

## طراحی زنجیره توزیع و تلقیح واکسن در شرایط پاندمی (مطالعه موردی واکسن کرونا)

احمد ماکوئی<sup>۱\*</sup>، مهدیه مهدیخانی<sup>۲</sup>

۱. استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲. کارشناسی ارشد بهینه‌سازی سیستم‌ها، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

### خلاصه

پژوهش حاضر یک مدل غیرخطی سه‌هدفه زنجیره توزیع و تلقیح واکسن با در نظر گرفتن مسأله مکان‌یابی-تخصیص، موجودی تحت عدم قطعیت تقاضا با یک سیستم صف شلوغ تحت شرایط پایداری ارائه می‌دهد. هدف حداقل‌سازی میانگین زمان انتظار واکسیناسیون، به حداقل رساندن هزینه‌های سفارش کلی، نگهداری، تأسیس مرکز تلقیح جدید و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از واکسیناسیون و تأسیس مرکز جدید است. با توجه به نوع مدل، از الگوریتم NSGA-II جهت حل استفاده گردید. نتایج تحلیل حساسیت در یک مثال کوچک عددی نشان داد، با افزایش میانگین زمان انتظار، هزینه‌های کل مسأله کاهش می‌یابد. همچنین تحلیل حساسیت مدل در نرخ‌های مختلف عدم قطعیت نشان داد، که افزایش نرخ عدم قطعیت، تعداد افراد نیازمند واکسن در شبکه را افزایش داده و به دلیل محدود بودن ظرفیت مراکز و همچنین ثابت بودن دیگر پارامترها، هزینه‌های متحمل بر شبکه افزایش می‌یابد. از سوی دیگر بیشتر شدن واکسن‌های سفارش داده شده و آماده توزیع، سبب افزایش میانگین زمان انتظار در مراکز توزیع، زباله‌های ناشی از آن‌ها و میزان انتشار گازهای مخرب زیست‌محیطی می‌گردد. با کاهش ظرفیت مراکز تلقیح به دلیل ثابت بودن مقدار سفارش واکسن، تعداد مراکز تلقیح بیشتری ایجاد شده که منجر به افزایش هزینه‌های ناشی از احداث و میزان حمل‌ونقل در شبکه، افزایش اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از احداث و حمل‌ونقل می‌گردد. این امر موجب کاهش نرخ ورودی به هر مرکز، طول صف و در نهایت میانگین زمان انتظار می‌گردد. در نهایت ۱۵ مثال عددی در ابعاد مختلف طراحی و کارایی الگوریتم پیشنهادی بررسی شده است.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۱/۱۲/۱۹

پذیرش ۱۴۰۲/۳/۲۷

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

مکان‌یابی-تخصیص

موجودی

زنجیره تأمین واکسن

طراحی زنجیره توزیع

صف M/M/m/C

نظریه صف

کرونا

### ۱. مقدمه

منتشر شده در طراحی انواع شبکه زنجیره تأمین، متأسفانه تنها سهم اندک و نچندان قابل توجهی از این تحقیقات مستقیماً متوجه بخش زنجیره توزیع و تلقیح واکسن هستند [۱]. مطابق با اساسنامه سازمان جهانی بهداشت، برخورداری از بالاترین حد استانداردهای قابل حصول سلامت، بدون در نظر گرفتن نژاد، مذهب، عقاید سیاسی و موقعیت اقتصادی و اجتماعی؛ حق مسلم هر انسانی است و سلامت عموم مردم برای دستیابی به صلح و امنیت امری ضروری است که به همکاری کامل افراد و دولت‌ها وابسته است. دولت‌ها در قبال سلامت مردم خود

حوزه بهداشت و سلامت جزء حوزه‌هایی تلقی می‌گردد که وجود یک سیستم کارا زنجیره تأمین در بخش‌های مختلف آن تا حد زیادی سلامت جامعه را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. از جمله مهم‌ترین بخش‌ها در این حوزه می‌توان به بخش زنجیره تأمین دارو، بخش زنجیره تأمین واکسن، بخش زنجیره تأمین خون و بخش زنجیره تأمین پیوند اشاره نمود که به‌طور مستقیم با سلامت جسمی و روانی افراد سروکار دارند. علی‌رغم وجود انبوه تحقیقات انجام شده و مقالات معتبر

\* نویسنده مسئول: احمد ماکوئی

تلفن: ۰۲۱-۷۳۲۲۵۰۰۴؛ پست الکترونیکی: [amakui@iust.ac.ir](mailto:amakui@iust.ac.ir)

برطبق [۹-۱۱]، مدیریت زنجیره تأمین را می‌توان ایجاد یکپارچگی و هماهنگی بین اجزاء زنجیره تأمین از قبیل تسهیلات، منابع، کالاها، تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان تلقی نمود که فعالیت آن‌ها در جهت تأمین تقاضای مشتریان به صورت مستقیم یا غیرمستقیم می‌باشد. زنجیره تأمین واکسن نیز شامل فرآیندهای پیچیده‌ای است (برای مثال تخصیص واکسن و توزیع واکسن) که نیاز به هماهنگی برای تحویل به موقع و توزیع واکسن دارد [۱۲]. تصمیمات اتخاذ شده در مدیریت زنجیره تأمین شامل سه دسته استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی هستند [۱۳] و [۱۴]. اولویت اصلی در دسته تصمیمات استراتژیک مشخص کردن تعداد و مکان قرارگیری تسهیلات و تخصیص مشتریان به مراکز توزیع در افق بلندمدت است تا به طور کلی طراحی شبکه زنجیره تأمین، حالت بهینه‌ای اتخاذ کند. دسته تاکتیکی مربوط به تولید و خرید، سیاست‌های مربوط به موجودی، نگهداری و استراتژی‌های حمل‌ونقل است. تصمیمات سطح عملیاتی نیز با توجه به کوتاه‌مدت بودن آن‌ها مربوط به زمان‌بندی، سهمیه‌بندی، مسیریابی و مسائلی مانند این‌ها است. در فرآیند تولید و توزیع اگر تصمیمات در هر سه سطح در نظر گرفته شوند بسیار مناسب‌تر است تا اینکه به صورت جداگانه به آن‌ها توجه شود [۱۳].

پژوهش حاضر شبکه‌ای برای زنجیره توزیع واکسن ارائه می‌دهد که هدف آن پاسخ مؤثر به تقاضا در شرایط اضطراری است (به عنوان مثال، پاندمی کووید-۱۹). هماهنگی زنجیره تأمین در چنین شرایطی چالش برانگیزتر از شرایط معمول است، زیرا سطح عدم قطعیت بالا است. این عدم قطعیت‌ها ناشی از عدم آشنایی با سناریوهای ناشی از بحران (به عنوان مثال، پاندمی کووید-۱۹) و پیامدهای غیرمنتظره آن مانند کمبود در تأمین، جنگ‌های تجاری و ... است. همچنین، تدارکات، حمل‌ونقل و توزیع در شرایط اضطراری نیاز به همکاری بین‌المللی زیادی بین بخش‌های دولتی و خصوصی جهت تسهیل برابری و دسترسی در واکسیناسیون دارد. علاوه بر این، میزان آسیب‌پذیری افراد در مبتلا شدن به بیماری کووید-۱۹ از میان گروه‌های سنی مختلف، چالش‌های جدی برای تضمین برابری در توزیع واکسن و همچنین مدیریت هزینه‌های خدمات (برای مثال، سفارش واکسن و هزینه‌های نگهداری) ایجاد کرده است [۵-۱۷].

مدل ریاضی سه‌هدفه و غیرخطی ارائه شده ضمن استفاده از مدل صف شلوغ، از مدل مکان‌یابی-موجودی جهت تخصیص بهینه واکسن‌ها و مکان‌یابی مراکز تلقیح جدید (موقت/دائم) با توجه به مسائل زیست‌محیطی، آلودگی‌های ناشی از واکسیناسیون و ایجاد مرکز تلقیح جدید استفاده نموده است و سه هدف (۱) به حداقل رساندن زمان انتظار واکسیناسیون، که اثربخشی و پاسخ‌گویی چنین زنجیره‌های توزیعی را افزایش خواهد داد، (۲) به حداقل رساندن هزینه تأسیس مرکز تلقیح جدید، سفارش کلی و هزینه نگهداری واکسن‌ها و (۳) کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از واکسیناسیون را دنبال می‌کند. تا به سوال چگونه می‌توان یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای بهینه‌سازی زنجیره توزیع و تلقیح واکسن در صنعت داروسازی با در نظر

مسئولیتی دارند که تنها با ارائه اقدامات بهداشتی و اجتماعی کافی قابل تحقق است [۲]. واکسیناسیون یک روش مؤثر برای جلوگیری از بیماری‌های عفونی است، که به وسیله آن از جمعیت آسیب‌پذیر حمایت می‌شود و موجب کاهش تعداد مبتلایان به بیماری‌های عفونی می‌گردد. روش‌های توزیع واکسن وابسته به هر کشور و تحت تأثیر سیاست‌های واکسیناسیون ملی آن کشور می‌باشد، واکسیناسیون همواره بخش اعظمی از هزینه‌های حوزه بهداشت را شامل می‌شود [۳].

در دو دهه آغازین از قرن ۲۱، جهان با اپیدمی‌های مختلفی از جمله سندروم‌های شدید تنفسی، زیکا، تب زرد، ابولا و در نهایت کرونا مواجه بوده است [۴]. این اپیدمی‌ها و از جمله ویروس کووید-۱۹ در سراسر جهان منجر به کاهش شدید فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی که موجب بیکاری و کاهش قابل توجه درآمد شده‌اند، می‌باشد [۵]. به دنبال آن بخش عظیمی از جمعیت دچار فقر شدید شدند و در تأمین غذا و دارو برای آن‌ها مشکلاتی ایجاد شد [۶]. اما تکامل همه‌گیری کووید-۱۹ ماهیت غیرقابل پیش‌بینی این ویروس را در برابر سایر ویروس‌ها نشان می‌دهد، جهان با انواع جدیدی که کانون بیماری را تغییر می‌دهند و کشورهایی که امواج متعدد عفونت و تأثیرات اقتصادی را تجربه می‌کنند، مواجه است. طبق گفته سازمان بهداشت جهانی دستیابی به پوشش واکسیناسیون بالا در همه کشورها تنها راه برای برهم زدن این بیماری همه‌گیر در سطح جهانی و پیروزی در رقابت با این ویروس است [۷]. تأثیر قابل توجهی که کووید-۱۹ بر سلامت و رفاه عموم افراد جامعه داشته است به علاوه تأثیر فلج‌کننده آن بر اقتصاد کشورها به این معنی است که واکسیناسیون کووید-۱۹ دو کارکرد حیاتی را انجام خواهد داد: اول آنکه مداخله بهداشتی ضروری منجر به کنترل و کاهش مرگ‌ومیر می‌شود، دوم آن که لوازم ضروری محرک اقتصادی را که دچار آسیب شده است به چرخه اقتصادی باز می‌گرداند (اجازه بازگشایی مجدد بنگاه‌های اقتصادی را می‌دهد) [۸].

در ایران برای جلوگیری از بحران اقتصادی، ناتوانی نظام سلامت در پاسخ‌گویی به بیماران، مسائل اجتماعی و روانی این بیماری، دولت و وزارت بهداشت تصمیم گرفتند از طریق رسانه‌ها برای مردم آگاهی‌هایی در خصوص بیماری و آموزش‌هایی پیرامون پیشگیری از ابتلا به آن انجام دهند. آن‌ها همچنین برخی از مراکز را تعطیل نمودند، ساعات کاری برخی از مراکز را کاهش دادند، در مکان‌های شلوغ از مواد ضدعفونی استفاده کردند، همچنین ورودی و خروجی شهرها را کنترل نمودند [۱]. اما با وجود محدودیت‌های اعمال شده در کشور همچنان ضررهای بسیاری از این همه‌گیری جامعه را درگیر نمود.

طبق گفته عالم و همکاران، یک واکسن دو فاز توسعه و تکمیل دارد تا مورد تأیید مقامات بهداشتی قرار گیرد. این در حالی است که بسیاری از شرکت‌ها قادر به سرعت بخشیدن به تولید و توزیع در شرایط دشوار نیستند. بنابراین، برای سیاست‌گذاران ضروری است تا درک کنند که چگونه سیستم‌های مراقبت بهداشتی فعلی باید برای پاسخ مؤثر به تقاضای بالای واکسیناسیون با عرضه محدود، ارتقا یابند [۱].

از فرآیند واکسیناسیون و همچنین آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از احداث مرکز جدید نیز دارد.

[۲۰] با ارائه یک مسأله برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی به طراحی شبکه زنجیره‌تأمین ترکیبی روبه جلو/معکوس به صورت یکپارچه به منظور جلوگیری از زیربهبندی ناشی از طراحی جداگانه فرآیندهای روبه جلو/معکوس که محصول مصرف شده بعد از جمع‌آوری به مراکز انهدام و بازیافت منتقل می‌شود و پس از بازیافت در بازارهای زبردستی به فروش می‌رود، پرداخته‌اند. [۲۱] با رویکرد برنامه‌ریزی ظرفیت جهت طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین انعطاف‌پذیر برای واکسن آنفولانزا در برابر پایداری تحت شرایط عدم‌اطمینان یک مدل ریاضی چندهدفه ارائه داده و برای مقابله با عدم قطعیت‌ها از یک روش بهینه‌سازی فازی قوی استفاده شده است.

در فرآیند واکسیناسیون توجه به گروه‌های مختلف سنی، اولویت بالایی و پایینی اقشار مختلف جامعه علی‌الخصوص در شرایط بحران جزء مهم‌ترین سیاست‌های هر سازمان بهداشت و هر دولتی است. در این خصوص دو پژوهش [۱۸]، [۲۲] نیز به توزیع عادلانه واکسن توجه نمودند.

توجه به زمان استفاده از واکسن‌ها و اقلام دارویی، نحوه حمل و نگهداری آن‌ها قابل چشم‌پوشی نیست. بنابراین [۲۳] با تجزیه و تحلیل پیچیدگی حمل و نقل زنجیره سرد، [۲۴] ضمن ادغام مشکلات مکان‌یابی و حمل و نقل، به اجرای کنترل موجودی هماهنگ در شبکه توجه دارند. همچنین [۲۵] به یک مسأله جدید مسیریابی دوهدفه وسیله نقلیه برای توزیع واکسن در مناطق مختلف برای کنترل شیوع بیماری‌های واگیر پس از یک فاجعه طبیعی می‌پردازد.

[۲۶] با ارائه یک مدل مکان‌یابی تسهیلات متراکم چندلایه (MLCFLP) که شامل یک سیستم صف کلاسیک یا جوکی است و به مشتریان اجازه می‌دهد تا از سایر لایه‌های شبکه خدمات دریافت کنند، قصد داشتند تا دو تابع هدف مجموع زمان انتظار و سفر و حداکثر احتمال بیکاری تسهیلات را کمینه‌سازی کنند، برای حل مدل از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب ۲ و رویکرد تاگوچی برای کالیبره کردن پارامترهای الگوریتم استفاده کردند.

[۲۷] ضمن ارائه یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط روشی را برای طراحی مجدد زنجیره توزیع واکسن پیشنهاد می‌کند که شامل مکان‌یابی مجموعه‌ای از مراکز توزیع متوسط و تعیین مسیرهای جریان از فروشگاه مرکزی (که در آن واکسن یک کشور دریافت می‌شود) از طریق یک یا چند مورد از این مراکز به کلینیک‌های بهداشتی که در آن واکسیناسیون واقعاً رخ می‌دهد، می‌پردازد. علاوه بر این، وسایل نقلیه حمل و نقل برای تخصیص به هر مسیر جریان و دستگاه‌های ذخیره‌سازی سرد برای استفاده در هر درمانگاه یا مرکز توزیع میانی تعیین می‌شوند. همچنین یک روش ابتکاری هم برای به‌دست آوردن راه‌حل‌های خوب برای مسائل بزرگ‌تر ارائه می‌دهد.

[۲۸] به طراحی شبکه توزیع واکسن پرداخته و به‌طور خاص، مسأله طراحی شبکه را به‌عنوان یک برنامه ترکیبی عدد صحیح (MIP)

گرفتن مسأله مکان‌یابی-تخصیص، موجودی تحت عدم قطعیت تقاضا توسعه داد؟ پاسخ مناسب دهد.

ساختار مقاله بدین ترتیب می‌باشد. در بخش دوم به بررسی مرور ادبیات تحقیق و تعیین شکاف تحقیقاتی پرداخته شده است. در بخش سوم ابتدا یک مدل غیر قطعی از شبکه توزیع و تلقیح واکسن ارائه و سپس با استفاده از روش برنامه‌ریزی فازی به کنترل پارامتر غیر قطعی تقاضا پرداخته شده است. در بخش چهارم روش حل مدل ریاضی و رویکرد تاگوچی برای کالیبره کردن پارامترهای الگوریتم توضیح داده شده است. در بخش پنجم نتایج مثال عددی مورد بررسی قرار گرفته و ۱۵ مثال عددی در سایزهای بزرگ طراحی و کارایی الگوریتم پیشنهادی بررسی شده است. در بخش ششم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها آتی تحقیق پرداخته شده است.

## ۲. مرور ادبیات

در ادامه به بررسی مطالعات موجود در حوزه زنجیره‌تأمین واکسن و شبکه توزیع آن پرداخته شده است.

برنامه واکسیناسیون عمومی با توجه به نگرانی‌های دولت و سازمان‌های درگیر از اهمیت بسیاری برخوردار است. [۲] راه‌حلی برای زنجیره عرضه واکسن و رفع موانع آن در برنامه واکسیناسیون عمومی ارائه داده و به این منظور، یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی استوار پیشنهاد و کلیه هزینه‌های مربوط به واکسن از جمله عرضه واکسن، تخصیص مراکز نامزد برای تزریق واکسن، هزینه نگهداری و تزریق، هزینه حمل و نقل و هزینه ناشی از کمبود واکسن، علاوه بر این‌ها عدم قطعیت تقاضا برای واکسن با سناریوهای متعدد در سطوح مختلف تقاضا در نظر گرفته است.

اما لزوم اهمیت به واکسیناسیون همگانی خصوصاً در شرایط بحران تا حدی اهمیت توجه به هزینه‌ها را کاهش می‌دهد به‌عنوان مثال [۱۸] ضمن ارائه یک مدل صف چنددوره‌ای برای زنجیره‌تأمین واکسن با در نظرگیری سطوح مختلف آسیب‌پذیری افراد جامعه در استرالیا یک تابع سودمند برای صف تعریف کرده تا تغییرات نرخ ورود مربوط به سطح موجودی واکسن‌ها، کارایی واکسن‌ها، و ضریب ریسک‌گریزی برای واکسن‌ها را بررسی کند.

همچنین عدم توجه به پسماندهای عفونی در شرایط پاندمی و انهدام آن‌ها مشکلی است که خود سبب انتشار بیماری‌های مختلف در کشورها می‌گردد. [۱۹] با اشاره به افزایش پسماندهای ناشی از واکسیناسیون و اهمیت برنامه مدیریتی مناسب در معدوم‌سازی یا بازیافت آن‌ها، یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط با هدف حداقل‌سازی هزینه کل سیستم و همچنین انتشار کربن و با در نظر گرفتن عدم قطعیت در نرخ گرایش به واکسیناسیون ارائه داده است. لازم به ذکر است آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از اجرای طرح واکسیناسیون همگانی در شرایط پاندمی صرفاً مربوط به واکسن‌ها و پسماندهای مربوط به آن نیست و مدل پژوهش حاضر با توجه به تأسیس مراکز تلقیح جدید سعی در کنترل و کاهش پسماندهای ناشی

[۳۲] با توجه به این که مسأله یافتن ترکیب بهینه استراتژی‌های واکسیناسیون، با توجه به کاهش هزینه برنامه، افزایش کارایی واکسیناسیون و بهبود مزایای اجتماعی، از اهمیت نظری و عملی زیادی برخوردار است. یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند معیاری را برای حل مسأله، تحلیل مدل و استخراج ویژگی‌های ساختاری راه‌حل بهینه ارائه دادند و متوجه شدند یک استراتژی یکپارچه شامل واکسیناسیون گسترده در مراحل اولیه بدون تبعیض با واکسیناسیون هدفمند در مراحل پایانی، بهتر از استراتژی‌های دیگر در هزینه و اثربخشی است. کی داساکلیس و همکاران در مقاله خود موردی که در آن یک حمله عمدی آبله در مقیاس بزرگ رخ می‌دهد را در نظر گرفته و با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای توزیع بهینه تجهیزات یک انبار واکسن از پیش تعیین شده و همچنین با شبیه سازی یک مثال عددی نزدیک به واقعیت روشی را جهت توزیع انواع کالا در شرایط بحران پیشنهاد می‌دهد [۳۳].

