

ارائه مدل ریاضی زنجیره تأمین واکسن با امکان حمل‌ونقل بین انبارها و مکان‌یابی مراکز واکسیناسیون

عزیزاله جعفری^{۱*}، محدثه خسروی^۲

۱. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران.

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران.

خلاصه

امروزه جوامع در تلاش هستند تا با تزریق واکسن ایمنی افراد را در برابر بیماری‌ها تضمین کنند، بنابراین تأمین واکسن نقش مهمی در زندگی انسان‌ها دارد. هدف این پژوهش ارائه یک مدل ریاضی برای زنجیره تأمین واکسن است که افراد بیشتر و با هزینه کمتری بتوانند واکسن دریافت کنند. برای این منظور، یک مدل ریاضی با هدف حداقل کردن هزینه‌ها جهت تعیین تصمیمات مختلف زنجیره تأمین شامل تعداد، مکان و ظرفیت تأسیسات شبکه و تخصیص جریان در مراکز مختلف زنجیره تأمین ارائه شده و از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای برخورد با عدم قطعیت استفاده شده است. عدم قطعیت در تقاضاها، آسیب‌پذیری واکسن‌ها و انبار ضایعات و ظرفیت محدود و اولویت‌های مختلف برای تقاضا، هزینه کمبود برای تقاضا برطرف نشده، امکان جابجایی بین انبارها و مکان‌یابی مراکز تزریق واکسن از مفروضات این پژوهش می‌باشد. خروجی حل مدل ریاضی پیشنهادی شامل مکان‌یابی مخزن‌ها، انبارها و مراکز تزریق واکسن، مقدار تقاضای برطرف نشده و میزان حمل‌ونقل بین اجزای مختلف شبکه زنجیره تأمین واکسن است. برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از خروجی مدل ریاضی این پژوهش از سه روش حل موجود در گمز استفاده شده و بر روی پارامترهای مهم مسأله نیز تحلیل حساسیت انجام گرفته است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۴

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

زنجیره تأمین واکسن

عدم قطعیت

طراحی شبکه زنجیره تأمین

برنامه‌ریزی تصادفی

دومرحله‌ای

۱. مقدمه

در جهان امروزی واکسن نقش مهمی در تضمین سلامتی بشر ایفا می‌کند. امروزه افراد بیش از پیش علاقه‌مند به واکسینه کردن خودشان برای نجات بدن خود در برابر بیماری‌های مختلف هستند. صنعت واکسن همواره در حال رشد بوده است و علاقه روزافزون در تأمین واکسن مناطق مختلف که با انواع ناخواسته بیماری‌ها روبه‌رو هستند، وجود دارد. واکسن به‌عنوان یک ابزار مهم جهت حفاظت از جمعیت در برابر بیماری‌های عفونی و واگیردار به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه که از لحاظ بهداشت در سطح پایین‌تری قرار دارند، تلقی می‌گردد [۱]. واکسن‌ها از نظر بهداشت عمومی و اقتصادی ارزش بسیار بالایی دارند، در ادامه برخی از این ارزش‌ها اشاره می‌کنیم. واکسن‌ها به

افراد کمک می‌کنند تا از بیماری‌های خطرناک پیشگیری کنند از جمله واکسن‌هایی مثل سرخک آنفولانزا هپاتیت و ... برای پیشگیری به افراد تزریق می‌شوند. واکسن‌ها از بیماری‌ها پیشگیری می‌کنند در نتیجه هزینه‌های درمان برای جامعه و افراد را کاهش می‌دهند همچنین واکسن‌ها با کاهش مرگ‌ومیر در جامعه باعث حفظ جمعیت جامعه می‌شوند [۲]. به‌طور کلی واکسن‌ها از نظر بهداشت عمومی و حفظ جان و سلامتی انسان‌ها ارزش بالایی دارند به حفظ سلامت جامعه کمک می‌کنند. برای تحقق اهداف گفته شده باید همه افراد جامعه به واکسن‌ها دسترسی داشته باشند. این دسترسی افراد به واکسن‌ها به‌وسیله زنجیره تأمین واکسن انجام می‌شود. زنجیره تأمین واکسن دسترسی افراد به واکسن سالم و به‌موقع را محقق می‌کند. این

* نویسنده مسئول: عزیزاله جعفری

تلفن: ۰۲۱-۴۶۱۴۲۳۶۵، پست الکترونیکی: a.jafari@usc.ac.ir

تأمین واکسن مناطق مختلف که با انواع ناخواسته بیماری‌ها روبه‌رو هستند، وجود دارد. از همین‌رو مسائل مهم و اساسی در طراحی شبکه زنجیره تأمین واکسن مطرح است. برای دولت‌ها و مراکز خصوصی اینکه همه به واکسن دسترسی داشته باشند بسیار هزینه‌بر است و ممکن است بعضی از مناطق یا گروه‌های خاص تحت پوشش واکسیناسیون قرار ندهند. بنابراین، به حداقل رساندن هزینه‌های مختلف مربوط به طراحی یک زنجیره تأمین مناسب مهم است. برای سرمایه‌گذاری در محصولات واکسن و برنامه‌های ایمن‌سازی نیازمند یک زنجیره تأمین کارآمد برای دریافت، ذخیره و انتقال واکسن در شرایط مناسب و توزیع واکسن با هزینه مناسب برای هر محل تقاضا در زمان مناسب هستیم. ثابت شده است که واکسیناسیون مؤثرترین روش برای پیشگیری از بیماری، ناتوانی و مرگ ناشی از عفونت است. تخمین زده می‌شود که هر ساله از ۲ تا ۳ میلیون مرگ به دلیل واکسن‌ها جلوگیری می‌شود و در طول سال‌ها، سطوح قابل توجهی از پوشش به دست آمده است. با این حال، تخمین زده می‌شود که در صورت بهبود بیشتر پوشش جهانی واکسیناسیون، می‌توان از ۱.۵ میلیون مرگ اضافی سالانه جلوگیری کرد [۷].

بنابراین با افزایش مناطق تحت پوشش برای واکسیناسیون می‌توان افراد بیشتری را از بیماری، آسیب‌های اجتماعی، مرگ و... نجات داد. با حداقل کردن هزینه و افزایش نقاط تقاضای تحت پوشش می‌توان افراد بیشتری را واکسینه کرد. جابجایی بین انبارها و مکان‌یابی برای مراکز واکسیناسیون هم می‌تواند نقاط تحت پوشش را افزایش دهد هم هزینه‌ها را کاهش دهد. چون بودجه همیشه محدود است (به‌خصوص در کشورهای کم‌درآمد و در حال توسعه مقدار این بودجه کمتر هم خواهد بود) بنابراین با حداقل کردن هزینه می‌توان افراد بیشتری را تحت پوشش واکسن قرار داد.

اهداف این پژوهش عبارتند از:

- ارائه یک مدل برای زنجیره تأمین واکسن با هدف حداقل کردن هزینه‌های زنجیره تأمین شامل: مجموع هزینه‌های احداث، مجموع هزینه‌های حمل و نقل واکسن و مجموع هزینه‌های جریمه عدم برآورد تقاضاها با اولویت بالا و پایین.
- کاهش مقدار کمبود واکسن در نقاط تقاضا با فراهم کردن امکان حمل و نقل بین انبارها.
- پیدا کردن بهترین مکان و ظرفیت برای احداث و تجهیز انبار استانی، انبار منطقه‌ای و مراکز تزریق واکسن.
- تعیین مقدار حمل و نقل بهینه واکسن از تولیدکننده به انبار اولیه، انبار استانی، انبار منطقه‌ای و مراکز تزریق واکسن.
- کاهش مقدار تقاضای برطرف نشده.

۲. مرور ادبیات و پیشینه تحقیق

ثابت شده است که واکسیناسیون مؤثرترین روش برای پیشگیری از بیماری، ناتوانی و مرگ ناشی از عفونت است. تخمین زده می‌شود که هر ساله از ۲ تا ۳ میلیون مرگ، به دلیل واکسن‌ها جلوگیری می‌شود و

زنجیره تأمین شامل تمام مراحل می‌گردد که مرتبط با تکمیل و ارائه تقاضای مصرف کننده باشد [۳]. هرگونه اقدامی که به منظور جلوگیری از بروز عفونت و یا تخفیف شکل طبیعی بیماری در فردی با تجویز آنتی‌بادی یا آنتی‌ژن به عمل آید، ایمن‌سازی یا واکسیناسیون گفته می‌شود [۳]. از همین‌رو مسائل مهم و اساسی در طراحی شبکه زنجیره تأمین واکسن مطرح است [۵]. برای سرمایه‌گذاری در محصولات واکسن و برنامه‌های ایمن‌سازی باید با زنجیره تأمین کارآمد برای دریافت، ذخیره و حمل و نقل در شرایط مناسب و ارائه واکسن با هزینه مناسب برای هر محل تقاضا در هر زمان، ادغام شود؛ بنابراین، به حداقل رساندن هزینه‌های مختلف مربوط به طراحی یک زنجیره تأمین مناسب مهم است.

مدیریت زنجیره تأمین واکسن در کشورهای در حال توسعه به اندازه تولید و برنامه‌های واکسن رشد نکرده است. مدیریت زنجیره تأمین با مشکلات جدی روبه‌رو است: سازمان جهانی بهداشت تخمین می‌زند که در برخی از کشورهای در حال توسعه، تقریباً ۵۰ درصد از کل دوزهای واکسن قبل از استفاده به دلیل ضعف در مدیریت زنجیره تأمین به هدر می‌رود [۲]. علاوه بر این، عواملی شامل معرفی واکسن‌های جدید و گران‌تر و برنامه‌های واکسیناسیون، استراتژی‌های مختلف تحویل و افزایش جمعیت هدف، فشار بیشتری به سیستم زنجیره تأمین واکسن وارد می‌کند تا در سطحی بالاتر که برای آن طراحی نشده است کار کند. بنابراین اکثر کشورهای در حال توسعه نیاز به بهینه‌سازی زنجیره تأمین واکسن خود دارند. ثابت شده است که برای مقابله با مشکلات مدیریت زنجیره تأمین واکسن، استراتژی‌های کوتاه‌مدت نه تنها بی‌ثمر هستند؛ بلکه ممکن است مشکلات بیشتری ایجاد کنند. یکی از موضوعات مهم در مدیریت زنجیره تأمین طراحی شبکه زنجیره تأمین است [۴].

در جامعه امروزی واکسن نقش مهمی در تضمین سلامت و جلوگیری از انتقال بیماری (خصوصاً بیماری‌هایی با سرعت انتشار زیاد) دارد. در طول چهار دهه گذشته، حداقل ۳۰ بیماری عفونی جدید ظهور کرده است [۵]. برای از بین بردن یک بیماری و کاهش اثرات اجتماعی، اقتصادی و حتی سیاسی آن، واکسیناسیون تنها راه ممکن است [۲]. اهمیت زنجیره تأمین واکسن ممکن است در این واقعیت دیده شود که پوشش واکسیناسیون کودکان در سراسر جهان برای سل، سرخک، دیفتی، کزاز، سیاه‌سرفه و فلج اطفال در چهل یا چند سال پس از شروع آن از کمتر از ۵٪ به حدود ۸۰٪ رسیده است. با این حال، هنوز هم امروزه حدود ۲۰ میلیون کودک که واکسن‌های اولیه را از دست می‌دهند، چیزی حدود ۱.۵ میلیون مرگ در سال باقی می‌گذارد که اگر پوشش جهانی بهبود یابد، می‌توان از آن‌ها جلوگیری کرد [۶]. سازمان جهانی بهداشت تخمین می‌زند که آنفولانزا ممکن است منجر به ۳ تا ۵ میلیون مورد بیماری شدید و ۲۹۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰۰ مرگ در هر سال به دلیل بیماری‌های تنفسی شود. واکسیناسیون بهترین راه برای پیشگیری و کنترل شیوع آنفولانزا است [۹]. به دلایل بیان شده صنعت واکسن همواره در حال رشد بوده است و علاقه روزافزون در

برای اینکه ضمن حفظ استانداردهای سازمان مراقبت‌های بهداشتی حداقل هزینه را داشته باشند ارائه کرده‌اند. آن‌ها برای حل این مسأله یک مدل ریاضی مبتنی بر آنالیز شبکه، تک‌هدفه با هدف حداقل کردن کل هزینه‌های زنجیره تأمین واکسناسیون ضمن حفظ منافع فردی اجزای اصلی شبکه زنجیره تأمین تحت نظارت سازمان مراقبت‌های بهداشتی پیشنهاد کرده‌اند. اجزای اصلی شبکه زنجیره تأمین معرفی شده توسط هوو و همکاران شامل سازمان مراقبت‌های بهداشتی، تولیدکننده، مراکز توزیع، کلینیک‌ها و مشتری‌ها (افرادی که واکسن دریافت می‌کنند) است. همچنین آن‌ها مدل ارائه شده برای افرادی که باید واکسینه شوند اولویت متفاوت دارد و واکسناسیون افراد باتوجه به اولویت آن‌ها انجام می‌شود. تصمیمات مدل ارائه شده توسط آن‌ها مقدار موجودی واکسن در انبارها و مقدار واکسن جابجا شده بین مراکز در هر دوره بین مراکز است.

