



دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مهندسی صنایع

عنوان:

گزارش پروژه درس

اعضای گروه

۴۰۰۱۷۰۲۷۷	روژین صوفی آبادی
۴۰۱۱۰۴۱۴۶	غزال زلفی موصلو
۴۰۱۱۰۴۴۷۹	محمدمهری منتظری هدش

نام درس

مبانی مهندسی سیستم‌های سلامت

نام استاد درس

دکتر بهاره محمودی

نیمسال دوم ۱۴۰۳-۱۴۰۴

فهرست

۲	معرفی مقاله پایه
۳	مرور ادبیات
۹	تعريف مسئله
۱۳	مدل سازی اصلاح شده
۱۳	مجموعه‌ها
۱۳	پارامترها
۱۳	متغیرهای تصمیم‌گیری
۱۴	مدل
۱۵	اشکالات مدل ارائه شده در مقاله و اصلاحات آن
۱۵	اشکالات نگارشی
۱۶	اشکالات منطقی در مدل‌سازی
۲۱	صحت‌سنگی و اعتبارسنجی مدل اصلاح شده
۲۹	حل مسئله، کدنویسی و بصری سازی (مطالعه موردی)
۲۹	داده و پارامترها
۳۰	کد گمز (حل مدل و تحلیل حساسیت)
۳۶	کد پایتون (بصری سازی نتایج)
۴۳	تحلیل و مقایسه نتایج
۴۵	منابع

معرفی مقاله پایه

در این پژوهه، هدف اصلی بازخوانی، تحلیل و بازنویسی یکی از مقالات علمی معتبر در حوزه مهندسی سیستم‌های سلامت است؛ مقاله‌ای که با تمرکز بر یک مسئله واقعی در بستر سلامت عمومی، بتواند بستری مناسب برای مدلسازی، تحلیل و پیاده‌سازی مفاهیم مطرح شده در درس فراهم سازد. بر این اساس، پس از بررسی چندین گزینه، مقاله‌ای انتخاب شد که هم از نظر محتوایی غنی و قابل توسعه است و هم با اهداف آموزشی درس هم راستا می‌باشد.

A Humanitarian Cold Supply Chain Distribution Model with Equity Consideration: The Case of COVID-19 Vaccine Distribution in the European Union از **Socio-Economic Planning Sciences** در ژورنال معتبر **Elsevier** منتشر شده است. این مقاله با تمرکز بر یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل زنجیره تأمین سلامت، یعنی توزیع عادلانه واکسن در شرایط بحرانی، مدلی کاربردی و نوآورانه ارائه می‌دهد که به خوبی با اهداف این درس و پژوهه تعریف شده هماهنگ است.

با توجه به معیارهایی که در فایل توضیحات پژوهه به عنوان شروط لازم برای انتخاب مقاله ذکر شده، مقاله مذکور تمامی این الزامات را دارد:

- غیر مروعی و پژوهشی اصیل: مقاله دارای مدل‌سازی ریاضی نوآورانه است و صرفاً به مرور ادبیات بسته نکرده است.
- دارای متداول‌وی کمی و قابل پیاده‌سازی: ساختار مدل شامل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) سه‌سطحی است.
- مطالعه موردی واقعی (**Case Study**): مسئله‌ی توزیع واکسن کرونا در اروپا با داده‌های دقیق و قابل اتکا مدل‌سازی شده است.
- منتشرشده در ژورنال **Q1** و دارای داوری تخصصی: انتشار در یکی از ژورنال‌های معتبر بین‌المللی حوزه برنامه‌ریزی اجتماعی-اقتصادی.
- انتشار در بازه مجاز زمانی: مقاله در سال ۲۰۲۳ منتشر شده است و شرط حداقل سه سال از زمان انتشار را دارد.
- دارای تحلیل حساسیت و رویکرد تصمیم‌سازی: مقاله فراتر از حل عددی، نتایج را تحلیل و از منظر سیاست‌گذاری بررسی می‌کند.

با توجه به ویژگی‌های فوق، این مقاله مبنای تحلیل، بازنویسی و توسعه مدل در طول پژوهه قرار گرفته است و تلاش شده با استفاده از آن، گامی علمی و کاربردی در مسیر یادگیری مفاهیم مهندسی سیستم‌های سلامت برداشته شود.

در ادامه، لینک فایل ارائه کلاسی گروه نیز جهت دسترسی قرار داده شده است:

[دربیافت فایل ارائه کلاسی گروه پنجم](#)

مروارید ادبیات

❖ لجستیک بشردوستانه و ضرورت رویکردهای جدید در ارزیابی عملکرد

لجدستیک بشردوستانه شاخه‌ای از مدیریت زنجیره تأمین است که بر توزیع منابع حیاتی در شرایط بحران و بلایا تمرکز دارد. برخلاف لجدستیک تجاری که غالباً بر کمینه‌سازی هزینه‌های مالی تأکید دارد، در لجدستیک بشردوستانه هدف اصلی نجات جان انسان‌ها و کاهش رنج ناشی از تأخیر در تأمین نیازهای اساسی است (Cantillo et al., 2018). پژوهشگران دریافت‌هایند که استفاده صرف از معیارهای سنتی (مانند کمینه‌کردن هزینه‌های حمل و نقل یا بیشینه‌کردن سود) برای سنجش کارایی عملیات امدادرسانی نامناسب است. در عوض، رویکردهای جدید پیشنهاد می‌کنند که مبانی اقتصاد رفاه در مدل‌سازی تصمیم‌های لجدستیک بعد از بلایا لحاظ شود تا تصمیمات بیشترین خیر برای بیشترین تعداد افراد را فراهم کند. به بیان دیگر، مدل‌های بهینه‌سازی باید هزینه‌های اجتماعی را در نظر بگیرند که شامل مجموع هزینه‌های لجدستیکی متعارف و هزینه‌های ناشی از رنج و محرومیت انسان‌ها است. چنین رویکردی تصمین می‌کند که استراتژی‌های توزیع به جای تمرکز صرف بر کارایی اقتصادی، بر کاهش رنج انسانی و بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی متمرکز شوند.

یکی از مفاهیم کلیدی که در سال‌های اخیر برای سنجش بعد انسانی عملکرد لجدستیک مطرح شده، هزینه‌های محرومیت^۱ است. ایده اصلی آن است که تأخیر در دسترسی آسیب‌دیدگان به اقلام حیاتی (مثل آب، غذا، دارو یا واکسن) معادل نوعی هزینه پنهان است که به صورت رنج، مرگ و میر یا تبعات منفی اجتماعی بروز می‌کند. در ادامه، مفهوم هزینه محرومیت و نحوه مدل‌سازی کمی آن شرح داده می‌شود و سپس مفهوم عدالت^۲ در تخصیص منابع بشردوستانه و شیوه‌های تحقق آن در مدل‌های ریاضی تبیین می‌گردد. سرانجام، با توجه به بحران کووید-۱۹، به چالش‌های زنجیره سرد واکسن و تلاش‌های پژوهشی برای ترکیب مفاهیم عدالت و هزینه محرومیت در مدل‌های توزیع واکسن پرداخته خواهد شد.

❖ هزینه‌های محرومیت: کمی‌سازی رنج انسانی در مدل‌های امدادرسانی

هزینه محرومیت به عنوان ارزش اقتصادی رنج و آسیبی تعریف می‌شود که افراد به دلیل نداشتن دسترسی به یک کالا یا خدمت ضروری متحمل می‌شوند. این مفهوم نخستین بار توسط (Holguín-Veras et al., 2013) معرفی شد که معتقد بودند در مدل‌های لجدستیک بشردوستانه پس از این، تابع هدف مناسب جمع هزینه‌های لجدستیکی و هزینه‌های محرومیت (هزینه‌های اجتماعی) است. آنها هزینه محرومیت را معیاری برای سنجش رنج انسانی ناشی از نبود دسترسی به اقلام حیاتی تعریف کردند. بر این اساس، هرچه تأمین یک کالای اساسی برای افراد آسیب‌دیده دیرتر انجام شود یا کمتر به نیازشان پاسخ دهد، مقدار عددی هزینه محرومیت افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، هزینه‌های محرومیت تابعی فزاينده از زمان محرومیت و میزان کمبود هستند. برای مثال، در شرایط فقدان غذا یا واکسن، هر ساعت یا روز تأخیر در تحويل می‌تواند معادل مقداری معین از رنج و آسیب برای فرد باشد که آن را می‌توان به صورت عددی (مثلاً دلاری) برآورد کرد.

¹ Deprivation Costs

² Equity

مطالعات تجربی برای برآورد این تابع هزینه انجام شده است. برای نمونه، (Cantillo et al., 2018) با استفاده از تئوری انتخاب گسسته و انجام پیمایش در میان بازماندگان بلایا در کلمبیا، توابع هزینه محرومیت را برای یک سبد کالاهای ضروری برآورد کردند. نتایج آنان نشان داد که هزینه محرومیت به صورت تابعی غیرخطی و محدب نسبت به زمان محرومیت افزایش می‌یابد. به این معنا که هرچه انتظار برای دریافت کالا طولانی‌تر شود، رنج انسانی با نرخ فزاينده‌ای افزایش می‌یابد (مثلاً اولین روزهای انتظار هزینه نسبتاً کمتر، اما روزهای بیشتر تأخیر هزینه بسیار بالاتری تحمیل می‌کند). همچنین (Holguín-Veras et al., 2016) با روش ارزش‌گذاری مشروط، نخستین تلاش‌ها را برای محاسبه کمی ارزش اقتصادی رنج انسانی ناشی از فقدان دسترسی به اقلام حیاتی صورت دادند. آنها در یک مطالعه موردی برای آب آشامیدنی، تابع هزینه محرومیت را بر اساس زمان محرومیت برآورد کردند و تأیید نمودند که این توابع شکل غیرخطی و افزایشی دارند و می‌توانند به صورت مستقیم در مدل‌های ریاضی لجستیک گنجانده شوند.

در عمل، برای استفاده از هزینه‌های محرومیت در مدل‌سازی، معمولاً یک تابع زمانی در نظر گرفته می‌شود که به ازای هر واحد زمان تأخیر در تأمین، مقداری هزینه به مدل اضافه می‌کند. به عنوان مثال، در مدل (Khodaee et al., 2022) برای توزیع واکسن، تابع محرومیت به صورت خطی بر حسب زمان تعریف شده است (به طور مشخص $t = 3t^r$ در هر دوره زمانی). این بدين معناست که اگر یک منطقه آسیب‌دیده تا دوره t ام واکسن دریافت نکند، متتحمل هزینه محرومیتی معادل $3t$ (به واحد مناسب) خواهد شد و مجموع هزینه محرومیت با تجمیع در طول زمان محاسبه می‌شود. البته در ادبیات پیشنهاد شده که شکل این تابع می‌تواند در حالت عمومی به صورت درجه دوم یا توابع غیرخطی دیگر باشد تا افزایش تصاعدی رنج در تأخیرهای طولانی‌تر را منعکس کند. مهم آن است که لحاظ کردن هزینه‌های محرومیت در تابع هدف مدل‌های امدادرسانی موجب می‌شود که مدل به جای صرفاً کمینه کردن هزینه‌های مالی، به کمینه کردن مجموع هزینه مالی و انسانی بپردازد. این رویکرد باعث اتخاذ تصمیماتی می‌شود که شاید اندکی هزینه‌های عملیاتی را افزایش دهد ولی در عوض رنج و آسیب کلی وارد به جامعه آسیب‌دیده را به حداقل ممکن می‌رساند. به بیان دیگر، مدل با درونی‌سازی تبعات انسانی تأخیر، اولویت را به رساندن سریع‌تر اقلام ضروری به تمامی نیازمندان می‌دهد.

❖ عدالت در تخصیص منابع بشردوستانه

عدالت یکی از مفاهیم بنیادین در حوزه اقتصاد و اخلاق است که در تصمیم‌گیری‌های عملیات بشردوستانه نیز نقشی کلیدی ایفا می‌کند. در زمینه توزیع کمک‌ها پس از بلایا یا در بحران‌های بهداشتی، عدالت به این معناست که علاوه بر میزان کل تأمین نیازها، توزیع منصفانه این تأمین بین افراد و مناطق مختلف نیز حائز اهمیت است. به طور ایده‌آل، هیچ منطقه یا گروه جمعیتی نباید به طور سیستماتیک نادیده گرفته شود یا کمتر از دیگران دریافت کند. انگیزه رعایت عدالت دو جنبه دارد: نخست انگیزه اخلاقی که بر اساس آن تمام انسان‌ها دارای حقوق برابرند و نباید تبعیضی در دسترسی به نیازهای حیاتی وجود داشته باشد. دوم انگیزه عملی که طبق آن توزیع ناعادلانه می‌تواند منجر به نارضایتی، ناآرامی یا حتی تشدید بحران شود، زیرا افرادی که احساس بی‌عدالتی کنند ممکن است دست به شورش یا مهاجرت بزنند و روند امدادرسانی را مختل کنند. بنابراین، تصمیم‌گیران

در عملیات امدادی باید به درجاتی از انصاف در پوشش دهی نیازها توجه کنند تا هم حقوق انسانی رعایت شود و هم از تبعات اجتماعی بی‌عدالتی جلوگیری گردد.

در ادبیات، عدالت در توزیع را معمولاً به دو دسته عدالت افقی و عدالت عمودی تقسیم می‌کنند. عدالت افقی به معنای برخورد برابر با افراد یا مناطقی است که شرایط مشابه دارند. در این رویکرد، فرض می‌شود همه افراد آسیب‌دیده در اولویت یکسان قرار دارند و باید دسترسی یکسانی به منابع داشته باشند. از سوی دیگر، عدالت عمودی به معنای برخورد نابرابر اما منصفانه با افراد یا مناطقی است که شرایط نابرابر دارند. در این نگرش، به افرادی که نیاز بیشتری دارند یا آسیب‌پذیرترند سهم بیشتری از منابع اختصاص می‌یابد؛ یعنی توزیع متناسب با نیاز صورت می‌گیرد. هر دوی این مفاهیم در سیاست‌گذاری‌های بهداشتی و امدادی کاربرد دارند. برای مثال، در توزیع واکسن ممکن است عدالت افقی ایجاد کند که همه استان‌ها سهم برابری از واکسن دریافت کنند، در حالی که عدالت عمودی ایجاد می‌کند مناطقی که جمعیت بیشتر یا نرخ ابتلای بالاتری دارند واکسن بیشتری بگیرند. پیاده‌سازی عدالت در مدل‌های ریاضی به دو رویکرد کلی انجام می‌شود: یا از طریق اعمال محدودیت (قيود) در مدل، یا از طریق تعریف یک هدف کمکی در تابع هدف (مدل چندهدفه). بسیاری از پژوهش‌ها رویکرد اول را برگزیده‌اند و با افزودن قیود عدالت، حداقل سطحی از انصاف را تضمین کرده‌اند. این قیود معمولاً تضمین می‌کنند که سطح خدمت‌رسانی به تمام مناطق در یک محدوده معین به هم نزدیک باشد. برای نمونه، محدودیت عدالت افقی می‌تواند تحمیل کند که اختلاف درصد پوشش تقاضای واکسن میان هر دو منطقه حداکثر X درصد باشد. در مدل (Khodaee et al., 2022) چنین قیدی لحاظ شده است که بر اساس آن تفاوت بین نسبت برآورده شدن تقاضا در هر دو منطقه نباید بیشتر از یک آستانه λ باشد. این محدودیت باعث می‌شود همه مناطق تا حد امکان پوشش واکسیناسیون نزدیک به هم داشته باشند و منطقه‌ای بسیار جلوتر یا عقب‌تر از بقیه نباشد. نیز در مدل چندمعیاره خود برای پاسخ به پاندمی، از قیود مشابهی برای تضمین عدالت بهره گرفته‌اند (Malmir & Zobel, 2021) که محدود کردن اختلاف شاخص‌های خدمت میان جمعیت‌های هدف را هدف گرفته است (به عنوان مثال اطمینان از اینکه هیچ بخش از جمعیت بسیار کمتر از بخش‌های دیگر دریافت نکند).

رویکرد دوم استفاده از توابع هدف کمکی یا شاخص‌های نابرابری است. برای نمونه، (Gutjahr & Fischer, 2018) استدلال می‌کنند که اگر تنها مجموع هزینه‌های محرومیت کل را کمینه کنیم، ممکن است توزیع بسیار نابرابری حاصل شود. آن‌ها به صورت نظری نشان دادند که کمینه‌سازی مجموع هزینه محرومیت می‌تواند به راه حل‌هایی منجر شود که به شکلی دلخواه ناعادلانه هستند. علت این است که مدل برای کاهش کل رنج، ممکن است تمام منابع را ابتدا به مناطقی بدهد که کاهش رنج بیشتری در پی دارند و مناطق دیگر را کلاً محروم بگذارند. برای جلوگیری از چنین وضعیتی، Gutjahr و Fischer پیشنهاد کردند که در تابع هدف شاخص‌های نابرابری (مانند ضریب جینی) لحاظ شود. در کار آن‌ها، یک جمله‌ی مبتنی بر ضریب جینی هزینه‌های محرومیت به تابع هدف افزوده شد تا مدل به راه حل‌هایی گرایش یابد که توزیع بین مناطق متوازن‌تر باشد. نتایج آزمایش‌های محاسباتی ایشان روی زلزله نیپال ۲۰۱۵ نشان داد که با پرداخت یک هزینه‌ی انصاف اندک (یعنی افزایش جزئی در هزینه کل)، می‌توان به کاهش چشمگیر نابرابری در توزیع دست یافت. به عنوان مثال، در مطالعه مذکور با صرفنظر کردن از کمترین بخش از کارایی (افزایش جزئی هزینه)، کاهش قابل توجهی در ضریب جینی توزیع منابع مشاهده شد. این یافته تأکیدی است بر این واقعیت که تأمین

عدالت در توزیع منابع امدادی با هزینه نسبتاً کمی از منظر کارایی همراه است و لذا تصمیم‌گیران نباید از لحاظ کردن عدالت بیم داشته باشند.

در مجموع، ادبیات نشان می‌دهد که مفهوم عدالت نقشی اساسی در موفقیت عملیات بشردوستانه دارد و مدل‌سازان تلاش کرده‌اند یا با قیود سخت‌گیرانه یا با اهداف کمکی، این مفهوم را در مدل‌ها ادغام کنند. در بحران‌های بهداشتی نیز کارهایی مانند (Enayati & Özaltın, 2020) بر توزیع بهینه واکسن آنفلوآنزا با قیود عدالت انجام شده‌است که نشان می‌دهد لحاظ محدودیت‌های حداقل-حداکثری در تخصیص واکسن می‌تواند توزیعی منصفانه‌تر بدون افت شدید کارایی فراهم آورد (به عنوان مثال توزیع مناسب واکسن بین گروه‌های سنی یا ریسک مختلف). بنابراین، ترکیب عدالت و کارایی یک چالش و ضرورت مهم در برنامه‌ریزی منابع سلامت و امدادرسانی است.

