

## برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مبتنی بر روش تقریب میانگین نمونه و الگوریتم تجزیه بندرز شتاب‌یافته برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت

علی‌اکبر حسینی<sup>۱\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۲۰	در این مقاله یک مدل ریاضی جامع برای طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن جریان‌های مستقیم و برگشتی به صورت توأم متعلق به چندین محصول در طی چند دوره زمانی ارائه شده است. عدم قطعیت پارامترهای تقاضا، نرخ‌های برگشت، احیا و امحا محصولات و هزینه‌های حمل‌ونقل، نگهداری و مدیریت جریان برگشتی با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای در نظر گرفته شده است. مدل ارائه شده با استفاده از یک روش حل کارا مبتنی بر تقریب میانگین نمونه و الگوریتم تجزیه بندرز شتاب‌یافته جدید حل شده است. الگوریتم تجزیه بندرز ارائه شده با استفاده از روش ابتکاری اولویت‌دهی و اضافه‌نمودن یک محدودیت جدید به مساله اصلی با هدف بهبود در سرعت همگرایی و ارائه برش‌های بهتر توسعه داده شده است. نتایج حل مدل ارائه شده برای مسائل نمونه متعلق به یک زنجیره تأمین تلفن همراه، حاکی از برتری جواب‌های حل برنامه‌ریزی تصادفی نسبت به حل قطعی و کارایی الگوریتم تجزیه بندرز شتاب‌یافته است. علاوه بر آن، جواب‌های برنامه‌ریزی احتمالی از استواری بیشتری نسبت به جواب‌های قطعی برخوردار هستند.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۰۵	
<b>واژگان کلیدی:</b> طراحی شبکه زنجیره تأمین، حلقه بسته، عدم قطعیت، برنامه‌ریزی تصادفی، الگوریتم تجزیه بندرز، تقریب میانگین نمونه.	

### ۱- مقدمه

در طی سال‌های اخیر در پی توجه روزافزون به ارتقای الزامات زیست‌محیطی، تمایل مصرف‌کنندگان به استفاده از محصولات تولیدشده در زنجیره‌های سبز و همچنین مزیت‌های اقتصادی مرتبط با بازیافت و احیای محصولات، شاهد توسعه سریع زنجیره‌های تأمین سنتی با هدف مدیریت جریان‌های برگشتی در کنار جریان مستقیم و برنامه‌ریزی توأم برای احیای محصولات در راستای پایداری

هرچه بیشتر زنجیره هستیم [۱ و ۲]. از این رو بسیاری از تولیدکنندگان نظیر کداک و زیراکس مجموعه‌ای از فعالیت‌های مدیریت جریان برگشتی شامل جمع‌آوری مجدد محصولات و تلاش برای تعمیر، احیا، بازیافت و اسقاط آن‌ها به صورت ایمن و اقتصادی را در شبکه‌های زنجیره تأمین خود برای طیف متنوعی از محصولات در نظر گرفته‌اند [۳]. از جمله تصمیمات مهم در مدیریت کارای یک زنجیره تأمین، تصمیم استراتژیک طراحی شبکه زنجیره

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: aa.hasani@shahroodut.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی شاهرود

جمع‌آوری، مراکز احیا و اسقاط. عدم قطعیت پارامترهای میزان تقاضای محصولات نهایی، میزان برگشت محصولات، نرخ احیا و امحا محصولات برگشتی، هزینه‌های حمل‌ونقل و مدیریت جریان برگشتی با استفاده از رویکرد سناریو محور در نظر گرفته شده است. روش حل کارای ارائه شده برای مدل تصادفی دو مرحله‌ای ارائه شده، مبتنی بر الگوریتم‌های تقریب میانگین نمونه و الگوریتم تجزیه بندرز شتاب یافته است. در نهایت نتایج پیاده‌سازی مدل ارائه شده برای یک زنجیره تأمین تلفن همراه ارائه شده است.

ساختار ادامه این مقاله به شرح زیر خواهد بود: در بخش ۲، مبانی نظری و پیشینه پژوهش تشریح شده و در بخش ۳، مساله به‌طور دقیق تشریح و مدل ریاضی مساله ارائه شده است. در بخش ۴، الگوریتم حل پیشنهادی معرفی شده است. در بخش ۵، نمونه موردی بررسی شده در این پژوهش و سپس در بخش ۶، داده‌ها و یافته‌های پژوهش در قالب نتایج محاسباتی حل مدل برای بررسی طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت تحلیل و توصیه‌های مدیریتی مرتبط ارائه شده است. در بخش ۷، ضمن نتیجه‌گیری از پژوهش انجام شده، زمینه‌های تحقیقاتی آتی معرفی شده است.

## ۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مدیریت جریان برگشتی محصولات در بسیاری از صنایع، همچون ساخت تجهیزات الکترونیکی و کامپیوتری، هواپیماسازی و تجهیزات پزشکی در مدیریت زنجیره تأمین در نظر گرفته شده و منافع متنوع اقتصادی و غیراقتصادی فراوانی را برای بازیگران حاضر در زنجیره‌های تأمین و مشتریان آن‌ها به همراه داشته است [۴]؛ برای نمونه، زنجیره تأمین برگشتی به‌صورت گسترده در صنایع تجهیزات کامپیوتری نظیر دل و ای.بی.ام به کار گرفته شده و تعمیر تجهیزات، خرید قطعات جدید و استفاده مجدد از قطعات مصروفی را برای مشتریان و تولیدکنندگان تسهیل نموده است. از سوی دیگر، امروزه با توسعه فناوری‌های دیجیتال و افزایش تعداد مصرف‌کنندگان تجهیزات

است که تأثیر بلندمدت معناداری بر عملکرد زنجیره همچون سودآوری و رقابت‌پذیری آن خواهد داشت [۴]. شبکه زنجیره تأمین را می‌توان مجموعه‌ای هماهنگ از موجودیت‌ها با نقش مشخص دانست که در راستای تحقق هدف زنجیره با یکدیگر تعامل دارند. با توجه به فضای کسب‌وکار امروز، دیگر ساختار زنجیره‌های تأمین سنتی که تنها یک جریان روبه‌جلو گذرنده از لایه‌های تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان تا مشتریان در نظر گرفته می‌شود، از کارآمدی لازم برخوردار نبوده و نمی‌تواند پاسخگوی بسیاری از نیازمندی‌ها و الزامات مدنظر باشد. از این‌رو نیاز است تا جریان دومی از محصولات در سطح زنجیره با شروع از مشتریان نهایی و ادامه یافتن به سوی تأمین‌کنندگان با گذر از تسهیلاتی میانی همچون مراکز جمع‌آوری/ باز توزیع، احیا یا بازیافت تحت عنوان جریان برگشتی باید در نظر گرفته شود [۵]. از این‌رو طی سال‌های اخیر، طراحی شبکه زنجیره‌های تأمین با در نظر گرفتن جریان‌های مستقیم و برگشتی به‌صورت توأم، مورد استقبال محققان قرار گرفته شده است [۶]. مدیریت کارای این جریان برگشتی به‌صورت پیوسته با چالش‌های متعددی در دنیای واقعی همچون عدم قطعیت در نرخ برگشت و امکان احیای مجدد محصولات و همچنین هزینه‌های مدیریت این جریان برگشتی همراه بوده است [۷]. عدم در نظر گرفتن این سطح از عدم قطعیت در طراحی شبکه زنجیره تأمین می‌تواند تأثیر نامطلوب بر اثربخشی تصمیمات اتخاذ شده در مواجهه با شرایط دنیای واقعی داشته باشد [۸]. از این‌رو نیاز است تا مجموعه تصمیم‌های استراتژیک طراحی شبکه زنجیره تأمین همچون مکان‌یابی تسهیلات و تعیین ظرفیت تسهیلات تحت فضای عدم قطعیت اتخاذ شود [۹].

در این مقاله، مساله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند سطحی متشکل از انواع تسهیلات برای مدیریت جریان برگشتی چندین محصول زنجیره تأمین در طی چندین دوره زمانی بررسی شده است. سطوح در نظر گرفته شده در ساختار شبکه این زنجیره عبارت‌اند از تسهیلات تولیدکننده محصولات جدید، مراکز توزیع، خرده‌فروشان، مراکز

برون‌سپاری فرآیندها [۱۵] و قیمت‌گذاری محصولات برگشتی [۱۶].

