

توسعه یک مدل ریاضی برای شبکه زنجیره تأمین قراردادی برای تولید روغن و دانه روغنی با ملاحظه ابعاد امنیت غذایی و حمایت از تولید داخل

مصطفی فرخیانی^۱، حسینعلی حسن پور^{۲*}، حسین غفاری توران^۳، علی قربان پور^۴

۱. دکتری مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران
۲. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران
۳. استادیار گروه مدیریت لجستیک، دانشکده مدیریت و برنامه‌ریزی راهبردی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران
۴. کارشناسی ارشد علوم تغذیه، گروه تغذیه و بهداشت مواد غذایی، دانشکده بهداشت، دانشگاه بقیه الله (عج)، تهران، ایران

خلاصه

در جهان امروز یکی از مشکلات اساسی بشر تأمین نیازهای غذایی است، به‌گونه‌ای که امنیت غذایی و افزایش کیفیت به‌عنوان اهداف مهم دولت‌ها قرار گرفته است. عوامل مؤثر بر امنیت غذایی شامل قابل دسترس بودن مواد غذایی (موجود بودن)، استطاعت مالی برای دسترسی به مواد غذایی، مفید بودن مواد غذایی (کیفیت) و پایداری امنیت غذایی در طول زمان از طریق مدیریت ملاحظات اقتصادی و اجتماعی، منابع آب و کیفیت خاک است. پژوهش حاضر، مدلی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین محصولات غذایی اساسی با ملاحظه ابعاد امنیت غذایی و رویکرد قراردادی، ارائه و حل می‌کند. شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه در این تحقیق، شامل تأمین‌کنندگان (دانه‌های روغنی)، تولیدکنندگان (روغن کلزا و آفتابگردان) و دو نوع مشتری است. در این تحقیق ابتدا با بررسی تحقیقات گذشته، ابعاد امنیت غذایی و عوامل مؤثر بر زنجیره امنیت غذایی، شناسایی شد. سپس برای انجام تحقیق میدانی، دو پرسش‌نامه تدوین شد. از طریق پرسش‌نامه اولیه، ابعاد امنیت غذایی و معیارهای مرتبط با آن، مورد تأیید خبرگان تحقیق قرار گرفت و سپس با استفاده از پرسش‌نامه نهایی، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر امنیت غذایی زنجیره تأمین مورد مطالعه، شناسایی شد. در مرحله بعد، براساس عوامل شناسایی شده، مدل ریاضی برای زنجیره تأمین مبتنی بر رویکرد قراردادی و حمایت از تولید داخل، ایجاد و حل گردید. مسأله در ابعاد کوچک با استفاده از روش «معیار جامع» حل شد. مدل ریاضی چندهدفه ارائه شده در این پژوهش، از نوع مسائل NP-hard است، بنابراین از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید چندهدفه (MOSA) و الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) برای حل مدل استفاده شده است. به‌منظور اعتبارسنجی، نتایج این الگوریتم‌ها با نتایج حل دقیق روش معیار جامع، مقایسه شده است. همچنین نتایج حاصل از دو الگوریتم MOSA و NSGA-II نیز با یکدیگر مقایسه شده است که نتایج مقایسات، نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم فراابتکاری MOSA می‌باشد. همچنین نتایج عددی نشان داد که میزان جریان محصول در دوره‌های چهارم و پنجم با افزایش قابل‌توجهی مواجه است. با بررسی تحلیل پارامتریک و جواب‌های پارتو نیز مشخص گردید که سود اعضای زنجیره تأمین همسو بوده و با افزایش سود تأمین‌کننده و تولیدکننده، رضایت‌مندی مشتریان نیز افزایش می‌یابد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۳/۰۸/۰۶

بازنگری ۱۴۰۳/۱۰/۱۴

پذیرش ۱۴۰۳/۱۰/۲۱

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

طراحی شبکه

زنجیره تأمین

امنیت غذایی

پایداری امنیت غذایی

عوامل مؤثر بر امنیت غذایی

۱. مقدمه

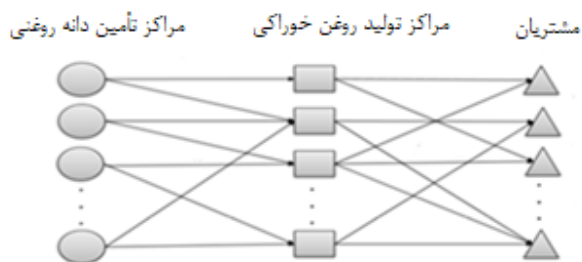
تقسیم‌بندی، چهار رکن اساسی امنیت غذایی را در دسترس بودن، قابلیت دستیابی از جهات فیزیکی و اقتصادی، کیفیت و ثبات (پایداری) تعریف می‌کند [۲]. در تحقیق قادیکلای و دیوکلای [۴]، بعد پایداری با چهار معیار اصلی حکمرانی خوب، تمامیت زیست‌محیطی، انعطاف‌پذیری اقتصادی و رفاه اجتماعی تعریف شده است. برای برآورده‌سازی پایداری از معیار انعطاف‌پذیری اقتصادی، شاخص‌های درآمد سرانه و حاشیه سود استفاده شده است. درواقع بعد پایداری تولید و دسترسی به مواد غذایی در طول زمان و بدون اختلال از طریق چهار معیار ذکر شده است.

جدول (۱). عوامل مستقیم و غیرمستقیم مؤثر بر زنجیره تأمین

غذایی [۳]

تغییرات تعرفه واردات مواد غذایی	عوامل مستقیم
قیمت محصولات کشاورزی و نوسانات آن	
یارانه‌های بخش کشاورزی	
تحقیق و توسعه بخش کشاورزی	
بیمه محصولات کشاورزی	عوامل غیرمستقیم
کشت فراسرزمینی	
تغییرات اقلیمی	
سیاست‌های اقتصاد کلان	
سیاست‌های پولی	
سیاست‌های مالی	
تغییرات قیمت حامل‌های انرژی	
امنیت ملی	
امنیت آب	
آموزش و سطح تحصیلات	
سواد تغذیه‌ای	
رشد اقتصادی	
شهرنشینی	

مبحث امنیت غذایی و وجود یک زنجیره تأمین مناسب و مطمئن مسأله‌ای بسیار مهمی است که توجه ویژه‌ای را می‌طلبد. لذا در این پژوهش طراحی یک شبکه زنجیره تأمین برای محصولات اساسی (روغن خوراکی) مبتنی بر ابعاد اصلی امنیت غذایی مدنظر قرار گرفته است. منظور از مواد غذایی اساسی، محصولاتی مثل «برنج، گوشت و مرغ و روغن خوراکی» است که در تحقیق حاضر، روغن خوراکی به عنوان مطالعه موردی درنظر گرفته شده است. مدل موردنظر این تحقیق همانند مدل شکل (۱) باشد.



شکل (۱). زنجیره تأمین پیشنهادی

غذا بخش مهمی از زندگی همه انسان‌ها را تشکیل می‌دهد و در این میان صنایع غذایی به عنوان حلقه واسط بین کشاورزی و دامپروری با مصرف‌کنندگان نهایی نقش مهمی در مدیریت زنجیره تأمین فرآورده‌های غذایی و توازن تولید و مصرف دارد. در گذشته فروشگاه‌های خرده‌فروشی همانند آنچه امروز شاهد آن هستیم به وفور یافت نمی‌شد. تبلیغات مواد غذایی بسیار کمتر بود و عمده افراد برای تأمین مواد غذایی فصلی، به بازارهای محلی مراجعه می‌کردند. امروزه با افزایش ارتباطات و دسترسی آسان و آزاد به اطلاعات، تغییراتی در رقابت بین واحدهای تولید و توزیع محصولات غذایی ایجاد شده است و این واحدها در تلاش هستند تا با روش‌های نوین مدیریت کسب‌وکار به شناسایی و تأمین مناسب نیازهای مصرف‌کنندگان بپردازند. همچنین پیشرفت‌های علمی که باعث افزایش کیفیت سلامت و ماندگاری بیشتر مواد غذایی شده است، سبک‌ها و رژیم‌های غذایی ما را نیز دچار دگرگونی کردند [۱].

صنایع غذایی در دهه‌های اخیر دچار تحولات عمده شده است. حرکت و مهاجرت افراد به منظور یافتن کار مناسب، منجر به تقاضا برای محصولات غذایی در سراسر دنیا شده است و تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان ملزم به انطباق خویش با این تغییرات تقاضا می‌باشند. آنچه نقش عمده‌ای در موفقیت یا شکست یک زنجیره تأمین مواد غذایی ایفا می‌کند "امنیت غذایی" است و این متغیر یکی از اصلی‌ترین و چالش‌برانگیزترین موضوع در این زنجیره می‌باشد.

مفهوم امنیت غذایی اولین بار در سال ۱۹۷۴ در کنفرانس جهانی غذا در رم مطرح شد. براساس تعریف سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد (فائو) در سال ۲۰۰۹، امنیت غذایی هنگامی وجود دارد که همه‌ی مردم، در همه‌ی اوقات، دستیابی فیزیکی و اقتصادی به غذای کافی، ایمن و مغذی که نیازها و ترجیحات رژیم غذایی آن‌ها را برای یک زندگی فعال و سالم برآورده می‌کند، داشته باشند. وضعیت امنیت غذایی در هر کشوری، می‌تواند به عنوان خروجی اصلی سیستم‌های غذایی مربوط به آن کشور درنظر گرفته شود. اگرچه افزایش کارایی و بهره‌وری سیستم‌های مواد غذایی موجب کاهش بروز پدیده‌ی گرسنگی و بهبود وضعیت تغذیه‌ی افراد شده است اما این موفقیت با نگرانی‌هایی جدی در مورد جوانب گوناگون سیستم‌های غذایی نظیر عدم تعادل در رژیم غذایی روزانه‌ی افراد و غیره روبه‌روست که می‌توانند اهداف اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی و نتیجتاً امنیت غذایی را تهدید کنند [۲]. برخی مراکز معتبر جهانی، سه بُعد اصلی را برای سنجش میزان امنیت غذایی کشورها مدنظر قرار می‌دهند که شامل: (۱) در دسترس بودن (۲) توانایی مالی برای تهیه کردن و (۳) کیفیت و ایمنی می‌باشد [۲].

همچنین در زنجیره تأمین امنیت غذایی دو دسته عوامل مستقیم و غیرمستقیم تأثیرگذار هستند. ابعاد امنیت غذایی می‌توانند توسط این عوامل برآورده شوند که در پایان پیشینه تحقیق ارتباط میان آن‌ها بیان می‌شود. در جدول (۱) این عوامل آورده شده‌اند [۳].

سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد نیز به عنوان کامل‌ترین

باشد. علم و همکاران [۷] با بررسی گسترده در زمینه‌ی عوامل مؤثر در دسترسی خانواده‌ها به مواد غذایی به این نتیجه رسیدند که استراتژی‌های سیاسی، اقتصادی و اجتماعی و همچنین عوامل طبیعی و جغرافیایی منجر به شرایط نامناسب دسترسی خانواده‌ها به مواد غذایی می‌شود. نسا و همکاران [۸] با بررسی‌هایشان نشان دادند که ماده غذایی غالب در اندونزی ماهی می‌باشد. در نتیجه تحلیل و تحقیقات آن‌ها نشان داد که زنان ساحلی در سلامت و بهره‌وری غذایی نقش عمده‌ای ایفا می‌کنند. آن‌ها در حل مسأله مورد نظر خود از روش‌های کیفی استفاده کردند. کامپی و همکاران [۹] بر مبنای اهداف توسعه پایدار و استخراج اطلاعات تولید کشورها از فائو برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۳، یک شبکه‌ای از محصولات غذایی برای کشورهای تولیدکننده ایجاد کردند. آن‌ها در مطالعه خود کشورها را بر اساس توانایی تولید و اثربخشی تولیداتشان رتبه‌بندی کردند. آن‌ها نشان دادند که رقابت کشورها و همچنین پایداری آن‌ها به الگوهای متنوع، سرانه تولید را در زنجیره غذایی و امنیت غذایی افزایش داده، اما ممکن است بروی پایداری اثر منفی داشته باشد. اما آن‌ها با تعادلی که ایجاد کردند توانستند تعادلی را بین دستیابی به امنیت غذایی و بهبود پایداری به صورت همزمان ایجاد کنند. علم و همکاران [۱۱] بحث پایداری و امنیت غذایی را تحت شرایط ریسک با اثرات موجی در زنجیره تأمین مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای حل مسأله خود از روش تفسیری ساختاری استفاده کردند. در تحقیق آن‌ها ۱۸ محرک شناسایی شد که بعد از تحلیل و بررسی مشاهده شد که ۵ محرک تأثیر بیشتری در کاهش اثرات موجی در زنجیره تأمین مواد غذایی دارند. ام‌حامد و همکاران [۱۰] امنیت غذایی در شرایط بحرانی زنجیره تأمین در قطر را بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که قطر در حال تبدیل از یک کشور واردکننده مواد غذایی به یک کشور تولیدکننده و حتی صادرکننده می‌باشد. باراکات و همکاران [۱۱] اثر جنگ بر امنیت غذایی در کشور اوکراین و همچنین خاورمیانه را مطالعه و بررسی کردند. بررسی آن‌ها به وضوح نشان داد که اقدامات بشردوستانه و تلاش برای توسعه آن تأثیر شگرفی در کاهش ناامنی غذایی دارد. ساگی و گوکارن [۱۲] یک رویکرد با چند ذینفع باهدف شناسایی معیارهای کلیدی اثرگذار در کاهش کمبود غذا در زنجیره تأمین مواد غذایی هند، ایجاد کردند. تحقیق آن‌ها نشان داد که حمایت دولت، مشارکت زنجیره، حمایت فناورانه، نگرش مصرف‌کننده و التزامات مدیریتی ۵ معیار اصلی در زنجیره تأمین مواد غذایی هستند. تونلی و همکاران [۱۳] در تحقیق خود نشان دادند که رقابت‌پذیری غیرمتمرکز منجر به افزایش امنیت غذایی می‌گردد. همچنین تحقیق آن‌ها ثابت کرد که تولید غیرمتمرکز متکی به هزینه حمل‌ونقل و اختلالات زنجیره تأمین می‌باشد. شلیا و همکاران [۱۴] از روش‌های پیش‌بینی کشاورزی برای افزایش بازدهی محصولات کشاورزی استفاده کردند. کانینگام و همکاران [۱۵] یارانه‌های غذایی و دریافت رژیم غذایی را در یک منطقه دورافتاده از هند در زمینه جهانی شدن محیط‌های غذایی بررسی کردند. هاشم و همکاران [۱۶] با بررسی اثر

در این مدل منظور از مراکز تأمین دانه روغنی، کشاورزان و مزارعی هستند که مواد اولیه تهیه روغن خوراکی (کلزا و آفتابگردان) را تأمین می‌کنند. منظور از مراکز تولید روغن خوراکی، کارخانه‌های فرآوری هستند که روغن تولید می‌کنند.

