

# مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌یی برای مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری محصولات در شبکه‌های لجستیک سبز

علی احسان (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

رضا توکلی مقدم\* (استاد)

پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه تهران

وحیدرضا قضاوتی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، تابستان ۱۳۹۵  
دوری ۱ - ۳۲، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۶۵-۵۷

در این نوشتار، مدلی برای مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری محصولات با در نظر گرفتن ریسک و عوامل زیست‌محیطی ارائه شده است. در ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط<sup>۱</sup> در شرایط قطعی برای زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته ارائه شده تا با در نظر گرفتن زنجیره‌ی تأمین رو به جلو و بازگشتی به‌صورت یک زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته از زیربهدیگی‌های حاصل از جدا در نظر گرفتن این دو زنجیره‌ی جاوگیری شود. سپس اثر شرایط عدم قطعیت در تقاضای مشتریان و نرخ محصولات بازگشتی از مشتریان در ساختار شبکه، به‌وسیله‌ی برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌یی و براساس روش سناریو محور بررسی شده است. در نهایت، نتایج عددی به دست آمده از هر دو مدل ارائه شده، و توانایی مدل تصادفی پیشنهادی در به‌کارگیری اطلاعات غیرقطعی بررسی شده است.

واژگان کلیدی: لجستیک سبز، زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته، ریسک، عوامل زیست‌محیطی، برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌یی.

aliehsan.ie@gmail.com  
tavakoli@ut.ac.ir  
v\_ghezavati@azad.ac.ir

## ۱. مقدمه

بسیار مهم است. بنابراین دولت‌ها، شرکت‌ها و مراکز صنعتی بر آن شدند تا با سرمایه‌گذاری و اتخاذ روش‌های مختلف در ساختار اصلی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین<sup>۲</sup> زمینه‌های لازم برای بهبود عملکرد زیست‌محیطی و کاهش آلاینده‌ها را فراهم آورند. در همین ارتباط به زنجیره‌های تأمینی که در آن‌ها روش‌ها یا تسهیلاتی برای کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی در نظر گرفته شده «زنجیره‌ی تأمین سبز»<sup>۳</sup> گفته می‌شود. در طراحی مدل‌های کلاسیک مکان‌یابی در شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین عموماً بر آنیم که تسهیلات به‌گونه‌یی مستقر شوند که کم‌ترین هزینه بر مجموعه تحمیل شود. بنابراین یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در این راستا، هزینه‌های حمل‌ونقل<sup>۴</sup> است که براساس فواصل تسهیلات با یکدیگر متفاوت خواهد بود.

از سوی دیگر فرایند حمل‌ونقل یکی از عوامل اساسی انتشار گازهای مخرب و ایجاد آلاینده‌ها -- از جمله گازهای گلخانه‌یی و گاز CO<sub>2</sub> -- می‌شود که این موارد تأثیرات مخرب بسیاری بر محیط زیست پیرامون خواهد داشت. بهترین حالت مربوط به زمانی است که کم‌ترین آلودگی به‌همراه کم‌ترین هزینه‌ی حمل‌ونقل محقق شود. بنابراین در زنجیره‌ی تأمین سبز در پی ایجاد موازنه بین کمینه‌کردن آلاینده‌های زیست‌محیطی و کمینه‌کردن هزینه‌های ناشی از حمل‌ونقل مواد و محصولات هستیم.

شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین، سیستمی یکپارچه از فرایندهایی مرتبط به هم است که هدفش دست‌یابی به مواد اولیه‌ی مورد نیاز، تبدیل مواد اولیه به محصولات، توسعه و ارزش‌گذاری آن‌ها، و توزیع محصولات به مشتریان و مقاصد نهایی برای کالاهای مصرفی است. بنابراین به‌صورت کلی می‌توان اجزای شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین را در دسته‌های تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، واسطه‌ها، خرده‌فروشان تقسیم‌بندی کرد؛ هدف اصلی این زنجیره کاهش هزینه‌ها، افزایش کارایی و اثربخشی، و در نهایت افزایش سود برای تمامی ذی‌نفعان است. یکی از مهم‌ترین تصمیمات استراتژیک در طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین، مکان‌یابی مراکز توزیع یا جمع‌آوری محصولات است. مراکز توزیع یا جمع‌آوری محصولات<sup>۲</sup> از جمله سطوحی هستند که مستقیماً با مشتری یا مصرف‌کنندگان در ارتباط‌اند و قرارگیری آن‌ها در مکان‌های مناسب منجر به ایجاد یک زنجیره‌ی تأمین کارا و پیوسته خواهد شد. این امر، با توجه به افزایش روزافزون آلودگی‌های زیست‌محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌یی که باعث تخریب لایه‌ی اوزون و گرم‌تر شدن زمین و به‌دنبال آن به خطر افتادن زندگی بشر خواهد شد، بسیار اساسی و حیاتی است. در این میان می‌توان حمل‌ونقل و همچنین استفاده‌ی بیش از حد از مواد بازیافت‌نشده‌ی -- یا موادی که به‌سختی قابل بازیافت‌اند و نقش به‌سزایی در افزایش این آلودگی‌ها دارند --

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۲/۱۳، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۲/۱۸، پذیرش ۱۳۹۳/۱۲/۲۰.

## ۲. پیشینه‌ی موضوع

در مدیریت زنجیره‌ی تأمین سه سطح تصمیم‌گیری وجود دارد: سطح استراتژیک، سطح تاکتیکی و سطح عملیاتی. در سطح استراتژیک تصمیماتی اتخاذ می‌شود که تأثیرش بر تسهیلات<sup>۶</sup> بلندمدت است. در این سطح تصمیمات مربوط به تعداد تسهیلات، مکان و ظرفیت تسهیلات، و نیز چگونگی جریان مواد در شبکه‌ی لجستیک مورد توجه قرار می‌گیرد. بر این اساس، تصمیماتی که در سطح استراتژیک گرفته می‌شود از تصمیمات کلان شبکه بوده و از اهمیت فراوانی برخوردار است؛ این تصمیمات برای یک دوره‌ی زمانی بلندمدت برنامه‌ریزی شده و سرمایه‌ی زیادی را به خود اختصاص می‌دهند. تصمیمات اتخاذ شده در سطح استراتژیک بر تصمیمات سطح تاکتیکی نیز اثرگذار خواهد بود. مطالعات نشان داده که بررسی همزمان تصمیم‌گیری در این دو سطح به میزان چشم‌گیری هزینه‌های موجود در شبکه را کاهش خواهد داد<sup>۱</sup> و موجب بهبود در تصمیم یا تصمیمات نهایی اخذ شده و اثر بخشی بیشتر می‌شود. همچنین به دنبال مکان‌یابی تسهیلات در شبکه‌ی لجستیک معکوس، یک مدل طراحی شبکه‌ی سه سطحی ارائه شد.<sup>۲</sup> مدل ارائه شده به دنبال انتخاب مراکز تولید، بازسازی و جمع‌آوری و تعیین جریان بین تسهیلات موجود در شبکه است. در مطالعه‌ی دیگر، یک مدل زنجیره‌ی تأمین فرموله شد<sup>۳</sup> به نحوی که تعیین و انتخاب مراکز جمع‌آوری و مدیریت جریان بین تسهیلات و قیمت‌گذاری بر محصولات برگشتی نوعی سیاست تشویقی برای مشتریان قلمداد شد. در ادامه، محققین مدلی در سطح استراتژیک زنجیره‌ی تأمین ارائه کردند<sup>۴</sup> که به تصمیم‌گیری در مورد انتخاب مراکز جمع‌آوری، احیا، سطح تکنولوژی مورد نیاز در مراکز احیا، و مدیریت جریان بین تسهیلات می‌پرداخت. مدل دیگری نیز برای طراحی نوعی زنجیره‌ی تأمین ارائه شد<sup>۵</sup> که برای دو سطح استراتژیک و تاکتیکی تصمیم‌گیری می‌کرد. این مدل در سطح استراتژیک به انتخاب مراکز جمع‌آوری و مدیریت جریان بین تسهیلات، و در سطح تاکتیکی به برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و تعداد تسهیلات مورد نیاز می‌پرداخت. در مطالعات بعدی نیز مدلی ارائه شد که در آن یک مسئله‌ی چند دوره‌ی چند سطحی برای طراحی شبکه در لجستیک معکوس در نظر گرفته شد.<sup>۶</sup> برای این مدل‌سازی از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط<sup>۷</sup> در شرایط احتمالی استفاده شد.