از نگاه برخی از محققان مدیریت زنجیره تأمین، مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی بر اساس فرآیندهای مدیریت محصولات برگشتی توسعه داده شده است؛ برای نمونه، مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی یک یا چندهدفه برای خدمات پس از فروش و به‌صورت خاص برای محصولاتی نظیر لوازم الکترونیک، فرش، لاستیک و کپسول‌های ال.پی.جی. در برخی دیگر از مطالعات، محققان بیش از یک فرآیند مدیریت جریان برگشتی را در مدل‌های خود در نظر گرفته‌اند [۲، ۵، ۱۲، ۱۴، ۱۷]؛ برای نمونه، یک شبکه لجستیک حلقه بسته با دو فرایند احیا و امحا برای محصولات فسادپذیر نظیر مواد غذایی و لوازم یک‌بارمصرف پزشکی ارائه شده است [۴]. در نمونه‌ای دیگر، یک شبکه لجستیک حلقه بسته با سه فرایند دمونتاز، احیا و امحا برای محصولات پزشکی در سطح یک زنجیره تأمین جهانی در منطقه پیمان اقتصادی اکو در نظر گرفته شده است [۷]. به‌این‌ترتیب، محققان این حوزه به توسعه شبکه‌های زنجیره تأمین با هدف نزدیکی بیشتر آن به شرایط حاکم بر دنیای واقعی بسیار توجه کرده‌اند؛ واضح است که طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن دو جریان مستقیم و برگشتی به‌صورت مجزا و بدون در نظر گرفتن ارتباطات مابین آن دو منجر به ارائه یک حل بهینه جزئی خواهد شد [۱۸]. برای نمونه، در یک مطالعه، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت پارامترهای تقاضا و نرخ برگشت با در نظر گرفتن الزامات محیط زیستی ارائه شده است [۶]. در نمونه‌ای دیگر، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن فرآیندهای احیا و امحا تحت شرایط عدم قطعیت پارامترهای تقاضا و نرخ برگشت ارائه شده است [۹]. در نظر گرفتن تسهیلات بدون محدودیت ظرفیت یک فرض ساده‌سازی شده در برخی از مطالعات طراحی شبکه زنجیره تأمین است. در نتیجه، برخی از محققان محدودیت ظرفیت تسهیلات را در طراحی شبکه

الکترونیکی در سرتاسر جهان، شاهد ایجاد هزاران تن انواع زباله‌های الکترونیکی هستیم که خود سهمی تقریبی معادل با ۲۵ درصد زباله‌های جهان را تشکیل می‌دهد. روندهای این‌چنینی، اهمیت پرداختن به مقوله مدیریت جریان محصولات برگشتی در سطح یک زنجیره تأمین را دوچندان می‌کند [۲]. بازگشت محصولات به تولیدکنندگان می‌تواند به دلایل مختلفی همچون دریافت خدمات پس از فروش و بازایافت محصولات مستهلک‌شده از سوی مشتریان انجام شود [۵]. مدیریت مؤثر جریان برگشتی با استفاده از یک سیستم احیا جهت کنترل محصولات برگشتی و هدایت آن‌ها به‌سوی تسهیلات مناسب انجام خواهد شد [۳]. بر این اساس، گروهی از محققان اروپایی در حوزه مدیریت زنجیره تأمین برگشتی، این نوع از زنجیره را تحت عنوان فرآیند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل جریان مواد اولیه مواد در جریان ساخت و محصولات نهایی معرفی کرده‌اند که از تولیدکنندگان به‌سوی تسهیلات مناسب احیا و اسقاط جریان دارد [۱۰]. لازم به ذکر است که مجموعه فعالیت‌های مرتبط با سیستم احیا با توجه به ماهیت فرآیندها و الزامات خاص هر صنعت می‌توانند متفاوت باشند که برخی از مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از جمع‌آوری، تفکیک و تعیین وضعیت محصولات برگشتی پس از بازرسی و تصمیم‌گیری پیرامون آن‌ها، اسقاط، احیا و توزیع مجدد محصولات احیاشده [۱۱].

یک پیکربندی جامع اما انعطاف‌پذیر با امکان لحاظ‌نمودن سطوح متنوعی از لایه‌ها شامل تسهیلات با عملکردهای مختلف و منطبق با فرآیندهای موردنیاز برای مدیریت جریان محصولات برگشتی، برای تولیدکنندگان بسیار مطلوب و کارا خواهد بود [۳]. از این‌رو مطالعات بسیاری در طی سال‌های اخیر در راستای توسعه شبکه‌های زنجیره تأمین برگشتی انجام شده است که با توجه به آن‌ها می‌توان فرآیندهای مدیریت زنجیره تأمین برگشتی را در حوزه‌های متنوعی دسته‌بندی کرد که برخی از مهم‌ترین عبارت‌اند از: مدیریت موجودی [۱۲]، مسیریابی وسایل حمل‌ونقل و جمع‌آوری محصولات [۱۳]، مکان‌یابی تسهیلات [۱۴]،

روش‌های حل دقیق، تاکنون روش‌های فرا ابتکاری متنوعی نظیر الگوریتم جستجوی ممنوعه [۲]، ژنتیک [۳۱-۲۷] و جستجوی همسایگی متغیر [۱۴] برای حل این مسائل ارائه شده است.

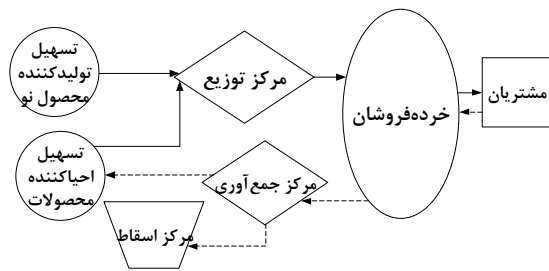
با توجه به بررسی ادبیات موضوع می‌توان دریافت نمود که توسعه مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن جریان‌های برگشتی تحت تأثیر شرایط واقعی محیط کسب‌وکار همچون ساختار و روابط مابین اجزای یک شبکه و عدم قطعیت پارامترهای تصمیم‌گیری و همچنین ارائه روش‌های حل دقیق کارا مورد نیاز مدیران زنجیره‌های تأمین خواهد بود. از این رو در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط جامع برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته به همراه یک الگوریتم حل دقیق کارا مبتنی بر روش‌های تقریب میانگین نمونه و تجزیه بندرز شتاب‌یافته جدید برای حل آن ارائه شده است. در این مقاله، با هدف افزایش دامنه کاربردپذیری مدل ارائه شده در دنیای واقعی نسبت به دیگر مطالعات انجام شده در ادبیات موضوع، توسعه‌های ذیل تحت عنوان نوآوری‌های اساسی در نظر گرفته شده است:

- توسعه مدل ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت فضای تصمیم‌گیری پارامترهای تقاضا، نرخ برگشت، نرخ احیا، نرخ امحا و هزینه‌های حمل‌ونقل و احیا، برنامه‌ریزی برای چندین دوره زمانی، برنامه‌ریزی برای چندین محصول، تصمیم‌گیری پیرامون ظرفیت تسهیلات با توجه به عدم قطعیت تقاضای مشتریان، امکان نگهداری موجودی در تسهیلات توزیع و در نهایت یک شبکه شش سطحی زنجیره تأمین سطحی قابل کاربرد برای طیف متنوعی از انواع محصولات؛

- ارائه یک الگوریتم حل کارا مبتنی بر تقریب میانگین نمونه و تجزیه بندرز شتاب‌یافته جدید برای حل مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای

زنجیره تأمین حلقه بسته با توجه به دو جریان مستقیم و برگشتی در نظر گرفته‌اند [۶]. این در حالی است که در نظر گرفتن حداکثر ظرفیت ممکن لزوماً نمی‌تواند منجر به یک تصمیم کارا در دنیای واقعی شود. تنها در مطالعات محدودی ظرفیت به‌عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده است که انطباق بیشتری با فرضیات دنیای واقعی دارد [۱۹، ۲۰]. مدل‌های طراحی شبکه چند محصولی نیز به دلیل انطباق بیشتر با دنیای واقعی، مورد توجه بسیاری از محققان نیز واقع شده است [۲۱، ۲۲]. برای نخستین بار سالما و همکارانش [۲۳] یک مدل تک‌محصولی و تک دوره‌ای برای یک مدل طراحی شبکه حلقه بسته در شرایط قطعیت ارائه نموده‌اند و سپس مدل ارائه شده را برای حالت چند محصولی توسعه داده‌اند. مدل‌های طراحی شبکه ارائه شده در یک فضای چند دوره‌ای نسبت به مدل‌های تک دوره‌ای از انطباق بیشتری با دنیای واقعی برخوردار هستند زیرا اتخاذ تصمیم در یک دوره زمانی می‌تواند بر دوره‌های مابعد آن تأثیرگذار باشد [۲۲، ۲۴]. برای نمونه، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی برای طراحی شبکه حلقه بسته چند سطحی و چند دوره‌ای با در نظر گرفتن ماهیت غیرقطعی پارامترها با استفاده از رویکرد فازی ارائه شده است [۲۵].