در مطالعه‌ای دیگر دویزر و همکاران [۱۱] بیان کرده‌اند که واکسناسیون یک راه مؤثر برای جلوگیری از همه‌گیری است. واکسناسیون باعث ایجاد ایمنی برای افراد واکسینه شده می‌شود، اما همچنین واکسناسیون می‌تواند فشار عفونت را برای افراد واکسینه نشده کاهش دهد. بنابراین افراد ممکن است در واقع بدون واکسینه شدن از عفونت فرار کنند. آن‌ها رابطه بین اثر گله و کسر واکسناسیون را برای مدل قطعی مستعد-آلوده-حذف شده انجام داده‌اند. آن‌ها برای حل مسأله تخصیص واکسن یک مدل مستعد-آلوده-حذف شده کلاسیک تک‌هدفه با هدف حداکثر کردن اثر واکسناسیون، که در آن S بیانگر افراد مستعد، I بیانگر افراد آلوده و R بیانگر افراد حذف شده‌است را ارائه کرده‌اند.

مقاله‌ی بعدی مهم‌ترین مقاله مورد استفاده در این پژوهش است. در این مقاله سجادی و همکاران [۵] یک شبکه زنجیره تأمین برای واکسن طراحی کرده‌اند. شبکه زنجیره تأمین طراحی شده شامل یک تولیدکننده، انبار اولیه، مخزن استان، انبار منطقه‌ای و کلینیک‌ها است. آن‌ها یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تک‌هدفه، با هدف حداقل کردن هزینه‌های حمل‌ونقل و جابجایی و افتتاح در حالی که عدم قطعیت را در تقاضای واکسن در نظر گرفته‌اند، ارائه کرده‌اند. این مدل دارای دو دسته تصمیمات استراتژیک (تصمیمات بلندمدت مثل مکان‌یابی مخازن استان) و تاکتیکی (تصمیمات میان‌مدت مثل مقدار واکسن حمل شده) است. همچنین آن‌ها در مدل‌سازی فسادپذیری واکسن‌ها، اتلاف در انبار، ظرفیت محدود و اولویت‌های متفاوت برای تقاضا را در نظر گرفته‌اند و در نهایت برای مقابله با عدم قطعیت با استفاده از بهینه‌سازی استوار یک مدل استوار که در مقابل عدم قطعیت مقاوم است را ارائه کرده‌اند. برای مطالعه موردی مدل پیشنهاد شده را برای طراحی شبکه واکسن آنفولانزای ایران اعمال کرده‌اند.

یانگ و راج کوپال [۷] برای طراحی شبکه توزیع واکسن یک مدل برنامه‌ریزی برای شبکه توزیع واکسن‌های برنامه جامع واکسناسیون سازمان جهانی بهداشت در کشورهایی با درآمد کم و متوسط پیشنهاد

در طول سال‌ها، سطوح قابل‌توجهی از پوشش به‌دست آمده است. با این حال، تخمین زده می‌شود که در صورت بهبود بیشتر پوشش جهانی واکسناسیون، می‌توان از ۱.۵ میلیون مرگ اضافی سالانه جلوگیری کرد [۳].

چن و همکاران [۸] برنامه‌ای جدید در راستای کمک به بهبود زنجیره تأمین واکسن در کشورهای در حال توسعه ارائه کرده‌اند. آن‌ها اظهار داشتند که یک زنجیره‌های تأمین واکسن قوی‌تر و کارآمدتر می‌تواند نرخ پوشش واکسناسیون را افزایش داده و به نوبه خود، انتقال بیماری در جامعه را کاهش دهد. زنجیره تأمین ارائه شده توسط آن‌ها دارای چهار سطح انبار ملی، انبار منطقه‌ای، انبار محلی و مراکز بهداشت است. آن‌ها مدل‌سازی شبکه توزیع واکسن به عنوان یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی تک‌هدفه با هدف حداکثرسازی دسترسی به واکسن برای شبکه‌های توزیع واکسن با در نظر گرفتن اختلال در موجودی در کشورهای در حال توسعه، امکان گسترش یا ایجاد ظرفیت برای انبارها و در نظر گرفتن تأثیری که تغییر اندازه واکسن یا معرفی واکسن جدید در زنجیره تأمین می‌گذارد ارائه کرده‌اند. تصمیمات مدل ارائه شده توسط آن‌ها شامل مقدار واکسن حمل شده بین مراکز مختلف، تعداد کل افراد واکسینه شده، موجودی واکسن در انبارها و ظرفیت مؤثر اضافه شده به انبارها است. همچنین آن‌ها مدل ارائه شده را برای زنجیره تأمین واکسن سه کشور در حال توسعه، نیجریه، تایلند و ویتنام استفاده کرده‌اند.

در مطالعه‌ای دیگر یارمند و همکاران [۹] یک مدل شبیه‌سازی را برای درک پویایی همه‌گیری یک بیماری در منطق برای سطوح مختلف واکسناسیون توسعه داده‌اند. آن‌ها برای حل مسأله تخصیص واکسن، یک مدل برنامه‌ریزی خطی تصادفی دو مرحله‌ای تک‌هدفه با هدف حداقل کردن هزینه‌های واکسناسیون با در نظر گرفتن عدم قطعیت در نتیجه واکسناسیون در مورد کنترل همه‌گیری، ارائه کرده‌اند. همچنین آن‌ها برای اولین بار از یک مدل خبر فروش برای حل مسأله تخصیص واکسن استفاده کرده‌اند. در مدل ارائه شده تقاضا ماهیتی پویا دارد و تقاضای هر دوره براساس دوره قبل تعیین می‌شود. هدف آن‌ها از ارائه این مدل انجام واکسناسیون دو مرحله‌ای برای مهار شیوع بیماری در چند منطقه‌ی جغرافیایی بوده است. مدل ارائه شده در مرحله‌ی اول تعدادی از دوزهای واکسن را به مناطقی که بیماری شیوع پیدا کرده است اختصاص می‌دهد، در مرحله‌ی دوم دوزهای باقی‌مانده را به مناطقی که بیماری شیوع پیدا نکرده است اختصاص می‌دهد. در این مقاله فرض شده‌است که مسئولان مراقبت‌های بهداشتی تصمیم گرفته‌اند واکسناسیون را در دو دوره زمانی مجزا به نام‌های فاز اول و فاز دوم انجام دهند. آن‌ها برای نشان دادن مزیت سیاست واکسناسیون دو مرحله‌ای نسبت به سیاست واکسناسیون مداوم، ۱۰۰ شهرستان کارولینای شمالی را در مورد آنفولانزای فصلی در نظر گرفته‌اند، که در نتیجه باعث صرفه‌جویی دو میلیون دلار می‌شود.

در پژوهشی در زنجیره تأمین واکسن هوو و تسادیکوویچ [۱۰] یک روش تحقیق عملیاتی با استفاده از مفاهیم و تکنیک‌های زنجیره تأمین

می کنند. آن ها یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط جدید تک هدفه، با هدف حداقل کردن هزینه های زنجیره تأمین برای ایجاد تصمیم های بهینه در مورد مقادیر منتقل شده بین مکان ها، نمایه های موجودی ها، مراکز و مراکز واکسیناسیون و برنامه های واکسیناسیون روزانه در مراکز واکسیناسیون شبکه زنجیره تأمین تحت اختلال ایجاد کرده اند. تصمیمات گرفته شده توسط مدل آن ها شامل مقدار واکسن منتقل شده و ذخیره شده و تولید شده در هر دوره ی زمانی، مقدار واکسن هدر رفته شده در مراکز واکسیناسیون، تعداد کارکنان مورد نیاز در مراکز تزریق و تعداد کامیون های مورد نیاز برای حمل و نقل است. همچنین آن ها در مدل ویژگی های خاص کوید-۱۹، مانند فن آوری های ویژه ذخیره سازی سرد، ماندگاری محدود واکسن های mRNA در شرایط سردخانه و اهداف واکسیناسیون مورد نیاز تحت فشار زمانی شدید را در نظر گرفته اند. آن ها برای حل مسأله در ابعاد کوچک یک استراتژی تجزیه دو مرحله ای مبتنی بر رویکرد تقسیم و تسلط و برای مسأله در ابعاد بزرگ یک رویکرد تجمیع پیشنهاد کرده اند.

علیزاده و همکاران [۱۵] یک زنجیره تأمین چند سطحی برای واکسن آنفولانزا در طول همه گیری کوید-۱۹ ارائه داده اند. آن ها در مسأله با محدودیت هایی مانند گروه بندی واکسیناسیون ها، اولویت بندی افراد و درجه اهمیت آن ها، کمبود واکسن و پوشش تقاضای ازدست رفته در سریع ترین زمان ممکن مواجه شده اند. شبکه طراحی شده توسط آن ها یک زنجیره تأمین چند سطحی شامل مرکز نگهداری واکسن، مرکز توزیع، گروه های مشتریان و مرکز زباله است. آن ها یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط جدید چند هدفه، با اهداف به حداقل رساندن هزینه، به حداکثر رساندن تخصیص تقاضا بر اساس اولویت بندی مشتری و به حداقل رساندن حداکثر تقاضای ازدست رفته مشتری ارائه کرده اند. در مدل پیشنهاد شده تقاضا در ابتدای دوره اول برابر با واکسن درخواستی است در ادامه با توجه به شرایط مسأله و ورود واکسن در دوره های مختلف، تقاضا در هر دوره با توجه به تقاضای ازدست رفته دوره قبل به روز شده است. تصمیمات گرفته شده توسط مدل آن ها شامل مقدار واکسن منتقل شده بین مراکز، مقدار زباله وارد شده به مرکز زباله و مقدار تقاضای برآورده نشده برای واکسن است. همچنین آن ها برای ارزیابی مدل، مطالعه موردی در استان مازندران، ایران انجام شده است.

محمدی و همکاران [۱۶] رویکردی را برای بهینه سازی طراحی شبکه توزیع واکسن ارائه کرده اند. آن ها برای این مسأله یک مدل ریاضی غیر خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه، با اهداف به حداقل رساندن تعداد کل مرگ و میرهای مورد انتظار در میان جمعیت و به حداقل رساندن هزینه توزیع کل کمین واکسیناسیون با در نظر گرفتن عدم قطعیت در نرخ انتقال بیماری، نرخ مرگ و تعداد تماس و اختلال در موجودی و ظرفیت ارائه کرده اند. در ادامه آن ها برای مقابله با عدم قطعیت با استفاده از رویکرد بهینه سازی تصادفی استوار مبتنی بر سناریوی یک مدل استوار ارائه کردند که در مقابل پارامترهای غیر قطعی

کرده اند. مدل پیشنهاد شده توسط آن ها یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط تک هدفه، با هدف حداقل کردن هزینه های زنجیره تأمین است. زنجیره تأمین ارائه شده توسط آن ها دارای چهار سطح انبار ملی، انبار منطقه ای، مراکز توزیع و مرکز بهداشت است. تصمیمات مدل ارائه شده توسط آن ها شامل مقدار و وسیله حمل و نقل واکسن و مکان مناسب برای مراکز توزیع است. آن ها برای حل این مدل در مسائل بزرگ یک الگوریتم جداسازی و ادغام مبتنی بر نرم افزار MIP ارائه داده اند. در ادامه آن ها داده های به دست آمده از چهار کشور را برای تجزیه و تحلیل عملکرد الگوریتم استفاده کرده اند.

لین و همکاران [۱۲] تصمیمات تولید و خرید در زنجیره تأمین واکسن آنفولانزا را مورد مطالعه قرار داده اند. این تصمیمات متشکل از تولیدکننده ای است که با بازده تولید نامشخص و با تقاضای نامشخص مواجه است. آن ها تعامل بین عملکرد و عدم قطعیت تقاضا و تأثیر آن بر پوشش مؤثر واکسن و هزینه های عفونت اجتماعی را برجسته می کنند. آن ها یک مدل ریاضی جدید تک هدفه، با هدف حداکثر سازی تقاضای پوشش داده شده با در نظر گرفتن خطرات ناشی از عدم قطعیت در طرف عرضه و تقاضا، هزینه های عفونت اجتماعی علاوه بر هزینه های تهیه واکسن و دو فرصت سفارش با به روز رسانی اطلاعات تقاضا ایجاد کرده اند که تولیدکننده ممکن است بخشی از تحویل را به تعویق بیندازد و برنامه ریز اجتماعی ممکن است کمتر یا بیش از تقاضا سفارش دهد.