❖ زنجیره سرد واکسن و چالش‌های توزیع در مقیاس وسیع

زنジره سرد واکسن به شبکه تأمین و توزیعی گفته می‌شود که در آن دمای نگهداری واکسن در تمام مراحل باید در محدوده‌ی معینی حفظ شود. واکسن‌ها محصولات حساسی هستند که تحت شرایط دمایی نامناسب می‌توانند کارایی خود را از دست بدهند؛ به ویژه واکسن‌های جدید کووید-۱۹ (مانند فایزر) که نیاز به دماهای بسیار پایین (مثلاً حدود منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد) برای نگهداری دارند. مدیریت زنجیره سرد واکسن یک چالش لجستیکی بزرگ است، زیرا مستلزم زیرساخت‌های سرمایشی از ابتدای تولید تا نقطه تزریق می‌باشد. این شامل وجود سردخانه‌ها و یخچال‌های مطمئن در مراکز تولید، وسایل نقلیه یخچال‌دار برای حمل و نقل، امکانات نگهداری در فرودگاه‌ها و انبارهای میانی و همچنین یخچال در مراکز بهداشتی محلی است. طبق مرور (Fahrni et al., 2022)، در برنامه جهانی واکسیناسیون کووید-۱۹ برای موفقیت، یک زنجیره سرد کارا و مقاوم ضرورت دارد که به کمک فناوری‌های پایش دما در تمام مسیر، از تولید تا مصرف بتواند از هدررفت واکسن جلوگیری کرده و واکسن‌ها را سالم به جمعیت هدف برساند. هرگونه خلل در زنجیره سرد نظیر قطع برق، خرابی تجهیزات سرمایشی، یا تأخیرهای طولانی در حمل و نقل می‌تواند به فاسد شدن محموله‌های واکسن و در نتیجه اتلاف منابع ارزشمند و زمان حیاتی منجر شود.

بحران همه‌گیری کووید-۱۹ مقیاس بی‌سابقه‌ای به توزیع واکسن داد. طی سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱، میلیاردها دوز واکسن می‌باشد در سراسر جهان تولید و توزیع شود؛ آن‌هم در شرایطی که هر کشور و منطقه‌ای خواهان دریافت سریع سهم عادلانه خود بود. با این حال، واقعیت توزیع جهانی واکسن از عدالت به دور بود. گزارش‌ها نشان می‌دهد که در پایان سال ۲۰۲۱، مقدار دوزهای واکسن تحويلی به کشورهای ثروتمند (ایالات متحده، اتحادیه اروپا و بریتانیا) طی فقط شش هفته، بیشتر از کل دوزهای دریافتی کشورهای آفریقایی در کل سال ۲۰۲۱ بود. چنین تفاوت فاحشی نمونه‌ای از بی‌عدالتی در توزیع جهانی واکسن است که می‌تواند عاقب اخلاقی و اپیدمیولوژیک جدی داشته باشد. نبود واکسن در کشورهای فقیر به معنای ادامه چرخش ویروس، جهش‌های جدید و تداوم پاندمی برای همه است. از همین رو، ابتکارهایی نظیر برنامه COVAX زیر نظر سازمان جهانی بهداشت شکل گرفتند تا توزیع منصفانه واکسن میان کشورها را ترویج کنند. هرچند در عمل، مشکلات لجستیکی (از جمله محدودیت ظرفیت تولید، دشواری‌های زنجیره سرد و انحصار خرید توسط کشورهای ثروتمند) مانع تحقق کامل اهداف عدالت محور شدند.

در مقیاس مناطق و کشورهای بزرگ نیز چالش‌های زنجیره سرد و عدالت خودنمایی می‌کند. برای مثال در اتحادیه اروپا، کشورهای مختلف دارای جمعیت و نرخ ابتلای متفاوتی بودند و کارخانجات تولید واکسن نیز در کشورهای محدودی مستقر بودند (فایزر در آلمان، مدرنا در سوئیس، آسترازنکا در انگلستان و غیره). برنامه‌ریزی توزیع در این اتحادیه می‌بایست هم ملاحظات کارابی را در نظر گیرد (مثلاً حمل سریع به تمام نقاط با استفاده از ظرفیت شرکت‌های لجستیکی شخص ثالث یا 3PLها) و هم ملاحظات عدالت (مثلاً هیچ کشور یا منطقه‌ای عقب نماند). همچنین باید محدودیت‌های زنجیره سرد رعایت شود؛ از ظرفیت حمل محدود هر کانتینر یخچال‌دار (مثلاً هر کانتینر مخصوص توان حمل حدود ۴۸۷۵ دوز واکسن را دارد)، تا حداکثر زمان ممکن برای رساندن واکسن قبل از انقضا. تمامی این پیچیدگی‌ها نشان می‌دهد که مدیریت زنجیره سرد واکسن در شرایط همه‌گیری یک مسئله چندبعدی است که ترکیبی از اهداف گاه متضاد را باید بهینه‌سازی کند: سرعت و پوشش حداکثری توزیع (برای کاهش شیوع و مرگ‌ومیر)، هزینه‌های عملیاتی قابل قبول، حداقل‌سازی اتلاف واکسن و حفظ زنجیره سرمایش و توزیع عادلانه بین مناطق.

❖ مدل‌سازی توزیع واکسن با لحاظ عدالت و هزینه‌های محرومیت

برای مواجهه با چالش‌های ذکر شده، پژوهش اخیر (Khodaee et al., 2022) یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح (MIP) پیشنهاد داده است که به طور خاص برای توزیع واکسن کووید-۱۹ با درنظرگرفتن عدالت و زنجیره سرد طراحی شده است. این مدل یک زنجیره تأمین سه‌سطحی را در بر می‌گیرد که شامل تولیدکنندگان واکسن، توزیع‌کنندگان منطقه‌ای (مراکز توزیع با امکانات سرد) و مناطق آسیب‌دیده (مقاصد نهایی واکسن) است. تابع هدف مدل، کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ها است که عبارت‌اند از: هزینه‌های حمل و نقل در شبکه سرد، هزینه به کارگیری وسائل نقلیه (مثلاً هزینه اجاره کامیون‌های یخچال‌دار)، هزینه کمبود (پنالتی برای برآورده نشدن تقاضا)، هزینه نگهداری موجودی واکسن در انبار سرد و نیز هزینه‌های محرومیت. با لحاظ کردن این اجزای متنوع، مدل تلاش می‌کند هم هزینه‌های مالی سیستم و هم هزینه‌های اجتماعی (ناشی از تأخیر و کمبود) را کاهش دهد. نوآوری مهم این مدل گنجاندن صریح مفهوم عدالت در ساختار مدل است. همان‌طور که بحث شد، عدالت می‌تواند به شکل قید یا هدف در مدل لحاظ شود. (Khodaee et al., 2022) روش قید را برگزیده‌اند و یک قید عدالت افقی تعریف کرده‌اند که تضمین می‌کند سهم واکسن دریافتی هر منطقه، نسبتاً متوازن با سایر مناطق باشد. به بیان دقیق‌تر، آن‌ها محدودیتی اعمال کرده‌اند که اختلاف بین درصد تقاضای برآورده شده‌ی هر دو منطقه‌ی دلخواه، از یک مقدار آستانه (λ) بیشتر نشود. با این ترفند، مدل از تخصیص تمام واکسن‌ها به برخی مناطق و نادیده گرفتن سایرین جلوگیری می‌کند و بهجای آن راه حلی ارائه می‌دهد که در آن تمام مناطق به نسبت تقریباً برابری واکسینه شوند. این روش مطابق با مفهوم عدالت افقی است که در آن برخورد برابر با همگان (در شرایط مساوی) تضمین می‌شود. در عین حال، می‌توان گفت تا حدی عدالت عمودی نیز ضمنی رعایت می‌شود چرا که تقاضای مناطق (نیاز) در مخرج کسر درصد برآورده شدن حضور دارد و هر منطقه متناسب با نیاز خود سهم می‌گیرد.

مدل مذکور بر داده‌های واقعی توزیع واکسن در اروپا اعمال شده و نتایج جالبی به همراه داشته است. تحلیل حساسیت مدل (Khodaee et al., 2022) نشان داد که میان هزینه کل سیستم و هزینه‌های محرومیت (رنج انسانی) یک مبادله وجود دارد که شدیداً تحت تأثیر درجه توجه به عدالت است. زمانی که قید عدالت را سخت‌گیرانه‌تر کنیم (λ را کوچک‌تر انتخاب کنیم) تا مناطق

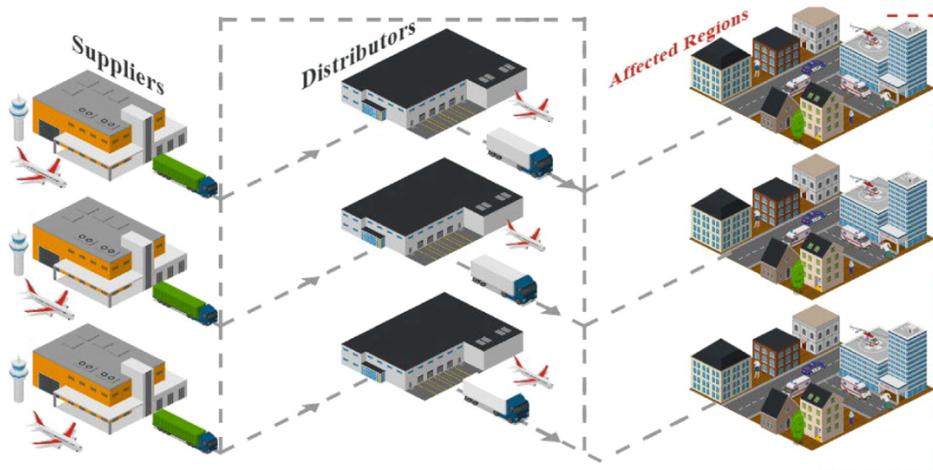
پوشش نقریباً برابرتری داشته باشد)، مدل ناچار می‌شود برخی منابع را به مناطق کمتر برخوردار هم تخصیص دهد؛ نتیجه آن کمی افزایش در هزینه‌های لجستیکی و عملیاتی است، اما در عوض کاهش قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های محرومیت مشاهده می‌شود. برای مثال، در یک سناریوی مطالعه شده، با افزایش سختگیری عدالت، هزینه کل حدود ۲٪ افزایش یافت ولی هزینه محرومیت جمعاً ۲۳٪ کاهش پیدا کرد. این نشان می‌دهد که صرف مقدار کمی بودجه بیشتر، توانسته رنج انسانی را به میزان چشمگیری کاهش دهد. از سوی دیگر، اگر عدالت نادیده گرفته شود (از بزرگ و قید عملاً غیرفعال شود)، مدل ممکن است منابع را به صورت نامتوازن تخصیص دهد به نحوی که هزینه کل اندکی کاهش یابد ولی توأمان هزینه محرومیت افزایش یابد. یافته‌های کمی این مطالعه مؤید همان مفهوم هزینه انصاف اندک در برابر منفعت اجتماعی بزرگ است که پیشتر (Gutjahr & Fischer, 2018) به آن اشاره کرده بودند. به بیان دیگر، در بستر توزیع واکسن نیز پرداخت هزینه‌ای اندک برای تحقق عدالت، از منظر کاهش مرگ‌ومیر و ابتلا بسیار مقرون به صرفه است.

نکته مهم دیگر این است که رعایت عدالت در توزیع واکسن نه تنها یک مسئله اخلاقی، بلکه ابزاری برای مهار بهتر پاندمی است. مدل (Khodaee et al., 2022) نشان می‌دهد که پوشش عادلانه و گستردگی واکسیناسیون در کاهش نرخ ابتلا و مرگ نقش کلیدی دارد. حتی اگر مدلی بدون قید عدالت بتواند هزینه‌های کوتاه‌مدت را کمی کاهش دهد، در بلندمدت عدم واکسیناسیون یک بخش از جامعه می‌تواند به شیوع مداوم بیماری و تحمل هزینه‌های سنگین‌تر (درمان بیماران بیشتر، آسیب به اقتصاد بر اثر طولانی شدن همه‌گیری) منجر شود. از این رو، مدیران سیستم سلامت و تصمیم‌گیران باید تأمین عدالت را جزوی جدایی‌ناپذیر از برنامه‌ریزی واکسیناسیون قرار دهند. به توصیه‌ی (Khodaee et al., 2022)، کاهش ناچیز هزینه‌ی اولیه در اثر نادیده گرفتن عدالت، در برابر هزینه‌های تحملی آتی ناچیز است و لذا تصمیم‌سازان باید محدودیت‌های عدالت‌محور را حتماً اعمال کنند. آنان محاسبه کردند که در سناریوی اتحادیه اروپا، حذف قید عدالت کل هزینه‌های توزیع را حدود ۵٪ کاهش می‌دهد، در حالی که این صرفه‌جویی کوچک می‌تواند به قیمت از دست رفتن منافع پوشش عادلانه (و تحمل هزینه‌های جبران‌ناپذیر سلامت عمومی) تمام شود. همچنین اجرای قید عدالت در آن سناریو موجب نزدیک به ۷۴٪ کاهش در هزینه‌های محرومیت شده است که بیانگر تأثیر عظیم این قید بر کاهش رنج و تلفات انسانی است.

در کنار قید عدالت، مدل (Khodaee et al., 2022) ملاحظات عملی دیگری را نیز در بر گرفته است تا واقع‌بینانه باشد. از جمله ظرفیت محدود زنجیره سرد در سطوح مختلف: ظرفیت تولید واکسن در هر کارخانه (مثلاً بر اساس داده‌های تولید فایزر، مدرنا و غیره)، ظرفیت ذخیره‌سازی مراکز توزیع منطقه‌ای (محدودیت فضای سردخانه در هر دوره) و ظرفیت حمل هر وسیله نقلیه سردخانه‌دار (محدودیت تعداد واکسن قابل حمل در یک کامیون). همچنین مدل امکان استفاده از تأمین‌کنندگان لجستیکی شخص ثالث (3PL) را فراهم کرده تا دولتها بتوانند با بهره‌گیری از ناوگان حمل و نقل و تخصص شرکت‌های لجستیکی توزیع واکسن را سرعت بخشنند. حضور این تصمیم‌ها در مدل به مدیران کمک می‌کند که بین سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری (مثلاً ارسال مستقیم واکسن از تولیدکننده به منطقه هدف در مقابل ارسال از طریق مرکز توزیع) و استخدام ظرفیت‌های بخش خصوصی برای حمل واکسن تصمیم‌های بهینه بگیرند. تمام این جنبه‌ها سبب شده مدل پیشنهادی یک ابزار پشتیبان تصمیم جامع برای برنامه‌ریزی توزیع واکسن در شرایط بحران باشد.

تعریف مسئله

مدل ارائه شده به دنبال طراحی یک زنجیره تأمین سرد انساندوستانه برای توزیع واکسن در شرایط بحرانی (همچون همه‌گیری COVID-19) است. این زنجیره تأمین دارای ساختار سه‌سطحی شامل تأمین‌کنندگان (کارخانجات تولید واکسن)، توزیع‌کنندگان (مراکز توزیع منطقه‌ای) و مناطق آسیب‌دیده (ARها، مقصد نهایی واکسن) می‌باشد. تأمین‌کنندگان هر کدام ظرفیت تولید محدودی داشته و انواع مشخصی از واکسن (مثلًا واکسن‌های مورد تأیید سازمان بهداشت جهانی) را تولید می‌کنند. واکسن‌های تولیدی یا از طریق مراکز توزیع به مناطق هدف ارسال می‌شوند و یا در صورت لزوم به طور مستقیم از تأمین‌کننده به منطقه آسیب‌دیده تحویل می‌گردند. مراکز توزیع که برای افزایش کارایی توسط شرکت‌های لجستیکی طرف سوم (3PL) اداره می‌شوند، وظیفه دارند واکسن‌های دریافتی از چندین تولیدکننده را ذخیره کرده و به مناطق مختلف رسانندگی کنند. تصمیم‌گیری اصلی در این مسئله تعیین الگوی بهینه‌ی توزیع واکسن است؛ به این معنی که مشخص شود هر نوع واکسن توسط کدام تأمین‌کننده، در چه زمانی (کدام دوره زمانی) و از طریق کدام مسیر و وسیله نقلیه سردخانه‌دار به هر یک از مناطق آسیب‌دیده ارسال شود. هدف نهایی برنامه‌ریزی توزیع، پوشش کامل و به موقع تقاضای تمامی مناطق تحت بحران است به نحوی که کمبود واکسن رخ ندهد و خدمات رسانی سلامت با عدالت تأمین گردد.



شکل ۱) زنجیره تأمین سرد در نظر گرفته شده.

در این مدل تمامی هزینه‌های کلیدی زنجیره تأمین سرد و همچنین جنبه‌های خدمات رسانی لحاظ شده است. مهم‌ترین جزء، هزینه حمل و نقل سرد واکسن‌ها است که بابت جابه‌جایی یخچال‌دار واکسن بین تأمین‌کنندگان، مراکز توزیع و مناطق آسیب‌دیده صرف می‌شود. این هزینه وابسته به فاصله جغرافیایی بین مبدأ و مقصد و وزن/حجم محموله واکسن بوده و معمولاً بر اساس ضرب فاصله (کیلومتر) در نرخ هزینه حمل و نقل سرد به ازای هر کیلومتر و در نظر گرفتن هزینه حمل هر جعبه واکسن محاسبه می‌گردد. به عنوان مثال، در مطالعه موردي فرض شده هر جعبه واکسن مخصوص حمل در زنجیره سرد حاوی حدود ۴۸۷۵ دوز (با وزن تقریبی ۸۰ پوند) است. بنابراین هزینه حمل هر جعبه در هر مسیر برابر است با مسافت بین دو نقطه ضربدر هزینه واحد حمل به ازای کیلومتر و ضربدر وزن آن جعبه (بر حسب پوند یا کیلوگرم). علاوه بر هزینه حمل و نقل، هزینه نگهداری موجودی واکسن در مراکز توزیع نیز در مدل در نظر گرفته شده است، چرا که واکسن‌ها ممکن است برای دوره‌های کوتاهی در انبار سرد نگهداری شوند. از سوی دیگر، مدل برای کمبود یا تأمین نشدن به موقع تقاضای مناطق آسیب‌دیده نیز هزینه‌ای جریمه‌ای در نظر می‌گیرد.

