

## مدل ریاضی چندهدفه برای مدیریت زنجیره تامین یکپارچه مستقیم و معکوس پایدار سبب درختی با در نظر گرفتن بازارهای خارجی میوه

یونس جبارزاده<sup>۱\*</sup>، حسین ریحانی‌یامچی<sup>۲</sup>، نادر غفاری نسب<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲

### چکیده

با افزایش جمعیت و رشد گسترده مصرف در سرتاسر جهان، شبکه‌های زنجیره تامین به شبکه‌های بسیار بزرگی تغییر کرده‌اند و اجزای مربوط به این شبکه‌های عظیم سبب ایجاد مشکلات جدی زیست‌محیطی شده‌اند. مدیریت زنجیره تامین پایدار در زمره مفاهیم نوظهور در عرصه تولید و عملیات است. شرکت‌ها باید با بکارگیری زنجیره تامین پایدار نسبت به بهبود عملکرد زیست‌محیطی و اجتماعی در کنار عملکرد اقتصادی اهتمام ورزند. مکانیزم‌های مختلفی نیاز است تا ضایعات را کاهش دهد یا بتواند از اقلام فاسد شده بهره‌برداری کند. در این میان توجه به لجستیک معکوس و زنجیره تامین حلقه بسته می‌تواند کمک کننده باشد. این موضوع در زنجیره تامین محصولات کشاورزی کمتر مطرح شده‌است. مقاله حاضر، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح چندهدفه و چند دوره‌ای برای بهینه‌سازی یک شبکه لجستیک یکپارچه مستقیم و معکوس میوه سبب، شامل سه سطح (باغ‌ها، مراکز توزیع و مناطق مشتریان داخلی و خارجی) در جریان مستقیم و دو سطح (مراکز کمپوستینگ و بازار کمپوست) در جریان معکوس، توسعه می‌دهد و حل می‌کند. به طوری که تمام جنبه‌های انتشار کربن دی‌اکسید در کل شبکه زنجیره تامین پیشنهادی را در نظر می‌گیرد و یک تعادل منصفانه و معقول بین اهداف اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی برقرار می‌نماید.

**کلمات کلیدی:** لجستیک معکوس، زنجیره تامین حلقه بسته، محصولات کشاورزی، بهینه‌سازی چندهدفه.

**طبقه‌بندی JEL:** C61, N55, Q17, M16

<sup>۱</sup> استادیار گروه مدیریت، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول: yjabarzade@tabrizu.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت کسب و کار، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

## مقدمه

در دهه‌های اخیر، توجه شرکت‌ها به مسائل زیست‌محیطی و الزام قوانین دولتی بر رعایت آنها، باعث ایجاد مفهومی جدید از توسعه به نام «توسعه پایدار» در میان جوامع جهانی شده‌است. توسعه‌ای پایدار است که به رشد متوازن سه ستون پایداری یعنی ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی بیانجامد. لزوم توجه به این مفهوم در توسعه از یک طرف و اهمیت مدیریت زنجیره تامین برای رسیدن به عملکرد بهینه یا نزدیک به بهینه عملکرد اقتصادی در سطح خرد و کلان، باعث پدید آمدن مفهومی جدید به نام «مدیریت زنجیره تامین پایدار» شده‌است (کارتز و روگرز، ۲۰۰۸). مدیریت زنجیره تامین پایدار لزوم توجه توأم به اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی عملیات زنجیره تامین و همچنین عملکرد اقتصادی آن در مدیریت جریان اطلاعات، مواد و پول تعریف شده‌است (سورینگ و مولر، ۲۰۰۸).

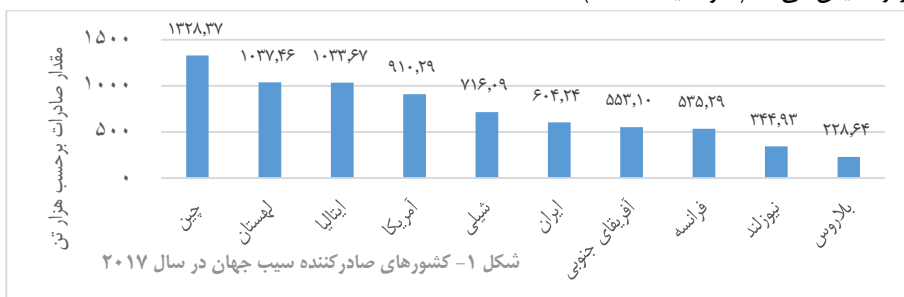
با افزایش رقابت، شرکت‌ها تلاش می‌کنند با اقدامات مختلف به بالاترین رضایت مشتری برسند، که طراحی زنجیره تامین پاسخگو یکی از مولفه‌های اصلی است. پاسخگویی زنجیره تامین به عنوان توانایی آن برای پاسخ سریع به تغییرات در تقاضا، هم از نظر حجم و هم ترکیب محصولات، تعریف شده است (آزارون و همکاران، ۲۰۱۹). زنجیره تامین مواد غذایی با توجه به افزایش روزافزون جمعیت جهان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مسئله مهمی که وجود دارد این است که یک سوم از تولید جهانی مواد غذایی سالانه هدر می‌رود و از دسترس خارج می‌شود (فانو، ۲۰۱۱). با هدر رفتن محصولات غذایی، منابع مورد استفاده در تولید و توزیع آنها در طول زنجیره تامین غذایی (مانند سوخت، آب، کودها) نیز هدر می‌روند و باعث ایجاد تأثیرات منفی بر روی سود، منابع طبیعی، اکوسیستم‌ها و سلامت انسان می‌شود (گوبل و همکاران، ۲۰۱۵). تأثیرات زیست‌محیطی در کشورهای در حال توسعه مانند ایران به دلیل شیوه‌های ناکارآمد آنها در طول مراحل کشت، فرآوری، بسته‌بندی و حمل و نقل زنجیره تامین مواد غذایی شیوع بیشتری دارد. تولید میوه به عنوان یکی از بخش‌های اصلی اقتصادی در ایران، مورد توجه است. ایران رتبه اول تولید میوه در خاورمیانه و شمال آفریقا را داراست و در سال‌های اخیر بین ده کشور برتر تولیدکننده میوه در جهان، رتبه هشتم را کسب کرده است (فانو، ۲۰۱۰). بنابراین اتخاذ شیوه‌های مدیریت پایدار نه یک اولویت بلکه یک ضرورت محسوب می‌شود. به دلیل نگرانی زیست‌محیطی و قوانین سختگیرانه در مورد زباله‌های ایجاد شده در زنجیره تامین، لجستیک معکوس و طراحی زنجیره تامین حلقه بسته از اهمیت بسزایی برخوردار است. محصولات برگشتی هم از نظر هزینه و هم از دید زیست‌محیطی گرانبها هستند<sup>۱</sup> (کریک و همکاران، ۲۰۱۳). در زنجیره تامین حلقه بسته مواد غذایی اقلام فاسد شده به

<sup>۱</sup> Carter & Rogers<sup>۵</sup> Gobel et al.<sup>۲</sup> Seuring & Müller<sup>۶</sup> FAOStat<sup>۳</sup> Azaron et al.<sup>۷</sup> Krikke et al.<sup>۴</sup> FAO

جای دفن می‌توانند برای تولید انرژی، بیوگاز و کود کمپوست به کار گرفته شوند و دوباره به زنجیره تامین بازگردند (ریتمن و مک‌کارتی<sup>۱</sup>، ۲۰۰۱).

تجارت جهانی و پیدایش شرکت‌های بین‌المللی منجر به توجه بیشتر به شبکه‌های زنجیره تامین جهانی شده‌است. زنجیره تامین جهانی در یک تعریف ساده زنجیره تامینی است که یکی از اعضای آن شامل تامین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده و مشتری در بیش از یک کشور مستقر شده‌اند. در واقع تجارت جهانی منجر به پراکندگی هر چه بیشتر زنجیره تامین گردیده است (سیام<sup>۲</sup>، ۱۹۹۷). این امر باعث افزایش اهمیت و نقش طراحی شبکه زنجیره تامین گردیده است. طراحی و پیکره بندی شبکه زنجیره تامین به عنوان یک تصمیم استراتژیک نقش اصلی در عملکرد زنجیره تامین ایفا می‌کند. این طراحی شامل تعیین محل، تعداد و ظرفیت تسهیلات شبکه و همچنین میزان موجودی مواد در شبکه است. پیکر بندی شبکه لجستیک نمی‌تواند در کوتاه مدت تغییر کند، زیرا تغییر آن بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. طراحی شبکه زنجیره تامین همچنین یک تصمیم خیلی مهم است، چون تصمیمات تاکتیکی و عملیاتی بعدی را نیز محدود می‌کند.

کشور ایران به دلیل شرایط آب و هوایی از لحاظ تولید سیب درختی در جایگاه هفتم در جهان قرار دارد. با توجه به جایگاه مناسب ایران در تولید سیب، وضعیت کشور طی سال‌های اخیر در صادرات این محصول در جهان نیز رشد قابل توجهی داشته است. شکل ۱ میزان صادرات سیب ایران را در بین ده کشور برتر نمایش می‌دهد (فائواستیت، ۲۰۱۷).



با توجه به ملاحظات فوق این مقاله به موضوع طراحی شبکه لجستیک چندهدفه، چند دوره‌ای و چند سطحی شامل تولید کنندگان (باغ‌ها)، مراکز توزیع، مناطق مشتریان میوه (مشتریان داخلی و خارجی)، مراکز کمپوستینگ و بازار کمپوست می‌پردازد. این مدل را می‌توان از جهات زیر از مطالعات قبلی متمایز کرد. اولاً بعد زیست‌محیطی و اجتماعی زنجیره تامین علاوه بر کل سود زنجیره تامین به عنوان اهداف متمایز کمی تعبیه شده‌اند. ثانیاً، بازار خارجی نیز در این مدل در نظر گرفته شده‌است تا مدل برای یک زنجیره

<sup>۱</sup> Rittmann & McCarty

<sup>۲</sup> Syam

تامین جهانی طراحی شده باشد. سرانجام لازم به ذکر است که طراحی شبکه لجستیک یک مسئله سخت<sup>۱</sup> است که بایستی از روش‌های بهینه سازی چندهدفه برای یافتن راه حل‌های پارتو بهره برده شود. در ادامه این تحقیق، ابتدا مقالات و تحقیقات صورت گرفته در حوزه طراحی شبکه لجستیک مورد واکاوی قرار می‌گیرند. در بخش سوم و چهارم مسئله مفروض این تحقیق به همراه ساختار زنجیره تامین تعریف شده‌است و سپس مدل ریاضی ارائه گردیده است. بخش پنجم شامل حل این مدل و بررسی نتایج آن است. در بخش ششم سعی شده‌است نتایج کلی ارائه گردد و پیشنهادهای محقق برای تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرند.