مفروضات اولیه مدل موردنظر این تحقیق به صورت زیر می‌باشند:

- ۱) مدل به صورت چنددوره‌ای و چندمحصولی در نظر گرفته شده است.
- ۲) هر چهار مؤلفه اصلی امنیت غذایی یعنی تولید (موجودیت)، دسترسی‌پذیری، کیفیت و پایداری باید برآورده شود.
- ۳) تقاضای تمام مناطق مشتریان باید برآورده گردد.
- ۴) برای ارضای محدودیت دسترسی‌پذیری، مؤلفه قیمت و تعرفه‌های دولتی در مدل اعمال می‌شوند.
- ۵) برای بررسی پایداری امنیت غذایی، پارامترهای مربوط به درآمد سرانه و حاشیه سود (مرتبط با ملاحظات اقتصادی مفهوم پایداری) در مدل دیده می‌شوند.

در یک زنجیره تأمین برای هماهنگ ساختن اجزا به منظور حداکثر کردن سود کل زنجیره، از ابزاری به نام قرارداد تأمین استفاده می‌شود. قراردادهای تأمین ابزاری قدرتمند هستند که به وسیله آن‌ها از مناسب بودن عرضه و تقاضا برای محصول نهایی اطمینان حاصل می‌شود. طراحی قرارداد یک راهبرد اصلی برای تنظیم انتظارات قراردادی موجود در بین شرکای زنجیره تأمین برای مدیریت ریسک است.

مدل‌های قراردادی مختلفی در زنجیره تأمین وجود دارد. از جمله «قرارداد تسهیم سود، قرارداد قیمت عمده‌فروشی و قرارداد تعرفه دوبخشی». از آنجا که در تحقیق حاضر از «قرارداد تسهیم سود» استفاده می‌شود، در ادامه توضیح داده می‌شود:

قرارداد تسهیم سود: این قرارداد در زنجیره تأمین به این شکل تعریف می‌شود که تأمین‌کننده، کالایی را به قیمت عمده‌فروشی که زیر قیمت تمام‌شده تولید است، به خرده‌فروش می‌فروشد. در عوض، خرده‌فروش قول می‌دهد که درصدی از سودش را به تأمین‌کننده بدهد [۳].

۲. پیشینه و مبانی نظری

در این بخش پیشینه موضوع به صورت خلاصه در دو بخش ابعاد امنیت غذایی و مدل‌سازی ریاضی در ادامه آورده شده‌اند.

۲-۱. ابعاد امنیت غذایی

با پیدایش قحطی در بنگلادش و سایر مناطق دنیا در دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، یک توجه خاص جهانی در حوزه شناخت راه‌های مبارزه با گرسنگی در بخش‌های عظیمی از جهان در حال توسعه ایجاد گردید [۵]. در این قسمت سعی می‌شود تحقیقاتی که موضوع دستیابی افراد به مواد غذایی را مورد بررسی قرار داده‌اند، مرور و بررسی گردند. بارچی و مورو [۶] با استفاده از طیف گسترده‌ای از رویکردهای مختلف امنیت غذایی را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها فرایند زنجیره تأمین غذایی از دسترسی تا بهره‌وری را از طریق متدلوژی‌های جدیدی ارزیابی کرده و به این نتیجه رسیدند که عدم امنیت غذایی می‌تواند ناشی از عدم برخورداری از آموزش کافی و همچنین عدم توجه به مسائل بهداشتی

شرایط عدم قطعیت مورد بحث قرار دادند. آن‌ها در مدل خود برای جلوگیری از اختلال، راهبرد قرارداد با تأمین کنندگان قابل اعتماد با رویکرد استوار را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که عدم قطعیت، تقاضا و سفارش را افزایش می‌دهد. قلیان جویباری و همکاران [۲۵] شبکه زنجیره تأمین غذایی برای پایداری و ثبات زعفران را ایجاد کردند. آن‌ها جهت تحلیل مدل مورد نظر خود از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و همچنین مدل‌سازی استفاده کرده و هزینه‌های زنجیره تأمین را کمینه کردند. پاتیدار و آگراول [۲۶] یک زنجیره تأمین مواد غذایی برای اقلام فاسدشدنی در هندوستان را طراحی کردند. آن‌ها در مسأله خود نشان دادند که حمایت از تولید داخل، باعث افزایش سود در زنجیره می‌شود. همچنین آذب و همکاران [۲۷] یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح زنجیره تأمین پایدار مواد غذایی را طراحی کردند. مدل آن‌ها، حمل‌ونقل، موجودی، فرآیند تقاضا و دورریز را در نظر می‌گیرد. آن‌ها فسادپذیری و پایداری را در مدل خود لحاظ کردند. مدل آن‌ها برای زنجیره تأمین شکر به کار برده شد و امنیت غذایی و پایداری زنجیره تأمین را افزایش دادند. رهبری و همکاران [۲۸] زنجیره تأمین نیشکر را تحت شرایط عدم قطعیت و بررسی ابعاد پایداری با در نظر گرفتن تصمیمات عملیاتی مورد مطالعه قرار دادند.

حمدی‌اصل و همکاران [۲۹] یک مدل‌سازی ریاضی برای شبکه زنجیره تأمین معکوس خرما طراحی کردند. آن‌ها در مدل خود، پایداری محصول خرما در شبکه زنجیره تأمین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها کاهش معنی‌داری در هزینه‌های کلی صنعت خرما را نشان داد. استسو و همکاران [۳۰] در تحقیق خود بررسی کردند که یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای برنامه‌ریزی کاشت، داشت، برداشت، ذخیره‌سازی، بسته‌بندی، حمل‌ونقل و فروش محصولات تازه به چه صورت باشد. یانگ و همکاران [۳۱] در تحقیق خود که رویکرد اصلی آن‌ها مدل‌سازی ریاضی بود، قرارداد تسهیم سود را در زنجیره تأمین محصولات کشاورزی در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که این قرارداد باعث افزایش سود و میزان مشارکت اعضا در زنجیره می‌شود. هو و همکاران [۳۲] هماهنگی قراردادهای و ارتقا سطح حکمرانی امنیت غذایی را در زنجیره تأمین غذایی محصولات کشاورزی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که قرارداد و مشارکت اعضا به طور چشم‌گیری بر هماهنگی زنجیره تأمین اثر می‌گذارد. در ادامه تحقیقات مرتبط در جدول (۲) به صورت دسته‌بندی شده آورده شده‌اند.

۳-۲. شکاف تحقیقاتی

مرور تحقیقات مرتبط نشان می‌دهد که در تحقیقاتی مثل نمایی و همکاران [۳۳] و میچالک و همکاران [۳۴] فقط مفهوم دستیابی به مواد غذایی یا موجودیت ملاحظه شده است. همچنین در تحقیقاتی همکاران [۶] مفهوم دسترسی‌پذیری ملاحظه شده است. در تحقیقاتی مثل پژوهش جانسون و همکاران [۳۵] و گرینوالد و زاجفن [۳۶] ابعاد پایداری و کیفیت ملاحظه شده است. در تحقیق گریگوری و همکاران [۳۷] نیز همه ابعاد به جز پایداری در تولید محصولات کشاورزی دیده شده است. با این تفاسیر در تحقیق حاضر سعی می‌شود که با یک

بیماری کوید-۱۹ بر زنجیره تأمین مواد غذایی نتیجه گرفتند که این بیماری بر پایداری زنجیره تأمین اثر منفی دارد. نماچنا و همکاران [۱۷] معیارهای امنیت غذایی در آفریقا را مورد بررسی قرار دادند و نتایج آن‌ها نشان داد که بخش غربی آفریقا در آینده شرایط سختی را از نظر امنیت غذایی در پیش دارد.

۲-۲. مدل‌سازی ریاضی در امنیت غذایی

سندرام و برناتن [۱۸] امنیت غذایی در منطقه جنوبی آسیا را با توجه به بیماری کرونا مورد بررسی قرار دادند. رویکرد آن‌ها، اثر تغییرات اقلیمی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت روستایی را به عنوان عوامل تأثیرگذار در امنیت غذایی در نظر گرفت. لویز و همکاران [۱۹] یک مدل ریاضی جهت بهینه کردن امنیت غذایی و ارتقا توسعه روستایی در پاراگوئه طراحی کردند. آن‌ها یک مدل عدد صحیح مختلط، جهت بهینه کردن سود و ارتقا امنیت غذایی برنامه‌ریزی کردند. تحقیق آن‌ها بیشترین سود را در یک دوره پنج ساله در زنجیره ایجاد کرد. کاظمی و سموعی [۲] یک مدل ریاضی دوسطحی با در نظر گرفتن امنیت غذایی جهت کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی آفت‌کش‌ها و کودها در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که ۵۰ درصد افزایش در قیمت آفت‌کش‌ها و ۳۰ درصد در کاهش کشت منجر به افزایش آسیب زیست‌محیطی می‌گردد. خان و همکاران [۲۰] شاخص‌های امنیت غذایی را در ۳۷۹ منطقه روستایی در پاکستان را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی اثر منفی در امنیت غذایی دارد. حمیداقلو [۲۱] یک زنجیره تأمین مواد غذایی با رویکرد نظریه بازی با حمایت دولت طراحی کردند. در مدل آن‌ها یک رویه نظریه بازی بین کشاورزان و بنگاه‌های کشاورزی ایجاد شد که نشان داد حمایت‌های دولت در افزایش تولید مواد غذایی نقش مهمی دارد. استسو و همکاران [۲۲] در تحقیق خود بررسی کردند که یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای برنامه‌ریزی کاشت، داشت، برداشت، ذخیره‌سازی، بسته‌بندی، حمل‌ونقل و فروش محصولات تازه به چه صورت باشد. آن‌ها پنج هدف را با هدف پایداری زنجیره تأمین دنبال کردند. اهداف آن‌ها به حداکثر رساندن سود زنجیره تأمین (اقتصادی)، به حداقل رساندن زباله (زیست‌محیطی)، به حداقل رساندن تقاضای برآورده نشده (اجتماعی)، به حداکثر رساندن تازگی محصولات فروخته شده (زیست‌محیطی و اجتماعی) و به حداقل رساندن بی‌عدالتی اقتصادی برای کشاورزان (اجتماعی) بود. مطالعه موردی آن‌ها زنجیره تأمین گوجه در آرژانتین بود.

عباس و همکاران [۲۳] شبیه‌سازی مفهومی چندهدفه را جهت بهینه‌سازی هزینه، اثرات زیست‌محیطی، کیفیت و ایمنی و تسهیلات حمل‌ونقل مناسب برای سیستم زنجیره تأمین محصولات غذایی فاسدشدنی توسعه دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که هزینه‌های زنجیره کاهش و کیفیت محصولات افزایش پیدا کردند. همچنین نتایج آن‌ها ثابت کرد که ۲۳ درصد افزایش در آگاهی اقتصادی، پایداری زنجیره تأمین را ۱۳۷ درصد افزایش می‌دهد. دارستانی و همکاران [۲۴] در تحقیق خود، یک مدل دوهدفه برای زنجیره تأمین گوشت را تحت

(ج) ملاحظه پارامتر جریمه به‌منظور عدم استفاده تأمین‌کننده از تأمین‌کننده خارجی دانه‌های روغنی (رویکرد حمایت از تولید داخل)،
(د) حل مدل ریاضی پیشنهادی با الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه و (ه) ملاحظه هر چهار بعد امنیت غذایی در مدل ریاضی موردنظر این تحقیق می‌باشد.

۳. روش تحقیق کیفی

در این تحقیق، ابتدا با بررسی میدانی و تحقیقات گذشته، پرسش‌نامه‌ای مبتنی بر عوامل تأثیرگذار در زنجیره تأمین امنیت غذایی تدوین شد.

این پرسش‌نامه، دربرگیرنده عوامل تأثیرگذار در امنیت غذایی و بررسی روایی و پایایی و همچنین تعیین مهمترین عوامل متناظر با هر بُعد امنیت غذایی جهت اعمال در مدل ریاضی مسأله می‌باشد. مصاحبه یکی از پرکاربردترین روش‌های جمع‌آوری داده‌ها در تحقیقات کیفی است که به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که تا اطلاعات دقیق و مفصلی از تجربیات و نظرات خبرگان و کارشناسان را جمع‌آوری کند. به‌همین دلیل در بخش کیفی این مسأله از یک پرسش‌نامه ساختاریافته و دومرحله‌ای جهت بررسی تأثیر عوامل تأثیرگذار در زنجیره تأمین امنیت غذایی استفاده شده است.

مطالعه و تحلیل همه‌جانبه، تمام ابعاد اصلی و معیارهای آن‌ها بررسی گردد. بیشتر تحقیقات گذشته، مسأله موردنظرشان را با استفاده از روش‌های آماری تحلیل کردند. اما در پژوهش حاضر، بعد از احصاء ابعاد و عوامل تأثیرگذار در زنجیره تأمین مواد غذایی موردنیاز و تحلیل این ابعاد و عوامل با روش‌های کمی، مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی آن انجام می‌شود. در این تحقیق سعی می‌شود که چهار بُعد اصلی امنیت غذایی در مدل‌سازی ریاضی بررسی شوند. در تحقیق شالچی طوسی و همکاران [۳۸] که با مدل ریاضی، مسأله امنیت غذایی موردنظرشان را حل کرده‌اند، "موجودیت، دسترسی‌پذیری و کیفیت" مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل ارائه شده در تحقیق حاضر، گسترشی از مدل پایه شالچی طوسی و همکاران [۳۸] و قلیان جویباری و همکاران [۲۵] است که بُعد پایداری نیز در مدل آن‌ها گنجانده شده است. از آنجاکه مدل پایه از دسته مسائل NP-Hard می‌باشد، مدل گسترش‌یافته در تحقیق حاضر نیز NP-Hard محسوب می‌شود.