این هزینه‌ی جریمه در قالب هزینه محرومیت تعریف شده است؛ یعنی هزینه‌ای اجتماعی که بیانگر رنج و آسیب انسانی ناشی از عدم دسترسی به واکسن به موقع می‌باشد. تابع هدف مدل مجموع این هزینه‌ها، شامل هزینه‌های لجستیکی (حمل و نقل سرد و نگهداری) و هزینه‌های کمبود/محرومیت را حداقل می‌کند، در حالی که تامین تقاضای تمامی مناطق را نیز مد نظر قرار می‌دهد. متغیرهای تصمیم‌گیری مدل بیانگر برنامه ارسال و تخصیص واکسن در طول افق برنامه‌ریزی هستند. به طور توصیفی، مدل تعیین می‌کند که چه مقدار از هر نوع واکسن تولید شده توسط هر تأمین‌کننده در هر دوره زمانی به هر یک از مراکز توزیع یا مستقیماً به کدام منطقه ارسال شود. همچنین مشخص می‌شود که هر محموله ارسالی از کدام مسیر (مستقیم یا غیرمستقیم از طریق کدام مرکز توزیع) و توسط کدام نوع وسیله نقلیه یخچال‌دار حمل گردد. تصمیمات دیگر شامل میزان موجودی واکسن در هر مرکز توزیع در هر دوره (میزان واکسن ذخیره شده برای استفاده در دوره‌های بعدی) و زمان‌بندی ارسال‌ها طی دوره‌های متولی است. تمامی این تصمیمات در خدمت این هدف هستند که واکسن‌ها به میزان کافی و در زمان مناسب به تمامی مناطق اولویت‌دار بررسند و بدین ترتیب معیارهای عملکردی هزینه‌ای و انسانی برآورده شوند.

مدل مذکور با درنظرگرفتن فرضیات واقع‌بینانه‌ای توسعه داده شده است تا پیچیدگی دنیای واقعی را نمایندگی کند. نخست، مسئله چند دوره‌ای است؛ بدین معنا که افق برنامه‌ریزی به چند بازه زمانی تقسیم شده و توزیع واکسن در هر دوره به طور جداگانه اما در ارتباط با دوره‌های دیگر برنامه‌ریزی می‌شود. برای مثال در مطالعه موردی، افق زمانی ۹۰ روزه به ۶ دوره ۱۵ روزه تقسیم شده است تا برنامه توزیع به صورت پویا و مرحله‌ای پیش روید. تقاضای هر منطقه در هر دوره از پیش معلوم فرض شده و مدل باید به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی کند که این تقاضا در همان دوره ارضاء شود؛ در واقع به دلیل بحران و فوریت، کمبود تقاضا مجاز نیست و تمامی نیازها باید برطرف گردد (هرچند در صورت بروز کمبود، هزینه محرومیت بسیار سنگینی اعمال خواهد شد تا راه حل قادر کمبود تشویق شود).

دوم، انواع مختلفی از وسایل نقلیه سرد برای حمل واکسن وجود دارد که هر یک ظرفیت حمل مشخص (تعداد محدودی جعبه واکسن) و هزینه عملیاتی متفاوتی دارند. در مدل حاضر به طور خاص دو نوع کامیون یخچال‌دار در دو بخش مختلف زنجیره تأمین به کار گرفته شده است: کامیون‌های بزرگ‌تر برای حمل بین تأمین‌کنندگان و مراکز توزیع و کامیون‌های چابک‌تر برای توزیع نهایی از مراکز به مناطق آسیب‌دیده. در نتیجه، مدیریت زنجیره تأمین با این رویکرد ناوگان، سریع‌تر و کنترل‌پذیرتر می‌شود. سوم، هر تأمین‌کننده دارای ظرفیت تولید محدودی در هر دوره است و نمی‌تواند بیش از حد معینی واکسن تولید کند؛ به طور مشابه هر مرکز توزیع دارای ظرفیت ذخیره‌سازی محدودی در انبار سرد خود می‌باشد که حداکثر موجودی واکسن قابل نگهداری را تعیین می‌کند.

چهارم، فرض می‌شود محدودیتی روی تعداد وسایل نقلیه در دسترس وجود ندارد؛ یعنی به هر تعداد کامیون یخچال‌دار که نیاز باشد می‌توان برای حمل واکسن‌ها استفاده کرد و همچنین تمامی مسیرهای حمل ممکن بین هر دو نقطه جغرافیایی در دسترس هستند.

پنجم، با توجه به فسادپذیری واکسن و نیاز به زنجیره سرد، فرض شده است واکسن‌ها در طول دوره برنامه‌ریزی کیفیت خود را حفظ می‌کنند به شرط آنکه در یخچال نگهداری شوند؛ بنابراین اثر فساد یا انقضا به صورت صریح در مدل لحاظ نشده است و

زمان انتقال بین گره‌ها^۳ نیز به دلیل سرعت عمل بالا ناچیز در نظر گرفته شده است. این ساده‌سازی‌ها به مدل امکان می‌دهد که ضمن رعایت واقعیت‌ها، مرکز بر تصمیمات کلیدی توزیع در کوتاه‌مدت باشد.

در طراحی این مسئله توجه ویژه‌ای به عدالت در تخصیص واکسن و پیامدهای انسانی آن شده است. عدالت بدین منظور در مدل به صورت یک محدودیت صریح گنجانده شده تا تضمین شود توزیع واکسن بین مناطق مختلف به صورت منصفانه انجام گیرد. در شرایط همه‌گیری، دسترسی منصفانه به واکسن‌ها امری حیاتی است؛ به طوری که هیچ منطقه‌ای صرفاً به دلیل برتری جغرافیایی یا اقتصادی نسبت به منطقه دیگر در اولویت مطلق قرار نگیرد. مدل با اعمال محدودیت عدالت، تخصیص را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که سطح تامین بین همه مناطق توازن داشته باشد و از تبعیض منطقه‌ای در دریافت واکسن جلوگیری شود. همان‌گونه که اشاره شد، پیامد بی‌عدالتی در توزیع به صورت افزایش رنج و تلفات انسانی ظاهر می‌شود؛ از این رو لحاظ کردن هزینه محرومیت به عنوان سنجه‌ای برای اندازه‌گیری رنج انسانی ناشی از عدم دسترسی به واکسن، ابزار تصمیم‌گیران برای ارزیابی پیامدهای اجتماعی هر برنامه توزیع است. هزینه محرومیت در واقع نوعی جرمیه تأخیر یا عدم تامین به موقع است که با گذشت هر دوره بدون واکسیناسیون جمعیت، افزایش می‌یابد و مدل را وادار می‌کند تا حتی به قیمت افزایش نسبی هزینه‌های لجستیکی، از عدم خدمت‌رسانی جلوگیری کند. یافته‌ها نشان داده‌اند که اعمال محدودیت عدالت تأثیر چشم‌گیری بر کاهش هزینه محرومیت دارد؛ به طور نمونه، در یک سناریو با لحاظ عدالت، هزینه محرومیت تا ۷۳/۸٪ کاهش یافته در حالی که کل هزینه‌های لجستیکی تنها حدود ۵٪ افزایش داشته است. این نتایج اهمیت حیاتی عدالت را در کاهش رنج انسانی تأیید می‌کند و توجیه‌کننده گنجاندن صریح آن در مدل است. به بیان دیگر، اندکی افزایش در هزینه‌های عملیاتی برای توزیع عادلانه می‌تواند از تحمیل هزینه‌های اجتماعی بسیار بزرگ‌تر در آینده (ناشی از شیوع بیشتر بیماری و مرگ‌ومیر) جلوگیری کند. بنابراین مدل توسعه‌یافته رویکردی است که در آن عدالت در تخصیص و هزینه‌های انسانی محرومیت نقشی محوری در طراحی مسئله داشته و از الزامات راه حل بهینه به شمار می‌آیند.

به منظور ارزیابی عملی مدل، یک مطالعه موردی واقعی در مقیاس اروپا انجام گرفته است. در این مطالعه، ۱۰ کشور اروپایی به عنوان مناطق آسیب‌دیده (مقاصد تقاضا) در نظر گرفته شده‌اند. در سمت عرضه، چهار شرکت بزرگ داروسازی تولیدکننده واکسن به عنوان تأمین‌کنندگان وارد شبکه می‌شوند که عبارت‌اند از: Pfizer در آلمان، Moderna در سوئیس، AstraZeneca در بریتانیا و Johnson&Johnson در هلند. هر یک از این تولیدکنندگان دارای یک مرکز توزیع (انبار سرد) نزدیک به محل کارخانه خود هستند که به عنوان هاب توزیع عمل می‌کند. این مرکز توزیع که تحت مدیریت ۳PL فعالیت می‌کنند، واکسن‌های تولیدی را از تمامی کارخانه‌ها جمع‌آوری کرده و بنا بر نیاز به کشورهای هدف ارسال می‌نمایند. طبق طراحی مدل، هر تأمین‌کننده می‌تواند به هر مرکز توزیع یا حتی مستقیماً به هر کشور هدف ارسال انجام دهد، هرچند وجود هاب‌های منطقه‌ای نزدیک تولیدکنندگان موجب کارایی بیشتر در تجمعی و ارسال محموله‌ها شده است. جمعیت و میزان تقاضای واکسن هر یک از ۱۰ کشور هدف مشخص و در برنامه لحاظ شده است (برای مثال کشورهای پر جمعیتی مانند آلمان و بریتانیا هر کدام در حدود دهها میلیون دوز تقاضا طی افق برنامه‌ریزی داشته‌اند که معادل دهها هزار جعبه واکسن می‌باشد). پارامترهای هزینه حمل و نقل بر اساس داده‌های واقعی

³ Lead Time

محاسبه گردیده‌اند؛ بدین صورت که فاصله هر کشور هدف از هر تأمین‌کننده و مرکز توزیع محاسبه شده و سپس با درنظرگرفتن هزینه حمل و نقل سرد به ازای کیلومتر و همچنین وزن هر جعبه واکسن، هزینه حمل یک جعبه واکسن در هر مسیر تعیین شده است. بدین ترتیب، اثر فاصله جغرافیایی و حجم محموله‌ها بر هزینه کل توزیع به شکلی واقع‌بینانه در مدل منعکس می‌شود. این مطالعه موردی نشان داد که مدل پیشنهادی قادر است یک برنامه توزیع بهینه ارائه دهد که هم هزینه‌های لجستیکی (مانند هزینه سردهم و انبارداری) را کمینه می‌کند و هم هزینه‌های اجتماعی را با اجرای توزیع عادلانه و پوشش حداقلی تقاضا کاهش می‌دهد. دستاورد چنین مدلی برای سیاست‌گذاران و مدیران، درک بهتر اهمیت عدالت در زنجیره تأمین واکسن و امکان پیاده‌سازی یک برنامه توزیع منصفانه و کارآمد است که در نهایت به کاهش آسیب‌های انسانی در بحران می‌انجامد.

مدل‌سازی اصلاح شده

مجموعه‌ها

$i =$ اندیس تأمین‌کنندگان ($I, 1, 2, \dots$)

$j =$ اندیس توزیع‌کنندگان ($J, 1, 2, \dots$)

$k =$ اندیس مناطق آسیب‌دیده ($K, 1, 2, \dots$)

$t =$ اندیس دوره زمانی ($T, 1, 2, \dots$)

پارامترها

$D_k^t =$ تقاضای AR k ام در دوره t

$P_k =$ هزینه جریمه تقاضای برآورده نشده برای AR k ام.

$C_{ij} =$ هزینه حمل و نقل سرد به ازای هر جعبه واکسن با کامیون یخچالی v از تأمین‌کننده i به توزیع‌کننده j .

$C'_{jk} =$ هزینه حمل و نقل سرد به ازای هر جعبه واکسن با کامیون یخچالی v' از توزیع‌کننده j به AR k ام.

$C''_{ik} =$ هزینه حمل و نقل سرد به ازای هر جعبه واکسن با کامیون یخچالی v از تأمین‌کننده i به AR k ام.

$FC =$ هزینه ثابت استفاده از هر کامیون یخچالی v .

$FC' =$ هزینه ثابت استفاده از هر کامیون یخچالی v' .

$PC_i^t =$ حداکثر ظرفیت تولید تأمین‌کننده i در دوره t .

$H =$ هزینه متوسط موجودی واکسن‌ها.

$S_j =$ حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی توزیع‌کننده j .

$\alpha =$ حجم هر جعبه واکسن.

$CAP =$ ظرفیت وسیله نقلیه نوع v برای انتقال جعبه‌های واکسن از تأمین‌کننده به توزیع‌کننده و AR.

$CAP' =$ ظرفیت وسیله نقلیه نوع v' برای انتقال جعبه‌های واکسن از توزیع‌کننده به AR.

$\lambda =$ حداکثر اختلاف مجاز بین درصد تقاضای برآورده شده در هر دو منطقه آسیب‌دیده (شاخص عدالت افقی).

$\lambda' =$ حداکثر اختلاف مجاز بین درصد کمبود تجمعی هر دو منطقه نسبت به کل تقاضای آن‌ها، در طول افق برنامه‌ریزی.

$M =$ عدد ثابت بزرگ.

متغیرهای تصمیم‌گیری

$x_{ij}^t =$ تعداد جعبه واکسن‌های حمل شده توسط وسیله نقلیه v از تأمین‌کننده i به توزیع‌کننده j در دوره t منتقل می‌شود.

$x'_{jk}^t =$ تعداد جعبه واکسن‌های حمل شده توسط وسیله نقلیه v' از توزیع‌کننده j به AR k در دوره t منتقل می‌شود.

$x''_{ik}^t =$ تعداد جعبه واکسن‌های حمل شده توسط وسیله نقلیه v از تأمین‌کننده i به AR k در دوره t منتقل می‌شود.

$R_k^{t't} =$ میزان تقاضای برآورده شده دوره t' در پایان دوره t مربوط به AR شماره k ام.

$N_k^{t't} =$ میزان تقاضای برآورده شده دوره t' در دوره t مربوط به AR شماره k ام.

Inv_j^t = میزان موجودی آخر دوره در توزیع کننده j در دوره t .

Num_i^t = تعداد وسائل نقلیه نوع v که واکسن را از تأمین کننده i در دوره زمانی t حمل می‌کنند.

Num_j^t = تعداد وسائل نقلیه نوع v' که واکسن را از توزیع کننده j در دوره زمانی t حمل می‌کنند.

مدل

$$\begin{aligned} MinZ = & \sum_{ijt} C_{ij} x_{ij}^t + \sum_{jkt} C'_{jk} x'_{jk}^t + \sum_{ikt} C''_{ik} x''_{ik}^t + \sum_{it} Num_i^t FC + \sum_{jt} Num_j^t FC' + \sum_{kt} P_k R_k^{tt} + \sum_{jt} H Inv_j^t \\ & + \sum_{tt'k} 3(t-t') R_k^{t't} \end{aligned}$$

s.t.

$$(1) \quad \sum_i x_{ij}^t + Inv_j^{t-1} = \sum_k x_{jk}^t + Inv_j^t \quad \forall j, t$$

$$(2) \quad Inv_j^t \leq S_j \quad \forall j, t$$

$$(3) \quad \sum_j x_{ij}^t + \sum_k x_{ik}^t \leq PC_i^t \quad \forall i, t$$

$$(4) \quad R_k^{tt} = D_k^t - \left\{ \sum_i x_{ik}^t + \sum_j x_{jk}^t - \sum_{t'} N_k^{t't} \right\} \quad \forall t, k ; t' < t$$

$$(5) \quad R_k^{t't} = R_k^{t'(t-1)} - N_k^{t't} \quad \forall t, t', k ; t' < t ; t > 1$$

$$(6) \quad R_k^{t'T} = 0 \quad \forall t', k$$

$$(7) \quad \alpha \cdot \left[\sum_j x_{ij}^t + \sum_k x_{ik}^t \right] \leq Num_i^t \cdot CAP \quad \forall i, t$$

$$(8) \quad \alpha \cdot \left[\sum_k x_{jk}^t \right] \leq Num_j^t \cdot CAP' \quad \forall j, t$$

$$(9) \quad \left| \frac{\sum_i x_{ik}^t + \sum_j x_{jk}^t}{D_k^t} - \frac{\sum_i x_{ik'}^t + \sum_j x_{jk'}^t}{D_{k'}^t} \right| \leq \lambda \quad \forall k, k', t$$

$$(10) \quad \left| \frac{\sum_{t=1}^t R_k^{t'(t-1)}}{\sum_{t=1}^t D_k^t} - \frac{\sum_{t=1}^t R_{k'}^{t'(t-1)}}{\sum_{t=1}^t D_{k'}^t} \right| \leq \lambda' \quad \forall k, k', t ; t' < t ; t > 1$$

$$(11) \quad x_{ij}^t, x_{jk}^t, x_{ik}^t, R_k^{t't}, N_k^{t't}, Inv_j^t, Num_i^t, Num_j^t \in \mathbb{N} \quad \forall i, j, k, t$$

اشکالات مدل ارائه شده در مقاله و اصلاحات آن

در این بخش به طور نظاممند به بررسی کاستی‌ها و نارسایی‌های مدل ارائه شده در مقاله می‌پردازیم. با توجه به بررسی دقیق مقاله و مقایسه آن با فروض و الزامات واقعی مسئله، مشخص شد که مدل دارای اشکالات متعددی است که هم از جنبه‌ی نگارشی و هم از نظر منطقی در مدلسازی قابل تقسیم‌بندی هستند.

از یک سو، اشکالات نگارشی به وضوح در بخش‌های مختلف مقاله دیده می‌شوند؛ از جمله ابهام در تعریف نمادها و متغیرها، ناسازگاری در استفاده از پارامترها، یا ضعف در سازمان‌دهی و ارائه فرمول‌ها. این دسته از مشکلات هرچند بر اصل مدلسازی اثر مستقیم ندارند، اما موجب دشواری درک مدل، احتمال سوء‌برداشت و کاهش اعتبار علمی مقاله می‌شوند.

از سوی دیگر، اشکالات منطقی در مدلسازی از اهمیت بیشتری برخوردارند، زیرا مستقیماً بر صحت و اعتبار ریاضی و عملی مدل اثر می‌گذارند. این اشکالات در سیر تدوین مدل، از تعریف مجموعه‌ها و پارامترها گرفته تا متغیرهای تصمیم‌گیری، تابع هدف و محدودیت‌ها، قابل مشاهده هستند. به همین دلیل، ما این بخش را بر اساس یک توالی منطقی تنظیم کرده‌ایم تا نشان دهیم چگونه مدل مقاله دچار خطا بوده و در مدل اصلاح شده چه تغییراتی اعمال شده است.