با توجه به اینکه بیشتر مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین از نوع مسائل با پیچیدگی حل بالا است [۱]، توسعه روش‌های دقیق، ابتکاری و فرا ابتکاری قدرتمند برای حل این نوع از مسائل لازم است؛ هزینه بالای پیاده‌سازی تصمیمات طراحی شبکه زنجیره تأمین سبب گشته تا اهمیت دقت این تصمیمات به نحو چشمگیری افزایش یابد. در نتیجه، استفاده از روش‌های حل دقیق برای حل مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین بسیار کارا تر خواهد بود از ارائه روش‌های حل دیگر حتی با خطای اندک. از این رو، برخی از محققان اقدام به ارائه روش‌های حل دقیق نظیر انشعاب و برش، انشعاب و تحدید و تجزیه بندرز برای حل مسائل ارائه نموده‌اند [۱۹، ۲۲، ۲۳، ۲۶]. با توجه به کاهش کارآمدی حل مسائل طراحی شبکه در مقیاس کلان با استفاده از



شکل ۱- نمای کلی زنجیره تأمین حلقه بسته

در این مدل، هدف تعیین ساختار شبکه با انتخاب تسهیلات جمع‌آوری و احیا و تخصیص خرده‌فروشان به مراکز جمع‌آوری و همچنین تعیین ظرفیت مراکز جمع‌آوری و احیا است. برای این منظور نیاز است تا مدیریت جریان مابین تسهیلات زنجیره در طی دوره‌های زمانی مختلف انجام‌شده و سطح موجودی محصولات در مراکز توزیع نیز با توجه به اهداف زنجیره تعیین شود. تصمیمات استراتژیک و عملیاتی یادشده می‌بایست به نحوی اتخاذ گردد که مجموع کل هزینه‌های ثابت و متغیر زنجیره در طی دوره‌های برنامه‌ریزی حداقل شود. راه‌اندازی هر یک از تسهیلات جمع‌آوری و احیا دارای هزینه ثابت است. هزینه‌های حمل‌ونقل محصولات مابین تسهیلات و همچنین نگهداری و پردازش آن‌ها در تسهیلات در نظر گرفته شده است. مدل ارائه‌شده در این مقاله قابل‌استفاده برای تولیدکنندگانی است که با مساله مدیریت جریان محصولات برگشت‌داده‌شده از سوی مشتریان مواجه هستند. این مقوله امروزه با افزایش اهمیت ارائه خدمات پس از فروش نظیر تعویض و تعمیر محصولات در بسیاری از صنایع فعال در حوزه محصولات الکترونیکی (محصولات مونتاژشده از مجموعه‌ای متنوع از قطعات قابل تعمیر، تعویض و یا اسقاط) کاربرد بیشتری خواهد داشت. از سوی دیگر، با توجه به استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی سناریو محور برای در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی، مدل ارائه‌شده به‌خوبی خواهد توانست به تصمیم‌گیرندگان در مواجهه با عدم قطعیت کامل هنگام ارائه محصولات جدید به بازار و مواجهه با مجموعه‌ای از رخدادهای محتمل به‌خوبی یاری رساند [۹].

ارائه‌شده برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی تحت فضای عدم قطعیت.

### ۳- مساله پژوهش: طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی تحت عدم قطعیت

#### ۳-۱- تعریف مساله

در این مقاله، طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چندسطحی برای چندین محصول طی چندین دوره زمانی با هدف حداقل نمودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی شبکه بررسی شده است. نمای کلی این مساله مطابق شکل ۱ است. در این مساله، محصولات برگشت داده‌شده از مشتریان اولیه به دلایل مختلف به خرده‌فروشان انتقال داده می‌شوند و هر خرده‌فروش نیز تنها به یک مرکز جمع‌آوری با توجه به هزینه حمل‌ونقل مابین آن دو تخصیص داده می‌شود. در مراکز جمع‌آوری، کالاهای غیرقابل‌استفاده امحا شده و مابقی آن‌ها به مراکز احیا ارسال می‌شوند. در مراکز احیا، محصولات برگشتی دمونتاژ شده و قطعات سالم آن‌ها در تولید محصولات جدید به کار گرفته خواهد شد. از این رو برای هر محصول می‌توان یک نرخ احیا تعریف نمود. تمامی کالاهای احیاشده و نو به مراکز توزیع ارسال شده و بدون هیچ‌گونه تفاوتی در اختیار مشتریان نهایی قرار خواهند گرفت. هزینه‌های نگهداری کالا و عدم پاسخگویی به تقاضا در پی مواجهه با کمبود در مراکز توزیع در نظر گرفته شده است. ظرفیت تسهیلات احیا و توزیع محدود است. میزان و سطح کیفیت محصولات برگشتی به دلیل وابستگی آن‌ها به عوامل متعدد با عدم قطعیت بسیاری همراه خواهد بود. اثر این عدم قطعیت بر نرخ برگشت و احیا محصولات و همچنین هزینه‌های فرآیند احیا مشاهده می‌شود. در مدیریت جریان روبه‌جلو نیز عدم قطعیت هزینه‌های تولید و نگهداری محصولات در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت پارامترهای یادشده مبتنی بر تابع توزیع برآوردشده برای هر یک با استفاده از تعریف سناریوهای معین با احتمال وقوع مشخص در نظر گرفته شده است [۲۴].

## ۳-۲-۲- مدل ریاضی

$W_{pc}$ : ظرفیت تسهیل  $p$  تولیدکننده محصول نو برای تولید محصول  $c$ ،

## ۳-۲-۱- مجموعه‌ها و اندیس‌ها

$C, T$  و  $S$ : به ترتیب مجموعه‌های محصولات، دوره‌های زمانی برنامه‌ریزی و سناریوها،

$\lambda$  و  $\pi_s$ : احتمال رخداد سناریو  $s$  و نرخ تخفیف.

$J, I, P, K$  و  $N$ : به ترتیب مجموعه خرده‌فروشان، توزیع‌کنندگان، تسهیلات تولیدکننده محصولات نو و مکان‌های بالقوه برای راه‌اندازی تسهیلات جمع‌آوری و احیا.

## ۳-۲-۳- متغیرها

$y_k$ : متغیر باینری با مقدار برابر با ۱ اگر مرکز جمع‌آوری  $k$  باز شود؛ ۰ در غیر این صورت،

$u_{ik}$ : متغیر باینری با مقدار برابر با ۱ اگر خرده‌فروش  $i$  تخصص‌یابد به مرکز جمع‌آوری  $k$ ؛ ۰ در غیر این صورت،

$x_{nc}$ : متغیر باینری با مقدار برابر با ۱ اگر تسهیل احیای  $n$  تخصص‌یافته شود به محصول  $c$ ؛ ۰ در غیر این صورت،

$q_n$  و  $v_{jc}$ : به ترتیب ظرفیت‌های احیای تسهیل  $n$  و مرکز توزیع  $j$  برای محصول  $c$ ،

## ۳-۲-۲- پارامترها

$F_{nk}^2$  و  $F_{nk}^1, F_k$ : به ترتیب هزینه‌های ثابت گشایش مرکز جمع‌آوری در مکان بالقوه  $k$ ، گشایش مرکز احیا در مکان بالقوه  $n$  و تخصیص محصول  $c$  به تسهیل احیا در مکان بالقوه  $n$

$z_{pic}^{5ts}, z_{pic}^{4ts}, z_{jic}^{3ts}, z_{njc}^{2ts}, z_{knc}^{1ts}, z_{ikc}^{ts}$ : به ترتیب میزان محصول  $c$  انتقال‌یافته از خرده‌فروش  $i$  به مرکز جمع‌آوری  $k$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$ ، محصول  $c$  انتقال‌یافته از مرکز جمع‌آوری  $k$  به تسهیل احیای  $n$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$ ،

محصول  $c$  انتقال‌یافته از تسهیل احیای  $n$  به مرکز توزیع  $j$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$ ، محصول  $c$  انتقال‌یافته از مرکز توزیع  $j$  به خرده‌فروش  $i$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$ ، محصول  $c$  انتقال‌یافته از تسهیل  $p$  تولیدکننده محصول نو به مرکز توزیع  $j$  در نخستین دوره و محصول  $c$  انتقال‌یافته از تسهیل  $p$  تولیدکننده محصول نو به مرکز توزیع  $j$  در دوره  $t \neq 1$  تحت سناریو  $s$ ،

$m_{kc}^{ts}$  و  $\rho_{cj}^{ts}, d_{ic}^{ts}$ : به ترتیب میزان کمبود محصول  $c$  که توزیع‌کننده  $i$  با آن مواجه خواهد شد در دوره  $t$  و تحت سناریو  $s$ ، سطح موجودی محصول  $c$  در مرکز توزیع  $j$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$ ، و میزان محصول  $c$  امحاشده در مرکز جمع‌آوری  $k$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$ .