باتوجه به موارد بالا نوآوری‌های این تحقیق شامل الف) انجام تحقیق دومرحله‌ای که در مرحله اول تحقیق میدانی (پرسش‌نامه) و در مرحله دوم یک مدل ریاضی جدید و کاربردی به‌کار رفته است، ب) ملاحظه یک رویکرد قراردادی در زنجیره تأمین امنیت غذایی برای بیشینه‌سازی سود تأمین‌کننده، تولیدکننده و رضایت‌مندی مشتریان،

جدول (۲). مرور تحقیقات مرتبط

نویسنده	سال	بررسی معیار	مدل ریاضی	موجودیت	دسترسی‌پذیری	بهره‌وری (کیفیت)	پایداری	ابعاد امنیت غذایی				ساختار زنجیره تأمین		رویکرد حل	
								محصول	دوره	هدف	چندهدفه	نوع مشارکت	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های آماری
قلیان جویباری و همکاران [۲۵]	۲۰۲۳	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
پاتیدار و آگراوال [۲۶]	۲۰۲۰	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
استسو و همکاران [۲۲]	۲۰۲۳	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
عباس و همکاران [۲۳]	۲۰۲۳	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
لوپز و همکاران [۱۹]	۲۰۲۴	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
آذب و همکاران [۲۷]	۲۰۲۳	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
رهبری و همکاران [۲۸]	۲۰۲۳	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
خان و همکاران [۲۰]	۲۰۲۴	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
استسو و همکاران [۳۰]	۲۰۲۱	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
نمانی و همکاران [۳۳]	۲۰۱۹	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
میچالک و همکاران [۳۴]	۲۰۱۸	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
یانگ و همکاران [۳۱]	۲۰۲۲	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
جانسون و همکاران [۳۵]	۲۰۲۰	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
گرینوالد و زاجفن [۳۶]	۲۰۲۰	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
گریگوری و همکاران [۳۷]	۲۰۱۲	*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق
تحقیق حاضر		*	*	*	*	*	*	تک‌محصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	تک‌هدفه	چندهدفه	قراردادی	غیرقراردادی	روش‌های حل دقیق

جدول (۳). بررسی روائی عوامل مستقیم از طریق فرمول لاوشه

عوامل	تعداد بله	تعداد خیر	ضریب لاشه	نتیجه
تغییرات تعرفه واردات مواد غذایی	۳۰	۰	۱/۰۰	تأیید
قیمت محصولات کشاورزی و نوسانات آن	۳۰	۰	۱/۰۰	تأیید
یارانه‌های بخش کشاورزی	۲۹	۱	۰/۹۳	تأیید
تحقیق و توسعه بخش کشاورزی	۲۸	۲	۰/۸۷	تأیید
بیمه محصولات کشاورزی	۲۹	۱	۰/۹۳	تأیید
کشت فراسرزمینی	۲۷	۳	۰/۸۰	تأیید

جدول (۴). بررسی روائی عوامل غیرمستقیم از طریق فرمول لاوشه

عوامل	تعداد بله	تعداد خیر	ضریب لاشه	نتیجه
تغییرات اقلیمی	۲۷	۳	۰/۸۰	تأیید
سیاست‌های اقتصاد کلان	۳۰	۰	۱/۰۰	تأیید
سیاست‌های پولی	۳۰	۰	۱/۰۰	تأیید
سیاست‌های مالی	۲۸	۲	۰/۸۷	تأیید
تغییرات قیمت حامل‌های انرژی	۲۹	۱	۰/۹۳	تأیید
امنیت ملی	۳۰	۰	۱/۰۰	تأیید
امنیت آب	۳۰	۰	۱/۰۰	تأیید
آموزش و تحصیلات	۲۸	۲	۰/۸۷	تأیید
سواد تغذیه‌ای	۳۰	۰	۱/۰۰	تأیید
رشد اقتصادی	۳۰	۰	۱/۰۰	تأیید
شه‌رنشینی	۲۷	۳	۰/۸۰	تأیید

۴. مدل سازی ریاضی

زنجیره مورد بررسی در این پژوهش، یک زنجیره تأمین سه سطحی، چندمحصولی، چنددوره‌ای و چندهدفه می‌باشد. محصولات مورد بررسی نیز محصولات غذایی شامل روغن کلزا و روغن آفتابگردان می‌باشند. بنابراین سطح اول این زنجیره، تأمین‌کنندگان مختلف قرار دارند که توانایی تأمین دانه‌های روغنی به‌ویژه کلزا و آفتابگردان را دارند. در سطح دوم، تولیدکنندگان روغن خوراکی (روغن کلزا و روغن آفتابگردان) قرار دارند که دانه‌های کلزا و آفتابگردان را از مراکز عرضه، تأمین کرده و از طریق فرآوری به روغن کلزا و آفتابگردان تبدیل می‌کنند. در این خصوص، تولیدکننده‌گان روغن می‌توانند با مراکز تأمین کلزا و آفتابگردان قرارداد منعقد کرده و شرایطی را فراهم کنند که دانه‌ها (کلزا و آفتابگردان) مراکز تأمین به‌صورت تضمینی خریداری شوند. تأمین‌کننده نیز مبتنی بر قرارداد تسهیم سود، متعهد می‌شود که دانه‌های روغنی را با قیمت تمام‌شده کمتری نسبت به حالت قبل، به تولیدکننده روغن بفروشد. در مقابل از مراکز تولید روغن می‌خواهد که بخشی از سهم فروشش را با مراکز تأمین سهیم شود. به دلیل قرارداد ذکرشده، زنجیره تأمین موردنظر یک زنجیره تأمین قراردادی است. در سطح سوم، مصرف‌کنندگان قرار دارند. این رویه قراردادی باعث خواهد شد که محصول نهایی (روغن کلزا و روغن آفتابگردان) با قیمت تمام‌شده کمتری به‌دست مصرف‌کننده برسد. همچنین در سطح دوم

برای رسیدن به این عوامل بعد از مصاحبه با خبرگان و مرور تحقیقات گذشته، معیارهای متناظر با هرکدام از ابعاد چهارگانه امنیت غذایی استخراج شد. سپس این ابعاد به بحث گذاشته شده و درنهایت با روش مصاحبه (دومرحله‌ای) به عوامل مؤثر در امنیت غذایی رسیدیم. این عوامل به دو دسته عوامل مؤثر و عوامل غیرمؤثر تقسیم می‌شوند که پیش‌تر به آن‌ها پرداخته شد. پرسش‌نامه توسط ۳۰ نفر از خبرگان مبحث زنجیره تأمین امنیت غذایی تکمیل گردید. اطلاعات مربوط به روائی و پایایی این عوامل درادامه آورده شده است. نتایج براساس طیف لیکرت پنج‌گانه و این‌که آیا این عوامل در امنیت غذایی تأثیرگذار هستند یا خیر درادامه آمده است.

بنابراین پس از دریافت نظرات خبرگان براساس فرمول لاوشه در رابطه (۱)، روائی هریک از سؤالات، باتوجه به تعداد نظرات مثبت و نقطه برش ۰/۶ بررسی و درنهایت هریک از آن‌ها تأیید یا حذف می‌شوند.

$$CVR = \frac{N_e - \frac{N}{2}}{\frac{N}{2}} \geq 0.6 \quad (1)$$

CVR : ضریب روائی سؤالات پرسش‌نامه (این مقدار بیش‌تر از ۰/۶ آن مورد تأیید است).

N_e : تعداد افرادی که جواب مثبت به سؤال پرسش‌نامه داده‌اند.

N : تعداد کل پرسش‌نامه‌های دریافت شده.

همچنین در این تحقیق با بهره‌گیری از ضریب آلفای کرونباخ (سازگاری منطقی درونی سنج‌ها)، پایایی یا میزان ثبات اطلاعات حاصل می‌گردد و به عبارت دیگر تصدیق نتایج صورت می‌گیرد. برای محاسبه ضریب آلفای کرونباخ بایستی واریانس نمره هر زیرمجموعه از سؤالات پرسش‌نامه و واریانس کل سؤالات را محاسبه نموده و با استفاده از رابطه (۲) ضریب آلفا را محاسبه کرد.

$$\alpha = \frac{n}{n-1} \left(1 - \frac{\sum S_i^2}{S^2} \right) \quad (2)$$

n : تعداد سؤالات تست (تعداد بخش‌هایی که آزمون به آن تقسیم شده است).

S_i^2 : واریانس سؤال (واریانس داده‌های موجود در یک ستون ماتریس داده‌ها).

S^2 : واریانس کل تست، به عبارت دیگر واریانس ستون مجموع در ماتریس داده‌ها.

هرچه عدد به‌دست آمده به ۱ نزدیک‌تر باشد، بیانگر همبستگی زیاد بین سؤالات و قابلیت اعتماد بیش‌تر پرسش‌نامه است. قابل ذکر است که آلفای کمتر از ۰/۶ ضعیف، بین ۰/۷ تا ۰/۸ قابل قبول و بیش از ۰/۸ خوب تلقی می‌شود. در جداول (۳) و (۴) روائی عوامل مستقیم و غیرمستقیم آورده شده‌اند.

پایایی عوامل فوق نیز از طریق آلفای کرونباخ اثبات گردید. ضریب آلفای کرونباخ برای عوامل مستقیم ۰/۸۸۲ و برای عوامل غیرمستقیم ۰/۸۵۶ به‌دست آمد که از نظر آماری نشان‌دهنده پایایی مناسب این عوامل می‌باشد.

برای مراکز تولید (کارخانه‌های فرآوری) انبارهایی برای مقابله با تغییرات ناگهانی تقاضا و شوک بازار، ملاحظه شده است که هزینه نگهداری این محصولات (روغن کلزا و روغن آفتابگردان) را مراکز تولید متحمل می‌شوند. برای دوره‌هایی که تقاضا بالا باشد و سطح تولید و موجودی جوابگوی تقاضا نباشد، مراکز تولید می‌توانند ظرفیت تولیدی خود را افزایش دهند. در سطح سوم این زنجیره، مصرف‌کننده‌های نهایی هستند که میزان تقاضای آن‌ها برای هر نوع محصول، در هر دوره مشخص می‌باشد. هزینه‌های حمل‌ونقل در زنجیره تأمین نیز ملاحظه می‌گردند.	$TRC_{i'kl}^t$	هزینه حمل یک واحد محصول i' از مرکز تولید k به ناحیه مشتریان l در دوره t
همچنین در این مدل یک پارامتر ابتکاری در نظر گرفته شده است که براساس آن تولیدکننده در صورت تأمین دانه روغنی از تأمین‌کننده خارجی جریمه خواهد شد. به همین دلیل برای حمایت از تولید داخل این پارامتر در مدل ریاضی مورد استفاده قرار گرفته است. این پارامتر مبتنی بر اصل ۵ و ۷ سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی انتخاب شده است. سیاست‌های ۵ و ۷ به ترتیب بر افزایش تولید نهاده‌های داخلی و مصرف کالای داخلی تأکید دارند.	TT_s^t	مجموع درصد تعرفه واردات و مالیات بر عوارض گمرکی و بیمه حمل از مرکز تأمین s در دوره t
همان‌طور که گفته شد پس از دریافت سفارشات، باتوجه به توانایی تهیه مواد غذایی توسط مراکز تولید، این مراکز دانه‌های روغنی را از مراکز تأمین دریافت می‌کنند. سپس مراکز تولید، روغن خوراکی موردنظر (روغن کلزا و روغن آفتابگردان) را تولید کرده و به مصرف‌کننده نهایی می‌رساند. نمادها و مجموعه‌ها به شرح زیر است:	$DC_{i'ck}$	هزینه توسعه‌ی مرکز تولید k برای محصول i' برای سطح ظرفیتی c
i نوع دانه‌ی روغنی (کلزا و آفتابگردان)	e_s^t	نرخ تبدیل واحد ارز مرکز s به واحد پولی پایه در دوره t
i' نوع محصول (روغن کلزا و روغن آفتابگردان)	$D_{i'l}^t$	تقاضای سرانه در منطقه l از محصول i' در دوره t
j نوع ماده‌ی مغذی (ویتامین، پروتئین، ماده‌ی معدنی)	$NV_{i'j}$	میزان ارزش غذایی موجود از ماده غذایی j در یک واحد از محصول i'
مراکز تأمین دانه‌های روغنی (می‌تواند داخلی و یا خارجی باشد)	N_j	میانگین موردنیاز از ماده مغذی j برای هر نفر
k مراکز تولید	H_l^t	جمعیت در منطقه مشتریان l در دوره t
l مناطق تقاضا	I_l^t	میانگین درآمد سرانه افراد در منطقه مشتریان l در دوره t
c سطوح ظرفیتی مختلف برای توسعه مرکز تولید	ρ_l	میانگین سهم سبد مواد غذایی از درآمد خانوار در منطقه مشتریان l
t دوره‌ی زمانی	Q_{is}	شاخص کیفیت دانه روغنی نوع i مربوط به مرکز تأمین s
پارامترهای لازم برای مدل‌سازی زنجیره تأمین امنیت غذایی محصولات موردنظر این تحقیق عبارتند از:	$Q_{i'l}$	شاخص میانگین کیفیت موردقبول برای محصول نوع i' در منطقه مشتریان l
قیمت خرید دانه روغنی i از مرکز تأمین s در دوره t	γ	درصد تخفیف تأمین‌کننده برای تولیدکننده
قیمت خرید روغن i' از تولیدکننده k در دوره t توسط مناطق مصرف‌کننده	$\emptyset$	درصد سود تأمین‌کننده از سود تولیدکننده در مدل قراردادی
ظرفیت مرکز تأمین s از دانه روغنی i	$\alpha_{i'l}$	میانگین حاشیه سود زنجیره تأمین برای محصول i' در منطقه مشتریان l
ظرفیت مرکز تولید k از محصول i'	RE_k	معیار ابتکاری مرتبط با اقتصاد مقاومتی
ظرفیت قابل توسعه با سطح c در مرکز تولید k از محصول i'	C_i	هزینه تمام شده دانه روغنی i برای تأمین‌کننده در هر هکتار (خرید بذر، کاشت، داشت و برداشت)
هزینه نگهداری هر واحد محصول i' در مرکز تولید k در دوره t	M	عدد بزرگ
هزینه حمل یک واحد محصول i از مرکز تأمین s به مرکز تولید k در دوره t	G_{isk}^t	میزان جریان دانه روغنی نوع i از مرکز تأمین s به مرکز تولید k در دوره t
هزینه نگهداری هر واحد محصول i' در مرکز تولید k در دوره t	$F_{i'kl}^t$	میزان جریان محصول نوع i' از مرکز تولید k به منطقه مشتریان l در دوره t
ظرفیت مرکز تولید k از محصول i'	$IV_{i'k}^t$	سطح موجودی محصول i' در مرکز تولید k در دوره t
ظرفیت قابل توسعه با سطح c در مرکز تولید k از محصول i'	$IC_{i'k}^t$	کل هزینه نگهداری محصول i' در مرکز تولید k در دوره t
هزینه نگهداری هر واحد محصول i' در مرکز تولید k در دوره t	$ID_{i'ck}$	متغیر صفر و یک توسعه‌ی ظرفیت مرکز تولید k برای محصول i' با سطح ظرفیتی c
هزینه حمل یک واحد محصول i از مرکز تأمین s به مرکز تولید k در دوره t	LY_{isk}^t	متغیر صفر و یک تخصیص مرکز تولید k به مرکز تأمین s برای دانه روغنی i در دوره t

$$Basketprice_l^t = \frac{(\sum_{i'} \sum_k [P_{i'}^t * F_{i'kl}^t + TRC_{i'kl}^t * F_{i'kl}^t]}{H_l^t} \quad \forall l, t \quad (17)$$

$$Nutrition_{jl}^t = \sum_{i'} \sum_k NV_{ij} * F_{i'kl}^t / H_l^t \quad \forall l, j, t \quad (18)$$

$$Qualitylevel_{i'l}^t = \sum_k F_{i'kl}^t * QM_{i'k}^t / D_{i'l}^t * H_l^t \quad \forall i', l, t \quad (19)$$

$$LY_{isk}^t \leq G_{isk}^t \leq M * LY_{isk}^t \quad \forall i, s, k, t \quad (20)$$

$$\sum_s LY_{isk}^t \leq 1 \quad \forall i, k, t \quad (21)$$

$$RY_{i'kl}^t \leq F_{i'kl}^t \leq M * RY_{i'kl}^t \quad \forall i, k, l, t \quad (22)$$

$$F_{i'kl}^t, G_{isk}^t, IV_{i'k}^t, IC_{i'k}^t, QM_{i'k}^t \geq 0, \quad LY_{isk}^t, RY_{i'kl}^t \in \{0, 1\} \quad (23)$$