کامران و همکاران [۱۳] یک مدل بهینه سازی شبیه سازی چند هدفه برای واکسینه کردن دانشجویان، چند دوره ای و چند کالایی تصادفی برای تصمیم گیری های تولید، توزیع، مکان، تخصیص و کنترل موجودی واکسن کوید-۱۹ ارائه کرده اند. شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی آن ها شامل چهار سطح است که شامل تولیدکنندگان، بیمارستان ها، مراکز واکسیناسیون و دانشجویانی که داوطلب واکسن هستند، است. مدل ریاضی پیشنهاد شده یک مدل چند هدفه، با اهداف به حداقل رساندن هزینه های زنجیره تأمین، به حداکثر رساندن مطلوبیت دانشجویان برای واکسیناسیون، و به حداکثر رساندن عدالت در توزیع واکسن با در نظر گرفتن آموزش مجازی و اعمال قرنطینه در تخمین تعداد واکسن ها و رعایت فاصله گذاری اجتماعی و برنامه ریزی برای تزریق واکسن در ساعات های کاری و غیر کاری است. در مدل پیشنهاد شده یک ساختار پویا سیستمی از شیوع کوید-۱۹ در دانشگاه ها ایجاد شده است و تقاضای واکسن با استفاده از شبیه سازی برآورد شده است که در آن تقاضا به عنوان یک پارامتر تصادفی داده شده وارد مدل ریاضی می شود. تصمیمات مدل ارائه شده توسط آن ها شامل مقدار کمبود واکسن در هر دوره، مقدار واکسن حمل شده بین مراکز، مقدار تولید واکسن توسط هر تولیدکننده و مقدار موجودی واکسن در مراکز تولید و بیمارستان ها در دوره های متفاوت است.

جورجیادیس و همکاران [۱۴] یک چارچوب جدید برای پرداختن به برنامه ریزی بهینه زنجیره های تأمین واکسن کوید-۱۹ و برنامه ریزی بهینه واکسیناسیون روزانه در مراکز واکسیناسیون موجود ارائه

راه‌حلی برای زنجیره‌تأمین واکسن ارائه داده تا با توجه به نگرانی‌های دولت و سازمان‌های درگیر، موانع موجود در برنامه واکسیناسیون عمومی را برطرف کند ارائه کرده‌اند. مدل پیشنهادی بر دو سطح نگرانی تمرکز دارد. مدل دوسطحی ارائه شده دارای سطح بالا (رهبر) و سطح پایین (پیرو) هست. تصمیم رهبر (سطح بالا) به‌طور قابل‌توجهی بر واکنش‌های پیروان تأثیر می‌گذارد (سطح پایین). در سطح بالا، خطر مرگ‌ومیر ناشی از تأمین نابهنگام واکسن و خطر نابرابری در توزیع واکسن در نظر گرفته شده است. در سطح پایین کلیه هزینه‌های مربوط به زنجیره‌تأمین واکسن در نظر گرفته شده است که شامل تأمین واکسن، تخصیص مراکز کاندید برای تزریق واکسن، هزینه نگهداری و تزریق، هزینه حمل‌ونقل و هزینه جریمه ناشی از کمبود واکسن می‌شود. همچنین آن‌ها در مدل ارائه شده مواردی مانند هزینه نگهداری و تزریق واکسن، هزینه حمل‌ونقل واکسن، جریمه مربوط به کمبود واکسن و عدم قطعیت در تقاضا را در نظر گرفته‌اند. تصمیمات گرفته‌شده توسط این مدل شامل میزان واکسن حمل شده توسط هروسیله نقلیه در هر دوره و تعداد کمبود واکسن در هر دوره است.

جاهد و همکاران [۱۸] یک مسأله مکان‌یابی-تخصیص و موجودی-توزیع در شبکه زنجیره‌تأمین واکسن پایدار و مقاوم، با در نظر گرفتن رژیم‌های ترکیبی واکسن علیه کوید-۱۹ طراحی کرده‌اند. علاوه بر این، آن‌ها سه رکن پایداری، شامل حداقل‌سازی هزینه‌های شبکه توزیع، به‌حداکثر رساندن تعداد افراد شاغل، اثربخشی واکسیناسیون، و برآورده کردن تقاضا، به حداقل رساندن کل انتشار گازهای گلخانه‌ای برای اطمینان از پایداری اجتماعی توسعه داده‌اند. همچنین، بهینه‌سازی مبتنی بر سناریو برای مواجهه با اختلالات و شکست‌های اجتناب‌ناپذیر، مانند ظرفیت تأمین‌کنندگان و مقادیر نامشخص تقاضای واکسن، که به‌نوع واکسن تزریق شده قبلی بستگی دارد، ارائه کرده‌اند و برنامه‌ریزی تصادفی مقاوم برای مدیریت عدم قطعیت‌ها استفاده شده است. تصمیمات گرفته شده در این مدل شامل محل تأمین واکسن، ایجاد مراکز توزیع، نقطه‌ی سفارش مجدد، مقدار واکسن ذخیره، مقدار جریان واکسن و ... است. برای حل مدل پیشنهادی، الگوریتم‌های فراابتکاری کارآمد، از جمله الگوریتم ژنتیک و جستجوی محله متغیر استفاده کرده‌اند. در نهایت مدل ارائه شده را برای مطالعه‌ی موردی در ایران ارائه کرده‌اند تا دقت مدل آن‌ها تأیید شود.

شیری و همکاران [۱۹] در این مطالعه، یک مدل ریاضی جدید برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین واکسن کووید-۱۹ توسعه داده شده را ارائه کرده‌اند. در این راستا، یک مدل شبکه چندکاناله طراحی شده است تا هزینه کل را به‌حداقل برساند و شفافیت را با در نظر گرفتن فناوری بلاک‌چین به‌حداکثر برساند. این مدل عدم قطعیت در عرضه را مورد توجه قرار داده و یک روش برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای مبتنی بر سناریو برای مدیریت عدم قطعیت ذاتی در افق‌های برنامه‌ریزی چند دوره‌ای ارائه می‌کند. تخصیص واکسن براساس دو سیاست اصلی شامل اولویت‌بندی براساس سن و جمعیت انجام

مقاوم است. تصمیمات گرفته شده توسط مدل آن‌ها شامل مقدار سفارش واکسن در هر انبار و دوره، مقدار واکسن جابجا شده بین انبارها در هر دوره، موجودی واکسن در هر مرکز واکسیناسیون و تعداد افراد واکسینه نشده در هر دوره است. شبکه توزیع واکسن ارائه شده توسط آن‌ها شامل انبار ملی، انبار استانی، انبار شهری و مراکز واکسیناسیون است که امکان جابجایی واکسن بین انبارهای استانی وجود دارد. مدل ارائه شده توسط آن‌ها چهار محدودیت اصلی دارد که به‌صورت زیر است:

- (۱) محدودیت‌هایی برای نظارت بر موجودی انبارها
 - (۲) محدودیت‌هایی برای نظارت بر افراد واکسینه شده در هر دوره
 - (۳) محدودیت‌های ظرفیت و تعداد واکسن‌های هدررفته
 - (۴) محدودیت برای کنترل ازدحام افراد در مراکز واکسیناسیون.
 - (۵) مدل پیشنهاد شده در نهایت از طریق یک مطالعه موردی واقعی از کمپین واکسیناسیون کوید-۱۹ در فرانسه تأیید شده است.
- خدایی و همکاران [۱۷] یک مدل زنجیره‌تأمین سرمایه‌بشردوستانه را با در نظر گرفتن عدالت برای توزیع واکسن کووید-۱۹ در طول یک بیماری همه‌گیر، با در نظر گرفتن هزینه محرومیت و یک مفهوم اجتماعی مهم به‌نام برابری ارائه داده‌اند. مدل ریاضی پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تک‌هدفه، با هدف حداقل کردن هزینه‌ها شامل هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های کمبود، هزینه‌های محرومیت هزینه‌های نگهداری برای برآورده کردن اهداف تقاضا در طرح توزیع واکسن است. تصمیمات گرفته شده توسط مدل آن‌ها شامل مقدار واکسن منتقل شده بین مراکز در هر دوره و مقدار واکسن حمل شده با هر وسیله‌ی نقلیه در هر دوره است. آن‌ها مدل پیشنهادی را در داده‌های توزیع واقعی واکسن اعمال کرده‌اند و پیشنهاد یک طرح بهینه برای توزیع واکسن کووید-۱۹ در اروپا را ارائه داده‌اند.

لیم و همکاران [۸] یک رویکردی برای طراحی مجدد زنجیره توزیع واکسن ایجاد کرده‌اند. این رویکرد شامل مکان‌یابی مجموعه‌ای از مراکز توزیع میانی و تعیین مسیرهای جریان از فروشگاه مرکزی (جایی که واکسن‌ها در یک کشور دریافت می‌شوند) از طریق یک یا چند مورد از این‌ها به کلینیک‌های بهداشتی که در آن واکسیناسیون انجام می‌شود، ارائه کرده‌اند. آن‌ها برای طراحی مجدد این شبکه به‌صورت بهینه، یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط چندهدفه، با اهداف حداقل کردن هزینه و حداکثر پوشش را ارائه داده‌اند. علاوه بر این، در مدل ارائه شده وسایل حمل‌ونقل برای تخصیص به هر مسیر جریان و دستگاه‌های سردخانه برای استفاده در هر کلینیک یا مرکز توزیع میانی تعیین می‌شود. زنجیره‌تأمین ارائه شده توسط آن‌ها دارای چهار سطح انبار ملی، انبار منطقه‌ای، مراکز توزیع و مراکز تزریق واکسن است. تصمیمات گرفته شده در این مدل شامل مقدار واکسن منتقل شده بین انبارها و مراکز، مکان‌یابی انبارهای منطقه‌ای و تعداد سفرهای وسیله نقلیه است.

ولی‌زاده و همکاران [۷] یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی قوی که

تولیدکننده، امکان جابجایی بین انبارها (اینکه بین انبارها و مخازن واکسن امکان جابجایی واکسن وجود دارد یا خیر)، مراکز واکسیناسیون ثابت هستند یا مکان‌یابی می‌شوند و اولویت‌های مختلفی برای تقاضا وجود دارد یا نه با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم.

باتوجه به بررسی‌های انجام شده در جدول (۱) اکثر مطالعات قبلی به جز [۲]، [۵]، [۸]، [۱۴] و [۱۹، ۱۸] تقاضا را قطعی در نظر گرفته‌اند. همچنین اکثر مقالات مقالات به جز [۵]، [۳] و [۱۰] اولویت برای تقاضا در نظر نگرفته‌اند. همه‌ی مقالات به جز [۵] هدر رفتن واکسن در نظر نگرفته‌اند. هیچ مطالعه‌ای به جز [۱۱] امکان جابجایی بین انبارها و مکان‌یابی مراکز تزریق واکسن را در نظر نگرفته‌است. همه مقالات به جز [۴]، [۶]، [۸]، [۹]، [۱۳]، [۱۴] و [۱۸] یک تولیدکننده برای واکسن در نظر گرفته‌اند.

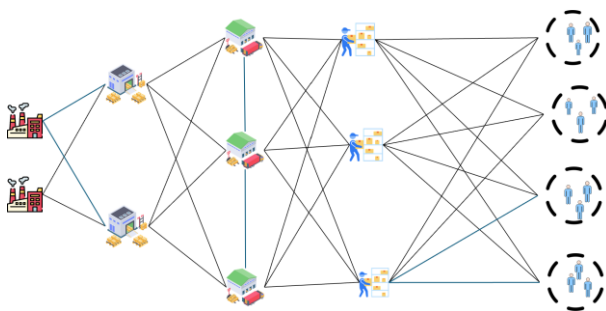
می‌شود. مدل و روش پیشنهادی با استفاده از یک مطالعه موردی واقعی از ایران اعتبارسنجی و آزمایش شده‌اند. طراحی بهینه زنجیره تأمین واکسن کووید-۱۹ تعیین شده و برخی تحلیل‌های حساسیت جامع بر روی مدل پیشنهادی انجام شده‌اند. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای به‌طور معناداری مقدار تابع هدف را در مقایسه با مدل رقیب کاهش می‌دهد. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که یکی از عوامل مؤثر در افزایش تقاضای برآورده شده و کاهش کمبود، قیمت هرنوع واکسن و توافق آن است. تصمیمات گرفته شده در این مدل شامل مقدار جابجایی واکسن بین مراکز و تقاضاهای برطرف نشده و انتخاب تأمین‌کننده برای برطرف کردن تقاضا است. مقایسه مقالات فوق در جدول شماره (۱) آمده است. در این جدول مقالات را از نظر تابع هدف، نوع تقاضا قطعی یا غیرقطعی بودن تعداد