در برخی از مطالعات [۲۰]، [۲۲]، [۲۷]، [۲۸] و [۳۴] با وجود استفاده از مدل‌های مکان‌یابی مراکز توزیع واکسن اشاره‌ای به مکان‌یابی مراکز تلفیح دائم یا موقت واکسن نشده است، مطالعه حاضر درصدد به‌کار بردن مدل‌های مکان‌یابی برای مراکز تلفیح دائم یا موقت در کنار مراکز توزیع واکسن می‌باشد و جزء معدود مطالعات در این زمینه به‌شمار می‌رود. همچنین در بررسی ماهیت برخی پارامترهای مسأله مانند تقاضا اکثر مطالعات [۱]، [۲۲]، [۲۳]، [۳۵] - [۳۹]، [۳۲]، [۳۷]، آن‌ها را قطعی فرض نمودند که با دنیای واقعی تطابق ندارد، غیر قطعی در نظر گرفتن برخی پارامترها مانند تقاضا در سایر پژوهش‌ها [۲۰]، [۲۷]، [۳۴]، [۲۵] و [۴۰] سبب تطبیق‌پذیری بیشتر مدل با دنیای واقعی می‌شود. پژوهش حاضر با در نظرگیری عدم قطعیت فازی تقاضا سعی دارد این تطبیق‌پذیری بیشتر از قبل شده و مدل کامل‌تری ارائه دهد.

عدم توجه به انهدام یا بازیافت برخی زباله‌های عفونی در اکثر مدل‌های بررسی شده، سبب شد مطالعه حاضر به مسأله زباله‌های تولید شده در فرآیند واکسیناسیون و مسائل زیست‌محیطی پس از آن مانند دو پژوهش [۲] و [۸] توجه نشان دهد.

ممکن است در هر مرکز تلفیح مجموعه‌ای از خدمت‌دهنده‌ها که وظیفه واکسیناسیون را برعهده دارند از تعداد افراد متقاضی واکسن کمتر بوده و این یعنی در هر مرکز امکان تشکیل صف برای هر خدمت‌دهنده با توجه به نرخ خدمت‌دهی و نرخ ورودی، وجود دارد. از این رو ضرورت به‌کارگیری سیستم صف در برخی پژوهش‌ها مانند [۲۶] و [۱۸] مدل را کاراتر نموده و برای حل مدل با توجه به NP-Hard بودن این دسته از مسائل از الگوریتم‌های فراابتکاری مانند پژوهش‌های [۲۷]، [۲۶]، [۱۸]، [۳۱]، [۲۴] استفاده گردیده است، مطالعه حاضر نیز با توجه به ماهیت مدل درصدد به‌کار بردن سیستم صف در مراکز تلفیح و همچنین استفاده از الگوریتم فراابتکاری برای حل مسأله است. بر این اساس هدف اصلی پژوهش طراحی زنجیره توزیع و تلفیح واکسن کووید-۱۹ در شرایط پاندمی است.

فرموله کرده و یک الگوریتم جدید برای مشکلات معمولی که خیلی بزرگ هستند، ارائه دادند. سپس از داده‌های حاصل از چهار کشور برای تجزیه و تحلیل عملکرد الگوریتم استفاده شد و نتایج نشان داد که می‌توان از طراحی مجدد شبکه توزیع صرفه‌جویی قابل توجهی به‌عمل آورد. [۱۲] به اهمیت تشخیص زودهنگام، جداسازی و درمان افراد آلوده به بیماری کووید-۱۹ و محدودیت دسترسی به کیت‌های تشخیص در کشور فیلیپین اشاره کرده‌اند و با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی جهت تعیین درصد تخصیص بهینه کیت‌های تشخیص در بین مراکز آزمایش معتبر در کشور فیلیپین، محدوده تخصیص بهینه را مشخص کردند. مدل ارائه شده جمعیت آلوده، میزان تولیدمثل بیماری، توزیع افراد آلوده و محدودیت‌های آزمایشی هر مرکز را در نظر گرفته است.

[۲۹] یک مدل زنجیره‌تأمین چندسطحی برای واکسن آنفولانزا ارائه داده و سه هدف به حداقل رساندن هزینه‌ها، حداکثر کردن تخصیص تقاضا براساس اولویت‌بندی مشتری و به حداقل رساندن حداکثر تقاضای از دست‌رفته مشتری با توجه به محدود بودن تعداد واکسن‌ها، نرخ که نشان‌دهنده اولویت هر گروه از مشتریان برای دریافت واکسن در مدل پیشنهادی است را دنبال می‌کند. برای ارزیابی مدل، مطالعه موردی در استان مازندران، ایران انجام شده است. [۳۰] با هدف تضمین سطح بالای خدمات با حداقل هزینه به نگرانی‌های زیست‌محیطی و اجتماعی نیز توجه کردند و یک مدل چندهدفه و چنددوره‌ای برای برنامه‌ریزی همزمان اقتصادی، زیست‌محیطی و واکسیناسیون پیشنهاد کردند.

[۳۱] یک مدل برنامه‌ریزی چندسطحی با حداکثر پوشش مورد انتظار در شرایط عدم قطعیت به‌منظور طراحی زنجیره‌تأمین دارویی یکپارچه با دو هدف کمینه کردن هزینه کل و افزایش پوشش تقاضا ارائه داده و برای مقابله با عدم قطعیت از رویکرد برنامه‌ریزی فازی بهره برده است. در حل مدل پیشنهادی از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب ۲ (NSGA-II) در تولید جبهه پارتویی استفاده و در انتها صحت مدل با یک مطالعه موردی سنجیده شده است.

[۴۲] در تلاش است تا با افزایش قابلیت اطمینان، هزینه‌های بلندمدت زنجیره‌تأمین کاهش و سطح سرویس‌دهی بالا رود. همچنین بخاطر نوع مدل پیشنهاد شده و غیرخطی و عدد صحیح بودن آن و به‌دلیل پیچیدگی مسأله در ابعاد بزرگ و اثبات NP-Hard بودن آن، به‌منظور حل از الگوریتم فراابتکاری توسعه داده شده ژنتیک استفاده شده است.

[۴۱] با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با توجه به فسادپذیری محصولات به طراحی یک زنجیره‌تأمین سبز پرداخته است. برای حل در ابعاد بزرگ الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط، شبیه‌سازی تبرید چندهدفه و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه استفاده شده است. همچنین به‌منظور دستیابی به بهترین و دقیق‌ترین جواب‌ها در الگوریتم‌های فراابتکاری، پارامترها با کمک طراحی آزمایش تاگوچی، تنظیم شدند.

### ۳. تعریف مسأله و مدل سازی

برعهده دارند. همچنین این که در هر مرکز امکان تشکیل صف برای هر خدمت‌دهنده با توجه به نرخ خدمت‌دهی و نرخ ورودی، وجود دارد. از این رو یکی از اهداف مسأله کمینه‌سازی میانگین زمان انتظار در مراکز تلفیح است. از سوی دیگر بعد از انجام فرآیند واکسیناسیون، زباله‌های ناشی از آن توسط مرکز جمع‌آوری، جمع‌آوری شده و پس از بازرسی، بخشی از آن‌ها که قابل بازیافت هستند، جهت بازیافت به مراکز بازیافتی و بخشی دیگر جهت انهدام، به مراکز انهدام ارسال می‌گردد.

مدل صف به‌کار برده شده در پژوهش حاضر مدل صف  $M/M/m/C$  است، در این مدل فرض می‌شود تعداد مشتریان بالقوه سیستم متناهی است و حداکثر تعداد مشتریان که به سیستم مراجعه می‌کنند برابر با عددی متناهی، مانند  $C$  است. در مطالعه حاضر مدل صف برای هر دو نوع مرکز تلفیح موجود و جدید مورد استفاده قرار گرفته است.

تصمیمات مختلفی در این شبکه اتخاذ می‌گردد که از جمله آن‌ها می‌توان به مکان‌یابی مراکز تلفیح جدید به‌عنوان تصمیم استراتژیکی اشاره نمود و همچنین تعیین تعداد سرورهای موازی، مقدار سفارش واکسن، تعیین مقدار موجودی انتهایی دوره در مراکز تلفیح، تعیین مقدار زباله‌های انتقال یافته به مراکز جمع‌آوری و انهدام و بازیافت از دیگر تصمیمات تاکتیکی است که در این مراکز اتخاذ می‌گردد. اتخاذ تصمیمات درست در این شبکه با بهینه‌سازی سه تابع هدف زیر همراه است:

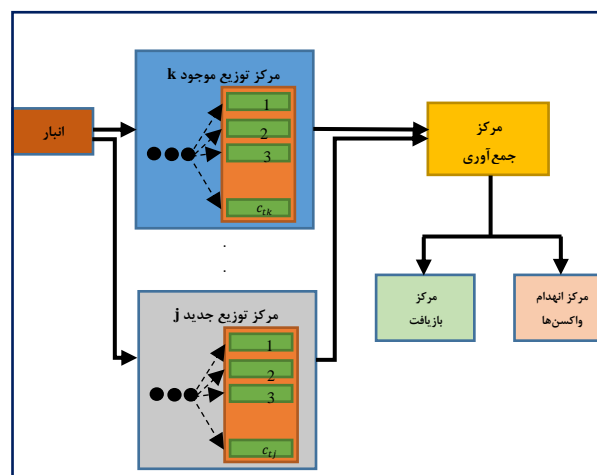
- کمینه‌سازی میانگین زمان انتظار در صف مراکز تلفیح
- کمینه‌سازی هزینه‌های ناشی از طراحی شبکه
- کمینه‌سازی اثرات مخرب زیست‌محیطی

این سه جنبه به‌عنوان جنبه‌های پایداری در شبکه مطرح شده‌اند. برای دستیابی به مقادیر بهینه ۳ تابع هدف فوق، تصمیمات استراتژیکی و تاکتیکی به‌صورت توأم اتخاذ می‌گردد. تصمیمات استراتژیکی این مدل شامل تعیین تعداد و مکان بهینه مراکز تلفیح جدید (موقت یا دائم) می‌باشد. تصمیمات تاکتیکی نیز شامل تعیین مقدار میزان موجودی نوع واکسن در مرکز موجود یا جدید در پایان دوره، تعیین تعداد سرورهای موازی در مراکز موجود یا جدید، تعیین تعداد واکسن‌های تأمین نشده از متقاضیان واکسن در هر دوره در هر مرکز تلفیح است. نظر به اینکه پارامتر تقاضا به‌صورت غیر قطعی می‌باشد؛ لذا امکان تعیین دقیق مقدار سفارش، مقدار زباله‌های ناشی از واکسیناسیون، تعداد مراکز جدید وجود ندارد. از این رو در این تحقیق از روش برنامه‌ریزی فازی جهت کنترل پارامتر غیر قطعی تقاضا استفاده شده است. در این صورت می‌توان با توجه به نرخ عدم قطعیت، مقدار دقیق تقاضا را برآورد نمود و نسبت به توزیع و ذخیره‌سازی واکسن و همچنین تعیین تعداد مراکز جدید اقدام کرد.

مدل شبکه زنجیره توزیع پایدار واکسن ارائه شده در این تحقیق به توجه به مفروضات زیر قابل مدل‌سازی خواهد بود:

- مدل ریاضی به‌صورت چنددوره‌ای و چندمحصولی است.

ویروس کرونا پدیده‌ای که با توجه به سرعت بالای انتشار، جهان را با بحران عظیمی روبه‌رو نموده است، در ظاهر ماهیتی صرفاً پزشکی و مرتبط با حوزه سلامت دارد اما در واقع پدیده‌ای چندبعدی محسوب می‌شود که آثار و پیامدهای آن در سایر حوزه‌ها اعم از اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و سیاسی نمایان شده است [۳۷]. سرعت شیوع این بیماری و تبدیل شدن آن به بحرانی جهانی، همچنین درگیری تمام کشورها هنوز فرصت کافی در انجام مطالعات و طرح‌های پژوهشی منسجم در یاری برای رهایی از این بیماری و خروج از بحران کرونا را فراهم نیاورده است. از جهتی دشواری در مهار این بیماری فشار بسیاری بر نظام درمانی کشورها در تشخیص و فرآیند درمان، همچنین تأمین دارو وارد آورده است. پیامدها و هزینه‌های ناشی از آن تأثیر شگرفی در دنیا داشته است که همین امر ضرورت دسترسی هرچه سریع‌تر به واکسن در پیشگیری و پاسخ مناسب به بحران را دوچندان نموده همچنین اهمیت فناوری در تولید واکسن را شفافیت بخشیده است و موجب شده است ضرورت مطالعات حوزه واکسن بیش‌ازپیش مورد توجه باشد. از این رو در این تحقیق یک شبکه زنجیره‌تأمین برای واکسیناسیون و جمع‌آوری زباله‌های ناشی از واکسن مطابق با شکل (۱) طراحی شده است.



شکل (۱). شبکه زنجیره‌توزیع مورد مطالعه

مطابق با شکل (۱)، در شبکه زنجیره‌توزیع مورد مطالعه، تعدادی مراکز تلفیح وجود دارد که وظیفه توزیع و واکسیناسیون را برعهده دارند. در صورتی که تعداد مراجعین برای دریافت واکسن بیش از ظرفیت این مراکز باشد، مراکز تلفیح جدید احداث می‌شود. مراکز واکسن مورد نیاز خود را از انبار استانی دریافت می‌کنند و بایستی پس از دریافت، اقدام به تلفیح و یا انبارش آن‌ها در مراکز تلفیح نمایند. مدل در نظر گرفته شده به‌صورت چنددوره‌ای بوده و در صورتی مرکز تلفیح جدید احداث می‌گردد که حداقل تعداد افراد مراجعه‌کننده و واکسن زده در آن دوره، بیش از یک حد مشخص باشد. در هر مرکز تلفیح مجموعه‌ای از خدمت‌دهنده‌ها وجود دارد که وظیفه واکسیناسیون را

تعداد افراد متقاضی (برآورد شده) علاقه‌مند به دریافت واکسن a برای مرکز تلفیح k در دوره t	$n_{akt}$	تخصیص هر نوع واکسن در هر پنجره زمانی براساس تقاضا و عرضه‌ی آن برآورده شده است.	•
هزینه سفارش واکسن a برای مرکز تلفیح k در دوره t	$Or_{akt}$	تأمین واکسن برای هر مرکز تلفیح موجود و جدید براساس ظرفیت عملیاتی آن و در دسترس بودن واکسن است.	•
هزینه سفارش واکسن a برای مرکز تلفیح جدید j در دوره t	$Or_{ajt}$	مفروضات مدل صف:	•
هزینه نگهداری واکسن a برای مرکز تلفیح k در دوره t	$Ho_{akt}$	تعداد افراد نیازمند واکسن به صورت غیرقطعی و فازی مثلثی است.	•
هزینه نگهداری واکسن a برای مرکز تلفیح جدید j در دوره t	$Ho_{ajt}$	مرکز توزیع واکسن خدمات غیر پویا ارائه می‌دهد و این یعنی هر فرد متقاضی براساس یکسری اطلاعات ثبت‌نامی به یک مرکز تلفیح منتقل می‌شود.	•
حداقل تعداد مجاز متقاضیان واکسن جهت تأسیس مرکز جدید	$M$	برای ایجاد مرکز تلفیح جدید باید حداقل تعداد افراد متقاضی واکسن مشخص باشد (متقاضیان واکسن باقیمانده در هر دوره که واکسن دریافت نکردند در صورتی که تعدادشان از مقدار M بیشتر باشد مرکز توزیع جدید برایشان تأسیس می‌شود و در غیر این صورت به دوره بعد منتقل می‌شوند).	•
نرخ خدمت مرکز تلفیح k	$\mu_k$	تعداد خدمت‌دهنده‌ها در هر مرکز تلفیح نامعلوم بوده و پس از حل مشخص می‌گردد. لازم به ذکر است حداکثر تعداد خدمت‌دهنده‌ها مشخص می‌باشد.	•
نرخ خدمت مرکز تلفیح جدید j	$\mu_j$	سیستم صف در هر مرکز تلفیح، یک زمان خدمت نمایی مستقل را دنبال می‌کند.	•
حداکثر ظرفیت مرکز تلفیح k برای نگهداری واکسن a	$I_{ak}^{max}$	هر متقاضی با نرخ ورود پواسن مستقل به سیستم صف‌بندی مرکز تلفیح مراجعه می‌کند.	•
حداکثر ظرفیت مرکز تلفیح جدید j برای نگهداری واکسن a	$I_{aj}^{max}$	براساس مفروضات بالا، در ادامه به معرفی نمادهای به کار رفته در مدل‌سازی پرداخته شده است.	•
حداکثر مقدار واکسن a ای که می‌تواند در دوره‌ی t عرضه شود.	$\chi_{at}^{max}$		
حداکثر تعداد خدمت‌دهنده‌ها در مرکز تلفیح k	$C_k^{max}$		
حداکثر تعداد خدمت‌دهنده‌ها در مرکز تلفیح جدید j	$C_j^{max}$		
تعداد مجاز مراکز تلفیح جدید	$P$		
درصدی از زباله‌های واکسیناسون غیرقابل استفاده که بایستی منهدم گردد	$\beta$		
هزینه انهدام زباله‌های واکسن توسط مرکز انهدام d	$e_d$		
هزینه بازیافت زباله‌های واکسن توسط مرکز بازیافت r	$u_r$		
هزینه جمع‌آوری زباله‌های واکسن توسط مرکز جمع‌آوری c	$g_c$		
اثرات زیست‌محیطی ایجاد مرکز تلفیح j	$Em_j$		
اثرات زیست‌محیطی نگهداری واکسن در مرکز تلفیح k	$Eh_k$		
اثرات زیست‌محیطی نگهداری واکسن در مرکز تلفیح جدید j	$Eh_j$		
اثرات زیست‌محیطی انهدام واکسن a در مرکز انهدام d	$Ed_{ad}$		
نرخ تعدیل هزینه‌های استراتژیکی و تاکتیکی	$\omega$		
ضریب ریسک‌گریزی افراد	$b$		
<b>متغیرهای تصمیم‌گیری</b>			
مقدار زباله‌های ناشی از واکسیناسیون نوع a جمع‌آوری شده توسط مرکز جمع‌آوری c در دوره t	$Y_{act}$	هزینه ثابت ایجاد مرکز تلفیح جدید در مکان پیشنهادی j	$f_j$
مقدار زباله‌های نوع a انتقال‌یافته به مرکز انهدام d در دوره t	$Z_{adt}$	ظرفیت مرکز تلفیح جدید در مکان پیشنهادی j برای واکسن a	$Cap_{aj}$
مقدار زباله‌های نوع a انتقال‌یافته به مرکز بازیافت r در دوره t	$Z_{art}$	ظرفیت مرکز تلفیح موجود در مکان k برای واکسن a	$Cap_{ak}$
میزان تقاضا از واکسن a در دوره t در مرکز تلفیح k	$D_{akt}$	ظرفیت مرکز جمع‌آوری c برای زباله‌های واکسن a	$Cap_{ac}$
تعداد واکسن a تأمین نشده در دوره t در کل مراکز تلفیح	$De_{at}$	ظرفیت مرکز انهدام d برای انهدام زباله‌های واکسن a	$Cap_{ad}$
مقدار ۱ دارد اگر مرکز تلفیح جدید در مکان j باز شود.	$X_j$	ظرفیت مرکز بازیافت r برای بازیافت زباله‌های واکسن a	$Cap_{ar}$
		تعداد دزهای تعریف شده برای واکسن a	$S_a$
		وزن گروه اولویت h در مرکز تلفیح k	$we_{hk}$

**اندیس‌ها**

j	اندیس مکان‌های کاندید برای ایجاد مرکز تلفیح جدید
k	اندیس مراکز تلفیح موجود
t	اندیس دوره‌های زمانی
a	اندیس نوع واکسن
h	اندیس گروه اولویت
c	اندیس مراکز جمع‌آوری
d	اندیس مرکز انهدام
r	اندیس مرکز بازیافت

**پارامترها**

$$\mu_k \rightarrow \begin{cases} n\mu_k & n = 1, 2, 3, \dots, c_{tk} \\ c_{tk}\mu_k & n = c_{tk}, c_{tk+1}, \dots \end{cases} \quad (1)$$

در این مطالعه فرض بر این است که مطلوبیت یک مرکز تلفیح  $U_k(\forall k)$  تابعی از کارایی واکسن و ضریب ریسک‌گریزی است. این ضریب نشان‌دهنده رفتارهای مختلف ریسک‌گریزی است.