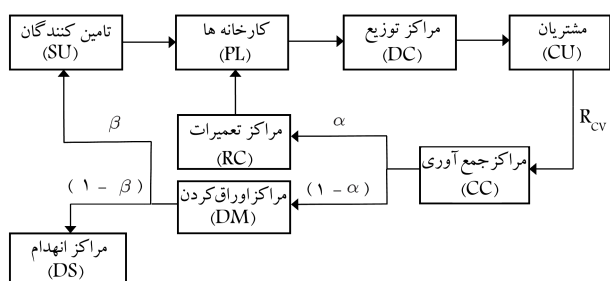
در مطالعات بعدی، یک مدل خطی ترکیبی برای بیشینه‌سازی سود در مسئله‌ی زنجیره‌ی تأمین معکوس ارائه شد<sup>۸</sup> و برای گسترش بیشتر این مدل، آن را به صورت چند محصولی و چند دوره‌ی در نظر گرفتند. سپس با استفاده از سناریوهای مختلف این مدل پیشنهادی تجزیه و تحلیل شد. با طراحی یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین رو به جلو و معکوس با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی برای فرموله کردن مدل،<sup>۹</sup> از آن برای تصمیم‌گیری در مکان‌یابی تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مراکز اوراق کردن – با در نظر گرفتن کمینه‌سازی هزینه – استفاده شد. برای حل این مدل از الگوریتم اصلاح‌شده‌ی ژنتیک استفاده شد که نتایج عددی حاصله نشان‌گر کارایی بالای الگوریتم بود. برخی از محققین به کمبود تحقیقات انجام‌شده در خصوص مکان‌یابی تسهیلات تعمیر – در شرایطی که محصولات بازگشتی از خرده‌فروشان یا مشتریان به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌شود تا پس از بازرسی تعمیر یا بازسازی شوند – اشاره کردند.<sup>۱۰</sup> آن‌ها برای پر کردن این خلاء تحقیقاتی، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح و یک الگوریتم ژنتیک به منظور حل آن ارائه دادند و برای اثبات کارایی آن از یک مثال موردی استفاده کردند. اما عده‌ی دیگر چنین بیان کردند که فرض قابلیت‌های محصولات تعمیر شده و بازیافتی ارجاعی به مراکز تولید برای ارضای کامل تقاضا در تولید،<sup>۱۱</sup> صرفاً برای صنایع معدودی صادق است. آن‌ها در همین

راستا یک مدل ریاضی پیشنهاد کردند و نتایج عددی حاصل از آن را نیز ارائه دادند. در ادامه، یک مدل یک پارچه‌ی لجستیک رو به جلو و برگشتی برای انتخاب مکان توزیع و جمع‌آوری ارائه شد.<sup>۱۲</sup> محققین یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین رو به جلو و بازگشتی مدل ریاضی چند هدفه‌ی احتمالی را که در شرایط عدم قطعیت فرموله‌بندی شده بود<sup>۱۳</sup> در نظر گرفتند. مدل ارائه شده در قسمت لجستیک رو به جلو شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و مراکز توزیع و در قسمت لجستیک معکوس شامل مراکز بازیابی و مراکز جمع‌آوری بود. هدف از مدل ارائه شده بیشینه‌سازی سود، افزایش پاسخ‌دهی به مشتریان و همچنین افزایش کیفیت شبکه بود. در نوشتار حاضر، مجموعه جواب‌های بهینه‌ی پارتو و نیز جواب‌های بهینه‌ی ریسک مالی، به منظور نشان دادن توازن بین اهداف ارائه شده است. یکی از روش‌های جلوگیری از پیامدهای زیان‌بار عدم کنترل اثرات مخرب زیست‌محیطی، سرمایه‌گذاری روی مباحث مرتبط و بیشینه‌کردن میزان بهره‌وری منابع و انرژی در کل زنجیره‌ی تأمین اعلام شده است.<sup>۱۴</sup> این سرمایه‌گذاری‌های برای صاحبان سرمایه مزایایی در بر خواهد داشت، مزایایی همچون دست‌یابی به بازارهای جدید، نوآوری در طراحی محصولات و ایجاد تنوع، ارزش گذاشتن به مشتریان به نحوی که مشتری نسبت به تولیدکننده‌ی که جنبه‌های زیست‌محیطی را رعایت می‌کند وفادارتر است.

## ۳. مدل‌های پیشنهادی

### ۳.۱. مدل قطعی

در این بخش یک مدل مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری محصولات در زنجیره‌ی تأمین با در نظر گرفتن عوامل زیست‌محیطی در یک زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته ارائه شده است. این مدل در هشت سطح: تأمین‌کنندگان،<sup>۸</sup> کارخانه‌ها،<sup>۹</sup> مراکز توزیع،<sup>۱۰</sup> مشتریان (نقاط تقاضا)،<sup>۱۱</sup> مراکز جمع‌آوری<sup>۱۲</sup> محصولات بازگشتی از مشتریان، مراکز تعمیر کردن،<sup>۱۳</sup> مراکز اوراق کردن<sup>۱۴</sup> و مراکز انهدام<sup>۱۵</sup> ارائه شده است (شکل ۱). محصولات نهایی ارسالی از کارخانه‌ها به مراکز توزیع از سه قسمت، قطعات ارسالی مراکز تعمیر، قطعات ارسالی از تأمین‌کنندگان، و قطعات تولیدی در خود کارخانه‌ها تشکیل می‌شود. هزینه‌ی خرید مواد یا قطعات اولیه در کارخانه‌های مختلف یکسان فرض شده است. برون‌سپاری بخشی یا تمام تولیدات به تولیدکنندگان خارجی و همچنین انبار کردن محصولات برای تولیدکنندگان امکان ندارد. هریک از تسهیلات دارای ظرفیت خاصی برای مواد یا قطعات است. تمامی مشتریان (مراکز تقاضا) در یک گستره‌ی وسیع جغرافیایی پراکنده‌اند و تمام تقاضای خود را از یک مرکز توزیع دریافت می‌کنند و کمبود برای مشتریان مجاز نیست. همچنین مکان تمامی تسهیلات به جز مراکز جمع‌آوری محصولات ثابت فرض شده است. به همین دلیل، در این نوشتار هزینه‌ی حمل‌ونقل و هزینه‌ی حاصل از انتشار گازهای گلخانه‌ی منحصراً به فرد



شکل ۱. شبکه‌ی هشت سطحی.

برای هریک از تسهیلات استفاده شده است. براساس مطالعات فروکن بروک<sup>[۱۲] [۱۳]</sup> و نیز جداول ارائه شده توسط مؤسسه ملی تحقیقات اقتصادی<sup>۱۶</sup> آمریکا (۱۹۹۳)، به جای استفاده از فرمول‌های معمول محاسبه‌ی هزینه‌های انتشار گازهای گلخانه‌یی که اکثراً با محدودیت‌هایی برای محاسبه‌ی تمامی حالات و ماشین‌آلات حمل‌ونقل مواجه‌اند از پارامتری استفاده شده که برای محاسبه‌ی هزینه‌های ناشی از گازهای گلخانه‌یی کافی است به مقاله یا جداول مذکور مراجعه و عدد مربوطه را جایگزین پارامتر کرد. مزیت این روش نسبت به روش استفاده از فرمول محاسباتی آن است که در این روش که بر پایه نتایج حاصل از تحقیق‌ها، بررسی‌ها و محاسبات انجام گرفته روی تمامی حالات و ماشین‌های حمل‌ونقل است که توسط یکی از معتبرترین مراکز در این زمینه تهیه و به تأیید بسیاری از مراکز معتبر در این حوزه نیز رسیده است. در صورتی که در حالت محاسباتی اعداد حاصله ممکن است دارای بعضی کاستی‌ها و خطاها باشند که این مهم می‌تواند از کارایی و اعتبار مدل به شدت بکاهد. در این مدل تقاضای هریک از مشتریان قطعی و صرفاً مختص به همان مشتری در نظر گرفته شده است. با توجه به منحصر به فرد منظور شدن تقاضای مشتریان ضریبی به عنوان «نرخ بازگشت محصولات مصرفی» نیز برای هر مشتری در نظر گرفته شده است. در مدل ارائه شده تمامی تسهیلات با استفاده از یک شبکه‌ی کامل و مشخص حمل‌ونقل با یکدیگر در ارتباط‌اند. با توجه به نیاز مدل به در نظر گرفتن هزینه‌ی عملیاتی، برای هریک از تسهیلاتی که در آن‌ها نیاز به عملیات اجرایی است، هزینه‌ی در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است سطوح مهارتی کارکنان در تمامی تسهیلات مذکور یکسان در نظر گرفته شده است.