### مرور ادبیات:

دسترسی راحت به میوه در طول سال و کیفیت آن مسائل مهمی است که منجر به شناخت صنعت کشاورزی به عنوان مهم‌ترین بخش صنعت برای آینده می‌شود. از طرفی نیز طراحی زنجیره تامین کارایی که در دستیابی به این اهداف کمک کننده باشند بسیار مهم است. مطالعات معدودی برای رسیدگی به مسائل مربوط به لجستیک معکوس میوه‌های تازه انجام شده‌است. یکی از مطالعات اولیه در مورد مدل‌های شبیه‌سازی در زنجیره‌تأمین کشاورزی در سال ۲۰۰۹ توسط آهومادا و ویلالوبوس<sup>۲</sup> انجام شده‌است. آنها بر روی غذاهای متنوع کشاورزی فاسدشدنی و هم فاسدشدنی و همچنین سبزیجات متمرکز شدند. اخیراً، یک مدل ریاضی برای زنجیره‌تأمین میوه توسط سوتوسیلوا و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۶) ارائه شده‌است که مروری از تحقیقات انجام شده تا سال ۲۰۱۶ می‌باشد. در کنار آنها چندین مطالعه به مدل‌های ریاضی در حوزه زنجیره تامین محصولات کشاورزی و زنجیره‌تأمین میوه<sup>۴</sup> می‌پردازند. آموریم و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۲) به تولید و توزیع محصولات فاسدشدنی می‌پردازند تا تازگی میوه‌ها را بهینه کنند. یک مدل یکپارچه برای تصمیم‌گیری در زمینه لجستیک تعاونی سرویس‌دهی میوه و سبزیجات<sup>۶</sup> توسط ولیچکو<sup>۷</sup> (۲۰۱۴) ارائه شده‌است. همچنین وردو و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۰) یک مدل پایه برای طراحی زنجیره‌های تامین میوه‌های تازه و فرآوری شده را با جزئیات عمیق ارائه دادند. اخیراً یک مدل برنامه‌ریزی حمل و نقل برای زنجیره تامین میوه که در آن یک مرکز لجستیک میوه توسط تعدادی از مراکز نگهداری با توجه به تقاضا در فصل غیربرداشت تأمین می‌شود، توسط نادال رویگ و پل آراگوس<sup>۹</sup> (۲۰۱۵) تهیه شد. اعتمادنیا و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۵) با استفاده از گزینه‌های حمل و نقل دو مدی، مکان بهینه تسهیلات عمده‌فروش را برای زنجیره‌تأمین میوه و سبزی پیشنهاد دادند و روش ابتکاری را برای دستیابی به نتایج پیشنهاد دادند.

<sup>۱</sup> NP-hard

<sup>۲</sup> Ahumada and Villalobos

<sup>۳</sup> Soto-Silva et al.

<sup>۴</sup> Fruit Supplly Chain (FSC)

<sup>۵</sup> Amorim et al.

<sup>۶</sup> logistics of vegetable and fruit servicing cooperative

<sup>۷</sup> Velychko

<sup>۸</sup> Verdouw et al

<sup>۹</sup> Nadal-Roig and Plà-Aragónés

<sup>۱۰</sup> Etemadnia et al.

چندین تحقیق بر تجزیه و تحلیل چندهدفه در مسائل برنامه‌ریزی در زنجیره تامین کشاورزی تمرکز دارند. مسائل بهینه‌سازی چندهدفه یک روش جامع با هدف شناسایی بهترین توازن بین چندین هدف متضاد است (مادومیر و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۹). یک مدل برنامه‌ریزی محصول توسط سارکر و ری<sup>۲</sup> (۲۰۰۹) به عنوان یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه تدوین شد و روش‌های مورد نظر آنها روش محدودیت اسپیلون<sup>۳</sup> و برخی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری<sup>۴</sup> چندهدفه شناخته شده بود. در واقع، توسعه الگوریتم‌های فرا ابتکاری به یافتن راه‌حل‌های بهینه برای مسائل نزدیک به دنیای حقیقی در مدت زمان محاسباتی اندک منتج شده است (غفاری‌نسب و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۸). چندین مقاله در رابطه با توازن بین قیمت و تقاضا در سیستم‌های کشاورزی از طریق مطالعه چندهدفه وجود دارد. برای مثال رومرو<sup>۶</sup> (۲۰۰۰) یک طرح تولید کارآمد را با توجه به ریسک تولیدکنندگان پیشنهاد کرد.

شاخص میزان انتشار کربن به عنوان شاخصی پرکاربرد و معتبر برای تعیین اثرات زیست‌محیطی به صورت کمی می‌باشد (زادجعفر و غلامیان، ۱۳۹۷). در مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه ارائه شده توسط پاکسوی و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۰)، به حداقل رساندن هزینه و میزان انتشار کربن دی‌اکسید در لجستیک روبه‌جلو و همچنین حداقل کردن هزینه‌های زنجیره تنها در لجستیک معکوس مورد ارزیابی قرار گرفته است. امین و ژانگ<sup>۸</sup> (۲۰۱۳) یک شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته که شامل مراکز تولید، مراکز جمع‌آوری و بازار تقاضا به صورت چند محصولی است را تحت شرایط عدم قطعیت توسعه داده‌اند. برای این هدف، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط پیشنهاد شده است که هزینه‌های کل را حداقل می‌نماید. علاوه بر این یک تابع زیست‌محیطی با در نظر گرفتن عوامل محیطی به صورت وزنی به مساله اضافه شده است. یک مدل چند هدفه برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای مسئله مکانیابی - مسیریابی - موجودی در زنجیره تامین حلقه بسته صنعت لبنیات کشور توسط حاجیان و همکاران (۱۳۹۷) ارائه شده است که برای حل مدل رویکردی از الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده است. اعتبار مدل نیز با مقایسه نتایج به دست آمده و نتایج روش حل دقیق گمز، بررسی شده‌اند.

اخیرا مفاهیم زنجیره‌تأمین پایدار و مسئولیت‌پذیری اجتماعی موضوع دیگری است که محققان این حوزه در مساله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین به آن پرداخته‌اند. دهقانیان و منصور<sup>۹</sup> (۲۰۰۹) برای ایجاد یک شبکه پایدار بازاریابی لاستیک، که در آن اثرات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی بطور همزمان در نظر گرفته شود، تحلیل چرخه عمر را به منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی پایان عمر لاستیک‌های استفاده شده و اندازه‌گیری مسئولیت‌های اجتماعی را به منظور بررسی اثرات اجتماعی و تابع هدف سود به منظور بررسی اثرات اقتصادی استفاده کرده‌اند. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک<sup>۱۰</sup> چندهدفه برای پیدا کردن

<sup>۱</sup> Madoumier et al.

<sup>۲</sup> Sarker and Ray

<sup>۳</sup>  $\epsilon$ -constrained

<sup>۴</sup> Metaheuristic Algorithms

<sup>۵</sup> Ghaffarinasab et al.

<sup>۶</sup> Romero

<sup>۷</sup> Paksoy et al.

<sup>۸</sup> Amin and Zhang

<sup>۹</sup> Dehghanian and Mansour

<sup>۱۰</sup> Genetic Algorithm

جواب‌های بهینه پارتو<sup>۱</sup> استفاده شده‌است. رحمانی و همکاران (۱۳۹۸) در مدل سه هدفه برای یک زنجیره‌تأمین پایدار روبه‌جلو که برای یک محصول کشاورزی زوال‌پذیر پیشنهاد شده است، حداقل سازی هزینه‌ها، کمینه سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای و حداکثرسازی سطح سلامت اجتماعی را مورد بررسی قرار داده‌اند. از روش محدودیت اپسیلون تقویت شده<sup>۲</sup> برای محاسبه متغیرهای تصمیم مسئله بهره برده بودند. برادران و صفری (۱۳۹۸) در مدل دوهدفه پیشنهادی خود برای یک زنجیره‌تأمین حلقه بسته، کاهش هزینه‌های کل و میزان آلاینده‌های زیست محیطی را مورد توجه قرار دادند. به منظور حل مدل یک روش جدید ترکیبی براساس رویکرد بهینه‌سازی استوار<sup>۳</sup> و برنامه‌ریزی احتمالی ارائه شده‌است.

یکی از مسائل زیست‌محیطی در زنجیره‌های تأمین مربوط به مقدار زباله تولید شده و در پاسخ، مدیریت و بازیافت این زباله‌ها، توجه متخصصان و محققان را به خود جلب کرده است (پاکسوی و همکاران، ۲۰۱۰؛ هابز و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۸). بازیابی ارزش یک محصول به طور معمول شامل فعالیت‌های لجستیکی معکوس مانند استفاده مجدد، تعمیر، بازیافت و بازسازی می‌باشد (جایارامن<sup>۵</sup>، ۲۰۰۶). بنابراین لجستیک معکوس شامل تمام فعالیت‌هایی است که از محصول استفاده شده (یعنی مورد نیاز کاربر نیست) شروع می‌شود تا اینکه این محصولات قابل استفاده مجدد در یک بازار شوند (فلیچمن و همکاران<sup>۶</sup>، ۱۹۹۷). شرکت‌ها دریافته‌اند که درک بهتر از بازگشت محصول و لجستیک معکوس موثر می‌تواند مزیت رقابتی فراهم کند (استاک و مولکی<sup>۷</sup>، ۲۰۰۹). زباله‌های مواد غذایی می‌تواند در طیف گسترده‌ای از کاربردهای صنعتی، از جمله تولید انرژی، تولید خوراک دام، کاربردهای شیمیایی یا دارویی استفاده شوند (گیروتو و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۱۵؛ شوال‌پور، اسدی و قادری، ۱۳۹۷). مدل‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری زنجیره‌تأمین مواد غذایی کشاورزی انگشت‌شماری در ادبیات وجود دارند که جریان‌های مواد را بصورت حلقه بسته که از مواد زائد برای تولید در همان زنجیره‌تأمین استفاده کند، در نظر گرفته‌اند (ژانگ و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۱۹). باناسیک و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۷) زنجیره‌تأمین حلقه بسته قارچ صنعتی را مورد مطالعه قرار دادند و اولین چارچوب برای زنجیره‌تأمین حلقه بسته مواد غذایی کشاورزی را ارائه دادند. در این تحقیق، محیط کشت محصول می‌تواند بازیافت شده و دوباره استفاده شود. بدین ترتیب آنها یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مساله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته ارائه نموده‌اند تا بین شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی توازن ایجاد نمایند. چراغعلی‌پور و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۸) مطالعه‌ای با هدف کاهش هزینه‌های زنجیره‌تأمین حلقه بسته مرکبات و به حداکثر رساندن پاسخ‌گویی به تقاضای مشتریان در جریان روبه‌جلو و معکوس، یک مدل ریاضی جدید را توسعه دادند. همچنین برای حل مدل از برخی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری شناخته شده استفاده شد.

<sup>1</sup> Pareto-Optimal solution

<sup>۲</sup> Augmented  $\epsilon$ -constrained

<sup>3</sup> Robust Optimization

<sup>۴</sup> Hobbs et al.