جدول (۱). چکیده مقالات مرور ادبیات پژوهش

ردیف	نویسنده	سال	تابع هدف	تقاضا	امکان جابه جایی بین				مراکز	اولویت	تعداد	
					انبارها		انبار اولیه	انبار استانی				واکسیناسیون
					انبار	بله						
S/M												
نوع												
قطعی غیرقطعی												
بله خیر												
بله خیر												
ثابت مکان‌یابی												
دارد ندارد												
تک چندگانه												
۱	چن [۸]	۲۰۱۴	S	حداکثر دسترسی به واکسن	✓		✓	✓	✓		✓	
۲	یارمند [۹]	۲۰۱۴	S	حداقل کردن هزینه	✓		✓	✓	✓		✓	
۳	هوو [۱۰]	۲۰۱۵	S	حداقل کردن هزینه	✓		✓	✓	✓		✓	
۴	دویزر [۱۱]	۲۰۱۸	S	حداکثر کردن اثر واکسیناسیون	✓		✓	✓	✓		✓	
۵	سجادی [۴]	۲۰۱۹	S	حداقل کردن هزینه	✓		✓	✓	✓		✓	
۶	یانگ [۷]	۲۰۲۰	S	حداقل کردن هزینه	✓		✓	✓	✓		✓	
۷	لین [۱۲]	۲۰۲۰	S	حداکثر تقاضای بر طرف شده	✓		✓	✓	✓		✓	
۸	کامران [۱۳]	۲۰۲۱	M	حداقل کردن هزینه حداکثر تقاضای بر طرف شده	✓		✓	✓	✓		✓	
۹	جورجیادیس [۱۴]	۲۰۲۱	S	حداقل کردن هزینه	✓		✓	✓	✓		✓	
۱۰	علیزاده [۱۵]	۲۰۲۱	M	حداقل کردن هزینه حداکثر تقاضای بر طرف شده	✓		✓	✓	✓		✓	
۱۱	محمدی [۱۶]	۲۰۲۲	M	حداقل کردن هزینه حداقل کردن مرگ‌ومیر	✓		✓	✓	✓		✓	
۱۲	خدایی [۱۷]	۲۰۲۲	S	حداقل کردن هزینه	✓		✓	✓	✓		✓	
۱۳	لیم [۶]	۲۰۲۲	M	حداقل کردن هزینه حداکثر پوشش	✓		✓	✓	✓		✓	
۱۴	ولی‌زاده [۵]	۲۰۲۲	M	حداقل کردن هزینه حداقل کردن مرگ‌ومیر	✓		✓	✓	✓		✓	
۱۵	جاهد [۱۸]	۲۰۲۴	M	حداقل کردن هزینه، حداکثر کردن رضایت	✓		✓	✓	✓		✓	
۱۶	شیری [۱۹]	۲۰۲۴	S	حداقل کردن هزینه	✓		✓	✓	✓		✓	
۱۷	پژوهش حاضر	۲۰۲۵	S	حداقل کردن هزینه	✓		✓	✓	✓		✓	

تولیدکننده، انبار اولیه، انبار استانی، انبار منطقه‌ای و مراکز بهداشت است که در شکل (۱) شبکه زنجیره‌تأمین مورد بررسی نمایش داده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است امکان جابجایی بین انبارهای استانی هم وجود دارد، مراکز بهداشت مکان‌یابی و انبارهای استانی و انبارهای منطقه‌ای مکان‌یابی می‌شوند. برای امکان مکان‌یابی مراکز بهداشت ما تقاضاها را به‌صورت نقطه تقاضا تعریف می‌کنیم هر نقطه تقاضا دارای تقاضا با اولویت بالا و پایین است. هر مرکز بهداشت تعدادی نقطه تقاضا را تحت پوشش قرار می‌دهد و هر نقطه تقاضا فقط می‌تواند تحت پوشش یک مرکز بهداشت باشد. مراکز بهداشتی و درمانی مسئول برآورده کردن نیازهای مشتریان هستند تقاضاها در این شبکه دارای دو اولویت هستند که شامل تقاضاهای با اولویت بالا و پایین می‌باشند. ما این اولویت‌ها را در طراحی شبکه خود با استفاده از دو رویکرد متفاوت اعمال می‌کنیم:

- (۱) محدودیت‌های موجود در مدل به‌منظور حصول اطمینان از تحقق تقاضای مشتریان با اولویت بالا، زودتر از مشتریان با اولویت پایین
 - (۲) توجه بیشتر به نیازهای ضروری مشتریان در تابع هدف.
- مکان‌های تولیدکننده، انبارهای اولیه از پیش تعیین شده‌اند، با این وجود برخی مکان‌های بالقوه برای احداث مخازن استان‌ها و انبارهای محلی و مراکز بهداشت وجود دارند که مراکز احداث شده از طریق طراحی شبکه انتخاب می‌شوند. همچنین سطوح مختلف ظرفیت برای مخازن استان‌ها وجود دارد. ظرفیت بالاتر به معنای هزینه احداث بیشتر می‌باشد. ظرفیت مناسب برای هر مخزن استانی از طریق بهینه‌سازی مشخص می‌شود. میزان جریان بین هر دو مرکز متوالی، تصمیم دیگری است که در این تحقیق اتخاذ می‌شود. همچنین برای بروز بیماری سناریوهای خوش‌بینانه، محتمل و بدبینانه در نظر گرفته شده است. تقاضای برای واکسن با توجه به هر سناریو متفاوت خواهد بود در سناریوی خوش‌بینانه تقاضا برای واکسن کم در محتمل معمولی و در بدبینانه بیشترین تقاضا برای واکسن وجود دارد.



شکل (۱). شبکه زنجیره‌تأمین واکسن پژوهش حاضر

اهداف این پژوهش عبارتند از: (۱) ارائه یک مدل برای زنجیره‌تأمین واکسن با هدف حداقل کردن هزینه‌های زنجیره‌تأمین شامل: مجموع هزینه‌های احداث، هزینه‌های حمل‌ونقل واکسن و هزینه‌های جریمه عدم برآورد تقاضاها با اولویت بالا و پایین (۲) کاهش مقدار کمبود واکسن در نقاط تقاضا با فراهم کردن امکان حمل‌ونقل بین انبارها (۳)

براساس مطالعات انجام شده انجام شده و باتوجه به خلأهای تحقیقاتی موجود هیچ‌یک از مقالات بررسی شده در این قسمت همه پارامترهای مورد بررسی را به‌صورت همزمان دربرنمی‌گیرند. براساس مطالعه ادبیات انجام شده هیچ مقاله‌ای مدلی ارائه نداده که تقاضا غیرقطعی باشد و امکان جابجایی بین انبارها وجود داشته باشد و مکان‌یابی برای مراکز تزریق انجام شود اولویت‌های مختلف برای تقاضا در نظر گرفته شده باشد. در این پژوهش، ما مدل سجادی و همکاران [۵] را توسعه می‌دهیم و یک مدل با هدف حداقل کردن هزینه با تقاضای غیرقطعی و با امکان جابجایی بین انبارها و مکان‌یابی برای مراکز تزریق و با در نظر گرفتن اولویت تقاضا و تعدادی تولیدکننده ارائه می‌کنیم. ما در این مدل دو اولویت بالا و پایین برای تقاضا در نظر خواهیم گرفت. شبکه زنجیره‌تأمین طراحی شده شامل چند تولیدکننده، انبار اولیه، مخزن استان، انبار منطقه‌ای و کلینیک‌ها است. در این شبکه زنجیره‌تأمین تصمیمات به دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند: تصمیمات استراتژیک (تصمیمات بلندمدت مثل مکان‌یابی مخازن استان) و تصمیمات تاکتیکی (تصمیمات میان مدت مثل مقدار واکسن حمل شده).

این مطالعه در چهار بخش ارائه می‌گردد به‌گونه‌ای که در بخش اول مقدمه و بیان چالش اصلی مطالعه تبیین گردیده و با بررسی مطالعات به‌روز انجام شده در حوزه موضوع مطرح شده در مطالعه حاضر خلأ تحقیقاتی این مطالعه ارائه گردیده است. در ادامه در بخش دوم به ارائه مدل پیشنهادی پرداخته شده و پس از بیان مفروضات مدل، اندیس‌ها و پارامترها، توابع هدف ارائه گردیده‌اند و در آخر محدودیت‌های مدل بیان خواهد شد. در بخش چهارم نیز به بیان نتایج عددی به‌دست آمده از حل مدل با استفاده از نرم‌افزار گمز پرداخته خواهد شد

۳. مدل پیشنهادی

با توجه به کاربرد زنجیره‌تأمین واکسن، بررسی این‌گونه مسائل و مدل‌سازی آن‌ها در شرایط نزدیک به واقعیت می‌تواند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. به‌طور کلی تصمیم‌گیری‌ها در مورد طراحی شبکه جزء تصمیمات مهم و اساسی محسوب می‌شود.

در این قسمت باتوجه به ادبیات بررسی شده در قسمت قبل و بررسی شکاف‌های موجود در ادبیات به ارائه مدل می‌پردازیم. با توجه به مقالات بررسی شده مشاهده کردیم که مقاله‌ای در حوزه زنجیره‌تأمین واکسن به‌طور همزمان اولویت برای تزریق واکسن، امکان هدررفت برای واکسن، عدم قطعیت در تقاضا، امکان جابجایی بین انبارهای استانی و مکان‌یابی برای مراکز تزریق واکسن را به‌طور همزمان در نظر نگرفته است. در این پژوهش به بررسی و مدل‌سازی مسأله پرداخته خواهد شد و علاوه بر آن با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح در پی ارائه مدلی کارا تر خواهیم بود. در نهایت به حل مدل در نرم‌افزار گمز می‌پردازیم.

شبکه زنجیره‌تأمین واکسن مسأله مورد بررسی ما دارای

$k \in K$	
M	مجموعه‌ای از نقاط بالقوه برای احداث مراکز بهداشت $m \in M$
D	مجموعه‌ای از نقاط تقاضا $d \in D$
S	مجموعه‌ای از سناریوهای وقوع بیماری $s \in S$
N	مجموعه‌ای از سطوح ظرفیت $n \in N$
۲-۳. پارامترها	
β_j^n	واکسن‌های هدر رفته در مخزن استان j با ظرفیت n (درصد)
γ_k	واکسن‌های هدر رفته در انبار محلی k (درصد)
t_{bi}^{tt}	مدت زمان حمل واکسن از تولیدکننده b به انبار اصلی i
t_{ij}^{pp}	مدت زمان حمل واکسن از انبار اصلی i به مخزن استان j
t_{jk}^{pd}	مدت زمان حمل واکسن از مخزن استان j به انبار محلی k
t_{km}^{dh}	مدت زمان حمل واکسن از انبار محلی k به مرکز بهداشت m
t_{jj}^{cc}	مدت زمان حمل واکسن از مخزن استان j به مخزن استان j (j)
T^{cc}	حداکثر زمان مجاز برای تحویل واکسن از مخزن استان j به مخزن استان (j)
T^{tt}	حداکثر زمان مجاز برای تحویل واکسن از یک تولیدکننده به یک انبار اصلی
T^{pp}	حداکثر زمان مجاز برای تحویل واکسن از یک انبار اصلی به یک مخزن استانی
T^{pd}	حداکثر زمان مجاز برای تحویل واکسن از یک مخزن استانی به یک انبار محلی
T^{dh}	حداکثر زمان مجاز برای تحویل واکسن از یک انبار محلی به یک مرکز بهداشت
cap_{bs}	ظرفیت تولیدکننده b در سناریوی s
cap_j^n	ظرفیت مخزن استان j با سطح ظرفیت n
cap_i	ظرفیت انبار اصلی i
cap_k	ظرفیت انبار محلی k
cap_m	ظرفیت انبار محلی m
d_{ms}^H	تقاضای با اولویت بالای واکسن در مرکز بهداشت m تحت سناریوی s
d_{ms}^L	تقاضای با اولویت پایین واکسن در مرکز بهداشت m تحت سناریوی s
d_{Ds}^H	تقاضای با اولویت بالای واکسن در نقطه‌ی تقاضا D تحت سناریوی s
d_{Ds}^L	تقاضای با اولویت پایین واکسن در نقطه‌ی تقاضا D تحت سناریوی s
ρ_s	احتمال وقوع سناریوی s
p_j^n	هزینه ثابت احداث مخزن استان j با سطح ظرفیت n
q_k	هزینه ثابت احداث انبار محلی k
q_m	هزینه ثابت احداث مرکز بهداشتی m
δ_{dm}	فاصله‌ی نقطه تقاضای d از مرکز بهداشت m

پیدا کردن بهترین مکان و ظرفیت برای احداث و تجهیز انبار استانی، انبار منطقه‌ای و مراکز تزریق واکسن (۴) تعیین مقدار حمل و نقل بهینه واکسن از تولیدکننده به انبار اولیه، انبار استانی، انبار منطقه‌ای و مراکز تزریق واکسن (۵) کاهش مقدار تقاضای برطرف نشده.

مفروضات در نظر گرفته شده در مدل عبارت‌اند از:

(۱) تقاضا دارای دو اولویت بالا و پایین است به این صورت که تقاضا با اولویت بالا شامل گروه‌های حساس مثل خانم‌های باردار، کودکان و افراد سالمند هستند و تقاضا با اولویت پایین شامل بقیه گروه‌های جامعه می‌شود.