$B_{cnt}^{3s}$  و  $B_{cpt}^{2s}, B_{ckt}^{1s}, B_{cjt}$ : به ترتیب هزینه‌های پردازش یک واحد از محصول  $c$  در مرکز توزیع  $j$  در دوره  $t$ ، پردازش یک واحد کالا از محصول  $c$  در مرکز جمع‌آوری  $k$  در دوره  $t$ ، تولید یک واحد کالا از محصول  $c$  در تسهیل  $p$  تولیدکننده محصولات نو در دوره  $t$  و احیا یک واحد کالا از محصول  $c$  در مرکز احیا  $n$  در دوره  $t$ ،

$G_{ckt}^s$  و  $E_c^s$ : به ترتیب نرخ‌های احیا برای محصول  $c$  و امحاشده برای محصول  $c$  در مرکز جمع‌آوری  $k$  در دوره  $t$ ،

$H_{cj}^s$  و  $\beta_c, \alpha_c$ : به ترتیب هزینه‌های کمبود یک واحد از محصول  $c$  در خرده‌فروشی، اسقاط یک واحد از محصول  $c$  و نگهداری یک واحد محصول  $c$  در مرکز توزیع  $j$ ،

$R_{ic}^{ts}$  و  $D_{ic}^{ts}$ : به ترتیب تقاضا در خرده‌فروش  $i$  برای محصول  $c$  در دوره  $t$  و تحت سناریو  $s$ ، و میزان برگشت محصولات  $c$  دریافت‌شده از خرده‌فروش  $i$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$ ،

۳-۲-۴- تابع هدف و محدودیت‌ها

مدل ارائه‌شده در این مقاله به صورت یک مدل دوسطحی احتمالی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است که در آن متغیرهای تصمیم‌گیری به دو دسته متغیرهای سطح اول و دوم تقسیم می‌شوند. در دسته نخست متغیرهایی قرار می‌گیرند که مقدار آن‌ها مستقل از سناریوهای عدم قطعیت

$A_{jit}^{4s}$  و  $A_{pjt}^{3s}, A_{njt}^{2s}, A_{knt}^{1s}, A_{ikt}^s$ : به ترتیب هزینه‌های حمل واحد کالا از خرده‌فروش  $i$  به مرکز جمع‌آوری در مکان بالقوه  $k$  در دوره  $t$ ، حمل واحد کالا از مرکز جمع‌آوری  $k$  به تسهیل احیا  $n$  در دوره  $t$ ، حمل واحد کالا از سایت احیا  $n$  به مرکز توزیع  $j$  در دوره  $t$ ، حمل واحد کالا از تسهیل  $p$  تولیدکننده محصولات نو به مرکز توزیع  $j$  در دوره  $t$  و حمل واحد کالا از مرکز توزیع  $j$  به خرده‌فروش  $i$  در دوره  $t$ ،

$B_{cnt}^{3s}$  و  $B_{cpt}^{2s}, B_{ckt}^{1s}, B_{cjt}$ : به ترتیب هزینه‌های پردازش یک واحد از محصول  $c$  در مرکز توزیع  $j$  در دوره  $t$ ، پردازش یک واحد کالا از محصول  $c$  در مرکز جمع‌آوری  $k$  در دوره  $t$ ، تولید یک واحد کالا از محصول  $c$  در تسهیل  $p$  تولیدکننده محصولات نو در دوره  $t$  و احیا یک واحد کالا از محصول  $c$  در مرکز احیا  $n$  در دوره  $t$ ،

$G_{ckt}^s$  و  $E_c^s$ : به ترتیب نرخ‌های احیا برای محصول  $c$  و امحاشده برای محصول  $c$  در مرکز جمع‌آوری  $k$  در دوره  $t$ ،

$H_{cj}^s$  و  $\beta_c, \alpha_c$ : به ترتیب هزینه‌های کمبود یک واحد از محصول  $c$  در خرده‌فروشی، اسقاط یک واحد از محصول  $c$  و نگهداری یک واحد محصول  $c$  در مرکز توزیع  $j$ ،

$R_{ic}^{ts}$  و  $D_{ic}^{ts}$ : به ترتیب تقاضا در خرده‌فروش  $i$  برای محصول  $c$  در دوره  $t$  و تحت سناریو  $s$ ، و میزان برگشت محصولات  $c$  دریافت‌شده از خرده‌فروش  $i$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$ ،

مدل ارائه‌شده در این مقاله به صورت یک مدل دوسطحی احتمالی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است که در آن متغیرهای تصمیم‌گیری به دو دسته متغیرهای سطح اول و دوم تقسیم می‌شوند. در دسته نخست متغیرهایی قرار می‌گیرند که مقدار آن‌ها مستقل از سناریوهای عدم قطعیت

$$\sum_n z_{njc}^{2ts} + \sum_p z_{pjc}^5 + \rho_{cj}^{(t-1)s} = \sum_i z_{jic}^{3ts} + \rho_{cj}^{ts} \quad \forall s, c, j; t > 1 \quad (3)$$

$$\sum_j z_{jic}^{3ts} = D_{ic}^{ts} - l_{ic}^{ts} + l_{ic}^{(t-1)s} \quad \forall s, t, i, c \quad (4)$$

$$R_{ic}^{ts} = \sum_k z_{ikc}^{ts} \quad \forall s, t, i, c \quad (5)$$

$$(1 - G_{ckt}^s) \sum_i z_{ikc}^{ts} = \sum_n z_{knc}^{ts} \quad \forall s, t, k, c \quad (6)$$

$$E_c^s \times \sum_k z_{knc}^{ts} = \sum_j z_{njc}^{2ts} \quad \forall s, t, n, c \quad (7)$$

$$\sum_j z_{pjc}^4 \leq W_{pc} \quad \forall c, p, t = 1 \quad (8)$$

$$\sum_j z_{pjc}^5 \leq W_{pc} \quad \forall s, c, p, t > 1 \quad (9)$$

$$\sum_n z_{njc}^{ts} + \sum_p z_{pjc}^{5ts} + \rho_{cj}^{(t-1)s} \leq v_{jc} \quad \forall s, c, j, t > 1 \quad (10)$$

$$\sum_n z_{njc}^{2ts} + \sum_p z_{pjc}^4 + \rho_{cj}^{(t-1)s} \leq v_{jc} \quad \forall s, c, j, t = 1 \quad (11)$$

$$\sum_k z_{knc}^{ts} \leq q_n \quad \forall s, t, n, c \quad (12)$$

$$q_n \leq M \times \sum_c x_{nc} \quad \forall n \quad (13)$$

$$\sum_k u_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (14)$$

$$u_{ik} \leq y_k \quad \forall i, k \quad (15)$$

$$z_{ikc}^{ts} \leq M \times u_{ik} \quad \forall s, t, i, c, k \quad (16)$$

$$\sum_n x_{nc} = 1 \quad \forall c \quad (17)$$

$$\sum_c x_{nc} \leq 1 \quad \forall n \quad (18)$$

$$z_{knc}^{1ts} \leq M \times x_{nc} \quad \forall s, t, n, c, k \quad (19)$$

$$\sum_i z_{inc}^{ts} \times g_{ckt} = m_{kc}^{ts} \quad \forall s, t, c, k \quad (20)$$

$$l_{ic}^{(t-1)s} = 0 \quad t = 1 \quad (21)$$

$$\rho_{cj}^{(t-1)s} = 0 \quad t = 1 \quad (22)$$

$$q_n, z_{ike}^{ts}, z_{knc}^{1ts}, z_{njc}^{2ts}, z_{pjc}^{5ts}, z_{pjc}^4, \quad (23)$$

$$z_{jic}^{3ts}, l_{ic}^{ts}, m_{kc}^{ts}, v_{jc}, \rho_{cj}^{ts} \geq 0$$

$$y_k, u_{ik}, x_{nc} \in \{0, 1\} \quad (24)$$

تابع هدف (1) مجموع هزینه‌های زنجیره تأمین شامل هزینه‌های ثابت عملیاتی را حداقل می‌کند. به صورت خاص،