<sup>5</sup> Jayaraman

<sup>6</sup> Fleischmann et al.

<sup>7</sup> Stock and Mulki

<sup>8</sup> Giroto et al.

<sup>۹</sup> Zhang et al.

<sup>۱۰</sup> Banasik et al.

<sup>۱۱</sup> Cheraghalipour et al.

بازارهای بین‌المللی فرصت خوبی را برای رقابت زنجیره‌های تامین در سطح جهانی فراهم کرده است. با افزایش رقابت جهانی و تنوع نیازهای مشتریان محیط کسب و کاری، هزینه‌های لجستیک و تولید زنجیره‌های تامین به شدت افزایش یافته است (درویشی و قاسمی یقین، ۱۳۹۷). یکی از اولین تحقیقات بر روی مسائل مکانیابی جهانی توسط هودر و جوکر<sup>۱</sup> (۱۹۸۵) انجام گردیده است. در سال‌های اخیر، در پژوهشی که توسط قو و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۷) انجام شده‌است، یک مدل ریاضی چند سطحی دو هدفه برای مساله طراحی شبکه زنجیره تامین جهانی ارائه شده‌است که مکان قرار گرفتن تسهیلات و مقدار کالای حمل شده بین تسهیلات و مراکز فروش را مشخص می‌کند. تابع هدف اول برای حداکثر سازی سود پس از کسر مالیات شرکت و تابع هدف دیگر برای کاهش ریسک تعریف شده‌اند.

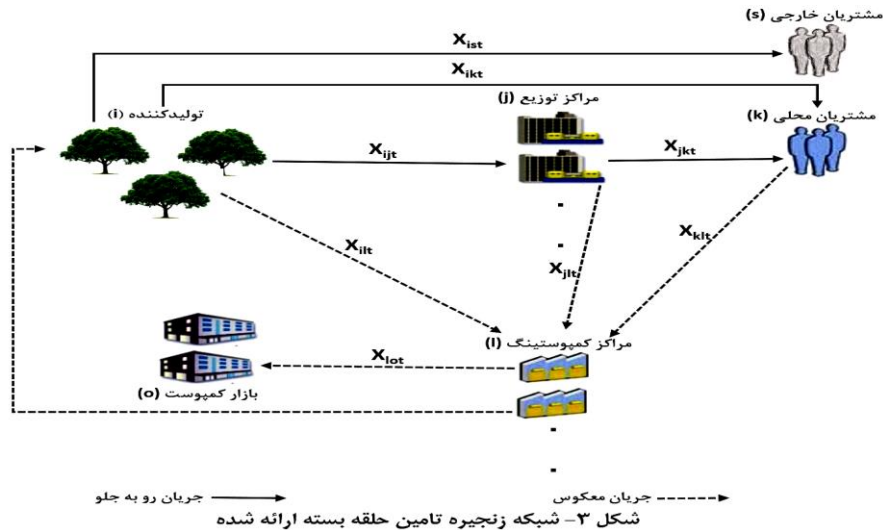
با توجه به تاثیرات بلند مدتی که طراحی شبکه لجستیک بر روی عملکرد زنجیره تامین دارد و به علت هزینه بالا و زمان بر بودن ایجاد تغییر طراحی شبکه در کوتاه مدت، لذا در طراحی این شبکه یکپارچه حلقه بسته بایستی با دقت عمل شود. با توجه به مطالعات انجام یافته می‌توان گفت این مقاله جزو اولین مقالاتی است که مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه برای زنجیره تامین حلقه بسته سبب چند دوره‌ای و چند سطحی شامل تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان میوه در جریان رو به جلو و همچنین مراکز کمپوستینگ و مشتریان کمپوست در جریان معکوس با در نظر گرفتن ملاحظات هر سه معیار پایداری را ارائه داده است. این مدل برای تحقق سه هدف شامل بیشینه سازی سود، کمینه سازی میزان انتشار کربن دی اکسید و بیشینه سازی درجه رضایت مشتریان انجام شده‌است. ضمناً در زنجیره تامین ارائه شده صادرات نیز در نظر گرفته شده‌است، یعنی علاوه بر مشتریان بومی برای میوه، مشتریان خارج از کشور نیز در مدل وارد شده‌اند و این نیز وجه تمایز دیگر این مقاله است چرا که زنجیره تامین ارائه شده از نوع جهانی و بین‌المللی نیز محسوب می‌شود.

### تعریف مسئله

فرایند انجام این تحقیق که در زمره پژوهش‌های کمی و کاربردی قرار دارد، بدین ترتیب است که پس از مطالعات پیشینه نظری در باب موضوع، مسئله تحقیق ابتدا به صورت مفهومی و سپس از طریق مدل ریاضی تبیین می‌شود. در مرحله بعدی مدل ریاضی برای مسئله آزمون فرضی حل شده و داده‌ها و نتایج تحلیل می‌گردند. در مرحله پایانی نیز نتایج بررسی و تحلیل می‌شوند.

<sup>۱</sup> Hodder & Jucker

<sup>۲</sup> Goh et al.



زنجیره تامین مورد بررسی در این پژوهش زنجیره تامین یکپارچه روبه جلو و معکوس میوه سیب است. ساختار این زنجیره تامین در شکل ۳، مشاهده می‌شود. در این زنجیره تامین، ابتدا سیب درختی توسط تولید کنندگان (باغداران) تولید شده و به دست مشتریان می‌رسد. در این مسئله دو دسته مشتری داریم که شامل مشتریان محلی و مشتریان خارجی (بین‌المللی) می‌باشد. مشتریان داخلی محصول سیب را یا به صورت مستقیم از باغ‌ها و یا از طریق توزیع کنندگان محصول تقاضا شده را دریافت می‌کنند. تقاضای مشتریان خارجی نیز از باغ‌هایی که محصولشان دارای کیفیت لازم و کافی برای صادرات هستند، پس از انجام فعالیت‌های لازم جهت بسته‌بندی مناسب برآورده می‌شوند. میوه‌های فاسد در سطوح مختلف زنجیره تامین روبه‌جلو یا دورریز شده و به مراکز دفن منتقل می‌شوند و یا از طریق جریان معکوس به مراکز کمپوستینگ منتقل می‌شوند و پس از پردازش در این مراکز به بازارهای کمپوست منتقل می‌شوند که باغ‌های موجود در زنجیره تامین فرضی نیز می‌توانند جزو این بازارها محسوب شوند. هدف از این پژوهش عبارت است از: ارائه مدلی برای بهینه‌سازی اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی پیکربندی زنجیره تامین ارائه شده در شکل ۳. در حقیقت علاوه بر اندازه‌گیری سود کل در یک طرح خاص زنجیره تامین حلقه بسته، عملکرد محیطی براساس انتشار کربن دی‌اکسید و عملکرد اجتماعی برحسب میزان برآورده ساختن تقاضای مشتریان لجستیک روبه‌جلو و معکوس ارزیابی می‌شوند. از آنجا که سه شاخص عملکرد زنجیره تامین در مدل‌سازی ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بهینه‌سازی چندهدفه برای ساخت مدل ریاضی زنجیره تامین حلقه بسته انجام می‌شود. این مدل با در نظر گرفتن توازن بین سه شاخص عملکردی پایدار به تصمیم گیرندگان اجازه می‌دهد تا به بهترین طراحی زنجیره تامین حلقه بسته میوه سیب برسند و مشخص کنند که چه تسهیلاتی (مراکز توزیع/مراکز کمپوستینگ) باید در شبکه گنجانده



- شوند و مقدار جریان محصولات بین تسهیلات مختلف و همچنین میزان موجودی مراکز توزیع را بهینه می‌کند. مفروضات این مدل به شرح زیر است:
- مکان و تعداد باغ‌ها، مشتریان جریان روبه جلو و معکوس و تعدادی از مراکز توزیع و کمپوستینگ از قبل مشخص است.
- فقط مراکز توزیع می‌توانند موجودی ذخیره کنند و موجودی اولیه آنها برابر صفر است.
- تقاضای مشتریان معین و مشخص است و بایستی در همان دوره پاسخ داده شود و به دوره بعد منتقل نمی‌شود.
- همه محصولات صادر شده به بازارهای خارجی فروخته شده و هیچگونه دورریزی وجود ندارد.
- شبکه زنجیره تامین، تک محصولی و چند دوره‌ای است.
- مکان بالقوه مراکز توزیع و مراکز کمپوستینگ مشخص است.
- همه تسهیلات تولید و توزیع دارای ظرفیت محدودی می‌باشند.
- درصدی از محصولات در قسمت مشتریان، مراکز توزیع و باغ‌ها خراب می‌شوند و می‌توانند به مراکز کمپوستینگ منتقل شوند.
- محصولات حمل شده از باغ‌ها به عنوان متغیر در نظر گرفته می‌شوند، زیرا تمام محصولات باغی در این شبکه در نظر گرفته نمی‌شوند و محصول حمل شده از هر باغ کمتر یا برابر حداکثر میزان تولید پیش بینی شده است. بقیه محصولاتی که از باغ‌ها حمل نمی‌شوند به عنوان دور ریز محسوب شده و منجر به کاهش عملکرد مالی و زیست‌محیطی می‌شوند.
- برای ملاحظات زیست‌محیطی میزان انتشار کربن دی اکسید معادل در نظر گرفته شده است. یعنی میزان خسارت ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای دیگر (به عنوان مثال متان) به خسارت معادل آن برحسب کربن دی اکسید تبدیل شده است. پس منظور از انتشار کربن دی اکسید در این مقاله همان انتشار کربن دی اکسید معادل است.
- در قیمت لحاظ شده به مشتریان خارجی تمام هزینه‌های مربوط به گمرک و مالیات کشورهای مدنظر لحاظ شده‌اند.
- در زنجیره تامین فرض شده دو جریان وجود دارد:
- الف- جریان محصولاتی که از تولیدکننده به مشتریان و مراکز توزیع منتقل می‌شوند که این جریان تا سه دوره برقرار است چون مدت برداشت میوه سیب توسط تولیدکننده حداکثر سه ماه است. همچنین در ادامه این جریان بخشی از تقاضای برآورده نشده مشتریان توسط تولیدکننده با دریافت میوه از مراکز توزیع برآورده می‌شود. فرض بر این است که این بخش از جریان تا ۸ دوره برقرار است.

ب- در جریان معکوس، محصولات بازگشتی به مراکز ورمی کمپوستینگ حمل می‌شوند و بعد از تبدیل شدن به کود کمپوست بخشی به بازار کود ارگانیک و بخش دیگر مستقیماً به تولیدکنندگان (باغ‌ها) منتقل می‌شوند. در نتیجه زنجیره‌تامین حلقه بسته خواهد بود.

### فرمول‌بندی مسئله

شاخص‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم و توابع هدف مدل ریاضی ارائه شده برای شبکه زنجیره‌تامین فرضی به شرح جداولی در ادامه آمده است.