(۲) تقاضا غیرقطعی است به این صورت که برای تقاضا سه سناریو پیش‌بینی شده که شامل بدبینانه، محتمل و خوش‌بینانه است، می‌شود و احتمال وقوع هر سناریو متفاوت است. در سناریو بدبینانه تقاضا برای واکسن به بیشترین مقدار می‌رسد برای مثال هنگام کوید-۱۹ تقاضا برای واکسن به بیشترین مقدار رسیده بود. در سناریو خوش‌بینانه کمترین تقاضا برای واکسن وجود دارد و در سناریو محتمل شرایط عادی برای تقاضای واکسن وجود دارد.

(۳) مقداری واکسن در انبارها محلی و مخزن استان‌ها اتلاف می‌شود. (۴) هر انبار ظرفیت محدودی دارد که واکسن‌های وارد شده و خارج شده از آن نباید بیش‌تر از ظرفیت آن انبار باشند.

(۵) امکان فاسد شدن برای واکسن‌ها وجود دارد به این صورت که اگر حمل و نقل بین دو انبار از زمان مشخصی بیشتر باشد واکسن از بین می‌رود.

(۶) بیش از یک تولیدکننده برای تولید واکسن‌ها وجود دارد. این تولیدکننده‌ها می‌توانند شامل تولیدکننده یا واردکننده باشند.

(۷) امکان جابجایی واکسن بین مخازن استان‌ها وجود دارد

(۸) مکان‌یابی برای مراکز تزریق واکسن (مراکز بهداشت) انجام می‌شود (۹) هر نقطه تقاضا فقط و حتماً تحت پوشش یک مرکز بهداشت قرار می‌گیرد.

(۱۰) مکان‌یابی برای مخازن استان‌ها و انبار محلی انجام می‌شود.

(۱۱) ظرفیت تولیدکننده‌ها بستگی به تقاضا دارد. برای هر سناریوی تقاضا ظرفیت متفاوتی تعریف می‌شود.

تابع هدف که برای این مدل در نظر گرفته شده است عبارت‌اند از: به حداقل رساندن هزینه کل که شامل هزینه احداث مخازن استان و انبارهای محلی و مراکز بهداشت هزینه‌های حمل و نقل از یک مرحله به مرحله دیگر است، با در نظر گرفتن اولویت برای تقاضاها و هزینه تقاضای برطرف نشده می‌باشد.

در توابع هدف، از اندیس‌ها و پارامترهایی استفاده شده است که در ادامه به تعریف آن‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۱. مجموعه‌ها

B	مجموعه‌ای از تولیدکننده‌ها $b \in B$
I	مجموعه‌ای از انبارهای اصلی $i \in I$
J	مجموعه‌ای از مکان‌های بالقوه برای احداث مخازن استان‌ها $j \in J$
K	مجموعه‌ای از مکان‌های بالقوه برای احداث انبارهای محلی

از انبارهای اصلی به مخازن استان‌ها، هزینه‌های حمل واکسن از مخازن استان‌ها به انبارهای محلی، هزینه‌های حمل واکسن از انبارهای محلی به مراکز بهداشتی و هزینه‌های حمل واکسن بین مخازن استان و حداقل کردن هزینه‌های جریمه عدم برآورد تقاضاها با اولویت بالا و پایین که معادله مدل‌سازی ریاضی تابع هدف را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} \text{Min } OFV = & \sum_{j \in J} \sum_{n \in N} p_j^n w_j^n + \sum_{k \in K} q_k v_k \\ & + \sum_{m \in M} q_m Z_m \\ & + \sum_{s \in S} \rho_s \left[\sum_{i \in I} \sum_{b \in B} f_{bi} x_{bis} \right. \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} g_{ij} y_{ijs} \\ & + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} l_{jk} z_{jks} \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} e_{km} u_{kms} \\ & + \sum_j \sum_{j \neq j} L_{jjs} S_{jj} + \sum_{m \in M} \pi_m^H \delta_m^H \\ & \left. + \sum_{m \in M} \pi_m^L \delta_m^L \right] \end{aligned} \quad (1)$$

۳-۵. محدودیت‌ها

محدودیت‌های (۲) و (۳) بیان می‌کند که تقاضا با اولویت بالا در هر مرکز بهداشت اگر تأسیس شده باشد برابر با مجموع تقاضاها با اولویت بالا در نقاط تقاضای تحت پوشش آن مرکز بهداشت است و همین‌طور برای تقاضا با اولویت پایین بیان می‌کند که تقاضا با اولویت پایین در هر مرکز بهداشت اگر تأسیس شده باشد برابر با مجموع تقاضاها با اولویت پایین در نقاط تقاضای تحت پوشش آن مرکز بهداشت است.

$$d_{ms}^H = \sum_{d \in D} d_{ds}^H B_{ds} Z_m \quad \forall m, s \quad (2)$$

$$d_{ms}^L = \sum_{d \in D} d_{ds}^L B_{ds} Z_m \quad \forall m, s \quad (3)$$

محدودیت‌های (۴) و (۵) میزان تقاضاهای برآورده نشده با اولویت بالا و اولویت پایین در هر سناریو را تعیین می‌کنند. مشخص است که برطرف شدن تقاضاها با اولویت پایین به برطرف شدن تقاضاهای با اولویت بالا بستگی دارد، در هر مرکز خدمات بهداشت و سلامت ابتدا تلاش می‌شود تقاضاها با اولویت بالا را برطرف کنند و پس از برطرف کردن تقاضاها با اولویت بالا واکسن‌های باقی‌مانده را به تقاضاها با اولویت پایین اختصاص می‌دهند.

$$d_{ms}^H - \sum_{k \in K} u_{kms} \leq \delta_{ms}^H \quad \forall m, s \quad (4)$$

$$d_{ms}^L + d_{ms}^H - \sum_{k \in K} u_{kms} - \delta_{ms}^H \leq \delta_{ms}^L \quad \forall m, s \quad (5)$$

محدودیت (۶) نشان می‌دهد که مخزن استان j می‌تواند تنها در یک سطح ظرفیت n احداث شود.

$$\sum_{n \in N} w_j^n \leq 1 \quad \forall j \quad (6)$$

Δ_m شعاع پوشش مرکز بهداشت m
 B_{dm} اگر نقطه‌ای تقاضای d تحت پوشش مرکز بهداشت m باشد ۱ و در غیر این صورت صفر
 S_{jj} هزینه حمل و نقل هر واحد واکسن از مخزن استان j به مخزن استان j
 f_{bi} هزینه حمل به‌ازای هر واحد واکسن از تولیدکننده b به انبار اصلی i
 g_{ij} هزینه حمل به‌ازای هر واحد واکسن از انبار اصلی i به مخزن استان j
 l_{jk} هزینه حمل به‌ازای هر واحد واکسن از مخزن استان j به انبار محلی k
 e_{km} هزینه حمل به‌ازای هر واحد واکسن از انبار محلی k به مرکز بهداشت m
 π_m^H هزینه جریمه عدم برآوردن تقاضای با اولویت بالا در مرکز بهداشت m
 π_m^L هزینه جریمه عدم برآوردن تقاضای با اولویت پایین در مرکز بهداشت m

۳-۳. متغیرهای تصمیم‌گیری

متغیرهای تصمیم مرحله اول:

w_j^n اگر مخزن استان با سطح ظرفیت n در مکان j احداث شود، ۱؛ در غیر این صورت، ۰
 v_k اگر انبار محلی در مکان k احداث شود، ۱؛ در غیر این صورت، ۰
 Z_m اگر مرکز بهداشت در مکان m احداث شود، ۱؛ در غیر این صورت، ۰

متغیرهای تصمیم مرحله دوم:

x_{bis} میزان واکسن حمل شده از تولیدکننده b به انبار اصلی i تحت سناریوی s
 y_{ijs} میزان واکسن حمل شده از انبار اصلی i به مخزن استان j تحت سناریوی s
 z_{jks} میزان واکسن حمل شده از مخزن استان j به انبار محلی k تحت سناریوی s
 L_{jjs} میزان واکسن حمل شده از مخزن استان j به مخزن استان j تحت سناریوی s
 u_{kms} میزان واکسن حمل شده از انبار محلی k به مرکز بهداشت m تحت سناریوی s
 δ_{ms}^H میزان تقاضای برآورده نشده با اولویت بالا در مرکز بهداشت m تحت سناریوی s
 δ_{ms}^L میزان تقاضای برآورده نشده با اولویت پایین در مرکز بهداشت m تحت سناریوی s

۳-۴. تابع هدف

هدف ما (۱) طراحی شبکه زنجیره تأمین با حداقل کردن هزینه‌ها است که این هزینه‌ها شامل: هزینه‌های احداث مخازن استان‌ها، هزینه‌های احداث انبارهای محلی، هزینه‌های احداث مراکز بهداشت هزینه‌های حمل واکسن از تولیدکننده به انبارهای اصلی، هزینه‌های حمل واکسن

انبارهای اصلی به مخازن استان‌ها تحت هر سناریو نباید بیشتر از ظرفیت انبارهای اصلی باشد.

$$\sum_{j \in J} y_{ijs} \leq cap_i \quad \forall i, s \quad (16)$$

محدودیت (۱۷) نشان می‌دهد اگر مخزن استانی در مکان بالقوه احداث نشده باشد هیچ جریانی از واکسن‌ها وجود ندارد، و کل واکسن‌های منتقل شده از مخزن استانی به انبارهای محلی تحت هر سناریو از ظرفیت مخزن استان فعال شده بیشتر نمی‌باشد.

$$\sum_{k \in K} z_{jks} \leq \sum_{n \in N} cap_j^n w_j^n \quad \forall j, s \quad (17)$$

محدودیت (۱۸) نشان می‌دهد اگر انبار محلی در مکان بالقوه احداث نشده باشد هیچ جریانی از واکسن‌ها وجود ندارد، و کل واکسن‌های منتقل شده از انبار محلی به مراکز بهداشت و درمان تحت هر سناریو از ظرفیت انبار محلی فعال شده بیشتر نمی‌باشد.

$$\sum_{m \in M} u_{kms} \leq cap_k v_k \quad \forall k, s \quad (18)$$

محدودیت‌های (۱۹) تا (۲۳) تضمین می‌کنند اگر زمان حمل بین دو مرکز متوالی بیشتر از حداکثر زمان مجاز برای تحویل واکسن تحت هر سناریو باشد، هیچ جریان واکسنی بین دو مرکز وجود نخواهد داشت.

$$y_{ijs} = 0 \mid t_{ij}^{pp} > T^{pp} \quad \forall j, s, i \quad (19)$$

$$z_{jks} = 0 \mid t_{jk}^{pd} > T^{pd} \quad \forall j, s, k \quad (20)$$

$$u_{kms} = 0 \mid t_{km}^{dh} > T^{dh} \quad \forall k, s, m \quad (21)$$

$$x_{bis} = 0 \mid t_{bi}^{tt} > T^{tt} \quad \forall b, s, i \quad (22)$$

$$L_{jjs} = 0 \mid t_{jj}^{cc} > T^{cc} \quad \forall j, s, j \quad (23)$$

محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵) ماهیت متغیرهای مسئله را نشان می‌دهد.

$$x_{bis}, y_{ijs}, z_{jks}, u_{kms}, \delta_{ms}^H, \delta_{ms}^L, L_{jjs} \geq 0 \quad \forall i, j, k, m, s, b \quad (24)$$

$$w_j^n, v_k, Z_m, F_{jjs}, F_{jjs} \in [20] \quad \forall j, k, n \quad (25)$$

۴. نتایج عددی

در این بخش، به تحلیل مطالعه‌ی عددی از مسأله طراحی زنجیره تأمین واکسن پرداخته شده است و مدل ارائه شده ارزیابی می‌گردد. با استفاده از شش مثال عددی ارائه شده، در جدول (۵) به حل مدل در نرم‌افزار GAMS با ورژن ۲۴.۱.۲ و روش‌های حل سیمپلکس و زنجیره بلوکی رمز و برنامه‌نویسی ترکیبی غیرخطی حل شده و مقایسه شده است (جدول (۲)). از نتایج به دست آمده در جدول (۲) این مفهوم استنباط می‌شود که حل مدل به روش‌های متفاوت مقدار تابع هدف یکسان و زمان حل متفاوت است، در نتیجه ما روش حلی را برای مدل انتخاب می‌کنیم که زمان کمتری دارد. شبیه‌سازی‌ها بر روی یک سیستم با مشخصات سی پی یو ۱۶ هسته‌ای نسل ۱۳ با ۳۲ گیگابایت حافظه اجرا شده است. به منظور حل مدل از داده‌های جدول (۳) و (۴) استفاده شده است. سپس مدل را در دو اندازه‌ی کوچک و متوسط حل کردیم برای اطمینان و مثال‌های بیشتر داده‌های تصادفی متوسط را ۵ بار

