مدیران

¹ Cho

² Özaltın

³ Chick

ارشد یک تولیدکننده پیشرو، پتانسیل تسریع تولید واکسن آنفلوانزا را بررسی نمودند. لین و همکاران (۲۰۲۰) بر استراتژی‌های حمل و نقل واکسن‌های حساس به دما تمرکز کردند و اهمیت رعایت پروتکل‌های متنوع بازرسی در سطح خرده‌فروشی را برجسته ساختند. همچنین، عنایتی و اوزالتین^۱ (۲۰۲۰) چارچوبی ارائه دادند که ترکیبی از مدل اپیدمی و بهینه‌سازی غیرخطی است و تخصیص عادلانه واکسن را با هدف حداقل کردن استفاده کلی تعیین می‌کند.

رستگار^۲ و همکاران (۲۰۲۱) مدلی برای بهینه‌سازی توزیع واکسن آنفلوانزا در ایران طراحی کردند که با در نظر گرفتن محدودیت‌های ذخیره‌سازی و ظرفیت، تحویل به تقاضا را به حداکثر می‌رساند. همچنین، لین و همکاران (۲۰۲۲) زنجیره‌های تأمین واکسن آنفلوانزا را مورد بررسی قرار داده و استراتژی تدارکات با سفارش دوگانه را برای بهبود هماهنگی تحت شرایط عدم قطعیت تولید و تقاضا پیشنهاد کردند. عنایتی و اوزالتین (۲۰۲۰) نیز مدل تقسیم‌بندی شده‌ای برای بهینه‌سازی تخصیص واکسن توسعه دادند که با تأکید بر عدالت و پویایی‌های انتقال خاص گروهی، به کنترل شیوع کمک می‌کند. علاوه بر این، ساجادی^۳ و همکاران (۲۰۱۹) مدل قوی زنجیره تأمین واکسن را طراحی کردند که به عدم قطعیت‌های تقاضا، فسادپذیری و محدودیت‌های ظرفیت پاسخ می‌دهد و اثربخشی آن را نسبت به روش‌های قطعی اثبات کردند. نهایتاً، چاندر^۴ و همکاران (۲۰۲۳) قراردادهای تأمین سفرهای را برای زنجیره تأمین واکسن هند ارائه دادند که نشان‌دهنده بهبود ۲۳.۷۲٪ در کارایی برنامه‌های ایمن‌سازی دولتی از طریق مکانیسم‌های انگیزشی است.

جریان دوم این تحقیق به تاب‌آوری و اثر اختلالات در مدل‌های زنجیره تأمین می‌پردازد. در این حوزه، مانجوری^۵ و همکاران (۲۰۱۸) تاب‌آوری زنجیره تأمین تانلوم را با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم بررسی کردند، هرچند به تصمیمات بهینه دست نیافتند. ژو^۶ و همکاران (۲۰۲۱) به یکپارچگی زنجیره تأمین در صنعت پنیر پرداختند و اهمیت یکپارچگی عملیاتی و کاهش تأخیر اطلاعات را برجسته ساختند. عبدالله^۷ و همکاران (۲۰۱۹) از پویایی سیستم برای شبیه‌سازی زنجیره تأمین سه‌سطحی در شرایط عادی و مختل استفاده کردند و نقش کلیدی ذخیره احتیاطی در ارتقای تاب‌آوری را نشان دادند. دیابات^۸ و همکاران (۲۰۱۸) رویکرد مشابهی را برای به حداقل رساندن اختلالات در زنجیره تأمین خون چهارسطحی به کار بردند. همچنین، سماني^۹ و همکاران (۲۰۱۹) سیاست پیشگیرانه دومرحله‌ای را با استفاده از Fuzzy AHP و تحلیل منطقی خاکستری برای کاهش ریسک‌ها در مدیریت زنجیره تأمین خون پیشنهاد دادند.

در بخش دیگری، صبوحي^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۸) مدل ترکیبی تحلیل پوششی داده‌ها و برنامه‌ریزی ریاضی را برای طراحی زنجیره تأمین تاب‌آور مطرح کردند که با مطالعه موردی شرکت داروسازی آتارا اعتبارسنجی شد. روزخوش^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۲) با مدل‌سازی پویایی سیستم، نرخ پذیرش بلاک چین در زنجیره تأمین لوازم خانگی ایران را پیش‌بینی کردند و افزایش آن به ۰.۸ تا سال ۲۰۳۰ را با سیاست‌های مؤثر محتمل دانستند. دینگ^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۲) تاب‌آوری

¹ Enayati and Özaltın

² Rastegar

³ Sadjadi

⁴ Chandra

⁵ Mancheri

⁶ Zhu

⁷ Abdullah

⁸ Diabat

⁹ Samani

¹⁰ Sabouhi

¹¹ Rouzkhosh

¹² Ding

سیستم گاز طبیعی چین را در مواجهه با اختلالات بررسی کردند و بر اهمیت افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و حمل و نقل در شرایط کمبود واردات و تقاضای فصلی تأکید نمودند. چن^۱ و همکاران (۲۰۲۰) نیز مدل پویایی سیستم مشابهی برای ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم واردات نفت چین توسعه دادند و راهکارهایی همچون جایگزینی تولید زغال‌سنگ با نفت و ذخایر استراتژیک را برای کاهش ریسک‌ها برجسته ساختند.

بر اساس مرور ادبیات موجود، تاکنون هیچ تحقیق جامعی به طور همزمان به کمبود عرضه و نوسانات تقاضا ناشی از پیک‌های فصلی به دلیل جهش‌های ویروسی و شیوع بیماری‌های جدید در زنجیره تامین واکسن آنفلوانزا نپرداخته است. این مطالعه به طور منحصر به فردی سه استراتژی تاب‌آوری شامل ایجاد بافرهای پشتیبان، قرارداد با تامین‌کنندگان پشتیبان و افزایش ظرفیت تولید داخلی را در قالب یک مدل پویایی سیستم یکپارچه می‌سازد و به ویژه پاسخ‌های پویا و لحظه‌ای زنجیره تامین را مورد تحلیل قرار می‌دهد. علاوه بر این، برای نخستین بار مبادلات بودجه‌ای بین این سه استراتژی تاب‌آوری تحت سناریوهای مختلف ارزیابی می‌شود.

۳. روش

این مطالعه با بهره‌گیری از رویکرد پویایی سیستم به تحلیل زنجیره تامین واکسن آنفلوانزا می‌پردازد و بر پویایی‌های عرضه و تقاضا به عنوان عوامل کلیدی تأکید دارد. تمرکز اصلی تحقیق بر شکاف میان عرضه و تقاضا است که به عنوان چالش محوری در مدیریت زنجیره تامین واکسن مطرح می‌شود.

مطالعه حاضر به بررسی موردی معاونت بهداشت و مرکز بهداشت استان خراسان رضوی در ایران می‌پردازد؛ نهادی که مسئول تامین واکسن از وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی در تهران و توزیع آن در سراسر استان است. فرآیند توزیع واکسن از اواخر مرداد ماه آغاز شده و اوج تقاضا از اواخر مهر تا اواسط اردیبهشت ماه ادامه می‌یابد. این واکسن‌ها به صورت رایگان در اختیار گروه‌های واجد شرایط نظیر کادر درمان، مرغانداران، مبتلایان به HIV، جانبازان، کارکنان و ساکنان مراکز بهزیستی و همچنین زنان باردار قرار می‌گیرد.

مدل توسعه یافته در این پژوهش، چارچوب زمانی ۲۴۰ روزه را با گام‌های زمانی روزانه در نظر می‌گیرد تا نوسانات و کمبودهای کوتاه‌مدت در عرضه واکسن را به طور دقیق شبیه‌سازی کند. استان خراسان رضوی، با جمعیتی بالغ بر ۶.۴ میلیون نفر و مساحتی برابر با ۱۱۸,۸۵۴ کیلومتر مربع، دومین استان پرجمعیت ایران محسوب می‌شود.

توسعه مدل بر اساس تحلیل علی، مفروضات پویای سیستم و داده‌های گردآوری شده از منابع مختلف از جمله مرور ادبیات و مصاحبه با کارشناسان حوزه سلامت، به ویژه از معاونت بهداشت و مرکز بهداشت استان، انجام شده است. مشارکت این کارشناسان نقش کلیدی در شناسایی سناریوها و سیاست‌های مؤثر برای طراحی زنجیره تامین واکسن تاب‌آور ایفا کرده است. داده‌های مورد نیاز نیز از طریق مصاحبه‌های نیمه ساختاریافته و بررسی اسناد رسمی گردآوری شد.

ساختار مفهومی مدل پس از تأیید نهایی کارشناسان، با استفاده از نرم‌افزار Vensim PLE x32 پیاده‌سازی و روابط ریاضی آن اعتبارسنجی شد. فرایند اعتبارسنجی شامل آزمون‌های ساختاری، سازگاری ابعادی، شرایط حدی و تحلیل رفتار سیستم بود تا اطمینان حاصل شود که مدل، بازتاب دقیقی از واقعیت سیستم ارائه می‌دهد. همچنین تحلیل حساسیت برای

¹ Chen

ارزیابی واکنش پذیری مدل نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی انجام شد که نتایج آن، اعتبار و قابلیت اطمینان مدل را در بازنمایی پویایی‌های سیستم تأیید می‌کند.

یکی از شاخص‌های کلیدی عملکرد در این مدل، «نرخ رضایت تقاضا» است که به عنوان نسبت واکسن‌های تحویل داده شده به تقاضای واقعی تعریف می‌شود. این شاخص معیاری برای سنجش توانایی سیستم در پاسخگویی به نیازهای مراکز بهداشتی در شرایط عادی و بحرانی مانند اوج تقاضا یا کمبود عرضه است و نمایانگر سطح تاب‌آوری زنجیره تأمین محسوب می‌شود (کریاکو^۱ و همکاران، ۲۰۱۸؛ چن^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). در واقع، یک سیستم تاب‌آور باید عملکرد خود را حتی در شرایط اختلال حفظ کرده، دسترسی پایدار به واکسن را تضمین کند و اعتماد عمومی به سیستم توزیع را تقویت نماید. مطالعات پیشین از جمله کریاکو و همکاران (۲۰۱۸)، دینگ^۳ و همکاران (۲۰۲۲) و چن و همکاران (۲۰۲۰) نیز بر اهمیت این شاخص در ارزیابی عملکرد و تاب‌آوری زنجیره تأمین در سناریوهای مختلف تأکید کرده‌اند.

۴. توصیف سیستم و طراحی مدل

مدل پویایی سیستم ارائه شده در شکل ۴، زنجیره تأمین واکسن آنفلوآنزا را با ادغام سه زیرسیستم اصلی - اپیدمی، عرضه و تقاضا - شبیه‌سازی و مدیریت می‌کند. فهرست متغیرها و معادلات مربوطه نیز در پیوست ارائه شده است. بازه زمانی شبیه‌سازی ۲۴۰ روزه، هم‌راستا با الگوی توزیع فصلی واکسن از اواخر مرداد و رسیدن به اوج از مهر تا اواسط فروردین در نظر گرفته شده است. این مدل، برای مقابله با نوسانات تقاضا و تضمین دسترسی پایدار به واکسن در دوره‌های اوج مصرف و شرایط اضطراری بهداشت عمومی، از مکانیسم‌های بازایی همچون بافرهای پشتیبان، عقد قرارداد با تأمین‌کنندگان پشتیبان و افزایش ظرفیت تولید داخلی بهره می‌گیرد. این رویکرد یکپارچه، امکان ارزیابی و بهبود تاب‌آوری زنجیره تأمین را در برابر اختلالات فراهم می‌سازد.