**خاصیت‌ها**

تابع مطلوبیت یک تابع دوبار مشتق‌پذیر با یکسری ویژگی است؛ ویژگی ۱- سود حاشیه‌ای مثبت است.

یعنی با افزایش کارایی واکسن، مطلوبیت افزایش می‌یابد.

$$\frac{d U_k(E_a, b)}{d E_a} \geq 0 ; \forall a, k \quad (2)$$

ویژگی ۲- سود حاشیه‌ای یک تابع غیر فزاینده است.

یعنی مطلوبیت حاشیه‌ای برای کارایی واکسن‌ها با افزایش کارایی کاهش می‌یابد.

$$\frac{d U_k^2(E_a, b)}{d E_a^2} \leq 0 ; \forall a, k \quad (3)$$

ویژگی ۳- زمانی که هیچ اثربخشی از یک واکسن خاص انتظار نمی‌رود، سود نهایی صفر است.

یعنی نرخ ورود باید بدون توجه به ویژگی‌ها و نرخ واکسن محاسبه شود.

$$U_k(0, b) = 0 ; \quad \forall k \quad (4)$$

ویژگی ۴- تابع مطلوبیت با ضریب ریسک‌گریزی، غیرکاهشی است.

یعنی بزرگی آن را می‌توان به این صورت بیان نمود که هرچه قدر  $a$  بزرگتر باشد، مطلوبیت بیشتر است.

$$\frac{d U_k(E_a, b)}{d b} \geq 0 ; \quad \forall a, k \quad (5)$$

براساس ویژگی‌های فوق تابع مطلوبیت صعودی و مقعر است که بتدریج با کارایی واکسن اشباع می‌شود. تابع نمایی یک تابع مطلوبیت است که برای توصیف ترجیحات ریسک افراد متقاضی استفاده می‌شود. تابع مطلوبیت نمایی می‌تواند به شکل زیر باشد:

$$U(E, b) = 1 - e^{-bE} ; \quad b > 0 \quad (6)$$

علاوه بر این فرض بر این است که نرخ ورود واکسن‌ها با سطح موجودی هم مرتبط است و این به معنای آن است که با کاهش موجودی نرخ ورود به مرکز تلفیح کاهش و با افزایش موجودی نرخ ورود به مرکز تلفیح افزایش می‌یابد.

در این مطالعه فرض بر آن است که نرخ ورود افراد متقاضی به سیستم صف‌بندی از توزیع پواسن با پارامتر  $\lambda_k$  برای مرکز تلفیح موجود و  $\lambda$  برای مرکز تلفیح جدید تبعیت می‌کند و به صورت زیر محاسبه می‌شود؛

$$\lambda_k \sim poisson \left( \sum_{k=1}^k U_k(E_a, b) \frac{1}{1 + e^{-Iatk}} \right); \quad \forall k, t \quad (7)$$

با توجه به نظر و با در نظر گرفتن یک سیستم صف با تراکم در روند واکسیناسیون هر مرکز تلفیح، زمان انتظار فرد متقاضی برای هر مرکز  $k$  در طول یک دوره مشخص  $t$  توسط معادله فرموله شده زیر به دست آمده است:

$C_{kt}$	تعداد سرورهای موازی در مرکز $k$ در دوره $t$
$C_{jt}$	تعداد سرورهای موازی در مرکز جدید $j$ در دوره $t$
$w_{kt}$	زمان‌های انتظار برای واکسن در مرکز $k$ در دوره $t$
$w_{jt}$	زمان‌های انتظار برای واکسن در مرکز جدید $j$ در دوره $t$
$X_{akt}$	تعداد سفارشات واکسن نوع $a$ در مرکز $k$ در دوره $t$
$X_{ajt}$	تعداد سفارشات واکسن نوع $a$ در مرکز جدید $j$ در دوره $t$
$I_{akt}$	میزان موجودی واکسن $a$ در مرکز $k$ در پایان دوره $t$
$I_{ajt}$	میزان موجودی واکسن $a$ در مرکز جدید $j$ در پایان دوره $t$
$\lambda_{kt}$	نرخ ورود متقاضیان واکسن به مرکز تلفیح $k$ در دوره $t$
$\lambda_{jt}$	نرخ ورود متقاضیان واکسن به مرکز تلفیح جدید $j$ در دوره $t$

همان‌طور که بیان شد مدل صف به کار برده شده در پژوهش حاضر مدل صف  $M/M/m/C$  است، در این مدل فرض می‌شود تعداد مشتریان بالقوه سیستم متناهی است و حداکثر تعداد مشتریان که به سیستم مراجعه می‌کنند برابر با عددی متناهی، مانند  $C$  است. مدل صف برای هر دو نوع مرکز تلفیح موجود و جدید مورد استفاده قرار گرفته است که در این قسمت برای جلوگیری از تکرار مطالب صرفاً برای مراکز موجود با اندیس  $k$  توضیحات ارائه می‌گردد.

- برای ایستگاه‌های خدماتی با بیش از یک خدمت‌دهنده ارائه می‌شود.
- نرخ ورود از توزیع پواسن پیروی می‌کند.
- زمان سرویس (خدمت‌دهی) از توزیع نمایی پیروی می‌کند.
- تعداد سرورها و خدمات ارائه شده توسط هر سرور مستقل از هم است.
- چه زمانی خدمت‌دهنده آزاد می‌شود؟ در واقع سیستم فقط یک صف را برای هر خدمت‌دهنده تشکیل می‌دهد و آن‌هایی که در ابتدای صف هستند، سرویس رو دریافت می‌کنند.
- به محض اینکه فرد متقاضی در سیستم صف برای دریافت خدمت حاضر شود، خدمت‌دهنده واکسیناسیون را آغاز می‌کند.
- در این مدل نرخ خروج افراد از سیستم متفاوت از نرخ خدمت‌دهی است.
- اگر تعداد افراد متقاضی در یک مرکز تلفیح  $n$  کمتر از تعداد خدمت‌دهنده‌ها مرکز تلفیح باشد، تعداد واکسن‌شدگانی که مرکز را ترک می‌کنند برابر است با  $n\mu_k$  زیرا زمان بین دو خروج متوالی حداقل  $n$  متغیرهای تصادفی نمایی است. به‌عنوان مثال؛
- زمان سرویس برای  $n$  تا از سرورهای موازی در مرکز تلفیح  $k$  در طول دوره  $t$   $(C_{tk}(\forall t, k))$  که در حال کار هستند یک متغیر تصادفی نمایی با پارامتر  $n\mu_k$  است. با این حال زمانی که تعداد افراد متقاضی در سیستم بیشتر از  $C_{tk}(\forall t, k)$  است نرخ خروج افراد برابر است با  $C_{tk}\mu_k$  زیرا زمان بین دو خروج متوالی در این مورد حداقل  $C_{tk}(\forall t, k)$  متغیرهای تصادفی نمایی خواهد بود. در نتیجه نرخ خدمات می‌تواند به این شکل نوشته شود:

$$\begin{aligned}
 & + \omega \sum_a \sum_t \sum_j (Or_{ajt} X_{ajt} + Ho_{ajt} I_{ajt}) \\
 & + (1 - \omega) \sum_j f_j X_j \\
 & + \omega \sum_{a=1}^A \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^t g_c Y_{act} + \omega \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^t e_d Z_{adt} \\
 & \quad + \omega \sum_{a=1}^a \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^t u_r W_{art} \\
 \text{Min } z_3 = & \sum_a \sum_t \sum_k E h_k I_{akt} + \\
 & \sum_a \sum_t \sum_j E h_j I_{ajt} + \sum_j E m_j X_j \\
 & + \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^t E d_{ad} Z_{adt}
 \end{aligned} \tag{۱۴}$$

s. t:

$$I_{ak(t-1)} + X_{akt} - I_{akt} \leq D_{akt} ; \quad \forall a, t, k \tag{۱۵}$$

$$I_{aj(t-1)} + X_{ajt} - I_{ajt} = De_{at} + De_{at-1} ; \quad \forall a, t, j \tag{۱۶}$$

$$I_{akt} \leq I_{ak}^{max} ; \quad \forall a, t, k \tag{۱۷}$$

$$I_{ajt} \leq I_{aj}^{max} ; \quad \forall a, t, j \tag{۱۸}$$

$$\sum_{k=1}^K X_{atk} + \sum_{j=1}^J X_{ajt} \leq X_{at}^{max} ; \quad \forall a, t \tag{۱۹}$$

$$\sum_{j=1}^J X_j \leq p \tag{۲۰}$$

$$D_{akt} \geq \sum_{h=1}^H S_a n_{akt} w_{ehk} ; \quad \forall a, t, k \tag{۲۱}$$

$$X_{akt} \leq Cap_{ak} ; \quad \forall a, t, k \tag{۲۲}$$

$$De_{at} = \max \left\{ 0, \sum_{k=1}^K X_{akt} - Cap_{ak} \right\} ; \quad \forall a, t \tag{۲۳}$$

$$M. X_j \leq X_{ajt} \leq Cap_{aj} X_j ; \quad \forall a, j, t \tag{۲۴}$$

$$C_{kt} \leq C_k^{max} ; \quad \forall t, k \tag{۲۵}$$

$$C_{jt} \leq C_j^{max} ; \quad \forall t, j \tag{۲۶}$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ajt} + \sum_{k=1}^K X_{akt} = \sum_{c=1}^C Y_{act} ; \quad \forall a, t \tag{۲۷}$$

$$\beta \sum_{c=1}^C Y_{act} = \sum_{d=1}^D Z_{adt} ; \quad \forall a, t \tag{۲۸}$$

$$(1 - \beta) \sum_{c=1}^C Y_{act} = \sum_{r=1}^R W_{art} ; \quad \forall a, t \tag{۲۹}$$

$$Y_{act} \leq Cap_{ac} ; \quad \forall a, c, t \tag{۳۰}$$

$$Z_{adt} \leq Cap_{ad} ; \quad \forall a, d, t \tag{۳۱}$$

$$W_{art} \leq Cap_{ar} ; \quad \forall a, r, t \tag{۳۲}$$

$$\lambda_{kt} \sim \text{poisson} \left( \sum_{a=1}^A U_k(E_a, b) \frac{1}{1 + e^{-I_{akt}}} \right) ; \quad \forall k, t \tag{۳۳}$$

$$\begin{aligned}
 & W_{tk} \\
 & = \frac{1}{\mu_k} + \frac{\left(\frac{\lambda_k}{\mu_k}\right) C_{tk} \mu_k \pi_0^{tk}}{(C_{tk} - 1)! (C_{tk} \mu_k - \lambda_k)^2} ; \quad \forall t, k \tag{۸}
 \end{aligned}$$

این معادله در تابع هدف اول در نظر گرفته شده است؛

عبارت اول  $\left(\frac{1}{\mu_k}\right)$  میانگین زمان خدمت مربوط به مرکز تلفیح را

محاسبه می کند و عبارت دوم  $\left(\frac{\lambda_k}{\mu_k}\right) C_{tk} \mu_k \pi_0^{tk} / ((C_{tk}-1)! (C_{tk}\mu_k - \lambda_k)^2)$  میانگین انتظار در صف قبل از خدمت را به عنوان یک بخش ضروری از معادله محاسبه می کند.

احتمال بیکاری (عدم وجود فرد متقاضی در صف) در هر مرکز تلفیح  $\pi_0^{tk}$  در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned}
 \pi_0^{tk} = & \left[ 1 + \sum_{n=1}^{C_{tk}-1} \left(\frac{\lambda_k}{\mu_k}\right) \frac{1}{n!} \right. \\
 & \left. + \left(\frac{\lambda_k}{\mu_k}\right)^{C_{tk}} \frac{1}{C_{tk}! \left(1 - \left(\frac{\lambda_k}{C_{tk}\mu_k}\right)\right)} \right]^{-1} ; \tag{۹} \\
 & \quad \forall t, k
 \end{aligned}$$

دانستن تابع توزیع احتمال pdf و cdf برای زمان انتظار واکسن

در هر کدام از صفها این امکان را به ما می دهد تا احتمال اینکه افراد در یک صف برای بیش از یک زمان مشخص منتظر بمانند را محاسبه کنیم.

$$\begin{aligned}
 G_k(x) = & \begin{cases} \left(\frac{\lambda_k}{\mu_k}\right)^{C_{tk}} \frac{(1 - e^{-(C_{tk}\mu_k - \lambda_k)x})}{(C_{tk} - 1)! \left(C_{tk} - \frac{\lambda_k}{\mu_k}\right)} \pi_0^{tk} + G_k(0) & x > 0 \\ 1 - \frac{C_{tk} \left(\frac{\lambda_k}{\mu_k}\right)^{C_{tk}}}{C_{tk}! \left(C_{tk} - \frac{\lambda_k}{\mu_k}\right)} \pi_0^{tk} & x = 0 \end{cases} \tag{۱۰}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 g_k(x) = & \begin{cases} \left(\frac{\lambda_k}{\mu_k}\right)^{C_{tk}} \frac{\mu_k e^{-(C_{tk}\mu_k - \lambda_k)x}}{(C_{tk} - 1)!} \pi_0^{tk} & x > 0 \\ 1 - \frac{C_{tk} \left(\frac{\lambda_k}{\mu_k}\right)^{C_{tk}}}{C_{tk}! \left(C_{tk} - \frac{\lambda_k}{\mu_k}\right)} \pi_0^{tk} & x = 0 \end{cases} \tag{۱۱}
 \end{aligned}$$

مدل مربوطه می تواند با بررسی احتمالات سیستمها (منظور مراکز

تلفیح یا بیمارستانها) استراتژیهای خدماتی مانند تغییر در تعداد سرورها (خدمت دهندهها، پرستاران و پزشکان و شاغلین) یا نرخ خدمات برای مدیران و تجزیه و تحلیل عملکرد سیستم صف، خروجی دهد.

با توجه به نمادهای فوق تعریف شده، مدل برنامه ریزی ریاضی

غیرخطی سه هدفه برای طراحی شبکه زنجیره توزیع پایدار واکسن تحت عدم قطعیت تقاضا به صورت زیر می باشد.

$$\text{Min } z_1 = \frac{\sum_t \sum_k W_{kt}}{T \cdot K} + \frac{\sum_t \sum_j W_{jt}}{T \cdot J} \tag{۱۲}$$

$$\text{Min } z_2 = \omega \sum_a \sum_t \sum_k (Or_{akt} X_{akt} + Ho_{akt} I_{akt}) \tag{۱۳}$$



زباله‌های جمع‌آوری شده توسط مرکز جمع‌آوری را از دو مرکز تلقیح جدید و موجود نشان می‌دهد. روابط (۲۸) و (۲۹) مقدار زباله‌های قابل بازیافت و انهدامی را پس از بازرسی در مرکز جمع‌آوری نشان می‌دهد. رابطه (۳۰) تا (۳۱) ظرفیت مراکز جمع‌آوری، بازیافت و انهدام را نشان می‌دهد. روابط (۳۲) تا (۳۸) مربوط به معادلات صف می باشد. روابط (۳۹) و (۴۰) و (۴۱) نوع متغیر تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد. با توجه به غیر قطعی بودن پارامتر تقاضا در مدل طراحی شده، در بخش بعدی از روش برنامه‌ریزی فازی جهت کنترل این پارامتر استفاده شده است. با توجه به غیرقطعی بودن تعداد افراد متقاضی واکسن در ادامه به کنترل این پارامتر با روش برنامه‌ریزی فازی پرداخته شده است. لذا مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی زیر را با پارامترهای فازی در نظر بگیرید:

$$\text{Min } Z = \bar{c}^t x \quad (42)$$

s. t.:

$$x \in N(\bar{A}, \bar{B}) \\ = \{x \in R^n | \bar{a}_i x \geq \bar{b}_i, i = 1, \dots, m, x \geq 0\} \quad (43)$$

که در آن  $\bar{b} = [\bar{b}_1, \bar{b}_2, \dots, \bar{b}_n]^t$  و  $\bar{A} = [\bar{a}_{ij}]_{m \times n}$ ،  $\bar{c} = (\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_n)$  پارامترهای فازی به کار رفته در تابع هدف مسئله، ضریب برداری و پارامتر سمت راست محدودیت می‌باشد. تابع توزیع احتمالی پارامترهای فازی براساس ویژگی‌های اعداد فازی فرض شده است. در نهایت  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  بردار تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد. برای امکان‌پذیری و بهینه‌سازی مسئله ارائه شده در مدل فوق، نیاز به کنترل پارامترهای غیرقطعی ارائه شده در تابع هدف و محدودیت می‌باشد. از این رو با فرض در نظر گرفتن پارامتر  $\alpha$  به‌عنوان حداقل درجه شدنی بودن محدودیت‌ها، مدل کنترل شده به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min } Z = EV(\bar{c})x \quad (44)$$

s. t.:

$$[(1 - \alpha)E_2^{a_i} + \alpha E_1^{a_i}]x \geq (1 - \alpha)E_1^{b_i} + \alpha E_2^{b_i}, \\ i = 1, \dots, m, x \geq 0, \alpha \in [0, 1] \quad (45)$$

که در رابطه فوق  $EV(\bar{c})$  ارزش مورد انتظار عدد فازی به کار رفته در تابع هدف مدل است که به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$EV(\bar{c}) = \frac{E_1^c + E_2^c}{2} \quad (46)$$

در این تحقیق پارامتر  $\bar{C} = (C^1, C^2, C^3)$  فازی به‌صورت فازی مثلثی و به‌صورت توزیع امکانی پارامتر فازی در نظر گرفته شده است.  $C^1$  و  $C^2$  و  $C^3$  به ترتیب بیانگر مقادیر خوش‌بینانه، محتمل، بدبینانه عدد فازی  $\bar{C}$  می‌باشند که توسط تصمیم‌گیرنده مشخص می‌گردند. بنابراین امید ریاضی (ارزش مورد انتظار پارامتر فازی تابع هدف) به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$EI(\bar{c}) = [E_1^c, E_2^c] = \left[ \frac{c^1 + c^2}{2}, \frac{c^2 + c^3}{2} \right] \quad (47)$$