محدودیت (۷) نشان می‌دهد هر نقطه تقاضا حتماً و فقط تحت پوشش یک مرکز بهداشت قرار می‌گیرد.

$$\sum_{m \in M} B_{dm} Z_m = 1 \quad \forall d \quad (7)$$

محدودیت (۸) نشان می‌دهد که میزان کل واکسن‌های حمل شده از انبار اصلی نباید بیشتر از میزان کل واکسن‌های موجود در هر سناریو باشد.

$$\sum_{j \in J} y_{ijs} \leq \sum_{b \in B} x_{bis} \quad \forall i, s \quad (8)$$

محدودیت‌های (۹) و (۱۰) ائتلاف واکسن‌ها در مخازن استانی و انبارهای محلی تحت هر سناریو را به ترتیب نشان می‌دهند.

$$\sum_{k \in K} z_{jks} \leq (1 - \beta_j^n) \left[\sum_{i \in I} y_{ijs} + \sum_{j \neq j} L_{jjs} \right] - \sum_{j \neq j} L_{jjs} \quad \forall j, n, s \quad (9)$$

$$\sum_{m \in M} u_{kms} \leq (1 - \gamma_k) \sum_{j \in J} z_{jks} \quad \forall k, s \quad (10)$$

محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند که واکسن‌های حمل شده از تولیدکننده به یک انبار اصلی نباید بیشتر از ظرفیت انبار اصلی باشد تحت هر سناریو باشد.

$$\sum_{b \in B} x_{bis} \leq cap_i \quad \forall i, s \quad (11)$$

محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که واکسن‌های حمل شده از هر تولیدکننده به تمام انبارهای اصلی نباید بیشتر از ظرفیت آن تولیدکننده تحت هر سناریو باشد.

$$\sum_{i \in I} x_{bis} \leq cap_{bs} \quad \forall b, s \quad (12)$$

محدودیت (۱۳) نشان می‌دهد اگر مخزن استانی در مکان بالقوه احداث نشده باشد هیچ جریانی از واکسن‌ها وجود ندارد، و کل واکسن‌های منتقل شده از انبار اصلی به مخزن استانی از ظرفیت مخزن استان فعال شده تحت هر سناریو بیشتر نمی‌باشد.

$$\sum_{i \in I} y_{ijs} + \sum_{j \neq j} L_{jjs} \leq \sum_{n \in N} cap_j^n w_j^n \quad \forall j, s \quad (13)$$

محدودیت (۱۴) اگر مرکز بهداشت در مکان بالقوه احداث نشده باشد هیچ جریانی از واکسن‌ها وجود ندارد، و کل واکسن‌های منتقل شده از انبار منطقه‌ای به مرکز بهداشت از ظرفیت مرکز بهداشت فعال شده تحت هر سناریو بیشتر نمی‌باشد.

$$\sum_{k \in K} u_{kms} \leq cap_m Z_m \quad \forall m, s \quad (14)$$

محدودیت (۱۵) نشان می‌دهد اگر انبار محلی در مکان بالقوه احداث نشده باشد هیچ جریانی از واکسن‌ها وجود ندارد، و کل واکسن‌های منتقل شده از مخازن استانی به انبارهای محلی فعال شده تحت هر سناریو از ظرفیت انبار محلی بیشتر نمی‌باشد.

$$\sum_{j \in J} z_{jks} \leq cap_k v_k \quad \forall k, s \quad (15)$$

محدودیت (۱۶) تضمین می‌کند کل واکسن‌های حمل شده از

افزایش هزینه ثابت احداث مخازن استان در شکل (۲) آمده است. همان‌طور که می‌بینیم با افزایش هزینه ثابت مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد.

جدول (۴). سایر داده‌های استفاده شده در مسأله

پارامتر	d_{DS}^H	d_{DS}^L
مقدار	$U(40,80)$	$U(70,120)$
	$U(75,110)$	$U(100,150)$
	$U(130,200)$	$U(150,250)$

جدول (۵). زمان حل و مقدار تابع هدف مدل برای دو مثال عددی

در نرم‌افزار گمز					
مثال	مثال	مثال	مثال	مثال	مثال
متوسط ۵	متوسط ۴	متوسط ۳	متوسط ۲	متوسط ۱	مثال کوچک
۲۳۶۷۴۷۸	۲۳۳۲۲۵۱	۲۳۱۶۶۷۰	۲۳۳۳۳۲۲	۲۳۴۲۸۲۲	۱۶۷۶۴۵
تابع هدف (هزینه)					
زمان حل					
۸.۶	۷.۸	۶.۰۵	۹.۹	۶.۹	۰.۰۸
در گمز (ثانیه)					

جدول (۶). مکان‌های احداث شده از میان مکان‌های بالقوه

مرکز بهداشت	انبار منطقه‌ای	مخازن استان
احداث شده	احداث شده	احداث شده
۳ از ۵	۳ از ۴	۲ از ۳
۲۴ از ۳۰	۸ از ۲۰	۶ از ۱۰
۲۴ از ۳۰	۹ از ۲۰	۶ از ۱۰
۲۴ از ۳۰	۹ از ۲۰	۶ از ۱۰
۲۴ از ۳۰	۹ از ۲۰	۶ از ۱۰
۲۴ از ۳۰	۸ از ۲۰	۶ از ۱۰

تولید کردیم و هربار مدل را با آن‌ها حل کردیم نتایج و زمان حل در جدول (۵) آمده است. داده‌های مثال‌های عددی با توجه به مقالات در ابعاد مختلف و به‌طور تصادفی تولید شده‌اند. به منظور مشخص شدن تأثیر پارامترهای مهم مثل تقاضا و ... آنالیز حساسیت بر روی این پارامترها انجام خواهد شد. بعد از حل مدل در دو اندازه کوچک و متوسط مخازن استان‌ها، انبار منطقه‌ای و مراکز بهداشت احداث شده در هر مثال در جدول (۶) آمده است.

جدول (۲). مقایسه‌ی روش‌های حل مدل در گمز

روش حل	نام اختصاری لاتین	مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)
سیمپلکس	CPLEX	۲۳۴۲۸۲۲	۶.۹
زنجیره بلوکی رمز	CBC	۲۳۴۲۸۲۲	۱۲۷.۱۴۳
و برنامه‌نویسی ترکیبی غیرخطی	BONMIN	۲۳۴۲۸۲۲	۱۲۷.۸۰۳

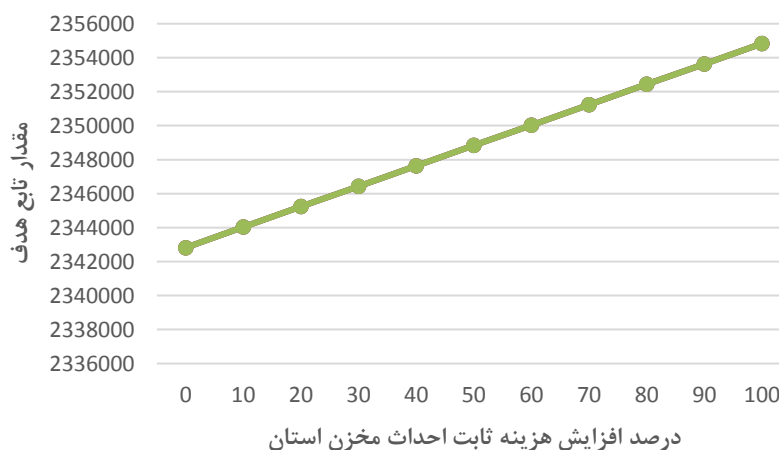
جدول (۳). تعدادی از مقادیر پارامترهای ورودی تحت تأثیر اندازه‌ی

مسأله

مجموعه‌ها	B	I	J	K	M	D	S	N
مسأله کوچک	۲	۲	۳	۴	۵	۹	۳	۳
مسأله‌های متوسط	۲	۴	۱۰	۲۰	۳۰	۷۰	۳	۳

۴-۱. تحلیل حساسیت

برای درک بهتر مدل و روابط بین پارامترها و تابع هدف آنالیز حساسیت روی پارامترهای مدل انجام می‌شود. آنالیز حساسیت به ما کمک می‌کند که متوجه شویم مدل درست کار می‌کند. ما در این پژوهش بر روی هر شش مثال عددی تحلیل حساسیت را انجام داده‌ایم و نتایج مشابهی داشت و یک مثال را برای تحلیل آسان‌تر، مثال متوسط اول را آورده‌ایم. اولین پارامتر برای آنالیز حساسیت هزینه احداث مخازن استانی و انبار محلی و مراکز بهداشت است که همان‌طور که انتظار داشتیم با افزایش هزینه احداث مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد. تأثیر



شکل (۲). نمودار تأثیر افزایش هزینه ثابت مخزن استان بر تابع هدف

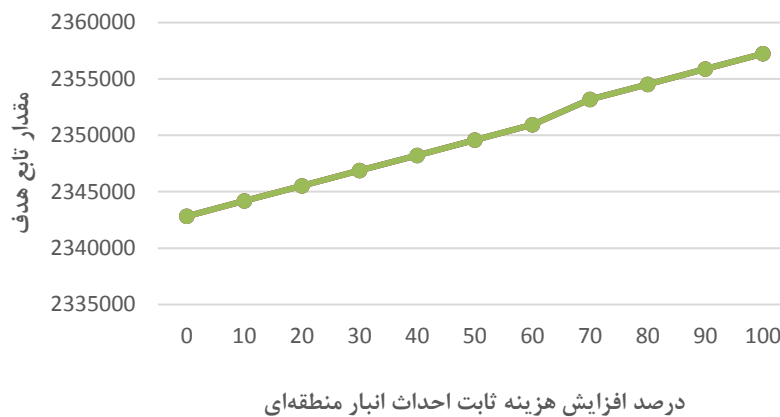
اولویت بالای برطرف نشده مراکز بهداشتی تحت سه سناریوی موجود را نشان می‌دهد. این نشان می‌دهد که با افزایش میزان ضایعات، میزان کل تقاضای اولویت بالای برطرف نشده افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش میزان ضایعات، واکسن‌های بیشتری در مخازن استان‌ها و انبارهای مناطق هدر می‌رود و در نتیجه میزان واکسن‌هایی که می‌توانند به سلامت به مراکز منتقل شوند کاهش خواهد یافت. بنابراین اگر میزان هدر رفتن واکسن را کاهش دهیم سبب کاهش تقاضای اولویت بالای برطرف نشده می‌شود.

شکل (۷) تأثیر نرخ هدررفت واکسن را بر میزان کل تقاضای اولویت پایین برطرف نشده مراکز بهداشتی تحت سه سناریوی موجود نشان می‌دهد. این نشان می‌دهد که با افزایش میزان ضایعات، میزان کل تقاضای اولویت پایین برطرف نشده افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش میزان ضایعات، واکسن‌های بیشتری در مخازن استان‌ها و انبارهای مناطق هدر می‌رود و در نتیجه میزان واکسن‌هایی که می‌توانند به سلامت به مراکز منتقل شوند کاهش خواهد یافت. بنابراین اگر میزان هدر رفتن واکسن را کاهش دهیم سبب کاهش تقاضای اولویت پایین برطرف نشده می‌شود. همان‌طور که در نمودار مشخص است بعد ۲۵ درصد افزایش نرخ هدر رفتن واکسن مقدار تقاضای اولویت پایین برطرف نشده ثابت می‌ماند این به دلیل این است همه‌ی تقاضای اولویت پایین برطرف نشده است و دیگر با افزایش درصد هدر رفتن واکسن مقدار آن ثابت می‌ماند و افزایش نمی‌یابد.

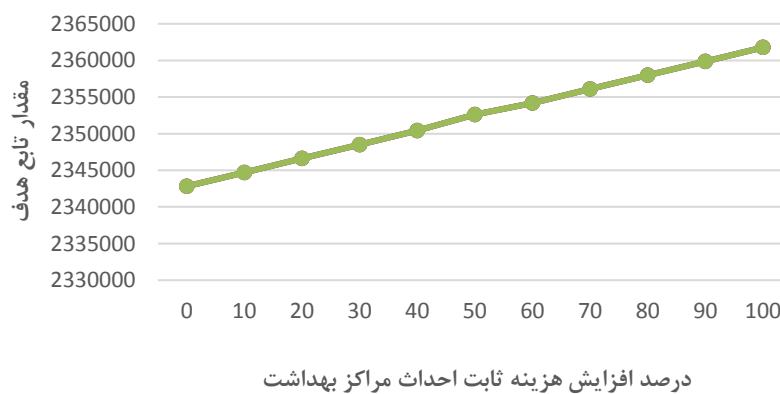
در قسمت بعد هزینه‌ی احداث انبار محلی و مراکز بهداشت را بالا برده‌ایم و مقدار تابع هدف را در هر بار بالا بردن هزینه بررسی کرده‌ایم و آن را در شکل (۳) و (۴) نشان داده‌ایم. با مشاهده شکل (۳) و (۴) خواهیم یافت که هرچه هزینه احداث انبارهای محلی و مراکز بهداشت افزایش یابد مقدار تابع هدف که کاهش هزینه‌های محتمل بر شبکه می‌باشد نیز افزایش می‌یابد. شکل (۳) و (۴) رابطه میان افزایش هزینه ثابت احداث انبارهای محلی و مرکز بهداشت و تأثیر آن بر تابع هدف را نمایش می‌دهد.