۱.۴. فرضیه پویا و نمودار حلقه علی

در این مطالعه، فرضیه پویای زنجیره تأمین واکسن، با تمرکز خاص بر راهبردهای تاب‌آوری، بر اساس ترکیبی از ادبیات مرتبط و بازخورد متخصصان از مقامات ارشد معاونت بهداشت نهایی شد. فرضیه حاصل به شرح زیر است:

در ساختار پویای زنجیره تأمین واکسن، اختلالات ناشی از شیوع بیماری‌های فصلی، جهش‌های ویروسی، یا ظهور بیماری‌های جدید، منجر به ایجاد شکاف عرضه و تقاضا می‌شود. در پاسخ به این وضعیت، سیاست‌های اضطراری به صورت خودکار فعال شده و سه راهبرد اصلی تاب‌آوری را در بر می‌گیرند: (۱) استفاده از موجودی انبار ذخیره‌سازی، مشروط به در دسترس بودن موجودی؛ (۲) تأمین از تأمین‌کنندگان پشتیبان تحت قراردادهای اضطراری از پیش تعیین شده؛ و (۳) حداکثرسازی بهره‌برداری از ظرفیت‌های تولید داخلی برای جبران کمبودها.

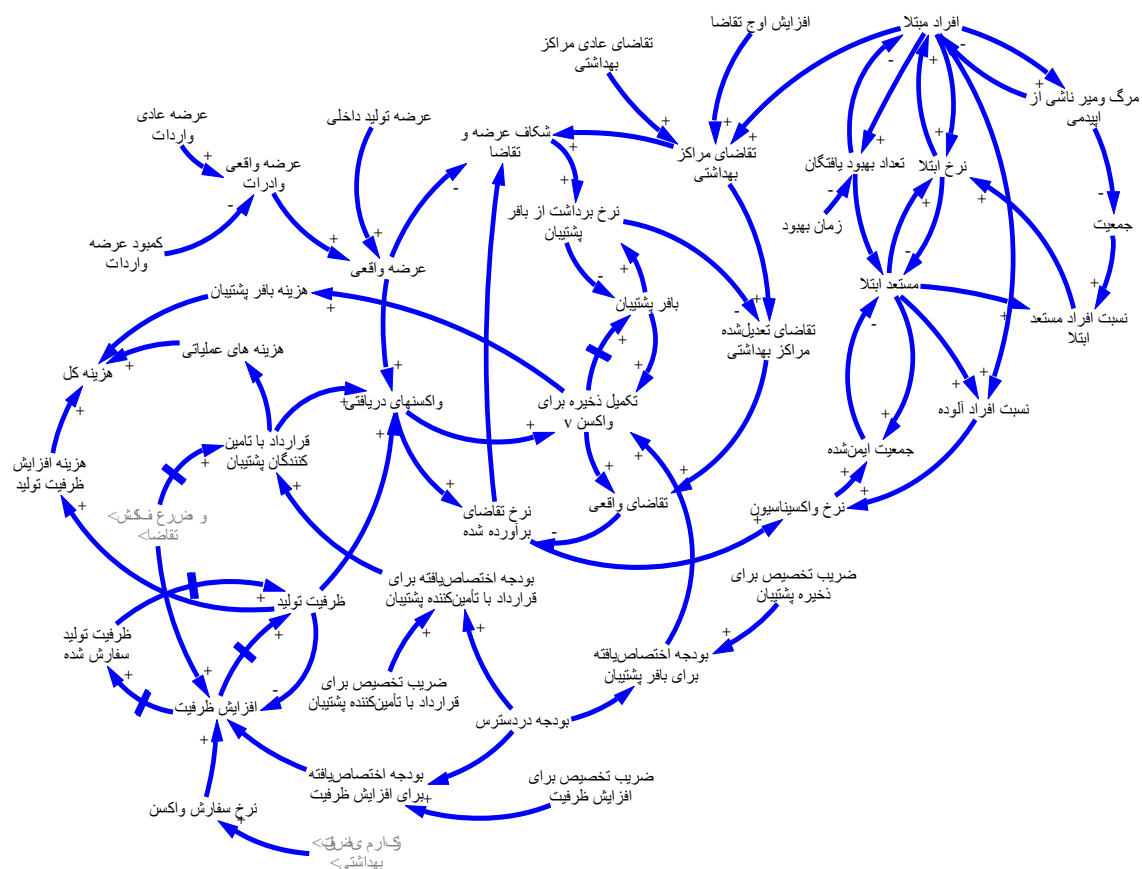
علاوه بر این، هنگامی که سطح موجودی به زیر آستانه هدف از پیش تعریف شده سقوط کند، یک مکانیزم دوباره‌پر کردن فعال می‌شود. اثربخشی و میزان این دوباره‌پر کردن به طور مستقیم تحت تأثیر بودجه اختصاص یافته قرار دارد. سه حلقه بازخورد تعادلی اصلی در پاسخ به شکاف عرضه و تقاضا فعال می‌شوند:

¹ Creaco

² Chen

³ Ding

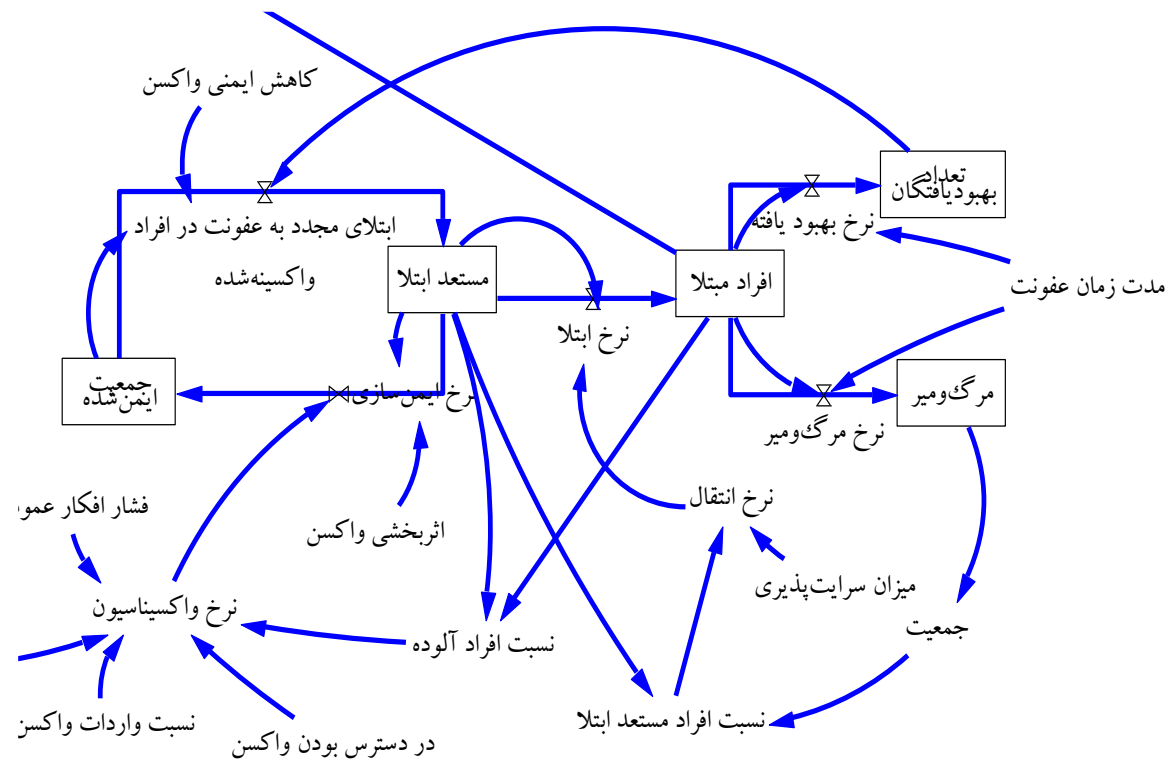
این ساختار پویا، مبنای نظری برای مدل‌سازی پویایی سیستم توسعه یافته در این پژوهش را فراهم می‌کند. این مدل‌سازی، منطق تصمیم‌گیری و رفتار سیستمی را در شرایط اختلالات ناشی از اپیدمی و محدودیت‌های منابع به تصویر می‌کشد و توضیحی منسجم از نحوه تعامل راهبردهای تاب‌آوری برای تثبیت زنجیره تأمین و اکسن ارائه می‌دهد.



شکل ۱. نمودار علی - حلقوی زنجیره تامین واکسن آنفولانزای خراسان بزرگ

۲.۴. زیرسیستم اپیدمی

زیرسیستم اپیدمی شامل مجموعه‌ای از حلقه‌های بازخوردی است که پویایی بیماری را از طریق تأثیر بر نرخ‌های عفونت، واکسیناسیون و مرگ‌ومیر شکل می‌دهند. با افزایش موارد عفونت، تعداد افراد مستعد افزایش یافته و یک حلقه بازخورد مثبت ایجاد می‌شود که به تسریع شیوع بیماری می‌انجامد. در مقابل، بهبودی موجب ایجاد ایمنی، کاهش آسیب‌پذیری و در نتیجه کند شدن روند انتقال می‌گردد. همچنین، افزایش نرخ واکسیناسیون تعداد افراد مستعد را کاهش داده و به کنترل شیوع کمک می‌کند، در حالی که مرگ‌ومیر نیز با کاهش جمعیت آسیب‌پذیر، انتقال بیماری را محدود می‌سازد. از سوی دیگر، رشد موارد عفونت می‌تواند تقاضا برای واکسن و آگاهی عمومی را افزایش دهد و به نوبه خود، مشوقی برای واکسیناسیون باشد. با این حال، در صورت ناکافی بودن نرخ‌های واکسیناسیون، این روند معکوس شده و زمینه برای گسترش بیماری فراهم می‌شود. این روابط و تعاملات پویا، که ماهیت غیرخطی و پیچیده سیستم را نشان می‌دهند، در شکل ۱ به تصویر کشیده شده‌اند.



شکل ۲. زیر سیستم اپیدمی زنجیره تامین واکسن آنفلوآنزای خراسان بزرگ

۳.۴. زیرسیستم تقاضا

در طول فصل آنفلوآنزا، تقاضا برای واکسن به طور معمول به دلیل افزایش موارد ابتلا و وقوع هم‌زمان اپیدمی‌های تنفسی رشد می‌کند. این تقاضا از دو بخش تشکیل می‌شود: سطح پایه که بیانگر نیازهای ثابت در طول سال است و افزایش‌های فصلی که عمدتاً در نتیجه ظهور سویه‌های جدید و مسری ایجاد می‌شوند. سویه‌های با قدرت سرایت بالا به شکل چشمگیری تقاضا را افزایش می‌دهند، زیرا افراد برای محافظت از خود به واکسیناسیون روی می‌آورند (علیزاده و همکاران، ۲۰۲۱؛

حلقه بازخورد بافر پشتیبان به صورت پویا با بهره گیری از ذخایر برای جبران اختلالات، پایداری عرضه را در شرایط اضطراری حفظ می کند. تخصیص منابع کافی به این بافر، چابکی سیستم را افزایش داده و اثر عدم قطعیت های تقاضا را کاهش می دهد. علاوه بر این، ملاحظات بودجه ای برای ایجاد بافر، توسعه ظرفیت تولید داخلی و انعقاد قراردادهای تأمین، نقش تعیین کننده ای در تصمیمات مالی دارند. مدیریت مؤثر هزینه ها تضمین می کند که زنجیره تأمین واکسن پایدار و مقاوم باقی بماند. شکل ۲، سازوکار این فرآیند و تعامل بین اجزای آن را به تصویر می کشد.