خواهد بود. در نتیجه مقدار این متغیرها پیش از درک عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی تعیین خواهد شد. این متغیرها مرتبط با تصمیم‌های مکان‌یابی، تخصیص، تعیین ظرفیت و حجم تولید در نخستین دوره هستند که عبارت‌اند از  $x_{nc}, y_k, u_{rk}, v_{jc}$  در سطح دوم نیز متغیرهای تحت تأثیر عدم قطعیت در تصمیمات تاکتیکی و عملیاتی در نظر گرفته می‌شوند که تمامی آن‌ها تحت تأثیر سناریوها هستند. به عبارت دیگر پس از تصمیم‌گیری پیرامون متغیرهای سطح اول، پدیده تصادفی رخ خواهد داد که بر متغیرهای سطح دوم تأثیر خواهد گذاشت. هنگامی که پارامترهای تصادفی شامل تقاضا و نرخ برگشت درک می‌شوند، بر اساس تصمیمی که در مرحله نخست اتخاذ شده است، در مرحله دوم پیرامون میزان حمل‌ونقل مابین تسهیلات، سطح موجودی و کمبود در مراکز توزیع تصمیم گرفته خواهد شد. بر این اساس، متغیرهای سطح دوم عبارت‌اند از  $m_{kc}^{ts}, z_{knc}^{1ts}, z_{ike}^{ts}, z_{jic}^{ts}, \rho_{cj}^{ts}, z_{njc}^{2ts}, z_{pjc}^{5ts}, z_{pjc}^4, l_{ic}^{ts}$

$$\min \sum_{c,n} F_{nc}^2 \times x_{nc} + \sum_k F_k \times y_k \quad (1)$$

$$+ \sum_f F_n^1 \times q_n + \sum_{c,p,j} (A_{pj1}^{3s} + B_{cpt}^{2s}) \times z_{pjc}^4$$

$$+ \pi_s \times \lambda^{t-1} \times \left( \begin{aligned} & \sum_{t,c,i,k,s} (A_{ikt}^a + B_{ckt}^{1s}) \times z_{ikc}^{ts} \\ & + \sum_{t,c,n,k,s} A_{knt}^{1s} \times z_{knc}^{1ts} \\ & + \sum_{t,c,n,j,s} (A_{njt}^{2s} + B_{cnt}^{3s}) \times z_{njc}^{2ts} \\ & + \sum_{j,t,c,s} H_{cj}^s \times p_{cj}^{ts} \\ & + \sum_{t>1,s,c,p,j} (A_{pj1}^{3s} + B_{cpt}^{2s}) \times z_{pjc}^{5ts} \\ & + \sum_{t,c,j,i,s} (A_{jit}^{4s} + B_{cjt}^s) \times z_{jic}^{3ts} \\ & + \sum_{i,s,t,c} \alpha_c \times l_{ic}^{ts} \\ & + \sum_{t,k,c,s} \beta_c^s \times m_{kc}^{ts} \end{aligned} \right)$$

$$\sum_n z_{njc}^{2ts} + \sum_p z_{pjc}^4 + \rho_{cj}^{(t-1)s} = \sum_i z_{jic}^{3ts} + \rho_{cj}^{ts} \quad \forall s, c, j; t = 1 \quad (2)$$

ظرفیت برای تسهیلات احیا را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۳) نیز تضمین می‌کند که ظرفیت در صورتی به تسهیل احیا تخصیص می‌یابد که محصول به بدان تخصیص یابد. روابط (۱۴) الی (۱۹) محدودیت‌های مکان‌یابی و تخصیص را برقرار می‌سازند. محدودیت (۱۴) تضمین می‌کند که هر خرده‌فروش تنها می‌تواند به یک مرکز جمع‌آوری اختصاص یابد. محدودیت (۱۵) نیز ملزم می‌سازد که نیاز به راه‌اندازی یک مرکز جمع‌آوری است اگر حداقل یک خرده‌فروش بدان تخصیص یابد. محدودیت (۱۶) مقید می‌کند در صورتی مابین یک خرده‌فروش و مرکز جمع‌آوری جریان محصول برقرار خواهد شد که آن‌ها به یکدیگر تخصیص یافته باشند. محدودیت (۱۷) اطمینان می‌دهد که هر محصول تنها می‌تواند به یک مرکز احیا تخصیص یابد. محدودیت (۱۸) تأکید می‌کند که هر تسهیل احیا حداکثر می‌تواند به یک نوع محصول تخصیص یابد. محدودیت (۱۹) اطمینان می‌دهد که هر محصول به یک تسهیل احیا از طریق یک مرکز جمع‌آوری ارسال خواهد شد اگر تسهیل احیا بدان محصول تخصیص یافته باشد. محدودیت (۲۰) تضمین می‌کند که سهم مشخصی از هر محصول در مراکز جمع‌آوری امحا می‌شود. محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲) سطح موجودی و میزان کمبود را در نخستین دوره تعیین می‌کنند. محدودیت‌های (۲۳) و (۲۴) نیز بیانگر نوع متغیرها هستند.

#### ۴- الگوریتم حل مبتنی بر تقریب میانگین

##### نمونه و الگوریتم تجزیه بندرز

##### شتاب یافته

مدل ریاضی ارائه شده از نوع مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط احتمالی مبتنی بر سناریو است. از آنجایی که در مدل ارائه شده تمامی جنبه‌های کاربردی طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در نظر گرفته شده است، مدل موردبررسی پیچیده بوده و شامل متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌های متنوعی است. این در حالی است که مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین به‌طور کلی از نوع مسائل با

نخستین عبارت تابع هدف نشان‌دهنده هزینه‌های ثابت تخصیص تسهیل احیا به محصولات و هزینه‌های ثابت گشایش مراکز جمع‌آوری است. دومین عبارت هزینه‌های گشایش تسهیلات احیا را تعیین می‌کند که براساس ظرفیت تخصیص داده شده بدان تسهیلات است. عبارت سوم بیانگر هزینه انتظاری حمل‌ونقل مابین دو تسهیل و هزینه‌های پردازش در تسهیلات است. عبارت چهارم نشانگر هزینه انتظاری نگهداری موجودی در مراکز توزیع، عبارت پنجم نشانگر هزینه انتظاری کمبود در مراکز توزیع و عبارت ششم نشانگر هزینه انتظاری امحا است.

معادلات (۲) الی (۷) عبارت‌اند از محدودیت‌های تعادل جریان. محدودیت‌های (۲) و (۳) تعادل جریان در مراکز توزیع را تضمین می‌کنند. تفاوت مابین این دو محدودیت در آن است که تصمیم سطح تولید در دوره ۱ بدون لحاظ نمودن سناریوها است، درحالی‌که در دوره‌های مابعد تصمیم مدنظر برای هر سناریو با توجه به میزان تقاضای مشخص شده در دوره ۱ خواهد بود. محدودیت (۴) تعادل جریان در توزیع‌کنندگان را نشان می‌دهد. محدودیت (۵) اطمینان می‌دهد که تمامی محصولات برگشتی دریافت شده توسط خرده‌فروشان به مراکز جمع‌آوری انتقال یابند. محدودیت (۶) تضمین می‌کند که محصولات باقی‌مانده در هر مرکز جمع‌آوری پس از امحا قطعات غیرقابل استفاده به مراکز احیا انتقال داده شوند. محدودیت (۷) تعادل جریان در تسهیلات احیا را برقرار می‌کند. لازم به ذکر است که از آنجایی که برخی از محصولات برگشتی در تولید محصولات جدید استفاده می‌شوند، خروجی تسهیلات احیا کمتر از ورودی آن‌ها خواهد بود با توجه به نرخ احیای محصول.