اشکالات نگارشی

این دسته از مشکلات هرچند مستقیماً بر صحت ریاضی مدل اثر ندارند، اما در بازخوانی، پیاده‌سازی و تحلیل نتایج اختلال ایجاد می‌کنند. مهم‌ترین اشکالات نگارشی شناسایی شده و اصلاحات اعمال شده در گزارش ما عبارت‌اند از:

❖ **تعريف‌نشدن λ (لاندا)** در بخش پارامترها

در مقاله از پارامتر λ استفاده شده است، اما هیچ‌گونه تعریفی برای آن ارائه نشده بود. این مسئله موجب ابهام در تفسیر مدل می‌شود.

اصلاح: در گزارش ما، پارامتر λ به طور دقیق تعریف و مستند شد تا شفافیت کامل ایجاد گردد.

❖ **ناسازگاری در تعریف هزینه نگهداری (H_z)**

در بخش پارامترها، هزینه نگهداری با اندیس z تعریف شده بود (یعنی هر انبار می‌تواند هزینه‌ی متفاوتی داشته باشد). اما در تابع هدف، به جای H_z از H استفاده شده بود، که معادل برابر دانستن هزینه نگهداری در تمام انبارها است. این ناسازگاری باعث تناقض در مدل می‌شود.

اصلاح: در گزارش ما اندیس z از H حذف گردید و هزینه نگهداری به صورت یکسان برای تمام انبارها منظور شد تا سازگاری بین تعریف و استفاده در تابع هدف حفظ شود.

❖ **اشتباه در تعویف ظرفیت کامیون‌های v' ($CAP_{v'}$)**

طبق مفروضات مقاله، کامیون‌های v' مختص مسیر توزیع‌کننده‌ها به مناطق آسیب‌دیده هستند. اما در تعریف پارامتر $CAP_{v'}$ به‌اشتباه نوشته شده بود از تولیدکننده به AR. این خطأ باعث مغایرت با منطق مسئله می‌شود. اصلاح: در گزارش ما این پارامتر اصلاح شد و تعریف صحیح آن ظرفیت کامیون‌های مسیر توزیع‌کننده به مناطق آسیب‌دیده درج گردید.

❖ اشتباہ تایبی در اولین متغیر تصمیم‌گیری (x_{ij}^{vt})

در مقاله اولین متغیر تصمیم‌گیری مربوط به حمل واکسن از تأمین‌کننده به توزیع کننده تعریف شده بود. اما به جای x_{ij}^{vt} به صورت ناقص و اشتباہ jx_{ij}^{vt} درج شده بود. این خطأ، نمادگذاری را مخدوش و متغیر را نامفهوم می‌کرد. اصلاح: در گزارش ما این متغیر به شکل صحیح x_{ij}^{vt} نوشته شد و در تمام روابط مدل نیز به صورت یکدست به کار گرفته شد.

اشکالات منطقی در مدلسازی

بررسی دقیق مقاله نشان داد که علاوه بر ایرادات نگارشی، مدل ارائه شده دارای اشکالات منطقی و بنیادی در ساختار مدلسازی نیز هست. این دسته از اشکالات اهمیت بیشتری دارند زیرا مستقیماً بر صحت، اعتبار و قابلیت حل مدل تأثیر می‌گذارند. در واقع، برخی از فروض مسئله و نحوه‌ی تعریف اجزاء مدل با یکدیگر ناسازگار بوده و این موضوع باعث می‌شود نتایج حاصل از مدل غیرواقعی یا حتی از نظر ریاضی نادرست باشند.

برای تحلیل این دسته از اشکالات، ما سیر منطقی تدوین مدل را دنبال کرده‌ایم و در هر مرحله، از تعریف مجموعه‌ها تا پارامترها، متغیرهای تصمیم‌گیری، تابع هدف و محدودیت‌ها ایرادات موجود را شناسایی و اصلاحات لازم را ارائه داده‌ایم. این روش به ما امکان می‌دهد نشان دهیم که مدل مقاله چگونه به تدریج دچار نارسانی شده و در مدل اصلاح شده‌ی ما چه تغییراتی اعمال شده است تا اشکالات برطرف گردد.

بر این اساس، اشکالات منطقی در مدلسازی در زیربخش‌های زیر بررسی می‌شوند:

- مجموعه‌ها
- متغیرهای تصمیم‌گیری
- تابع هدف
- محدودیت‌ها

❖ اشکالات منطقی در مجموعه‌ها

یکی از نخستین اشکالات منطقی مدل مقاله به تعریف مجموعه‌های مرتبط با وسایل نقلیه برمی‌گردد. در مطالعه‌ی موردی مقاله، ذکر شده است که تعداد کامیون‌های نوع ۷ برابر ۸ و تعداد کامیون‌های نوع ۷ برابر ۲۰ است. در حالی که در بخش مفروضات مدل تصریح شده که هیچ محدودیتی در تعداد کامیون‌های در دسترس وجود ندارد. این تناقض آشکار چند مشکل اساسی ایجاد می‌کند:

➢ تناقض بین مفروضات و داده‌های مطالعه موردی

از یکسو ادعا شده که تعداد کامیون‌ها نامحدود است، اما از سوی دیگر مقادیر ثابت $V = 20$ و $V' = 8$ معرفی شده است. این تناقض به لحاظ منطقی ناسازگار است و خواننده را در درک ساختار مدل سردرگم می‌کند.

➢ غیرواقعی بودن مقادیر ثابت

حتی اگر این اعداد (۸ و ۲۰) را بپذیریم، با توجه به ظرفیت هر کامیون و حجم تقاضا در مطالعه‌ی موردی، به هیچ وجه امکان پوشش کامل تقاضا وجود ندارد. این موضوع نشان می‌دهد که داده‌های مقاله ساختگی بوده یا نتایج آن قابل اتکا نیستند.

➤ عدم سازگاری با متغیرهای تصمیم‌گیری مدل

در خود مدل، متغیرهای تصمیم‌گیری Num_i^{vt} و $Num_j^{v't}$ معرفی شده‌اند که تعداد کامیون‌های نوع v و v' را در هر دوره زمانی مشخص می‌کنند. بنابراین، تعداد کامیون‌ها باید توسط مدل تصمیم‌گیری شود و نمی‌توان از ابتدا اعداد ثابتی مانند $V = 20$ و $V' = 8$ را به مجموعه‌ها نسبت داد. این ناسازگاری باعث می‌شود مدل به صورت ریاضی حل ناپذیر یا بی‌اعتبار گردد.

➤ نقض فرض نامحدود بودن وسائل نقلیه

تعريف مجموعه‌های v و v' با تعداد اعضای ثابت، عملأ در تضاد با فرض مهم مسئله مبنی بر نامحدود بودن وسائل نقلیه است. این تناقض، یکی از جدی‌ترین ایرادات منطقی مدل مقاله محسوب می‌شود.

راه حل اصلاحی:

در مدل اصلاح شده‌ی ما، برای رفع این مشکلات منطقی، مجموعه‌های v و v' و در نتیجه اندیس‌های مربوط به آنها به طور کامل حذف شدند. بدین ترتیب، متغیرهای تصمیم‌گیری و پارامترها دیگر وابسته به این اندیس‌ها نیستند و تنها متغیرهای i و j وظیفه تعیین تعداد کامیون‌ها را برعهده دارند. این تغییر باعث می‌شود که:

- تناقض بین مفروضات و داده‌ها برطرف شود،
- مدل با فرض نامحدود بودن وسائل نقلیه همخوان گردد،
- و فرایند حل مدل منطقی و معتبر باقی بماند.

در راستای این تغییرات متغیرهای تصمیم‌گیری y_v^t ، $y_{v'}^t$ و $y_{v''}^t$ از مدل‌سازی حذف شدند زیرا در ادامه هر کامیون به صورت مستقل برنامه‌ریزی نمی‌شود و فقط تعداد هر نوع کامیون مورد تصمیم‌گیری قرار می‌گیرد. در ادامه محدودیت‌های مربوطه نیز از مدل حذف شدند:

$$(eq. 6) \quad \sum_{ij} x_{ij}^{vt} \leq My_v^t \quad \forall v, t$$

در مقاله

$$(eq. 7) \quad \sum_{ik} x_{ik}^{vt} \leq My_v'^t \quad \forall v, t$$

در مقاله

$$(eq. 8) \quad \sum_{jk} x_{jk}^{v't} \leq My_{v'}'^t \quad \forall v', t$$

در مقاله

❖ اشکالات منطقی در تابع هدف – Deprivation Cost

در مقاله، جمله‌ی هزینه محرومیت فقط بر مبنای کمبود همان دوره نوشته شده است. فرم دقیق ارائه شده به صورت زیر است:

$$Deprivation Cost = \sum_{t \in T} r(t) \left[\sum_{k \in K} D_k^t (1 - z_k^t) + \sum_{k \in K} \left(z_k^t \left(D_k^t - \left(\sum_{iv} x_{iv}^{vt} + \sum_{jv'} x_{jv'}^{v't} \right) \right) \right) \right]$$

که در آن

D_k^t تقاضای ایجادشده منطقه k در دوره t ،
 x_{ik}^{vt} مقدار ارسالی از تامین‌کننده i به منطقه k با وسیله نقلیه v در دوره t ،
 $x_{jk}^{v't}$ مقدار ارسالی از توزیع‌کننده j به منطقه k با وسیله نقلیه v' در دوره t
و $\{0,1\} \in z_k^t$ نشانگر ارسال در دوره t برای منطقه k است (اگر در دوره t هیچ ارسالی به k انجام نشود $z_k^t = 0$ ، در غیر این صورت $z_k^t = 1$).

بدین ترتیب: اگر $z_k^t = 0$ ، کل D_k^t در همان دوره جریمه می‌شود و اگر $z_k^t = 1$ ، صرفاً باقیمانده برآورده نشده همان دوره یعنی $D_k^t - (\sum_{iv} x_{ik}^{vt} + \sum_{jv'} x_{jk}^{v't})$

نقد منطقی:

این فرمول، منطق محرومیت را که باید تابعی از زمان انتظار از لحظه ایجاد تقاضا باشد نقض می‌کند. چون:

➢ برای تقاضایی که در $t' = 2$ ایجاد شده و $t = 3, 4$ به طور کامل برآورده نمی‌شود، هزینه محرومیت فقط در همان $t' = 2$ (یا در بهترین حالت، فقط روی بخش تازه برآورده نشده همان دوره) اعمال می‌شود و انتظار تجمعی در دوره‌های بعدی در هزینه بازتاب نمی‌یابد؛

➢ علماً این جمله تابع هدف با پنالتی کمبود همپوشانی پیدا می‌کند و بدون لحاظ فاصله زمانی ایجاد تا تامین کار می‌کند؛
➢ با معنای D_k^t (تقاضای ایجادشده در هر دوره) ناسازگار است، زیرا برای همان تقاضا در دوره‌های بعد که هنوز تامین نشده، دیگر هزینه محرومیت متناسب با زمان سپری شده لحاظ نمی‌شود.

راه حل اصلاحی:

برای بازتاب درست هزینه انتظار از لحظه ایجاد تقاضا تا هر دوره جاری، ساختار رهگیری تقاضا را از دوره ایجاد به دوره مشاهده متصل کردیم:

۱. بازتعریف متغیر کمبود به صورت دوفهرستی

به جای فرم تک‌فهرستی، متغیر کمبود را به شکل زیر تعریف کردیم:

$R_k^{t't} =$ مقدار کمبود (برآورده نشده) تقاضای ایجادشده برای k در دوره t' که تا پایان دوره t همچنان باقی است، $t' \geq t$.
(توجه: در مدل ما R کمبود است و همین قرارداد برای R_k^t و $R_k^{t't}$ نیز برقرار است).

به این ترتیب، هر تقاضا از لحظه ایجاد (t') تا هر دوره بعدی (t) قابل رهگیری است و مدت انتظار به صراحت وارد مدل می‌شود.

۲. حذف متغیر z_k^t از مدل و تابع هدف

با ورود رهگیری زمانی کمبود، دیگر نیازی به متغیر دودویی z_k^t برای ساختن عبارت قطعه‌ای نیست و این متغیر از مدل حذف شد.

۳. فرم اصلاح شده هزینه محرومیت

جمله Deprivation Cost به صورت زیر بازنویسی شد تا هزینه هر کمبود به تناسب زمان سپری شده از دوره ایجاد محاسبه شود:

$$\text{Deprivation Cost} = \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T: t' \leq t} \sum_{k \in K} r(t-t') R_k^{t't}$$

در این فرم:

- اگر بخشی از تقاضای k که در t' ایجاد شده تا پایان t هنوز تامین نشده باشد، به اندازه $R_k^{t't}$ و با وزن زمانی $(t-t')$ جریمه می‌شود؛

- بنابراین، سناریوی ایجاد در $t' = 2$ و باقی‌ماندن تا $t = 4$ دقیقاً دو دوره انتظار ($t-t' = 2$) را در هزینه منعکس می‌کند.

۴. معرفی متغیر کمکی برای ترازهای زمانی

به موازات $R_k^{t't}$ ، یک متغیر کمکی رهگیری نیز تعریف می‌کنیم:

$$N_k^{t't} = \text{مقدار تامین شده از تقاضای ایجاد شده در } t' \text{ برای } k \text{ در دوره } t, t' \geq t.$$

که در زیربخش تغییرات در محدودیت‌ها از آن برای نوشتن معادلات موازنۀ دقیق ایجاد/تامین/باقیمانده استفاده خواهیم کرد. نتیجه عملی این اصلاحات در تابع هدف: هزینه محرومیت اکنون یک هزینه زمان-تجمیعی است که هر واحد کمبود را تا زمانی که برطرف نشده، در هر دوره با وزنی متناسب با طول انتظار ($r(t-t')$ محاسبه می‌کند؛ بدین‌سان، منطق محرومیت با تعریف D_k^t و پویایی واقعی تامین کاملاً هم‌راستا می‌شود و هم‌پوشانی نامطلوب با پنالتی کمبود نیز از میان می‌رود.

❖ اشکالات منطقی در محدودیت‌ها

پس از بررسی مجموعه‌ها، متغیرهای تصمیم‌گیری و تابع هدف، اکنون به بخش محدودیت‌ها می‌رسیم. محدودیت‌ها ستون فقرات هر مدل ریاضی هستند و اگر به درستی طراحی نشده باشند، می‌توانند منجر به راه حل‌های غیرمنطقی یا حتی ناسازگار شوند. در مقاله مورد بررسی، تعدادی از محدودیت‌ها با وجود نیت درست، دارای ایرادهای مفهومی یا ریاضی‌اند؛ ایرادهایی که یا با سایر فروض مسئله هم‌خوانی ندارند، یا به لحاظ فرموله‌سازی دقیق نیستند. بنابراین، در این بخش هر محدودیت به صورت مجزا بازنویسی می‌شود، سپس نقد منطقی آن ارائه شده و در نهایت نسخه‌ی اصلاحی بیان خواهد شد.

➢ محدودیت اول - ارسال/دریافت از توزیع‌کننده و تراز خروجی

$$(eq. 2) \quad \sum_{iv} x_{ij}^{vt} \geq \sum_{kv'} x_{jk}^{v't} \quad \forall j, t$$

در مقاله

نقد منطقی:

هدف نگارندگان این بوده که مقدار خروجی از توزیع‌کننده j در دوره t از مقدار ورودی همان دوره بیشتر نشود. اما نامعادله بالا موجودی انبار را نادیده می‌گیرد؛ حال آن‌که بخشی از خروجی دوره t می‌تواند از موجودی پایان دوره $1-t$ تأمین شود.

راه حل اصلاحی:

ورودی مؤثر قابل خرج در دوره t برابر ورودی جاری + موجودی پایان $1-t$ است، پس نامعادله باید چنین باشد:

$$(eq. 2) \quad \text{اصلاح شده} \quad \sum_{iv} x_{ij}^{vt} + Inv_j^{t-1} \geq \sum_{kv'} x_{jk}^{v't} \quad \forall j, t$$

مقایسه با محدودیت دوم مقاله (تراز موجودی):

$$(eq. 3) \quad \text{در مقاله} \quad \sum_{iv} x_{ij}^{vt} + Inv_j^{t-1} = \sum_{kv'} x_{jk}^{v't} + Inv_j^t \quad \forall j, t$$

از برابری بالا و بدیهی بودن $Inv_j^t \geq 0$ نتیجه می‌شود که نامعادله اصلاح شده به صورت خودکار برقرار است؛ بنابراین محدودیت اول پس از اصلاح، زائد می‌شود و می‌توان آن را حذف و صرفاً تراز موجودی را نگه داشت:

$$(1) \quad \sum_i x_{ij}^t + Inv_j^{t-1} = \sum_k x_{jk}^t + Inv_j^t \quad \forall j, t$$

➢ محدودیت سوم - تراز تقاضا/تأمین بدون درنظرگرفتن بکلاگ

$$(eq. 4) \quad \text{در مقاله} \quad D_k^t - \left\{ \sum_{jv'} x_{jk}^{v't} + \sum_{iv} x_{ik}^{vt} \right\} = R_k^t \quad \forall t, k$$

نقد منطقی:

این رابطه، کمبود دوره t را فقط بر مبنای تقاضای همان دوره منهای ارسال‌های همان دوره می‌سنجد و کمبود منتقل شده از دوره قبل را نادیده می‌گیرد. در عمل، چنین فرمی معادل با فرض ضمنی $R_k^{t-1} = 0$ است؛ یعنی مدل اجازه وجود بکلاگ از دوره‌های قبلی را نمی‌دهد.

راه حل اصلاحی:

برای حفظ موازنۀ درست تقاضا/تأمین با امکان انتقال کمبود، باید بکلاگ پایان دوره قبل وارد شود:

$$(eq. 4) \quad \text{اصلاح شده} \quad D_k^t + R_k^{t-1} = \left\{ \sum_{jv'} x_{jk}^{v't} + \sum_{iv} x_{ik}^{vt} \right\} = R_k^t \quad \forall t, k$$

نتیجه تطبیق با محدودیت دهم مقاله؛ فرم اصلاح شده فوق دقیقاً با محدودیت دهم (فرم تراز استاندارد با بکلاگ) یکسان است؛ بنابراین، پس از افزودن R_k^{t-1} به محدودیت سوم، محدودیت سوم زائد می‌شود و می‌توان آن را حذف کرد.