### ۱.۱.۳. مجموعه‌ها

$SU$ : مجموعه مکان‌های ثابت تأمین‌کنندگان ( $SU = 1, 2, \dots$ )  
 $PL$ : مجموعه مکان‌های ثابت کارخانه‌ها ( $PL = 1, 2, \dots$ )  
 $DC$ : مجموعه مکان‌های ثابت مراکز توزیع ( $DC = 1, 2, \dots$ )  
 $CU$ : مجموعه مکان‌های ثابت مشتریان ( $CU = 1, 2, \dots$ )  
 $CC$ : مجموعه مکان‌های کاندید در اختیار برای مراکز جمع‌آوری ( $CC = 1, 2, \dots$ )  
 $RC$ : مجموعه مکان‌های ثابت مراکز تعمیرات ( $RC = 1, 2, \dots$ )  
 $DM$ : مجموعه مکان‌های ثابت مراکز اوراق‌کردنی ( $DM = 1, 2, \dots$ )  
 $DS$ : مجموعه مکان‌های ثابت مراکز انهدام ( $DS = 1, 2, \dots$ )

### ۲.۱.۳. پارامترها

$P_{su}$ : تولیدات کارخانه  $su$   
 $P_{pl}$ : تولیدات کارخانه  $pl$   
 $D_{cu}$ : تقاضای مشتری  $cu$   
 $R_{cu}$ : نرخ بازگشت محصولات مصرفی از مشتری  $cc$  به مرکز جمع‌آوری  $cu$   
 $\alpha$ : نرخ محصولات ارسالی از مرکز جمع‌آوری  $cc$  به مرکز تعمیر  $rc$   
 $\beta$ : نرخ محصولات ارسالی از مرکز اوراقی  $dm$  به تأمین‌کننده‌ی  $su$   
 $FC_{cc}$ : هزینه‌ی ثابت احداث مرکز جمع‌آوری  $cc$   
 $Cap_{su}$ : ظرفیت تولید تأمین‌کننده  $su$   
 $Cap_{pl}$ : ظرفیت تولید کارخانه  $pl$   
 $Cap_{dc}$ : ظرفیت انبار مرکز توزیع  $dc$   
 $Cap_{cc}$ : ظرفیت انبار مرکز جمع‌آوری  $cc$   
 $Cap_{rc}$ : ظرفیت انبار مرکز تعمیرات  $rc$   
 $Cap_{dm}$ : ظرفیت انبار مرکز اوراق‌کردن  $dm$   
 $Cap_{ds}$ : ظرفیت انبار مرکز انهدام  $ds$

$TC_{su}$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد از تأمین‌کننده  $su$  به کارخانه  $pl$   
 $TC_{pl}$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد از کارخانه  $pl$  به مرکز توزیع  $dc$   
 $TC_{dc}$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد از مرکز توزیع  $dc$  به مشتری  $cu$   
 $TC_{cu}$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد از مشتری  $cu$  به مرکز جمع‌آوری  $cc$   
 $TC_{cc-rc}$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد از مرکز جمع‌آوری  $cc$  به مرکز تعمیرات  $rc$   
 $TC_{cc-dm}$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد از مرکز جمع‌آوری  $cc$  به مرکز اوراق‌کردن  $dm$   
 $TC_{rc}$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد از مرکز تعمیرات  $rc$  به کارخانه  $pl$   
 $TC_{dm-su}$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد از مرکز اوراق‌کردن  $dm$  به تأمین‌کننده  $su$   
 $TC_{dm-ds}$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد از مرکز اوراق‌کردن  $dm$  به مرکز انهدام  $ds$   
 $E_{su}$ : هزینه‌ی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌یی از تأمین‌کننده  $su$  به کارخانه  $pl$   
 $E_{pl}$ : هزینه‌ی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌یی از کارخانه  $pl$  به مرکز توزیع  $dc$   
 $E_{dc}$ : هزینه‌ی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌یی از مرکز توزیع  $dc$  به مشتری  $cu$   
 $E_{cu}$ : هزینه‌ی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌یی از مشتری  $cu$  به مرکز جمع‌آوری  $cc$   
 $E_{cc-rc}$ : هزینه‌ی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌یی از مرکز جمع‌آوری  $cc$  به مرکز تعمیرات  $rc$   
 $E_{cc-dm}$ : هزینه‌ی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌یی از مرکز جمع‌آوری  $cc$  به مرکز اوراق‌کردن  $dm$   
 $E_{rc}$ : هزینه‌ی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌یی از مرکز تعمیرات  $rc$  به کارخانه  $pl$   
 $E_{dm-su}$ : هزینه‌ی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌یی از مرکز اوراق‌کردن  $dm$  به تأمین‌کننده  $su$   
 $E_{dm-ds}$ : هزینه‌ی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌یی از مرکز اوراق‌کردن  $dm$  به مرکز انهدام  $ds$   
 $C_{su}$ : هزینه‌ی باز یافت به‌ازای هر واحد محصول در تأمین‌کننده  $su$   
 $C_{pl}$ : هزینه‌ی تولید به‌ازای هر واحد محصول در کارخانه  $pl$   
 $C_{cc}$ : هزینه‌ی بازرسی و تفکیک به‌ازای هر واحد محصول در مرکز جمع‌آوری  $cc$   
 $C_{rc}$ : هزینه‌ی تعمیرات به‌ازای هر واحد محصول در مرکز تعمیرات  $rc$   
 $C_{dm}$ : هزینه‌ی اوراق‌کردن به‌ازای هر واحد محصول در مرکز اوراق‌کردن  $dm$   
 $C_{ds}$ : هزینه‌ی انهدام به‌ازای هر واحد محصول در مرکز انهدام  $ds$ .

### ۳.۱.۳. متغیرها

$PQ_{supl}$ : تعداد محصولات حمل شده از تأمین‌کننده  $su$  به کارخانه  $pl$   
 $PQ_{pldc}$ : تعداد محصولات حمل شده از کارخانه  $pl$  به مرکز توزیع  $dc$   
 $PQ_{ccrc}$ : تعداد محصولات حمل شده از مرکز جمع‌آوری  $cc$  به مرکز تعمیرات  $rc$   
 $PQ_{ccdm}$ : تعداد محصولات حمل شده از مرکز جمع‌آوری  $cc$  به مرکز اوراق‌کردن  $dm$   
 $PQ_{rcpl}$ : تعداد محصولات حمل شده از مرکز تعمیرات  $rc$  به کارخانه  $pl$   
 $PQ_{dm-su}$ : تعداد محصولات حمل شده از مرکز اوراق‌کردن  $dm$  به تأمین‌کننده  $su$   
 $PQ_{dm-ds}$ : تعداد محصولات حمل شده از مرکز اوراق‌کردن  $dm$  به مرکز انهدام  $ds$   
 $W_{cc}$ : اگر مرکز جمع‌آوری در محل کاندید  $cc$  احداث شود برابر ۱؛ در غیر این صورت برابر صفر است؛

$$\sum_{cu} R_{cu} D_{cu} X_{cucc} \leq Cap_{cc} W_{cc} \quad \forall cc \in CC \quad (10)$$

$$\sum_{cc} PQ_{ccrc} \leq Cap_{rc} \quad \forall rc \in RC \quad (11)$$

$$\sum_{cc} PQ_{ccrc} = \sum_{pl} PQ_{rcpl} \quad \forall rc \in RC \quad (12)$$

$$\sum_{cc} \beta PQ_{ccdm} = \sum_{su} PQ_{dmsu} \quad \forall dm \in DM \quad (13)$$

$$\sum_{cc} (1 - \beta) PQ_{ccdm} = \sum_{ds} PQ_{dmds} \quad \forall dm \in DM \quad (14)$$

$$\sum_{cc} PQ_{ccdm} \leq Cap_{dm} \quad \forall dm \in DM \quad (15)$$

$$\sum_{dm} PQ_{dmds} \leq Cap_{ds} \quad \forall ds \in DS \quad (16)$$

$$\sum_{dc} X_{dceu} = 1 \quad \forall cu \in CU \quad (17)$$

$$\sum_{cu} X_{cucc} = 1 \quad \forall cc \in CC \quad (18)$$

$$W_{cc}, X_{dceu}, X_{cucc} \in \{0, 1\} \quad \forall cc \in CC, dc \in DC, cu \in CU \quad (19)$$