رابطه (۳) سود تأمین‌کننده (مراکز تأمین) و رابطه (۴) سود مراکز تولید در زنجیره تأمین روغن کلزا و روغن آفتابگردان را بیشینه می‌کند. رابطه (۵) بیشینه کردن رضایت‌مندی مصرف‌کنندگان را نشان می‌دهد. روابط (۶) و (۷) محدودیت‌های مربوط به ظرفیت مراکز تولید هستند که تضمین می‌کند موجودی مرکز از ظرفیت آن تجاوز نکند. همچنین فقط یک سطح ظرفیتی برای توسعه‌ی مرکز انتخاب شود. رابطه (۸) مربوط به موجودی محصولات در مراکز تولید در انتهای هر دوره هست و تعادل جریان را برقرار می‌کند. رابطه (۹) هزینه‌های نگهداری موجودی را محاسبه می‌کند. رابطه (۱۰) بُعد اول امنیت غذایی یعنی در دسترس بودن (موجود بودن) را تعریف می‌کند. روابط (۱۱) و (۱۲) بُعد دوم امنیت غذایی یعنی استطاعت مالی برای تهیه غذا را تعریف می‌کنند. منظور از $P_{i'l}^t$ قیمت تمام شده محصول برای مشتریان هست روابط (۱۳) و (۱۴) بُعد سوم امنیت غذایی یعنی مفید بودن (کیفیت) را تعریف می‌کنند. این محدودیت بیان می‌کند که میزان کیفیت متوسط هر نوع از محصولات در هر منطقه حداقل به میزان کیفیت قابل قبول برای همان محصول در همان منطقه باشد. رابطه‌ی (۱۵) مربوط به ظرفیت تأمین‌کنندگان (مراکز تأمین) است. رابطه‌ی (۱۶) ارضای تقاضای نواحی جمعیتی را تضمین می‌کند. روابط (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) به ترتیب قیمت سبد محصولات، ارزش غذایی و متوسط سطح کیفیت محصولات ارسال شده به مناطق جمعیتی را محاسبه می‌کنند. روابط (۲۰) و (۲۲) محدودیت‌های مربوط به متغیر باینری جریان‌های اعضای زنجیره هستند. رابطه (۲۱) تک‌منبعی بودن مراکز تولید را تضمین می‌کند. رابطه (۲۳) متغیرهای مثبت و باینری مدل را مشخص می‌کند.

همچنین بعد از تأیید عوامل مؤثر بر امنیت غذایی، با نظر خبرگان، چند عامل مهم جهت اعمال در مدل ریاضی مسأله انتخاب شدند. از عوامل استفاده شده در مدل ریاضی این مسأله می‌توان به تغییر تعرفه واردات مواد غذایی، قیمت محصولات و نوسانات آن‌ها، شهرنشینی و جمعیت، سواد تغذیه‌ای و سیاست‌های اقتصاد کلان مثل درآمد سرانه و نرخ حاشیه سود اشاره کرد. این عوامل جهت اعمال سیاست‌های رده کاربر در مدل ریاضی مسأله مورد استفاده قرار گرفتند. تعرفه واردات و نوسانات قیمتی در رابطه‌ی (۱۱) مورد استفاده قرار گرفتند. بحث جمعیت و حاشیه سود در رابطه‌ی (۱۲) مورد استفاده قرار گرفتند.

متغیر صفر و یک تخصیص منطقه مشتری l به مرکز تولید k برای محصول i' در دوره t
شاخص کیفیت محصول نوع i' انبارشده در مرکز تولید k در دوره t

$Basketprice$ قیمت سبد مواد غذایی در هر منطقه
 $Nutrition_{jl}^t$ میزان ماده مغذی در هر منطقه
 $Qualityleve$ سطح کیفیت هر محصول در هر منطقه

۱-۴. مدل ریاضی غیر خطی

۱-۴-۱. توابع هدف

برای این مطالعه سه تابع هدف در نظر گرفته شده است. تابع هدف اول (Z_1) بیشینه کردن سود تأمین‌کننده (مرکز تأمین)، تابع هدف دوم (Z_2) بیشینه کردن سود مراکز تولید و تابع هدف سوم (Z_3) بیشینه کردن میزان رضایت‌مندی مشتریان را نشان می‌دهد.

$$\max Z_1 = \sum_i \sum_s \sum_k \sum_t G_{isk}^t * \gamma P_{is}^t (1 + TT_s^t) - \sum_i \sum_s \sum_k \sum_t G_{isk}^t * TRC_{isk}^t - \sum_i C_i + \phi(\Delta Z_2) \quad (3)$$

$$\max Z_2 = \sum_{i'} \sum_k \sum_l \sum_t p_{i'k}^t * F_{i'kl}^t - RE_k \sum_i \sum_s \sum_k \sum_t G_{isk}^t * \gamma P_{is}^t - \sum_{i'} \sum_k \sum_l \sum_t F_{i'kl}^t * TRC_{i'kl}^t - \sum_{i'} \sum_k \sum_l ID_{i'ck}^t * DC_{i'ck}^t - \sum_{i'} \sum_k \sum_t IC_{i'k}^t \quad (4)$$

$$\max Z_3 = \sum_{i'} \sum_l \sum_t \min \left\{ \frac{\sum_k F_{i'kl}^t}{D_{i'l}^t} \right\} \quad (5)$$

۱-۴-۲. محدودیت‌ها

محدودیت‌های مدل به شرح زیر است:

$$IV_{i'k}^t \leq Cap_{i'k} + \sum_c Cap_{i'ck} * ID_{i'ck}^t \quad \forall i', k, t \quad (6)$$

$$\sum_c ID_{i'ck}^t \leq 1 \quad \forall i', k \quad (7)$$

$$IV_{i'k}^t = IV_{i'k}^{t-1} + \sum_s G_{isk}^t - \sum_l F_{i'kl}^t \quad \forall i', k, t \quad (8)$$

$$IC_{i'k}^t = \frac{IV_{i'k}^t + IV_{i'k}^{t-1}}{2} * ICR_{i'k}^t \quad \forall i', k, t \quad (9)$$

$$\sum_{i'} \sum_k NV_{ij} * F_{i'kl}^t \geq H_l^t * N_j \quad \forall j, l, t \quad (10)$$

$$P_{i'l}^t = \sum_s (((p_{is}^t * e_s^t * (1 + TT_s^t)) + TRC_{isk}^t) * G_{isk}^t) \quad \forall i', k, t \quad (11)$$

$$(\sum_{i'} \sum_k (P_{i'l}^t * F_{i'kl}^t + TRC_{i'kl}^t * F_{i'kl}^t)) \leq H_l^t * I_l^t * \rho_l \quad \forall l, t \quad (12)$$

$$QM_{i'k}^t = \sum_s Q_{is} * LY_{isk}^t \quad \forall i', k, t \quad (13)$$

$$QM_{i'k}^t * RY_{i'kl}^t \geq Q_{i'l} * RY_{i'kl}^t \quad \forall i', k, l, t \quad (14)$$

$$\sum_k G_{isk}^t \leq Cap_{is} \quad \forall i, s, t \quad (15)$$

$$\sum_k F_{i'kl}^t \leq D_{i'l}^t * H_l^t \quad \forall i', l, t \quad (16)$$

جدول (۵). مقادیر مربوط به پارامترهای مسأله

$Cap_{is} = U\{0,2000\}$	$Cap_{i'k} = U\{0,2000\}$	$Cap_{i'ck} = U\{1,4\}$	$ICR_{i'k}^t = U\{1,5\}$	$TRC_{isk}^t = U\{1,5\}$
$TRC_{i'kl}^t = U\{1,5\}$	$TT_s^t = U\{0,1\}$	$DC_{i'ck} = U\{0,10\}$	$e_s^t = U\{0,1\}$	$\rho_l = 0.4$
$NV_{ij} = U\{0,1\}$	$N_j = U\{0,1\}$	$\emptyset = 0.2$	$I_l^t = \{10,100\}$	$Q_{is} = \{0,1\}$
$Q_{i'l} = \{0,1\}$	$\alpha_{i'l} = U\{20,100\}$	$H_l^t = U\{0,1000\}$		$\gamma = 0.15$
$D_{i'l}^t = U\{0,1000\}$		$RE_k = \{1.4\}$	$C_l = 500,700$	

جدول (۶). پارامتر مربوط به پارامتر قیمت دانه‌های روغنی و روغن

ماده/محصول	قیمت دانه روغنی	قیمت روغن
کلزا	$U\{20,50\}$	$U\{60,100\}$
آفتابگردان	$U\{10,40\}$	$U\{40,70\}$

برای حل مسائل چندهدفه روش‌های متعددی وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های برنامه‌ریزی آرمانی، معیار جامع و اپسیلون محدودیت تقویت‌شده اشاره کرد. هیچ‌کدام از این روش‌ها بر دیگری ارجحیت ندارند. بنابراین در این تحقیق برای حل مسأله در ابعاد کوچک از روش معیار جامع، به دلیل انعطاف‌پذیری بالای آن استفاده شده است [۴۰]. قبل از حل نیاز هست توضیحاتی در مورد این روش بیان شود. در این روش مجموع توان انحرافات نسبی اهداف از مقدار بهینه‌شان حداقل می‌گردد. بدین صورت که برای یک مسأله با n تابع هدف، باید مقدار بهینه هر تابع هدف را (از اولین تا n امین) مستقل از بقیه $n-1$ تابع هدف دیگر و با در نظرگیری تمامی محدودیت‌های مسأله حساب کرد. از آنجایی که هرچه توابع هدف به مقادیر بهینه‌شان نزدیک‌تر باشد، مطلوب‌تر است بنابراین به دنبال تابع هدفی هستیم که با استفاده از آن، همه توابع به مقدار بهینه‌شان نزدیک شوند. بدین منظور باید مجموع انحرافات نسبی اهداف از مقادیر بهینه‌شان حداقل شود. بنابراین تابع هدف و مدل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min z = \sum_{i=1}^n w_i \left(\frac{z_i^* - z_i}{z_i^*} \right)^p \quad (30)$$

$$g_i(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq b_i$$

به طوری که داریم:

$$z_i = f_i(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad X_i \geq 0$$

z_i : آزاد در علامت

باتوجه به سه هدفه بودن مدل ریاضی مسأله، در این تحقیق از روش حل «معیار جامع» استفاده می‌شود. ابتدا مقادیر بهینه هر کدام از توابع هدف به صورت جداگانه (با نرم‌افزار گمز) به دست می‌آید و سپس به صورت زیر در یک تابع هدف جدید قرار می‌گیرند. همان طور که در قسمت‌های قبل بیان شد Z_1 ، Z_2 و Z_3 مقادیر تابع هدف به ترتیب برای تأمین‌کننده، تولیدکننده و مشتری می‌باشند. لذا تابع Z_4 به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min Z_4 = \left(\frac{Z_1^* - Z_1}{Z_1^*} + \frac{Z_2^* - Z_2}{Z_2^*} + \frac{Z_3 - Z_3^*}{Z_3^*} \right)^p \quad (31)$$

مبحث سواد تغذیه‌ای با در نظر گرفتن ریز مغذی‌ها در رابطه (۱۳) اعمال گردید. در قسمت تشریح محدودیت‌ها بیان می‌شود که ابعاد امنیت غذایی با اثرگذاری این عوامل برآورده می‌شود.

۵. مطالعه موردی و یافته‌ها

۵-۱. حل دقیق

برای حل مسأله به روش دقیق از آنجاکه مدل پیشنهادی، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) می‌باشد، ابتدا آن را به صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) و دقیق اصلاح کرده و برای اعتبارسنجی مدل اصلاح شده، یک مسأله تصادفی با ابعاد کوچک به روش معیار جامع توسط نرم‌افزار گمز توسط سیستمی با 2.7 GHz و Intel Core i7 حل شده و توابع اهداف براساس نرم‌های مختلف بررسی می‌شوند. در این مسأله دو مرکز تأمین، دو مرکز تولید و دو منطقه مشتری وجود دارد. محدودیت‌های (۱۲) و (۱۴) مدل را غیرخطی می‌کنند. برای خطی‌سازی مدل، دو متغیر پیوسته‌ی $x_{ii'skl}^t = LY_{isk}^t$ و $x_{ii'skl}^t = LY_{isk}^t * RY_{i'kl}^t$ به همراه محدودیت‌های زیر به مدل اضافه شده‌اند.

$$x_{ii'skl}^t \leq M * LY_{isk}^t \quad \forall i, i', s, k, l, t \quad (24)$$

$$x_{ii'skl}^t \geq F_{i'kl}^t - M * (1 - LY_{isk}^t) \quad \forall i, i', s, k, l, t \quad (25)$$

$$x_{ii'skl}^t \leq F_{i'kl}^t \quad \forall i, i', s, k, l, t \quad (26)$$

$$x_{ii'skl}^t \leq M * LY_{isk}^t \quad \forall i, i', s, k, l, t \quad (27)$$

$$x_{ii'skl}^t \geq RY_{i'kl}^t - M * (1 - LY_{isk}^t) \quad \forall i, i', s, k, l, t \quad (28)$$

$$x_{ii'skl}^t \leq RY_{i'kl}^t \quad \forall i, i', s, k, l, t \quad (29)$$

در این بخش نتایج حاصل از حل مسأله مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای حل مسأله از مقادیر استفاده شده در جدول (۵) برای پارامترهای مسأله استفاده شده است.

در این مسأله دو منطقه مشتری وجود دارد که جمعیت آن‌ها به صورت تصادفی مطابق جدول (۵) می‌باشد. همچنین براساس میزان استخراج روغن از دانه روغنی میزان جریان محصول از مراکز تولید به مشتریان ۴۵ درصد جریان محصول از مراکز تأمین به مراکز تولید است [۳۹].

باتوجه به تفاوت قیمت دانه‌های روغنی (کلزا و آفتابگردان) و محصولات نهائی (روغن کلزا و روغن آفتابگردان) در دنیای واقعی، در جدول (۶)، قیمت آن‌ها به صورت مجزا آورده شده است.

جدول (۹). جواب کارای به دست آمده با روش LP متریک با نرم

$p = 2$			
تابع هدف	تابع هدف	تابع هدف	مجموع انحراف
تأمین کننده (Z1)	تولید کننده (Z2)	مشتریان (Z3)	نسبی از بهینگی
۷۸۹۰۰	۹۴۹۵۰	٪۹۰/۲	۰/۰۰۲

در جواب به دست آمده در جدول (۹) مجموع مربع انحرافات نسبی از بهینگی کمترین مقدار خود را دارد.

در جواب پارتو به دست آمده در جدول (۱۰)، بیشینه انحراف از بهینگی کمترین مقدار خود را دارد.

در جدول (۱۱) مقادیر بهینه میزان جریان دانه روغنی (آفتابگردان) و میزان جریان محصولات روغنی (روغن آفتابگردان) در دوره ۵ ساله نشان داده می شود.