➢ محدودیت چهارم - ظرفیت انبار توزیع‌کننده

$$(eq. 5) \quad \text{در مقاله} \quad \sum_{iv} x_{ij}^{vt} + Inv_j^{t-1} \leq S_j \quad \forall j, t$$

نقد منطقی:

این نامعادله فقط ورودی جاری + موجودی پایان دوره قبل را با ظرفیت S_j مقایسه می‌کند و خروجی همان دوره از انبار j را نادیده می‌گیرد؛ در حالی‌که معیار درست اشغال انبار باید ورودی + موجودی قبلی - خروجی باشد.

راه حل اصلاحی:

ابتدا خروجی دوره t از انبار را نیز وارد می‌کنیم:

$$(eq. 5) \quad \text{اصلاح شده} \quad \sum_{iv} x_{ij}^{vt} + Inv_j^{t-1} - \sum_{kv'} x_{jk}^{v't} \leq S_j \quad \forall j, t$$

اکنون با استفاده از معادله‌ی تراز موجودی (که در بخش قبل ثبت شد):

$$(1) \quad \sum_i x_{ij}^t + Inv_j^{t-1} = \sum_k x_{jk}^t + Inv_j^t \quad \forall j, t$$

سمت چپ نامعادله‌ی اصلاح شده دقیقاً برابر می‌شود با Inv_j^t . بنابراین محدودیت ظرفیت به فرم مینیمال زیر فرومی‌ریزد:

$$(2) \quad Inv_j^t \leq S_j \quad \forall j, t$$

➢ محدودیت‌های پنجم تا هفتم و محدودیت نهم - قیود پیوندی Big-M

همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، متغیرهای دودویی فعال‌سازی (y_v^t , $y'_{v'}^t$ و $y''_{v''}^t$) در مدل اصلاح شده حذف شدند. در نتیجه، قیود متناظر با فعال‌سازی این متغیرها نیز از مدل کنار گذاشته می‌شوند:

$$(eq. 6) \quad \text{در مقاله} \quad \sum_{ij} x_{ij}^{vt} \leq My_v^t \quad \forall v, t$$

$$(eq. 7) \quad \text{در مقاله} \quad \sum_{ik} x_{ik}^{vt} \leq My'_{v'}^t \quad \forall v, t$$

$$(eq. 8) \quad \text{در مقاله} \quad \sum_{jk} x_{jk}^{v't} \leq My''_{v''}^t \quad \forall v'', t$$

$$(eq. 10) \quad \text{در مقاله} \quad \sum_{jv'} x_{jk}^{v't} + \sum_{iv} x_{ik}^{vt} \leq Mz_k^t \quad \forall j, t$$

➢ محدودیت دهم - تراز تقاضا/تأمین با بازنویسی کمبود

$$(eq. 11) \quad \text{در مقاله} \quad D_k^t + R_k^{t-1} = \left(\sum_{jv'} x_{jk}^{v't} + \sum_{iv} x_{ik}^{vt} \right) + R_k^t \quad \forall t, k$$

راه حل اصلاحی:

با توجه به این‌که متغیر کمبود از فرم تک‌فهرستی $R_k^{t't}$ به فرم دوفهرستی R_k^t تغییر داده شد، معادله‌ی تراز باید به‌گونه‌ای بازنویسی شود که کمبودهای ناشی از تقاضای ایجاد شده در هر دوره t' و وضعیت آن‌ها در دوره‌ی جاری t قابل رهگیری باشد. بنابراین روابط زیر جایگزین محدودیت دهم می‌شوند:

۱. تعریف کمبود ایجادشده و تأمین شده در همان دوره:

$$(4) \quad R_k^{tt} = D_k^t - \left\{ \sum_i x_{ik}^t + \sum_j x_{jk}^t - \sum_{t'} N_k^{t't} \right\} \quad \forall t, k; t' < t$$

۲. بهروزرسانی کمبودهای باقی‌مانده از دوره‌های پیشین:

$$(5) \quad R_k^{t't} = R_k^{t'(t-1)} - N_k^{t't} \quad \forall t, t', k; t' < t; t > 1$$

این بازنویسی موجب می‌شود کمبود هر تقاضای ایجادشده از لحظه‌ی شکل‌گیری تا زمان تأمین در مدل به‌طور صریح ردیابی شود.

به این ترتیب، ساختار $R_k^{t't}$ و متغیر کمکی $N_k^{t't}$ جایگزین فرم ساده و ناقص R_k^t در مقاله می‌شوند.

➢ محدودیت یازدهم - پاکسازی بک‌لاگ در پایان افق

$$(eq. 12) \quad \begin{array}{l} \text{در مقاله} \\ \sum_{jv'} x_{jk}^{v'T} + \sum_{iv} x_{ik}^{vT} = D_k^T + R_k^T \end{array} \quad \forall k$$

نقد منطقی:

استفاده از R_k^T (به‌جای بک‌لاگ پایان ۱!-T!) تضمین صریحی بر صفر شدن بک‌لاگ در پایان افق نمی‌دهد و با بازفرمول‌بندی کمبود به $R_k^{t't}$ نیز سازگار نیست.

راه حل اصلاحی:

برای الزام به تمام کمبودهای معوق در پایان افق، قید زیر را برای هر تقاضای ایجادشده اعمال می‌کنیم:

$$(6) \quad R_k^{t'T} = 0 \quad \forall t', k$$

➢ محدودیت چهاردهم - عدالت

$$(eq. 15) \quad \begin{array}{l} \text{در مقاله} \\ \left| \frac{\sum_{iv} x_{ik}^{vt} + \sum_{jv'} x_{jk}^{v't}}{D_k^t} - \frac{\sum_{iv} x_{ik'}^{vt} + \sum_{jv'} x_{jk'}^{v't}}{D_{k'}^t} \right| \leq \lambda \end{array} \quad \forall k, k', t$$

نقد منطقی:

مخرج هر کسر فقط تقاضای همان دوره D_k^t را در نظر می‌گیرد، در حالی‌که در هر دوره باید تقاضای واقعی قابل خدمت سنجیده شود؛ یعنی تقاضای تازه دوره + کمبود منتقل شده از دوره‌های قبل. به بیان دیگر، وقتی صورت نماینده *supply* دوره است، مخرج باید نماینده *demand-in-system* باشد.

راه حل اصلاحی (فرم کامل منطبق با رهگیری بک‌لاگ):

$$(eq. 15) \quad \begin{array}{l} \text{اصلاح شده} \\ \left| \frac{\sum_i x_{ik}^t + \sum_j x_{jk}^t}{D_k^t + \sum_{t'} R_k^{t'(t-1)}} - \frac{\sum_i x_{ik'}^t + \sum_j x_{jk'}^t}{D_{k'}^t + \sum_{t'} R_{k'}^{t'(t-1)}} \right| \leq \lambda \end{array} \quad \forall k, k', t$$

نکته: در این فرم، هم صورت و هم مخرج شامل متغیرهای تصمیم‌گیری می‌شوند و حل مسئله با حل گرهای در دسترس ما امکان پذیر نبود. با تأیید استاد، قید عدالت را ساده‌سازی کردیم.
ساده‌سازی پذیرفته شده:

۱. عدالت بر مبنای **supply** همان دوره (بدون بک‌لاغ در مخرج):

$$(9) \quad \left| \frac{\sum_i x_{ik}^t + \sum_j x_{jk}^t}{D_k^t} - \frac{\sum_i x_{ik'}^t + \sum_j x_{jk'}^t}{D_{k'}^t} \right| \leq \lambda \quad \forall k, k', t$$

۲. عدالت بر مبنای انباشت کمبود نسبت به انباشت تقاضا تا انتهای دوره t :

$$(10) \quad \left| \frac{\sum_{t'} R_k^{t'(t-1)}}{\sum_{t=1}^t D_k^t} - \frac{\sum_{t'} R_{k'}^{t'(t-1)}}{\sum_{t=1}^t D_{k'}^t} \right| \leq \lambda' \quad \forall k, k', t ; t' < t ; t > 1$$

یادآوری: با وجود این ساده‌سازی‌ها، قیود عدالت در برخی تنظیمات باعث رفتارهای عددی نامطلوب و نتایج غیرمنطقی در تحلیل حساسیت λ نسبت به هزینه محرومیت شدند؛ توسعه آتی مدل برای بهبود پایداری محاسباتی مدنظر قرار گرفته است.

صحتسنجی و اعتبارسنجی مدل اصلاح شده

برای اطمینان از درستی مدل و پیاده‌سازی آن، آزمایش‌های صحتسنجی روی نمونه‌داده‌های کوچک طراحی شد. این داده‌ها از نظر ساختار کاملاً مشابه داده‌های اصلی هستند اما به دلیل اندازه بسیار کوچک، جواب بهینه آن‌ها بدیهی و قابل‌پیش‌بینی است. بدین ترتیب می‌توان بررسی کرد که آیا مدل اصلاح شده دقیقاً همان رفتار مورد انتظار را نشان می‌دهد یا خیر.

مثال اول - یک کارخانه، یک توزیع‌کننده، یک منطقه و یک دوره

در این مثال تنها یک کارخانه (Pfizer)، یک توزیع‌کننده (DC1) و یک منطقه مقصد (UK) در نظر گرفته شده است. افق برنامه‌ریزی یک دوره است تا بتوانیم بررسی کنیم مدل تمام تقاضا را پوشش می‌دهد و مسیر بهینه را درست انتخاب می‌کند.

- تقاضا: 15,191

• ظرفیت تولید: عددی تصادفی از توزیع یکنواخت بین 15,200 تا 16,000 برای جلوگیری از infeasible شدن

• تابع هزینه حمل و نقل:

$$\sum_{ijt} C_{ij} x_{ij}^t + \sum_{jkt} C'_{jk} x'_{jk}^t + \sum_{ikt} C''_{ik} x''_{ik}^t$$

حالت اول - ارسال مستقیم بهینه است

در این حالت فواصل به گونه‌ای تنظیم شد که حمل مستقیم از کارخانه به UK کم‌هزینه‌ترین گزینه باشد:

مبدأ	مقصد	فاصله(km)
Pfizer	UK	100
Pfizer	DC1	900
DC1	UK	900

- مجموع فاصله در مسیر غیرمستقیم: 1800 km

• هزینه مؤثر: $1800 \times 0.3 = 540$ (بیشتر از 100 km)

انتظار می‌رود مدل تمام تقاضا را به‌طور مستقیم از کارخانه به UK تخصیص دهد.

نتیجه مدل:

- تمامی ارسال‌ها به صورت مستقیم انجام شده‌اند.

• هیچ کمبودی وجود ندارد.

• هزینه کل برابر با مقدار بهینه محاسبه شده است.

```
200 VARIABLE TotalCost.L      = 1.944480E+8 total cost of the system
VARIABLE deprivation_cost.L = 0.000 Deprivation cost due to unmet demand
```

```

---- 201 VARIABLE xijv.L amount boxes transported from i to j by v in t
      ( ALL      0.000 )

---- 201 VARIABLE xikv.L amount transported directly from i to k
      t1
pfiizer.uk 15191.000

---- 201 VARIABLE xjkvp.L amount transported from j to k by vp in t
      ( ALL      0.000 )

```

حالت دوم - استفاده از توزیع‌کننده بهینه است

اکنون فواصل را بر عکس تنظیم می‌کنیم تا مسیر غیرمستقیم از طریق DC1 به صرفه‌تر باشد:

مبدأ	مقصد	فاصله(km)
Pfizer	UK	500
Pfizer	DC1	300
DC1	UK	400

- مجموع فاصله مؤثر: $300+400 = 700 \text{ km}$

- هزینه مؤثر: $700 \times 0.3 = 210 \text{ (كمتر از 500 km مستقیم)}$

انتظار می‌رود مدل کل تقاضا را از طریق DC1 تخصیص دهد.

نتیجه مدل:

- تمام ارسال‌ها ابتدا به DC1 و سپس به UK انجام شده‌اند.

- هیچ کمبودی وجود ندارد.

- هزینه کل برابر با مقدار بهینه‌ی محاسبه‌شده است.

```

---- 200 VARIABLE TotalCost.L      =  4.083423E+8  total cost of the sys
                                         tem
VARIABLE deprivation_cost.L     =      0.000  Deprivation cost due
                                         to unmet demand

```

```

---- 201 VARIABLE xijv.L amount boxs transported from i to j by v in t

t1

pfizer.dcl 15191.000

---- 201 VARIABLE xikv.L amount transported directly from i to k

( ALL      0.000 )

---- 201 VARIABLE xjkvp.L amount transported from j to k by vp in t

t1

dcl.uk 15191.000

```

به این ترتیب، مدل اصلاح شده در هر دو حالت رفتار مورد انتظار را نشان داد و مسیر بهینه را با توجه به داده‌های ورودی درست تشخیص داد.

مثال دوم - سه دوره، دو کارخانه، دو توزیع‌کننده، دو منطقه
برای آزمون پویایی مدل در افق چند دوره‌ای (۳ دوره)، سناریویی با دو کارخانه (Pfizer, Moderna)، دو مرکز توزیع (UK, GER) و دو منطقه مقصد (dc_ger, dc_swi) طراحی شد. هدف، راستی‌آزمایی انتخاب مسیرهای بهینه، رفتار موجودی/جریان‌ها در طول زمان و واکنش مدل به کمبودهای برنامه‌ریزی نشده است.

فواصل ورودی سناریو (کمینه‌سازی هزینه حمل):

- suppliers→ARs: Pfizer→UK: 1200 , Pfizer→GER: 1000 ; Moderna→UK: 1300 , Moderna→GER: 900
- suppliers→distributors: Pfizer→dc_ger: 2 , Pfizer→dc_swi: 200 ; Moderna→dc_ger: 200 , Moderna→dc_swi: 2
- distributors→ARs: dc_ger→UK: 930 , dc_ger→GER: 100 ; dc_swi→UK: 140 , dc_swi→GER: 800

از این اعداد انتظار داریم: حمل مستقیم ARs→suppliers غیربهینه باشد؛ ارسال کارخانه‌ها به مراکز مطابق جفت‌های نزدیک dc_swi→UK و dc_ger→GER (Moderna→dc_swi و Pfizer→dc_ger) انجام شود و نهایتاً توزیع مراکز به مناطق به صورت dc_swi→UK و dc_ger→GER شکل گیرد.

پارامترهای ثابت تقاضای کل:

- totalDemand("uk") = 4344 •
- totalDemand("ger") = 5060 •

حالت اول - تولید کافی و توزیع یکنواخت تقاضا

- توزیع تقاضا در هر منطقه به صورت یکنواخت روی ۳ دوره.
- تولید هر کارخانه در هر دوره > یک‌سوم تقاضای کل همان منطقه (برای پیشگیری از کمبود).
- انتظار: عدم کمبود و صفر بودن هزینه کمبود؛ انتخاب مسیرهای بهینه مطابق فواصل.

نتیجه مدل (خلاصه):

- هیچ کمبودی ثبت نشده است (penalty/backlog cost = 0).
- جریان‌ها مطابق انتظار: dc_swi→UK و dc_ger→GER؛ Pfizer→dc_ger و سپس Moderna→dc_swi.

```

---- 199 VARIABLE TotalCost.L      = 4.351161E+7 total cost of the system
      VARIABLE deprivation_cost.L = 0.000 Deprivation cost due to unmet demand

---- 200 VARIABLE xijv.L amount boxes transported from i to j by v in t
          t1           t2           t3
pfiwer .dc_ger    1669.800   1669.800   1720.400
moderna.dc_swi   1433.520   1433.520   1476.960

---- 200 VARIABLE xikv.L amount transported directly from i to k
          ( ALL       0.000 )

---- 200 VARIABLE xjkvp.L amount transported from j to k by vp in t
          t1           t2           t3
dc_ger.ger     1669.800   1669.800   1720.400
dc_swi.uk      1433.520   1433.520   1476.960

```

حالت دوم - تمرکز تقاضا در یک دوره و تولید ناکافی همان دوره

برای سنجش واکنش مدل به کمبود و عدالت، بیشتر تقاضا را در دوره اول تجمعی کرده و تولید دوره‌ای را کمتر از تقاضای همان دوره در نظر گرفتیم. تقسیم تقاضا برای هر منطقه:

$$D(k, 't1') = 0.9 * \text{totalDemand}(k)$$

$$D(k, 't2') = 0.05 * \text{totalDemand}(k)$$

$$D(k, 't3') = 0.05 * \text{totalDemand}(k)$$

پارامترهای عدالت:

$$\lambda=0.1 \text{ و } \lambda'=0.01$$

انتظار: وقوع کمبود در دوره اول، اعمال هزینه کمبود و توزیع نسبتاً متوازن کمبود بین مناطق به‌واسطه قیود عدالت.

نتیجه مدل (خلاصه):

- هزینه کمبود < 0 (مطابق انتظار).
- ارسال‌ها همچنان مسیرهای نزدیک را انتخاب می‌کنند (کارخانه به مرکز نزدیک، مرکز به منطقه متناظر).
- کمبودها بین UK و GER در هر دوره نزدیک به هم نگه داشته شده‌اند (اثر قید عدالت).

- در دوره اول که ۹۰٪ تقاضای کل ظاهر می‌شود و تولید از آن کمتر است، مدل کمبود را به درستی نشان داده است.
- کمبودها در دو منطقه تقریباً متوازن هستند (اثر قید عدالت) و هزینه کمبود نیز بزرگتر از صفر است.
- نمونه سنجش عدالت (دوره اول):

$$\left| \frac{4000}{(5060 \times 0.9)} - \frac{3477}{(4344 \times 0.9)} \right| = 0.003$$

```

---- 199 VARIABLE TotalCost.L      = 4.354435E+7 total cost of the system
          VARIABLE deprivation_cost.L = 75.900 Deprivation cost due
                                         to unmet demand

---- 200 VARIABLE xjkvp.L amount transported from j to k by vp in t

          t1           t2           t3
dc_ger.ger 4000.000    781.700   278.300
dc_swi.uk  3477.432    649.368   217.200

---- 200 VARIABLE Short.L

          t1           t2
uk.tl     432.168
ger.tl    554.000    25.300

```

جمع‌بندی صحبت‌سنگی مثال دوم:

- مدل در افق سه دوره‌ای مسیرهای بهینه را مطابق هندسه فواصل انتخاب می‌کند.
- در سناریوهای تولید ناکافی و تقاضای مرکز، کمبود به درستی ظاهر می‌شود و هزینه آن محاسبه می‌گردد.
- قیود عدالت (در فرم ساده‌سازی شده پذیرفته شده) کمبودها را بین مناطق نزدیک می‌کند و از انباشت افراطی کمبود در یک منطقه جلوگیری می‌نماید.