جدول ۱- شاخص‌ها و پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل ریاضی

شاخص‌ها	
مکان تولیدکنندگان (باغ‌ها)	$i = 1, 2, \dots, I$
مکان مراکز توزیع موجود	$j_1 = 1, 2, \dots, J_1$
مکان بالقوه مراکز توزیع	$j_2 = 1, 2, \dots, J_2$
مکان موجود و بالقوه مراکز توزیع	$j = j_1 + j_2$
مکان مشتریان داخلی میوه	$k = 1, 2, \dots, K$
مکان مشتریان خارجی میوه	$s = 1, 2, \dots, S$
مکان مراکز کمپوستینگ موجود	$l_1 = 1, 2, \dots, L_1$
مکان بالقوه مراکز کمپوستینگ	$l_2 = 1, 2, \dots, L_2$
نقاط موجود و بالقوه مراکز کمپوستینگ	$l = l_1 + l_2$
دوره‌های زمانی	$t = 1, 2, \dots, t', \dots, T$
مکان مشتریان کمپوست	$o_1 = 1, 2, \dots, O_1$
بعضی از باغ‌های استفاده کننده از کمپوست	$o_2 = 1, 2, \dots, O_2$
مکان تمام مشتریان کمپوست	$o = o_1 + o_2$
پارامترها	
هزینه ثابت تاسیس مرکز توزیع $j$	$f_j$
هزینه ثابت تاسیس مرکز کمپوستینگ $l$	$f_l$
هزینه حمل به ازای واحد محصول حمل شده بر واحد مسافت طی شده (تن.کیلومتر/ریال)	$dc$
هزینه حمل به ازای واحد محصول صادراتی (تن/ریال)	$ds$
مسافت بین مکان $i$ و $j$ (کیلومتر)	$d_{ij}$
هزینه نگهداری محصول توسط توزیع کننده $j$ در دوره $t$ (تن/ریال)	$ch_{jt}$
هزینه فرآوری و بسته‌بندی به ازای واحد محصول در مرکز $j$ در دوره $t$	$cp_{jt}$
هزینه تولید کمپوست به ازای واحد محصول در مرکز کمپوستینگ $l$ در دوره $t$	$cr_{lt}$
هزینه تولید به ازای واحد محصول تولید شده توسط تولیدکنندگان	$cp'$
فرآوری و بسته‌بندی به ازای واحد محصول صادراتی در باغ $i$ در دوره $t$	$cpe_{it}$
ضریب وزنی پاسخگویی به مشتریان جریان روبه جلو	$\rho$
تقاضای محصول مشتری $k$ در دوره $t$	$dk_t$

تقاضای محصول مشتری S در دوره t	$d_{st}$
تقاضای کمپوست مشتری O در دوره t	$d_{ot}'$
انتشار کربن ثابت تاسیس مرکز توزیع j	$fe_j$
انتشار کربن ثابت تاسیس مرکز کمپوستینگ l	$fe_l$
انتشار کربن ناشی از نگهداری محصول در مرکز توزیع j	$eh_j$
انتشار کربن ناشی از فرآوری و بسته‌بندی محصول در مرکز توزیع j	$ep_j$
انتشار کربن ناشی از فرآوری و بسته‌بندی محصول صادراتی در باغ i	$eps_i$
انتشار کربن ناشی از تولید کمپوست در مرکز l	$ec_l$
انتشار کربن ناشی از تولید واحد محصول در باغ i	$ep_i'$
انتشار کربن ناشی از حمل واحد محصول به ازای مسافت طی شده	$de$
انتشار کربن ناشی از حمل واحد محصول صادراتی	$dse$
کسر فاسد شده محصول تولیدی توسط تولیدکنندگان در دوره t	$\alpha_t$
عدد مثبت خیلی بزرگ	$M$
ظرفیت تولید باغ i در دوره t	$\lambda_{cit}$
ظرفیت نگهداری محصول در مرکز توزیع j	$\lambda h_j$
کسر فاسد شده محصول توسط مشتریان در دوره t	$\theta_t$
کسر فاسد شده محصولات توسط مراکز توزیع در دوره t	$\beta_t$
ظرفیت تولید کمپوست مرکز کمپوستینگ l	$\lambda r_l$
نرخ تبدیل محصول فاسد شده به کمپوست	$\varphi$
هزینه انهدام به ازای واحد محصول دورریز	$wc$
انتشار کربن دی اکسید ناشی از انهدام واحد محصولات دورریز	$we$
کسری از تقاضای محصول صادراتی که در دوره t بایستی برآورده شود	$\gamma_t$
قیمت فروش میوه در بازار k	$P_k$
قیمت فروش میوه در بازار S	$P_s$
قیمت فروش کمپوست در بازار O	$P_o$
<b>متغیرهای تصمیم</b>	
اگر مرکز توزیع j در نقاط بالقوه تاسیس شود مقدار ۱، در غیر اینصورت ۰	$W_j$
اگر مرکز کمپوستینگ l در نقاط بالقوه تاسیس شود مقدار ۱، در غیر اینصورت ۰	$Y_l$
اگر باغ i حائز کیفیت مطلوب جهت صادرات باشد مقدار ۱، در غیر اینصورت ۰	$Q_i$
مقدار محصول ارسال شده از $re(i, j, k, l, o)$ به $r'e(i, j, k, l, o)$ در دوره t	$X_{rr't}$
مقدار محصول انبار شده توسط مرکز توزیع j در دوره t	$Ih_{jt}$
مقدار محصول تولیدی وارد شده به زنجیره تامین توسط تولید کننده i در دوره t	$\lambda_{it}$

پس از تعریف ساختار مسئله و پارامترهای آن، محدودیت‌ها و توابع هدف مدل در ادامه ارائه شده‌اند. مسئله دارای سه تابع هدف و بیست و یک محدودیت است.

**تابع هدف اول: بیشینه سازی سود کل**

تابع هدف اول ( $Z$ ) مقدار سود کل زنجیره تامین به دست می‌دهد، که تفاضل میان درآمد کل زنجیره تامین و هزینه کل آن تعریف می‌شود. درآمد کل مجموع درآمد حاصل از فروش میوه در بازار داخلی ( $ZI_1$ ) و خارجی ( $ZI_2$ ) و درآمد حاصل از فروش کود کمپوست ( $ZI_3$ ) است و هزینه کل شامل هزینه ثابت تأسیس مراکز ( $ZC_1$ )، هزینه حمل و نقل محصولات ( $ZC_2$ )، هزینه نگهداری موجودی در مراکز توزیع ( $ZC_3$ )، مجموع هزینه تولید توسط تولیدکنندگان، هزینه فرآوری مراکز توزیع و هزینه بازپزدازش در مراکز کمپوستینگ ( $ZC_4$ ) و هزینه انهدام محصولات دورریز ( $ZC_5$ ). فرمول نویسی ریاضی تابع هدف در معادلات (۱)–(۸) آورده شده‌است.

$$Max Z = ZI_1 + ZI_2 + ZI_3 - ZC_1 - ZC_2 - ZC_3 - ZC_4 - ZC_5 \quad (۱)$$

$$ZI_1 = \left( \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{t'} X_{ikt} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{jkt} \right) \times P_k$$

(۲)

$$ZI_2 + ZI_3 = \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{t'} X_{ist} P_s + \sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T X_{lot} P_o \quad (۳)$$

$$ZC_1 = \sum_{j=1}^J f_j W_j + \sum_{l=1}^L f_l Y_l \quad (۴)$$

$$\begin{aligned} ZC_2 = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{t'} X_{ijt} d_{ij} dc + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{t'} X_{ikt} d_{ik} dc + \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{t'} X_{ist} ds \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^{t'} X_{ilt} d_{il} dc + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{jlt} d_{jl} dc + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{jkt} d_{jk} dc \\ & + \sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T X_{lot} d_{lo} dc + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{klt} d_{kl} dc \end{aligned} \quad (۵)$$

$$ZC_3 = \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T lh_{jt} ch_{jt} \quad (۶)$$

$$\begin{aligned} ZC_4 = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{t'} X_{ijt} cp_{jt} + \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{t'} X_{ist} cpe_{it} + \sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T X_{lot} cr_{lt} \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{t'} \lambda_{it} cp' \end{aligned} \quad (۷)$$

$$ZC_5 = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{t'} (\lambda_{it} - \lambda'_{it}) wc + \left( \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (\theta_t (X_{ikt} + X_{jkt}) - X_{klt}) \right) wc$$

$$+ \left( \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^{t'} (\alpha_t \lambda_{it} - X_{ilt}) + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T (\beta_t Ih_{i(t-1)} - X_{jlt}) \right) wc \quad (۸)$$

### تابع هدف دوم: کمینه‌سازی تاثیرات زیست‌محیطی

از آنجایی که انتشار کربن دی اکسید به عنوان عاملی برای سنجش تاثیرات زیست‌محیطی مطرح می‌شود. تابع هدف دوم برای مینیمم کردن مقدار انتشار کربن دی اکسید ( $Z^{emission}$ ) است که شامل انتشار کربن دی اکسید ناشی از تاسیس تسهیلات بالقوه جدید ( $Z^{PE}$ )، انتشار کربن دی اکسید ناشی از نگهداری موجودی ( $Z^{PH}$ )، انتشار کربن دی اکسید ناشی از فرآوری میوه‌ها برای بازار داخلی و خارجی و پردازش مجدد جهت تولید کمپوست ( $Z^{PR}$ )، انتشار کربن دی اکسید ناشی از حمل و نقل ( $Z^{PT}$ ) و انتشار کربن دی اکسید ناشی از انهدام میوه‌های فاسد شده ( $Z^{PD}$ ) می‌باشد. فرمول نویسی ریاضی تابع هدف در معادلات (۹)–(۱۴) نشان داده شده‌است.

$$Min Z^{emission} = z^{PE} + z^{PH} + z^{PR} + z^{PT} + z^{PD} \quad (۹)$$

$$z^{PE} = \sum_{j=1}^J fe_j W_j + \sum_{l=1}^L fe_l Y_l \quad (۱۰)$$

$$z^{PH} = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T Ih_{jt} eh_j \quad (۱۱)$$

$$z^{PR} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X_{ijt} ep_j + \sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^L \sum_{t=1}^T X_{lot} ec_l + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{t'} \lambda_{it} ep'_i + \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{t'} X_{ist} eps_i \quad (۱۲)$$

$$z^{PT} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{t'} X_{ijt} d_{ij} de + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{t'} X_{ikt} d_{ik} de + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{jkt} d_{jk} de + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^{t'} X_{ilt} d_{il} de + \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{t'} X_{ist} dse + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{jlt} d_{jl} de + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{klt} d_{kl} de + \sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^L \sum_{t=1}^T X_{lot} d_{lo} de \quad (۱۳)$$

$$z^{PD} = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{t'} (\lambda_{it} - \lambda'_{it}) we + \left( \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (\theta_t (X_{ikt} + X_{jkt}) - X_{klt}) \right) we + \left( \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^{t'} (\alpha_t \lambda_{it} - X_{ilt}) + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T (\beta_t Ih_{i(t-1)} - X_{jlt}) \right) we \quad (۱۴)$$