از این رو مدل کنترل شده به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min } z_1 = \frac{\sum_t \sum_k W_{kt}}{T \cdot K} + \frac{\sum_t \sum_j W_{jt}}{T \cdot J} \quad (48)$$

$$\pi_0^{tk} = \left[ 1 + \sum_{n=1}^{C_{kt}-1} \left( \frac{\lambda_{kt}}{\mu_k} \right) \frac{1}{n!} + \left( \frac{\lambda_{kt}}{\mu_k} \right)^{C_{kt}} \frac{1}{C_{kt}! \left( 1 - \left( \frac{\lambda_{kt}}{C_{kt}\mu_k} \right) \right)} \right]^{-1}; \quad (34)$$

$$W_{kt} = \frac{1}{\mu_k} + \frac{\left( \frac{\lambda_{kt}}{\mu_k} \right)^{C_{kt}} \mu_k \pi_0^{tk}}{(C_{kt} - 1)! (C_{kt}\mu_k - \lambda_{kt})^2}; \quad (35)$$

$$\lambda_{jt} \sim \text{poisson} \left( \sum_{a=1}^A U_k(E_a, b) \frac{1}{1 + e^{-\lambda_{ajt}}} \right); \quad (36)$$

$$\pi_0^{tj} = \left[ 1 + \sum_{n=1}^{C_{jt}-1} \left( \frac{\lambda_{jt}}{\mu_j} \right) \frac{1}{n!} + \left( \frac{\lambda_{jt}}{\mu_j} \right)^{C_{jt}} \frac{1}{C_{jt}! \left( 1 - \left( \frac{\lambda_{jt}}{C_{jt}\mu_j} \right) \right)} \right]^{-1}; \quad (37)$$

$$W_{jt} = \frac{1}{\mu_j} + \frac{\left( \frac{\lambda_{jt}}{\mu_j} \right)^{C_{jt}} \mu_j \pi_0^{tj}}{(C_{jt} - 1)! (C_{jt}\mu_j - \lambda_{jt})^2}; \quad (38)$$

$$X_{akt}, I_{akt}, X_{ajt}, I_{ajt}, Y_{act}, Z_{adt}, W_{art}, D_{akt}, De_{at} \geq 0 \text{ \& integer; } \forall a, t, k, r, d, c, j \quad (39)$$

$$C_{kt}, W_{kt}, C_{jt}, W_{jt} \geq 0; \quad \forall t, k, j \quad (40)$$

$$X_j \in \{0, 1\}; \quad \forall j \quad (41)$$

رابطه (۱۲) تابع هدف اول مسئله را نشان می‌دهد و هدف کاهش تراکم در سیستم با به حداقل رساندن زمان انتظار هست. رابطه (۱۳) تابع هدف دوم مسئله را نشان می‌دهد و هدف کاهش مجموع هزینه‌های سفارش‌دهی و نگهداری واکسن‌ها برای تمام بیمارستان‌ها در طول دوره‌های مختلف و همچنین حداقل کردن هزینه تأسیس مرکز تلقیح جدید است. رابطه (۱۴) تابع هدف سوم مسئله را نشان می‌دهد و شامل کمینه‌سازی اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از مدیریت زباله‌های واکسن و احداث مراکز تلقیح است. رابطه (۱۵) محدودیت تعادل موجودی برای هر مرکز تلقیح  $k$  و نوع واکسن  $a$  در دوره‌های مختلف  $t$  است. رابطه (۱۶) محدودیت تعادل موجودی برای هر مرکز تلقیح جدید  $j$  و نوع واکسن  $a$  در دوره‌های مختلف  $t$  می‌باشد. رابطه (۱۷) و (۱۸) حداکثر موجودی انتهایی دوره را در مراکز تلقیح موجود و جدید نشان می‌دهد. رابطه (۱۹) نشان می‌دهد تعداد سفارشات هر نوع واکسن  $a$  برای مراکز موجود و مراکز جدید نباید از حداکثر مقدار مجاز قابل عرضه در هر دوره  $t$  بیشتر شود. رابطه (۲۰) حداکثر تعداد مراکز تلقیح جدید که بایستی احداث شود را نشان می‌دهد. رابطه (۲۱) وزن گروه‌های اولویت را برای هر مرکز تلقیح در نظر می‌گیرد تا طیف متنوعی از تقاضای ناحیه را به یک مرکز اختصاص دهد (کل تقاضا هم براساس تعداد دوزهای تعریف شده برای هر نوع واکسن است). رابطه (۲۲) حداکثر ظرفیت مراکز تلقیح جدید را نشان می‌دهد. رابطه (۲۳) تعداد افراد نیازمند واکسن که در آن دوره زمانی نتوانسته‌اند خدمات دریافت کنند را نشان می‌دهد. رابطه (۲۴) محدودیت احداث مراکز تلقیح جدید را با توجه به محدودیت تعداد نفرات نشان می‌دهد. روابط (۲۵) و (۲۶) حداکثر تعداد خدمت‌دهنده در هر مرکز تلقیح موجود و جدید را نشان می‌دهد. رابطه (۲۷)

$$W_{art} \leq Cap_{ar}; \quad \forall a, r, t \quad (۶۵)$$

$$\lambda_{kt} \sim \text{poisson} \left( \sum_{a=1}^A U_k(E_a, b) \frac{1}{1 + e^{-I_{akt}}} \right); \quad (۶۶)$$

$\forall k, t$

$$\pi_0^{tk} = \left[ 1 + \sum_{n=1}^{C_{kt}-1} \left( \frac{\lambda_{kt}}{\mu_k} \right) \frac{1}{n!} + \left( \frac{\lambda_{kt}}{\mu_k} \right)^{C_{kt}} \frac{1}{C_{kt}! \left( 1 - \left( \frac{\lambda_{kt}}{C_{kt}\mu_k} \right) \right)} \right]^{-1}; \quad (۶۷)$$

$\forall t, k$

$$W_{kt} = \frac{1}{\mu_k} + \frac{\left( \frac{\lambda_{kt}}{\mu_k} \right)^{C_{kt}} \mu_k \pi_0^{tk}}{(C_{kt} - 1)! (C_{kt}\mu_k - \lambda_{kt})^2}; \quad (۶۸)$$

$\forall t, k$

$$\lambda_{jt} \sim \text{poisson} \left( \sum_{a=1}^A U_k(E_a, b) \frac{1}{1 + e^{-I_{ajt}}} \right); \quad (۶۹)$$

$\forall k, j$

$$\pi_0^{tj} = \left[ 1 + \sum_{n=1}^{C_{jt}-1} \left( \frac{\lambda_{jt}}{\mu_j} \right) \frac{1}{n!} + \left( \frac{\lambda_{jt}}{\mu_j} \right)^{C_{jt}} \frac{1}{C_{jt}! \left( 1 - \left( \frac{\lambda_{jt}}{C_{jt}\mu_j} \right) \right)} \right]^{-1}; \quad (۷۰)$$

$\forall t, j$

$$W_{jt} = \frac{1}{\mu_j} + \frac{\left( \frac{\lambda_{jt}}{\mu_j} \right)^{C_{jt}} \mu_j \pi_0^{tj}}{(C_{jt} - 1)! (C_{jt}\mu_j - \lambda_{jt})^2}; \quad (۷۱)$$

$\forall t, j$

$$X_{akt}, I_{akt}, X_{ajt}, I_{ajt}, Y_{act}, Z_{adt}, W_{art}, D_{akt}, De_{at} \geq 0 \text{ \& integer}; \forall a, t, k, r, d, c, j \quad (۷۲)$$

$$C_{kt}, W_{kt}, C_{jt}, W_{jt} \geq 0; \quad \forall t, k, j \quad (۷۳)$$

$$X_j \in \{0,1\}; \quad \forall j \quad (۷۴)$$

#### ۴. روش‌های حل

با توجه به غیرخطی بودن مدل ریاضی، در ادامه به تشریح الگوریتم NSGA-II پرداخته شده است. الگوریتم NSGA-II به واسطه جمعیت محور بودن الگوریتم و همچنین داشتن دو عملگر جستجوی قوی نظیر ترکیب و جهش، به عنوان الگوریتم انتخابی جهت حل مسأله در نظر گرفته شده است. در بیشتر مسائل شبکه زنجیره تأمین، الگوریتم NSGA-II به عنوان یکی از روش‌های حل در نظر گرفته شده است برای مثال [۴۳] از یک مدل صف شلوغ در زنجیره توزیع واکسن در کشور استرالیا جهت به حداقل رساندن میانگین زمان انتظار مراجعین و همچنین حداقل سازی هزینه‌های سفارش‌دهی و نگهداری استفاده نموده است و با توجه به NP-Hard بودن مسأله از الگوریتم NSGA-II

$$\text{Min } z_2 = \omega \sum_a \sum_t \sum_k (Or_{akt} X_{akt} + Ho_{akt} I_{akt}) + \omega \sum_a \sum_t \sum_j (Or_{ajt} X_{ajt} + Ho_{ajt} I_{ajt}) + (1 - \omega) \sum_j f_j X_j + \omega \sum_{a=1}^A \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^t g_c \cdot Y_{act} \quad (۴۹)$$

$$+ \omega \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^t e_d \cdot Z_{adt} + \omega \sum_{a=1}^A \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^t u_r \cdot W_{art}$$

$$\text{Min } z_3 = \sum_a \sum_t \sum_k Eh_k I_{akt} + \sum_a \sum_t \sum_j Eh_j I_{ajt} + \sum_j Em_j X_j + \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^t Ed_{ad} Z_{adt} \quad (۵۰)$$

s. t: (۵۱)

$$I_{ak(t-1)} + X_{akt} - I_{akt} \leq D_{akt}; \quad \forall a, t, k \quad (۵۲)$$

$$I_{aj(t-1)} + X_{ajt} - I_{ajt} = De_{at} + De_{at-1}; \quad \forall a, t, j \quad (۵۳)$$

$$I_{akt} \leq I_{ak}^{max}; \quad \forall a, t, k \quad (۵۴)$$

$$I_{ajt} \leq I_{aj}^{max}; \quad \forall a, t, j \quad (۵۵)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{atk} + \sum_{j=1}^J X_{ajt} \leq X_{at}^{max}; \quad \forall a, t \quad (۵۶)$$

$$\sum_{j=1}^J X_j \leq p \quad (۵۷)$$

$$D_{akt} \geq \sum_{h=1}^H S_a \left[ (1 - \alpha) \frac{n_{akt}^1 + n_{akt}^2}{2} + \alpha \frac{n_{akt}^2 + n_{akt}^3}{2} \right] we_{hk} \quad (۵۸)$$

$$X_{akt} \leq Cap_{ak} \quad (۵۹)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ajt} + \sum_{k=1}^K X_{akt} = \sum_{c=1}^C Y_{act}; \quad \forall a, t \quad (۶۰)$$

$$\beta \sum_{c=1}^C Y_{act} = \sum_{d=1}^d Z_{adt} \quad \forall a, t \quad (۶۱)$$

$$(1 - \beta) \sum_{c=1}^C Y_{act} = \sum_{r=1}^R W_{art}; \quad \forall a, t \quad (۶۲)$$

$$Y_{act} \leq Cap_{ac}; \quad \forall a, c, t \quad (۶۳)$$

$$Z_{adt} \leq Cap_{ad}; \quad \forall a, d, t \quad (۶۴)$$

II جهت حل بهره برده است.

[۵۰] به طراحی شبکه توزیع حلقه بسته براساس نیازهای مشتریان جهت به حداقل رساندن همزمان هزینه کل و انتشار کل CO<sub>2</sub> پرداخته است. برای مقابله با پیچیدگی مسأله از NSGA-II استفاده کرده است و عملکرد الگوریتم را با استفاده از روش تاگوچی برای تنظیم پارامترهای آن افزایش داده است. [۵۱] مدلی دوهدفه برای پاسخ و بازیابی یکپارچه جهت تصمیم‌گیری استراتژیک پس از بحران در توزیع امداد و بازسازی شبکه کوتاه‌مدت ارائه داده است و با تمرکز بر در نظر گرفتن اهداف متضاد بین عدالت و هزینه، یک رویکرد ترکیبی براساس الگوریتم NSGA-II پیشنهاد کرده است. [۵۲] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای برنامه‌ریزی تولید و توزیع نوع دوستانه برای یک تولیدکننده در یک زنجیره تأمین چندلایه دوکاناله ارائه می‌دهد که با توجه به NP-Hard بودن مدل از الگوریتم NSGA-II استفاده شده است.

[۵۳] یک مسأله زمان‌بندی ماشین‌های موازی نامرتب با هدف زمان‌بندی یک مجموعه ارائه داده است. این مسأله شامل محدودیت‌های واجد شرایط بودن ماشین، زمان‌های راه‌اندازی وابسته به ترتیب، محدودیت‌های تقدم، زمان‌های راه‌اندازی وابسته به مجموعه و محدودیت‌های منابع مشترک با اهداف به حداقل رساندن زمان ساخت و تأخیر کل کار بوده است. با توجه به NP-hard بودن مسأله، از الگوریتم NSGA-II برای حل استفاده گردید و در نهایت پس از بررسی صحت مدل چندین برنامه زمان‌بندی عملیاتی با عملکردی معادل برای برنامه‌ریزان تولید ارائه شد. که هر یک به نحوی از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب برای حل مدل بهره برده‌اند.

الگوریتم ژنتیک با ایجاد تصادفی یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها شروع می‌شود، درحالی‌که حدود یا محدودیت‌های مسأله را ارضا می‌کنند. به عبارت دیگر، کروموزوم‌ها رشته‌هایی از مقادیر پیشنهادی برای متغیرهای تصمیم مسأله هستند و هر یک نمایانگر یک پاسخ محتمل برای مسأله هستند. کروموزوم‌ها از تکرارهای متوالی که نسل نامیده می‌شوند، استنتاج می‌شوند. در طول هر نسل، این کروموزوم‌ها با توجه به هدف بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و کروموزوم‌هایی که پاسخ بهتری برای مسأله مورد نظر محسوب می‌شوند، شانس بیشتری برای تولید مجدد جواب‌های مسأله پیدا می‌کنند. فرموله نمودن تابع ارزیابی کروموزوم‌ها به نحوی که بر سرعت همگرایی محاسبات به سمت جواب بهینه عمومی کمک کند، بسیار حائز اهمیت است. چراکه در الگوریتم ژنتیک برای هر کروموزوم باید مقدار تابع ارزیابی محاسبه شده و چون معمولاً در بسیاری از مسائل با تعداد قابل‌ملاحظه‌ای از کروموزوم‌ها مواجه هستیم، زمان‌بر بودن محاسبه تابع ارزیابی می‌تواند استفاده از الگوریتم ژنتیک را در برخی از مسائل به لحاظ کاربردی بودن غیرممکن سازد؛ به همین سبب، براساس مقادیر به دست آمده تابع هدف در جمعیت رشته‌ها، به هر رشته یک عدد برازندگی نسبت داده می‌شود. که این عدد برازندگی احتمال انتخاب را برای هر رشته تعیین می‌کند. براساس این احتمال

انتخاب، ابتدا مجموعه‌ای از رشته‌ها انتخاب می‌شوند.

برای تولید نسل بعدی کروموزوم‌های جدید که فرزند نامیده می‌شوند از طریق پیوند دو کروموزوم از نسل کنونی با استفاده از عملگر ترکیب یا از طریق اصلاح کروموزوم با استفاده از عملگر جهش ایجاد می‌شوند. پس رشته‌های جدید جایگزین رشته‌هایی از جمعیت اولیه می‌شوند تا تعداد جمعیت رشته‌ها در تکرارهای محاسباتی مختلف ثابت باشد. مکانیزم‌های تصادفی که بر روی انتخاب و حذف رشته‌ها عمل می‌کنند به گونه‌ای هستند که رشته‌های با برازندگی بیشتر، احتمال بیشتری برای ترکیب و تولید رشته‌های جدید داشته و در مرحله جایگزینی نسبت به دیگر رشته‌ها مقاوم‌تر باشند. بدین لحاظ جمعیت دنباله‌ها در یک رقابت براساس تابع هدف در طی نسل‌های مختلف، کامل شده و توسط مقدار تابع هدف در جمعیت رشته‌ها افزایش می‌یابد، به طوری که بعد از چندین سال، الگوریتم به سمت بهترین کروموزوم همگرا می‌شود که به طور امیدوارانه نشان‌دهنده حل بهینه یا زیربهینه برای مسأله مورد نظر است.

به طور کلی در این الگوریتم ضمن آن‌که در هر تکرار محاسباتی، توسط عملگرهای ژنتیکی نقاط جدیدی از فضای جواب مورد جستجو قرار می‌گیرند توسط مکانیزم انتخاب، روند جستجوی نواحی از فضای را که متوسط آماری تابع هدف در آن‌ها بیشتر است، کنکاش می‌کند. معمولاً جمعیت جدید که جایگزین جمعیت پیشین می‌شود برازندگی بیشتری دارد. این بدان معناست که از نسلی به نسل دیگر جمعیت بهبود می‌یابد. هنگامی جستجو نتیجه‌بخش است که به حداکثر نسل ممکن رسیده باشیم یا همگرایی حاصل شده باشد یا معیارهای توقف برآورده شده باشد و در نتیجه بهترین کروموزوم به دست آمده از آخرین نسل به عنوان حل بهینه تخمینی یا حل بهینه برای مسأله انتخاب می‌گردد. در کاربرد الگوریتم ژنتیک چندین موضوع باید در نظر گرفته شود. اول در مورد ژن‌هایی که نشان‌دهنده حل‌های مسأله هستند باید تصمیم‌گیری شود (کد کردن). دوم، تابع برازندگی برای ارزیابی حل باید معین شود. سوم، عملگرهای ژنتیک مانند عملگرهای جهش و ترکیب و روش‌های انتخاب باید طراحی شوند. چهارم، روش تولید جمعیت نسل جدید باید معلوم شود. سرانجام موضوعی که برای کاربرد این الگوریتم در مسائل بهینه‌سازی محدودیت‌دار بسیار لازم است، این است که چطور با محدودیت‌ها رفتار شود، به دلیل اینکه عملگرهای ژنتیک با دست‌کاری کروموزوم‌ها معمولاً منجر به تولید فرزندان نشدنی (غیرموجه) می‌شود. در ادامه به بررسی این موارد پرداخته شده است.

#### ۴-۱. نحوه نمایش جواب و تولید جمعیت اولیه

این مرحله شاید مشکل‌ترین مرحله حل مسأله بهینه‌سازی ترکیبی باشد. الگوریتم ژنتیک به جای این که بر روی پارامترها یا متغیرهای مسأله کار کند، با شکل کد شده آن‌ها کار می‌کند. همان‌طور که می‌دانیم روش‌های سنتی و عددی برای مسائل با فضای جستجوی بزرگ کارآمد نیستند. براساس مطالعات صورت گرفته الگوریتم ژنتیک از کارایی بالایی برای حل مسائل زنجیره‌تأمین چندهدفه، چندسطحی و چندمحصولی برخوردار است [۴۳]. مسائل مختلف اغلب ساختار

#### ۴-۲. فرآیند الگوریتم NSGA-II

NSGA-II یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است و کارایی آن در حل مسائل مختلف، به اثبات رسیده است. اسرینیاس و دب روش بهینه‌سازی NSGA را برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه معرفی نمودند. این الگوریتم، همانند الگوریتم ژنتیک با یک جمعیت اولیه که به طور تصادفی تولید شده‌اند، شروع می‌گردد. در گام بعدی جمعیت تولید شده از دید توابع هدف تعریف شده ارزیابی می‌شوند (فرض کنید دو تابع هدف کمینه‌سازی داریم). پس از تقسیم‌بندی جمعیت به دسته‌های متفاوت با کاربرد فرآیند مرتب‌سازی نامغلوب، پارامتر کنترلی به نام فاصله ازدحامی را محاسبه می‌کنیم. این پارامتر برای هر دو عضو در هر گروه محاسبه می‌شود و بیانگر اندازه‌ای از نزدیکی عضو موردنظر نسبت به دیگر اعضای جمعیت آن دسته و گروه می‌باشد. مقدار بزرگ این پارامتر منجر به واگرایی و گستره بهتری در مجموعه اعضای جمعیت خواهد شد.