بخش اول تابع هدف ۱ هزینه ثابت تأسیس مراکز جمع‌آوری محصولات بازگشتی را محاسبه می‌کند. عبارات دوم تا دهم به ترتیب هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای را بین هر دو تسهیلات متوالی محاسبه می‌کند. در عبارات یازدهم تا هفدهم، به ترتیب مجموع هزینه‌ی باز یافت و تولید مجدد قطعات در تأمین‌کننده‌ها، هزینه‌ی تولید مواد اولیه، هزینه‌ی تولید قطعات در کارخانه‌ها، هزینه‌ی بازرسی و تفکیک قطعات بازگشتی از مشتریان در مراکز جمع‌آوری، هزینه‌ی تعمیرات محصولات قابل تعمیرات در مراکز تعمیرات، هزینه‌ی اوراق کردن قطعات غیر قابل تعمیر در مراکز اوراق کردن و هزینه‌ی انهدام قطعات غیر قابل باز یافت در مراکز انهدام محاسبه شده است.

محدودیت ۲ بیان می‌کند که مجموع تعداد قطعات ارسالی از واحد اوراق کردن به هریک از تأمین‌کننده‌ها نباید از ظرفیت تأمین‌کننده‌ی مورد نظر بیشتر باشد. محدودیت ۳ بیان می‌کند که مجموع تعداد قطعاتی که از مراکز اوراق کردن به هریک از تأمین‌کننده‌ها ارسال می‌شود نباید از مجموع قطعاتی که از آن تأمین‌کننده به کارخانه‌ها ارسال می‌شود بیشتر باشد. محدودیت ۴ بیان می‌کند که مجموع قطعاتی که از تأمین‌کننده‌ها و مراکز تعمیرات به هر کارخانه ارسال می‌شود باید از ظرفیت کارخانه مورد نظر کم‌تر باشد. محدودیت ۵ بیان می‌کند که مجموع تعداد قطعاتی که در هر کارخانه تولید می‌شود به علاوه قطعاتی که از تأمین‌کننده‌ها و مراکز تعمیرات به آن کارخانه ارسال می‌شود باید با تعداد قطعات تولیدی که از کارخانه مربوطه به مراکز توزیع ارسال می‌شود برابر باشد. محدودیت ۶ بیان می‌کند که مجموع قطعاتی که از کارخانه‌ها به هر مرکز توزیع ارسال می‌شود باید از ظرفیت مرکز توزیع مورد نظر کم‌تر باشد. محدودیت ۷ بیان می‌کند که مجموع تعداد قطعاتی که از کارخانه‌ها به هریک از مراکز توزیع ارسال می‌شود باید از مجموع تقاضای مشتریانی که به آن مرکز توزیع مربوطه تخصیص داده شده‌اند، بیشتر باشد. محدودیت ۸ بیان می‌کند که تعداد قطعاتی که از مراکز توزیع به مراکز تعمیرات ارسال می‌شود،  $\alpha$  برابر تعداد قطعاتی است که از مشتریان به مراکز جمع‌آوری ارسال شده است.

محدودیت ۹ بیان می‌کند که تعداد قطعات ارسالی از مراکز توزیع به مراکز اوراق کردن  $(1 - \alpha)$  برابر تعداد قطعاتی است که از مشتریان به مراکز جمع‌آوری ارسال

$X_{dceu}$ : اگر تقاضای مشتری  $cu$  توسط مرکز توزیع  $dc$  برآورده شود برابر ۱؛ در غیر این صورت برابر صفر است؛

$X_{cucc}$ : اگر مرکز جمع‌آوری  $cc$  به مشتری  $cu$  تخصیص داده شود برابر ۱؛ در غیر این صورت برابر صفر است.

### ۴.۱.۳. فرمول‌بندی ریاضی

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{cc} FC_{cc} W_{cc} + \sum_{su} \sum_{pl} (TC_{su} + E_{su}) PQ_{supl} \\ & + \sum_{pl} \sum_{dc} (TC_{pl} + E_{pl}) PQ_{pldc} \\ & + \sum_{dc} \sum_{cu} (TC_{dc} + E_{dc}) D_{cu} X_{dceu} \\ & + \sum_{cu} \sum_{cc} (TC_{cu} + E_{cu}) R_{cu} D_{cu} X_{cucc} \\ & + \sum_{cc} \sum_{rc} (TC_{cc-rc} + E_{cc-rc}) PQ_{ccrc} \\ & + \sum_{cc} \sum_{dm} (TC_{cc-dm} + E_{cc-dm}) PQ_{ccdm} \\ & + \sum_{rc} \sum_{pl} (TC_{rc} + E_{rc}) PQ_{rcpl} \\ & + \sum_{dm} \sum_{su} (TC_{dm-su} + E_{dm-su}) PQ_{dmsu} \\ & + \sum_{dm} \sum_{ds} (TC_{dm-ds} + E_{dm-ds}) PQ_{dmds} \\ & + \sum_{dm} \sum_{su} C_{su} PQ_{dmsu} + \sum_{su} C_{su} P_{su} + \sum_{pl} C_{pl} P_{pl} \\ & + \sum_{cu} \sum_{cc} C_{cc} R_{cu} D_{cu} X_{cucc} + \sum_{cc} \sum_{rc} C_{rc} PQ_{ccrc} \\ & + \sum_{cc} \sum_{dm} C_{dm} PQ_{ccdm} + \sum_{dm} \sum_{ds} C_{ds} PQ_{dmds} \end{aligned} \quad (1)$$

### ۵.۱.۳. محدودیت‌ها

$$\sum_{dm} PQ_{dmsu} \leq Cap_{su} \quad \forall su \in SU \quad (2)$$

$$\sum_{dm} PQ_{dmsu} + P_{su} = \sum_{pl} PQ_{supl} \quad \forall su \in SU \quad (3)$$

$$\sum_{su} PQ_{supl} + \sum_{rc} PQ_{rcpl} \leq Cap_{pl} \quad \forall pl \in PL \quad (4)$$

$$\sum_{su} PQ_{supl} + \sum_{rc} PQ_{rcpl} + P_{pl} = \sum_{Dc} PQ_{pldc} \quad \forall pl \in PL \quad (5)$$

$$\sum_{pl} PQ_{pldc} \leq Cap_{dc} \quad \forall dc \in DC \quad (6)$$

$$\sum_{pl} PQ_{pldc} \geq \sum_{cu} D_{cu} X_{dceu} \quad \forall dc \in DC \quad (7)$$

$$\sum_{cu} \alpha R_{cu} D_{cu} X_{cucc} = \sum_{rc} PQ_{ccrc} \quad \forall cc \in CC \quad (8)$$

$$\sum_{cu} (1 - \alpha) R_{cu} D_{cu} X_{cucc} = \sum_{dm} PQ_{ccdm} \quad \forall cc \in CC \quad (9)$$

تصمیم‌گیرنده را نسبت به وقوع آن سناریوی خاص در آینده مشخص می‌کند. در بین احتمال‌های در نظر گرفته شده، محتمل‌ترین احتمال از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است.