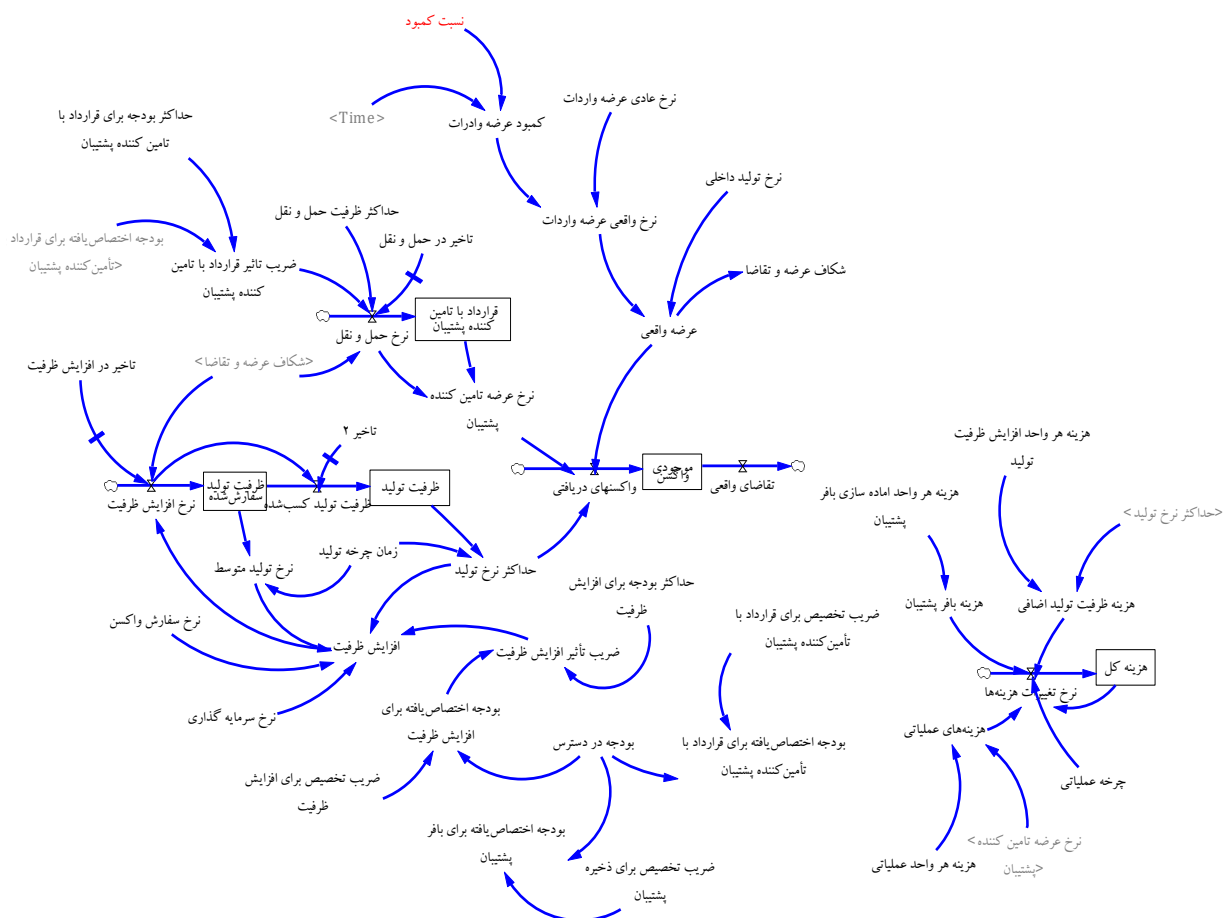
۴.۴. زیرسیستم عرضه

واردات واکسن آنفلوانزا به ایران با چالش‌هایی نظیر تحریم‌ها، نوسانات قیمت و مسائل لجستیکی مواجه است که این عوامل به کمبود عرضه منجر می‌شوند. این کمبودها باعث کاهش نرخ عرضه واقعی واردات، تخلیه موجودی واکسن و افزایش شکاف عرضه-تقاضا می‌گردند.

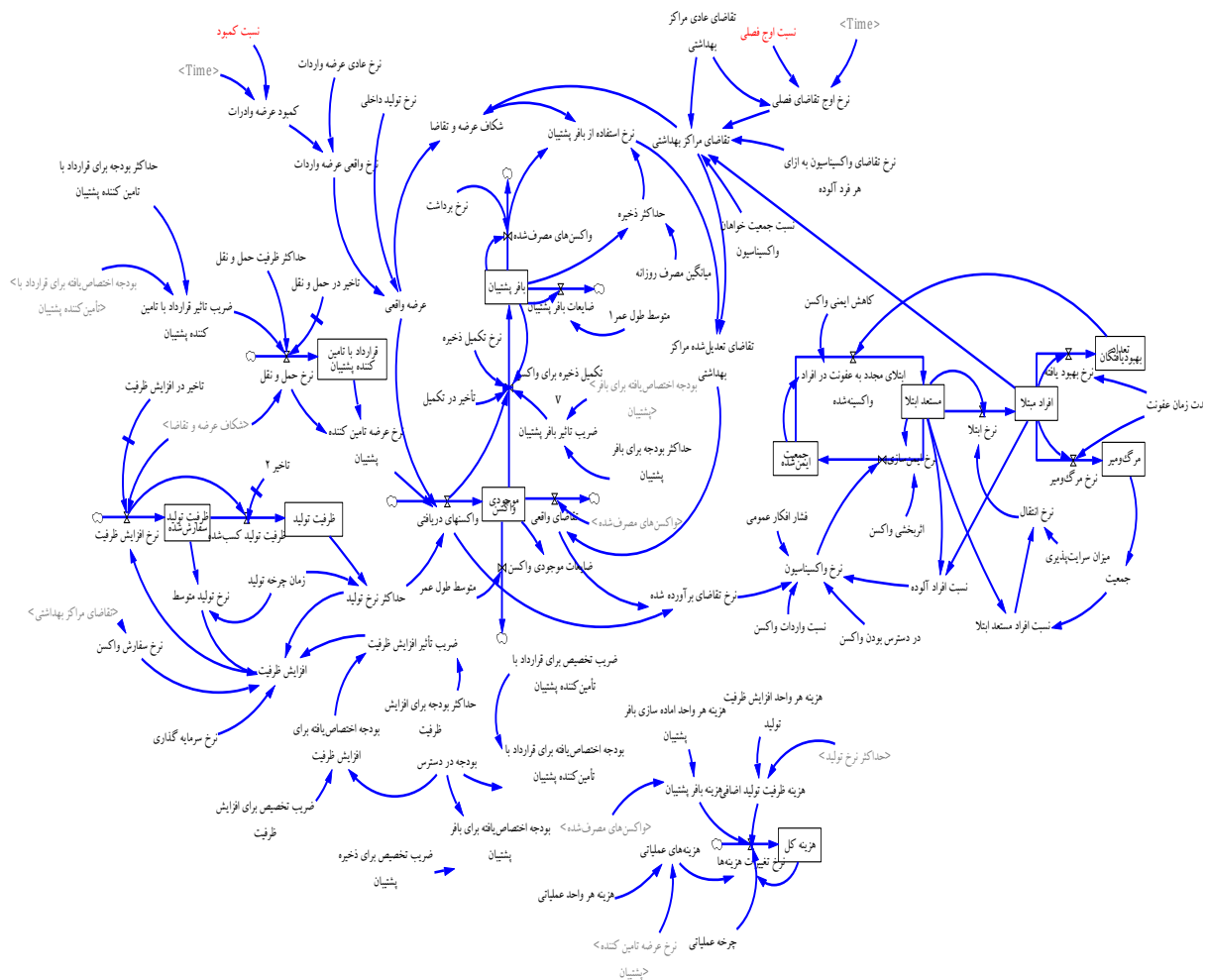
در واکنش به این شرایط، سیستم اقدام به فعال‌سازی قرارداد با تأمین‌کننده پشتیبان کرده و نرخ عرضه از تأمین‌کننده پشتیبان را برای جبران کمبودها افزایش می‌دهد. اگر کمبود همچنان ادامه یابد، راهکارهایی همچون افزایش ظرفیت تولید داخلی از طریق بالا بردن نرخ سرمایه‌گذاری و نرخ افزودن ظرفیت به اجرا درمی‌آید. این اقدامات یک حلقه بازخورد مثبت ایجاد می‌کنند که عرضه را در بلندمدت تقویت می‌نماید.

در این میان، تخصیص بهینه بودجه نقشی حیاتی دارد؛ چرا که تأمین مالی کافی برای قرارداد با تأمین‌کننده پشتیبان و افزایش ظرفیت تولید داخلی، به‌طور مستقیم بر پایداری عرضه اثر می‌گذارد. مدیریت کارآمد هزینه‌ها نیز با تضمین منابع کافی برای بافر پشتیبان و ارتقای ظرفیت تولید، به کاهش شکاف عرضه-تقاضا کمک می‌کند.

این فرآیندها و تعاملات پیچیده، در قالب یک مدل پویایی سیستم مبتنی بر انباشت و جریان (شکل‌های ۳ و ۴) شبیه‌سازی و تحلیل شده‌اند تا از تصمیم‌گیری آگاهانه برای افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین واکسن و پاسخ‌گویی به نوسانات تقاضا پشتیبانی کنند.