از طرفی در این الگوریتم، از میان جواب‌های هر نسل  $P_t$  تعدادی از آن‌ها با استفاده از روش انتخاب تورنمنت دودویی انتخاب می‌شوند. در روش انتخاب دودویی، دو جواب به تصادف از میان جمعیت انتخاب می‌شوند و سپس میان این دو جواب، مقایسه‌ای انجام می‌شود و هرکدام که بهتر باشد، در نهایت انتخاب می‌شود. معیارهای انتخاب در NSGA-II در درجه اول، رتبه جواب و در درجه دوم فاصله ازدحامی مربوط به جواب است. هرچه رتبه جواب کمتر باشد و دارای فاصله ازدحامی بیشتری باشد، مطلوب‌تر است. با تکرار عملگر انتخاب دودویی بر روی جمعیت هر نسل، مجموعه‌ای از افراد آن نسل برای شرکت در ترکیب و جهش انتخاب می‌شوند. بر روی بخشی از افراد انتخاب شده، عمل ترکیب و بر روی بقیه، عمل جهش انجام می‌شود و جمعیت  $Q_t$  متشکل از فرزندان و جهش‌یافتگان ایجاد می‌شود. در ادامه، این جمعیت با جمعیت اصلی ادغام می‌شود. اعضای جمعیت تازه شکل یافته  $R_t$ ، ابتدا برحسب رتبه و به صورت صعودی مرتب می‌شوند.

اعضایی از جمعیت که دارای رتبه یکسانی هستند، برحسب فاصله ازدحامی و به صورت نزولی مرتب می‌شوند. حال اعضای جمعیت در درجه اول برحسب رتبه و در درجه دوم برحسب فاصله ازدحامی مرتب‌سازی شده‌اند. برابر با تعداد افراد جمعیت اصلی، اعضای  $P_{t+1}$  از بالای فهرست مرتب شده انتخاب می‌شوند و بقیه اعضا دور ریخته (رد) می‌شوند. اعضای انتخاب شده جمعیت نسل بعدی را تشکیل می‌دهند و چرخه مذکور در این بخش، غالباً به نام جبهه پارتو شناخته می‌شوند. هیچ‌کدام از جواب‌های جبهه پارتو، بر دیگری ارجحیت ندارند و بسته به شرایط، می‌تواند هرکدام را به عنوان یک تصمیم بهینه در نظر گرفت. رویکرد کلی الگوریتم در شکل (۲) نشان داده شده است.

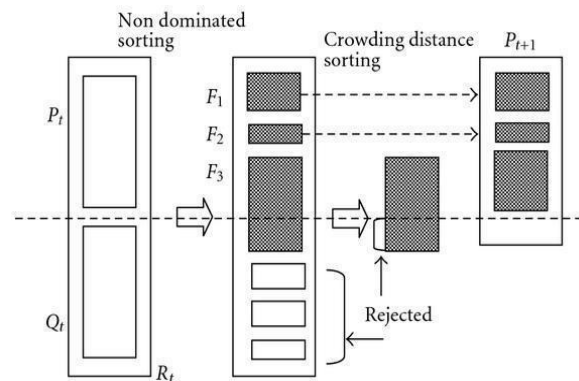
#### ۵. مرتب‌سازی نامغلوب

در روش NSGA-II اعضای جمعیت براساس مفهوم غلبه نداشتن مرتب می‌شوند. در روش مرتب‌سازی نامغلوب، به اعضای از جمعیت که نسبت به سایر اعضای آن نسل غلبه نشده‌اند، رتبه یک داده شده و

داده‌های متفاوت و یا نمایش ژنتیکی متفاوتی دارند. یکی از روش‌های کد کردن روش دودویی می‌باشد که در آن هدف تبدیل جواب مسأله به رشته‌ای از اعداد باینری است. روش‌های دیگری نیز از قبیل کد کردن با اعداد جایگشتی و یا رمزگذاری مقدار در ادبیات وجود دارند که بسته به نوع مسأله ممکن است به صورت رشته‌هایی از اعداد یا یک ماتریس و غیره باشد. به عبارت دیگر هر بردار از فضای حالت مسأله، مسأله را در قالب یک کروموزوم نشان می‌دهد. آلتیمارک و همکاران [۴۴]، یک روش جدید به نام الگوریتم ژنتیک مبتنی بر اولویت با رمزگذاری و رمزگشایی برای یک مسأله حمل‌ونقل دوسطحی و عملگر تقاطع جدیدی به نام WMX توسعه دادند. در این روش، یک ژن در یک کروموزوم شامل دو نوع از اطلاعات است:

(۱) مکان ژن (موقعیت ژن در ساختار کروموزوم)

(۲) ارزش ژن (مقداری که ژن در ساختار کروموزوم گرفته است)



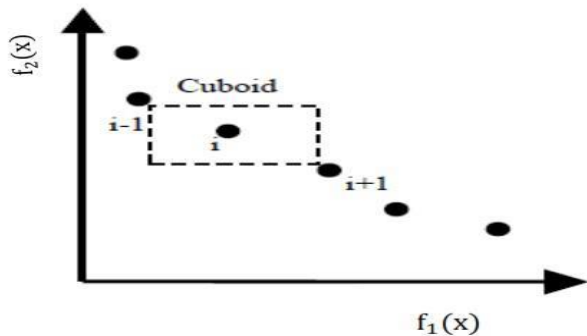
شکل (۲). عملکرد کلی الگوریتم NSGA-II [۴۴]

آن‌ها از موقعیت ژن برای نشان دادن یک گره (منبع/انبار) و از ارزش آن برای نشان دادن اولویت آن گره برای ساخت یک درخت حمل‌ونقل استفاده کرده‌اند. کدگذاری مبنی بر اولویت توسط جن و همکاران [۴۵] برای برنامه‌ریزی پروژه محدودیت منابع؛ لین و همکاران [۴۶] برای طراحی شبکه لجستیک چند سطحی؛ لین و همکاران [۴۷]، برای طراحی شبکه لجستیک معکوس؛ همزادایی و بیلداز [۴۸]، برای مدل مختلط موازنه خط مونتاژ و تعیین توالی و توسط چیترا و سابراج [۴۹]، برای مسائل مسیریابی و کوتاه‌ترین مسیر به کار گرفته شده است. در ادبیات همچنین روش‌های متنوعی برای تولید جمعیت اولیه از جواب‌های مسأله وجود دارند که دو نوع آن به قرار زیر می‌باشند:

- تولید جمعیت اولیه تصادفی: با توجه به اینکه کروموزوم‌ها متعلق به نواحی مختلف فضای جواب می‌باشند، در این روش تنوع کروموزوم‌ها زیاد است. لازم به ذکر است که کاربرد این روش ممکن است منتهی به جواب‌های ناموجه شود.
- تولید جمعیت اولیه با کاربرد روش‌های ابتکاری یا فراابتکاری: درست است که با کاربرد این روش الگوریتم با جواب‌های شدنی شروع به اجرا می‌کند اما منجر به همگرایی زودرس یا کاهش تنوع در جمعیت می‌شود و این یکی از شکل‌های عمده است.

۵-۱. فاصله ازدحامی

پس از جبهه‌بندی نقاط، معیار دیگری برای ارزیابی نقاط موجود در یک جبهه استفاده می‌شود که فاصله ازدحام نام دارد. رویکرد فاصله ازدحام به منظور حفظ تنوع پاسخ‌ها در جبهه بهینه پارتو پیشنهاد شده است. برای محاسبه فاصله ازدحام متناسب به هر نقطه روی یک جبهه مشخص، نقاط قبل و بعد را نسبت به توابع هدف مسأله در نظر گرفته و یک مستطیل در سطح دوبعدی تشکیل می‌شود، همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است. بدیهی است در صورتی که تعداد توابع هدف بیش از ۲ تا باشد، نقاط موردنظر یک مکعب را تشکیل خواهند داد.



شکل (۴). محاسبه فاصله ازدحام برای اعضای جمعیت هر جبهه به‌طور جداگانه [۴۴]

برای محاسبه فاصله ازدحام جواب  $i$  ام در این شکل، مستطیلی ترسیم شده که جواب‌های بعدی و قبلی را نسبت به دو تابع هدف در گوشه‌های آن قرار گرفته‌اند. فاصله ازدحام برای این نقطه معادل متوسط اضلاع این مستطیل است. هرچه فاصله ازدحام کمتر باشد، نشان‌دهنده تراکم بیشتر جواب‌ها است. لازم به ذکر است در شرایطی که مسأله دارای بیش از دو تابع هدف باشد، نقاط  $i-1$  و  $i+1$  برای تمام توابع هدف یکسان نخواهند بود. ابتدا برای هر تابع هدف  $k$ ، نتایج مرتب می‌شوند. به نقاطی که ماکزیمم و مینیمم مقدار این تابع هدف را دارند، مقدار فاصله بی‌نهایت اختصاص می‌یابد. فاصله ازدحام برای اعضای جمعیت هر جبهه به‌طور جداگانه طبق روابط (۷۶) تا (۷۸) و مطابق شکل (۴) محاسبه می‌شود. فاصله‌ها نیز تنها بین اعضای هر جبهه انجام می‌شود.

$$cd_1(x) = \frac{|Z_1^{i+1} - Z_1^{i-1}|}{Z_1^{max} - Z_1^{min}} \quad (76)$$

$$cd_2(x) = \frac{|Z_2^{i+1} - Z_2^{i-1}|}{Z_2^{max} - Z_2^{min}} \quad (77)$$

$$cd(x) = cd_1(x) + cd_2(x) \quad (78)$$

مراحل محاسبه فاصله ازدحام برای جواب‌های واقع بر جبهه به شرح زیر است:

- ۱) تعداد جواب‌های واقع بر جبهه (دسته)  $i$  را محاسبه کنید و آن را  $J$  بنامید.  $(|F| = J)$  برای هر  $i$  در این مجموعه، مقدار اولیه فاصله ازدحام را صفر فرض کنید.  $CD_i = 0$
- ۲) جواب‌ها را براساس هر تابع هدف  $M = 1, \dots, p$  مرتب کنید.

در دسته جبهه اول قرار می‌گیرند و از جمعیت نیز کنار گذاشته می‌شوند. سپس در بین اعضای باقیمانده مجدداً اعضای که غلبه نشده باشند، انتخاب شده و رتبه دو به آن‌ها تعلق می‌گیرند. این اعضا در جبهه دوم قرار گرفته و به‌طور موقت از جمعیت کنار گذاشته می‌شوند. این روند تا قرار گرفتن تمامی اعضای جمعیت در جبهه‌های مختلف ادامه می‌یابد. مفهوم غلبه نقطه‌ای بر نقطه دیگر مطابق رابطه (۷۵) است. هرگاه چنین رابطه‌ای برقرار باشد بدین معنی است که نقطه  $a$  بر نقطه  $b$  غلبه دارد و  $f_i$  و  $f_j$  توابع هدف نام و  $Z$  مسأله هستند.

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}: f_i(a) \geq f_i(b), \quad (75)$$

$$\exists i \in \{1, 2, \dots, n\}: f_i(a) > f_i(b)$$

فرآیند رتبه‌بندی نامغلوب به‌طور خلاصه شامل مراحل زیر است:

۱) مجموعه‌های  $F_i$  که جواب‌های نامغلوب در سطح  $Z$  را در خود ذخیره خواهند نمود، ایجاد کرده. سطح  $i$  را مساوی یک قرار دهید. مرحله (۱) دو شمارنده برای کروموزوم‌های در حال مقایسه را به ترتیب با  $z = 1$  و  $k = 2$  فرض کنید.

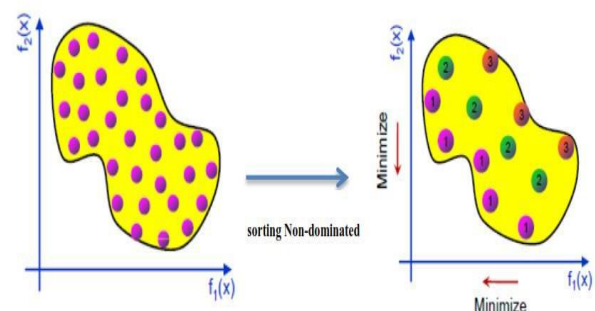
مرحله (۲) کروموزوم  $Z$  را با  $k$  مقایسه کنید. اگر جواب  $Z$  بر جواب  $k$  مسلط است، به شمارنده  $k$  یک واحد اضافه کنید، در غیر این صورت به مرحله ۳ بروید.

مرحله (۳) در صورتی که  $k > nPop$  تعداد کل کروموزوم‌های جمعیت است، کروموزوم  $Z$  را در مجموعه  $F_i$  قرار دهید و به مرحله ۵ بروید. در صورتی که  $k < nPop$  به مرحله ۲ بازگردید.

مرحله (۴)  $Z$  را مساوی  $k$  قرار دهید. در صورتی که  $k = nPop$  کروموزوم  $k$  را به مجموعه  $F_i$  انتقال دهید و به مرحله ۵ بروید. در غیر این صورت، شمارنده  $k$  را یک واحد افزایش دهید و به مرحله ۵ بازگردید.

مرحله (۵) در صورتی که  $z = nPop - 1$ ، به مرحله ۲ بروید، در غیر این صورت  $Z$  را یک واحد افزایش دهید همچنین  $k = z + 1$ ، سپس به مرحله ۲ بازگردید.

۲) کروموزوم‌های قرار گرفته در مجموعه  $F_i$  را از جمعیت حذف کنید،  $i$  را یک واحد افزایش دهید و به مرحله (۱) برگردید. توجه کنید که اندازه جمعیت را با توجه به تعداد کروموزوم‌های حذف شده به‌روزرسانی کنید. این فرآیند را تا زمانی ادامه دهید که کلیه کروموزوم‌ها در مجموعه‌های  $F_i$  دسته‌بندی شوند. نمونه‌ای از دسته‌های مرتب شده از جمعیت کروموزوم‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳). نمونه‌ای از دسته‌های مرتب‌شده با اعمال مرتب‌سازی نامغلوب [۴۴]

هر آزمایش، از رابطه (۸۱) مقدار بی‌مقیاس شده هر آزمایش (RPD) جهت تحلیل طراحی آزمایش تاگوچی محاسبه می‌گردد.

$$S_i = \frac{NPF + MSI + SM + MID + CPU}{5} \quad (۸۰)$$

$$RPD = \frac{S_i - S_i^*}{S_i^*} \quad (۸۱)$$

در رابطه فوق،  $S_i$  جواب هر آزمایش و  $S_i^*$  بهترین جواب در بین کلیه آزمایش‌ها است.

جدول (۱). سطوح پارامترهای پیشنهادی برای تنظیم پارامتر

الگوریتم NSGA II			
پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
حداکثر تعداد تکرار	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
تعداد جمعیت	۵۰	۷۵	۱۰۰
نرخ ترکیب	۰/۷	۰/۸	۰/۹
نرخ جهش	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷

پس از محاسبه مقدار هر آزمایش و همچنین بی‌مقیاس کردن مقادیر هر آزمایش برای هر الگوریتم، داده‌ها جهت تحلیل در نرم‌افزار Minitab 16 وارد شده‌اند. از آنجایی که توابع هدف به‌صورت کمینه‌سازی می‌باشد، بیشترین مقدار معیار SN، ملاک انتخاب مقادیر پارامترها می‌باشد. با مقایسه اختلاف حداکثر و حداقل مقادیر به‌دست آمده در الگوریتم NSGA-II برای شاخص S/N، تأثیر قابل توجه پارامتر Max It (حداکثر تعداد تکرار) در بهبود فرآیند حل الگوریتم NSGA-II، مشهود می‌باشد. پارامترهای Npop (تعداد جمعیت)، Pm (نرخ جهش) و Pc (نرخ ترکیب) به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی تأثیرگذاری قرار دارند (جدول (۲)).

جدول (۲). نتایج تحلیل تنظیم پارامتر الگوریتم NSGA II

سطح	حداکثر تعداد تکرار	تعداد جمعیت	نرخ ترکیب	نرخ جهش
۱	۰/۱۰۳۷۸	۰/۱۳۳۰۹	۰/۰۷۰۰۶	۰/۱۴۵۵۱
۲	۰/۱۵۹۷۶	۰/۱۲۷۴۲	۰/۱۰۳۳۷	۰/۰۴۴۸۱
۳	۰/۰۱۱۶۳	۰/۰۱۴۶۶	۰/۱۰۱۷۴	۰/۰۸۴۸۵
Delta	۰/۱۴۸۱۴	۰/۱۱۸۴۲	۰/۰۳۳۳۱	۰/۱۰۰۷۰
رتبه	۱	۲	۴	۳

به‌طور کامل‌تر می‌توان جدول (۲) این‌گونه تفسیر نمود که در سطح (۱) شامل پارامترهای پیشنهادی، هر چه مقدار داده نشان داده شده بیشتر باشد به‌منزله تأثیرگذاری بیشتر آن پارامتر در آن سطح بر روی الگوریتم است. برای مثال در سطح اول، مقدار داده (حداکثر تعداد تکرار) بیشترین می‌باشد که در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که تأثیرگذاری این پارامتر بر روی الگوریتم در داده‌های سطح (۱) بیشتر از بقیه الگوریتم‌ها می‌باشد. مقدار Delta نشان داده شده نیز، نتیجه‌گیری کلی در مورد سه سطح را نشان می‌دهد برای مثال می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر (حداکثر تعداد تکرار) بیشترین تأثیر خود را بر

برای هر هدف  $M$  به جواب‌های واقع شده بر مرز جبهه (نقاط ابتدایی و انتهایی)، فاصله ازدحام بزرگی اختصاص دهید.  $(CD_{ij}^m = CD_{ij}^m = \infty)$  و برای محاسبه این شاخص برای بقیه جواب‌ها از رابطه (۷۹) استفاده کنید:

$$CD_{ij}^m = \frac{|Z_m^{ij+1} - Z_m^{ij-1}|}{Z_m^{max} - Z_m^{min}} \quad (۷۹)$$

در رابطه فوق  $I_j^m$  نشان‌دهنده جواب  $Z$  ام در فهرست مرتب شده جواب‌ها براساس تابع هدف  $m$  می‌باشد. صورت کسر در سمت راست رابطه فوق نشان‌دهنده اختلاف مقدار تابع هدف  $m$  ام برای دو جواب مجاور جواب  $Z$  است. مخرج کسر نشان‌دهنده اختلاف حداقل و حداکثر مقدار تابع هدف  $m$  ام در جمعیت است.

### ۵-۲. عملگر انتخاب تورنمنت براساس ازدحام

ساختار کلی این عملگر مشابه عملگر انتخاب تورنمنت تشریح شده در بخش الگوریتم ژنتیک است. تفاوت اصلی این دو عملگر در این است که در انتخاب تورنمنت براساس ازدحام فرض می‌شود که هر جواب دارای دو مشخصه به‌شرح زیر است:

(۱) رتبه غیر غالب هر عضو از جمعیت کروموزوم‌ها  $r_i$

(۲) فاصله ازدحام هر عضو از جمعیت کروموزوم‌ها  $d_i$

در عملگر انتخاب تورنمنت براساس ازدحام، یک جواب در رقابت با جواب دیگر زمانی برنده خواهد بود که حداقل یکی از دو شرط زیر برقرار باشد:

(۱) جواب دارای رتبه بهتری باشد  $r_i < r_j$

(۲) در صورتی که رتبه هر دو جواب مساوی باشد، فاصله ازدحام جواب  $i$  بهتر از جواب  $j$  باشد  $d_i > d_j, r_i = r_j$

شرط اول امکان اطمینان از اینکه جواب برنده روی جبهه برتر واقع شده را فراهم می‌کند. شرط دوم نیز، امکان انتخاب جواب‌های متنوع‌تر را از نقاط واقع بر یک جبهه فراهم می‌کند.