از مزایای رویکرد سناریو محور می‌توان به عدم محدودیت در تعداد پارامترهای غیر قطعی در نظر گرفته شده اشاره کرد. در عین حال کاربردی بودن این روش با توجه به این حقیقت که نیازمند پیش‌بینی همه پیامدهای محتمل آتی هستیم، محدود می‌شود. چنان که اشاره شد، رویکرد دوم مبتنی بر توزیع احتمال است. این رویکرد زمانی کاربرد دارد که بتوان طیف پیوسته‌ی پیامدهای بالقوه محتمل آتی را پیش‌بینی کرد. مزیت این رویکرد آن است که با تخصیص یک تابع توزیع احتمال به طیف پیوسته‌ی پیامدهای محتمل، نیاز به پیش‌بینی دقیق سناریوها برطرف می‌شود، اما پیچیدگی به کار بردن توأمان توابع توزیع مختلف می‌تواند تعداد پارامترهای غیر قطعی در نظر گرفته شده را محدود کند. بنابراین با توجه به در نظر گرفتن شرایط ریسک و عدم قطعیت مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهایی علاوه بر مجموعه‌های مدل قطعی نیازمند هستیم که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است.

### ۱.۲.۳. مجموعه

$S$ : مجموعه سناریوهای در نظر گرفته شده  $(s = 1, 2, \dots, S)$ .

### ۲.۲.۳. پارامترها

$D_{cu}^s$ : تقاضای مشتری  $cu$  تحت سناریوی  $s$ ;

$R_{cu}^s$ : نرخ بازگشت محصولات مصرفی از مشتری  $cu$  به مرکز جمع‌آوری  $cc$  تحت سناریوی  $s$ ;

$P^s$ : احتمال وقوع سناریوی  $s$ .

### ۳.۲.۳. متغیرها

$PQ_{sup}^s$ : تعداد محصولات حمل شده از تأمین‌کننده  $su$  به کارخانه  $pl$  تحت سناریوی  $s$ ;

$PQ_{pldc}^s$ : تعداد محصولات حمل شده از کارخانه  $pl$  به مرکز توزیع  $dc$  تحت سناریوی  $s$ ;

$PQ_{ccrc}^s$ : تعداد محصولات حمل شده از مرکز جمع‌آوری  $cc$  به مرکز تعمیرات  $rc$  تحت سناریوی  $s$ ;

$PQ_{cedm}^s$ : تعداد محصولات حمل شده از مرکز جمع‌آوری  $cc$  به مرکز اوراق کردن  $dm$  تحت سناریوی  $s$ ;

$PQ_{rcpl}^s$ : تعداد محصولات حمل شده از مرکز تعمیرات  $rc$  به کارخانه  $pl$  تحت سناریوی  $s$ ;

$PQ_{dmsu}^s$ : تعداد محصولات حمل شده از مرکز اوراق کردن  $dm$  به تأمین‌کننده  $su$  تحت سناریوی  $s$ ;

$PQ_{dmds}^s$ : تعداد محصولات حمل شده از مرکز اوراق کردن  $dm$  به مرکز اندام  $ds$  تحت سناریوی  $s$ ;

$X_{cucc}^s$ : اگر تقاضای مشتری  $cu$  تحت سناریوی  $s$  توسط مرکز توزیع  $dc$  برآورده شود برابر ۱؛ در غیر این صورت برابر صفر است؛

$X_{cucc}^s$ : اگر مرکز جمع‌آوری  $cc$  تحت سناریوی  $s$  به مشتری  $cu$  تخصیص داده شود برابر ۱؛ در غیر این صورت برابر صفر است.

شده است. محدودیت ۱۰ بیان می‌کند که مجموع قطعاتی که از مشتریان به هر مرکز جمع‌آوری ارسال می‌شود باید از ظرفیت مرکز جمع‌آوری احداث شده مورد نظر کم‌تر باشد. محدودیت ۱۱ بیان می‌کند که مجموع قطعات ارسالی از مراکز جمع‌آوری به هر مرکز تعمیرات، باید از ظرفیت مرکز تعمیرات مورد نظر کم‌تر باشد. محدودیت ۱۲ بیان می‌کند که مجموع تعداد قطعات ارسالی از مراکز جمع‌آوری به هر یک از مراکز تعمیرات باید با مجموع قطعاتی که از آن مرکز تعمیرات به کارخانه‌ها، برابر باشد. محدودیت ۱۳ بیان می‌کند که تعداد قطعات ارسالی از مراکز اوراق کردن به تأمین‌کننده‌ها،  $\beta$  برابر تعداد قطعاتی است که از مراکز توزیع به مراکز اوراق کردن ارسال شده است. محدودیت ۱۴ بیان می‌کند که تعداد قطعات ارسالی از مراکز اوراق کردن به مراکز انهدام،  $(1 - \beta)$  برابر تعداد قطعاتی است که از مراکز توزیع به مراکز اوراق کردن ارسال شده است. محدودیت ۱۵ بیان می‌کند که مجموع قطعات ارسالی از مراکز جمع‌آوری به هر مرکز اوراق کردن باید از ظرفیت مرکز اوراق کردن مورد نظر کم‌تر باشد. محدودیت ۱۶ بیان می‌کند که مجموع قطعات ارسالی از مراکز اوراق کردن به هر مرکز انهدام باید از ظرفیت مرکز انهدام مورد نظر کم‌تر باشد. محدودیت ۱۷ بیان می‌کند که هر مرکز توزیع تنها می‌تواند به یک مشتری تخصیص داده شود. محدودیت ۱۸ بیان می‌کند که هر مشتری باید به یک مرکز جمع‌آوری محصولات بازگشتی تخصیص داده شود و در نهایت محدودیت ۱۹ متغیرهای باینری یا همان متغیرهای صفر و ۱ را نشان می‌دهد.

### ۲.۳. مدل تصادفی دو مرحله‌ی

نیاز به در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل‌های مکان‌یابی زنجیره‌ی تأمین از این واقعیت سرچشمه می‌گیرد که به دلیل عدم توانایی مدل‌های مکان‌یابی در پیش‌بینی آینده، اطلاعات کافی برای تصمیم‌گیری بهینه در آینده وجود ندارد. بنابراین به‌کارگیری مباحث مرتبط با عدم قطعیت در مدل‌ها می‌تواند در پیش‌بینی ریسک‌های قابل کنترل برای انتخاب بهترین مدل مکان‌یابی راهکار مناسبی باشد. از سوی دیگر، عدم قطعیت موجود در زنجیره‌ی تأمین و محیط پیرامون باعث بروز پیچیدگی‌هایی در مسائل مربوطه خواهد شد.

قدم اول برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مسائل مکان‌یابی، تعیین نحوه‌ی مواجهه با پارامترهای غیر قطعی و بررسی تأثیر در نظر گرفتن عدم قطعیت در برخی از پارامترها بر سایر پارامترها خواهد بود. رویکردهای بهینه‌سازی تحت شرایط عدم قطعیت از فلسفه‌های مختلفی برای بهینه‌سازی استفاده می‌کنند که از آن جمله می‌توان به کمیته‌سازی امید ریاضی، کمیته‌سازی انحراف از معیارها و نیز کمیته‌سازی بیشینه هزینه‌ها نام برد. براساس مطالعات انجام شده<sup>[۱۵]</sup> رویکردهای اصلی مواجهه با عدم قطعیت شامل برنامه‌ریزی تصادفی (مدل‌های ارجاعی، برنامه‌ریزی تصادفی پایدار و مدل‌های احتمالی)، برنامه‌ریزی فازی (برنامه‌ریزی منعطف و امکانی)، برنامه‌ریزی پویای احتمالی و بهینه‌سازی پایدار است که به دلیل عدم ارتباط تمام این مباحث با مقاله‌ی ارائه شده، در بخش مرور ادبیات به توضیح مباحث مرتبط پرداخته شده است. قدم بعدی برای در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت، تبیین مقتضی از پارامترهای غیرقطعی است.