شکل ۴. زیر سیستم عرضه زنجیره تأمین واکسن آنفلوانزای خراسان بزرگ



شکل ۵. زنجیره تامین واکسن آنفولانزای خراسان بزرگ

۵. اعتبارسنجی مدل (آزمون مدل)

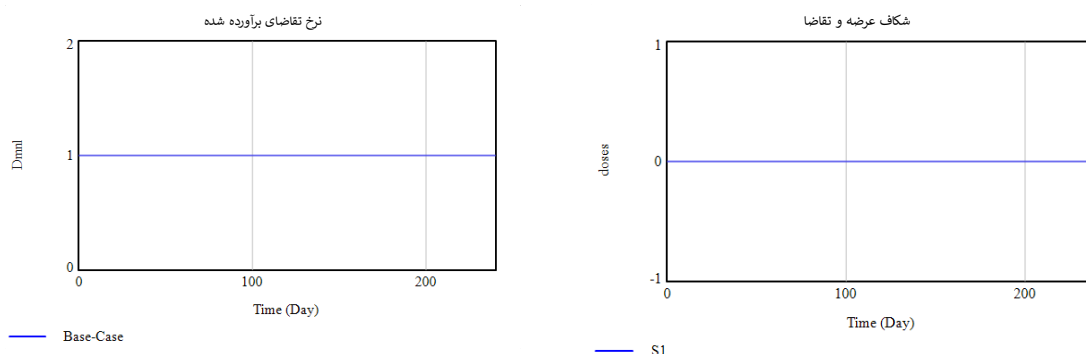
اعتبارسنجی، دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های پویایی سیستم را از طریق تمرکز بر روابط و فرمول‌بندی‌های دقیق تضمین می‌کند (مدرس^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). در این راستا، آزمون‌های متعددی به کار گرفته می‌شود؛ از جمله تأیید ساختاری برای مقایسه ساختار مدل با سیستم واقعی، سازگاری ابعادی برای اطمینان از هم‌خوانی واحدها و ابعاد متغیرها، بازتولید رفتار برای تطبیق الگوهای رفتاری مدل با داده‌های واقعی، آزمون شرایط حدی برای ارزیابی مدل در سناریوهای بحرانی و تحلیل حساسیت برای سنجش تأثیر تغییر پارامترها بر خروجی مدل (فارستر و سنگه^۲، ۱۹۹۶). هرچند اجرای همه این آزمون‌ها در عمل همواره امکان‌پذیر یا مقرون به صرفه نیست، در این مطالعه از تأیید ساختاری، سازگاری ابعادی، شرایط حدی و تحلیل حساسیت به عنوان مراحل اصلی اعتبارسنجی استفاده شد.

ساختار مدل با نظر و تأیید کارشناسان معاونت بهداشت و مرکز بهداشت خراسان رضوی و رئیس اداره بیماری‌های واگیردار نهایی گردید. در این فرآیند، اصول کلیدی سیستم بررسی و بر این نکته تأکید شد که عرضه واکسن باید همواره

¹ Modares

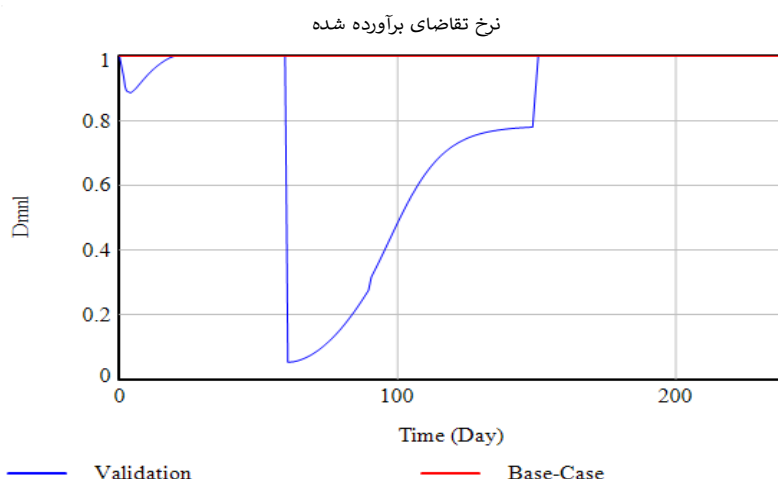
² Forrester and Senge

با تقاضای مراکز بهداشتی هم‌راستا باشد تا از بروز کمبود جلوگیری شود. در شرایط عادی، عملکرد بهینه زنجیره تأمین زمانی محقق می‌شود که تمام تقاضاها به‌موقع و بدون تأخیر برآورده شوند. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در این وضعیت شکاف عرضه-تقاضا برابر با صفر و نرخ رضایت تقاضا معادل یک است که نشان‌دهنده کارایی کامل سیستم می‌باشد.

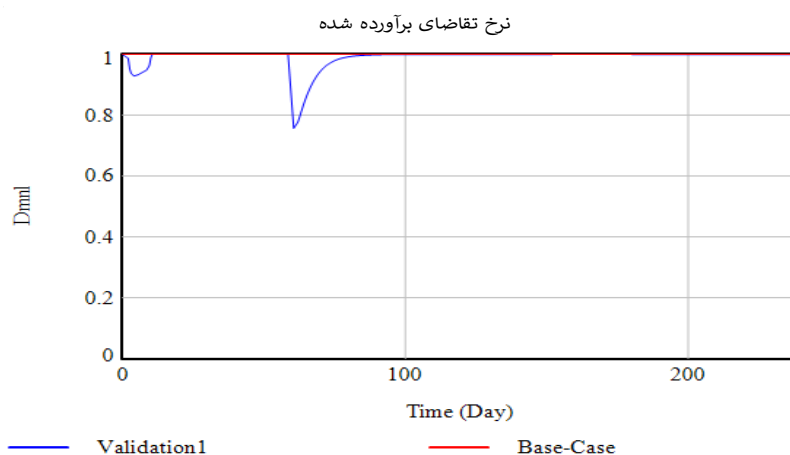


شکل ۵. نتایج آزمون تایید ساختاری

در تحلیل حساسیت، تمامی متغیرهای مدل ثابت نگه داشته شدند و تنها متغیر مورد بررسی تغییر یافت تا اثر آن بر رفتار سیستم سنجیده شود. برای نمونه، کاهش نرخ برداشت از بافر پشتیبان از ۰٫۹ به ۰٫۱ باعث افت قابل توجه نرخ رضایت تقاضا گردید (شکل ۶). در مقابل، افزایش ۳۰ درصدی ظرفیت حمل و نقل منجر به بهبود نرخ رضایت تقاضا شد؛ زیرا این تغییر، نرخ عرضه تأمین‌کننده پشتیبان را افزایش داد (شکل ۷). این یافته‌ها نشان می‌دهند که مدل نسبت به تغییرات متغیرهای کلیدی حساس بوده و واکنش آن به تغییرات در پارامترهای مهم، رفتار واقعی سیستم را بازتاب می‌دهد.

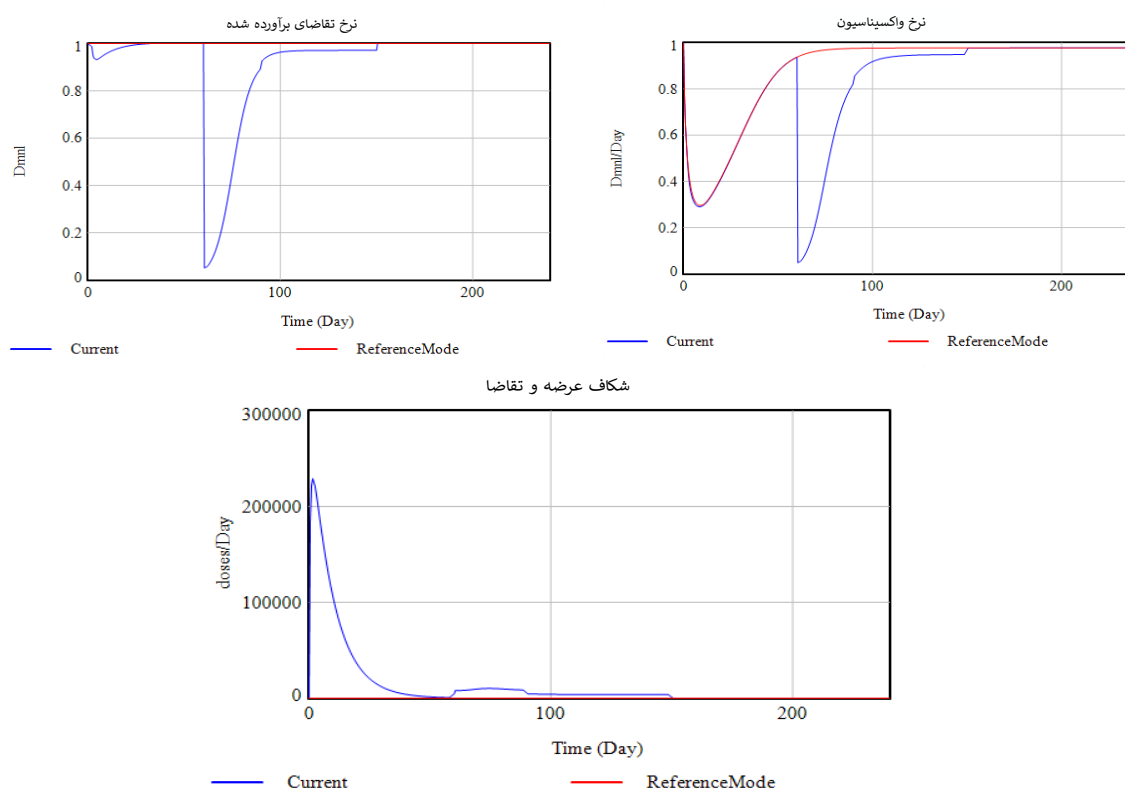


شکل ۷. تحلیل حساسیت تقاضای برآورده شده با تغییر نرخ برداشت از بافر پشتیبان



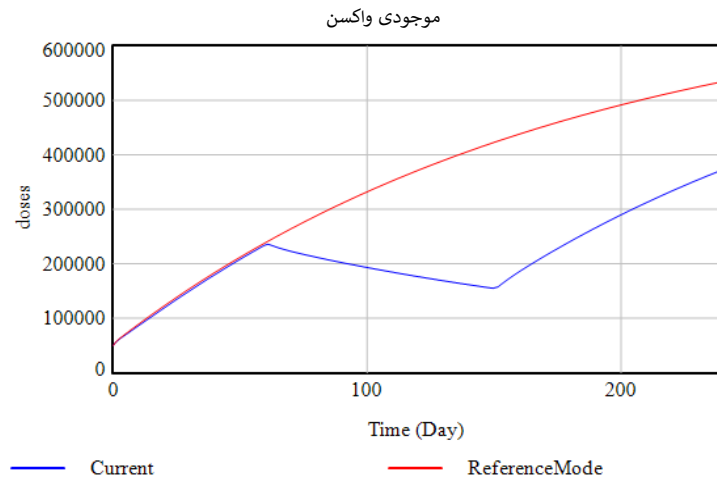
شکل ۸. تحلیل حساسیت تقاضای برآورده شده با تغییر ظرفیت حمل و نقل

آزمون مقدار حدی، عملکرد یک مدل را تحت شرایطی مانند مقادیر صفر یا بی‌نهایت برای متغیرها ارزیابی می‌کند. این آزمون که از طریق تحلیل معادلات یا شبیه‌سازی انجام می‌شود (سوانسون، ۲۰۰۲)، برای سناریوهای بدون کمبود عرضه وارداتی و اوج تقاضای فصلی به کار گرفته شد. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، تحت این شرایط، نرخ رضایت تقاضا به ۱ رسید، که نشان‌دهنده تعادل کامل بین عرضه و تقاضا است.