نتایج جدول (۱۲) نشان می دهد که به دلیل تداوم شرایط قرارداد در زنجیره تأمین، میزان جریان روغن خوراکی در دوره های چهارم و پنجم به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است و برای منطقه یک، از مقدار ۱۸ در دوره اول به مقادیر ۷۸ و ۱۲۱/۵ به ترتیب در دوره های چهارم و پنجم افزایش یافته است.

جدول (۱۰). مجموعه جواب های پارتو روش LP متریک با نرم

بی نهایت			
تابع هدف	تابع هدف	تابع هدف	مجموع انحراف
تأمین کننده (Z1)	تولید کننده (Z2)	مشتریان (Z3)	نسبی از بهینگی ($\times 10^{-6}$)
۷۹۱۴۵	۹۴۹۰۰	٪۹۰/۶۷	۰/۰۰۱

جدول (۱۱). میزان جریان دانه آفتابگردان از مراکز تأمین به مراکز تولید در دوره های مختلف

G_{isk}^t				
اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم
۶۱/۲	۵۲/۳	۱۰۹/۱	۳۲۰	۱۴۲/۹
۲۱/۲	۷۵/۱	۱۸۹	۲۳۲	۲۲۲
۳۱/۱	۵۳/۲	۱۴۵	۳۳۰	۱۶۵/۴
۸۳/۱	۷۰/۶	۱۱۱	۱۲۰	۱۸۱/۱

جدول (۱۲). میزان جریان روغن آفتابگردان از مراکز تولید به مراکز مشتری در دوره های مختلف

$F_{l'kl}^t$				
اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم
۱۸	۰	۳۸	۷۸	۱۲۱/۵
۰	۸۱	۵۳	۱۰۱	۵۹
۹۱	۱۱۹	۵۸	۱۱۸.۵	۱۰۲
۷۵	۰	۹۱	۹۹	۱۲۶

۵-۲. حل با استفاده از الگوریتم فراابتکاری

همان طور که در بخش ۲-۳ تشریح شد، مدل ریاضی تحقیق حاضر، از دسته مسائل NP-Hard است. حل این گونه مسائل در ابعاد بزرگ، از طریق برنامه ریزی خطی و نرم افزارهای موجود امکان پذیر نبوده و یا

نیاز است رابطه بالا کمینه شود تا انحراف معیار از مقدار بهینه هر تابع هدف، به کمترین مقدار ممکن برسد. رابطه فوق به ازای مقادیر مختلف p حل شده و نتایج بررسی می گردد. معمولاً در تحقیقات گذشته [۳۸] در $p = 1$ و $p = 2$ و $p = \infty$ بهترین جواب ها به دست آمده اند.

برای حل مسأله ابتدا توابع هدف به صورت جداگانه و با در نظر گرفتن محدودیت ها حل شده و مقادیر زیر در جدول (۷) برای توابع هدف مسأله به دست آمده اند.

جدول (۷). مقادیر بهینه توابع هدف به صورت مجزا

مقدار بهینه تابع هدف	مقدار بهینه تابع هدف	مقدار بهینه تابع هدف
تأمین کننده (Z1*)	تولید کننده (Z2*)	هدف مشتری (Z3*)
۷۹۲۰۰	۹۵۰۰۰	٪۹۰/۶۹

ابتدا برای نرم $p = 1$ حل شده و تعداد ده جواب پارتو (جواب های نامغلوب) در جدول (۸) آورده شده اند. تعداد جواب ها براساس تغییر در مقدار اوزان به دست آمده اند. تغییر در اوزان براساس ترکیب سه تایی از مجموعه $w_i = \{0.2, 0.3, 0.35, 0.4\}$ انتخاب شده است. در یک حالت نیز سه وزن یکسان در نظر گرفته شده اند.

از آنجائی که کمینه سازی مجموع انحرافات در اولویت است. لذا براساس این روش، جواب پارتو شماره ۷ به عنوان جواب کارا در نظر گرفته می شود.

براساس نتایج موجود در جدول (۸)، در روش LP متریک براساس نرم $p = 1$ جواب پارتو شماره ۷ از مجموعه جواب های پارتو به دست آمده انتخاب می شود. چراکه در این جواب مجموع انحراف نسبی از بهینگی کمترین مقدار خود را دارد.

همانند آنچه برای $p = 1$ انجام شد، بهترین جواب کارا برای مسأله به ازای $p = 2$ و $p = \infty$ در ادامه آورده شده است. در جدول (۹) جواب کارای مسأله برای $p = 2$ مشاهده می شود.

جدول (۸). مجموعه جواب های پارتو روش LP متریک با نرم $p = 1$

شماره جواب پارتو	تابع هدف	تابع هدف	تابع هدف	مجموع انحراف
	تأمین کننده (Z1)	تولید کننده (Z2)	مشتریان (Z3)	نسبی از بهینگی
۱	۶۸۰۵۰	۸۲۱۴۰	٪۷۹/۸	۰/۰۷۴
۲	۶۸۷۰۰	۸۵۳۰۰	٪۸۲/۱	۰/۰۶۹
۳	۶۹۰۰۰	۸۷۵۰۰	٪۸۳/۲	۰/۰۶۹
۴	۷۱۳۰۰	۸۸۹۵۰	٪۸۴/۶	۰/۰۵۱
۵	۷۴۰۰۰	۹۲۵۰۰	٪۸۶	۰/۰۴۹
۶	۷۶۹۰۰	۹۳۲۰۰	٪۸۸/۲	۰/۰۳۸
۷	۷۹۰۵۰	۹۴۸۰۰	٪۹۰/۶	۰/۰۰۴
۸	۷۹۲۰۰	۹۱۵۶۲	٪۸۹/۰۲	۰/۰۱۷
۹	۷۸۱۵۰	۸۹۶۲۵	٪۸۷/۲	۰/۰۴۱
۱۰	۷۶۲۵۳	۸۹۵۲۱	٪۸۶/۹	۰/۰۷۷

را دارند. در الگوریتم ژنتیک چندهدفه، واژه‌ی نسل، اختصاص یافته به جمعیت هر تکرار است. برخی از جواب‌های نسل فعلی که به آن جمعیت والد گفته می‌شود برای تولید جمعیت بعدی انتخاب می‌شود. کروموزوم‌های جمعیت والد با استفاده از سه عملگر تقاطع، جهش و یا حضور مجدد، فرزندان خود را جهت حضور در نسل بعدی تولید می‌کنند. عملگر جهش عموماً برای حفظ سطح قابل قبولی از تنوع‌سازی در جمعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرزندان برای نسل بعدی انتخاب می‌شوند که دارای برازندگی بهتری نسبت به والدین خود باشند. این امر موجب تکامل نسل بعدی می‌گردد. با افزایش تعداد تکرار الگوریتم، مجموعه‌ای از بهترین جواب‌ها به دست می‌آید. پس از بیان مقدماتی که ذکر شد، لازم است شبه‌کد و فلوچارت الگوریتم ژنتیک پیشنهادی نیز بیان شود.

جدول (۱۳). شبه‌کد الگوریتم ژنتیک چندهدفه

شروع
تشکیل کروموزم خالی با ساختار (Z, Solution, Gen, GADData).
ایجاد جواب اولیه تصادفی به تعداد جمعیت الگوریتم (PopulationSize).
انتخاب بهترین اعضای جمعیت که مقدار تابع هدف بهتری را برای مسأله در نظر می‌گیرند (ارزیابی برازندگی).
تکرار مراحل زیر به تعداد حلقه اصلی (MainLoopSize):
انتخاب والد براساس تورنمنت دوتایی و انتخاب تصادفی برای اپراتور تقاطع.
انجام تقاطع و ایجاد جمعیت فرزندان.
انتخاب کروموزوم براساس انتخاب تصادفی برای اپراتورهای جهش.
انجام جهش و ایجاد جمعیت جهش‌یافتگان.
یکپارچه کردن جمعیت (مجموع نسل کنونی و فرزندان حاصل از تقاطع و جهش).
اعمال روش مرتب‌سازی نامغلوب.
محاسبه‌ی پارامتر کنترلی فاصله‌ی ازدحامی.
مرتب کردن جمعیت و حذف جمعیت اضافی.
بررسی شرایط خاتمه و تکرار در صورت نیاز.
پایان حلقه اصلی
چاپ جواب نامغلوب نهایی و نمودارهای مناسب.

۵-۲-۳. تعیین پارامترهای کنترلی الگوریتم‌ها

برای تعیین پارامترهای کنترلی الگوریتم فراابتکاری MOSA و NSGA-II از روش تاگوچی استفاده شده است. الگوریتم فراابتکاری MOSA، پنج پارامتر کنترلی مهم دارد که عبارت است از: تعداد تکرار، تعداد تکرار در هر دما، تعداد اعضای آرشیو، دمای اولیه برای هر تابع هدف و ضریب کاهش دما می‌باشد. برای تنظیم پارامترهای کنترلی

به مدت‌زمان و حافظه بالایی نیاز دارند [۲۵، ۳۸]. بنابراین از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید چندهدفه (MOSA) و الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) برای حل مدل در ابعاد بزرگ استفاده شده است. در ادامه نیز به منظور اعتبارسنجی الگوریتم‌ها، نتایج آن‌ها حاصل از آن با حل دقیق مقایسه می‌شود. همچنین الگوریتم‌ها در ۲۷ نمونه مسأله با یکدیگر مقایسه می‌شوند. تمام برنامه‌نویسی‌های این مسأله در نرم‌افزار متلب اجرا شده است.

۵-۲-۱. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه

گام‌های الگوریتم MOSA را برای حل یک مسأله با سه تابع هدف پیشینه‌سازی به شرح زیر می‌توان خلاصه کرد:

گام ۱) تعدادی جواب اولیه $s_1, s_2, \dots, s_n \in \Omega$ ایجاد می‌شود و جواب‌های نامغلوب از میان جواب‌های اولیه به آرشیو انتقال می‌یابد و یک جواب به تصادف از آرشیو انتخاب می‌شود.

گام ۲) مقدار اولیه شمارشگر تعداد دفعات تغییر دما $k = 0$ در نظر گرفته می‌شود.

گام ۳) شمارشگر تعداد تکرار در هر دما $m = 0$ در نظر گرفته می‌شود. گام ۴) یک جواب جدید در همسایگی جواب فعلی ایجاد می‌شود ($s' \in N(s)$).

گام ۵) مقدار $\Delta f_1 = f_1(s') - f_1(s)$, $\Delta f_2 = f_2(s') - f_2(s)$ و $\Delta f_3 = f_3(s') - f_3(s)$ محاسبه می‌شود.

گام ۶) اگر برای هر سه تابع هدف بهبود به صورت هم‌زمان حاصل نشود (برای مثال $\Delta f_1 \geq 0$, $\Delta f_2 \leq 0$ و $\Delta f_3 \leq 0$) آنگاه جواب s' وارد آرشیو می‌شود. در صورت مغلوب شدن توسط جواب‌های دیگر از آرشیو حذف و در صورت غالب شدن، جواب یا جواب‌های مغلوب حذف می‌شود و یا هیچ‌کدام از اعضا مغلوب نمی‌شود که به اعضای آرشیو اضافه می‌شود و یک جواب جدید به تصادف از آرشیو برای ادامه کار انتخاب می‌شود. در غیر این صورت s' با احتمال $p_1 = e^{\frac{-\Delta f_1}{t_{k1}}}$, $p_2 = e^{\frac{-\Delta f_2}{t_{k2}}}$ و $p_3 = e^{\frac{-\Delta f_3}{t_{k3}}}$ براساس رویکرد پذیرش جایگزین s می‌شود. رویکردهای پذیرش گوناگونی در ادبیات وجود دارد که در این تحقیق از عمده‌ترین آن استفاده می‌شود. در این رویکرد در صورتی که احتمال‌های پذیرش (p_1, p_2, p_3) از یک مقدار آستانه‌ای هم‌چون δ بیشتر بود، جایگزین جواب فعلی می‌گردد.

گام ۷) مقدار m را افزایش دهید.

گام ۸) اگر $m = M$ شده است. به گام ۹ رفته و گرنه الگوریتم به گام ۴ برمی‌گردد.

گام ۹) مقدار k یک واحد افزایش داده می‌شود ($k \rightarrow k + 1$) و طبق زمان‌بندی سرمایه‌ش، دما کاهش می‌یابد.

گام ۱۰) اگر شرط خاتمه الگوریتم برقرار شده، توقف کرده و بهترین جوابی را که تاکنون به دست آمده است، به عنوان جواب بهینه الگوریتم معرفی می‌شود و گرنه الگوریتم به گام ۳ می‌رود.

۵-۲-۲. الگوریتم ژنتیک چندهدفه

باتوجه به قابلیت‌های الگوریتم‌های چندهدفه، این الگوریتم‌ها توانایی جستجوی فضاهای مختلف جواب، به همراه بهینگی هم‌زمان توابع هدف

این گونه است که میانگین مقادیر تابع هدف پس از اجرای مختلف، برای ۲۷ آزمایش به دست می آید و سپس نمودارهای لازم به راحتی توسط نرم افزار به دست می آید، ولی در حالت چندهدفه، چون مقادیر تابع هدف هم مقیاس نیستند، رویه کار به این صورت است که ابتدا داده ها بی مقیاس می شوند که در اینجا از روش انحراف درصد نسبی استفاده شده است. سپس بایستی برای هر آزمایش مقدار عبارت (۳۲) محاسبه شود [۴۲].

$$MOCV = \frac{MID}{Diversity} \quad (32)$$

MID میانگین فاصله از یک نقطه ایده آل است که نرخ همگرایی را تا آن نقطه اندازه می گیرد. برای به دست آوردن نقطه ایده آل، از جواب های بهینه مربوط به حل مسأله در قسمت های قبل (جدول (۷)) استفاده شده است. Diversity، بیشترین گسترش بین جواب ها را اندازه می گیرد [۴۲] که از فرمول (۳۵) محاسبه می شود:

$$MID = \frac{\sum C_i}{N} \quad (33)$$

$$C_i = \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + f_3^2} \quad (34)$$

$$Diversity = \sqrt{\sum_{j=1}^m (\max f_i^j - \min f_i^j)^2} \quad (35)$$

از آنجاکه به دنبال کمینه سازی ضریب تغییرات چندهدفه (MOCV) می باشیم، براساس شکل (۲) هرچه مقدار میانگین به دست آمده برای پارامترها کمتر باشد، مقدار آن پارامتر به بهترین مقدار خود نزدیک است و جواب های بهتری در اجرای الگوریتم ارائه می دهد. همچنین میانگین نسبت اغتشاشات (شکل (۳)) که به استواری جواب ها نیز معروف است، انحراف استاندارد را نشان می دهد و محاسبه استواری از فرمول $10\log_{10}(\text{objective function})^2$ به دست می آید. هرچه استواری جواب ها بیشتر باشد، جواب مطلوب تر است. از این رو باتوجه به هم خوانی جواب های دو نمودار میانگین جواب ها و میانگین نسبت اغتشاشات، پارامترهای کنترلی الگوریتم MOSA برای تابع هدف اول براساس آزمون تاگوچی مطابق جدول (۱۵) می باشد.