قبل از پرداختن به حل مسأله با استفاده از الگوریتم NSGA-II، به تنظیم پارامترهای این الگوریتم با روش تاگوچی پرداخته شده است. در روش تاگوچی، در ابتدا باید فاکتورهای مناسب را شناسایی و سپس سطوح هر یک از فاکتورها را انتخاب و در ادامه بایستی طرح آزمایش مناسب را برای این فاکتورهای کنترل مشخص شود. پس از مشخص شدن طرح آزمایش، آزمایش‌ها را انجام داده و باهدف پیدا کردن بهترین ترکیب پارامترها، آزمایش‌ها تحلیل می‌شود. در این پژوهش، برای هر فاکتور ۳ سطح مطابق با جدول (۱) در نظر گرفته و با توجه به تعداد فاکتورها و تعداد سطوح آن‌ها به تعیین طراحی آزمایش و اجرای آن‌ها پرداخته شده است.

با توجه به سه تابع هدفه بودن مدل پیشنهادی، جهت تحلیل داده‌ها، بایستی ابتدا مقدار هر آزمایش از رابطه (۸۰) محاسبه شود. در این رابطه در صورت کسر شاخص‌های مورد استفاده در الگوریتم فراابتکاری شامل (تعداد جواب کارا (NPF)، شاخص بیشترین گسترش (MSI)، شاخص فاصله متریک (SM)، شاخص فاصله از نقطه ایده‌آل (MID) و زمان محاسباتی (CPU-time)) است. پس از تعیین مقدار

NSGA-II به‌دست آمده است. همچنین جنبه پارتو به‌دست آمده در شکل (۶) نشان داده شده است.

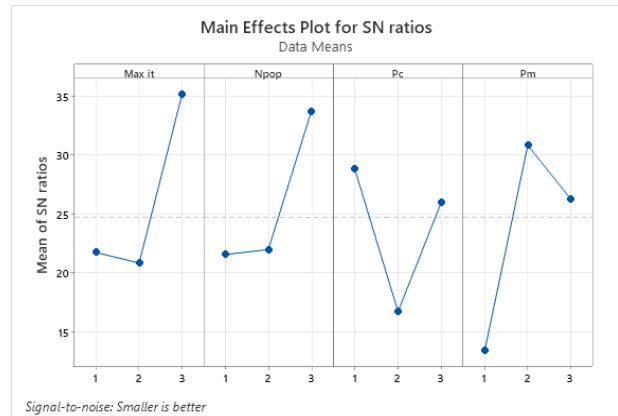
جدول (۴). حدود بازه‌ای پارامترهای مسئله

پارامتر	حدود بازه‌ای	پارامتر	حدود بازه‌ای
$f_j$	$\sim U[1000,2000]$	$Or_{akt}$	$\sim U[5,8]$
$Cap_{aj}$	$\sim U[200,300]$	$Or_{ajt}$	$\sim U[5,8]$
$Cap_{ak}$	$\sim U[80,120]$	$Ho_{akt}$	$\sim U[0.5,1]$
$Cap_{ac}$	$\sim U[500,600]$	$Ho_{ajt}$	$\sim U[0.5,1]$
$Cap_{ad}$	$\sim U[300,400]$	$M$	20
$Cap_{ar}$	$\sim U[300,400]$	$\mu_k$	$\sim U[5,10]$
$S_a$	$\sim U[1,2]$	$\mu_j$	$\sim U[5,10]$
$we_{hk}$	$\sim U[0.3,0.5]$	$I_{ak}^{max}$	$\sim U[20,40]$
$e_d$	$\sim U[1,2]$	$I_{aj}^{max}$	$\sim U[5,10]$
$u_r$	$\sim U[1,2]$	$X_{at}^{max}$	$\sim U[1000,1500]$
$g_c$	$\sim U[1,3]$	$C_k^{max}$	$\sim U[2,4]$
$Em_j$	$\sim U[500,1500]$	$C_j^{max}$	$\sim U[2,4]$
$Eh_k$	$\sim U[50,150]$	$P$	4
$Eh_j$	$\sim U[50,150]$	$\beta$	0.4
$Ed_{ad}$	$\sim U[50,150]$		
$n_{akt}$	$\sim U[100,125]$		

جدول (۵). مجموعه جواب‌های کارای مثال عددی سایز کوچک

جواب کارا	Z1	Z2	Z3
۱	۷/۲۸۴	۹۹۳۲۶/۵۳	۴۲۰۳۵۸/۷۳
۲	۷/۸۰۳	۹۳۰۱۲/۵۰	۴۳۵۵۴۵/۴۰
۳	۷/۹۰۰	۹۰۰۶۲/۵۶	۳۸۱۰۳۱/۹۹
۴	۸/۸۸۴	۸۹۸۵۳/۲۱	۳۷۲۳۸۰/۱۳
۵	۹/۴۳۹	۸۸۹۸۶/۶۴	۳۸۲۰۳۲/۹۹
۶	۹/۸۵۰	۸۷۲۷۰/۳۵	۴۱۹۳۵۶/۵۴
۷	۱۰/۱۸۷	۸۷۳۱۶/۷۸	۳۷۹۲۳۰/۱۱
۸	۱۱/۵۱۴	۹۴۷۴۰/۳۹	۳۶۸۴۰۴/۸۰
۹	۱۱/۵۵۱	۸۶۵۰۴/۰۳	۴۱۸۱۴۳/۹۵
۱۰	۱۱/۶۸۱	۸۹۰۷۶/۰۷	۳۷۸۸۴۲/۱۰
۱۱	۱۳/۱۵۴	۸۷۴۵۵/۵۲	۳۷۵۳۵۰/۶۲
۱۲	۱۳/۲۴۷	۸۷۰۸۷/۹۰	۳۷۳۱۲۰/۷۷
۱۳	۱۴/۵۲۱	۸۶۶۵۱/۹۵	۳۶۶۲۸۰/۱۹
۱۴	۱۴/۶۷۶	۸۶۷۴۴/۸۸	۳۵۹۰۴۸/۲۵
۱۵	۱۶/۳۱۷	۸۶۳۲۵/۳۹	۴۱۳۶۴۱/۷۰
۱۶	۱۷/۳۳۱	۸۶۵۸۷/۶۶	۳۸۲۲۶۷/۹۲
۱۷	۱۷/۵۲۱	۸۶۴۵۳/۹۴	۳۶۳۷۷۵/۷۹
۱۸	۱۷/۶۷۶	۸۵۸۲۰/۸۰	۴۱۰۱۴۰/۶۵
۱۹	۱۹/۳۴۲	۸۶۴۰۸/۱۷	۳۷۰۶۸۸/۵۰
۲۰	۱۹/۹۳۹	۸۶۱۰۲/۷۹	۴۰۵۴۵۴/۳۵
۲۱	۲۱/۶۶۷	۸۶۰۵۳/۸۴	۴۰۸۷۱۷/۷۹
۲۲	۲۱/۶۶۷	۸۶۳۰۸/۳۵	۳۷۲۰۶۸/۲۳
۲۳	۲۲/۱۴۵	۸۵۹۲۶/۷۱	۴۰۹۵۹۶/۲۰
۲۴	۲۴/۵۲۴	۸۵۷۵۲/۰۲	۴۲۱۷۱۶/۳۹
۲۵	۳۲/۹۳۲	۸۶۳۸۴/۱۵	۳۷۱۵۶۶/۸۸
۲۶	۴۰/۵۰۲	۸۵۷۷۶/۲۴	۴۱۱۴۶۳/۸۲
۲۷	۴۳/۷۲۸	۸۵۸۶۳/۱۳	۴۰۸۲۲۷/۷۵
۲۸	۴۵/۱۸۹	۸۶۶۳۵/۴۴	۳۶۳۰۱۸/۲۰
۲۹	۴۸/۰۱۰	۸۶۶۳۴/۷۵	۳۶۲۷۹۸/۴۸

روی کیفیت جواب‌های حاصله از الگوریتم دارد. لذا هرچه مقدار این پارامتر افزایش یابد، احتمال کسب جواب‌های کارای بهتر افزایش می‌یابد. شکل (۵) نمودار متوسط نسبت S/N را برای الگوریتم NSGA-II نشان می‌دهد. مطابق با آنچه بیان شد، بیشترین مقدار معیار S/N، ملاک انتخاب مقادیر پارامترها می‌باشد.



شکل (۵). نمودار متوسط نسبت S/N در الگوریتم NSGA-II

مطابق با نتایج قابل مشاهده از شکل (۵)، در صورتی که مقدار حداکثر تعداد تکرار در سطح ۳، تعداد جمعیت در سطح ۳، نرخ ترکیب در سطح ۱ و نرخ جهش در سطح ۲ قرار بگیرد، الگوریتم NSGA-II بیشترین کارایی را خواهد داشت.

### ۶. تجزیه و تحلیل و مثال عددی

پس از تنظیم پارامتر الگوریتم NSGA-II در این بخش یک مثال عددی در سایز کوچک طراحی و مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری آن نشان داده شده است. اندازه مثال عددی طراحی شده در این بخش به‌صورت جدول (۳) می‌باشد.

جدول (۳). اندازه مثال عددی در سایز کوچک

اندیس	شرح	تعداد
$j$	اندیس مکان‌های کاندید برای ایجاد مرکز تلقیح جدید	۴
$k$	اندیس مراکز تلقیح موجود	۳
$t$	اندیس دوره‌های زمانی	۳
$a$	اندیس نوع واکسن	۴
$h$	اندیس گروه اولویت	۳
$c$	اندیس مراکز جمع‌آوری	۴
$d$	اندیس مرکز انهدام	۵
$r$	اندیس مرکز بازیافت	۵

همچنین حدود بازه‌ای پارامترهای مسئله نیز با توجه به داده‌های مقاله‌های پایه به شرح جدول (۴) می‌باشد. در این جدول تعداد افراد نیازمند واکسن به‌صورت عدد فازی مثلثی در سه سطح خوشبینانه، محتمل و بدبینانه در نظر گرفته شده است.

پس از حل مثال عددی سایز کوچک با در نظر گرفتن نرخ عدم قطعیت ۰/۵، ۲۹ جواب کارا به‌شرح جدول (۵) توسط الگوریتم

جدول (۷). مقدار موجودی واکسن‌ها در مراکز تلفیق موجود و جدید

واکسن	دوره	مرکز تلفیق موجود					مرکز تلفیق جدید				
		۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۱	۲۴	۱	۰	۵	۵	۱	۲	۵	۵	
۲	۱	۷	۲	۳	۴	۲	۲	۲	۲	۲	
۳	۱	۸	۵	۷	۰	۸	۱	۳	۰	۸	
۴	۱	۲۰	۲۲	۲	۵	۶	۱	۴	۵	۶	
۱	۲	۶	۲۱	۱۵	۴	۵	۲	۱	۴	۵	
۲	۲	۷	۲۱	۷	۰	۳	۲	۳	۰	۳	
۳	۲	۳۷	۵	۱۶	۶	۶	۳	۶	۶	۶	
۴	۲	۲۷	۹	۲۱	۰	۶	۲	۲	۰	۶	
۱	۳	۱۱	۱	۱۵	۰	۸	۳	۰	۰	۸	
۲	۳	۱۲	۵	۹	۰	۴	۳	۰	۰	۴	
۳	۳	۱	۱	۱۰	۵	۸	۳	۵	۵	۸	
۴	۳	۱	۲۷	۲۱	۰	۰	۳	۰	۰	۰	

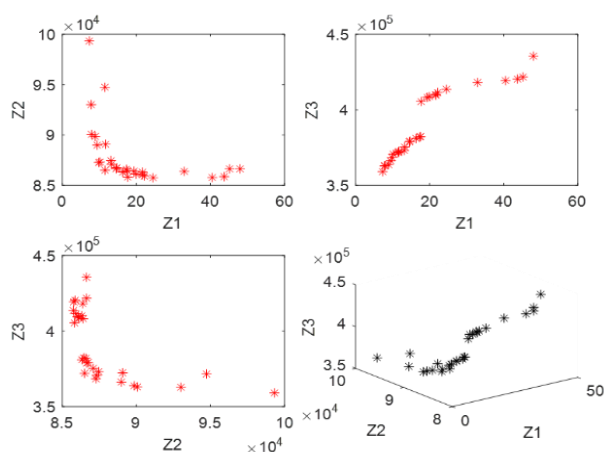
جدول (۸). تعداد خدمت‌دهنده‌های موازی به‌کار رفته در مراکز

دوره	تلفیق				
	مرکز تلفیق موجود	مرکز تلفیق جدید			
۱	۱	۲	۳	۱	۲
۲	۲	۲	۳	۴	۲
۳	۳	۲	۳	۲	۲

در این مسأله جمع‌آوری زباله‌های ناشی از واکسیناسیون نیز در نظر گرفته شده است. در جدول (۹) مقدار زباله‌های ناشی از واکسیناسیون جمع‌آوری شده توسط مرکز جمع‌آوری نشان داده شده است.

جدول (۹). تعداد زباله‌های ناشی از واکسیناسیون جمع‌آوری شده

واکسن	دوره	مرکز جمع‌آوری			
		۱	۲	۳	۴
۱	۱	۰	۳۷۰	۰	۰
۲	۱	۰	۵۰۸	۱۹	۵۱۷
۳	۱	۰	۵۴۶	۰	۴۵۹
۴	۱	۰	۵۰۳	۳۷	۵۶۱
۱	۲	۰	۳۴۶	۰	۰
۲	۲	۰	۵۰۸	۳۲	۵۱۷
۳	۲	۰	۵۴۶	۰	۴۹۱
۴	۲	۰	۵۰۳	۰	۵۲۰
۱	۳	۰	۲۹۹	۰	۰
۲	۳	۰	۵۰۸	۰	۴۸۹
۳	۳	۰	۵۴۶	۰	۳۲۰
۴	۳	۰	۵۰۳	۰	۴۷۷



شکل (۶). جبهه پارتو حاصل از حل مثال عددی سایز کوچک

با بررسی جواب‌های کارای مثال عددی سایز کوچک و همچنین جبهه پارتو به‌دست آمده، مشاهده می‌گردد با افزایش میانگین زمان انتظار، هزینه‌های کل مسأله کاهش یافته است. لذا هرچه زمان انتظار طولانی‌تر شده، هزینه‌های کل کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، هزینه‌های کل شبکه نیز افزایش یافته است. این نشان می‌دهد که توابع هدف در تضاد با یکدیگر هستند. برحسب تحلیل‌های صورت گرفته، شاخص‌های ارزیابی جواب‌های کارای الگوریتم نیز به‌شرح جدول (۶) به‌دست آمده است.

جدول (۶). شاخص‌های ارزیابی جواب‌های کارای الگوریتم NSGA

شاخص	مقدار
میانگین Z1	۱۹/۳۱
میانگین Z2	۸۷۸۳۱/۸۱
میانگین Z3	۳۸۹۸۰۲/۳۸
NPF	۲۹
MSI	۷۷۶۹۲/۲۳
SM	۰/۷۸
MID	۳۱۰۵۰/۳۲
CPU-time	۱۳۷/۲۹۷

پس از ارائه نتایج حل مثال عددی در سایز کوچک، در ادامه به بررسی خروجی‌های بهترین جواب کارا پرداخته شده است. بر این اساس دو مرکز تلفیق شماره ۱ و ۲ از بین ۴ مرکز بالقوه در نظر گرفته شده احداث شده است.

جدول (۷) به‌ترتیب مقدار موجودی از واکسن‌ها را در مراکز تلفیق جاری و جدید نشان می‌دهد. در جدول (۸) نیز تعداد خدمت‌دهنده‌های موازی در مراکز تلفیق موجود و جدید را در هر دوره زمانی نشان می‌دهد. نتایج جدول (۹) نشان می‌دهد که مرکز جمع‌آوری شماره ۱، جهت جمع‌آوری زباله‌های ناشی از واکسیناسیون مورد استفاده قرار نگرفته است. همچنین جدول (۱۰) مقدار زباله‌های انتقال یافته به مرکز انهدام را در مثال عددی نشان می‌دهد.



جدول (۱۲). تعداد سفارشات واکسن‌ها در مراکز تلقیح موجود و

جدید						
واکسن	دوره	مرکز تلقیح موجود				
		۱	۲	۳	۱	۲
۱	۱	۱۱۷	۱۱۷	۹۴	۴۲	۰
۲	۱	۲۰۸	۲۲۹	۲۱۴	۲۲۶	۱۶۷
۳	۱	۱۹۴	۲۱۵	۲۳۰	۲۳۱	۱۳۵
۴	۱	۲۱۲	۲۷۲	۲۱۵	۲۱۸	۱۸۴
۱	۲	۷۵	۱۳۶	۱۰۹	۲۶	۰
۲	۲	۲۰۱	۲۴۶	۲۱۵	۲۲۶	۱۶۹
۳	۲	۲۱۵	۲۱۰	۲۳۲	۲۳۱	۱۴۹
۴	۲	۱۹۹	۲۳۷	۲۳۲	۲۱۸	۱۳۷
۱	۳	۹۸	۹۶	۹۴	۱۱	۰
۲	۳	۲۰۶	۲۱۱	۲۱۳	۲۲۶	۱۴۱
۳	۳	۱۵۰	۲۰۶	۲۱۷	۲۳۱	۶۲
۴	۳	۱۶۶	۲۶۸	۲۱۳	۲۱۸	۱۱۵

۷. تحلیل حساسیت

پس از بررسی اعتبار مدل و تجزیه و تحلیل یک مثال عددی در سایز کوچک، در این بخش به تحلیل حساسیت مدل ریاضی ارائه شده پرداخته شده است. از این‌رو چندین پارامتر حساس مسئله در نظر گرفته شده و با تغییر آن‌ها، تغییرات مقادیر توابع هدف مسئله مورد بررسی قرار گرفته است. مدل ارائه شده در این تحقیق در شرایط عدم قطعیت طراحی شده است که با استفاده از روش برنامه‌ریزی فازی به کنترل پارامتر غیر قطعی مسئله پرداخته شده است. از این‌رو ابتدا نرخ عدم قطعیت جهت تحلیل حساسیت مسئله در نظر گرفته شده است. در تحلیل‌های قبیل مقدار ۰/۵ در نظر گرفته شده بود، که در این بخش با تغییر آن بین ۰/۱ تا ۰/۹، میانگین جواب‌های به‌دست آمده در جدول (۱۳) نشان داده شده است.