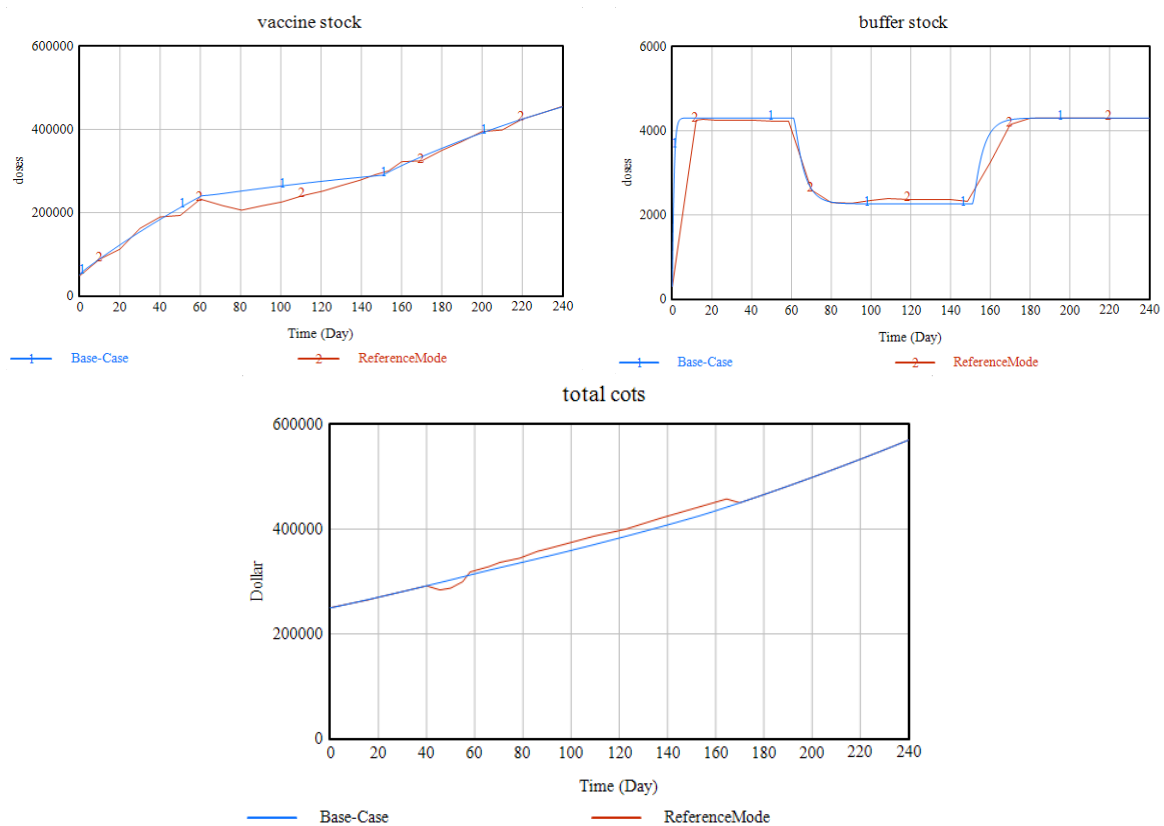
شکل ۹. مدل تحت شرایط حدی

در شکل ۹، قرارداد با تأمین‌کنندگان پشتیبان و افزایش ظرفیت تولید برای جبران کمبود عرضه فعال نمی‌شوند. موجودی واکسن به طور مداوم افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده رشد پایدار عرضه واکسن در طول زمان است. این آزمون نشان داد که مدل کارآمد و معتبر است.



شکل ۱۰. مدل تحت شرایط حدی

این آزمایش به منظور اعتبارسنجی عملکرد تابعی مدل با مقایسه روندهای زمانی متغیرهای کلیدی مدل با داده‌های تاریخی سیستم توزیع واکسن در استان خراسان رضوی (حالت مرجع) انجام شد. بر اساس شکل ۱۴، روندهای زمانی متغیرهایی مانند بافر پشتیبان، هزینه کل، و سطوح موجودی واکسن از مدل شبیه‌سازی با داده‌های دنیای واقعی مقایسه شدند.



شکل ۱۱. مقایسه متغیرها با رفرنس مد

۱.۵. ارزیابی عملکرد مدل شبیه سازی

پس از تأیید ساختار مدل توسط متخصصان معاونت بهداشت استان خراسان رضوی و گذراندن موفقیت آمیز آزمون های سازگاری ابعاد و تطبیق مدل در نرم افزار Vensim، شبیه سازی اولیه انجام شد. در ادامه، با استفاده از آزمون بازتولید رفتار، نتایج شبیه سازی متغیرهای اصلی با رفتار مرجع آن ها مقایسه گردید و شاخص $RMSPE$ محاسبه شد. به عنوان نمونه، این آزمون برای متغیر «موجودی واکسن» انجام شد و مقادیر پیش بینی شده با روش سری زمانی استخراج شده از اسناد معاونت بهداشت خراسان رضوی مورد ارزیابی قرار گرفت. شاخص $RMSPE$ یک معیار آماری برای سنجش انطباق رفتار مدل است و اختلاف بین داده های واقعی (At) و داده های شبیه سازی شده (St) را نشان می دهد. برای تأیید صحت رفتار سیستم، مقدار این شاخص باید کمتر از ۰.۱ باشد.

$$RMPSE = \sqrt{1/n \sum_{t=1}^n \left(\frac{St - At}{At} \right)^2} \quad (1)$$

بر اساس محاسبات صورت گرفته، مقدار شاخص $RMSPE$ در این شبیه سازی برابر با ۰.۰۷۰۴۲۲ به دست آمد که کمتر از حد معیار ۰.۱ است و بنابراین صحت رفتاری و اعتبار مدل را تأیید می کند.

۶. تحلیل سناریو و سیاست

یک سناریو شرایط محیطی تصادفی را بازتاب می دهد، در حالی که سیاست شامل اقدامات هدفمند در چارچوب یک مدل است. طراحی سیاست با شبیه سازی تغییرات در پارامترهای سیاستی و تحلیل پیامدهای آن، عملکرد مدل را ارزیابی می کند. تحلیل حساسیت به شناسایی پارامترهای کلیدی مؤثر بر رفتار مدل کمک کرده و زمینه را برای توسعه و شبیه سازی سناریوهای سیاستی فراهم می سازد تا نرخ های رضایت تقاضا در شرایط مختلف بررسی شود (سای^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). در این مطالعه سه سناریو مورد تحلیل قرار گرفت که شامل سناریوی یک (سناریو پایه) با فرض تقاضای عادی و بدون مداخلات سیاستی، سناریو دو (سناریوی جهش های ژنتیکی و وروس) که باعث افزایش آنفلوآنزای فصلی و رشد تقاضای واکسن می شد و سناریو سوم، سناریوی بدترین حالت که ترکیبی از جهش های ژنتیکی و وروس و شیوع بیماری های جدید بوده و افزایش قابل توجهی در تقاضا ایجاد می کرد. برای مقابله با این شرایط، سه سیاست مبتنی بر نتایج شبیه سازی مورد ارزیابی قرار گرفت که شامل ضریب تخصیص برای بافر پشتیبان، ضریب تخصیص برای افزایش ظرفیت و ضریب تخصیص برای قرارداد با تأمین کننده پشتیبان بود. این سیاست ها به طور مستقل و در قالب سناریوهای مختلف، بر اساس برنامه های موجود مرکز بهداشت خراسان رضوی و مطالعات پیشین، تحلیل شدند. این سناریوها بر اساس داده های تجربی، دستورالعمل های بین المللی مانند نقشه راه (WHO SAGE (2022) و مطالعات قبلی (ایوانوف^۲، ۲۰۲۰؛ دایجزر^۳ و همکاران، ۲۰۱۸) تدوین و از طریق مشورت با کارشناسان بهداشت استان خراسان رضوی اعتبارسنجی شدند.

¹ Sai

² Ivanov

³ Duijzer

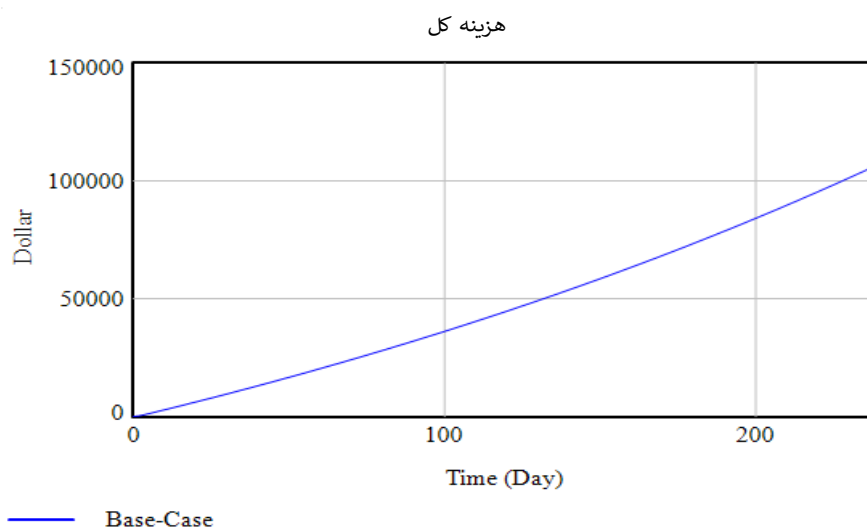
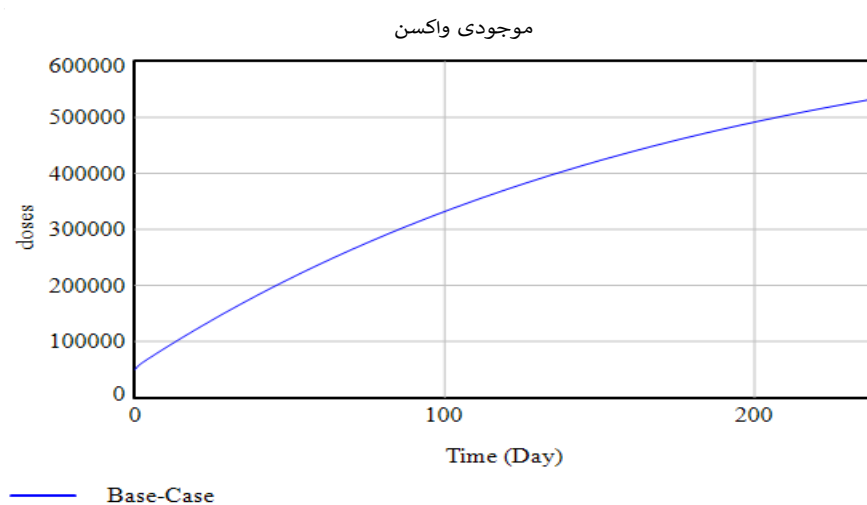
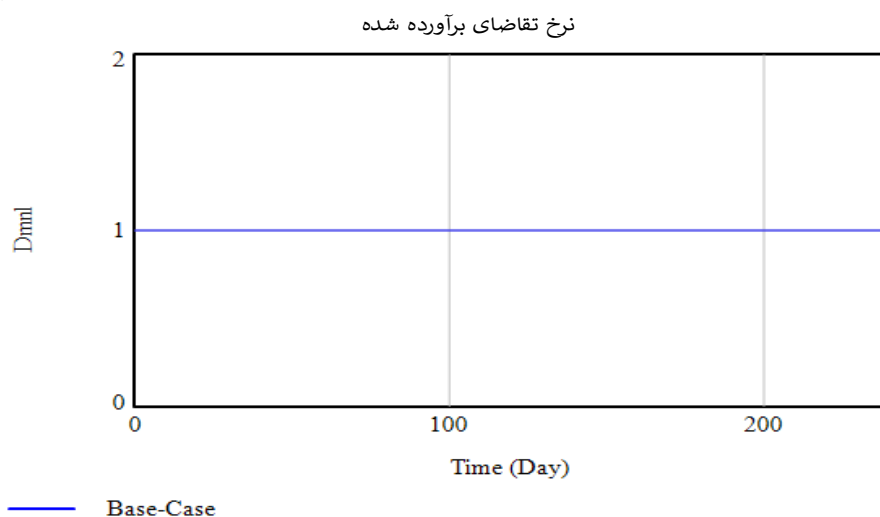
جدول ۱. مقادیر متغیرها بر اساس سناریوهای مختلف