### تابع هدف سوم: پیشینه‌سازی پاسخگویی

برای اینکه مدل بتواند میزان رضایت مشتریان از زنجیره تامین را بسنجد، درصد برآورده ساختن تقاضای آنها را ملاک قرار داده است. تابع هدف سوم ( $Z'$ ) میزان پاسخگویی به تقاضای مشتریان جریان روبه جلو و معکوس را بیشینه می‌کند.

$$\begin{aligned}
 \text{Max } Z' = & \rho \times \frac{\left[ \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{t'} X_{ikt} + \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{t'} X_{ist} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{jkt} \right]}{\left[ \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{t'} d_{kt} + \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{t'} d_{st} \right]} \\
 & + (1 - \rho) \times \frac{\left[ \sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T X_{lot} \right]}{\left[ \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T d'_{ot} \right]} \quad (15)
 \end{aligned}$$

این تابع از دو کسر تشکیل شده‌است: کسر اول حاصل تقسیم مقدار مجموع جریان‌های ورودی به مناطق مشتریان داخلی و خارجی میوه بر مجموع تقاضای کل مناطق مشتریان و کسر دوم حاصل تقسیم مجموع جریان‌های ورودی به بازارهای کمپوست بر مجموع تقاضای کل بازارهای کمپوست است. بیشترین مقدار این تابع زمانی حادث می‌شود که جریان‌های ورودی به مناطق مشتریان با مقدار تقاضای آنها در هر دو جریان روبه جلو و معکوس برابر باشد، که برابر با یک می‌باشد. این مقدار همیشه عددی بین صفر و یک است. فرمول نویسی ریاضی تابع هدف در معادله (۱۵) نشان داده شده‌است.

### محدودیت‌های مدل:

محدودیت (۱۶) اطمینان حاصل می‌کند که کسر محصول فاسد شده از مقدار محصول ورودی برابر خواهد بود با مجموع مقدار محصولاتی که مشتریان داخلی و بین‌المللی میوه و مراکز توزیع دریافت می‌کنند.

$$\lambda_{it} \times (1 - \alpha_t) = \sum_{j=1}^J X_{ijt} + \sum_{k=1}^K X_{ikt} + \sum_{s=1}^S X_{ist} \quad \forall i \in I, t \in t' \quad (16)$$

محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) قید می‌کند که محصولات در صورتی از باغ‌ها به مراکز توزیع بالقوه و مراکز کموستینگ بالقوه حمل می‌شوند که آن مراکز تاسیس شده باشند.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{t'} X_{ijt} \leq M \times W_j \quad \forall j \in J \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{t'} X_{ilt} \leq M \times Y_l \quad \forall l \in L \quad (18)$$

محدودیت (۱۹) تضمین می‌کند که جریان فیزیکی محصول از باغ‌ها به بازارهای خارجی میوه‌های با درجه کیفیت بالا را شامل می‌شود که متغیر باینری  $Q_i$  در آن نشان‌دهنده این است که کیفیت محصول باغ  $i$  مشمول شرایط لازم جهت صادرات می‌باشد یا نه، که این انتخاب در ابتدای اولین دوره اتفاق افتاده است.

$$\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{t'} X_{ist} \leq \lambda c_{it} \times Q_i \quad \forall i \in I \quad (19)$$

محدودیت‌های (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) این اطمینان را می‌دهند که مقدار محصولات بازگشتی از تولیدکننده، مراکز توزیع و مشتریان داخلی به مراکز کمپوستینگ، به ترتیب کمتر یا برابر با نرخ فاسد شده محصولات تولیدکننده، موجودی مراکز توزیع و مقدار تقاضای مشتریان است.

$$\sum_{t=1}^L X_{ilt} \leq \alpha_t \times \lambda_{it} \quad \forall i \in I, t \in T' \quad (20)$$

$$\sum_{l=1}^L X_{jlt} \leq \beta_t \times I h_{j(t-1)} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (21)$$

$$\sum_{l=1}^L X_{klt} \leq \theta_t \times d_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (22)$$

محدودیت‌های (۲۳) و (۲۴) به ترتیب بیان می‌کنند که محصولات بازگشتی تنها در صورتی از مراکز توزیع و بازارها به مراکز کمپوستینگ منتقل می‌شوند که آن مرکز کمپوست بالقوه تاسیس شده باشد.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X_{jlt} \leq M \times Y_l \quad \forall l \in L \quad (23)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{klt} \leq M \times Y_l \quad \forall l \in L \quad (24)$$

محدودیت (۲۵) بالانس جریانات ورودی، خروجی و موجودی مراکز توزیع در هر دوره را اطمینان می‌دهد.

$$I h_{j(t-1)} + \sum_{i=1}^I X_{ijt} = I h_{jt} + \sum_{k=1}^K X_{jkt} + \sum_{l=1}^L X_{jlt} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (25)$$

تاکید بر اینکه مقدار محصول دریافتی توسط هر یک از مشتریان در هر دوره کمتر یا برابر با مقدار تقاضای آن مشتری در آن دوره است در محدودیت (۲۶) آورده شده است. محدودیت (۲۷) اطمینان حاصل می‌کند که مقدار محصول که بایستی صادر شود بزرگتر یا برابر با درصد خاصی (۲) از تقاضای بازارهای خارجی و کوچکتر یا برابر با مقدار تقاضای آن بازارها است که باید برآورده شود. محدودیت (۲۸) تایید می‌کند که مقدار محصول کمپوست حمل شده به بازار کمپوست بایستی کمتر یا برابر با میزان تقاضای آن بازار باشد.

$$\sum_{j=1}^J X_{jkt} + \sum_{i=1}^I X_{ikt} \leq d_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (26)$$

$$\gamma \times d_{st} \leq \sum_{i=1}^I X_{ist} \leq d_{st} \quad \forall s \in S, t \in T' \quad (27)$$

$$\sum_{l=1}^L X_{lot} \leq d'_{ot} \quad \forall o \in O, t \in T \quad (28)$$

اطمینان از اینکه مقدار محصولات حمل شده از مشتریان به مراکز کمپوست بایستی کمتر یا برابر با مجموع جریان‌های ورودی از باغ‌ها و مراکز توزیع به ناحیه مشتریان میوه باشد در محدودیت (۲۹) آمده است

$$\sum_{i=1}^I X_{ikt} + \sum_{j=1}^J X_{jkt} \geq \sum_{l=1}^L X_{klt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (29)$$

محدودیت (۳۰) بالانس جریان در مرکز کمپوستینگ را برقرار می‌کند. این محدودیت بیان می‌دارد که جریان خروجی از مراکز کمپوستینگ برابر با نرخ تبدیل میوه به کود کمپوست ( $\varphi$ ) ضرب در مجموع جریان‌های ورودی از تسهیلات جریان روبه‌جلو به مراکز کمپوستینگ است.

$$\left[ \sum_{i=1}^I X_{ilt} + \sum_{j=1}^J X_{jlt} + \sum_{k=1}^K X_{klt} \right] \times \varphi = \sum_{o=1}^O X_{lot} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (30)$$

محدودیت (۳۱) اطمینان می‌دهد که مقدار محصول ورودی توسط هر یک از تولیدکنندگان کمتر یا برابر با میزان ظرفیت آن باغ است. محدودیت (۳۲) تاکید دارد که میزان موجودی که توسط هر مرکز توزیع در هر دوره می‌تواند ذخیره شود بایستی کمتر یا برابر با مقدار ظرفیت آن باشد. محدودیت (۳۳) نیز تاکید دارد که مقدار محصول دریافتی بازار کمپوست از هر یک از مراکز کمپوستینگ بایستی کمتر یا برابر با حداکثر ظرفیت آن مرکز باشد.

$$\lambda_{it} \leq \lambda c_{it} \quad \forall i \in I, t \in T' \quad (31)$$

$$Ih_{jt} \leq \lambda h_j \quad \forall j \in J, t \in T \quad (32)$$

$$\sum_{o=1}^O X_{lot} \leq \lambda r_l \quad \forall l \in L, t \in T \quad (33)$$



نهایتاً، محدودیت باینری و نامنفی بودن متغیرهای تصمیم در محدودیت‌های (۳۴)، (۳۵) و (۳۶) آورده شده‌اند.

$$Y_l, W_j, Q_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, l \in L, j \in J \quad (34)$$

$$X_{r,t} \geq 0 \quad \forall r \in \{I, J, K, S, L, O\}, r' \in \{I, J, K, S, L, O\}, t \in T \quad (35)$$

$$Ih_{jt} \geq 0, \lambda_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (36)$$

### حل مدل و آنالیز حساسیت:

زنجیره تأمین حلقه بسته میوه در تعداد محدودی از مقالات مانند چراغعلی پور و همکاران (۲۰۱۸) بررسی شده‌است. بیشتر میوه‌های فاسد شده در باغ‌ها، مراکز توزیع و مشتریان میوه دفن می‌شوند و از بین می‌روند. در حالی که این میوه‌های تلف شده می‌توانند در مراکز ورمی‌کمپوستینگ به کود طبیعی (کود کمپوست) تبدیل شوند و از این طریق سبب کاهش انتشار کربن دی‌اکسید می‌شوند در حالی که همزمان باعث افزایش سود از طریق کاهش هزینه‌های مربوطه و برآورده ساختن تقاضای کود کمپوست می‌شود. هدف از این بخش بررسی کاربرد مدل ریاضی با مثال عددی است. برای این منظور، یک مسئله آزمون نزدیک به واقعیت در نظر گرفته شده‌است.

یک زنجیره تأمین پنج سطحی در نظر گرفته شده‌است که در آن مجموعه‌ای از نه باغ سیب درختی، هشت مرکز توزیع در دسترس و پنج مکان بالقوه برای تأسیس مراکز توزیع جدید در نظر گرفته شده‌است، که ترکیبی از آنها باید به گونه‌ای طراحی گردد که تقاضای نه مکان مشتری داخلی و سه مکان مشتری خارجی را در هشت دوره زمانی تا حد امکان برآورده کند و همچنین هشت مرکز کمپوستینگ در دسترس و پنج مکان بالقوه برای تأسیس مراکز کمپوستینگ جدید در نظر گرفته شده‌است که بهترین ترکیب از آنها بایستی به گونه‌ای طراحی گردد که تقاضای هشت بازار کود کمپوست را برآورده کند به گونه ای که بیشترین سود عاید زنجیره تأمین شود و همزمان میزان انتشار کربن دی‌اکسید کمینه و میزان پاسخگویی به بیشینه مقدار خود برسد. جزئیات مربوط به شبکه فرض شده در جدول ۲ آورده شده‌است.