نامعادلات (۸) الی (۱۳) نشان‌دهنده محدودیت ظرفیت است. محدودیت‌های (۸) و (۹) تضمین می‌کند که سطح تولید در هر تسهیل تولید محصول جدید در هر دوره کمتر از ظرفیت آن است. محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) نیز نشان‌دهنده محدودیت ظرفیت مراکز توزیع با در نظر گرفتن سطح موجودی است. محدودیت (۱۲) محدودیت



محصولات همراه با عدم قطعیت است بردار تصادفی  $\bar{\xi} = (\bar{d}, \bar{u}, \bar{q})$  به عنوان یک درک از پارامترهای تصادفی  $\xi = (d, u, q)$  شمرده می شود. یک متغیر به سمت چپ محدودیت (۲۹) افزوده خواهد شد تا تابع برگشتی برای تمامی ترکیب های ممکن از تصمیمات مرحله اول و سناریوها همچنان شدنی باقی بماند. مقدار ضریب این متغیر در تابع هدف معادل با جریمه کمبود و یا هزینه برون سپاری است. مدل دو مرحله ای تصادفی طراحی شبکه زنجیره تأمین به صورت ذیل خواهد بود:

$$\min_{z,w} f(z,w) = c_1^T z + c_2^T w + E_{\bar{\xi}} [Q(z, \bar{\xi})] \quad (31)$$

$$z \in Z \subseteq \{0,1\}^{K \times |K|} \quad (32)$$

$$w \in W \subseteq \{0,1\}^{N \times |N|} \quad (33)$$

$$Q(z, \xi) = \min_{x,pr} q^T(\xi)x + h^T Pr \quad (34)$$

$$Rx \leq u(\xi) \quad (35)$$

$$Nx = 0 \quad (36)$$

$$Hx \leq Mz \quad (37)$$

$$Dx + Pr \geq d(\xi) \quad (38)$$

$$x \in \mathbb{R}_+^{A \times |P|} \quad (39)$$

تابع هدف (۳۱) شامل هزینه های تصمیمات استراتژیک و ارزش انتظاری هزینه های عملیاتی آینده است.  $Q(z, \xi)$  یک تابع تصادفی متعلق به تصمیم  $z$  در مرحله نخست و سناریو  $\xi$  است. در مرحله نخست مدل (۳۱) الی (۳۹)، پیرامون ساختار شبکه تصمیم گیری می شود. در مرحله دوم نیز پیرامون فعالیت های عملیاتی مدیریت شبکه و سناریوهای دریافت شده، اتخاذ می شود. علاقه مندان جهت مطالعه جزئیات مدل تصادفی دو مرحله ای می توانند به مطالعات انجام شده توسط بیرگه و لووکس [۳۲] و شپیرو و روسزینسکی [۳۳] مراجعه نمایند. به منظور بهینه سازی مدل تصادفی ارائه شده در این مقاله، از روش میانگین تقریب نمونه برای برآورد تابع انتظاری استفاده شده است. تقریب میانگین نمونه یک روش برای کاهش اندازه مدل تصادفی است که با تعداد بسیار زیادی از سناریوها مواجه است [۳۴، ۳۵]. تکنیک تقریب میانگین نمونه مدل تصادفی

پیچیدگی ها حل بالا هستند [۷، ۸]. تعداد متغیرها و محدودیت های مدل ارائه شده را می توان در جدول ۱ مشاهده نمود. با توجه به جمع بندی ادبیات موضوع می توان ملاحظه نمود که برای شبکه های بزرگ زنجیره تأمین، تعداد متغیرهای تصمیم گیری، محدودیت ها و به ویژه متغیرهای باینری افزایش خواهد یافت. تعداد سناریوها و دوره های زمانی تأثیر افزایشی بر تعداد محدودیت ها و متغیرها خواهند داشت. در نتیجه دشواری های محاسباتی با افزایش اندازه شبکه، تعداد سناریوها و دوره های زمانی در برنامه ریزی به شکل معناداری افزایش خواهد یافت. مدل ریاضی ارائه شده در بخش سوم را می توان در قالب فشرده و عمومی ذیل به صورت مجدد نمایش داد.

$$\min c_1^T z + c_2^T w + q_1^T x \quad (25)$$

$$z \in Z \subseteq \{0,1\}^{K \times |K|} \quad (26)$$

$$Rx \leq u \quad (27)$$

$$Hx \leq Mz \quad (28)$$

$$Dx \geq d \quad (29)$$

$$x \in \mathbb{R}_+^{A \times |P|} \quad (30)$$

جدول ۱- ابعاد مدل ارائه شده برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته

$ K  +  I  \times  K  +  N  \times  C $	تعداد متغیرهای باینری
$ K  +  J  \times  C  \times (1 +  P  -  P  \times  S ) +  S  \times  T  \times  C  \times ( I  \times  K  +  k  \times  N ) +  S  \times  T  \times  C  \times ( N  \times  J  +  I  \times  J ) +  S  \times  T  \times  C  \times ( P  \times  J  +  I  +  J  +  K )$	تعداد متغیرهای پیوسته
$ S  \times  T  \times  C  \times (2 J  + 2 I  \times  C  + 2 K  + 2 N  +  I  \times  K  +  N  \times  C  +  P ) + 2 N  +  C  \times (1 +  P ) +  I  \times ( K  + 1) -  S  \times  C  \times  P $	تعداد محدودیت ها

در این مقاله، تغییر در اطلاعات به عنوان مهم ترین منبع عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. از این رو، برنامه ریزی تصادفی دو مرحله ای سناریومحور برای مدل نمودن این نوع از عدم قطعیت به کار گرفته شده است. تابع تصادفی دو مرحله ای، هزینه های عملیاتی را پس از درک عدم قطعیت پارامترهای تصادفی و پس از اتخاذ تصمیم های مرحله اول حداقل می سازد. تقاضا، هزینه های عملیاتی و میزان برگشت

ظرفیت از نوع متغیرهای پیچیده خواهند بود و با تعیین مقدار آن‌ها، مساله اصلی به تعداد  $N$  زیرمساله کوچک‌تر شکسته خواهد شد.

$$\min_{x, Pr} c_1^T \bar{z} + c_2^T \bar{w} + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N q^T(\xi^n) x^n + h^T Pr^n \quad (49)$$

$$Rx^n \leq u \quad (50)$$

$$Nx^n = 0 \quad (51)$$

$$Hx^n \leq M\bar{z} \quad (52)$$

$$Dx^n + Pr^n \geq d(\xi^n) \quad (53)$$

$$x^n \in \mathbb{R}_+^{|A| \times |P|} \quad (54)$$

در مدل (۴۹-۵۴)، نشان‌دهنده مقادیر در نظر گرفته‌شده برای متغیرهای  $(z, w)$  هستند. مساله شامل عبارات (۴۹) الی (۵۴) خطی است. مقادیر دوگان محدودیت (۵۲) می‌توانند جهت ایجاد جواب بهتر برای  $(z, w)$  به کار گرفته شوند. علاوه بر آن، یک برش از مقادیر دوگان ایجاد خواهد شد و به مساله اصلی اضافه خواهد شد.

$$\min_{z, w, \theta} f(z, w, \theta) = c_1^T z + c_2^T w + \theta \quad (55)$$

$$z \in Z \subseteq \{0, 1\}^{|\mathcal{E}| \times |\mathcal{I}|} \quad (56)$$

$$w \in W \subseteq \{0, 1\}^{|\mathcal{N}|} \quad (57)$$

$$\theta \in \mathbb{R} \quad (58)$$

$\theta$  یک متغیر آزاد است که به همراه برش اضافه‌شده، تقریب محدبی از زیرمسائل را ارائه می‌دهد. برش‌های ایجادشده در هر مرحله به مساله اصلی تا دست‌یابی به شرایط بهینه‌گی اضافه خواهد شد. این رویکرد تحت عنوان الگوریتم تجزیه بندرز شناخته شده است [۳۷] و در ادبیات برنامه‌ریزی تصادفی روش  $L$ -شکل نیز نامیده می‌شود. استفاده از روش مذکور در این مقاله با توجه به مدل پیشنهادشده می‌تواند دو مزیت عمده را به همراه داشته باشد که عبارت‌اند از:

۱. هر یک از دو مدل برنامه‌ریزی اصلی و زیرمساله دارای ساختار ساده‌تری نسبت به مدل تقریب میانگین نمونه هستند که می‌توانند حل سریع‌تری را به همراه داشته باشند. مساله اصلی از نوع برنامه‌ریزی صفر-یک بوده و زیرمساله تحت تأثیر آن نیز از نوع برنامه‌ریزی خطی و شبکه است.