در برنامه‌ریزی تصادفی برای بیان پارامترهای قطعی رویکردهای متفاوتی وجود دارد؛ رویکرد اول مبتنی بر سناریوها و رویکرد دوم مبتنی بر توابع توزیع احتمال است. در رویکرد اول که سناریو محور<sup>[۱۷]</sup> است، عدم قطعیت با مجموعه‌ی گسسته‌ی از سناریوها بیان شده، و چگونگی اثرگذاری عدم قطعیت در آینده پیش‌بینی می‌شود. برای هر سناریو یک احتمال وقوع متصور می‌شویم که در واقع این امر احتمال انتظارات

$$\sum_{pl} PQ_{pldc}^s \leq Cap_{dc} \quad \forall dc \in DC, s \in S \quad (25)$$

$$\sum_{pl} PQ_{pldc}^s \geq \sum_{cu} D_{cu}^s X_{dccc}^s \quad \forall dc \in DC, s \in S \quad (26)$$

$$\sum_{cu} \alpha R_{cu}^s D_{cu}^s X_{cucc}^s = \sum_{rc} PQ_{ccrc}^s \quad \forall cc \in CC, s \in S \quad (27)$$

$$\sum_{cu} (1 - \alpha) R_{cu}^s D_{cu}^s X_{cucc}^s = \sum_{dm} PQ_{ccdm}^s \quad \forall cc \in CC, s \in S \quad (28)$$

$$\sum_{cu} R_{cu}^s D_{cu}^s X_{cucc}^s \leq Cap_{cc} W_{cc} \quad \forall cc \in CC, s \in S \quad (29)$$

$$\sum_{cc} PQ_{ccrc}^s \leq Cap_{rc} \quad \forall rc \in RC, s \in S \quad (30)$$

$$\sum_{cc} PQ_{ccrc}^s = \sum_{pl} PQ_{rcpl}^s \quad \forall rc \in RC, s \in S \quad (31)$$

$$\sum_{cc} \beta PQ_{ccdm}^s = \sum_{su} PQ_{dmsu}^s \quad \forall dm \in DM, s \in S \quad (32)$$

$$\sum_{cc} (1 - \beta) PQ_{ccdm}^s = \sum_{ds} PQ_{dmds}^s \quad \forall dm \in DM, s \in S \quad (33)$$

$$\sum_{cc} PQ_{ccdm}^s \leq Cap_{dm} \quad \forall dm \in DM, s \in S \quad (34)$$

$$\sum_{dm} PQ_{dmds}^s \leq Cap_{ds} \quad \forall ds \in DS, s \in S \quad (35)$$

$$\sum_{dc} X_{dccc}^s = 1 \quad \forall cu \in CU, s \in S \quad (36)$$

$$\sum_{cu} X_{cucc}^s = 1 \quad \forall cc \in CC, s \in S \quad (37)$$

$$X_{dccc}^s, X_{cucc}^s, W_{cc} \in \{0, 1\} \\ \forall cc \in CC, dc \in DC, cu \in CU, s \in S \quad (38)$$

#### ۴. نتایج محاسباتی

مدل پیشنهادی، یک مدل مکان‌یابی تک‌هدفی تصادفی دومرحله‌ای است. به منظور نزدیک‌تر شدن مفاهیم ارائه شده به یک نمونه واقعی، مدل مذکور را با داده‌های به دست آمده از یک هولدینگ داروسازی آزموده‌ایم. سازمان مذکور براساس طرح توسعه‌ی سازمانی خود، به مکان‌یابی برای احداث مراکز جمع‌آوری محصولات بازگشتی خود پرداخته است. پس از توزیع محصولات دو مسئله قابل بررسی است: ۱. حجم زیاد کارتن‌های باقی مانده از این توزیع؛ ۲. حجمی از محصولات که به دلیل عدم رعایت موارد لازم در جابه‌جایی‌های مربوطه دچار له‌شدگی و خردشدگی و غیره شده و داروخانه‌ها از دریافت آنها امتناع می‌کنند و این جزء خسارات مراکز پخش در نظر گرفته می‌شود. بنابراین از آنجا که حجم تولیدات کارخانه‌ی مربوطه زیاد است و مراکز پخش هم بخشی از هولدینگ مذکورند، احداث مراکز جمع‌آوری محصولات بازگشتی امری عاقلانه و دارای منفعت مالی قابل توجهی است. بنابراین مدیریت مجموعه طرحی را امکان‌سنجی می‌کرد که در آن کلیه‌ی محصولات بازگشتی از مشتریان به مراکز جمع‌آوری انتقال یابد و در آنجا محصولات قابل تعمیر و به‌سازی به مراکز تعمیر ارسال شده و پس از انجام اصلاحات لازم برای استفاده مجدداً به

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{cc} FC_{cc} W_{cc} + E_s \left[ \sum_s \sum_{su} \sum_{pl} (TC_{su} + E_{su}) PQ_{supl}^s \right] \\ & + E_s \left[ \sum_s \sum_{pl} \sum_{dc} (TC_{pl} + E_{pl}) PQ_{pldc}^s \right] \\ & + E_s \left[ \sum_s \sum_{dc} \sum_{cu} (TC_{dc} + E_{dc}) D_{cu}^s X_{dccc}^s \right] \\ & + E_s \left[ \sum_s \sum_{cu} \sum_{cc} (TC_{cu} + E_{cu}) R_{cu}^s D_{cu}^s X_{cucc}^s \right] \\ & + E_s \left[ \sum_s \sum_{cc} \sum_{rc} (TC_{cc-rc} + E_{cc-rc}) PQ_{ccrc}^s \right] \\ & + E_s \left[ \sum_s \sum_{cc} \sum_{dm} (TC_{cc-dm} + E_{cc-dm}) PQ_{ccdm}^s \right] \\ & + E_s \left[ \sum_s \sum_{rc} \sum_{pl} (TC_{rc} + E_{rc}) PQ_{rcpl}^s \right] \\ & + E_s \left[ \sum_s \sum_{dm} \sum_{su} (TC_{dm-su} + E_{dm-su}) PQ_{dmsu}^s \right] \\ & + E_s \left[ \sum_s \sum_{dm} \sum_{ds} (TC_{dm-ds} + E_{dm-ds}) PQ_{dmds}^s \right] \\ & + E_s \left[ \sum_s \sum_{dm} \sum_{su} C_{su} PQ_{dmsu}^s \right] + \sum_{su} C_{su} P_{su} \\ & + \sum_{pl} C_{pl} P_{pl} + E_s \left[ \sum_s \sum_{cu} \sum_{cc} C_{cc} R_{cu}^s D_{cu}^s X_{cucc}^s \right] \\ & + E_s \left[ \sum_s \sum_{cc} \sum_{rc} C_{rc} PQ_{ccrc}^s \right] \\ & + E_s \left[ \sum_s \sum_{cc} \sum_{dm} C_{dm} PQ_{ccdm}^s \right] \\ & + E_s \left[ \sum_s \sum_{dm} \sum_{su} C_{su} PQ_{dmsu}^s \right] \\ & + E_s \left[ \sum_s \sum_{dm} \sum_{ds} C_{ds} PQ_{dmds}^s \right] \end{aligned} \quad (20)$$

#### ۵.۲.۳. محدودیت‌ها

$$\sum_{dm} PQ_{dmsu}^s \leq Cap_{su} \quad \forall su \in SU, s \in S \quad (21)$$

$$\sum_{dm} PQ_{dmsu}^s + P_{su} = \sum_{pl} PQ_{supl}^s \quad \forall su \in SU, s \in S \quad (22)$$

$$\sum_{su} PQ_{supl}^s + \sum_{rc} PQ_{rcpl}^s \leq Cap_{pl} \quad \forall pl \in PL, s \in S \quad (23)$$

$$\sum_{su} PQ_{supl}^s + \sum_{rc} PQ_{rcpl}^s + P_{pl} = \sum_{dc} PQ_{pldc}^s \\ \forall pl \in PL, s \in S \quad (24)$$

جدول ۱. اطلاعات ورودی.

متوسط نرخ محصولات ارسال		نرخ بازگشت محصولات از مشتریان	تقاضا	احتمال وقوع هر سناریو	سناریوها	اندازه‌ی مسئله
از مراکز	جمع‌آوری به مراکز تعمیرات					
$\beta$	$\alpha$	$R_{cu}$	$D_{cu}$	$P^s$	$S$	$Su \times Pl \times Dc \times Cu \times Cc \times Rc \times Dm \times Ds$
۰٫۶	۰٫۴	۰٫۷	$U \sim [450, 600]$	۰٫۶	۱ (جاده‌یی)	$1 \times 2 \times 3 \times 5 \times 3 \times 2 \times 1 \times 1$
		۰٫۶	$U \sim [490, 590]$	۰٫۳	۲ (ریلی)	
		۰٫۶۵	$U \sim [460, 560]$	۰٫۱	۳ (هوایی)	

جدول ۲. هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌یی.

تصادفی			قطعی	هزینه
$S_r$	$S_r$	$S_1$		
$U \sim [7, 20]$	$U \sim [3, 15]$	$U \sim [1, 10]$	$U \sim [1, 15]$	هزینه‌های حمل‌ونقل
$U \sim [1, 7]$	$U \sim [3, 9]$	$U \sim [5, 13]$	$U \sim [1, 9]$	هزینه‌ی انتشار گازهای گلخانه‌یی

جدول ۳. نتایج محاسباتی براساس داده‌های اسمی.

تعداد محدودیت‌ها		تعداد متغیرها		میزان تابع هدف		اندازه‌ی مسئله
تصادفی	قطعی	تصادفی	قطعی	تصادفی	قطعی	
۱۷۲	۶۰	۱۶۳	۵۷	۴۶۱۹۳۴٫۵۶	۴۶۱۱۹۴٫۴۴	$1 \times 2 \times 3 \times 5 \times 3 \times 2 \times 1 \times 1$

جدول ۴. نتایج محاسباتی براساس سناریوها.

میزان تابع هدف		احتمال وقوع هر سناریو	سناریوها	اندازه‌ی مسئله
تصادفی	قطعی			
۴۶۵۶۳۱٫۶۰۸	۴۲۲۹۷۸٫۹۶۵	۰٫۶ (داده اسمی)	۱	$1 \times 2 \times 3 \times 5 \times 3 \times 2 \times 1 \times 1$
۴۵۴۵۱۴٫۵۹۲	۳۸۷۶۵۴٫۳۷۸	۰٫۳	۲	
۴۶۲۰۱۲٫۱۳۰	۳۶۹۳۰۱٫۲۱۳	۰٫۱	۳	

که در جداول ۱ و ۲ به تفصیل شرح داده شده است. سناریوی اول مبنی بر حمل‌ونقل جاده‌یی است که هزینه‌ی کم‌تری نسبت به سایر روش‌های حمل‌ونقل دارد، اما آلودگی محیطی آن بالاتر از سایر روش‌هاست. سناریوی دوم مبتنی بر حمل‌ونقل ریلی است که هزینه‌ی حمل‌ونقل آن نسبت به حمل‌ونقل جاده‌یی بیشتر است اما از آلاینده‌ی محیطی به مراتب کم‌تری بهره می‌برد. نهایتاً سناریوی سوم مبتنی بر حمل‌ونقل هوایی است که دارای بالاترین هزینه‌ی حمل‌ونقل است، اما کم‌ترین آلاینده‌ی محیطی را نیز دارد. مثال ارائه شده به وسیله‌ی نرم‌افزار GAMS و توسط یک دستگاه لپ‌تاپ با پردازنده‌ی Intel Core i7 ۲٫۳GHZ و با RAM ۸Gig و تحت سیستم عامل Windows ۷ حل و نتایج آن ارائه شده است.

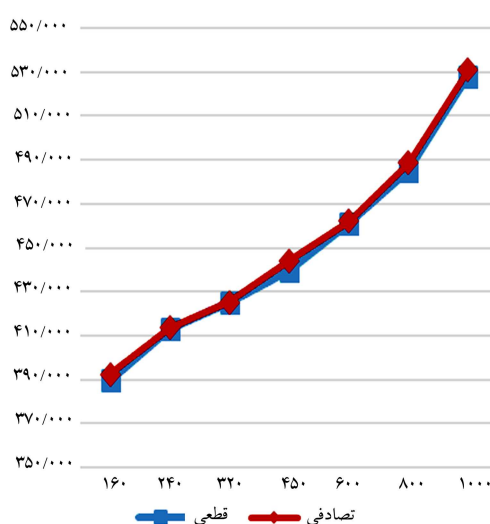
در مثال، داده‌های سناریوهایی که دارای بالاترین احتمال وقوع‌اند به‌عنوان داده اسمی در مدل قطعی شناخته شده است. چنان که در جدول ۴ ارائه شده، نتایج حاصل از مقدار تابع هدف مدل تصادفی در بالاترین سطح با نتایج مدل قطعی حاصل از به وقوع پیوستن داده‌های اسمی مقایسه شده است. علاوه بر این تعداد متغیرها و محدودیت‌های مدل تصادفی در مقایسه با مدل قطعی (جدول ۳) خود نشان‌گر پیچیدگی مدل احتمالی ارائه شده است.

همانطور که اشاره شد احداث یا برچیدن تسهیلات در یک شبکه‌ی زنجیره‌ی

کارخانه ارسال شود. همچنین محصولات قابل بازافت (مانند جعبه‌ها و کارتن‌های حمل محصولات) به مراکز اوراق‌کردنی ارسال شود تا چنانچه قابل بازافت‌اند به تأمین‌کنندگان برای بازافت، و در صورت قابل استفاده نبودن به مراکز انهدام منتقل شوند. ابتدا با فرض معلوم بودن تقاضای مشتریان مسئله به‌صورت قطعی حل شده و سپس با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضای مشتریان نیز، مدل پیشنهادی به‌صورت تصادفی حل شده و تفاوت‌های ناشی از منظور کردن عدم قطعیت ارزیابی شده است. در مکان‌بانی تصادفی دوم‌مرحله‌یی، متغیرهای مربوط به احداث مراکز جمع‌آوری و میزان تولید کارخانه‌ها به‌عنوان متغیرهای مرحله اول در نظر گرفته شده، که تصمیم‌گیری درمورد آن‌ها باید قبل از وقوع سناریوها و مشخص شدن مقادیر واقعی پارامترها صورت پذیرد. متغیرهای مرتبط با توزیع محصولات به‌عنوان متغیرهای مرحله دوم در نظر گرفته شده است؛ به این ترتیب با توجه به سناریوهایی که رخ می‌دهد مقادیر واقعی پارامترهای غیر قطعی مشخص شده و تصمیم مقتضی متناسب با آن اتخاذ خواهد شد. افزایش تعداد سناریوها به‌طور معناداری باعث افزایش زمان محاسباتی می‌شود که این افزایش زمان، تأثیر چندانی در بهبود جواب‌های به دست آمده نخواهد داشت. تجربیات به دست آمده از این مقاله نیز حاکی از صدق این مطلب است. در این مقاله به‌منظور بررسی مدل‌های ارائه شده یک مثال فرضی با فرض وجود سه سناریو در نظر گرفته شده است

جدول ۵. تحلیل حساسیت بر روی تقاضای مشتریان.

تقاضای مشتریان		میزان تابع هدف
$D_{cu}$	قطعی	
[۱۶۰ - ۰]	۳۸۹۹۳۰,۸۱۶	۳۹۲۳۷۳,۰۵۳
[۲۴۰ - ۱۶۰]	۴۱۳۲۷۹,۶۵۶	۴۱۳۶۸۹,۹۲۹
[۳۲۰ - ۲۴۰]	۴۲۵۰۷۷,۰۰۰	۴۲۵۳۶۰,۷۶۸
[۴۵۰ - ۳۲۰]	۴۳۹۹۲۳,۵۲۰	۴۴۴۲۳۱,۸۱۶
[۶۰۰ - ۴۵۰]	۴۶۱۱۹۴,۴۴۴	۴۶۲۱۰۹,۱۷۰
[۸۰۰ - ۶۰۰]	۴۸۵۱۵۰,۴۰۸	۴۸۸۶۰۳,۶۵۰
[۱۰۰۰ - ۸۰۰]	۵۲۷۹۴۷,۲۶۴	۵۳۰۷۷۳,۷۶۴



شکل ۲. تفاوت کارایی مدل‌های قطعی و تصادفی.