جدول (۱۵). پارامترهای کنترلی الگوریتم MOSA برای تابع هدف اول

پارامتر	مقدار
تعداد تکرار	۲۰۰
تعداد تکرار در هر دما	۲۰
تعداد اعضای آرشیو	۵۰
دمای اولیه	۱۰۰۰
ضریب کاهش دما	۰/۹

برای توابع هدف دوم و سوم نیز پارامترهای کنترلی مطابق جدول (۱۵) به دست آمده اند.

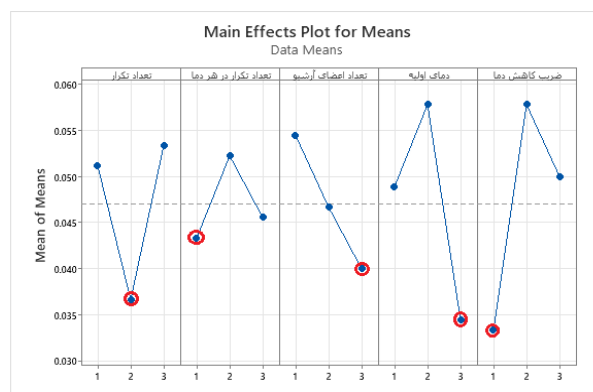
همچنین پارامترهای کنترلی الگوریتم ژنتیک شامل اندازه ی جمعیت (nPop)، معیار خاتمه که شامل بررسی تعداد مشخصی از

این الگوریتم، باتوجه به تحقیقات پیشین [۴۱]، سطوح مختلفی برای پارامترهای الگوریتم MOSA مطابق جدول (۱۴) به دست آمد.

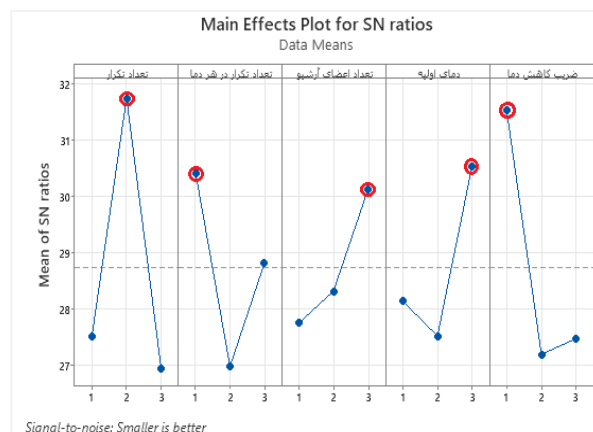
جدول (۱۴). سطوح مربوط به پارامترهای کنترلی الگوریتم MOSA

سطوح	تعداد تکرار	تعداد تکرار در هر دما	تعداد اعضای آرشیو	دمای اولیه توابع هدف			
				تولید کننده	تأمین کننده	مشترکین	ضریب کاهش دما
سطح ۱	۱۵۰	۲۰	۷۰	۱۵۰۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰	۰/۹
سطح ۲	۲۰۰	۳۰	۶۰	۱۲۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۰/۹۵
سطح ۳	۲۵۰	۵۰	۵۰	۱۰۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۰/۹۸

پس از ۲۷ بار اجرای الگوریتم MOSA، نتایج آزمایشات در نرم افزار Minitab 22 وارد و تحلیل تاگوچی اجرا شد. نتایج حاصل از طراحی آزمایش ها توسط نرم افزار مینی تب در شکل های (۲) و (۳) نشان داده شده است.



شکل (۲). میانگین جواب های حاصل از نرم افزار مینی تب برای تنظیم پارامترهای MOSA



شکل (۳). میانگین نسبت اغتشاشات حاصل از نرم افزار مینی تب برای تنظیم پارامترهای MOSA

درحالتی که مدل مورد بررسی تک هدفه باشد، نحوه انجام کار به

جدول (۱۷). مقادیر ایده‌آل تنظیم شده برای الگوریتم NSGA-II

NSGA-II			
اندازه جمعیت	معیار خاتمه	احتمال تقاطع	احتمال جهش
۱۰۰	۲۰۰ نسل	۰/۵۰	۰/۲۰

۵-۲-۴. اعتبارسنجی الگوریتم‌ها

به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها، ابتدا عملکرد آنان در ابعاد کوچک با حل دقیق مقایسه می‌شود و در نهایت ۲۷ مسأله تصادفی در ابعاد مختلف تولید شده و عملکرد دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه می‌شود. تمام برنامه نویسی‌های کامپیوتری این تحقیق توسط نرم‌افزار MATLAB نوشته شده و با یک کامپیوتر ۲.۷ GHz و Intel Core i7 اجرا گردیده است.

در این قسمت ابتدا ۷ مسأله تصادفی در ابعاد مختلف تولید و به‌روش معیار جامع و الگوریتم‌های MOSA و NSGA-II حل شد. هر مسأله تصادفی، توسط سه پارامتر تعداد تأمین‌کنندگان، تعداد تولیدکنندگان و تعداد مشتریان نشان داده شده است. همچنین تقاضای مناطق مشتریان به‌صورت $U\{0, 100\}$ و مابقی پارامترها مطابق جداول (۵) و (۶) می‌باشد. نتایج این مقایسه در جدول (۱۸) آمده است. خطای حاصل از الگوریتم‌ها طبق فرمول (۳۶) محاسبه می‌شود.

$$(36) \quad \text{درصد اختلاف جواب} = \left| \frac{\text{جواب دقیق} - \text{جواب الگوریتم فراابتکاری}}{\text{جواب دقیق}} \right| \times 100$$

همچنین در شکل (۶) مقایسه زمان حل ۵ نمونه مسأله توسط الگوریتم‌های MOSA و NSGA-II و حل دقیق آورده شده است. توضیحات کامل‌تر در مورد این نمودار در ادامه بیان می‌شود.

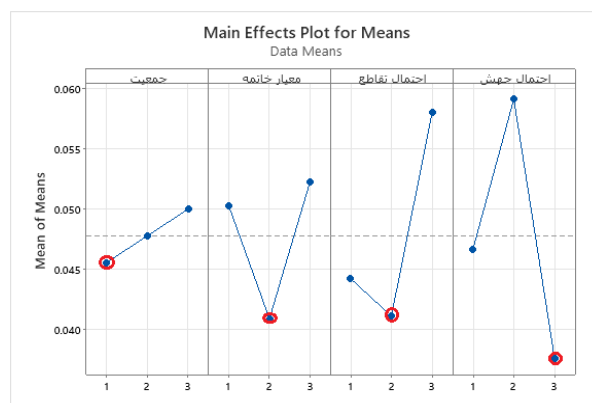
بررسی جدول (۱۸) نشان می‌دهد که الگوریتم MOSA جواب‌های نزدیک‌تری به حل دقیق نسبت به الگوریتم NSGA-II از نظر بهترین جواب حاصل برای هریک از توابع هدف ارائه می‌دهد. زیرا به‌طور میانگین الگوریتم NSGA-II در ۹۰٪ زمان حل دقیق به ۹۵٪ جواب بهینه تابع هدف اول، ۹۶٪ جواب بهینه تابع هدف دوم و ۹۸٪ جواب بهینه تابع هدف سوم رسیده است این در حالی است که الگوریتم MOSA به‌طور میانگین در ۱۰٪ زمان حل دقیق به ۹۶٪ جواب بهینه تابع هدف اول، ۹۷٪ جواب بهینه تابع هدف دوم و ۹۹٪ جواب بهینه تابع هدف سوم رسیده است. اختلاف کمتر از ۵ درصدی میانگین جواب‌های یافت شده توسط الگوریتم‌ها با روش حل دقیق، نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم‌های MOSA و NSGA-II می‌باشد. همچنین بررسی زمان حل مسائل نیز نشان می‌دهد که زمان حل مسائل با روش معیار جامع به‌طور نمای افزایش می‌یابد. این در حالی است که زمان حل مسأله توسط الگوریتم‌های MOSA و NSGA-II به‌طور خطی افزایش ناچیزی دارد (شکل (۶)). این امر نشان از زمان حل بسیار مناسب روش فراابتکاری دارد. از طرفی به‌دلیل NP-Hard بودن مسأله، روش حل دقیق، قابلیت حل مسأله شماره ۶ و ۷ را نداشته است.

نسل‌ها است، احتمال تقاطع (pc)، احتمال جهش (pm) می‌باشد. همانند آنچه برای الگوریتم MOSA بیان شد، برای تنظیم پارامترهای کنترلی این الگوریتم، با توجه به تحقیقات پیشین [۴۲]، سطوح مختلفی برای پارامترهای الگوریتم NSGA-II مطابق جدول (۱۶) به‌دست آمد.

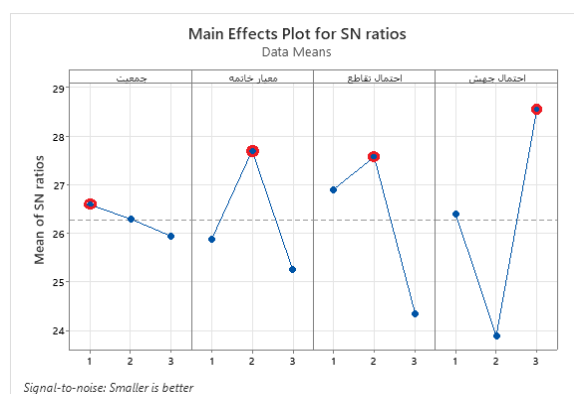
جدول (۱۶). پارامترهای احصا شده برای الگوریتم ژنتیک

NSGA-II				سطوح
جمعیت	معیار خاتمه	احتمال تقاطع	احتمال جهش	
۱۰۰	۱۵۰	۲۵ درصد	۱۰ درصد	سطح ۱
۱۵۰	۲۰۰	۵۰ درصد	۱۵ درصد	سطح ۲
۲۰۰	۲۵۰	۷۵ درصد	۲۰ درصد	سطح ۳

همانند فرآیند انجام شده برای الگوریتم MOSA، با استفاده از آزمایش L27 نتایج حاصل از طراحی آزمایش‌ها توسط نرم‌افزار مینی‌تب در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است.



شکل (۴). میانگین جواب‌ها حاصل از نرم‌افزار مینی‌تب برای تنظیم پارامترهای NSGA-II



شکل (۵). میانگین نسبت اغتشاشات حاصل از نرم‌افزار مینی‌تب برای تنظیم پارامترهای NSGA-II

همان‌طور که برای الگوریتم MOSA توضیح داده شد براساس شکل میانگین جواب‌ها و نسبت اغتشاشات، پارامترهای کنترلی الگوریتم NSGA-II پیشنهادی مطابق جدول (۱۷) است.

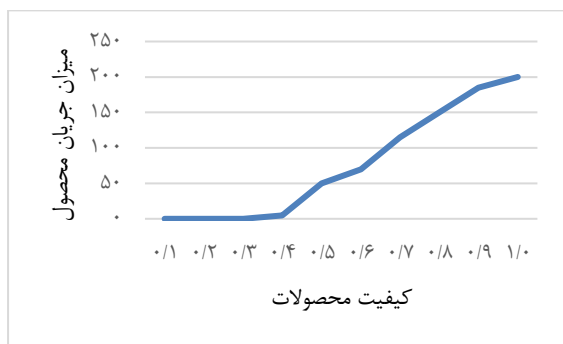
جدول (۱۸). مقایسه MOSA-II و NSGA-II با حل دقیق

شماره مسأله	تعداد مناطق مشتریان	تعداد مراکز تولید	تعداد مراکز تأمین	حل دقیق (معیار جامع)			MOSA			NSGA-II		
				هدف اول	هدف دوم	زمان حل (ثانیه)	هدف اول	هدف دوم	زمان حل (ثانیه)	هدف اول	هدف دوم	زمان حل (ثانیه)
۱	۲	۲	۲	۷۹۱۴۵	۹۴۹۰۰	۷۲/۷	۷۶۵۴۰	۹۴۹۹۰	۹۰/۷۵	۷۵۶۲۱	۹۰۴۰۰	۸۹/۰۰
۲	۴	۳	۳	۱۲۱۲۵۴	۱۴۳۲۱۱	۲۹۵	۱۲۱۲۵۴	۱۳۸۷۰۰	۹۰/۰۰	۱۲۷۳۰۰	۱۴۳۲۱۱	۹۰/۰۱
۳	۵	۴	۴	۱۶۲۵۴۱	۱۸۳۲۵۴	۱۰۵۰	۱۶۵۴۰۲	۱۷۵۰۵۰	۹۲/۰۰	۱۵۵۳۲۱	۱۷۴۵۴۲	۸۹/۵۰
۴	۶	۵	۵	۲۰۱۵۴۲	۲۱۸۶۵۴	۲۶۶۲.۲	۱۹۲۴۶۰	۲۱۰۹۲۱	۹۱/۴۵	۱۹۲۰۰۰	۲۰۲۵۴۱	۹۱/۶۵
۵	۶	۶	۶	۲۴۵۱۲۴	۲۷۳۲۱۰	۳۹۸۵	۲۵۵۰۰۰	۲۷۷۰۰۰	۹۰/۰۰	۲۵۳۰۰۰	۲۷۹۰۰۰	۹۱/۰۰
۶	۱۰	۸	۸	-	-	-	۴۰۲۵۶	۳۲۵۲۱۰	۹۱/۵۰	۳۹۷۰۰	۷۹۱۴۵	۹۰/۰۲
۷	۱۰	۹	۹	-	-	-	۴۹۲۵۶	۳۸۵۴۰۰	۹۱/۹۸	۴۹۰۵۱	۹۰۰۰۰	۹۱/۵۰
میانگین (به غیر از مسأله ۶ و ۷) ۱۶۱۹۲۱ ۱۸۲۵۸۲ ۹۱/۵۴ ۱۶۱۳ ۱۶۱۹۰۰ ۱۷۹۰۰۰ ۹۰/۸۴ ۱۶۲/۴ ۱۶۰۶۴۴ ۱۷۷۹۲۲ ۹۰/۲۵ ۱۵۲/۱												

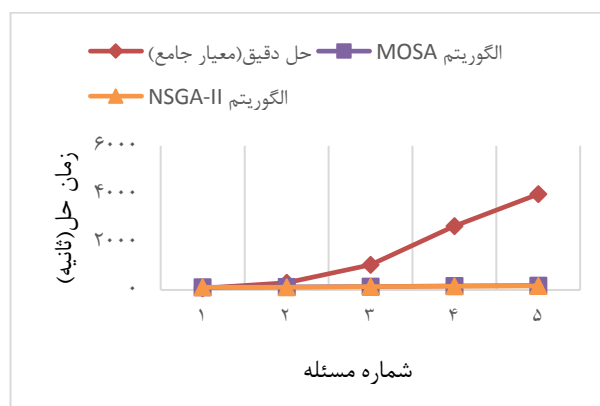
نامغلوب یافت شده را از طریق رابطه (۳۷) محاسبه می‌کند. هرچه این معیار کمتر باشد، منطقاً کیفیت جواب‌های به‌دست آمده بالاتر خواهد بود. سومین معیار، Q-metric می‌باشد که همان تعداد جواب‌های نامغلوب یافت شده است. هرچه تعداد جواب‌های نامغلوب یافت شده بیشتر باشد، کیفیت جواب‌های یافت شده بیشتر خواهد بود. همان‌طور که در جدول (۱۹) مشاهده می‌شود، براساس معیار S-metric، پراکندگی جواب‌ها برای الگوریتم MOSA کمتر بوده و در نتیجه کارایی این الگوریتم براساس این معیار نسبت به الگوریتم NSGA-II بهتر می‌باشد. همچنین با مقایسه معیار Q-metric مشخص شد که تعداد جواب‌های نامغلوب یافت شده برای الگوریتم MOSA بیشتر از الگوریتم NSGA-II بوده و در نتیجه کیفیت جواب‌ها بالاتر است. بنابراین بررسی شاخص پراکندگی و تعداد جواب‌های غیرمغلوب یافت‌شده در جدول (۱۹) نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم MOSA نسبت به الگوریتم NSGA-II می‌باشد.