جدول ۲- لیست اندیس‌های مسئله

$$i = \{ \text{رامسر ۱، رامسر ۲، رامسر ۳، نور ۱، نور ۲، نور ۳، ساری ۱، ساری ۲، ساری ۳} \}$$

$$j = \{ \text{تنکابن ۱، تنکابن ۲، تنکابن ۳، چالوس ۱، چالوس ۲، چالوس ۳، قائم‌شهر ۱، قائم‌شهر ۲} \}$$

$$j_p = \{ \text{رامسر ۱، رامسر ۲، بابل ۱، بابل ۲، نکا} \}$$

$$k = \{ \text{چالوس ۱، چالوس ۲، بابلسر، آمل ۱، آمل ۲، آمل ۳، رامسر، بهشهر، پل سفید} \}$$

$$s = \{ \text{روسیه، عمان، قطر} \}$$

$$l = \{ \text{نوشهر ۱، نوشهر ۲، آمل ۱، آمل ۲، آمل ۳، چالوس ۱، چالوس ۲، چالوس ۳} \}$$

$$l_p = \{ \text{رامسر ۱، رامسر ۲، ساری ۱، ساری ۲، جویبار} \}$$

$$o = \{ \text{بهشهر ۱، بهشهر ۲، تنکابن، نکا، جویبار} \}$$

$$o_p = \{ \text{رامسر، نور، ساری} \}$$

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مسئله آزمون

	$T$
	$t'$
	$f_j$
ماه	$f_l$
	$Dc$
میلیون ریال	$Ds$
	$ch_{jt}$
تن / ریال	$cp_{jt}$
	$cr_{lt}$
تن / ریال	$cp'$
تن / ریال	$d_{kt}$
تن	$d_{st}$
تن	$d'_{ot}$
کیلوگرم کربن دی اکسید	$fe_j$
کیلوگرم کربن دی اکسید	$fe_l$
تن محصول / کیلوگرم کربن دی اکسید	$eh_j$
تن محصول / کیلوگرم کربن دی اکسید	$ep_j$
تن محصول / کیلوگرم کربن دی اکسید	$epe_i$
تن محصول / کیلوگرم کربن دی اکسید	$ec_l$
تن. کیلومتر / کیلوگرم کربن دی اکسید	$ep'_i$
تن محصول / کیلوگرم کربن دی اکسید	$De$
درصد	$Dse$
تن	$a_t$
درصد	$\lambda c_{it}$
درصد	$\lambda h_j$
تن	$\theta_t$
درصد	$\beta_t$
میلیون ریال	$\lambda r_l$
میلیون ریال	$\Phi$
تن / ریال	$P_k$
تن محصول / کیلوگرم کربن دی اکسید	$P_s$
	$P_o$
	$Wc$
	$We$



مقادیر پارامترهای مدل ریاضی پیشنهاد شده از مطالعه موردی موجود در مقاله چراغعلی پور و همکاران (۲۰۱۸) و همچنین مقادیر موجود در مقالات نورجانی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۷)، اریکسون و اسپانگبرگ<sup>۲</sup> (۲۰۱۷) و فائو (۲۰۱۵) برگرفته شده‌اند. از آنجا که تخمین مقادیر برخی پارامترها در دنیای واقعی دشوار است، مسئله آزمون فرض می‌کند که برخی پارامترها از توزیع یکنواخت پیروی می‌کنند. هدف از استفاده از توزیع یکنواخت، در نظر گرفتن یک مدل واقع بینانه است. مقادیر پارامترهای مسئله آزمون مورد بحث در جدول ۳ گردآوری شده‌است.

مکانهای موجود و بالقوه تسهیلات با استفاده از نقشه موجود در مقاله چراغعلی پور و همکاران (۲۰۱۸) مشخص شد و مسافت بین این مکانها با استفاده از نقشه گوگل<sup>۳</sup> به دست آمده است. جزئیات این داده‌ها در جدول ۴ آورده شده‌است.

به منظور اعتبارسنجی عملکرد روش حل پیشنهادی، مثال عددی با استفاده از نرم‌افزار GAMS ۲۴.۱.۲ در رایانه شخصی با مشخصات Intel Core i7، ۲۴.۶۰ گیگاهرتز، رم ۱۲ گیگابایت حل شده‌است. راه حل‌های بهینه ایده آل مربوط به هر یک از توابع هدف به صورت جداگانه قبل از فرایند محاسباتی مقیاس‌پذیری<sup>۴</sup> بصورت جدول ۵ محاسبه شده‌است. مقدار بهینه ایده‌آل (بیشینه) مربوط به تابع هدف سود ۲۱۶۷۷۳۴۶۷۵ ریال و مقدار بهینه ایده‌آل (کمینه) تابع هدف انتشار کربن دی اکسید ۱۲۷۶۸۰۵ کیلوگرم است. تابع هدف پاسخگویی در بدترین حالت صفر و در بهترین حالت برابر یک است، که مقدار بهینه ایده‌آل (بیشینه) آن در این مدل برابر یک است.

جدول ۵-مقادیر ایده‌آل توابع هدف

$Z^*$ (ریال)	$Z^{emission*}$ (کیلوگرم)	$Z^*$ (درصد)
۲۱۶۷۷۳۴۶۷۵	-۵۰۴۶۶۵۷۱۹۹	-۱۱۶۷۹۵۹۵۶۹۷
۱۷۵۳۶۷۲	۱۲۷۶۸۰۵	۷۲۷۹۳۶۶
۰.۷۳۸	۰.۲۷۹	۱

روش مقیاس‌پذیری معیار جامع در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. این روش به منظور حداقل کردن انحراف توابع هدف موجود نسبت به حل ایده‌آل آنها در یک مدل چندهدفه است. برای این تحقیق که یک مدل برنامه‌ریزی با سه تابع هدف شامل بیشینه کردن سود، کمینه کردن انتشار کربن دی‌اکسید و بیشینه کردن پاسخگویی است فرض می‌کنیم که  $Z^*$ ،  $Z^{emission*}$  و  $Z^*$  مقادیر بهینه حل جداگانه هر یک از توابع هدف با محدودیت‌ها می‌باشد.  $w_1$ ،  $w_2$  و  $w_3$

<sup>۱</sup> Nurjanni et al.

<sup>۳</sup> google Maps

<sup>۲</sup> Eriksson & Spångberg

<sup>۴</sup> scalarization

عوامل وزنی هر یک از توابع هدف هستند که توسط تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌شوند، به طوری که مجموع اوزان بایستی برابر یک شود. تابع هدف نهایی مطابق معادله (۳۷) برای وزن‌های متفاوتی از توابع هدف حل شد. بدین منظور ۶۶ حالت از توابع هدف با اوزان متفاوت با هم ترکیب شدند و مقادیر بهینه مربوط به هر یک از توابع هدف در کنار سایر توابع هدف به دست آمدند. این مقادیر همان مجموعه راه‌حل‌های بهینه پارتوی مسئله است که در جدول ۶ آمده است. مقادیر منفی تابع هدف سود نشان‌دهنده ضرر در زنجیره تامین مورد مطالعه می‌باشد. نمودار مربوط به این راه‌حل‌های بهینه پارتو نیز مطابق شکل ۴ ترسیم شده است.

$$Min w_1 \left( \frac{Z^* - Z}{Z^*} \right) + w_2 \left( \frac{Z^{emission} - Z^{emission*}}{Z^{emission*}} \right) + w_3 \left( \frac{Z' - Z'}{Z'} \right) \quad (37)$$

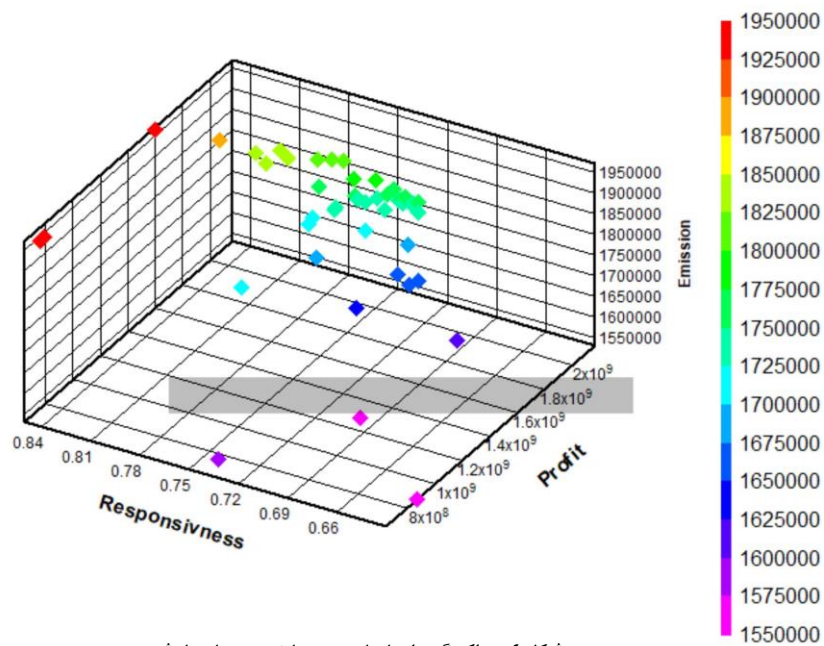
S.t

Eqs. (۱۶)-(۳۶)

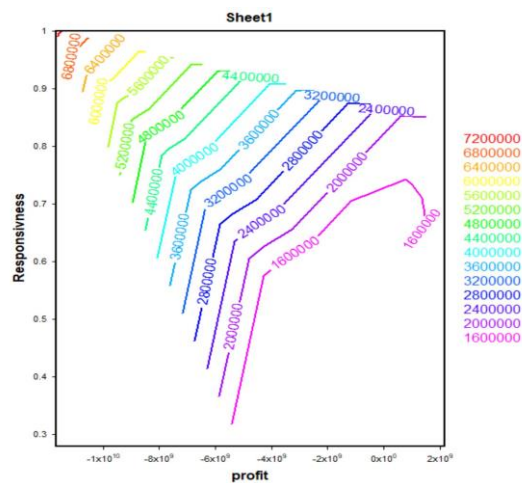
جدول ۶- راه‌حل‌های بهینه پارتوی مسئله حل شده