در شکل ۲ نمودار حاصل از تحلیل حساسیت روی تقاضای مشتریان (جدول ۵) نشان داده شده است؛ چنان که مشاهده می‌شود افزایش تقاضا منجر به افزایش هزینه‌های کل در هر دو مدل قطعی و تصادفی می‌شود. این مشاهدات را می‌توان به‌عنوان تأثیر تقاضا بر هزینه‌های هر دو شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین رو به جلو و بازگشتی توضیح داد. لازم به ذکر است تا زمانی که تعداد محصولات بازگشتی مستقیماً وابسته به میزان تقاضاست، افزایش تقاضا باعث افزایش تعداد محصولات بازگشتی و منجر به تأثیر بر هزینه‌های شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین بازگشتی خواهد شد. از سوی دیگر تغییر در نرخ محصولات بازگشتی نیز بر هزینه‌های شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین بازگشتی تأثیرگذار خواهد بود ولی افزایش تقاضا به مراتب تأثیرگذارتر از افزایش نرخ بازگشتی محصولات بر شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین خواهد بود.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شده با در نظر گرفتن عوامل زیست‌محیطی و لزوم در نظر گرفتن ریسک‌های آینده برای احداث تسهیلات در حال حاضر، مدلی برای مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری محصولات ارائه شود. در این راستا ابتدا به کلیات تحقیق بیان شده اشاره شد، سپس ادبیات و پیشینه‌ی موضوع شامل مسائل مکان‌یابی، انواع مدل‌های طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین، مطالعات مرتبط صورت گرفته پیرامون زنجیره‌ی تأمین سبز، برخی از قوانین بین‌المللی پیرامون حفاظت از محیط زیست و در نهایت موارد مرتبط با احتمال وقوع ریسک پرداخته شد. پس از مطالب فوق دو مدل قطعی و تصادفی سناریومحور ارائه شد. مدل قطعی به مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری محصولات با در نظر گرفتن عوامل زیست‌محیطی بدون توجه به احتمال وقوع ریسک در آینده و صرفاً براساس شرایط حال حاضر می‌پرداخت. اما مدل تصادفی با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ی تلاش بر انتخاب مکان یا مکان‌هایی برای جمع‌آوری محصولات با توجه به شرایط زیست‌محیطی و در شرایط وجود ریسک‌های احتمالی آنی دارد. در نهایت با حل هر دو مدل، عملکرد هر دو مدل مورد مقایسه قرار گرفت و تحلیل حساسیت روی تقاضای مشتریان در بازه‌های مختلف صورت پذیرفت.

تأمین به دلیل این که از تصمیمات استراتژیک هستند از فرایندهای هزینه‌بر و زمان‌بر خواهد بود. بنابراین تغییرات مکان تسهیلات در تصمیمات کوتاه‌مدت عملاً امری غیرممکن خواهد بود. از سوی دیگر تعیین میزان جریان بین تسهیلات در شبکه به‌عنوان یک تصمیم تاکتیکی برای تصمیمات کوتاه‌مدت بسیار انعطاف‌پذیرتر خواهد بود. بنابراین برای تعیین عملکرد مدل‌های قطعی و تصادفی تحت سناریوها، ابتدا مدل‌ها با نرم‌افزار GAMS حل شده، سپس با تعیین جواب‌های متغیرهای باینری مربوط به مکان‌یابی تسهیلات حاصل از حل هر دو مدل، میزان متغیرهای تصمیم‌گیری جدید بین تسهیلات تحت هر سناریو به دست آمده است.

در اینجا باید اشاره کرد که مکان و تعداد تسهیلاتی که از حل هر دو مدل به دست آمده و با متغیرهای باینری نشان داده شده، باید در محاسبات تعیین میزان جدید متغیرهای تصمیم بین تسهیلات ثابت در نظر گرفته شوند. بنابر توضیحات ارائه شده عملکرد مدل‌های قطعی و تصادفی تحت هر یک از سناریوها در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که در این جدول آمده، هزینه‌ی تابع هدف به دست آمده از مدل تصادفی در استفاده از داده‌های اسمی بهتر از تابع هدف به دست آمده از مدل تصادفی است. این در صورتی است که مدل تصادفی و قطعی برای تمامی سناریوها شدنی هستند و بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل قطعی نیز قابلیت به‌کارگیری داده‌های غیرقطعی را دارد. همچنین نتایج به دست آمده حاکی از آن است که افزایش هزینه‌ها به‌صورت صعودی و خطی خواهد بود.

تفاوت‌های موجود بین توابع هدف به دست آمده از مدل تصادفی و قطعی در شرایط استفاده از داده‌های اسمی نشان‌دهنده‌ی هزینه‌ی پیشگیرانه‌ی است که برای جلوگیری از وقوع ریسک باید پرداخت. شایان ذکر است که این هزینه‌ها از دیدگاه کلان دارای ویژگی‌های زیادی است و چنان که گفته شد می‌تواند از بسیاری از هزینه‌های سنگین دیگر که ممکن است در آینده بر شبکه تحمیل شود، جلوگیری کند. به همین دلیل در سال اخیر مباحث مرتبط با ریسک و قابلیت اطمینان مورد توجه بسیاری از تولیدکنندگان و صاحبان صنایع بزرگ قرار گرفته است و تلاش می‌شود با مد نظر قرار دادن این عوامل مؤثر و بررسی هرچه دقیق‌تر علل وقوع آنها و اتخاذ بهترین شیوه در صورت وقوع این عوامل، تصمیم‌گیری لازم را به‌گونه‌ی اتخاذ کنند که کم‌ترین آسیب را از وقوع ریسک‌های مختلف به سرمایه‌های خود شاهد باشند.



پانویسها

1. mixed-integer linear programming (MILP)
2. distribution/collection center
3. supply chain network
4. green supply chain (GSCH)
5. transportation Cost
6. facilities
7. mixed-integer programming
8. supplier
9. plants
10. distribution centers
11. customers (demand's point)
12. collection centers
13. repairing centers
14. dismantle centers
15. disposal centers
16. national economic research associate
17. scenario base

منابع (References)

1. Chen, C.L., Yuan, T.W. and Lee, W.C. "Multi-criteria fuzzy optimization for locating warehouse and distribution centers in a supply chain network", *J. of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, **38**, pp. 393-401 (2001).
2. Lu, Z. and Bostel, N. "A facility location model for logistics systems including reverse flows: the case of remanufacturing activities", *Computers & Operations Research*, **34**, pp. 299-323 (2001).
3. Figueiredo, J.N. and Mayerle, S.F. "Designing minimum-cost recycling collection networks with required throughput", *Transportation Research Part E*, **44**, pp. 731-752 (2008).
4. Fanseca, M.C., Sanchez, A.G., Miler, M.O. and Gama, F.S. "A stochastic bi-objective location model for strategic reverse logistics", *TOP- An Official Journal of the Spanish Society of Statistics and Operations Research*, **18**(1), pp. 158-184 (2010).
5. Aksen, D. Aras, N. and Kara Arslan, A.G. "Design and analyses of government subsidized collection systems for incentive- dependent returns", *Int. J. of Production Economics*, **119**, pp. 308-327 (2009).
6. El-Sayed, M., Afia, N. and El-Kharbotly, A. "A stochastic model for forward- reverse logistic network design under risk", *Computer & Industrial Engineering*, **58**, pp. 423-31 (2010).
7. Alumur, S.A. , Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F. and Verter, V. "Multi-period reverse logistics network design", *Eur. J. of Operational Research*, **220**, pp. 67-78 (2012).
8. Wang, H.F. and Wei Hsu, H. "A closed-loop logistic model with a spanning - tree based genetic algorithm", *Computers & Operations Research*, **37**, pp. 376-386 (2012).
9. Min, H. and Ko, H. "The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers", *Int. J. of Production Economics*, **113**, pp. 176-192 (2008).
10. Jaber, M. and ElSaadany, M.A. "The production, re-manufacture and waste disposal model with lost sales", *Int. J. of Production Economics*, **120**, pp. 115-124 (2009).
11. Ramezani, M., Bashiri, M. and Tavakkoli-Moghaddam, R. "A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level", *Applied Mathematical Modeling*, **37**, pp. 328-344 (2012).
12. Srivasta, S.K. "Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review", *Int. J. of Management Reviews*, **9**(1), pp. 53-80 (2007).
13. Frokenbrock, D.J. "External costs of intercity truck freight transportation", *Transportation Research Part A*, **33**, pp. 505-526 (1999).
14. Frokenbrock, D.J. "Comparison of external costs of rail and truck freight transportation", *Transportation Research Part A*, **35**, pp. 321-337 (2001).
15. Sahinidis, N.V. "Optimization under uncertainty: State-of-the-art and opportunities", *Computers and Chemical Engineering*, **28**, pp. 971-983 (2004).