سناریو	سیاست	ضریب تخصیص برای بافر پشتیبان	ضریب تخصیص برای افزایش ظرفیت	ضریب تخصیص برای قرارداد با تأمین کننده پشتیبان
۱			-	
۲	۱	۱۰۰%	۰	۰
	۲	۴۰%	۰	۶۰%
	۳	۱۰%	۷۰%	۲۰%
۳	۱	۱۰۰%	۰	۰
	۲	۴۰%	۶۰%	۰
	۳	۱۰%	۲۰%	۷۰%

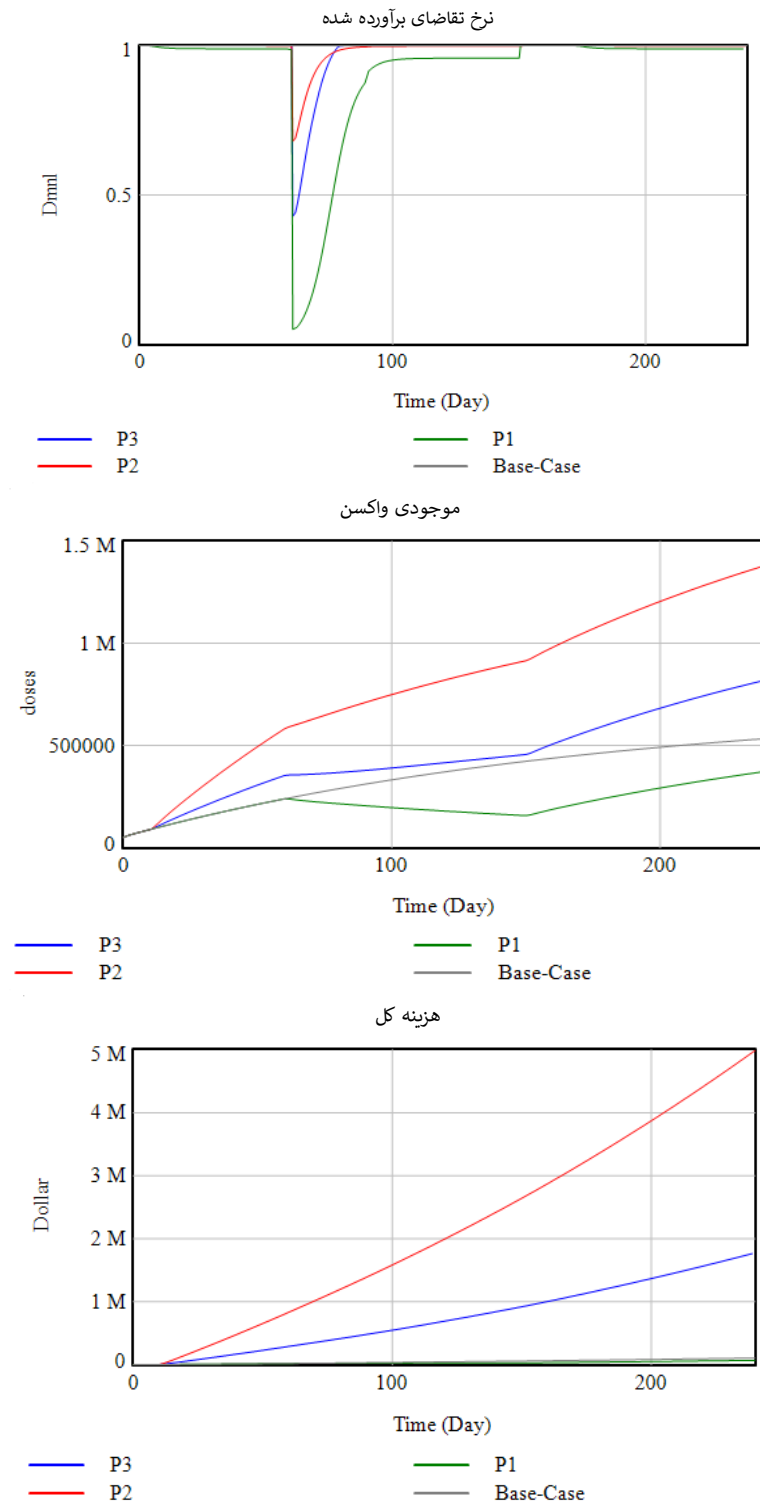
۱.۶. تحلیل نتایج سناریو و سیاست

شکل ۱۰-۱۲ نتایج سناریوهای مختلف را تحت سیاست‌های گوناگون مقایسه کرده و تمرکز آن بر نرخ رضایت از تقاضا، هزینه کل و موجودی واکسن است.

در سناریوی پایه، شکل ۱۰، تقاضا در طول دوره شبیه‌سازی به طور کامل تأمین شد و موجودی واکسن تا روز ۲۴۰ به صورت پیوسته افزایش یافت. این نتایج شامل نرخ تأمین تقاضا، هزینه کل و موجودی واکسن هستند. در سناریوی ۱ (سیاست‌های پایه یا عادی کسب و کار)، تقاضا در سطح منظم باقی ماند و هیچ مداخله سیاستی در طول دوره شبیه‌سازی اعمال نشد. همان‌طور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد، نرخ تأمین تقاضا در کل دوره شبیه‌سازی تقریباً برابر با ۱ (۱۰۰٪) بود؛ بدین معنا که تمامی تقاضاها بدون کمبود یا اختلال برآورده شدند. در این حالت، موجودی واکسن به تدریج و با روندی نسبتاً ثابت افزایش یافت و تا روز ۲۴۰ بدون افت یا نوسان ادامه پیدا کرد.



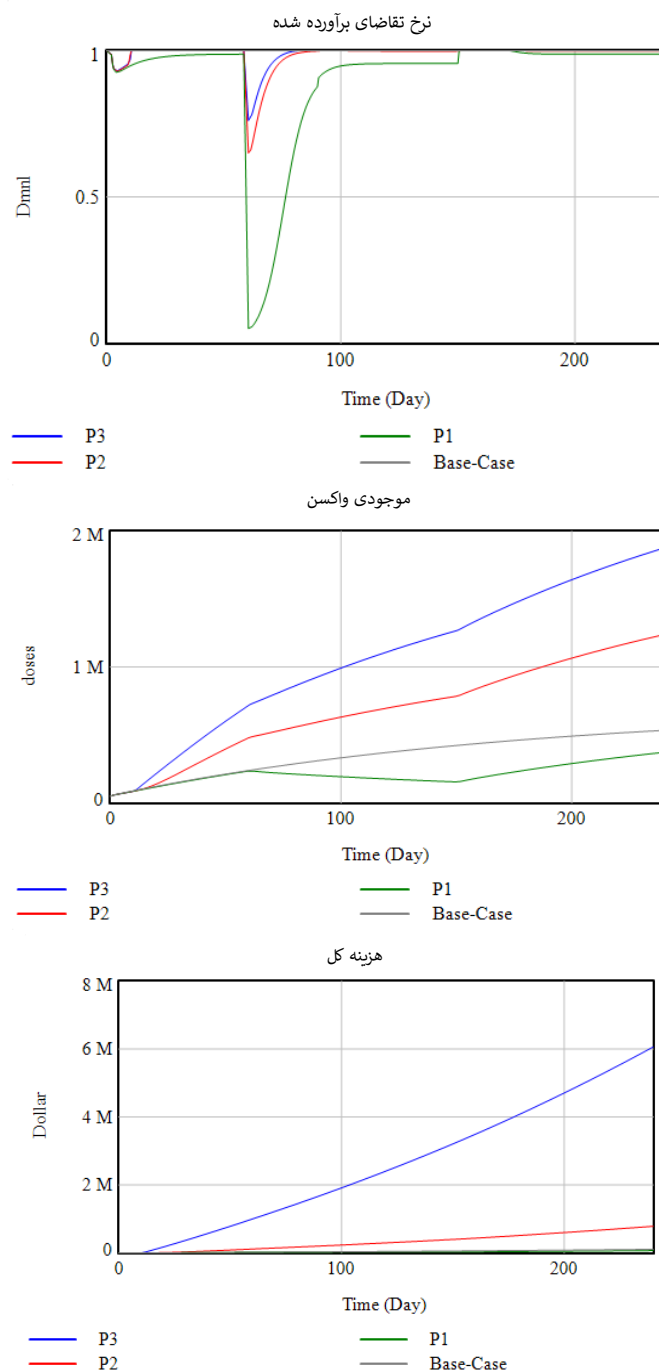
شکل ۱۲. نتایج سناریو پایه



شکل ۱۳. نتایج سناریو ۲ تحت سیاست های مختلف

مطابق شکل ۱۱، در سناریوی جهش های ویروسی، نرخ رضایت از تقاضا تحت سیاست سوم بالاتر از سیاست های یکم و دوم بود، در حالی که سیاست یکم کمترین هزینه کل و سیاست دوم بیشترین موجودی را ثبت کرد. در سناریوی ۲ (جهش های ژنتیکی ویروس)، تفاوت سیاست ها آشکارتر شد. نتایج نشان می دهد که نرخ تأمین تقاضا در سیاست ۳ — یعنی تقویت ظرفیت تولید داخلی — نسبت به سیاست های ۱ و ۲ به طور قابل توجهی افزایش می یابد. از منظر

حلقه‌های بازخورد، این برتری ناشی از حلقه تقویت تولید داخلی است؛ به این معنا که هرگونه شکاف میان عرضه و تقاضا به‌طور مستقیم موجب تحریک ظرفیت‌های تولید داخلی می‌شود. این حلقه بازخوردی با افزایش عرضه واقعی و بهبود نرخ تأمین تقاضا، شکاف را سریع‌تر و پایدارتر کاهش می‌دهد. در مقابل، سیاست ۱ عمدتاً بر حلقه استفاده از ذخیره استراتژیک متکی است و بنابراین توان پایداری کمتری در برابر اختلالات شدید دارد، چراکه موجودی ذخیره پس از مصرف نیازمند زمان و منابع برای دوباره‌پرکردن است. سیاست ۲ نیز بر حلقه تأمین پشتیبان استوار است که اگرچه در کوتاه‌مدت اثرگذار است، اما به دلیل محدودیت دسترسی به عرضه خارجی و تأخیرهای احتمالی، پایداری کمتری نسبت به سیاست ۳ دارد.