(۳۱) الی (۳۹) را با مساله (۴۰) الی (۴۲) به‌عنوان مساله اصلی تقریب می‌زند.

$$\min_{z, w} f(z, w) = c_1^T z + c_2^T w + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Q(z, \xi^n) \quad (40)$$

$$z \in Z \subseteq \{0, 1\}^{|\mathcal{E}| \times |\mathcal{I}|} \quad (41)$$

$$w \in W \subseteq \{0, 1\}^{|\mathcal{N}|} \quad (42)$$

برای هر یک از  $N$  نمونه، زیرمساله (۴۳) الی (۴۸) در اختیار است.

$$Q(z, \xi^n) = \min_{x, Pr} q^T(\xi^n) x + h^T Pr \quad (43)$$

$$Rx \leq u \quad (44)$$

$$Nx = 0 \quad (45)$$

$$Hx \leq Mz \quad (46)$$

$$Dx + Pr \geq d(\xi^n) \quad (47)$$

$$x \in \mathbb{R}_+^{|A| \times |P|} \quad (48)$$

برای حل مساله نهایی، نیاز است تا به‌صورت همزمان تعداد  $N$  زیرمساله و مساله اصلی با یکپارچه نمودن آن‌ها بهینه شوند. این مساله ترکیبی دربرگیرنده تصمیمات مکان‌یابی تسهیلات جدید و مدیریت جریان مابین تسهیلات است. با توجه به ظرفیت محدود تسهیلات، می‌توان مشاهده نمود که مساله شامل عبارات (۴۰) الی (۴۸) توسعه‌یافته مساله مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت محدود است که خود از نوع مسائل با پیچیدگی‌های حل بالا است. از این‌رو مدل مساله شامل عبارات (۴۰) الی (۴۸) نیز دارای پیچیدگی‌های حل بالا خواهد بود [۳۶]. از این‌رو استفاده از ابزارهای برنامه‌ریزی عددصحيح مختلط برای بهینه‌سازی مدل موردبررسی با دشواری‌های محاسباتی فراوانی همراه خواهد بود. خوشبختانه ساختار مدل مذکور زمینه استفاده از دیگر رویکردهای حل مناسب و کارا را فراهم می‌سازد. مساله تقریب میانگین نمونه موردبررسی در این مقاله (۴۹-۵۴) از نوع برنامه‌ریزی عدد صحيح مختلط است که در آن یک مساله اصلی و  $N$  زیرمساله به کار گرفته‌شده‌اند. در مساله اصلی، مکان و ظرفیت تسهیلات مدنظر تعیین‌شده و مقدار آن‌ها در تمامی زیرمسائل تحت تأثیر هر یک از سناریوها ثابت خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر، متغیرهای مکان‌یابی و

گام-۳: اگر تفاوت مابین حد بالا و پایین کمتر از فاصله مطلوب تا بهینه ( $\delta$ ) باشد، سپس الگوریتم حل پایان خواهد یافت.  $UB$  مقدار بهینه و  $\hat{Z}$  جواب بهینه است. در غیر این صورت، به گام ۴ بروید.

گام-۴: فرض نمایید که  $\lambda_i^n$ ،  $\mu_i^n$  و  $\eta_i^n$  مقادیر بهینه متغیرهای دوگان به ترتیب برای محدودیت‌های (۴۴)، (۴۶) و (۴۷) در هر تکرار باشند. ضرایب برش بهینه به صورت ذیل محاسبه می‌شوند. به شمارنده تعداد تکرارها یک واحد اضافه شده و به صورت مجدد به گام ۲ ارجاع داده می‌شود.

$$a_{k+1}^T = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\mu_i^n)^T M \quad (63)$$

$$b_{k+1} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\lambda_i^n)^T u + (\eta_i^n)^T d^n \quad (64)$$

در فرایند حل الگوریتم تجزیه بندرز، تابع غیرصریح و غیرخطی  $N^{-1} \sum_{n=1}^N Q(z, \xi^n)$  با مقدار  $\theta$  و برش‌های بهینه‌ای که در هر تکرار به مساله اصلی اضافه می‌شوند، تقریب زده می‌شود. به واسطه این تقریب، مساله اصلی را می‌توان آزادسازی شده مساله اصلی تقریب میانگین نمونه دانست. در نتیجه، گام یک، حد پایین برای مقدار بهینه مساله تقریب میانگین نمونه ارائه می‌دهد. در گام ۲، زیرمساله حل می‌شود تا مقدار تابع هدف برای جواب‌های شدنی  $(z_i, w_i)$  برآورد شود و یک حد بالا برای مقدار بهینه ارائه شود. اگر فاصله ایجاد تا بهینه در محدوده مطلوب باشد، الگوریتم حل متوقف می‌شود. در غیر این صورت، برش بهینه به مساله اصلی جهت ارائه یک تقریب بهتر از تابع غیرخطی اضافه می‌شود. این برش‌ها، یک مقدار دقیق برای  $(z_i, w_i)$  و حد پایین برای نقاط دیگر مجموعه‌های  $Z$  و  $W$  ارائه می‌نماید. بر این اساس، الگوریتم در طی یک تعداد تکرار مشخص متوقف خواهد شد. باین وجود تعداد کل تکرارها ممکن است زیاد باشد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، برای مسائل نمونه مورد بررسی در این مقاله، همگرایی الگوریتم کلاسیک تجزیه بندرز ضعیف است. از جمله دلایل این ضعف می‌تواند تعداد زیادی از تکرارهای آغازین غیرمؤثر بدون ایجاد بهبود معنادار در فاصله تا نقطه

۲. با ثابت نمودن مقادیر متغیرهای پیچیده در مرحله اول،  $N$  زیرمساله از یکدیگر تفکیک شده و می‌توانند به صورت مجزا از یکدیگر حل شوند که تأثیر مثبتی بر کاهش زمان حل مسائل خواهد داشت. از این رو الگوریتم تجزیه بندرز می‌تواند به عنوان یک راه کار مناسب برای حل مساله تقریب میانگین نمونه به کار گرفته شود. با استفاده از الگوریتم تجزیه بندرز می‌توان مساله تقریب میانگین نمونه با تفکیک به دو بخش مساله اصلی و زیرمسائل فرعی حل نمود. در مساله اصلی، تقریب تابع  $N^{-1} \sum_{n=1}^N Q(z, \xi^n)$  با متغیرهای پیوسته و مجموعه محدودیت‌ها در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر آن، تابع مذکور به فرم خطی ذیل تقریب زده می‌شود. زیرمسائل در نظر گرفته شده برش‌ها را ایجاد نموده و آن‌ها را به مساله اصلی جهت فراهم نمودن یک تقریب بهتر اضافه می‌نماید. فرایند تجزیه بندرز به صورت ذیل است:

گام-آغازین: حد پایین ( $LB$ ) و حد بالا ( $UB$ ) به ترتیب برابر با منفی بی‌نهایت ( $-\infty$ ) و مثبت بی‌نهایت ( $+\infty$ ) در نظر گرفته می‌شوند. همچنین شمارنده تکرارها ( $i$ ) برابر با صفر و میزان فاصله مطلوب  $\delta$  بزرگ‌تر یا مساوی صفر است.  $(\hat{Z}, \hat{W})$  نیز به عنوان جواب فعلی در نظر گرفته می‌شود.