Z'	توابع هدف			وزن‌ها			توابع هدف				
	Z <sup>emission</sup>	Z	Z (ریال)	Z <sup>emission</sup>	Z'	Z'	Z <sub>n</sub> <sup>emission</sup>	Z	Z (ریال)	Z <sup>emission</sup>	Z'
	(کیلوگرم)		(کیلوگرم)	(کیلوگرم)	(درصد)	(درصد)	(کیلوگرم)		(ریال)	(کیلوگرم)	(درصد)
۰	۱	۰	-۵۰۶۶۵۷۱۹۹	۱۲۷۶۸۰۶	-۰٫۲۷۹	-۰٫۳	-۰٫۴	-۰٫۳	۲۱۱۰۲۶۶۲۸۵	۱۷۳۸۱۷۶۵	-۰٫۷۶۴
۰	-۰٫۹	-۰٫۱	-۵۶۸۳۹۱۴۹	۱۴۶۱۱۳۴	-۰٫۵۷۴	-۰٫۳	-۰٫۳	-۰٫۴	۲۱۵۹۰۳۳۱۹۸	۱۷۴۹۳۳۵	-۰٫۷۴۹
۰	-۰٫۸	-۰٫۲	۱۷۰۹۰۷۱۱۷۶	۱۶۲۴۶۱۴	-۰٫۶۷۶	-۰٫۳	-۰٫۳	-۰٫۵	۲۱۶۳۰۳۳۸۹۰	۱۷۵۰۵۷۶	-۰٫۷۴۷
۰	-۰٫۷	-۰٫۳	۱۹۰۸۶۲۸۲۸۷	۱۶۶۲۸۵۷	-۰٫۷۱۶	-۰٫۳	-۰٫۱	-۰٫۶	۲۱۶۳۴۰۱۷۴۸۱	۱۷۵۰۶۴۲	-۰٫۷۴۷
۰	-۰٫۶	-۰٫۴	۲۱۴۴۲۷۶۶۸۰	۱۷۳۹۱۴۹	-۰٫۷۳۵	-۰٫۳	-	-۰٫۷	۲۱۶۰۹۶۹۶۱۶	۱۷۷۰۸۵۶	-۰٫۷۵۲
۰	-۰٫۵	-۰٫۵	۲۱۶۶۴۴۹۸۹۲	۱۷۴۸۰۸۲	-۰٫۷۴۱	-۰٫۴	-۰٫۶	-	-۳۳۵۶۱۳۳۰۸۱	۱۳۵۱۱۷۹	-۰٫۵۷۸
۰	-۰٫۴	-۰٫۶	۲۱۶۶۴۴۹۸۹۲	۱۷۴۸۰۸۲	-۰٫۷۴۱	-۰٫۴	-۰٫۵	-۰٫۱	۱۸۱۶۸۵۷۳۱۴	۱۶۸۳۷۷۲	-۰٫۷۷۰
۰	-۰٫۳	-۰٫۷	۲۱۶۶۵۶۶۷۳۷	۱۷۴۸۳۵۵	-۰٫۷۴۱	-۰٫۴	-۰٫۴	-۰٫۲	۲۰۳۶۷۰۲۴۰۹	۱۷۲۹۰۲۸	-۰٫۷۷۷
۰	-۰٫۲	-۰٫۸	۲۱۶۷۴۱۵۵۰۹	۱۷۴۹۵۰۶	-۰٫۷۴۱	-۰٫۴	-۰٫۳	-۰٫۳	۲۱۰۶۹۴۴۴۶۳	۱۷۴۲۹۲۲	-۰٫۷۶۹
۰	-۰٫۱	-۰٫۹	۲۱۶۷۴۴۴۸۸۸	۱۷۴۹۶۲۹	-۰٫۷۴۱	-۰٫۴	-۰٫۲	-۰٫۴	۲۱۳۶۷۳۸۱۷۸	۱۷۴۷۳۹۸	-۰٫۷۶۰
۰	-	-۱	۲۱۶۷۷۳۳۶۷۵	۱۷۵۲۶۷۲	-۰٫۷۳۸	-۰٫۴	-۰٫۱	-۰٫۵	۲۱۵۴۴۴۷۶۹۵	۱۷۵۸۰۴۸	-۰٫۷۵۵
-۰٫۱	-۰٫۹	-	-۴۱۹۶۴۴۶۶۹۸	۱۲۸۲۹۱۶	-۰٫۳۷۹	-۰٫۴	-	-۰٫۶	۲۱۴۹۷۱۴۳۳۷	۱۷۸۴۰۷۲	-۰٫۷۶۲
-۰٫۱	-۰٫۸	-۰٫۱	۸۷۰۵۷۳۸۵۹	۱۵۳۲۰۲۰	-۰٫۶۳۰	-۰٫۵	-۰٫۵	-	-۲۳۰۲۹۸۷۸۸۰	۱۳۹۵۰۰۱	-۰٫۶۱۵
-۰٫۱	-۰٫۷	-۰٫۲	۱۸۸۴۴۱۸۷۷۰	۱۶۵۸۶۵۳	-۰٫۷۱۹	-۰٫۵	-۰٫۴	-۰٫۱	۱۹۲۳۸۳۷۳۴	۱۷۱۸۴۴۵	-۰٫۷۸۴
-۰٫۱	-۰٫۶	-۰٫۳	۲۰۳۷۸۶۹۶۳۲	۱۶۹۷۳۳۰	-۰٫۷۲۲	-۰٫۵	-۰٫۳	-۰٫۲	۲۰۴۴۹۴۰۶۰۷	۱۷۳۱۷۷۸	-۰٫۷۷۷
-۰٫۱	-۰٫۵	-۰٫۴	۲۱۶۲۳۶۴۴۷۳	۱۷۴۶۷۰۸	-۰٫۷۴۲	-۰٫۵	-۰٫۳	-۰٫۳	۲۱۰۸۹۶۱۹۵۸	۱۷۵۰۰۰۶	-۰٫۷۷۱
-۰٫۱	-۰٫۴	-۰٫۵	۲۱۶۶۴۴۹۸۹۲	۱۷۴۸۰۸۲	-۰٫۷۴۱	-۰٫۵	-۰٫۱	-۰٫۴	۲۱۲۶۱۳۷۵۰	۱۷۸۳۶۹	-۰٫۷۷۳
-۰٫۱	-۰٫۳	-۰٫۶	۲۱۶۶۶۶۰۰۵۶	۱۷۴۸۱۳۳	-۰٫۷۴۱	-۰٫۵	-	-۰٫۵	۲۱۲۰۴۹۵۵۴۳	۱۸۱۹۸۱۲	-۰٫۷۷۹
-۰٫۱	-۰٫۲	-۰٫۷	۲۱۶۷۳۴۸۱۳۴	۱۷۴۹۱۷۲	-۰٫۷۴۱	-۰٫۶	-۰٫۴	-	۶۴۳۷۶۹۹۴۱	۱۵۷۷۵۶۹	-۰٫۷۳۲
-۰٫۱	-۰٫۱	-۰٫۸	۲۱۶۷۴۴۴۸۸۸	۱۷۴۹۶۲۹	-۰٫۷۴۱	-۰٫۶	-۰٫۳	-۰٫۱	۱۹۶۱۷۰۱۶۸۰	۱۷۳۳۵۹	-۰٫۷۸۴
-۰٫۱	-	-۰٫۹	۲۱۶۷۷۳۳۶۷۵	۱۷۴۹۷۳۴	-۰٫۷۴۱	-۰٫۶	-۰٫۲	-۰٫۲	۲۰۴۹۲۳۷۵۵۹	۱۶۹۶۶۲۹	-۰٫۷۸۸
-۰٫۲	-۰٫۸	-	-۳۸۲۲۹۰۲۳۶۰	۱۳۰۸۶۵۵	-۰٫۴۸۶	-۰٫۶	-۰٫۱	-۰٫۳	۲۰۸۲۸۰۶۰۷۵	۱۸۲۱۴۰۱	-۰٫۷۹۲
-۰٫۲	-۰٫۷	-۰٫۱	۱۱۷۷۵۰۵۰۸۲	۱۵۷۰۵۶۹	-۰٫۶۹۰	-۰٫۶	-	-۰٫۴	۲۱۰۵۵۷۴۳۹۴	۱۸۲۰۶۲۹	-۰٫۷۸۵
-۰٫۲	-۰٫۶	-۰٫۲	۱۹۰۸۵۶۶۶۹۶	۱۶۶۵۸۰۲	-۰٫۷۲۸	-۰٫۷	-۰٫۳	-	۱۴۴۳۸۴۴۷۳	۱۷۰۳۹۶۰	-۰٫۷۸۵
-۰٫۲	-۰٫۵	-۰٫۳	۲۱۱۷۴۸۱۱۰	۱۷۳۳۶۱۹	-۰٫۷۵۳	-۰٫۷	-۰٫۲	-۰٫۱	۱۹۵۱۶۱۰۷۷۰	۱۸۲۵۱۶۰	-۰۸۱۲
-۰٫۲	-۰٫۴	-۰٫۴	۲۱۵۷۶۴۳۰۲۸	۱۷۴۵۵۳۸	-۰٫۷۴۶	-۰٫۷	-۰٫۲	-۰٫۲	۲۰۲۲۳۶۸۵۰۰	۱۸۲۵۳۷۸	-۰۸۰۴
-۰٫۲	-۰٫۳	-۰٫۵	۲۱۶۵۹۱۷۶۵۷	۱۷۴۸۷۳۸	-۰٫۷۴۲	-۰٫۷	-	-۰٫۳	۲۰۰۵۸۳۵۱۳	۱۸۴۵۰۸۲	-۰۸۰۸
-۰٫۲	-۰٫۲	-۰٫۶	۲۱۶۶۷۰۷۹۹۹	۱۷۴۹۱۷۲	-۰٫۷۴۲	-۰۸	-۰٫۲	-	۷۸۹۵۹۲۴۴	۱۹۳۷۴۷۱	-۰۸۰۰
-۰٫۲	-۰٫۱	-۰٫۷	۲۱۶۶۷۵۱۱۶۲	۱۷۴۹۸۲۵	-۰٫۷۴۲	-۰۸	-۰٫۱	-۰٫۱	۱۸۲۴۰۳۴۵۵۵	۱۸۹۸۶۳۴	-۰۸۱۹
-۰٫۲	-	-۰۸	۲۱۶۵۶۱۸۵۳۰	۱۷۶۰۱۰۸	-۰۷۴۵	-۰۸	-	-۰۲	۱۹۳۷۷۱۲۰۵۷	۱۸۴۹۳۷۸	-۰۸۱۷
-۰۳	-۰۷	-	-۳۹۱۱۰۸۴۵۸۸	۱۳۳۵۲۳۴	-۰۵۵۴	-۰۹	-	-	۷۶۳۷۱۴۸۲۳	۱۹۳۷۶۰۹	-۰۸۰۰
-۰۳	-۰۶	-۰۱	۱۶۹۶۷۵۶۵۸۵	۱۶۴۰۶۵۱	-۰۷۳۵	-۰۹	-	-۰۱	۱۵۸۳۰۳۱۳۳۳	۱۹۷۱۴۷۸	-۰۸۰۸
-۰۳	-۰۵	-۰۲	۲۰۱۹۱۰۸۶۶۷	۱۷۰۸۰۸۴	-۰۷۵۷	۱	-	-	-۱۱۶۷۹۵۵۶۹۷	۲۲۷۹۳۶۷	۱

از نظر مفهومی، بین توابع هدف تعارض وجود دارد بطوریکه به دست آوردن مقدار رضایت بخش برای یکی از توابع هدف منجر به فاصله گرفتن مقادیر سایر توابع هدف از مقدار بهینه ایده آل می شود که این مورد در شکل ۵ مشاهده می شود. همانطور که مشاهده می شود با حرکت به سمت مقدار ایده آل (بیشینه) سود منجر به فاصله گرفتن تابع هدف انتشار کربن دی اکسید و پاسخگویی از مقادیر ایده آل می شود.