شکل ۱۴. نتایج سناریو ۳ تحت سیاست‌های مختلف

مطابق شکل ۱۲، در سناریوی ترکیبی جهش‌های ویروسی و شیوع بیماری‌های جدید، سیاستسوم بالاترین نرخ رضایت از تقاضا و بیشترین موجودی واکسن را به دست آورد و سیاست یکم کمترین هزینه کل را رقم زد. نتایج سناریوی ۳ (شیوع همزمان بیماری‌های نوظهور و جهش‌های ویروسی) نیز این الگو را تأیید می‌کند. بالاترین نرخ تأمین تقاضا مربوط به سیاست ۳ است، چراکه فعال‌سازی حلقه تقویت تولید داخلی به‌طور مستقیم ظرفیت عرضه را با سطح تقاضای جهشی هماهنگ می‌کند. در این حالت، اگرچه هزینه کل سیستم در سیاست ۱ کمتر است و سیاست ۲ بیشترین موجودی را ایجاد می‌کند، اما تنها سیاست ۳ قادر است با ایجاد تعادل پویا میان عرضه و تقاضا، نرخ پوشش واکسیناسیون را در سطوح بالاتر حفظ کند. بنابراین، برتری سیاست ۳ از منظر نتایج شبیه‌سازی و ساختار حلقه‌های بازخورد علی‌ناشی از مکانیزم خودتقویتی افزایش ظرفیت تولید داخلی است که در شرایط اختلالات شدید، پاسخ‌گویی پایدارتر و سریع‌تری را نسبت به سایر سیاست‌ها فراهم می‌آورد.

۷. بحث و نتیجه‌گیری

مطالعه تاب‌آوری زنجیره تأمین واکسن آنفلوانزا را در برابر کمبود واردات و افزایش تقاضای فصلی بررسی می‌کند. با بهره‌گیری از یک مدل پویایی سیستم، اثر پارامترهایی مانند ضریب تخصیص برای بافر پشتیبان، ضریب تخصیص برای افزایش ظرفیت و ضریب تخصیص برای قرارداد با تأمین‌کنندگان پشتیبان بر نرخ رضایت از تقاضا و نرخ‌های واکسیناسیون تحلیل شد. برخلاف پژوهش‌های پیشین که بیشتر بر بهینه‌سازی کمی یا مدل‌های اپیدمیولوژیک متمرکز بودند (لین و همکاران، ۲۰۲۲؛ رستگار و همکاران، ۲۰۲۱؛ سازوار و همکاران، ۲۰۲۱؛ سانسون و همکاران، ۲۰۲۲؛ سو و همکاران، ۲۰۱۹)، این مطالعه به‌طور خاص به اختلالات ناشی از جهش‌های ویروسی، شیوع بیماری‌های جدید و اوج‌های فصلی پرداخته است. نتایج نشان داد که استراتژی ترکیبی شامل افزایش ظرفیت تولید داخلی، استفاده از ذخایر بافر و بهره‌گیری از تأمین‌کنندگان پشتیبان می‌تواند به شکلی پایدار شکاف عرضه و تقاضا را کاهش داده و پوشش واکسیناسیون را تضمین کند. این یافته‌ها با مطالعاتی که بر نقش تنوع تأمین‌کنندگان و منابع جایگزین در افزایش تاب‌آوری زنجیره‌های حیاتی تأکید کرده‌اند هم‌راستا است (ایوانوف^۱، ۲۰۲۰؛ پال^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، نتایج ما بر اهمیت سرمایه‌گذاری در ظرفیت‌های تولید داخلی تأکید دارد؛ موضوعی که پیش‌تر نیز در ادبیات تاب‌آوری زنجیره تأمین دارو و واکسن مورد تأیید قرار گرفته است (شیه^۳، ۲۰۲۰؛ کوپروز^۴ و همکاران، ۲۰۲۲). نوآوری اصلی این مطالعه در بررسی اثر تخصیص بودجه میان استراتژی‌های مختلف است؛ عاملی که در بسیاری از مدل‌های قبلی نادیده گرفته شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که در شرایط عدم قطعیت، تخصیص بهینه بودجه میان ذخایر استراتژیک، قراردادهای تأمین پشتیبان و سرمایه‌گذاری در تولید داخلی می‌تواند به ایجاد تعادلی پویا میان هزینه و پاسخ‌گویی به تقاضا منجر شود. این نتیجه در امتداد دیدگاه پژوهش‌هایی است که بر اهمیت تحلیل همزمان کارایی اقتصادی و تاب‌آوری عملیاتی تأکید کرده‌اند (دلگوئی و ایوانوف^۵، ۲۰۲۱). علاوه بر کاربرد خاص در زمینه واکسن آنفلوانزا، نتایج این پژوهش از منظر نظری نیز قابل تعمیم است. سه مؤلفه اصلی شناسایی شده — بافر پشتیبان، عقد قرارداد با تأمین‌کنندگان پشتیبان و افزایش ظرفیت تولید داخلی — به‌عنوان عناصر کلیدی

¹ Ivanov

² Paul

³ Shih

⁴ Queiroz

⁵ Dolgui & Ivanov

تاب‌آوری زنجیره تامین عمل می‌کند و در قالب حلقه‌های بازخورد تعادلی با یکدیگر تعامل دارند. این چارچوب مفهومی می‌تواند مبنای توسعه مدل‌های تاب‌آوری برای سایر زنجیره‌های حیاتی مانند دارو، تجهیزات پزشکی و حتی کالاهای اساسی در شرایط بحران قرار گیرد. بدین ترتیب، پژوهش حاضر ضمن هم‌راستا بودن با ادبیات موجود، یک مدل بازخوردی-رفتاری تعمیم‌پذیر ارائه می‌دهد که امکان استفاده سیاست‌گذاران و مدیران را برای طراحی ترکیب بهینه استراتژی‌های تاب‌آوری با توجه به شرایط بومی و محدودیت‌های منابع فراهم می‌کند. با وجود نتایج ارزشمند این پژوهش، مدل ارائه‌شده دارای چند محدودیت است. نخست، به منظور حفظ سادگی و شفافیت، بسیاری از روابط زنجیره تامین به صورت خطی و ساده‌سازی‌شده در نظر گرفته شده‌اند، در حالی که در عمل تعاملات میان بازیگران زنجیره می‌تواند غیرخطی و پیچیده باشد. دوم، عدم قطعیت‌های سیاسی-اقتصادی مانند تحریم‌ها، نوسانات نرخ ارز، و تغییرات سیاست‌های تجاری که به طور مستقیم بر واردات و توزیع واکسن اثرگذارند، در مدل لحاظ نشده‌اند. سوم، رفتار تامین‌کنندگان و دولت‌ها بر اساس فرضیات ثابت در نظر گرفته شده است، در حالی که در شرایط واقعی ممکن است این رفتارها پویا و واکنش‌محور باشند. چهارم، مدل حاضر به موضوع حیاتی زیرساخت‌های زنجیره سرد به‌ویژه در بخش حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی نپرداخته است، که در مناطق با زیرساخت‌های ضعیف می‌تواند مانع جدی در دسترسی به واکسن باشد. برای پژوهش‌های آتی، پیشنهاد می‌شود این محدودیت‌ها مورد توجه قرار گیرند. از جمله، گسترش مدل با لحاظ کردن تأخیرها و ظرفیت‌های زنجیره سرد و بررسی سرمایه‌گذاری‌های موردنیاز در این حوزه. همچنین، توسعه مدل‌های هیبریدی با ادغام پویایی سیستم و تکنیک‌های یادگیری ماشین یا هوش مصنوعی می‌تواند دقت پیش‌بینی تقاضا و کارایی تصمیم‌گیری را افزایش دهد. علاوه بر این، استفاده از فناوری‌های نوین مانند بلاکچین و اینترنت اشیا برای رهگیری و پایش زنجیره تامین می‌تواند به شفافیت و اعتماد بیشتر کمک کند. در نهایت، تحلیل سناریوهای سیاسی-اقتصادی و طراحی مکانیسم‌های همکاری منطقه‌ای و بین‌المللی می‌تواند چشم‌انداز کامل‌تری از تاب‌آوری زنجیره تامین واکسن در شرایط واقعی ارائه دهد.

تعارض منافع

تعارض منافی بین نویسندگان وجود ندارد.

ORCID

Elnaz borji-khangheshlaghi  <https://orcid.org/0009-0000-6251-358X>

Alireza Pooya  <https://orcid.org/0000-0001-6000-3535>

Zahra Naji-Azimi  <https://orcid.org/0000-0003-1583-7244>

Farzad Dehghanian  <https://orcid.org/0000-0002-7568-5839>

منابع

- Abdullah, M., Hishamuddin, H., & Bazin, N. (2019). A system dynamics approach to investigate the effects of disruption on the supply chain with a mitigation strategy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 697(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/697/1/012024>
- Alizadeh, M., Paydar, M. M., Hosseini, S. M., & Makui, A. (2021). Influenza vaccine supply chain network design during the COVID-19 pandemic considering dynamical demand. *Scientia Iranica*. <https://doi.org/10.24200/sci.2021.58365.5694>
- Arifoğlu, K., & Tang, C. S. (2022). A two-sided incentive program for coordinating the influenza vaccine supply chain. *Manufacturing & Service Operations Management*, 24(1), 235–255. <https://doi.org/10.1287/msom.2020.0938>
- Chen, S., Zhang, M., Ding, Y., & Nie, R. (2020). Resilience of China's oil import system under external shocks: A system dynamics simulation analysis. *Energy Policy*, 146, 111795. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111795>
- Cho, S.-H. (2010). The optimal composition of influenza vaccines subject to random production yields. *Manufacturing & Service Operations Management*, 12(2), 256–277. <https://doi.org/10.1287/msom.1090.0271>
- Chung, J. R., Rolfes, M. A., Flannery, B., Prasad, P., O'Halloran, A., Garg, S., Fry, A. M., Singleton, J. A., Patel, M., Reed, C., & others. (2020). Effects of influenza vaccination in the United States during the 2018–2019 influenza season. *Clinical Infectious Diseases*, 71(8), e368–e376. <https://doi.org/10.1093/cid/ciz1244>
- Creaco, E., Di Nardo, A., Giudicianni, C., Greco, R., Santonastaso, G. F., & others. (2018). Resilience analysis in the permanent partitioning of a water distribution network. *Proceedings of 13th International Conference on Hydroinformatics*.
- Dai, T., Cho, S.-H., & Zhang, F. (2016). Contracting for on-time delivery in the US influenza vaccine supply chain. *Manufacturing & Service Operations Management*, 18(3), 332–346. <https://doi.org/10.1287/msom.2015.0574>
- Demirci, E. Z., & Erkip, N. K. (2020). Designing intervention scheme for vaccine market: A bilevel programming approach. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 32, 453–485. <https://doi.org/10.1007/s10696-019-09348-5>
- Diabat, A., Jabbarzadeh, A., & Khosrojerdi, A. (2019). A perishable product supply chain network design problem with reliability and disruption considerations. *International Journal of Production Economics*, 212, 125–138. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.018>
- Ding, Y., Chen, S., Zheng, Y., Chai, S., & Nie, R. (2022). Resilience assessment of China's natural gas system under supply shortages: A system dynamics approach. *Energy*, 247, 123518. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123518>
- Dolgui, A., & Ivanov, D. (2021). Exploring supply chain structural dynamics: New disruptive technologies and disruption risks. *International Journal of Production Economics*, 229, 107886. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107886>
- Duijzer, L. E., Van Jaarsveld, W., & 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>
- Duijzer, L. E., Van Jaarsveld, W., & Dekker, R. (2018). The benefits of combining early a specific vaccination with later specific vaccination. *European Journal of Operational Research*, 271(2), 606–19.
- Enayati, S., & Özaltın, O. Y. (2020). Optimal influenza vaccine distribution with equity. *European Journal of Operational Research*, 283(2), 714–725. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.11.025>