حل مسئله، کدنویسی و بصری سازی (مطالعه موردنی)

داده و پارامترها

α	3.1 cubic foot
PC_i^t	Uniform(5600,5800)
S_j	Uniform(5000,6000)
CAP	Uniform(1650,1750)
CAP'	Uniform(450,550)
H	Uniform(0.7,1.3)
P_k	Uniform(30,35)
FC	Uniform(100,110)
FC'	Uniform(50,60)
Cost_per_km_pound	1.6
Shipping_box_weight	80
decayFactor	0.8

: برای محاسبه این پارامتر از آنجا که با شروع همه‌گیری کرونا تقاضا در ابتدا زیاد است و به مرور با واکسینه شدن افراد تقاضا کم می‌شود، تقاضای کل (totalDemand) هر منطق آسیب دیده را به صورت کاهشی با یک توزیع هندسی با ضریب decayFactor تقاضای کل برای مناطق آسیب دیده به شرح زیر است:

United kingdom	27344
Germany	34060
Netherland	7090
Switzerland	3506
Sweden	4197
Italy	24764
Spain	19258
Greece	4398
Poland	7090
Austria	3635

$$C_{ij} = 0.3 \times dis_{ij} \times Cost_per_km_pound \times Shipping_box_weight$$

$$C'_{jk} = 0.3 \times dis_{jk} \times Cost_per_km_pound \times Shipping_box_weight$$

$$C''_{ik} = 1 \times dis_{ik} \times Cost_per_km_pound \times Shipping_box_weight$$

مقادیر dis_{ik} , dis_{jk} و dis_{ij} در این فرمول با توجه به فاصله‌ی کشورها قرار داده شده است.

کد گمز (حل مدل و تحلیل حساسیت)

برای بررسی رفتار مدل اصلاح شده، پس از پیاده‌سازی در محیط GAMS، تحلیل حساسیت بر روی داده‌های ساخته شده انجام شد. تحلیل حساسیت در سه بخش صورت گرفت: تغییر تعداد دوره‌های زمانی، تغییر سطح تقاضا و تغییر ظرفیت تولید. در این قسمت نتایج مربوط به تغییر دوره‌های زمانی ارائه می‌شود.

تغییر دوره‌های زمانی

سه سناریو با تعداد دوره‌های مختلف (۳، ۶ و ۱۰ دوره) در نظر گرفته شد. در همه سناریوها مقدار کل تقاضا ثابت بوده و ظرفیت تولید کارخانه‌ها نیز به گونه‌ای تنظیم شده است که در نهایت امکان پوشش کامل تقاضا وجود داشته باشد. هدف از این آزمایش، بررسی تأثیر طول افق برنامه‌ریزی بر هزینه کل و هزینه محرومیت است.

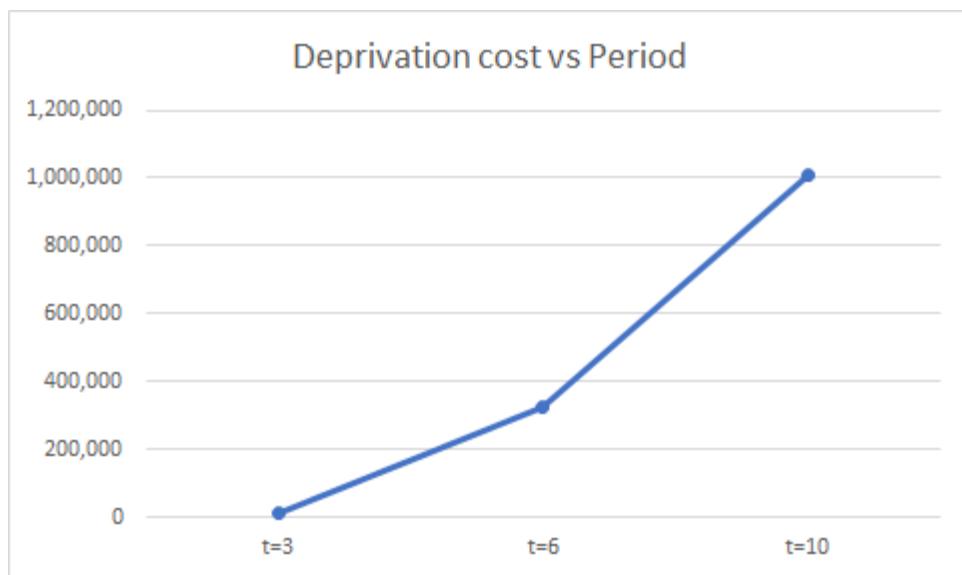
تغییرات هزینه کل با تغییر دوره‌های زمانی



این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش تعداد دوره‌ها، هزینه کل سیستم کاهش می‌یابد. علت این موضوع آن است که افزایش طول افق برنامه‌ریزی به مدل اجازه می‌دهد تخصیص منابع را در طول زمان بهینه‌تر مدیریت کند. به عنوان نمونه، زمان‌بندی ارسال واکسن از تأمین‌کنندگان به مراکز توزیع و مناطق، مدیریت موجودی برای جلوگیری از هزینه‌های اضافی و استفاده‌ی بهتر از ظرفیت‌ها امکان‌پذیر می‌شود. در نتیجه، مجموع هزینه‌های حمل و نقل، هزینه‌های ثابت وسائل نقلیه، هزینه‌های کمبود و هزینه‌های نگهداری کاهش پیدا می‌کند.

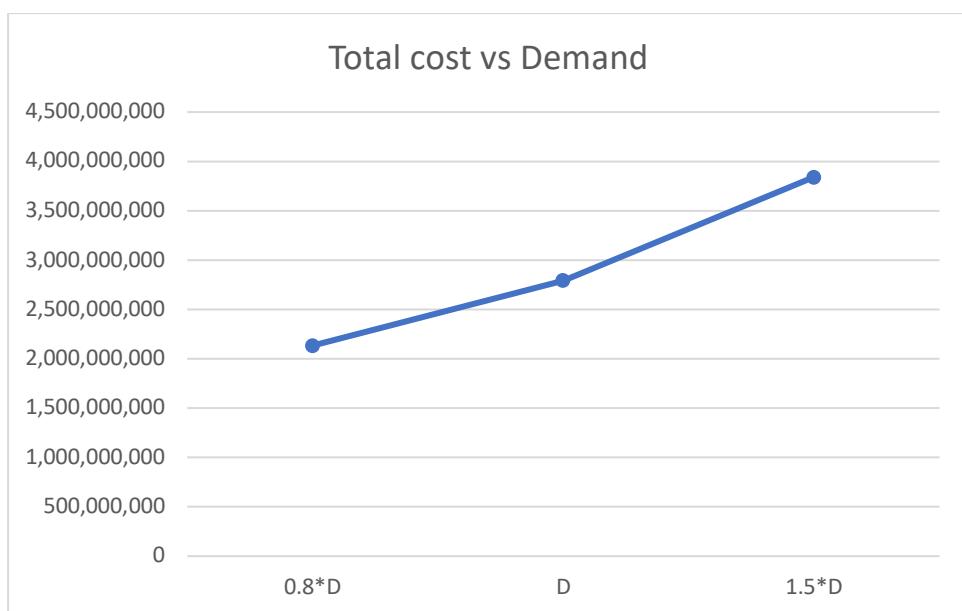
تغییرات هزینه محرومیت با تغییر دوره‌های زمانی

برخلاف هزینه کل، هزینه محرومیت با افزایش تعداد دوره‌ها روندی صعودی دارد. دلیل این امر آن است که هرچه افق برنامه‌ریزی طولانی‌تر باشد، مدل بخشی از تقاضا را به دوره‌های بعد موکول می‌کند تا هزینه‌های لجستیکی کاهش یابد. این موضوع باعث می‌شود محرومیت افراد برای مدت بیشتری ادامه یابد و در نتیجه هزینه محرومیت افزایش پیدا کند. در مقابل، زمانی که تعداد دوره‌ها کمتر است، مدل ناچار است در همان ابتدای افق تقاضاها را پاسخ دهد، بنابراین محرومیت کمتری رخ می‌دهد.



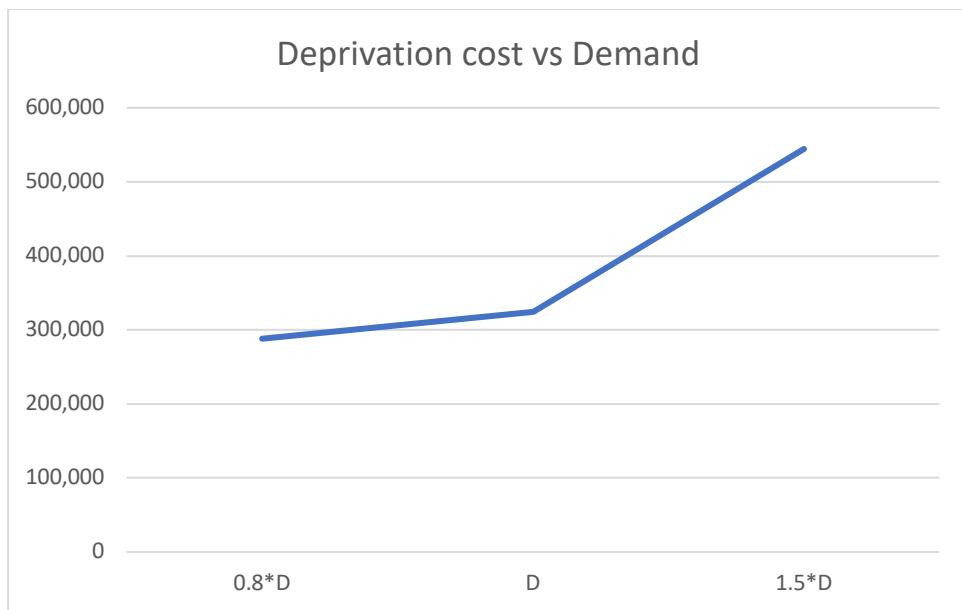
در گام بعدی از تحلیل حساسیت، اثر تغییر سطح تقاضا بر عملکرد مدل بررسی شد. در این آزمایش سه سناریو D ، $D \times 0.8$ و $D \times 1.5$ در نظر گرفته شد. در تمامی سناریوها سایر پارامترها از جمله ظرفیت تولید، هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های نگهداری ثابت باقی ماندند تا تنها تأثیر تغییر تقاضا قابل مشاهده باشد.

تغییرات هزینه کل با تغییر تقاضا



نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تقاضا، هزینه کل سیستم نیز رشد می‌کند. به‌طور مشخص، افزایش ۵۰ درصدی تقاضا منجر به رشد تقریباً ۳۷ درصدی در هزینه کل شده است. این موضوع اهمیت برنامه‌ریزی برای شرایط مختلف و در نظر گرفتن سناریوهای بدینانه در شرایط بحرانی پاندمی را بر جسته می‌کند.

تعییرات هزینه محرومیت با تغییر تقاضا

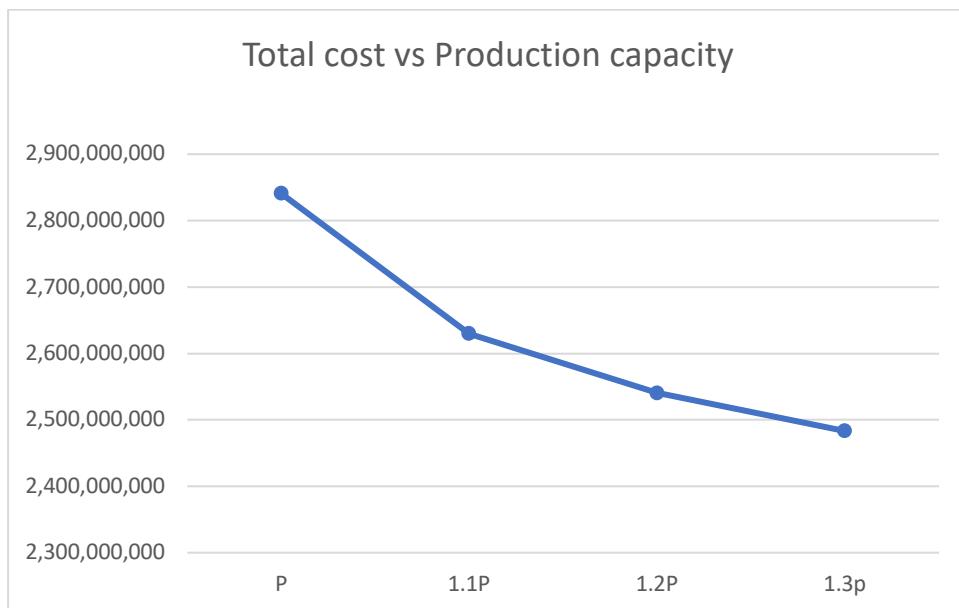


برخلاف هزینه کل که به صورت خطی‌تری رشد می‌کند، هزینه محرومیت واکنش شدیدتری نسبت به تعییرات تقاضا دارد. برای مثال، با افزایش ۵۰ درصدی تقاضا، هزینه محرومیت حدود ۶۷ درصد افزایش داشته است. دلیل این رفتار آن است که با ثابت بودن ظرفیت تولید و امکانات حمل و نقل، بخشی از تقاضا در دوره‌های بعد معوق می‌ماند و همین امر باعث طولانی‌تر شدن مدت انتظار و رشد قابل توجه هزینه محرومیت می‌شود.

جمع‌بندی. تعییرات سطح تقاضا به‌طور مستقیم هم بر هزینه‌های لجستیکی و هم بر هزینه‌های اجتماعی (محرومیت) اثرگذار است. از آنجا که بخش عمده‌ای از رشد هزینه کل در شرایط افزایش تقاضا ناشی از افزایش هزینه محرومیت است، توصیه می‌شود در طراحی مدل‌های عملیاتی، سناریوهای مختلف تقاضا مدنظر قرار گرفته و از روش‌های مقاوم یا تصادفی برای مقابله با نوسانات شدید استفاده شود.

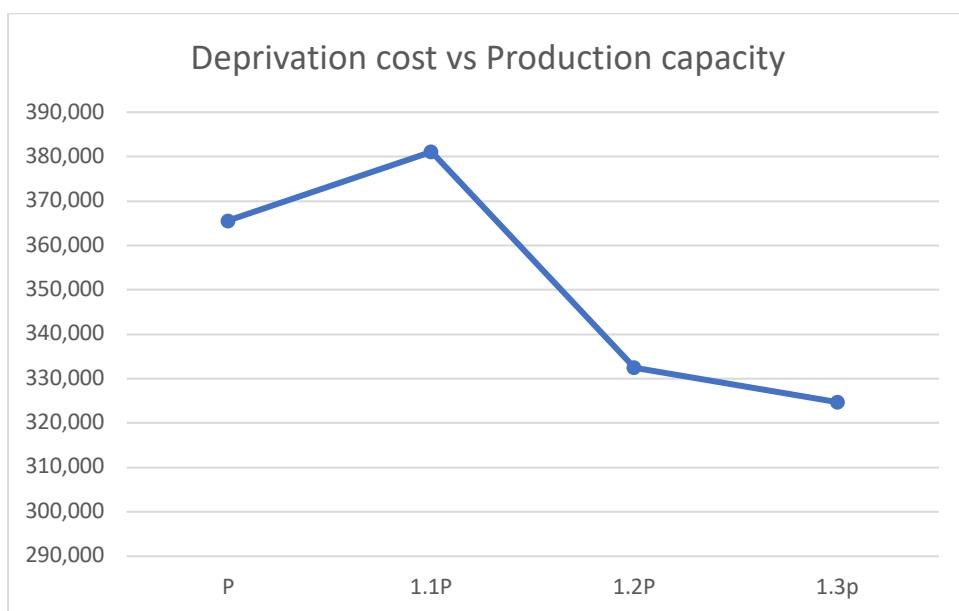
در این بخش از تحلیل حساسیت، اثر تعییر ظرفیت تولید بر عملکرد مدل بررسی شد. در سناریوی پایه مقدار تولید اولیه در بازه‌ی ۵۸۰۰ تا ۶۲۰۰ واحد در نظر گرفته شد. سپس در هر گام، ظرفیت تولید ۱۰٪ افزایش یافت و تعییرات هزینه کل و هزینه محرومیت مشاهده گردید.

تعییرات هزینه کل با تعییر ظرفیت تولید
نتایج نشان می‌دهد که افزایش ظرفیت تولید باعث کاهش قابل توجه هزینه کل می‌شود. دلیل این موضوع آن است که با منابع بیشتر، مدل قادر است تقاضا را بهتر پوشش دهد و نیاز به حمل و نقل پرهزینه یا نگهداری مازاد کاهش می‌یابد. همچنان، کمبودها کمتر رخ می‌دهند و در مجموع صرفه‌جویی حدود ۳۰۰ میلیون (معادل تقریباً ۱۰٪) حاصل می‌شود.



تغییرات هزینه محرومیت با تغییر ظرفیت تولید

رفتار هزینه محرومیت غیرخطی است. در ابتدا، با افزایش ظرفیت از مقدار پایه تا ۱.۱ برابر، هزینه محرومیت اندکی افزایش می‌یابد. علت این موضوع آن است که مدل بخشی از ظرفیت جدید را برای بهینه‌سازی سایر بخش‌ها (مانند کاهش هزینه‌های حمل و نقل یا نگهداری) به کار می‌گیرد و ممکن است برخی تقاضاها همچنان با تأخیر پاسخ داده شوند. اما از نقطه‌ی ۱.۲ برابر ظرفیت به بعد، هزینه محرومیت روند کاهشی پیدا می‌کند. در این حالت منابع کافی برای پوشش سریع‌تر تقاضاها فراهم است و در نتیجه تأخیرها کمتر شده و هزینه محرومیت کاهش می‌یابد.



جمع‌بندی. تغییر ظرفیت تولید نشان داد که افزایش منابع تولیدی، در نهایت هم هزینه کل و هم هزینه محرومیت را کاهش می‌دهد. هرچند در مراحل اولیه ممکن است به دلیل نحوه تخصیص منابع، رفتار هزینه محرومیت اندکی صعودی باشد، اما با افزایش بیشتر ظرفیت، مدل به سمت تأمین کامل‌تر و به موقع حرکت می‌کند. این یافته اهمیت سرمایه‌گذاری در ظرفیت تولید را در شرایط بحرانی دوچندان می‌کند.