۵-۲-۵. تحلیل پارامتری

در این بخش تحلیل پارامتری برای سود اعضای زنجیره تأمین نسبت به برخی پارامترهای حساس مسأله انجام می‌شود. در شکل (۷) میزان جریان محصولات از تولیدکننده به مشتریان ($F_{i'kl}^t$) نسبت به پارامتر کیفیت محصولات در هر منطقه ($Q_{i'1}$) بررسی می‌گردد.



شکل (۷). میزان جریان محصولات تولیدکننده به مشتریان به‌ازای کیفیت محصولات تولیدکننده



شکل (۶). مقایسه زمان حل مسائل توسط روش حل دقیق و الگوریتم فراابتکاری

در ادامه عملکرد دو الگوریتم در حل مسائل مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌منظور مقایسه عملکرد دو الگوریتم MOSA و NSGA-II، ابتدا ۲۷ مسأله تصادفی در ابعاد مختلف تولید و سپس توسط هر دو الگوریتم حل شد. برای سهولت بررسی کیفیت جواب‌های حاصل از دو الگوریتم، از سه شاخص مقایسه‌ای S metric، Q metric و مدت زمان پردازش استفاده می‌شود. هرچه Q metric بیشتر و S metric کمتر باشد، کیفیت جواب ارائه شده بهتر است. منظور از Q metric تعداد جواب‌های غیرمغلوب یافت‌شده است. شاخص S metric شاخص پراکندگی می‌باشد که از طریق رابطه (۳۷) به‌دست می‌آید.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N-1} (d_i - d_{mean})^2}{(N-1)d_{mean}}} \quad (37)$$

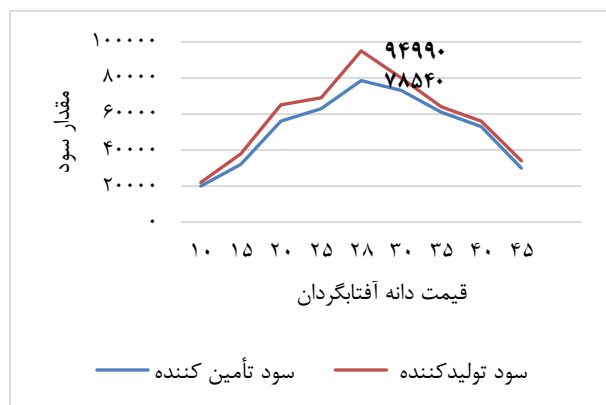
در رابطه (۳۷)، d_i نشان‌دهنده فاصله اقلیدسی بین دو جواب غیرمغلوب یافت‌شده و d_{mean} معرف میانگین مقادیر d_i می‌باشد. نتایج مقایسات دو الگوریتم در جدول (۱۹) آورده شده است.

همان‌طور که بیان شد، سه معیار مهم برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری وجود دارد. یکی از این معیارها زمان حل می‌باشد. دومین معیار S-metric بوده که پراکندگی جواب‌های

جدول (۱۹). مقایسه عملکرد دو الگوریتم MOSA و NSGA-II

شماره مساله	تعداد مناطق مشتریان	تعداد مراکز تولید	تعداد مراکز تامین	MOSA					NSGA-II				
				هدف اول	هدف دوم	هدف سوم (درصد)	Q metric	S metric	زمان حل (ثانیه)	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	Q metric
۱	۱۰	۳	۳	۷۵۲۱۱	۹۲۱۲۲	۹۱	۱۴	۵/۳	۱۵۸/۵	۷۴۲۵۱	۹۱۲۵۴/۹	۹۰/۵	۱۳
۲	۱۰	۳	۱۵	۷۴۳۴۱	۹۱۵۲۴	۸۹	۹	۱۴/۸	۱۶۷/۲	۷۳۵۶۲	۹۲۵۶۱	۹۰	۱۰
۳	۱۰	۳	۲۵	۷۶۳۲۱	۹۳۲۵۴	۹۰	۱۰	۳۶/۷	۱۷۷/۲	۷۷۵۶۲	۹۳۶۵۲	۹۱	۷
۴	۱۰	۱۵	۳	۷۵۳۲۱	۹۶۲۵۴	۹۲	۷	۹/۲	۱۸۶/۲	۷۵۴۲۱	۹۴۵۳۱	۹۱	۶
۵	۱۰	۱۵	۱۵	۳۸۵۲۱۰	۴۲۵۴۰۳	۹۳	۱۲	۸/۹	۱۹۵/۱	۳۹۶۵۲۱	۴۱۵۲۰۲	۹۲	۱۰
۶	۱۰	۱۵	۲۵	۳۸۴۲۱۲	۴۲۳۲۷۱	۹۲	۱۴	۲۱/۱	۲۰۴/۳۵	۳۸۲۶۵۴	۴۲۱۵۲۱	۹۱	۱۳
۷	۱۰	۲۵	۳	۷۴۲۵۴	۹۳۲۵۱	۸۹	۶	۹/۳	۲۱۱/۲	۷۵۶۲۴	۹۴۲۵۵	۹۰	۴
۸	۱۰	۲۵	۱۵	۳۸۴۶۹۵	۴۳۱۴۸۶	۹۰	۹	۴۰/۲	۲۱۹	۳۸۲۵۴۷	۴۲۵۶۵۴	۹۱	۳
۹	۱۰	۲۵	۲۵	۵۹۳۲۱۴	۶۹۲۱۴۸	۹۱	۶	۶/۷	۲۲۷	۶۰۰۸۵۴	۶۹۸۵۴۱	۹۱	۴
۱۰	۲۰	۳	۳	۷۶۳۲۱	۹۳۶۲۱	۸۰	۹	۱۴/۸	۴۰۰	۷۷۵۲۱	۹۲۱۲۵	۷۸	۸
۱۱	۲۰	۳	۱۵	۷۹۵۲۱	۹۶۲۵۱	۸۲	۱۰	۲۸/۷	۶۵۰	۷۸۵۶۲	۹۱۵۸۷	۸۱	۱۱
۱۲	۲۰	۳	۲۵	۸۰۳۶۱	۹۶۸۵۴	۸۴	۸	۲۳/۲	۷۶۰	۷۸۹۶۱	۹۴۶۹۶	۸۳	۹
۱۳	۲۰	۱۵	۳	۸۰۱۴۷	۹۵۸۵۴	۸۳	۸	۹/۶	۶۳۰	۷۹۵۲۲	۹۶۵۸۳	۸۲	۷
۱۴	۲۰	۱۵	۱۵	۳۸۴۵۷۴	۴۳۰۶۵۸	۹۲	۹	۱۲/۸	۷۶۲	۳۸۳۶۵۸	۴۲۶۹۸۴	۹۱	۸
۱۵	۲۰	۱۵	۲۵	۳۸۷۵۴۹	۴۲۹۸۵۷	۹۲	۱۶	۱۵/۹	۹۲۱	۳۸۲۱۴۷	۴۲۹۶۳۸	۹۱/۵	۱۴
۱۶	۲۰	۲۵	۳	۷۵۶۵۴	۹۵۴۷۸	۸۱	۱۸	۲۸/۸	۹۵۴	۷۴۵۶۱	۹۴۵۲۳	۸۰	۱۷
۱۷	۲۰	۲۵	۱۵	۳۸۵۶۲۵	۴۳۱۲۵۴	۹۰	۲۶	۱۸/۶	۹۸۰	۳۸۴۷۸۶	۴۳۰۷۸۹	۹۱	۲۷
۱۸	۲۰	۲۵	۲۵	۶۰۰۱۴۷	۷۱۰۲۵۴	۹۱/۵	۲۰	۱۲/۳	۱۰۰۲	۵۹۸۷۸۴	۷۰۱۵۴۷	۹۰/۵	۱۹
۱۹	۵۰	۳	۳	۷۸۶۵۴	۹۴۸۵۲	۸۱	۱۸	۸/۹	۹۶۵	۷۶۶۹۳	۹۴۵۸۸	۸۰	۱۶
۲۰	۵۰	۳	۱۵	۷۹۰۰۰	۹۲۵۰۰	۹۰	۱۶	۱۰/۲	۱۰۵۰	۷۸۶۰۰	۹۲۶۵۷	۹۰	۱۸
۲۱	۵۰	۳	۲۵	۷۸۹۰۰	۹۳۵۴۷	۹۱	۶	۹/۵	۱۲۵۶	۷۷۸۹۴	۹۳۶۵۱	۹۰/۵	۴
۲۲	۵۰	۱۵	۳	۷۸۵۲۰	۹۴۶۳۰	۹۰	۸	۱۲/۲	۱۲۰۰	۷۷۸۴۷	۹۴۷۶۶	۸۹/۵	۶
۲۳	۵۰	۱۵	۱۵	۳۸۷۴۵۴	۴۲۸۷۵۶	۹۱/۵	۹	۱۵/۳	۱۴۵۳	۳۸۶۶۶۶	۴۳۱۵۴۴	۹۲	۷
۲۴	۵۰	۱۵	۲۵	۳۸۹۵۶۵	۴۳۰۲۱۱	۹۲	۱۰	۱۸/۶	۱۵۲۱	۳۸۵۶۴۵	۴۳۰۹۰۰	۹۱/۵	۸
۲۵	۵۰	۲۵	۳	۷۶۵۶۵	۹۵۵۵۴	۹۰	۱۲	۱۴	۱۴۰۱	۷۵۴۵۴	۹۲۳۶۴	۹۰	۱۰
۲۶	۵۰	۲۵	۱۵	۳۷۸۴۵۱	۴۲۰۱۴۷	۸۹	۱۹	۱۵/۶	۱۴۵۰	۳۷۶۵۶۲	۴۲۲۱۱۱	۸۹/۵	۱۴
۲۷	۵۰	۲۵	۲۵	۶۰۲۰۰۰	۷۱۵۸۷۴	۸۶	۱۷	۳۶/۲	۱۵۳۲	۵۹۹۳۸۸	۷۱۳۰۰۰	۸۵	۸
۷۱۰/۱	۲۰	۱۰/۱	۸۸/۳	۲۳۷۸۴۳	۲۷۳۵۱۳	۸۸/۶	۱۲/۱	۱۶/۲	۷۲۰/۵	۲۲۳۲۸۱	۲۷۲۲۶۷	۸۸/۳	۱۰/۱

میانگین

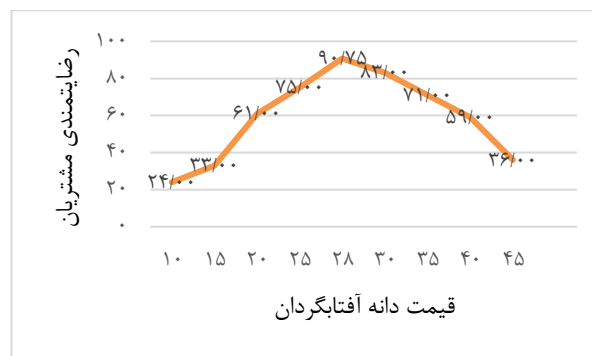


شکل (۸). سود تأمین کننده و تولیدکننده نسبت به قیمت دانه آفتابگردان

شکل (۷) نشان می‌دهد که اگر کیفیت محصولات کمتر از ۵۰ درصد باشد، مشتریان رغبتی برای خرید نخواهند داشت. در نتیجه میزان جریان محصولات به مشتریان تقریباً صفر خواهد بود. اما همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش کیفیت محصولات، میزان جریان محصولات نیز به شکل چشم‌گیری افزایش می‌یابد. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) تخصیص مشتریان به مراکز تولید را براساس کیفیت نشان می‌دهند. در ادامه نیز در شکل (۸) میزان تابع سود تأمین کننده و تولیدکننده نسبت به قیمت دانه آفتابگردان آورده شده است. سپس در شکل (۹) میزان رضایت‌مندی مشتریان نسبت به قیمت دانه آفتابگردان آورده شده است. در این قسمت به جای مراکز تأمین از تأمین کننده و به جای مراکز تولید از تولیدکننده استفاده شده است.

مراجع

- [1] Alam, M. F. B., Tushar, S. R., Ahmed, T., Karmaker, C. L., Bari, A. M., de Jesus Pacheco, D. A., ... & Islam, A. R. M. T. (2024). Analysis of the enablers to deal with the ripple effect in food grain supply chains under disruption: Implications for food security and sustainability. *International Journal of Production Economics*, 270, 109179. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109179>.
- [2] Kazemi, M. J., & Samouei, P. (2024). A new bi-level mathematical model for government-farmer interaction regarding food security and environmental damages of pesticides and fertilizers: Case study of rice supply chain in Iran. *Computers and Electronics in Agriculture*, 219, 108771. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108771>.
- [۳] طهماسبی، م. (۱۳۹۳). پیش‌بینی تأمین و مصرف محصولات غذایی اساسی برای تأمین امنیت غذایی کشور در افق ۱۴۱۰ با استفاده از نرم‌افزار IFS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی صنایع گرایش لجستیک و زنجیره تأمین. دانشکده مهندسی. دانشگاه جامع امام حسین.
- [۴] صفائی قادیکلائی، ع و غلام رضاتبار دیوکلایی، ز (۱۳۹۳). تبیین چارچوبی برای ارزیابی پایداری زنجیره تأمین مواد غذایی با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه فازی (مورد مطالعه: شرکت‌های منتخب تولیدی فرآورده‌های گوشتی استان مازندران)، ۶ (۳): ۵۳۵-۵۴۴. دانشکده مدیریت دانشگاه تهران. <https://civilica.com/doc/1400361>.
- [5] Westengen, O. T., & Banik, D. (2016). The state of food security: From availability, access and rights to food systems approaches. In *Forum for development studies*, 43 (1): 113-134. Routledge. <https://doi.org/10.1080/08039410.2015.1134644>.
- [6] Burchi, F., & De Muro, P. (2016). From food availability to nutritional capabilities: Advancing food security analysis. *Food Policy*, 60: 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.03.008>.
- [7] Alam, M. M., Siwar, C., Talib, B. A., & Wahid, A. N. (2017). Climatic changes and vulnerability of household food accessibility. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-06-2016-0075>.
- [8] Nessa, N., Gatta, R., Ambo-Rappe, R., Jompa, J., & Yahya, A. F. (2020, September). The role of women in the utilization of *Enhalus acoroides*: livelihoods, food security, impacts and implications for coastal area management. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 564 (1): 012073. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1755-1315/564/1/012073.
- [9] Campi, M., Duenas, M., & Fagiolo, G. (2020). *Specialization in food production, global food security and sustainability* (No. 2020/05). <https://hdl.handle.net/10419/228144>.
- [10] Amhamed, A., Genidi, N., Abotaleb, A., Sodi, A., Abdullatif, Y., Hushari, M., & Al-Kuwari, M. (2023). Food security strategy to enhance food self-sufficiency and overcome international food supply chain crisis: the state of Qatar as a case study. *Green Technology, Resilience, and Sustainability*, 3(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s44173-023-00012-8>.
- [11] Barakat, S., Cochrane, L., & Vasekha, I. (2023). The humanitarian-development-peace nexus for global food security: Responding to the climate crisis, conflict, and supply chain disruptions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 98, 104106. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104106>.