- Forrester, J. W., & Senge, P. M. (1996). Tests for building confidence in system dynamics models. *Modelling for Management: Simulation in Support of Systems Thinking*, 2(414–434).
- Georgiadis, G. P., & Georgiadis, M. C. (2021). Optimal planning of the COVID-19 vaccine supply chain. *Vaccine*, 39(37), 5302–5312. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2021.07.068>
- Ivanov, D. (2022). Viable supply chain model: Integrating agility, resilience and sustainability perspectives—Lessons from and thinking beyond the COVID-19 pandemic. *Annals of Operations Research*, 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03640-6>
- 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>
- Lin, Q., Zhao, Q., & Lev, B. (2022). Influenza vaccine supply chain coordination under uncertain supply and demand. *European Journal of Operational Research*, 297(3), 930–948. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.05.025>
- Lister, S., & Williams, E. D. (2004). Influenza vaccine shortages and implications.
- Modares, A., Pooya, A., Emrooz, V. B., & Roozkhosh, P. (2024). Presenting a new model for evaluating the factors affecting equipment reliability using system dynamics. *Quality and Reliability Engineering International*. <https://doi.org/10.1002/qre.3553>
- Mohammadi, M., Dehghan, M., Pirayesh, A., & Dolgui, A. (2022). Bi-objective optimization of a stochastic resilient vaccine distribution network in the context of the COVID-19 pandemic. *Omega*, 113, 102725. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102725>
- Özaltın, O. Y., Prokopyev, O. A., & Schaefer, A. J. (2018). Optimal design of the seasonal influenza vaccine with manufacturing autonomy. *INFORMS Journal on Computing*, 30(2), 371–387. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2017.0786>
- Özaltın, O. Y., Prokopyev, O. A., Schaefer, A. J., & Roberts, M. S. (2011). Optimizing the societal benefits of the annual influenza vaccine: A stochastic programming approach. *Operations Research*, 59(5), 1131–1143. <https://doi.org/10.1287/opre.1110.0988>
- Paul, S. K., Chowdhury, P., Moktadir, M. A., & Lau, K. H. (2021). Supply chain recovery challenges in the wake of COVID-19 pandemic. *Journal of Business Research*, 136, 316–329. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.07.056>
- Queiroz, M. M., Ivanov, D., Dolgui, A., & Wamba, S. F. (2022). Impacts of epidemic outbreaks on supply chains: Mapping a research agenda amid the COVID-19 pandemic through a structured literature review. *Annals of Operations Research*, 319(1), 1159–1196. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03685-7>
- 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>
- Roozkhosh, P., Pooya, A., & Agarwal, R. (2023). Blockchain acceptance rate prediction in the resilient supply chain with hybrid system dynamics and machine learning approach. *Operations Management Research*, 16(2), 705–725. <https://doi.org/10.1007/s12063-022-00336-x>
- Sabouhi, F., Pishvae, M. S., & Jabalameli, M. S. (2018). Resilient supply chain design under operational and disruption risks considering quantity discount: A case study of pharmaceutical supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 126, 657–672. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.001>
- Sadjadi, S. J., Ziaei, Z., & Pishvae, M. S. (2019). The design of the vaccine supply network under uncertain condition: A robust mathematical programming approach. *Journal of Modelling in Management*, 14(4), 841–871. <https://doi.org/10.1108/JM2-07-2018-0093>

- Sah, P., Medlock, J., Fitzpatrick, M. C., Singer, B. H., & Galvani, A. P. (2018). Optimizing the impact of low-efficacy influenza vaccines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(20), 5151–5156. <https://doi.org/10.1073/pnas.1802479115>
- Sai, A. R., Buckley, J., Fitzgerald, B., & Le Gear, A. (2021). Taxonomy of centralization in public blockchain systems: A systematic literature review. *Information Processing & Management*, 58(4), 102584. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2021.102584>
- Samani, M. R. G., & Hosseini-Motlagh, S.-M. (2019). An enhanced procedure for managing blood supply chain under disruptions and uncertainties. *Annals of Operations Research*, 283(1), 1413–1462. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2873-4>
- Sansone, M., Holmstrom, P., Hallberg, S., Nordén, R., Andersson, L.-M., & Westin, J. (2022). System dynamic modelling of healthcare associated influenza—a tool for infection control. *BMC Health Services Research*, 22(1), 709. <https://doi.org/10.1186/s12913-022-07959-7>
- 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>
- Shih, W. C. (2020). Is it time to rethink globalized supply chains? *MIT Sloan Management Review*, 61(4), 1–3. <https://sloanreview.mit.edu/article/is-it-time-to-rethink-globalized-supply-chains/>
- Sy, C., Bernardo, E., Miguel, A., San Juan, J. L., Mayol, A. P., Ching, P. M., Culaba, A., Ubando, A., & Mutuc, J. E. (2020). Policy development for pandemic response using system dynamics: A case study on COVID-19. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 4, 497–501. <https://doi.org/10.1007/s41660-020-00130-x>
- Zhu, Q., Krikke, H., & Caniëls, M. C. (2021). The effects of different supply chain integration strategies on disruption recovery: A system dynamics study on the cheese industry. *Logistics*, 5(2), 19. <https://doi.org/10.3390/logistics5020019>
- Zimmerman, R. K., Nowalk, M. P., Chung, J., Jackson, M. L., Jackson, L. A., Petrie, J. G., Monto, A. S., McLean, H. Q., Belongia, E. A., Gaglani, M., & others. (2016). 2014–2015 influenza vaccine effectiveness in the United States by vaccine type. *Clinical Infectious Diseases*. <https://doi.org/10.1093/cid/ciw635>

پیوست. فهرست متغیرها و معادلات متناظر آن‌ها در مدل زنجیره تامین واکسن آنفلوانزا

Variable Name	Equation
population	6.5e+06-death
Fraction susceptible	susceptible/population
infectivity	0.3
Transmission rate	MAX(Fraction susceptible*infectivity, 0)
fraction infected	infected/susceptible
infecting	susceptible*Transmission rate
infected	$\int$ infecting-death rate-recovering
recovering	infected/infection Duration*(1-fatality rate)
recovered	$\int$ recovering
death rate	(fatality rate*infected)/infection Duration
death	$\int$ death rate
fatality rate	0.001
infection Duration	7
susceptible	$\int$ reinfection vaccinated-immunization rate-infecting
reinfection vaccinated	(immunized+recovered)/Waning time
immunization rate	susceptible*Vaccination rate*vaccine effectiveness
immunized	$\int$ immunization rate-reinfection vaccinated
Waning time	180
vaccine effectiveness	0.7
Vaccination rate	$((3+Vaccine\ import)*(vaccine\ availability)*(people\ thinking\ pressure)*(Demand\ satisfaction\ rate))/(1+fraction\ infected)$
vaccine availability	0.9
Vaccine import	0.7
people thinking pressure	0.3
Health centers demand	normal hospital sector demand+seasonal peak demand rate+(infected*Proportion seeking vaccination*vaccination demand rate per infected person)
normal hospital sector demand	3900
proportion of seasonal peak	0 or 1
seasonal peak demand rate	IF THEN ELSE(Time>=60:AND:Time<=90 , proportion of seasonal peak*normal hospital sector demand , 0)
vaccination demand rate per infected person	190
Proportion seeking vaccination	0.01
Backup Buffer Utilization Rate	IF THEN ELSE(supply and demand gap>0,max buffer/Vaccines used, 0)
max buffer	buffer stock/average daily consumption
withdrawal rate	0.9
Vaccines used	(buffer stock*withdrawal rate)
buffer stock waste	buffer stock/average lifespan1
buffer stock	$\int$ buffer replenishment for vaccine v-buffer stock waste-Vaccines used
average daily consumption	650

buffer replenishment for vaccine v	$DELAY1(Receiving\ vaccines+(buffer\ replenishment\ rate*buffer\ stock)*buffer\ stock\ Impact\ Factor, replenishment\ delay)$
buffer replenishment rate	0.1
replenishment delay	5
buffer stock Impact Factor	allocated budget to buffer stock/Maximum budget to buffer stock
Maximum budget to buffer stock	3500
vaccine stock	$\int buffer\ replenishment\ for\ vaccine\ v+Receiving\ vaccines-actual\ demand-vaccine\ stock\ waste$
actual demand	Adjusted health centers Demand+Vaccines used
Receiving vaccines	$(actual\ supply+Maximum\ production\ rate+backup\ supplier\ supply\ rate)$
Demand satisfaction rate	$IF\ THEN\ ELSE(Receiving\ vaccines/actual\ demand>1, 1, IF\ THEN\ ELSE(Receiving\ vaccines/actual\ demand\leq 0, 0, Receiving\ vaccines/actual\ demand))$
supply and demand gap	Health centers demand-actual supply
backup supplier supply rate	$IF\ THEN\ ELSE(Contract\ with\ backup\ supplier>0, transportation\ rate, 0)$
actual supply	actual import supply rate+Internal production rate
Internal production rate	200
actual import supply rate	normal import supply rate*(1-import supply shortage)
import supply shortage	$IF\ THEN\ ELSE(Time\leq 60, 0, IF\ THEN\ ELSE(Time>60:AND:Time\leq 150, proportion\ of\ shortage, 0))$
normal import supply rate	3700
proportion of shortage	0 or 1
Maximum Budget to Backup supplier Contract	3500
Maximum transportation capacity	9000
transportation delay	10
backup supplier supply Impact Factor	allocated budget to Back up supplier Contract/Maximum Budget to Backup supplier Contract
allocated budget to Back up supplier Contract	Allocation Factor for Back up supplier Contract*available budget
transportation rate	$DELAY\ FIXED(IF\ THEN\ ELSE(supply\ and\ demand\ gap\geq 0, Maximum\ transportation\ capacity*backup\ supplier\ supply\ Impact\ Factor, 0), transportation\ delay, 0)$
Contract with backup supplier	$\int transportation\ rate$
Delay in increase	8
Capacity adding rate	$DELAY\ FIXED(IF\ THEN\ ELSE(supply\ and\ demand\ gap>0, capacity\ augmentation, 0), Delay\ in\ increase, 0)$
production capacity on order	$\int Capacity\ adding\ rate-acquired\ production\ capacity$
acquired production capacity	$DELAY1(Capacity\ adding\ rate, delay\ 2)$
production capacity	$\int acquired\ production\ capacity$
vaccine order rate	Health centers demand
average production rate	production capacity on order/Production cycle time
Production cycle time	2
Investment rate	0.1

capacity augmentation	$\text{MAX}((\text{vaccine order rate} - \text{Maximum production rate} - \text{average production rate}) * \text{Investment rate}) * \text{Capacity Augmentation Impact Factor}, 0)$
Maximum production rate	production capacity/Production cycle time
Capacity Augmentation Impact Factor	allocated budget to capacity augmentation/Maximum Budget to capacity augmentation
allocated budget to capacity augmentation	Allocation Factor for capacity augmentation*available budget
available budget	5000
allocated budget to buffer stock	Allocation Factor for Backup Buffer*available budget
allocated budget to buffer stock	Allocation Factor for Backup Buffer*available budget
cost of additional production capacity	(Unit cost of preparing additional production capacity*Maximum production rate)
Operational Costs	(Operational unit cost*backup supplier supply rate)
cost of buffer stock	(Unit cost of preparing buffer stock*Vaccines used)