ما تأثیر نرخ هدر رفتن واکسن را بر تابع هدف بررسی کردیم. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، افزایش کمی در نرخ هدررفت واکسن منجر به افزایش قابل توجه هزینه کل زنجیره تأمین می‌شود. این جلوگیری از هدر رفتن مقداری واکسن می‌تواند برای کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین واکسن استفاده شود. روش‌های جلوگیری از هدر رفتن واکسن مثل اقدامات کم هزینه مانند نصب صحیح و نگهداری منظم تجهیزات زنجیره سرد، میزان هدر رفتن واکسن را کاهش می‌دهد. همچنین آموزش کارکنان انبارها باعث کاهش خطاهای انسانی مانند شکستگی و انجماد تصادفی واکسن‌های ذخیره شده می‌شود، این اقدامات هزینه زیادی ندارد و ممکن است میزان هدررفت واکسن و در نتیجه هزینه کل در زنجیره واکسن را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد.

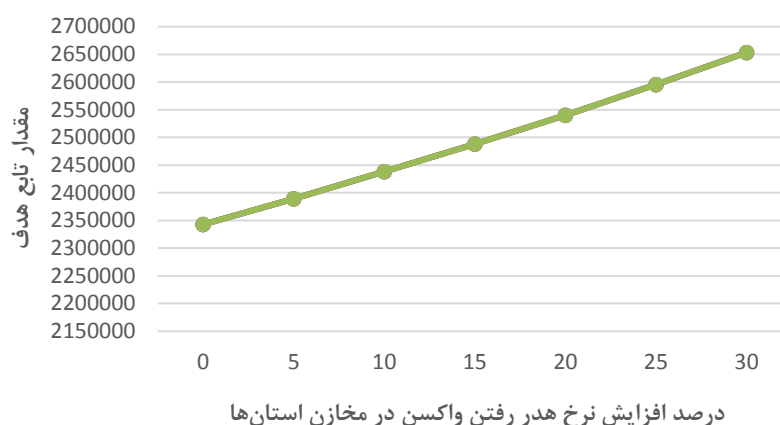
شکل (۶) تأثیر نرخ هدررفت واکسن را بر میزان کل تقاضای



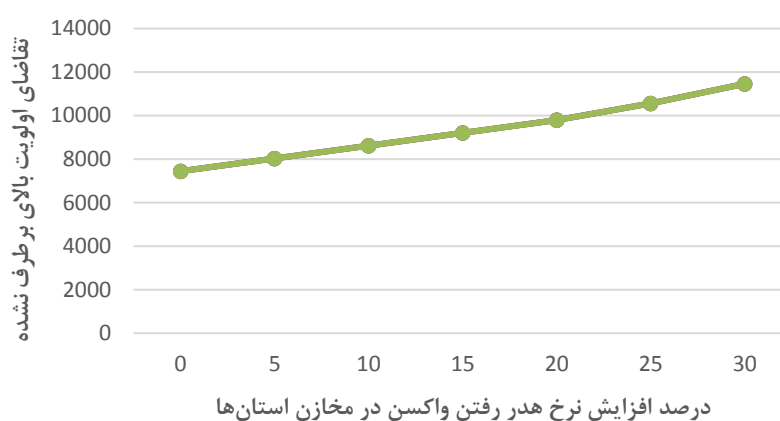
شکل (۳). نمودار تأثیر افزایش هزینه ثابت احداث انبار منطقه‌ای بر تابع هدف



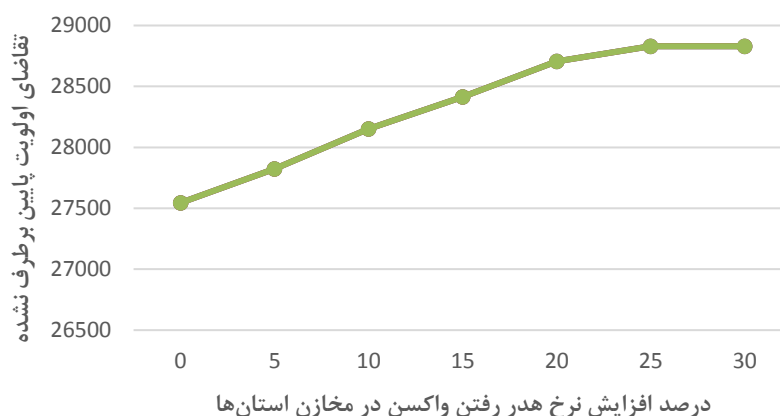
شکل (۴). نمودار تأثیر افزایش هزینه ثابت احداث مراکز بهداشت بر تابع هدف



شکل (۵). نمودار تأثیر افزایش نرخ هدر رفتن واکسن در مخازن استان‌ها بر روی مقدار تابع هدف



شکل (۶). نمودار تأثیر افزایش نرخ هدر رفتن واکسن در مخازن استان‌ها بر تقاضای اولویت بالای برطرف نشده



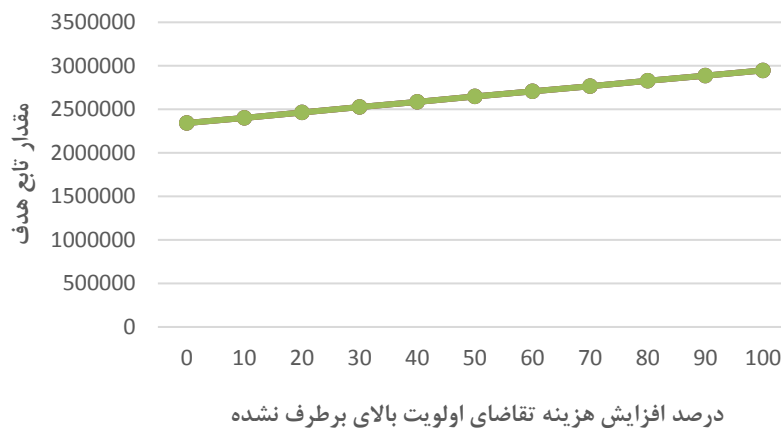
شکل (۷). نمودار تأثیر افزایش نرخ هدر رفتن واکسن در مخازن استان‌ها بر تقاضای اولویت پایین برطرف نشده

نشده مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد. اثر افزایش جریمه تقاضا برآورده نشده اولویت پایین در شکل (۹) نمایش داده شده است. همان‌طور که در نمودار شکل (۹) مشخص است با افزایش هزینه جریمه تقاضای اولویت پایین برطرف نشده مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد. نتایج محاسبات و مقایسه شکل (۹) و (۸) که در شکل (۱۰) آمده است

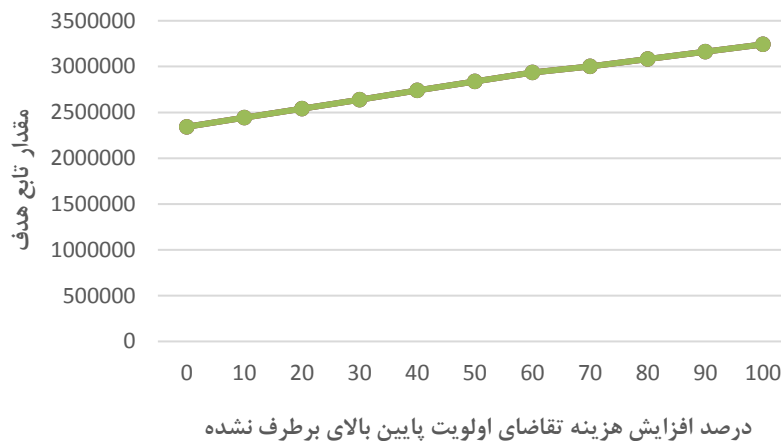
پارامتر دیگری که به نظر می‌رسد تأثیر زیادی بر طراحی زنجیره واکسن دارد با توجه به این زنجیره، جریمه‌های مرتبط با خواسته‌های برآورده نشده است. اثر افزایش جریمه تقاضا برآورده نشده اولویت بالا در شکل (۸) نمایش داده شده است. همان‌طور که در نمودار شکل (۸) مشخص است با افزایش هزینه جریمه تقاضای اولویت بالای برطرف

انجام شد. در آنالیز حساسیت متوجه شدیم تابع هدف مدل نسبت به هزینه احداث مخازن استان‌ها، هزینه احداث انبار محلی، هزینه مراکز بهداشت، درصد هدر رفتن واکسن و هزینه جریمه تقاضا برآورده نشده اولویت بالا و پایین حساس است. همچنین مشخص شده افزایش درصد هدر رفتن واکسن باعث افزایش تقاضای برآورده نشده اولویت بالا و پایین می‌شود. در نتیجه می‌توان با کاهش میزان هدر رفتن واکسن مقدار هزینه‌ها و تقاضای اولویت بالا و پایین برطرف نشده را به مقدار قابل توجهی کاهش داد.

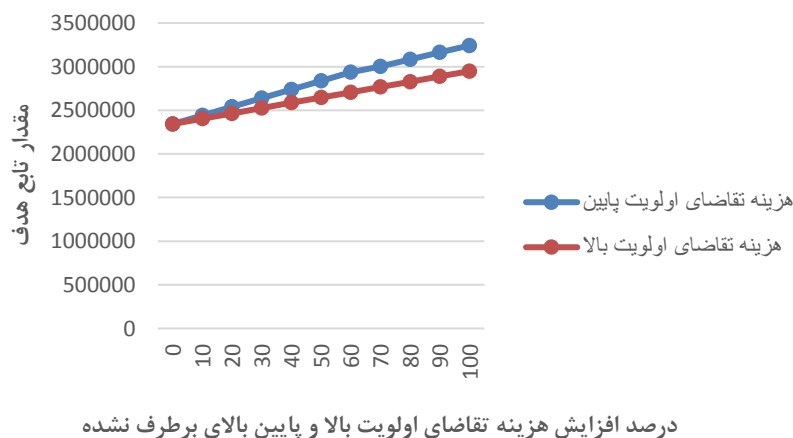
نشان می‌دهد که تابع هدف به هزینه جریمه تقاضای برآورده نشده با اولویت پایین نسبت به هزینه جریمه تقاضای برآورده نشده با اولویت بالا حساس‌تر است. این می‌تواند به این دلیل باشد مدل ابتدا تقاضا با اولویت بالا را برآورده می‌کند سپس بقیه واکسن‌های باقی‌مانده را به تقاضا با اولویت پایین اختصاص می‌دهد در نتیجه تقاضای اولویت پایین‌ها بیشتر دچار تقاضای برآورده نشده می‌شوند بنابراین افزایش هزینه تقاضای برطرف نشده اولویت پایین روی تابع هدف تأثیر بیشتری دارد. در این بخش آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مدل



شکل (۸). نمودار تأثیر افزایش هزینه تقاضای اولویت بالای برطرف نشده بر تابع هدف



شکل (۹). نمودار تأثیر افزایش هزینه تقاضای اولویت پایین برطرف نشده بر تابع هدف



شکل (۱۰). نمودار مقایسه افزایش هزینه تقاضای اولویت پایین و بالای برطرف نشده بر تابع هدف

۵. نتیجه‌گیری

مدیریت زنجیره‌تأمین واکسن در کشورهای در حال توسعه به اندازه تولید و برنامه‌های واکسن رشد نکرده است. مدیریت زنجیره‌تأمین با مشکلات جدی روبه‌رو است: سازمان جهانی بهداشت تخمین می‌زند که در برخی از کشورهای در حال توسعه، تقریباً ۵۰ درصد از کل دوزهای واکسن قبل از استفاده به دلیل ضعف در مدیریت زنجیره‌تأمین به هدر می‌رود [۲]. به همین دلیل با افزایش بهره‌وری در زنجیره‌تأمین واکسن و کاهش هزینه‌های زنجیره‌تأمین می‌تواند دسترسی به واکسن را برای افراد بیشتری فراهم کند. بعد از مطالعه در ادبیات زنجیره‌تأمین واکسن متوجه شدیم مقاله‌ای همزمان عدم قطعیت در تقاضا، فسادپذیری واکسن، مکان‌یابی مراکز تزریق، هدر رفتن واکسن، اولویت در تقاضای واکسن را همزمان در نظر نگرفته‌اند. ما در این پژوهش سعی کردیم مدلی ارائه دهیم که نزدیک به واقعیت باشد و این موارد را هم دربرگیرد. این پژوهش یک مدل زنجیره‌تأمین برای واکسن ارائه کرده است. در این مدل تصمیماتی شامل مقدار بهینه واکسن حمل شده بین انبارها و مکان احداث مخازن استان و انبار منطقه‌ای و مراکز بهداشت است. همان‌طور که در بخش دوم گفته شد پس از مطالعه ادبیات زنجیره‌تأمین واکسن مشخص شد که یک مدل کامل با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا، فسادپذیری واکسن، مکان‌یابی مراکز تزریق، هدر رفتن واکسن، اولویت در تقاضای واکسن و ظرفیت برای انبارها و تولیدکننده وجود ندارد. این پژوهش سعی کرده با در نظر گرفتن همه‌ی موارد بالا در یک مدل ریاضی گنجانده شود:

- ۱) تقاضا در هر نقطه تقاضا غیر قطعی است
- ۲) انبارها و تولیدکننده‌ها دارای ظرفیت هستند
- ۳) مکان‌یابی مراکز بهداشت، انبار محلی و مخازن استان‌ها
- ۴) در نظر گرفتن فسادپذیری واکسن‌ها
- ۵) در نظر گرفتن هدر رفتن واکسن در انبار منطقه‌ای و مخازن استانی
- ۶) امکان جابجایی واکسن بین مخازن استان‌ها
- ۷) در نظر گرفتن دو اولویت بالا و پایین برای تقاضاها

هدف این پژوهش ارائه یک مدل ریاضی برای زنجیره‌تأمین واکسن است که بتواند افراد بیشتر با هزینه کمتر واکسن دریافت کنند. برای این منظور، یک مدل ریاضی با هدف حداقل کردن هزینه‌ها جهت تعیین تصمیمات مختلف زنجیره‌تأمین شامل تعداد، مکان و ظرفیت تأسیسات شبکه و تخصیص جریان در مراکز مختلف زنجیره‌تأمین پرداخته می‌شود و رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای برخورد با عدم قطعیت به کار گرفته می‌شود. برای مقابله با عدم قطعیت در برنامه‌ریزی احتمالی دومرحله‌ای مبتنی بر سناریوی، سه سناریوی خوش‌بینانه و محتمل و بدبینانه را در نظر گرفته‌ایم.

مورد دیگر در نظر گرفته شده در مدل فسادپذیری واکسن‌ها است که در مدل به این صورت در نظر گرفته شده است که اگر زمان جابجایی واکسن بین دو نقطه بیشتر از زمان مشخص شده توسط کارشناس‌ها طول بکشد هیچ واکسنی بین آن دو نقطه جابجا نمی‌شود. مورد بعدی مکان‌یابی مراکز بهداشت است به این صورت که

هرنقطه کاندید برای احداث مرکز بهداشت تعدادی نقطه تقاضا را تحت پوشش قرار می‌دهد. مرکز بهداشت باید در نقاطی تأسیس شود که هرنقطه تقاضا فقط و حتماً تحت پوشش یک مرکز بهداشت باشد. همچنین برای تقاضاها در هر نقطه تقاضا دو اولویت بالا و پایین وجود دارد. به این صورت که با محدودیت‌های تعریف شده مدل اول تقاضا با اولویت بالا در هر مرکز بهداشت و سناریوی را برطرف می‌کند سپس باقی‌مانده‌ی واکسن‌ها را به تقاضا با اولویت پایین اختصاص می‌دهد. همچنین هزینه‌ی تقاضا با اولویت بالا برطرف نشده بیشتر از هزینه‌ی تقاضا با اولویت پایین برطرف نشده است.

باتوجه به اهداف تحقیق بزرگترین دستاورد این پژوهش ارائه یک مدل ریاضی برای زنجیره‌تأمین واکسن است. با استفاده از این مدل افراد تصمیم‌گیرنده در این حوزه می‌توانند هزینه‌های زنجیره‌تأمین واکسن و مقدار تقاضای برآورده نشده را کاهش بدهند که این باعث کاهش آسیب‌هایی می‌شود که بیماری می‌تواند به جامعه وارد کند. سعی شده مدل ارائه شده در این پژوهش نزدیک به واقعیت باشد. افراد می‌توانند با استفاده از این مدل مواردی مثل عدم قطعیت در تقاضا، اولویت بالا و پایین برای تقاضا، ظرفیت محدود برای تولیدکننده و انبارها، امکان جابجایی بین مخازن استان‌ها، مکان‌یابی مراکز بهداشت، فسادپذیری واکسن‌ها و ضایعات واکسن را در نظر بگیرند.

در این پژوهش مشخص شد که برای کاهش هزینه‌های زنجیره‌تأمین می‌توان هزینه‌های احداث مخازن استانی، انبار محلی و مراکز بهداشت را کاهش داد. همچنین مورد دیگری که مشخص شد بر روی تابع هدف و هزینه‌های کل زنجیره‌تأمین تأثیر می‌گذارد درصد هدر رفتن واکسن در مخازن استان است که باعث افزایش هزینه زنجیره‌تأمین می‌شود. همچنین افزایش هدر رفتن واکسن باعث افزایش تقاضای برآورده نشده اولویت بالا و پایین می‌شود. در ادامه مشخص شده هزینه برآورده نشدن تقاضا با اولویت بالا و پایین باعث تأثیر بر مقدار کل هزینه‌ها می‌شود.

این تأثیر به این صورت است که افزایش هزینه‌ی جریمه تقاضای برآورده نشده چه در اولویت بالا چه در اولویت پایین باعث افزایش مقدار تابع هدف در نتیجه باعث افزایش هزینه‌های زنجیره‌تأمین می‌شود. بنابراین مدیران و افراد تأثیرگذار می‌توانند برای کاهش هزینه‌های زنجیره‌تأمین اقداماتی مثل کاهش هزینه‌های احداث و کاهش مقدار هدر رفتن واکسن با راهکارهای آسان و کم‌هزینه مثل آموزش پرسنل و نگهداری بهتر واکسن انجام دهند.

در پایان می‌توان نتیجه گرفت این مقاله مدلی ارائه کرده است که باعث می‌شود مدیران و صاحب‌نظران در زنجیره‌تأمین واکسن بتوانند برای زنجیره‌تأمین واکسن از آن استفاده کنند.

۶. پیشنهادهای آینده

این تحقیق می‌تواند کامل‌تر از این شود. در طی تحقیقات انجام شده موضوعات بسیار و متفاوتی وجود داشت که ما به دلیل کمبود وقت، پیچیده شدن بیش از حد و هم‌جهت نبودن اهداف این مدل با این

- 233, no. 1, pp. 208-219. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.027>
- [10] S. Hovav and D. Tsadikovich, (2015). "A network flow model for inventory management and distribution of influenza vaccines through a healthcare supply chain," *Operations Research for Health Care*, vol. 5, pp. 49-62. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2015.05.003>
- [11] L. E. Duijzer, W. L. van Jaarsveld, J. Wallinga, and R. Dekker, (2018). "Dose-optimal vaccine allocation over multiple populations," *Production and Operations Management*, vol. 27, no. 1, pp. 143-159. <https://doi.org/10.1111/poms.12788>
- [12] Q. Lin, Q. Zhao, and B. Lev, (2022). "Influenza vaccine supply chain coordination under uncertain supply and demand," *European Journal of Operational Research*, vol. 297, no. 3, pp. 930-948. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.05.025>
- [13] M. A. Kamran, R. Kia, F. Goodarzian, and P. Ghasemi, (2023). "A new vaccine supply chain network under COVID-19 conditions considering system dynamic: Artificial intelligence algorithms," *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 85, p. 101378. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101378>
- [14] G. P. Georgiadis and M. C. Georgiadis, "Optimal planning of the COVID-19 vaccine supply chain," *Vaccine*, vol. 39, no. 37: 5302-5312, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2021.07.068>
- [15] M. Alizadeh, M. M. Paydar, S. M. Hosseini, and A. Makui, (2021). "Influenza vaccine supply chain network design during the COVID-19 pandemic considering dynamical demand," *Scientia Iranica*. [10.24200/sci.2021.58365.5694](https://doi.org/10.24200/sci.2021.58365.5694)
- [16] M. Mohammadi, M. Dehghan, A. Pirayesh, and A. Dolgui, (2022). "Bi-objective optimization of a stochastic resilient vaccine distribution network in the context of the COVID-19 pandemic," *Omega*, vol. 113, p. 102725. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102725>
- [17] V. Khodaei, V. Kayvanfar, and A. Haji, (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*, vol. 4, p. 100126. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100126>
- [18] A. Jahed, S. M. H. Molana, R. Tavakkoli-Moghaddam, and V. Valizadeh, (2024). "Designing an integrated sustainable-resilient mix-and-match vaccine supply chain network," *Annals of Operations Research*, pp. 1-50. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-06211-1>
- [19] M. Shiri, P. Fattahi, and F. Sogandi, (2024). "An integrated blockchain-enabled multi-channel vaccine supply chain network under hybrid uncertainties," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 22829. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67071-0>
- موارد، عملی نشدند. پیشنهادهای آینده این پژوهش برای تحقیقاتی آینده به شرح زیر است:
- (۱) در نظر گرفتن عدم قطعیت در هزینه‌های احداث
- (۲) در نظر گرفتن سایر هزینه‌ها مثل هزینه سفارش‌دهی و موجودی
- (۳) در نظر گرفتن عدم قطعیت در سایر پارامترها مثل درصد هدر رفتن واکسن
- (۴) در نظر گرفتن موجودی و دوره‌ی زمانی برای واکسن
- ### مراجع
- [1] R. G. Douglas and V. B. Samant, (2018). "The vaccine industry," *Plotkin's Vaccines*, p. 41. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35761-6.00004-3>
- [2] W. H. Organization, (2005). "Monitoring vaccine wastage at country level: guidelines for programme managers," World Health Organization., [WHO/V&B/03.18. Rev.1](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35761-6.00004-3)
- [3] L. E. Duijzer, W. Van Jaarsveld, and R. Dekker, (2018). "Literature review: The vaccine supply chain," *European Journal of Operational Research*, vol. 268, no. 1, pp. 174-192. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.015>
- [4] S. J. Sadjadi, Z. Ziaei, and M. S. Pishvaei, (2019). "The design of the vaccine supply network under uncertain condition: A robust mathematical programming approach," *Journal of Modelling in Management*. <https://doi.org/10.1108/JM2-07-2018-0093>
- [5] J. Valizadeh et al., (2023). "Designing an optimization model for the vaccine supply chain during the COVID-19 pandemic," *Expert Systems with Applications*, vol. 214, p. 119009. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119009>
- [6] J. Lim, B. A. Norman, and J. Rajgopal, (2022). "Redesign of vaccine distribution networks," *International Transactions in Operational Research*, vol. 29, no. 1, pp. 200-225. <https://doi.org/10.1111%2Fitor.12758>
- [7] Y. Yang, H. Bidkhori, and J. Rajgopal, (2021). "Optimizing vaccine distribution networks in low and middle-income countries," *Omega*, vol. 99, p. 102197. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102197>
- [8] S.-I. Chen, B. A. Norman, J. Rajgopal, T. M. Assi, B. Y. Lee, and S. T. Brown, (2014). "A planning model for the WHO-EPI vaccine distribution network in developing countries," *Iie Transactions*, vol. 46, no. 8, pp. 853-865. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2013.813094>
- [9] H. Yarmand, J. S. Ivy, B. Denton, and A. L. Lloyd, (2014). "Optimal two-phase vaccine allocation to geographically different regions under uncertainty," *European Journal of Operational Research*, vol.

Providing a Mathematical Model of the Vaccine Supply Chain with the Possibility of Transportation between Warehouses and the Location of Vaccination

Azizolah Jafari^{1*}, Mohadeseh Khosravi²

¹. Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran.

². MSc Student in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Technical and Engineering Sciences, University of Science and Culture, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received :2024/12/10

Revised: 2025/04/05

Accepted: 2025/05/04

Keywords:

Vaccine Supply Chain

Uncertainty

Supply Chain Network Design

Two-Stage Stochastic Planning

ABSTRACT

Nowadays, societies are striving to ensure immunity against diseases through vaccination, making vaccine supply a crucial aspect of human life. The goal of this research is to propose a mathematical model for the vaccine supply chain to enable more people to receive vaccines at a lower cost. To this end, a mathematical model is presented with the objective of minimizing costs to determine various supply chain decisions, including the number, location, and capacity of network facilities, as well as flow allocation across different centers in the supply chain. A two-stage stochastic programming approach is used to address uncertainty. The assumptions of this research include uncertainties in demand, vaccine vulnerability, waste storage, limited capacity, varying priorities for demand, shortage costs for unmet demand, the possibility of transfers between warehouses, and the location of vaccination centers. The output of the proposed mathematical model includes the location of depots, warehouses, and vaccination centers, the amount of unmet demand, and the volume of transportation between different components of the vaccine supply chain network. To validate the results obtained from the mathematical model, three solution methods available in GAMS were used, and a sensitivity analysis was performed on the key parameters of the problem.

* Corresponding author. A. Jafari
Tel.:021-46142365; E-mail: a.jafari@usc.ac.ir