جدول (۱۳). تغییرات میانگین تابع هدف در نرخ‌های مختلف عدم قطعیت

نرخ عدم قطعیت	میانگین Z1	میانگین Z2	میانگین Z3
۰/۱	۱۷/۶۳	۸۱۰۳۵/۷۲	۳۱۱۹۸۲/۶۸
۰/۲	۱۷/۸۸	۸۲۶۷۴/۶۶	۳۳۱۸۹۶/۲۵
۰/۳	۱۸/۱۴	۸۴۷۵۶/۰۸	۳۵۹۸۷۱/۴۸
۰/۴	۱۸/۹۳	۸۶۷۴۸/۶۸	۳۷۱۸۵۵/۶۸
۰/۵	۱۹/۳۱	۸۷۸۳۱/۸۱	۳۸۹۸۰۲/۳۸
۰/۶	۱۹/۹۱	۸۸۳۴۸/۶۷	۴۰۱۸۹۶/۷۶
۰/۷	۲۰/۶۴	۸۹۲۴۸/۲۵	۴۲۱۹۸۶/۳۳
۰/۸	۲۱/۳۳	۹۱۱۳۳/۹۸	۴۳۹۷۴۵/۲۸
۰/۹	۲۲/۱۸	۹۳۱۸۹/۶۶	۴۵۶۸۷۶/۳۳

نتایج جدول (۱۳) نشان می‌دهد که با افزایش نرخ عدم قطعیت، تعداد افراد نیازمند واکسن در شبکه بیشتر شده و در نتیجه به‌دلیل محدود بودن ظرفیت مراکز و همچنین ثابت بودن دیگر پارامترها،

جدول (۱۰). مقدار زباله‌های انتقال یافته به مرکز انهدام

واکسن	دوره	مرکز انهدام				
		۱	۲	۳	۴	۵
۱	۱	۰	۱۴۸	۰	۰	۰
۲	۱	۰	۳۳۲	۰	۸۶	۰
۳	۱	۰	۳۵۶	۰	۴۶	۰
۴	۱	۰	۳۲۹	۰	۱۱۲	۰
۱	۲	۰	۱۳۹	۰	۰	۰
۲	۲	۰	۳۳۲	۰	۹۱	۰
۳	۲	۰	۳۵۶	۰	۵۹	۰
۴	۲	۰	۳۲۹	۰	۸۱	۰
۱	۳	۰	۱۲۰	۰	۰	۰
۲	۳	۰	۳۳۲	۰	۶۷	۰
۳	۳	۰	۳۴۷	۰	۰	۰
۴	۳	۰	۳۲۹	۰	۶۳	۰

نتایج جدول (۱۰) نیز نشان می‌دهد که دو مرکز انهدام شماره ۲ و ۴ جهت حذف زباله‌های ناشی از واکسیناسیون مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت در جدول (۱۱) مقدار زباله‌های واکسن نوع a انتقال یافته به مرکز بازیافت را نشان می‌دهد.

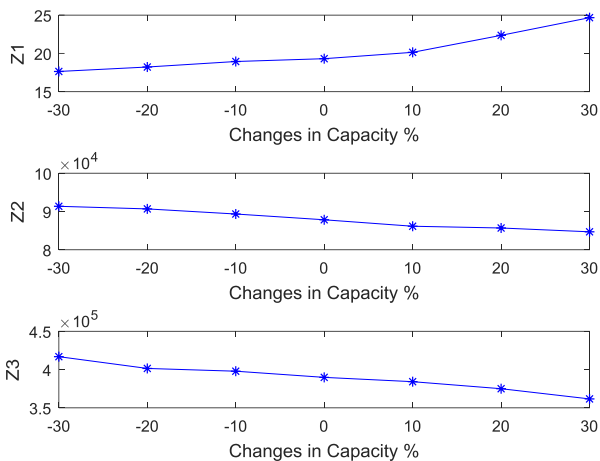
جدول (۱۱). مقدار زباله‌های انتقال یافته به مرکز بازیافت

واکسن	دوره	مرکز بازیافت				
		۱	۲	۳	۴	۵
۱	۱	۰	۰	۳۷۰	۰	۰
۲	۱	۳۲۶	۳۲۲	۳۵۳	۴۳	۰
۳	۱	۲۷۵	۳۹۷	۳۳۳	۰	۰
۴	۱	۳۵۸	۳۴۳	۳۴۳	۵۷	۰
۱	۲	۰	۰	۳۴۶	۰	۰
۲	۲	۳۲۶	۳۲۲	۳۵۳	۵۶	۰
۳	۲	۳۰۷	۳۹۷	۳۳۳	۰	۰
۴	۲	۳۳۷	۳۴۳	۳۴۳	۰	۰
۱	۳	۰	۰	۲۹۹	۰	۰
۲	۳	۳۲۲	۳۲۲	۳۵۳	۰	۰
۳	۳	۱۳۶	۳۹۷	۳۳۳	۰	۰
۴	۳	۲۹۴	۳۴۳	۳۴۳	۰	۰

همچنین جدول (۱۲) نیز تعداد سفارشات واکسن را در مراکز تلقیح موجود و جدید نشان می‌دهد. تحلیل نتایج نشان داد، مقدار سفارشات تنها زمانی که مرکز تلقیح جدید احداث شده است، رخ داده و تمامی مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری مقادیر منطقی به‌خود گرفته‌اند. از این‌رو پس از اعتبارسنجی مدل نیز، در ادامه به تحلیل حساسیت مسئله تحت تغییر در پارامترهای حساس مدل پرداخته شده است.

حمل و نقل شده است. در حالی که با کاهش ظرفیت و افزایش تعداد مراکز تلفیق، به دلیل کاهش نرخ ورودی به هر مرکز، طول صف در آن مرکز کاهش یافته و این امر منجر به کاهش میانگین زمان انتظار شده است.

شکل (۸) روند تغییرات میانگین توابع هدف را در ظرفیت‌های مختلف مراکز تلفیق نشان می‌دهد.



شکل (۸). تغییرات توابع هدف مسئله در ظرفیت‌های مختلف مراکز تلفیق

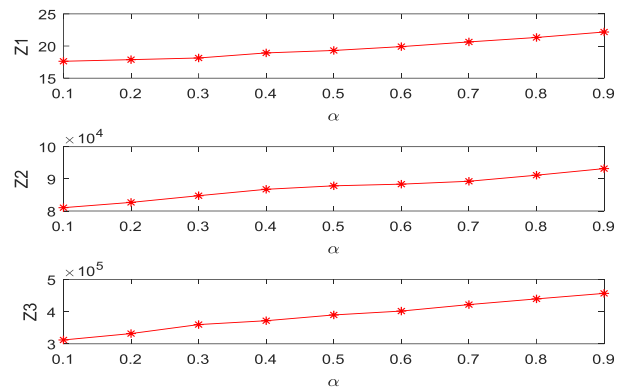
### ۸. تجزیه و تحلیل مثال‌های عددی در ابعاد مختلف

در این بخش از تحقیق به تجزیه و تحلیل مثال‌های عددی در ابعاد مختلف جهت بررسی کارایی الگوریتم NSGA-II پرداخته شده است. از آنجایی که مدل ارائه شده یک مدل غیرقابل حل با نرم‌افزار GAMS و همچنین یک مسئله NP-Hard می‌باشد، از این روش تحلیل‌های صورت گرفته براساس الگوریتم NSGA-II بوده است.

جدول (۱۵)، ۱۵ مثال عددی را که به صورت تصادفی ایجاد شده است، نشان می‌دهد. همچنین در جدول (۱۶) حدود بازه‌های پارامترهای مسئله نیز که متناسب با اندازه مسائل طراحی شده است، نشان داده شده است. داده‌های ارائه شده به صورت تصادفی بوده و تابع توزیع یکنواخت است. پس از طراحی مثال‌های عددی مختلف هر مثال عددی سه بار توسط الگوریتم NSGA-II حل شده است. در نتیجه حل این مثال‌های عددی، میانگین توابع هدف و همچنین شاخص‌های به کار رفته در ارزیابی الگوریتم NSGA-II به ترتیب در جدول (۱۷) و جدول (۱۸) نشان داده شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌گردد با افزایش اندازه مسئله، تعداد افراد نیازمند واکسن افزایش یافته و از این رو هزینه‌های ناشی از سفارش واکسن، احداث مراکز تلفیق نیز افزایش یافته است. از سوی دیگر به دلیل افزایش تعداد افراد نیازمند واکسن، میانگین زمان انتظار نیز افزایش یافته و با افزایش حمل و نقل نیز گازهای گلخانه‌ای افزایش یافته است. تحلیل‌های دیگر نشان می‌دهد که با افزایش اندازه مسئله، زمان حل مسئله به صورت نمایی افزایش می‌یابد.

هزینه‌های تحمیل شده بر شبکه افزایش یافته است. از سوی دیگر بیشتر شدن واکسن‌های سفارش داده شده و آماده توزیع، منجر به افزایش میانگین زمان انتظار در مراکز توزیع نیز شده است. همچنین بیشتر شدن تعداد واکسن‌ها و زباله‌های ناشی از آن‌ها، میزان انتشار گازهای مخرب زیست‌محیطی را نیز افزایش داده است. در شکل (۷) روند تغییرات میانگین توابع هدف در نرخ‌های مختلف عدم قطعیت نشان داده شده است.



شکل (۷). تغییرات توابع هدف مسئله در نرخ‌های مختلف عدم قطعیت

در تحلیل دیگر هر یک از ظرفیت‌های مراکز تلفیق به اندازه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کمتر و بیشتر از حد نرمال در نظر گرفته شده و تأثیر آن بر روی میانگین‌های توابع هدف بررسی شده است. از این رو جدول (۱۴) تغییرات میانگین تابع هدف در ظرفیت‌های مختلف مراکز تلفیق نشان می‌دهد.

جدول (۱۴). تغییرات میانگین تابع هدف در ظرفیت‌های مختلف

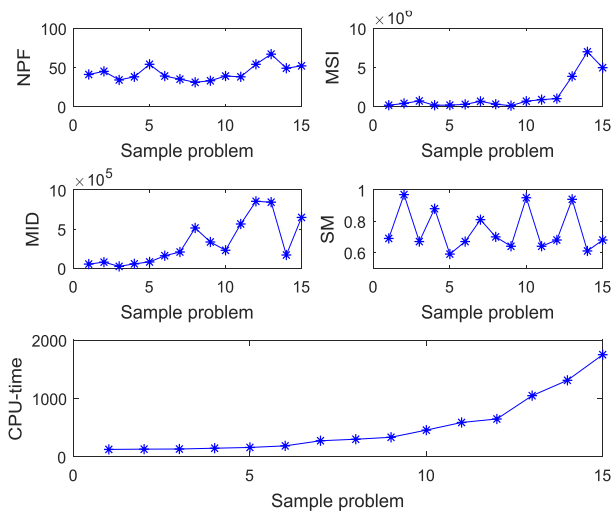
مراکز تلفیق			
درصد تغییرات	میانگین Z1	میانگین Z2	میانگین Z3
-۳۰٪	۱۷/۶۴	۹۱۳۵۶/۳۴	۴۱۶۸۵۴/۶۴
-۲۰٪	۱۸/۲۲	۹۰۶۷۴/۲۲	۴۰۱۴۶۹/۲۲
-۱۰٪	۱۸/۹۴	۸۹۳۴۱/۲۵	۳۹۷۹۶۳/۴۵
۰	۱۹/۳۱	۸۷۸۳۱/۸۱	۳۸۹۸۰۲/۳۸
+۱۰٪	۲۰/۱۴	۸۶۱۴۵/۶۷	۳۸۴۱۶۸/۶۷
+۲۰٪	۲۲/۳۶	۸۵۶۸۴/۲۰	۳۷۴۹۸۶/۰۵
+۳۰٪	۲۴/۶۷	۸۴۶۸۷/۶۶	۳۶۱۶۵۲/۰۵

با توجه به نتایج جدول (۱۴) می‌توان بیان کرد با کاهش ظرفیت مراکز تلفیق به دلیل ثابت بودن مقدار سفارش واکسن و افراد نیازمند آن، باید تعداد بیشتری از مراکز تلفیق ایجاد گردد که این امر منجر به افزایش هزینه‌های ناشی از احداث می‌گردد. از سوی دیگر به دلیل افزایش تعداد مراکز، میزان حمل و نقل در شبکه افزایش داشته و این مسئله منجر به افزایش اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از احداث و

مثال	میانگین Z1	میانگین Z2	میانگین Z3
۴	۳۰/۸۵	۴۳۵۴۲۷/۰۸	۱۲۳۶۶۳۲/۹۳
۵	۳۳/۲۴	۷۵۲۸۶۸/۴۳	۳۵۷۹۱۲۴/۰۲
۶	۳۵/۴۵	۷۳۹۴۹۴/۰۰	۵۸۴۲۰۷۲/۷۴
۷	۳۸/۳۶	۱۳۸۹۳۴۱/۹۶	۹۰۵۵۲۹۲/۴۵
۸	۴۸/۶۲	۵۶۹۳۹۱۳/۶۸	۱۰۰۵۸۰۵۲/۹۶
۹	۶۸/۵۶	۸۸۰۳۲۳۴/۹۹	۳۰۴۶۰۸۰۹/۷۷
۱۰	۷۶/۲۵	۱۱۱۸۵۰۵۹/۲۲	۳۵۴۲۴۴۲۳/۳۶
۱۱	۸۱/۲۹	۱۶۱۱۳۱۲۸/۸۱	۵۸۷۴۳۲۳۶/۰۲
۱۲	۹۶/۵۴	۱۸۱۸۳۳۷۴/۳۲	۶۴۳۳۱۶۵۵/۸۵
۱۳	۹۸/۱۰	۴۳۲۰۶۶۴۶/۶۸	۷۵۰۹۹۹۹۹/۴۵
۱۴	۱۰۰/۲۵	۷۸۹۵۰۵۶۲/۳۴	۸۶۴۶۲۴۸۲/۲۶
۱۵	۱۰۵/۲۴	۸۴۳۵۴۳۵۲/۳۵	۹۴۶۳۵۴۳۸/۲۵

جدول (۱۸). میانگین شاخص‌های ارزیابی در مثال‌های عددی سائز مختلف با الگوریتم NSGA-II

مثال	NPF	MSI	MID	SM	CPU-TIME
۱	۴۱	۱۷۰۰۹۸/۶۴	۵۲۰۷۵/۱۵	۰/۶۹	۱۲۵/۳۳
۲	۴۵	۳۹۸۸۸۰/۰۵	۷۶۹۰۷/۳۴	۰/۹۷	۱۲۹/۷۳
۳	۳۴	۷۱۵۰۱۲/۶۳	۲۲۸۷۴/۷۳	۰/۶۷	۱۳۲/۱۵
۴	۳۸	۱۷۰۷۸۲/۹۵	۵۵۴۵۷/۴۲	۰/۸۸	۱۴۵/۷۷
۵	۵۴	۱۸۱۹۲۷/۹۳	۷۹۷۳۸/۳۰	۰/۵۹	۱۵۸/۹۴
۶	۳۹	۲۸۰۵۰۵/۹۵	۱۵۹۰۰۳/۵	۰/۶۷	۱۸۶/۰۵
۷	۳۵	۶۶۸۳۷۹/۹۰	۲۰۶۴۸۹/۹	۰/۸۱	۲۷۳/۶۹
۸	۳۱	۲۹۵۸۰۸/۶۸	۵۱۳۶۰۰/۰	۰/۷۰	۲۹۹/۶۴
۹	۳۳	۱۱۶۵۵۸/۹۴	۳۳۴۷۰۳/۹	۰/۶۴	۳۳۳/۳۷
۱۰	۳۹	۶۸۳۳۳۸/۱۹	۲۲۸۴۸۵/۶	۰/۹۵	۴۵۵/۸۳
۱۱	۳۸	۸۸۷۴۳۲/۳۳	۵۶۴۷۱۹/۴	۰/۶۴	۵۸۶/۷۱
۱۲	۵۴	۱۰۱۶۵۰۲/۳	۸۵۴۳۵۵/۲	۰/۶۸	۶۴۶/۵۱
۱۳	۶۷	۳۸۵۷۸۱/۶	۸۴۳۵۶۶/۰	۰/۹۴	۱۰۴۶/۲۴
۱۴	۴۹	۶۹۹۸۴۶۵/۳	۱۶۸۳۲۵/۲	۰/۶۱	۱۳۰۹/۲۰
۱۵	۵۲	۴۹۶۸۴۶۳/۸	۶۴۸۴۶۸/۶	۰/۶۸	۱۶۴۸/۰۶



شکل (۹). میانگین شاخص‌های ارزیابی الگوریتم در مثال‌های عددی ابعاد بزرگ

با این حال الگوریتم پیشنهادی، توانسته است که این مسائل را در زمان کمتر از ۲۰۰۰ ثانیه حل کند. شکل (۹) و شکل (۱۰) نیز میانگین توابع هدف و شاخص‌های ارزیابی الگوریتم را در مثال‌های عددی مختلف نشان می‌دهد.

جدول (۱۵). اندازه مثال‌های عددی در سائزهای مختلف

مثال	R	D	C	H	A	T	J	K
۱	۶	۵	۵	۵	۴	۳	۶	۵
۲	۶	۶	۶	۶	۴	۳	۶	۶
۳	۸	۸	۷	۷	۴	۳	۶	۸
۴	۱۲	۱۲	۱۰	۱۰	۴	۴	۸	۱۰
۵	۱۵	۱۵	۱۲	۱۲	۴	۴	۱۰	۱۲
۶	۱۸	۱۸	۱۵	۱۵	۵	۴	۱۲	۱۵
۷	۲۰	۲۰	۱۸	۱۸	۵	۶	۱۵	۱۸
۸	۲۲	۲۲	۲۱	۲۰	۵	۶	۱۸	۲۰
۹	۲۴	۲۴	۲۴	۲۳	۵	۶	۲۳	۲۲
۱۰	۲۸	۲۸	۲۵	۲۵	۵	۸	۲۵	۲۴
۱۱	۳۰	۳۰	۲۸	۲۸	۶	۸	۲۸	۲۶
۱۲	۳۵	۳۵	۳۰	۳۰	۶	۸	۳۲	۲۸
۱۳	۴۰	۴۰	۳۵	۳۵	۶	۱۲	۳۵	۳۰
۱۴	۴۵	۴۵	۴۰	۴۰	۶	۱۲	۴۰	۳۵
۱۵	۵۰	۵۰	۴۵	۴۵	۶	۱۲	۴۵	۴۰

جدول (۱۶). حدود بازه‌ای پارامترهای مسأله

پارامتر	حدود بازه‌ای	پارامتر	حدود بازه‌ای
$f_j$	$\sim U[1000,2000]$	$Or_{akt}$	$\sim U[5,8]$
$Cap_{aj}$	$\sim U\left[\frac{200 J }{2}, \frac{300 J }{2}\right]$	$Or_{ajt}$	$\sim U[5,8]$
$Cap_{ak}$	$\sim U\left[\frac{80 K }{2}, \frac{120 K }{2}\right]$	$Ho_{akt}$	$\sim U[0.5,1]$
$Cap_{ac}$	$\sim U\left[\frac{500 C }{2}, \frac{600 C }{2}\right]$	$Ho_{ajt}$	$\sim U[0.5,1]$
$Cap_{ad}$	$\sim U\left[\frac{300 D }{2}, \frac{400 D }{2}\right]$	$M$	20
$Cap_{ar}$	$\sim U\left[\frac{300 R }{2}, \frac{400 R }{2}\right]$	$\mu_k$	$\sim U[5,10]$
$S_a$	$\sim U[1,2]$	$\mu_j$	$\sim U[5,10]$
$we_{hk}$	$\sim U[0.3,0.5]$	$I_{ak}^{max}$	$\sim U[20,40]$
$e_d$	$\sim U[1,2]$	$I_{aj}^{max}$	$\sim U[5,10]$
$u_r$	$\sim U[1,2]$	$X_{at}^{max}$	$\sim U[1000,1500]$
$g_c$	$\sim U[1,3]$	$C_k^{max}$	$\sim U[2,4]$
$Em_j$	$\sim U[500,1500]$	$C_j^{max}$	$\sim U[2,4]$
$Eh_k$	$\sim U[50,150]$	$P$	4
$Eh_j$	$\sim U[50,150]$	$\beta$	0.4
$Ed_{ad}$	$\sim U[50,150]$		
$n_{akt}$	$\sim U[100,125]$		$\sim U[50,75]$

جدول (۱۷). میانگین توابع هدف در مثال‌های عددی سائز مختلف با الگوریتم NSGA-II

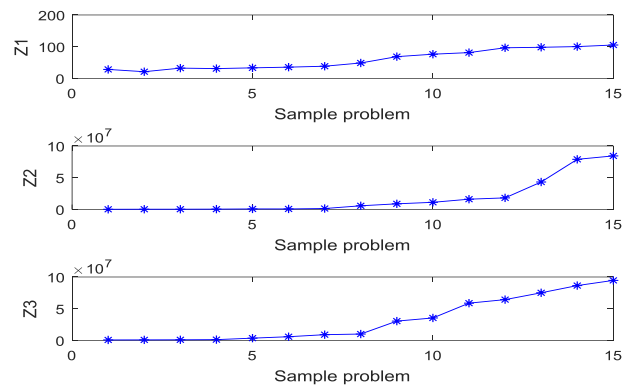
مثال	میانگین Z1	میانگین Z2	میانگین Z3
۱	۲۹/۲۸	۱۸۱۶۰۹/۲۶	۷۶۳۴۳۶/۶۸
۲	۲۱/۰۷	۲۷۲۶۴۹/۸۶	۸۵۲۴۵۴/۱۸
۳	۳۲/۴۰	۳۰۲۷۷۹/۷۴	۹۸۷۳۰۸/۳۹

به دست آمد که با بررسی جواب‌های کارای مثال عددی سایز کوچک و همچنین جبهه پارتو به دست آمده، مشاهده گردید با افزایش میانگین زمان انتظار، هزینه‌های کل مسئله کاهش یافته است. لذا هرچه زمان انتظار طولانی‌تر شده، هزینه‌های کل کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش انتشار زباله‌های مخرب زیست‌محیطی، هزینه‌های کل شبکه نیز افزایش یافته است. همچنین با تحلیل حساسیت مدل در نرخ‌های مختلف عدم قطعیت مشاهده شد، که با افزایش نرخ عدم قطعیت، تعداد افراد نیازمند واکسن در شبکه بیشتر شده و در نتیجه به دلیل محدود بودن ظرفیت مراکز و همچنین ثابت بودن دیگر پارامترها، هزینه‌های تحمیل شده بر شبکه افزایش یافته است. از سوی دیگر بیشتر شدن واکسن‌های سفارش داده شده و آماده توزیع، منجر به افزایش میانگین زمان انتظار در مراکز توزیع نیز شده است. از سوی دیگر بیشتر شدن تعداد واکسن‌ها و همچنین زباله‌های ناشی از آن‌ها، میزان انتشار زباله‌های مخرب زیست‌محیطی را نیز افزایش داده است. در نهایت در تحلیلی دیگر مشاهده گردید که با کاهش ظرفیت مراکز تلقیح به دلیل ثابت بودن مقدار سفارش واکسن و افراد نیازمند آن، بایستی تعداد بیشتری از مراکز تلقیح ایجاد گردد که این امر منجر به افزایش هزینه‌های ناشی از احداث می‌گردد. از سوی دیگر به دلیل افزایش تعداد مراکز، این مسئله منجر به افزایش زباله‌های مخرب زیست‌محیطی ناشی از احداث شده است. در حالی که با کاهش ظرفیت و افزایش تعداد مراکز تلقیح، به دلیل کاهش نرخ ورودی به هر مرکز، طول صف در آن مرکز کاهش یافته و این امر سبب کاهش میانگین زمان انتظار شده است.