شکل (۹). میزان رضایت‌مندی مشتریان نسبت به قیمت دانه آفتابگردان

همان‌طور که در شکل (۸) مشخص است، سود بهینه تأمین‌کننده و تولیدکننده در مقدار مشخص ۲۸ واحد قیمت دانه آفتابگردان به‌دست آمده است. براساس شکل (۹) نیز در همین قیمت، رضایت‌مندی مشتریان بیشینه است. همچنین جواب پارتوی جداول (۸)، (۹) و (۱۰) نیز بیشینه بودن سود تأمین‌کننده ($Z1$) و سود تولیدکننده ($Z2$)، توأم با بیشینه کردن رضایت‌مندی مشتری ($Z3$) را نشان می‌دهد. تحلیل پارامتری انجام شده در این بخش خود یکپارچگی این زنجیره تأمین را نشان می‌دهد.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق ابتدا عوامل مؤثر بر امنیت غذایی شناسایی شد و روائی و پایایی این عوامل از دید خبرگان تحقیق، بررسی شد. سپس بانظر خبرگان، تعدادی از این عوامل برای اعمال در مدل ریاضی انتخاب شدند. از عوامل استفاده شده در مدل ریاضی این مسئله، می‌توان به «تغییر تعرفه واردات مواد غذایی، قیمت محصولات و نوسانات آن‌ها، شهرنشینی و جمعیت، سواد تغذیه‌ای و سیاست‌های اقتصاد کلان مثل درآمد سرانه و نرخ حاشیه سود» اشاره کرد. سپس مسئله در ابعاد کوچک و با استفاده از روش معیار جامع حل شد. در ادامه به‌دلیل NP-Hard بودن مسئله مورد بررسی، از الگوریتم‌های فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید چندهدفه و ژنتیک چندهدفه برای حل آن استفاده شد. برای بررسی عملکرد الگوریتم‌های ارائه شده، ابتدا نتایج به‌دست آمده توسط آن در حل مسائل با ابعاد مختلف با حل دقیق مقایسه شد. نتایج حاصل از آن نشان از کارایی مناسب الگوریتم‌های استفاده شده را دارد. سپس نتایج الگوریتم‌ها در ۲۷ مسئله تصادفی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم MOSA نسبت به الگوریتم NSGA-II می‌باشد. در تحقیقات آینده می‌توان با انعقاد قرارداد بین سطوح پایین‌تر زنجیره تأمین، مسئله تحقیق حاضر را توسعه داد و باعث هماهنگی در زنجیره تأمین شد. با اضافه کردن متغیر تصمیم کیفیت در تابع هدف مشتریان، می‌توان مسئله را از دیدگاه مشتریان نیز مورد بررسی قرار داد و از این طریق، تأثیر سیاست‌ها و عوامل موردنظر مصرف‌کنندگان را نیز دقیق‌تر بررسی کرد. همچنین از روش‌های حل مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری عمیق برای حل این مسئله در آینده می‌توان استفاده کرد.

- 10.22084/ier.2024.29296.2166 در سیستم‌های تولید.
- [25] Gholian-Jouybari, F., Hashemi-Amiri, O., Mosallanezhad, B., & Hajiaghahi-Keshteli, M. (2023). Metaheuristic algorithms for a sustainable agri-food supply chain considering marketing practices under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 213, 118880. <https://doi.org/10.3390/logistics7030046>.
- [26] Patidar, R., & Agrawal, S. (2020). A mathematical model formulation to design a traditional Indian agri-fresh food supply chain: a case study problem. *Benchmarking: An International Journal*, 27(8), 2341-2363. <https://doi.org/10.1108/BIJ-01-2020-0013>.
- [27] Azab, R., Mahmoud, R. S., Elbehery, R., & Gheith, M. (2023). A Bi-Objective Mixed-Integer Linear Programming Model for a Sustainable Agro-Food Supply Chain with Product Perishability and Environmental Considerations. *Logistics*, 7(3), 46. <https://doi.org/10.3390/logistics7030046>.
- [28] Rahbari M, Khamseh AA, Mohammadi M. (2023). A novel multi-objective robust fuzzy stochastic programming model for sustainable agri-food supply chain: case study from an emerging economy. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(25): 67398-442. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26305-w>.
- [۲۹] حمدی اصل، ع، عموزادخلیلی، ح، توکلی‌مقدم، رضا، حاجی آقایی، م. (۱۴۰۰). بهینه‌سازی چندهدفه در طراحی شبکه زنجیره تأمین خرما. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۹(۱۹)، ۱۳۷-۱۵۳. [10.22084/ier.2022.26317.2091](https://doi.org/10.22084/ier.2022.26317.2091).
- [30] Estes, A., Alemany, M. M. E., & Ortiz, Á. (2021). Impact of product perishability on agri-food supply chains design. *Applied Mathematical Modelling*, 96, 20-38. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.02.027>.
- [31] Yang, Q., Xiong, L., Li, Y., Chen, Q., Yu, Y., & Wang, J. (2022). Contract Coordination of Fresh Agri-Product Supply Chain under O2O Model. *Sustainability*, 14(14), 8771. <https://doi.org/10.3390/su14148771>.
- [32] Hou, J., Wu, L., & Hou, B. (2020). Risk attitude, contract arrangements and enforcement in food safety governance: a China's agri-food supply chain scenario. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2733. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082733>.
- [33] Namany, S., Govindan, R., Alfagih, L., McKay, G., & Al-Ansari, T. (2020). Sustainable food security decision-making: an agent-based modelling approach. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120296>.
- [34] Michalk, D. L., Kemp, D. R., Badgery, W. B., Wu, J., Zhang, Y., & Thomassin, P. J. (2019). Sustainability and future food security—a global perspective for livestock production. *Land Degradation & Development*, 30(5), 561-573. <https://doi.org/10.1002/ldr.3217>.
- [35] Johnson, B. J., Ribeiro, F. R., & Beckett, J. L. (2013). Application of growth technologies in enhancing food security and sustainability. *Animal frontiers*, 3(3), 8-13. <https://doi.org/10.2527/af.2013-0018>.
- [36] Greenwald, H. P., & Zajfen, V. (2017). Food insecurity and food resource utilization in an urban immigrant community. *Journal of immigrant and minority health*, 19(1), 179-186. <https://doi.org/10.1007/s10903-015-0331-9>.
- [37] Gregory, P. J., Ingram, J. S., & Brklacich, M. (2012). Climate change and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463): 2139-2148.
- [12] Sagi, V., & Gokarn, S. (2023). Determinants of reduction of food loss and waste in Indian agri-food supply chains for ensuring food security: A multi-stakeholder perspective. *Waste Management & Research*, 41(3), 575-584. <https://doi.org/10.1177/0734242X221126421>.
- [13] Tonelli, D., Rosa, L., Gabrielli, P., Parente, A., & Contino, F. (2024). Cost-competitive decentralized ammonia fertilizer production can increase food security. *Nature Food*, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00979-y>.
- [14] Shelia, V., Hansen, J., Sharda, V., Porter, C., Aggarwal, P., Wilkerson, C. J., & Hoogenboom, G. (2019). A multi-scale and multi-model gridded framework for forecasting crop production, risk analysis, and climate change impact studies. *Environmental Modelling & Software*, 115, 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.02.006>.
- [15] Cunningham, S. A., Shaikh, N. I., Datar, A., Chernishkin, A. E., & Patil, S. S. (2021). Food subsidies, nutrition transition, and dietary patterns in a remote Indian district. *Global Food Security*, 29, 100506. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100506>.
- [16] Hashem, N. M., González-Bulnes, A., & Rodríguez-Morales, A. J. (2020). Animal welfare and livestock supply chain sustainability under the COVID-19 outbreak: An overview. *Frontiers in veterinary science*, 7, 679. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.582528>.
- [17] Nhemachena, C., Nhamo, L., Matchaya, G., Nhemachena, C. R., Muchara, B., Karuaihe, S. T., & Mpandeli, S. (2020). Climate Change Impacts on Water and Agriculture Sectors in Southern Africa: Threats and Opportunities Sustainable Development. *Water*, 12(10), 2673. <https://doi.org/10.3390/w12102673>.
- [18] Sundram, P., & Brennan, C. S. (2024). Triumphs, trials and tomorrow in food security: an ASEAN outlook. *International Journal of Food Science & Technology*, 59(4), 2079-2087. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16899>.
- [19] López, M. M., Vera Andreo, J., Plà Aragonés, L. M., & Recalde-Ramírez, J. L. (2024). Design of a mathematical model to optimize farmer food security and promote rural development in Paraguay. *Annals of Operations Research*, 1-38. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-06199-8>.
- [20] Khan, Y., Ashraf, S., & Shah, M. (2024). Determinants of food security through statistical and fuzzy mathematical synergy. *Environment, Development and Sustainability*, 26(6), 14981-14999. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03231-y>.
- [21] Hamidoğlu, A. (2024). A game-theoretical approach on the construction of a novel agri-food supply chain model supported by the government. *Expert Systems with Applications*, 237, 121353. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121353>.
- [22] Estes, A., Alemany, M. M. E., & Ortiz, A. (2023). Sustainable agri-food supply chain planning through multi-objective optimisation. *Journal of Decision Systems*, 1-25. <https://doi.org/10.1080/12460125.2023.2180138>.
- [23] Abbas, H., Zhao, L., Gong, X., & Faiz, N. (2023). The perishable products case to achieve sustainable food quality and safety goals implementing on-field sustainable supply chain model. *Socio-Economic Planning Sciences*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101562>.
- [۲۴] دارستانی، ح، جوادی، ب، موسی زاده، م، ابدالی، م. (۱۴۰۳). طراحی مدل دوهدفه شبکه زنجیره تأمین گوشت با در نظر گرفتن قابلیت ارجاعی تحت شرایط عدم قطعیت، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع

- Comparative Study of ϵ -constraint, LP-metric, and Weighted Sum Multi-objective Optimization Methods in a Circular Economy. *Procedia CIRP*, 122, 294-299. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.043>.
- [41] Ulungu, E. L., Teghem, J. F. P. H., Fortemps, P. H., & Tuytens, D. (1999). MOSA method: a tool for solving multiobjective combinatorial optimization problems. *Journal of multicriteria decision analysis*, 8(4), 221. <https://doi.org/10.2517/af.2013-0016>.
- [۴۲] جبهه. م (۱۳۹۵) طراحی شبکه زنجیره تأمین چندهدفه، چندسطحی مبتنی بر چابکی و ارزش‌های سازمانی و حل آن با یک روش کارا. پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی صنایع گرایش لجستیک و زنجیره تأمین.
- <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1745>.
- [۳۸] شالچی طوسی، م. پورمحمدی، ف. پیشوایی، س. (۱۳۹۴). طراحی مجدد شبکه و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین محصولات غذایی با لحاظ کردن امنیت غذایی و جریان‌های مالی، چهاردهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع. <https://civilica.com/doc/760890>.
- [39] Kadivar, Sh. Qavami, M., Karachorlu, M. and Delkhosh, B. (1389). Chemical evaluation of oil extracted from different cultivars of rapeseed. *Food Science and Nutrition*, 7(2 (serial 26)), 19-29[in persian]. <https://www.noormags.ir/view/fa/articlepage/1092596>.
- [40] Poonia, V., Kulshrestha, R., & Sangwan, K. S. (2024). A



DOI: <https://doi.org/10.22084/ier.2025.30040.2181>

Development of a Mathematical Model for a Contractual Supply Chain Network for Oil and Oilseed Production, Considering Food Security Aspects and Supporting Domestic Production

Mostafa Farokhiani¹, Hossein-Ali Hassanpour^{2*}, Hossein Ghaffaritouran³, Ali Ghorbanpour⁴

¹ PhD of Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Logistics Management, Faculty of Management and Strategic Planning, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran

⁴ Master of Science in Nutrition, Department of Nutrition and Food Hygiene, Faculty of Health, Baqiyatallah University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 27 - 10 - 2024

Revised: 3 - 1 - 2025

Accepted: 10 - 1 - 2025

Keywords:

Network Design

Supply Chain

Food Security

Sustainability of Food Security

Factors Affecting Food Security

ABSTRACT

In today's world, one of the basic problems of mankind is to provide food needs, so that food security and quality increase are the important goals of governments. Factors affecting food security include the availability of food (availability), the financial ability to access food, the usefulness of food (quality) and the sustainability of food security over time through the management of Economic and social considerations, water resources and soil quality. The current research presents and solves a model for the design of the supply chain network of basic food products considering the aspects of food security and the contractual approach. The supply chain network studied in this research includes suppliers (oilseeds), producers (rapeseed and sunflower oil) and two types of customers. In this research, first by reviewing past researches, the dimensions of food security and factors affecting the food security chain were identified. Then, two questionnaires were compiled to conduct field research. Through the initial questionnaire, the dimensions of food security and related criteria were approved by research experts, and then using the final questionnaire, the most important factors affecting the food security of the studied supply chain were identified. In the next step, based on the identified factors, the mathematical model for the supply chain based on the contractual approach and supporting domestic production was created and solved. The problem was solved in small dimensions using the "comprehensive criterion" method. The multi-objective mathematical model presented in this research is a type of NP-hard problem, so multi-objective simulated annealing meta-heuristic algorithm (MOSA) and multi-objective genetic algorithm (NSGA-II) were used to solve the model. For the purpose of validation, the results of these algorithms have been compared with the exact solution results of the comprehensive criterion method. Also, the results of two algorithms, MOSA and NSGA-II, have been compared with each other, and the results of the comparisons show the better performance of the meta-heuristic algorithm of MOSA. Numerical results also showed that the product flow rate in the fourth and fifth period increases significantly. By examining parametric analysis and Pareto solutions, it was also determined that the profits of the supply chain members are aligned and that customer satisfaction also increases with the increasing in the profits of the supplier and the producer.

* Corresponding author. H. Hassanpour

Tel.:021-85692191; E-mail address: hahassan@ihu.ac.ir