شکل ۴- پراکنده‌گی راه‌حل‌های بهینه پارتوی مسئله حل شده



شکل ۵- تعارض توابع هدف با هم

بدلیل هزینه و انتشار کربن دی اکسید بالای حاصل از تاسیس مراکز توزیع و کمپوستینگ جدید، مدل تصمیم گرفت که هیچ مرکز جدیدی را تاسیس نکند و با مراکز موجود به کار خود ادامه دهد که در این حالت بیشینه تابع هدف پاسخگویی برابر با ۰,۸۵ به دست آمد. ولی زمانی که تنها هدف مدل بیشینه ساختن تابع هدف پاسخگویی است و برای دو تابع هدف دیگر ارزشی قائل نیست تابع هدف پاسخگویی در حد بالای خود یعنی یک قرار می‌گیرد.

### نتیجه‌گیری

این تحقیق یک مدل ریاضی را برای یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار پنج سطحی متشکل از باغات، مراکز توزیع و مشتریان داخلی و خارجی میوه در لجستیک روبه‌جلو و مراکز کمپوستینگ و بازارهای کمپوست در لجستیک معکوس ایجاد کرده است. این مسئله ابتدا به یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط با سه هدف ناسازگار، شامل بیشینه ساختن سود کل شبکه زنجیره تأمین، به حداقل رساندن انتشار کربن دی اکسید از فعالیت‌های بخش‌های مختلف شبکه و در عین حال حداکثر کردن پاسخگویی به تقاضای مشتریان در هر بازار، صورت می‌گیرد. با در نظر گرفتن مسئله آزمون، مدل پیشنهادی با استفاده از روش کلاسیک معیار جامع به یک تابع تک هدفه تبدیل شد و با وزن‌های مختلف برای توابع هدف در نرم افزار GAMS حل شد. وجود راه‌حلهای بهینه پارتو، اعتبار مدل را تأیید کرد.

مطالعات در زمینه طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته بسیار گسترده است. روش‌های دیگر حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه مانند محدودیت افسیلون و روش چیبیشف می‌توانند استفاده شوند. از آنجایی که مدل ارائه شده در ابعاد بزرگ مسئله جزو مسائل سخت محسوب می‌شود پس بررسی حل مدل با استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری توصیه می‌شود. همچنین، با توجه به اینکه در واقعیت برخی پارامترها، مانند تقاضا و میزان برگشتی‌ها، غیرقطعی‌اند، استفاده از رویکردهای فازی و برنامه‌ریزی استوار مفید خواهد بود.



## منابع

- برادران، وحید، و صفری، زهرا (۱۳۹۸). یک مدل مکان یابی دو هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت. *فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی*، ۱۷(۵۴)، ۲۲۳-۲۶۲.
- حاجیان، سیماء، افشارکاظمی، محمدعلی، سیدحسینی، سید محمد، و طلوعی اشلقی، عباس (۱۳۹۸). ارائه مدل چندهدفه برای مسئله مکان‌یابی- مسیریابی- موجودی در شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته چند دوره‌ای و چندمحصولی برای کالاهای فاسدشدنی. *مدیریت صنعتی*، ۱۱(۱)، ۸۳-۱۱۰.
- درویشی، فاطمه، و قاسمی یقین، رضا (۱۳۹۷). خرید جهانی در زنجیره عرضه پوشاک: یک رویکرد یکپارچه تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی-گروهی. *علوم و فناوری نساجی*، ۷(۳)، ۵-۱۸.
- رحمانی، مینا، سازور، زینب، و بزرگی امیری، علی (۱۳۹۸). ارائه‌ی یک مدل ریاضی سه‌هدفه برای برنامه‌ریزی پایدار زنجیره‌ی تأمین مواد کشاورزی زوال‌پذیر. *مهندسی صنایع و مدیریت*، ۱(۲)، ۳۵-۳۸.
- زادجعفر، محدثه السادات، و غلامیان، محمدرضا (۱۳۹۷). مروری بر مدل‌های موجودی با رویکرد پایداری در زنجیره تامین. *مدیریت زنجیره تامین*، ۲۰(۵۹)، ۴-۱۷.
- شوال‌پور، سعید، اسدی، مونا، و قادری، حمید (۱۳۹۷). مدل بهینه‌یابی برای طراحی زنجیره تامین سوخت زیستی. *نشریه انرژی ایران*، ۲۱(۶۵)، ۱۲۳-۱۴۲.

- Ahumada, O., & Rene Villalobos, J. (2009). Application of planning models in the agri-food supply chain: a review. *European Journal of Operational Research*, 195, 1-20.
- Amin, S. H., & Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, (37)6, 4165-4176.
- 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, 89-101.
- Azaron, A., Venkatadri, U., Farhang Doost, A. (2019). Designing Profitable and Responsive Supply Chains under Uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2816-2820.
- Banasik, A., Kanellopoulos, A., Claassen, G. D. H., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & van der Vorst, J. G. A. J. (2017). Closing loops in agricultural supply chains using multi-objective optimization: A case study of an industrial mushroom supply chain. *International Journal of Production Economics*, (183), 409-420.

- Carter, C. R., & Rogers, D. R. (2008). A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), 360-387.
- Cheraghalipour, A., Paydar, M. M., & Hajiaghahi-Keshteli, M. (2018). A Bi-objective Optimization for Citrus Closed-Loop Supply Chain Using Pareto-Based Algorithms. *Applied Soft Computing*, 69, 33-59.
- Dehghanian, F., & Mansour, S. (2009). Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. *Resources, conservation and recycling*, 53, 559-70.
- Eriksson, M., & Spångberg, J. (2017), "Carbon footprint and energy use of food waste management options for fresh fruit and vegetables from supermarkets", *Waste Management*, Vol. 60, pp. 786-799.
- Etemadnia, H., Goetz, S. J., Canning, P., & Tavallali, M. S. (2015). Optimal wholesale facilities location within the fruit and vegetables supply chain with bimodal transportation options: An LP-MIP heuristic approach. *European Journal of Operational Research*, 244, 648-661.
- FAO, 2011. Global food losses and food waste- extent, causes and prevention. SAVE FOOD an Initiat. Food Loss Waste Reduct. 37. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0126>.
- FAOStat (2010), [http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\\_by\\_commodity](http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity). Accessed 15 November 2018.
- FAOStat (2017), [http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/commodities\\_by\\_country\\_exports](http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/commodities_by_country_exports). Accessed 1 January 2020.
- FAO, (2015), "Food Wastage Footprint & Climate Change", *UN FAO, Rome*.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., van der LAAN, E., van Nunen, J. A. E. E., & van Wassenhove, L. N. (1997). Quantitative models for reverse logistics: a review. *European Journal of Operational Research*, 103, 1-17.
- Ghaffarinasab, N., Motallebzadeh, A., Jabarzadeh, Y., Y. Kara, B. (2018). Efficient simulated annealing based solution approaches to the competitive single and multiple allocation hub location problems. *Computers & Operations Research*, 90, 173-192.
- Giroto, F., Alibardi, L., & Cossu, R. (2015). Food waste generation and industrial uses: a review. *Waste Management*, 45, 32-41.

- Gobel, C., Langen, N., Blumenthal, A., Teitscheid, P., Ritter, G., Gobel, C., Langen, N., Blumenthal, A., Teitscheid, P., Ritter, G., 2015. Cutting food waste through cooperation along the food supply chain. *Sustainability* 7, 1429e1445. <https://doi.org/10.3390/su7021429>.
- Goh, M., Lim, J. Y., & Meng, F. (2007). A stochastic model for risk management in global supply chain networks. *European Journal of Operational Research*, 182(1), 164-173.
- Hobbs, S., Morton, E., Barclay, N., & Landis, A. (2018). Sustainability Approach: Food Waste-to-Energy Solutions for Small Rural Developing Communities. *The International Journal of Environmental, Cultural, Economic, and Social Sustainability: Annual Review*, 13, 21-37.
- Hodder, J. E., & Jucker, J. V. (1985). International plant location under price and exchange rate uncertainty. *Engineering Costs and Production Economics*, 9(1), 225-229.
- Jayaraman, V. (2006). Production planning for closed-loop supply chains with product recovery and reuse: an analytical approach. *International Journal of Production Research*, 44, 981-998.
- Krikke, H., Hofenk, D. and Wang, Y., 2013. *Revealing an invisible giant: A comprehensive survey into return practices within original (closed-loop) supply chains*. *Resources, Conservation and Recycling*, 73, pp.239-250.
- Madoumier, M., Trystram, G., Sébastien, P., Collignan, A. (2019). Towards a holistic approach for multi-objective optimization of food processes: A critical review. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 1-15.
- Nadal-Roig, E., & Plà-Aragónés, L. M. (2015). Optimal Transport Planning for the Supply to a Fruit Logistic Centre. In Plà-Aragónés, L. (eds). *Handbook of Operations Research in Agriculture and the Agri-Food Industry* (vol. 224, pp. 163-177). New York, NY: Springer.
- Nurjanni, K. P., Carvalho, M., & Costa, L. (2017), "Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model", *International Journal of Production Economics*, Vol. 183, Part B, pp. 421-432.
- Paksoy, T., Özceylan, E., & Weber, G. W. (2010). A multi objective model for optimization of a green supply chain network. *AIP Conference Proceedings*, 311.
- Rittmann, Bruce E., and P. L. McCarty. 2001. *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*. New York: McGraw-Hill Book Co.
- Romero, C. (2000). Risk programming for agricultural resource allocation: a multidimensional risk approach, *Ann. Operations Research*, 94, 57-68.

- Sarker, R., & Ray, T. (2009). An improved evolutionary algorithm for solving multiobjective crop planning models. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68, 191-199.
- Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699–1710.
- Stock, J. R., Mulki J. P. (2009). PRODUCT RETURNS PROCESSING: AN EXAMINATION OF PRACTICES OF MANUFACTURERS, WHOLESALERS/DISTRIBUTORS, AND RETAILERS. *Journal of Business Logistics*, 30, 33-62.
- Soto-Silva, W. E., Nadal-Roig, E., González-Araya, M. C., & Pla-Aragones, L. M. (2016). Operational research models applied to the fresh fruit supply chain. *European Journal of Operational Research*, (251)2, 345–355.
- Syam, S. S. (1997). A model for the capacitated  $p$ -facility location problem in global environments. *Computers & operations research*, 24(11), 1005-1016.
- Velychko, O. (2014). Integrated Modeling of Solutions in the System of Distributing Logistics of a Fruit and Vegetable Cooperative. *Business: Theory and Practice*, 15, 362–370.
- Verdouw, C. N., Beulens, A. J. M., Trienekens, J. H., & Wolfert, J. (2010). Process modelling in demand-driven supply: A reference model for the fruit industry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 73, 174–187.
- Zhang, Y., Chu, F., Che, A., Yu, Y., & Feng, X. (2019). Novel model and kernel search heuristic for multi-period closed-loop food supply chain planning with returnable transport items. *International Journal of Production Research*, 57(23), 7439-7456.