یکی از بخش‌های کلیدی مدل اصلاح شده، قید عدالت (Equity Constraint) است که تضمین می‌کند کمبودها و پوشش تقاضا به طور نسبتاً متوازن میان مناطق مختلف توزیع شود. برای ارزیابی اهمیت این محدودیت، مدل یکبار با قید عدالت و یکبار بدون آن اجرا شد و نتایج مقایسه گردید.

تأثیر بر هزینه کل



نتایج نشان می‌دهد که با حذف قید عدالت، هزینه کل تنها حدود ۰/۰۰۱٪ کاهش یافته است؛ یعنی اثر آن بر کاهش هزینه کل بسیار ناچیز است.

تأثیر بر هزینه محرومیت

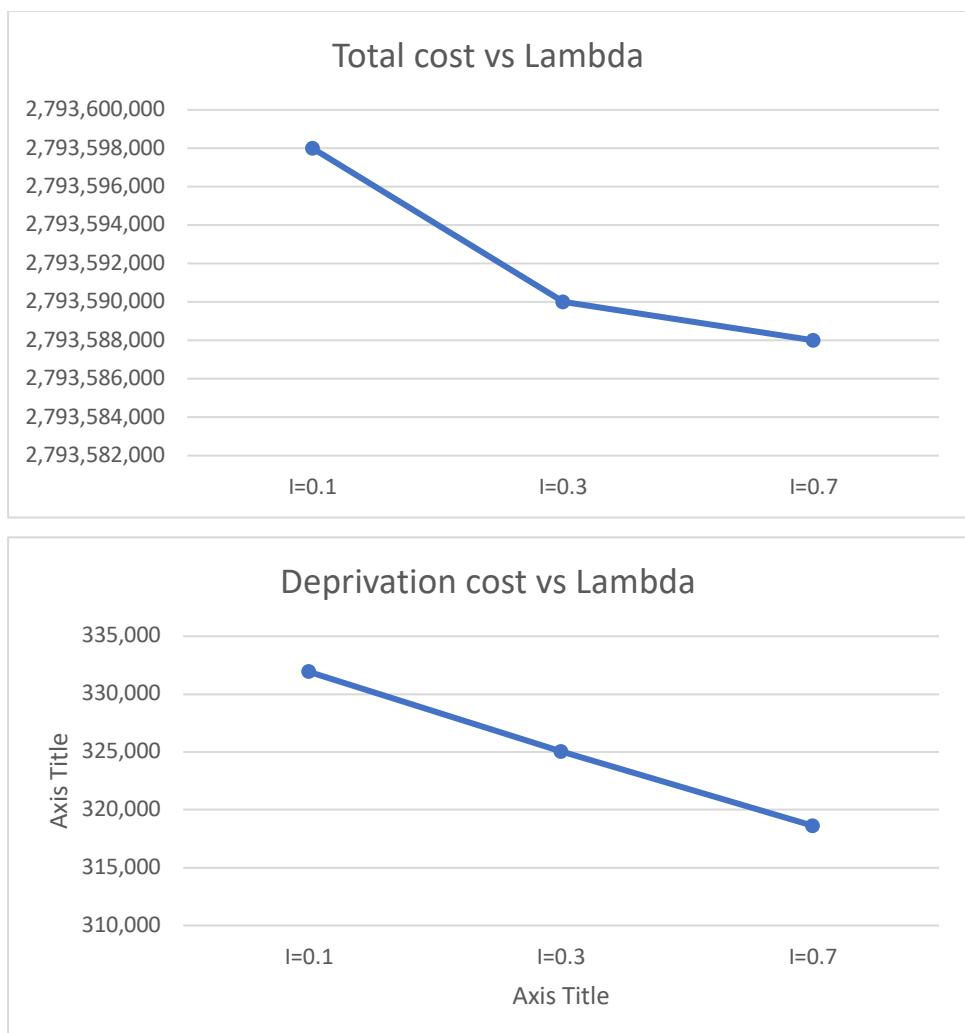


در مقابل، هزینه محرومیت با حذف محدودیت عدالت تقریباً ۷٪ کاهش پیدا کرده است. این اتفاق به این دلیل رخ می‌دهد که مدل بدون محدودیت عدالت، کمبود برخی مناطق را تا حد زیادی کاهش داده اما در بعض مناطق دیگر را نادیده گرفته و کمبود آن‌ها به شدت افزایش یافته است.

جمع‌بندی. هرچند حذف قید عدالت منجر به کاهش جزئی در هزینه کل و هزینه محرومیت می‌شود، اما این کاهش در برابر پیامدهای انسانی آن ناچیز است. بی‌توجهی به عدالت به معنای محرومیت شدید برخی مناطق و نابرابری در دسترسی به واکسن خواهد بود. بنابراین، در شرایط بحرانی، تصمیم‌گیران باید فراتر از صرفه‌جویی‌های جزئی مالی بیندیشند و ارزش برابر جان انسان‌ها را در اولویت قرار دهند.

پارامتر λ در محدودیت عدالت میزان سختگیری در توزیع برابر منابع بین مناطق مختلف را تعیین می‌کند. از دیدگاه نظری، هرچه λ بزرگ‌تر انتخاب شود، عدالت سهل‌گیرانه‌تر خواهد بود و اجازه داده می‌شود که اختلاف بیشتری در پوشش تقاضا بین مناطق وجود داشته باشد. در چنین حالتی انتظار می‌رود که هزینه کل کاهش پیدا کند، اما در مقابل هزینه محرومیت افزایش یابد؛ زیرا برخی مناطق مدت بیشتری در کمبود باقی می‌مانند.

با این حال، در پیاده‌سازی ما به دلیل اینکه امکان خطی‌سازی قید عدالت اصلی وجود نداشت و از فرم ساده‌سازی شده استفاده کردیم، نتایج برخلاف انتظار نظری به دست آمدند. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار λ هر دو هزینه (کل و محرومیت) کاهش یافته‌اند. این کاهش نتیجه‌ی مستقیم ساده‌سازی قید عدالت است و نشان‌دهنده‌ی رفتار واقعی مدل در صورت پیاده‌سازی کامل قید عدالت نیست.



جمع‌بندی.

- در مدل نظری: افزایش λ در نتیجه کاهش هزینه کل و افزایش هزینه محرومیت.
- در نتایج بهدستآمده: به علت ساده‌سازی عدالت، روند معکوس مشاهده شد.
- برای دستیابی به نتایج معتبر، لازم است خطی‌سازی دقیق یا تقریب‌های مناسب برای قید عدالت اصلی انجام شود و تحلیل حساسیت دوباره تکرار گردد.

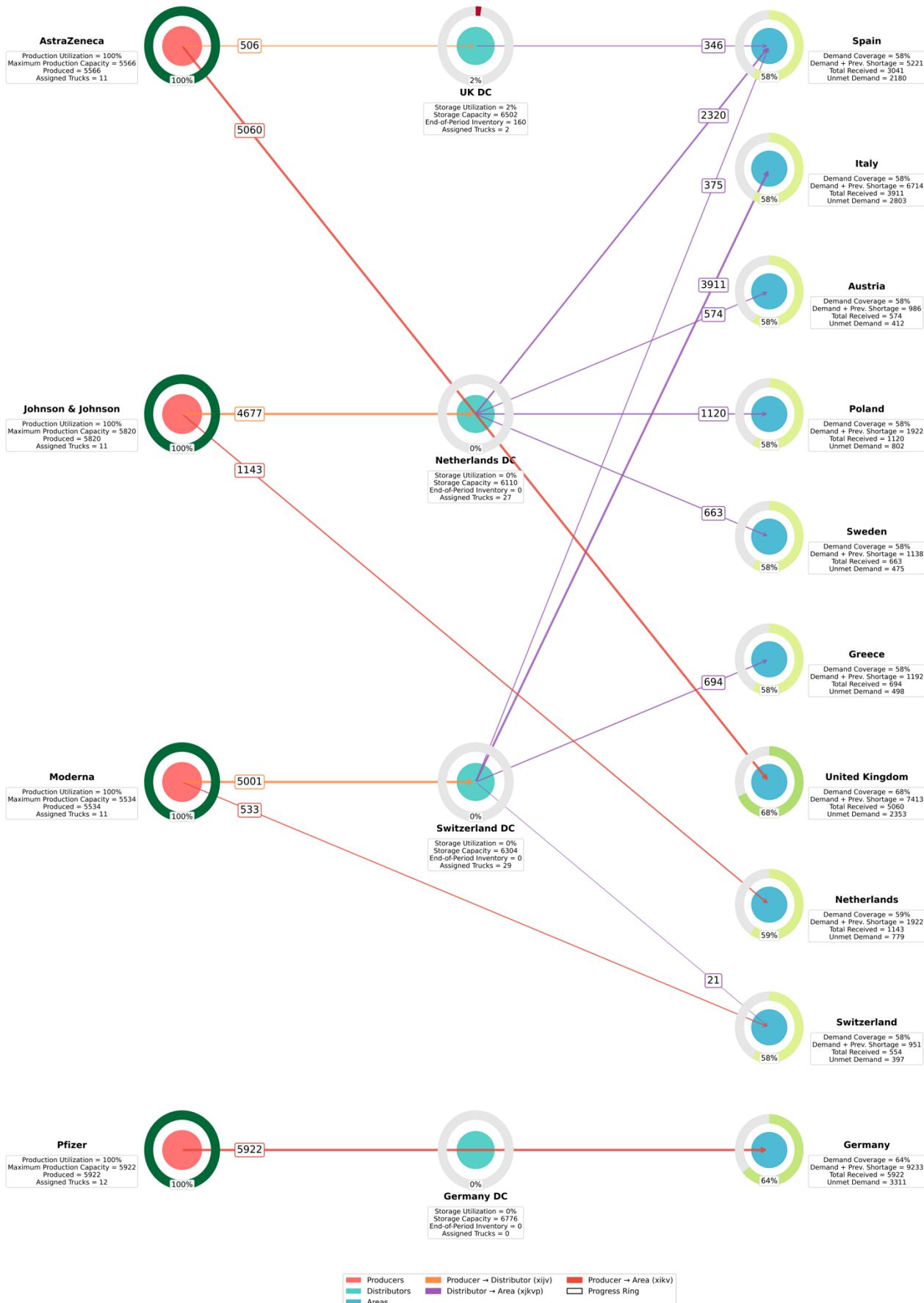
کد پایتون (بصری سازی نتایج)

برای درک بهتر از جریان‌های زنجیره تأمین واکسن و نحوه تخصیص منابع در طول افق برنامه‌ریزی، خروجی حل مدل پایه پس از اجرا در محیط GAMS استخراج شد و سپس به کمک پایتون مورد پردازش و نمایش قرار گرفت. در این مرحله، با استفاده از ابزارهای بصری‌سازی، نمودارهایی طراحی شدند که ارتباط میان تأمین‌کنندگان (Producers)، مراکز توزیع (Distributors) و مناطق مقصد (Areas) را در هر دوره نشان می‌دهند.
در این نمودارها:

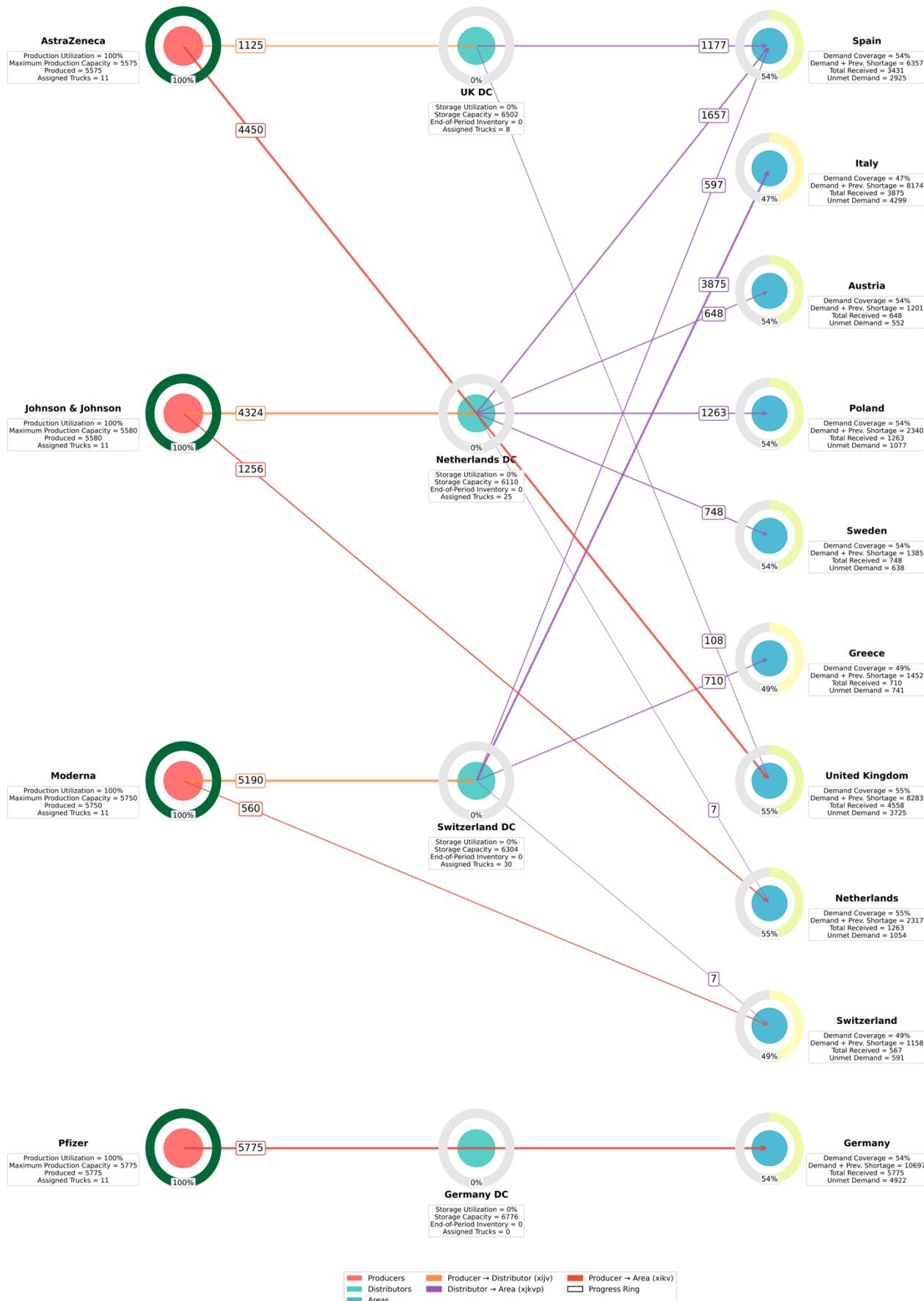
- گره‌های سمت چپ تولیدکنندگان هستند که ظرفیت تولید، میزان تولید واقعی و تعداد کامیون‌های تخصیص‌یافته را نمایش می‌دهند.
- گره‌های میانی مراکز توزیع هستند که سطح استفاده از ظرفیت انبار، موجودی پایان دوره و میزان دریافت/ارسال را مشخص می‌کنند.
- گره‌های سمت راست مناطق مقصد هستند که درصد پوشش تقاضا، میزان دریافت واقعی، تقاضای برآورده‌نشده و وضعیت محرومیت در آن‌ها نشان داده می‌شود.
- رنگ و ضخامت یال‌ها حجم جریان بین نهادها را نمایان می‌سازد.

این نمودارها برای هر یک از دوره‌های افق برنامه‌ریزی (۶ تصویر برای ۶ دوره) ترسیم شده‌اند و امکان بررسی روند تغییرات در طول زمان را فراهم می‌کنند. به کمک این ابزار می‌توان مشاهده کرد که کدام مناطق در هر دوره بیشترین کمبود را داشته‌اند، چه مسیری برای ارسال بهینه انتخاب شده است و ظرفیت‌های انبار و تولیدکنندگان چگونه مورد استفاده قرار گرفته‌اند.
جهت مشاهده‌ی کدها و جزئیات تولید این نمودارها می‌توانید به [لینک نوت بوک](#) مراجعه کنید.