پس از اعتبار سنجی مدل، ۱۵ مثال عددی در سایزهای مختلف نیز طراحی و با الگوریتم پیشنهادی حل شد که نتیجه آن نمایی بودن زمان حل مسئله با افزایش اندازه مسئله بود. همچنین روش پیشنهادی کارایی خود را به لحاظ دستیابی به نتایج بهتر در کمتر از ۲۰۰۰ ثانیه اثبات کرد.

### مراجع

- [1] S. T. Alam, S. Ahmed, S. M. Ali, S. Sarker, G. Kabir, and A. Ul-Islam, 'Challenges to COVID-19 vaccine supply chain: Implications for sustainable development goals', *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 239, p. 108193, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijpe.2021.108193.
- [2] J. Valizadeh et al., 'Designing an optimization model for the vaccine supply chain during the COVID-19 pandemic', *Expert Syst. Appl.*, vol. 214, p. 119009, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2022.119009.
- [۳] باقری نژاد، جعفر و گل محمدی، زهرا. (۱۳۹۵). زنجیره تأمین واکسن و راهکارهایی برای بهبود این زنجیره، اولین کنفرانس بین‌المللی کاربرد پژوهش و تحقیق در علوم و مهندسی، تهران، <https://civilica.com/doc/584585>
- [۴] جادران، فاطمه، و یزدانی، حمیدرضا. (۱۳۹۹). شناسایی مؤلفه‌های سرمایه اجتماعی کلان برای مقابله با پیامدهای ویروس کرونا. فصلنامه انجمن علوم مدیریت ایران. ۱۵ (۵۹)، ۶۳-۹۴.
- [5] Yadav, A., & Iqbal, B. A. (2021). Socio-economic scenario of South Asia: An overview of impacts of



شکل (۱۰). میانگین مقادیر توابع هدف مسئله در مثال‌های عددی ابعاد بزرگ

### ۹. نتیجه و جمع‌بندی

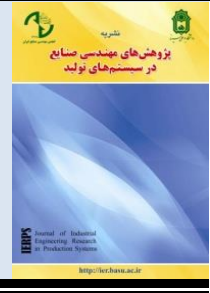
اهمیت توسعه واکسن کرونا در جهان، رساندن مؤثر و ایمن واکسن‌ها به مناطقی که تحت تأثیر این بیماری همه‌گیر قرار گرفته‌اند، پدیده‌ای دشوار است. هدف از پژوهش حاضر طراحی زنجیره توزیع و تلقیح واکسن کرونا در کشور ایران با توجه به محدودیت‌های کمبود واکسن، تاخیر در تحویل واکسن‌ها، همه‌گیری کرونا، عدم رعایت مردم در پیشگیری از کرونا، تحریم‌ها و محدودیت‌های موجود در تهیه واکسن‌ها، اهمیت اقشار و گروه‌های مختلف مردمی چه از نظر سنی، چه از نظر شغلی، چه از نظر اولویت بالایی و اولویت پایینی افراد در همه گروه‌های سنی است. لذا پژوهش حاضر در پی ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای بهینه‌سازی زنجیره توزیع و تلقیح واکسن در صنعت داروسازی با در نظر گرفتن مسئله مکان‌یابی-تخصیص، موجودی تحت عدم قطعیت تقاضا بود. برای این امر ابتدا یک شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته شد که شامل سطوح انبار استانی، مراکز تلقیح جدید و موجود، مراکز جمع‌آوری زباله‌های واکسن، مراکز بازیافت و انهدام است.

در این شبکه سیستم صف در توزیع واکسن برای متقاضیان در نظر گرفته شده است که تعیین تعداد خدمت‌دهنده‌های هر مرکز به صورت یک متغیر لحاظ شد. هدف اصلی از ارائه این مدل دستیابی به کمترین هزینه، کمترین میزان اثرات مخرب زیست‌محیطی و کمترین میانگین زمان انتظار در صف بود. جهت دستیابی به اهداف فوق تصمیمات استراتژیکی نظیر مکان‌یابی مراکز تلقیح جدید و تصمیمات تاکتیکی نظیر تعیین مقدار سفارش واکسن، تعیین مقدار موجودی انتهای دوره انبارهای داخلی مراکز تلقیح و مدیریت جریان زباله‌های واکسن بود. از آنجایی که تعداد افراد متقاضی واکسن یا همان تقاضا به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده بود، از روش برنامه‌ریزی فازی جهت کنترل این پارامتر استفاده شد. لذا این پارامتر به صورت خوشبینانه، محتمل و بدبینانه در مدل وجود داشت که با استفاده از نرخ عدم قطعیت کنترل گردید.

مدل ریاضی با توجه به غیرخطی بودن و همچنین NP-Hard بودن آن از الگوریتم NSGA-II برای حل مسئله استفاده گردید. پس از حل یک مثال عددی در سایز کوچک، ۲۹ جواب کارای مختلف

- [22] Tavana, M., Govindan, K., Nasr, A. K., Heidary, M. S., & Mina, H. (2021). A mathematical programming approach for equitable COVID-19 vaccine distribution in developing countries. *Annals of Operations Research*, 1-34.
- [23] Dai, D., Wu, X., & Si, F. (2021). Complexity analysis of cold chain transportation in a vaccine supply chain considering activity inspection and time-delay. *Advances in Difference Equations*, 2021(1), 1-18.
- [24] Darmawan, A., Wong, H., & Thorstenson, A. (2021). Supply chain network design with coordinated inventory control. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 145, 102168.
- [25] Shamsi Gamchi, N., Torabi, S. A., & Jolai, F. (2021). A novel vehicle routing problem for vaccine distribution using SIR epidemic model. *Or Spectrum*, 43(1), 155-188.
- [26] Chaleshtori, A. E., Jahani, H., & Aghaie, A. (2020). Bi-objective optimization approach to a multi-layer location-allocation problem with jockeying. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106740.
- [27] Lim, J., Norman, B. A., & Rajgopal, J. (2022). Redesign of vaccine distribution networks. *International Transactions in Operational Research*, 29(1), 200-225.
- [28] Yang, Y., Bidkhor, H., & Rajgopal, J. (2021). Optimizing vaccine distribution networks in low and middle-income countries. *Omega*, 99, 102197.
- [29] Alizadeh, M., Paydar, M. M., Hosseini, S. M., & Makui, A. (2021). Influenza vaccine supply chain network design during the COVID-19 pandemic considering dynamical demand. *Scientia Iranica*.
- [30] de Carvalho, M. I., Ribeiro, D., & Barbosa-Povoa, A. P. (2019). Design and planning of sustainable vaccine supply chain. *Pharmaceutical Supply Chains-Medicines Shortages*, 23-55.
- [31] Nasrollahi, M., & Razmi, J. (2021). A mathematical model for designing an integrated pharmaceutical supply chain with maximum expected coverage under uncertainty. *Operational Research*, 21, 525-552.
- [32] Ng, C. T., Cheng, T. C. E., Tsadikov, D., Levner, E., Elalouf, A., & Hovav, S. (2018). A multi-criterion approach to optimal vaccination planning: Method and solution. *Computers & Industrial Engineering*, 126, 637-649.
- [33] Dasaklis, T. K., Rachaniotis, N., & Pappis, C. (2017). Emergency supply chain management for controlling a smallpox outbreak: the case for regional mass vaccination. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 4(1), 27-40.
- [34] Savadkoobi, E., Mousazadeh, M., & Torabi, S. A. (2018). A possibilistic location-inventory model for multi-period perishable pharmaceutical supply chain network design. *Chemical Engineering Research and Design*, 138, 490-505.
- [35] Martonosi, S. E., Behzad, B., & Cummings, K. (2021). Pricing the COVID-19 vaccine: A mathematical approach. *Omega*, 103, 102451.
- [36] Sinha, P., Kumar, S., & Chandra, C. (2023). Strategies for ensuring required service level for COVID-19 herd immunity in Indian vaccine supply chain. *European journal of operational research*, 304(1), 339-352.
- [37] Niu, B., Li, Q., & Chen, L. (2020). Exclusive vs. competitive retailing: overseas vaccine supplier's channel selection considering profit and social responsibility objectives. *Computers & Industrial Engineering*, 144, 106499.
- [38] Robbins, M. J., & Lunday, B. J. (2016). A bilevel formulation of the pediatric vaccine pricing problem. *COVID-19. South Asian Survey*, 28(1), 20-37.
- [6] Pereira, M., & Oliveira, A. M. (2020). Poverty and food insecurity may increase as the threat of COVID-19 spreads. *Public health nutrition*, 23(17), 3236-3240.
- [7] <https://www.who.int/about/governance/constitution>
- [۸] دیرنگ، فائزه و جبل‌عاملی، محمد سعید. (۱۳۹۹). ارائه رویکرد استوار طراحی شبکه زنجیره‌تأمین منطقه‌ای واکسن در حالت عدم قطعیت پارامترها (مطالعه موردی). *دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه علم و صنعت ایران*.
- [9] Christopher, M. (2016). *Logistics & supply chain management*. Pearson Uk.
- [۱۰] کشانی‌شیدا. (۱۴۰۱). شناسایی، ارزیابی و الویت‌بندی شاخص‌های مؤثر بر تاب‌آوری زنجیره‌تأمین با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: کارخانه صنایع غذایی زرین شاد سپاهان).
- [11] Scavarda, L. F., De Carvalho, A. B., & Vieira, M. D. S. (2006). A reference matrix for information system in supply chain management. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 3(1), 21-48.
- [12] Buhat, C. A. H., Duero, J. C. C., Felix, E. F. O., Rabajante, J. F., & Mamplata, J. B. (2021). Optimal allocation of COVID-19 test kits among accredited testing centers in the Philippines. *Journal of healthcare informatics research*, 5, 54-69.
- [13] Amorim, P., Günther, H. O., & Almada-Lobo, B. (2012). Multi-objective integrated production and distribution planning of perishable products. *International Journal of Production Economics*, 138(1), 89-101.
- [14] Park\*, Y. B. (2005). An integrated approach for production and distribution planning in supply chain management. *International Journal of Production Research*, 43(6), 1205-1224.
- [15] Bettampadi, D., Lepkowski, J. M., Sen, A., Power, L. E., & Boulton, M. L. (2021). Vaccination inequality in India, 2002–2013. *American Journal of Preventive Medicine*, 60(1), S65-S76.
- [16] Lee, S., Golinski, M., & Chowell, G. (2012). Modeling optimal age-specific vaccination strategies against pandemic influenza. *Bulletin of mathematical biology*, 74(4), 958-980.
- [17] Hovav, S., & Tsadikov, D. (2015). A network flow model for inventory management and distribution of influenza vaccines through a healthcare supply chain. *Operations Research for Health Care*, 5, 49-62.
- [18] Jahani, H., Chaleshtori, A. E., Khaksar, S. M. S., Aghaie, A., & Sheu, J. B. (2022). COVID-19 vaccine distribution planning using a congested queuing system—A real case from Australia. *Transportation Research Part e: Logistics and Transportation Review*, 163, 102749.
- [19] Bani, E. A., Fallahi, A., Varmazyar, M., & Fathi, M. (2022). Designing a sustainable reverse supply chain network for COVID-19 vaccine waste under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 174, 108808.
- [20] Sazvar, Z., Tafakkori, K., Oladzad, N., & Nayeri, S. (2021). A capacity planning approach for sustainable-resilient supply chain network design under uncertainty: A case study of vaccine supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 159, 107406.
- [21] Zandkarimkhani, S., Mina, H., Biuki, M., & Govindan, K. (2020). A chance constrained fuzzy goal programming approach for perishable pharmaceutical supply chain network design. *Annals of Operations Research*, 295, 425-452.

- multistage logistics network design by using hybrid evolutionary algorithm. *Computers & industrial engineering*, 56(3), 854-873.
- [47] Gen, M., Lin, L., Yun, Y., & Inoue, H. (2018). Recent advances in hybrid priority-based genetic algorithms for logistics and SCM network design. *Computers & Industrial Engineering*, 125, 394-412.
- [48] Hamzadayi, A., & Yildiz, G. (2012). A genetic algorithm based approach for simultaneously balancing and sequencing of mixed-model U-lines with parallel workstations and zoning constraints. *Computers & industrial engineering*, 62(1), 206-215.
- [49] Chitra, C., & Subbaraj, P. (2012). A nondominated sorting genetic algorithm solution for shortest path routing problem in computer networks. *Expert systems with applications*, 39(1), 1518-1525.
- [50] Babaeinesami, A., Tohidi, H., Ghasemi, P., Goodarzi, F., & Tirkolaee, E. B. (2022). A closed-loop supply chain configuration considering environmental impacts: a self-adaptive NSGA-II algorithm. *Applied Intelligence*, 52(12), 13478-13496.
- [51] Ransikarbum, K., & Mason, S. J. (2022). A bi-objective optimisation of post-disaster relief distribution and short-term network restoration using hybrid NSGA-II algorithm. *International Journal of Production Research*, 60(19), 5769-5793.
- [52] Lin, C. C., Liu, W. Y., Peng, Y. C., & Lee, T. K. (2023). Altruistic production and distribution planning in the multilayer dual-channel supply chain: Using an improved NSGA-II with lion pride algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 176, 108884.
- [53] Chang, Y. C., Chang, K. H., & Zheng, C. P. (2022). Application of a Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm to Solve a Bi-Objective Scheduling Problem Regarding Printed Circuit Boards. *Mathematics*, 10(13), 2305.
- European Journal of Operational Research*, 248(2), 634-645.
- [39] Samii, A. B., Pibernik, R., Yadav, P., & Verecke, A. (2012). Reservation and allocation policies for influenza vaccines. *European Journal of Operational Research*, 222(3), 495-507.
- [40] Yan, X., & Zaric, G. S. (2017). Influenza vaccine supply chain with vaccination promotion effort and its coordination. *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 7(1), 53-72.
- [۴۱] کوچک زاده، زهرا، غلامی، سعیده، و رحمانی، دنیا. (۱۴۰۱). ارائه مدل بهینه‌سازی استوار برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته سبز کالاها فاسدشدنی. *نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید*، ۱۰(۲۰)، ۱۱۳-۱۳۱. doi: 10.22084/ier.2023.26822.2095
- [۴۲] صادقیان، رامین و اسفندیاری، رضا. (۱۴۰۱). طراحی شبکه زنجیره‌تأمین چندسطحی بر مبنای اهداف چندگانه قابلیت اطمینان، هزینه و زمان تحویل با استفاده از روش حل فراابتکاری. *نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید*، ۱۰(۲۰)، ۱۱۱-۱۱۳. doi: 10.22084/ier.2023.25839.2072۹۱-۱۱۱
- [43] Chaleshtori, A. E., Jahani, H., & Aghaie, A. (2020). Bi-objective optimization approach to a multi-layer location-allocation problem with jockeying. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106740.
- [44] Gen, M., Altıparmak, F., & Lin, L. (2006). A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding. *OR spectrum*, 28, 337-354.
- [45] Kim, K. W., Gen, M., & Yamazaki, G. (2003). Hybrid genetic algorithm with fuzzy logic for resource-constrained project scheduling. *Applied soft computing*, 2(3), 174-188.
- [46] Lin, L., Gen, M., & Wang, X. (2009). Integrated



DOI: 10.22084/IER.2023.27619.2119

## Vaccine Distribution and Inoculation Chain Design in Pandemic Conditions (Case Study of Corona Vaccine)

A. Makui<sup>1\*</sup>, M. Mahdikhani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> M. A. in Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 2023/3/10

Accepted: 2023/6/17

#### Keywords:

Location-Allocation  
Inventory  
Vaccine Supply Chain  
Distribution Chain Design  
M/M/m/C queue  
Queuing Theory  
Corona

### ABSTRACT

This research has presented a three-objective nonlinear mathematical programming model for optimizing the vaccine distribution chain in the pharmaceutical industry. With regard to stability issues, this involves considering location allocation, inventory under uncertain demand, and a crowded queue system with regard to stability and minimizing vaccination waiting times, ordering costs, vaccine holding costs, establishing new vaccination centers, and reducing harmful environmental waste caused by vaccinations and establishing new vaccination centers. As this problem is NP-hard, the NSGA\_II algorithm was used. In a numerical example, sensitivity analysis showed that increasing the average waiting time decreased the total costs of the problem, while increasing the amount of generated garbage increased the total costs of the network. Moreover, a sensitivity analysis of the model at various levels of uncertainty revealed that with an increase in uncertainty, the network will have more people who need vaccines, which increases the network's costs. Due to the limited capacity of the centers and the fixed parameters of the network, costs increase. In contrast, the increased number of vaccines ordered and ready for distribution results in an increase in the average waiting time in distribution centers and waste. As a result of reducing the capacity of inoculation centers due to the fixed amount of vaccine orders, more centers were built, resulting in an increase in construction costs and increase in greenhouse gases due to the construction of a new center and transportation. Thus, the rate of entry to each center will decrease, as well as the length of the queue, ultimately leading to a decrease in average waiting time. In addition, 15 numerical examples have been examined to demonstrate the efficiency and design of the proposed algorithm.

\* Corresponding author. A. Makui

Tel.: 021-73225004; E-mail address: amakui@iust.ac.ir