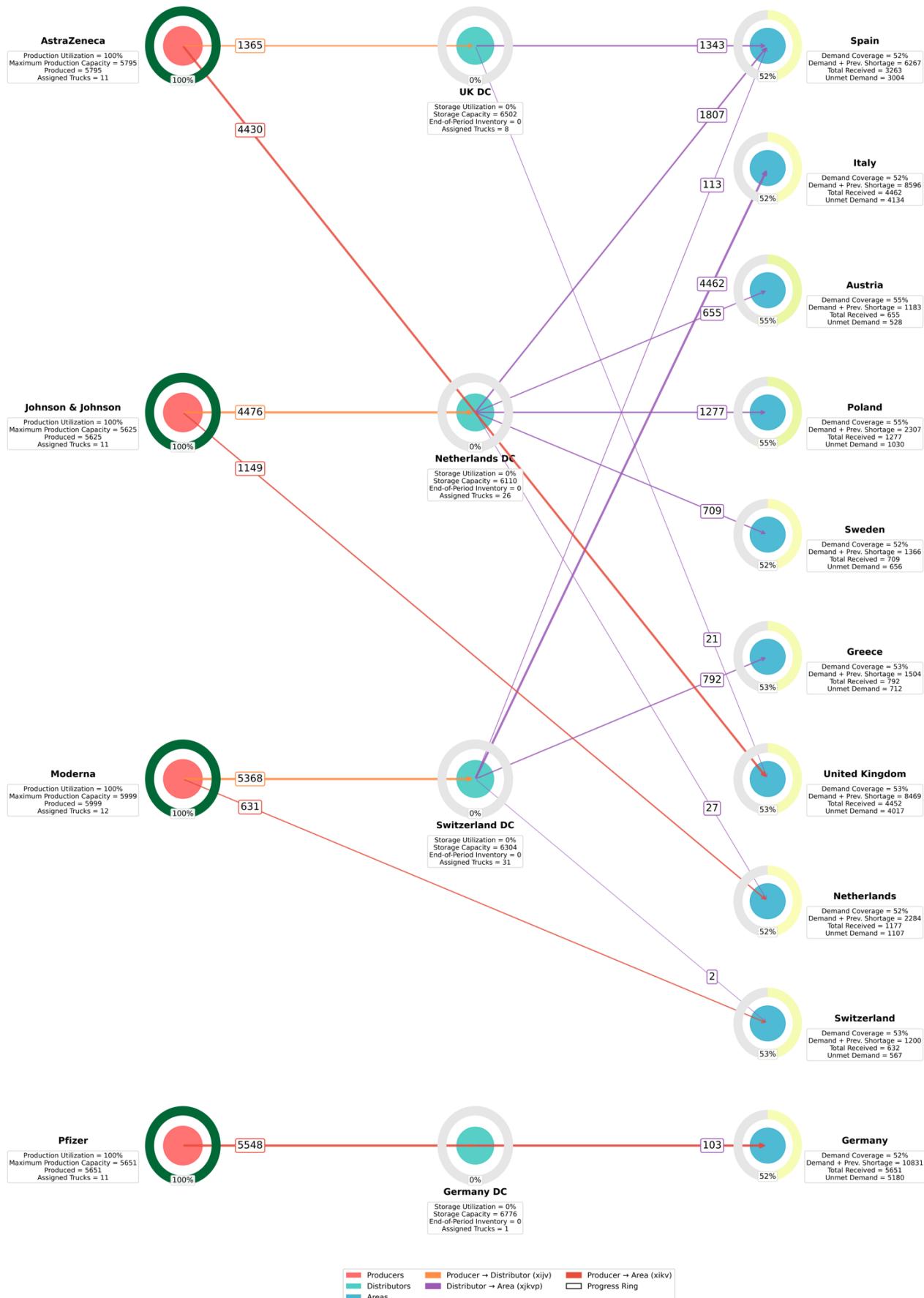
Vaccine Supply Chain – t1



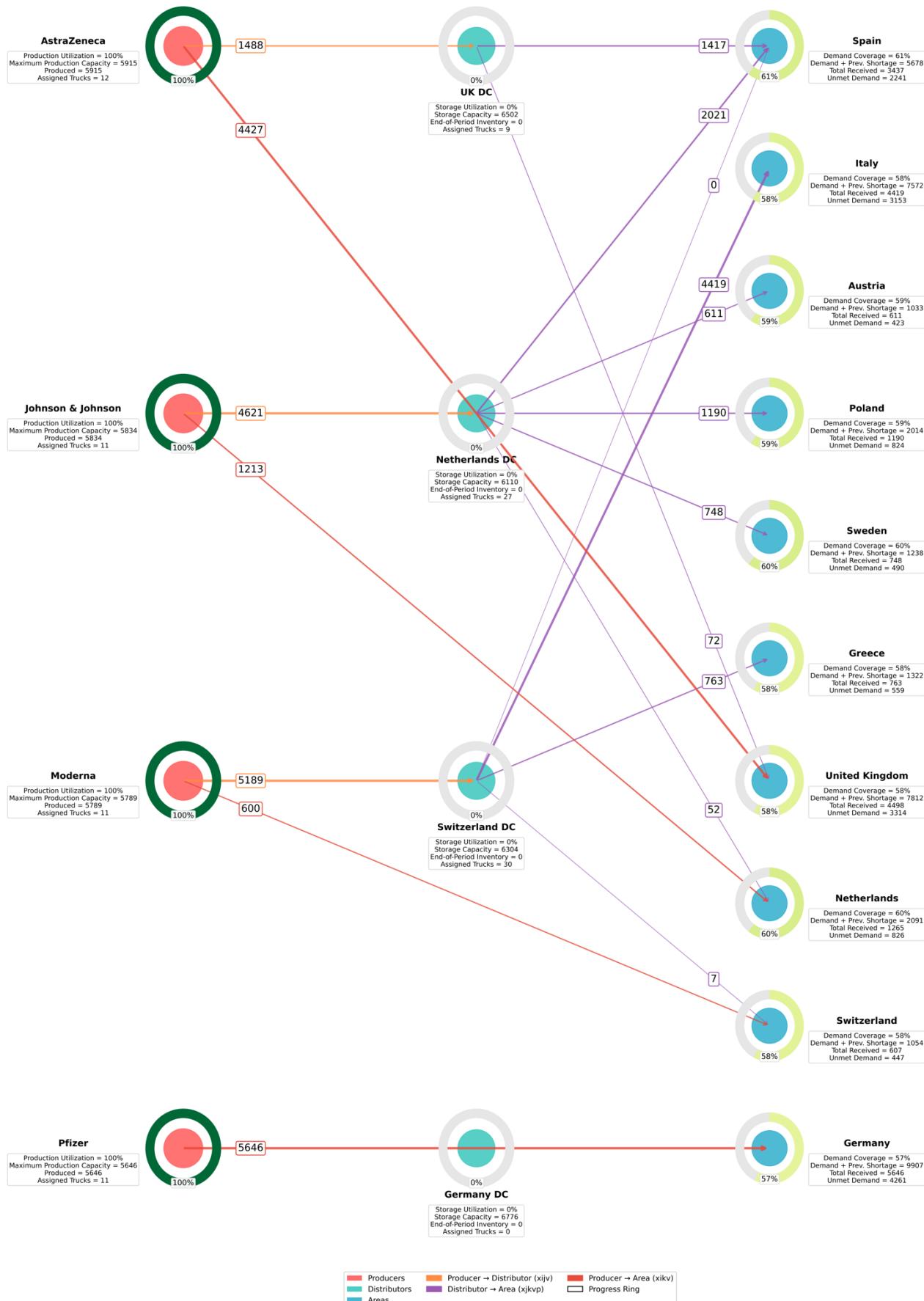
Vaccine Supply Chain – t2



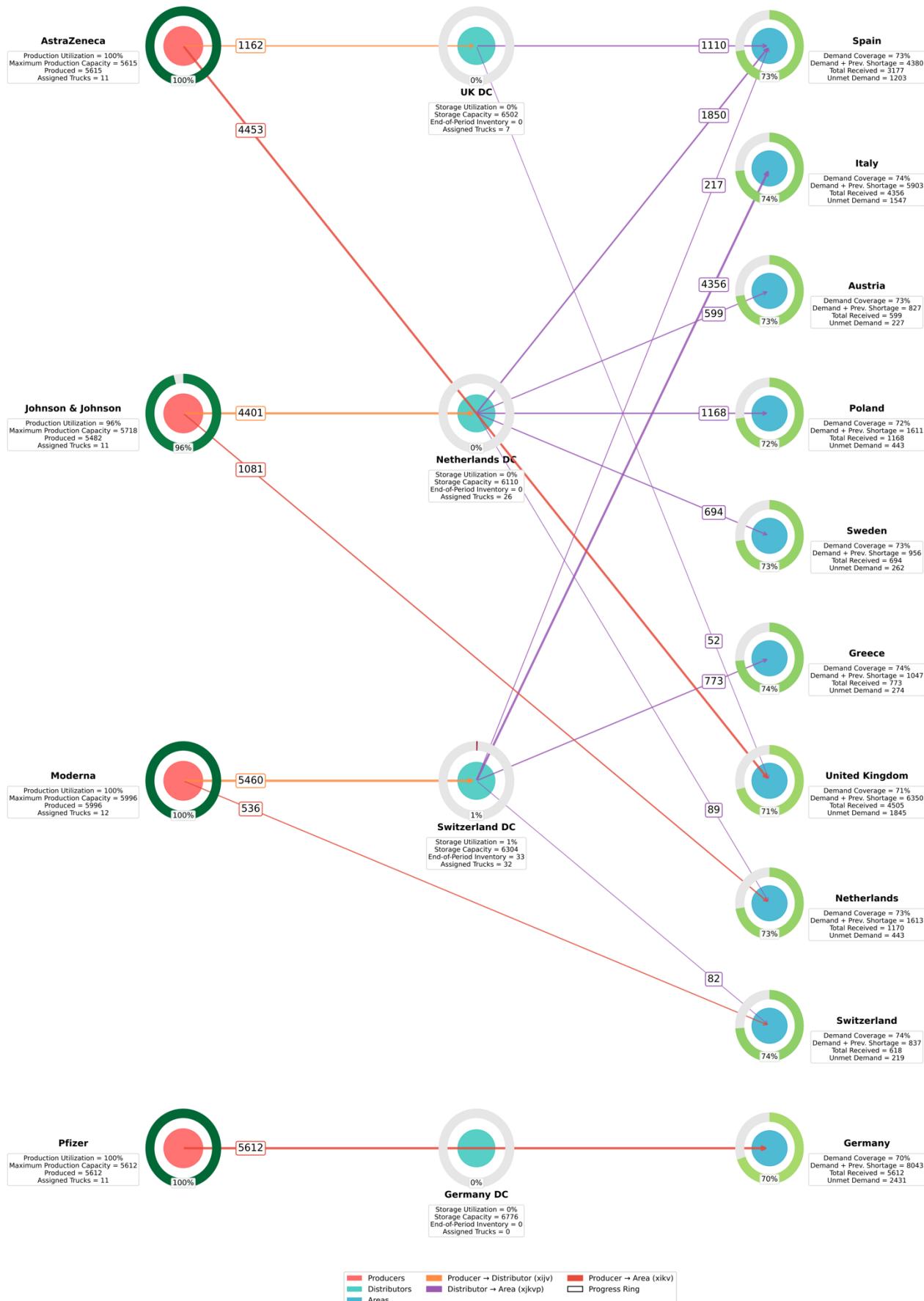
Vaccine Supply Chain – t3



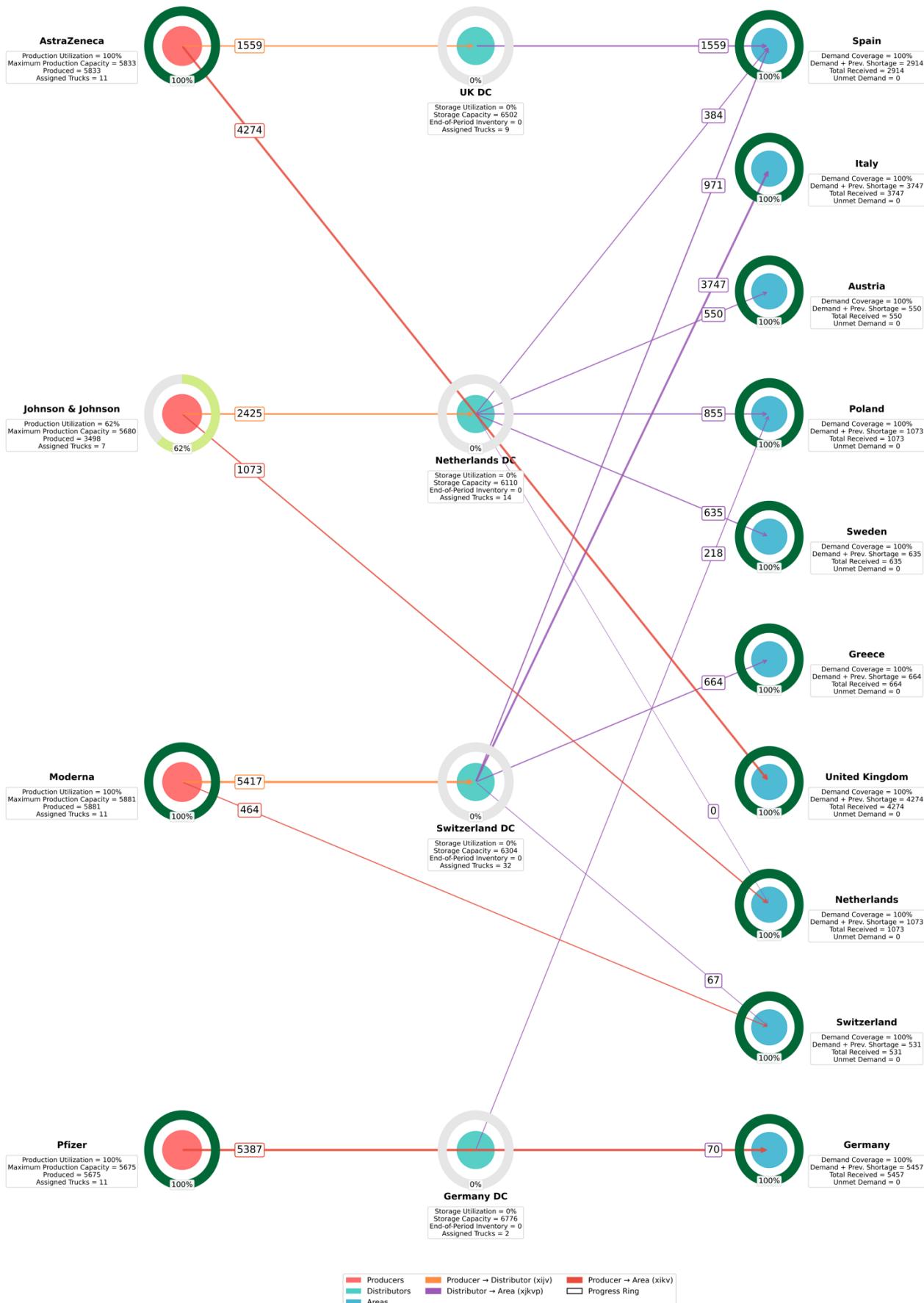
Vaccine Supply Chain – t4



Vaccine Supply Chain – t5



Vaccine Supply Chain – t6



تحلیل و مقایسه نتایج

در این قسمت نتایج به دست آمده از مدل اصلاح شده خودمان را با نتایج گزارش شده در مقاله مقایسه می‌کنیم. مقایسه در چند محور اصلی انجام شده است: هزینه کل، هزینه محرومیت، تحلیل حساسیت نسبت به λ ، اثر تغییر دوره‌ها و تقاضا. در ادامه، هر یک از این موارد به صورت جداگانه بررسی و تفاوت‌ها بیان شده است.

۱. هزینه کل

- در مقاله: هزینه کل برای سناریوی پایه حدود $10^9 \times 22$ یورو گزارش شده است. تغییر افق زمانی و تقاضا باعث نوساناتی بین $10^9 \times 10$ تا $10^9 \times 02$ یورو شده است.
- در مدل ما: هزینه کل در سناریوهای بازتولیدشده مقدار بسیار متفاوتی نشان داد؛ در اغلب موارد هزینه‌ها یا بسیار کمتر از مقادیر مقاله بودند یا روند تغییرات معکوس رفتار مقاله را نشان دادند.

۲. هزینه محرومیت (Deprivation Cost)

- در مقاله: مقدار پایه هزینه محرومیت تنها حدود $10^5 \times 1$ یورو (یعنی تقریباً صفر در مقایسه با هزینه کل) گزارش شده است. حتی در سناریوهای افزایش تقاضا یا تغییر افق، تغییرات بسیار ناچیزی (بین چند ده هزار یورو) مشاهده شده است.
- در مدل ما: هزینه محرومیت متناسب با تغییر پارامترها (افزایش تقاضا، تغییر تعداد دوره‌ها و تغییر λ) تغییرات شدیدتری نشان داد و به عنوان بخشی جدی از هزینه کل ظاهر شد. برخلاف مقاله که اثر محرومیت را تقریباً ناچیز معرفی کرده بود، در نتایج ما این بخش نقش پررنگی در تصمیم‌گیری داشت.

۳. تحلیل حساسیت نسبت به λ

- در مقاله: گزارش شده است که با کاهش λ عدالت سخت‌گیرانه‌تر، هزینه کل اندکی افزایش و هزینه محرومیت به طور محسوسی کاهش می‌یابد. در مقابل، با افزایش λ هزینه کل کاهش و هزینه محرومیت کمی افزایش پیدا می‌کند.
- در مدل ما: نتایج یا روند متفاوتی را نشان دادند و یا در برخی موارد با حل‌گر قابل بازتولید نبودند. در کل، اثر تغییر λ آن‌گونه که مقاله گزارش کرده بود، قابل تکرار نشد.

۴. تغییر تعداد دوره‌ها و تقاضا

- در مقاله: افزایش تعداد دوره‌ها باعث کاهش هزینه کل و در عین حال افزایش هزینه محرومیت معرفی شده است. همچنین افزایش ۵۰٪ تقاضا تنها باعث افزایش ۳۷٪ هزینه کل و حدود ۶۷٪ هزینه محرومیت گزارش شده است.
- در مدل ما: چنین روابط منظم و خطی بین تغییر تقاضا یا تعداد دوره‌ها با هزینه‌ها مشاهده نشد؛ نتایج بسیار حساس‌تر و در مواردی معکوس بودند.

مقایسه‌ی مستقیم نشان می‌دهد که نتایج مقاله با منطق مدل و با نتایج بازتولیدشده توسط ما هم خوانی ندارند. در مقاله هزینه محرومیت تقریباً بی‌اثر گزارش شده و تغییر پارامترها نیز اثرات بسیار ملایم نشان داده‌اند، در حالی‌که در مدل ما هزینه محرومیت و اثر تغییر پارامترها بسیار جدی‌تر و پررنگ‌تر ظاهر شدند.

از آنجا که در طول پژوهه مشکلات بنیادی مدل مقاله را شناسایی و اصلاح کردیم، طبیعی است که مدل مقاله در حالت اولیه جواب‌های ناموجه بدهد. با توجه به این مقایسه عددی، این احتمال وجود دارد که نتایج مقاله حاصل اعدادسازی یا دست‌کاری محاسباتی باشند و به همین دلیل قابل اتکا برای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری واقعی نیستند.

منابع

- Cantillo, V., Serrano, I., Macea, L. F., & Holguín-Veras, J. (2018). *Discrete choice approach for assessing deprivation cost in humanitarian relief operations*. Socio-Economic Planning Sciences, 63, 33–46.
- Enayati, S., & Özaltın, O. Y. (2020). *Optimal influenza vaccine distribution with equity*. European Journal of Operational Research, 283(2), 714–725.
- Fahrni, M. L., Ismail, I. A.-N., Refi, D. M., Almeman, A., Che Yaakob, N., Md Saman, K., ... & Babar, Z.-U.-D. (2022). *Management of COVID-19 vaccines cold chain logistics: a scoping review*. Journal of Pharmaceutical Policy and Practice, 15(1), Article 16.
- Gutjahr, W. J., & Fischer, S. (2018). *Equity and deprivation costs in humanitarian logistics*. European Journal of Operational Research, 270(1), 185–197.
- Holguín-Veras, J., Amaya-Leal, J., Cantillo, V., Van Wassenhove, L. N., Aros-Vera, F., & Jaller, M. (2016). *Econometric estimation of deprivation cost functions: A contingent valuation experiment*. Journal of Operations Management, 45, 44–56.
- Holguín-Veras, J., Pérez, N., Jaller, M., Van Wassenhove, L. N., & Aros-Vera, F. (2013). *On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models*. Journal of Operations Management, 31(5), 262–280.
- Khodaee, V., Kayvanfar, V., & Haji, A. (2022). *A humanitarian cold supply chain distribution model with equity consideration: The case of COVID-19 vaccine distribution in the European Union*. Decision Analytics Journal, 4, 100126.
- Malmir, B., & Zobel, C. W. (2021). *An applied approach to multi-criteria humanitarian supply chain planning for pandemic response*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 11(3), 320–346.