گام-۱: مساله اصلی ذیل حل شده و  $w_i$  و  $z_i$  به عنوان جواب‌های بهینه مساله در نظر گرفته می‌شوند.

$$LB = \min_{z, w, \theta} c_1^T z + c_2^T w + \theta \quad (59)$$

$$z \in Z, w \in W \quad (60)$$

$$\theta \geq a_k^T z + b_k \quad k = 1, \dots, i \quad (61)$$

گام-۲: برای هر سناریو  $n$  زیرمسائل شامل عبارات (۴۳) الی (۴۸) حل می‌شوند. با ثابت در نظر گرفتن متغیرهای مرحله اول  $(z_i)$ ، مقدار تابع هدف با توجه به مقدار متغیرهای  $w_i$  و  $z_i$  برآورد می‌شود:

$$\hat{f}_N(z_i, w_i) = c_1^T z_i + c_2^T w_i + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Q(z_i, \xi^n) \quad (62)$$

اگر  $\hat{f}_N(z_i, w_i) < UB$  باشد، سپس  $UB = \hat{f}_N(z_i, w_i)$ ،  $\hat{Z} = z_i$ ،  $\hat{W} = w_i$

با استفاده از مجموعه راه‌کارهای ابتکاری ذکر شده در فوق، حداقل ۲۰ جواب شدنی ایجاد می‌شود. این روش‌های ابتکاری تولید جواب‌های خوب را تضمین نمی‌کنند. از این رو، ۱۰ مورد از بهترین جواب‌ها انتخاب و برش‌های مربوط به آن‌ها ایجاد می‌شوند. یکی از دلایل استفاده از روش‌های متفاوت برای تولید جواب‌های شدنی، ایجاد یک نقطه مرکزی برای برش‌های قدرتمند است. علاوه بر برش‌های ایجاد شده، شاهد آن هستیم که در تکرارهای آغازین، بسیاری از مراکز توزیع را از تصمیم‌گیری خارج می‌شوند. دلیل این رویداد را می‌توان در هزینه جریمه بالا در زیرمسائل دانست که منجر به یک فاصله زیاد تا نقطه بهینه می‌شود که در اغلب موارد این جواب‌ها منجر به برش‌های ناکارآمد خواهند شد. از این رو، یک محدودیت برش به مساله اصلی به صورت ذیل اضافه می‌شود:

$$\sum_{i \in D_k, j \in C_E} z_{ji} \times CAP_j^p \geq \bar{D}_k^p \quad p \in P, k \in K \quad (65)$$

علاوه بر آن، نیازمند جوابی هستیم که حداقل متوسط تقاضا را پاسخگو باشد. زیرمدل شامل عبارات (۴۳) الی (۴۸) در واقع یک مدل حمل‌ونقل است که در پایه بهینه تهبگن است. از این رو، جواب بهینه چندگانه برای متغیرهای دوگان خواهیم داشت. جواب‌های دوگان متعدد مجموعه‌ای از انتخاب‌ها برای برش‌ها با قدرت‌های مختلف را به همراه خواهند داشت. تمامی این برش‌ها معتبر بوده اما برخی از آن‌ها می‌توانند توسط دیگران مغلوب شوند. برش  $\alpha$  می‌تواند توسط برش  $\beta$  مغلوب شود اگر برش  $\beta$  بتواند تقریب بهتری برای جواب بهینه  $z^*$  ایجاد نماید. در ادبیات موضوع نشان داده شده است که اگر یک برش به نحوی انتخاب شود که حداکثر مقدار را در نقطه مرکزی (هسته) ایجاد نماید، این برش نمی‌تواند توسط برش‌های دیگر مغلوب شود [۳۸]. در این مقاله از بهترین جواب‌های شدنی ایجاد شده توسط الگوریتم‌های ابتکاری مبتنی بر اولویت‌بندی تخصیص برای ایجاد نقطه مرکزی استفاده شده است. شکل ۲، نمودار الگوریتم تجزیه شتاب‌یافته را نشان می‌دهد. برش‌ها از جواب‌های آغازین خوب ایجاد می‌شوند و همچنین

بهینه باشد. از این رو نیاز است تا بر روی عدم کارایی الگوریتم تمرکز شود. برای این منظور از یک روش ابتکاری ساده اما کارا برای ایجاد جواب شدنی اولیه استفاده شده است که به‌نوبه خود منجر به ایجاد برش‌های خوب خواهد شد. علاوه بر آن، محدودیت تقاضا به مساله اصلی اضافه شده است تا مانع از ایجاد جواب‌ها با جریمه کمبود زیاد و درنهایت یک فاصله زیاد تا نقطه بهینه شد. این اقدامات سبب بهبود همگرایی در تکرارهای آغازین الگوریتم تجزیه بندرز خواهد شد. علاوه بر آن، یک نقطه مرکزی خوب با استفاده از جواب‌های شدنی الگوریتم ابتکاری آغازین به‌منظور قدرت بخشیدن به برش‌های بهینه ایجاد شده است.

رویکرد مدنظر برای بهبود در تکرارهای نامؤثر آغازین، اضافه نمودن برش‌های خوب در آن تکرارها است. این برش‌های خوب، یک تقریب مناسب برای تابع غیرخطی ارائه نموده و حد پایین بهتری را ایجاد می‌نمایند. برش‌های خوب منجر به جواب‌های خوب خواهند شد و جواب‌های خوب منجر به برش‌های بهتر خواهند شد. برای این منظور از روش‌های ابتکاری مبتنی بر اولویت‌بندی تخصیص [۱۴] به شرح ذیل استفاده می‌شود.

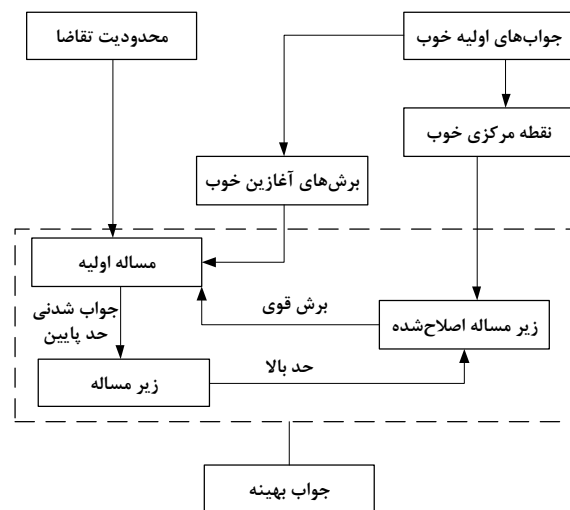
(۱) مجموعه‌ای از اعداد تصادفی به گره‌های تأمین تخصیص داده می‌شود. سپس هر گره با بالاترین اولویت برای تخصیص تقاضا با توجه به ماتریس هزینه حمل‌ونقل مابین گره تأمین و تقاضا انتخاب می‌شود. توقف تخصیص وابسته به رسیدن به حداکثر ظرفیت گره تأمین و یا ارضای تقاضای گره تقاضا است. در صورت رسیدن به حداکثر ظرفیت گره تأمین، گره تأمین بعدی با بالاترین اولویت انتخاب می‌شود. این فرایند تا پاسخگویی به حداکثر تقاضای ممکن ادامه خواهد یافت.

(۲) در این حالت، گره تقاضا با بالاترین اولویت انتخاب شده و تخصیص داده می‌شود که به گره تأمین با کمترین هزینه به میزان حداقل ظرفیت گره تأمین و تقاضای گره تقاضا. سپس اولویت هر دو گره صفر شده و گره بعدی با بالاترین اولویت انتخاب می‌شود. این فرایند تا تأمین حداکثر تقاضای ممکن ادامه خواهد یافت.

زنجیره موردبررسی کاهش خواهد یافت. در مرحله نخست، نیاز به راه‌اندازی مجموعه‌ای از مراکز جمع‌آوری و احیا است. پس‌از آن، مشتریان محصولات را به خرده‌فروشان تحویل می‌دهند. محصولات برگشتی توسط خرده‌فروشان دریافت شده و به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌شوند. تسهیلات توزیع فعلی نمی‌توانند به‌عنوان تسهیلات جمع‌آوری در نظر گرفته شوند، زیرا ظرفیت آن‌ها محدود بوده و درعین حال شاهد افزایش در میزان تقاضا پس از در نظر گرفتن امکان برگشت محصولات در زنجیره تأمین خواهیم بود. از این‌رو ظرفیت مراکز احیا مهم بوده و نیاز است تا پیرامون ظرفیت آن‌ها با هدف مدیریت بهینه منابع و اجتناب از در نظر گرفتن ظرفیت اضافی، تصمیم‌گیری شود. با توجه به ارزش بالای زمین در کشور موردبررسی، مدیران زنجیره تأمین ترجیح می‌دهند تا از انبارهای فعلی خود به‌عنوان مراکز جمع‌آوری استفاده نمایند. از این‌رو مکان‌های کاندید عبارت‌اند از انبارهای موجود که در نقاط مختلف کشور پراکنده شده‌اند. هر خرده‌فروش به‌عنوان یک مشتری در نظر گرفته می‌شود که تقاضای خاص خود را برای هر محصول دارد. تقاضای خرده‌فروشان و مکان آن‌ها نقش مهمی را در تعیین مکان تسهیلات احیا و مراکز جمع‌آوری ایفا می‌نماید. میزان برگشت محصولات کسری از میزان تقاضای پاسخ‌داده شده مشتریان خواهد بود. با توجه به آن‌که میزان تقاضای مشتریان در طی زمان تغییر می‌کند، شرکت نیازمند آن است تا برنامه‌ریزی خود را برای چند دوره زمانی و یک افق مشخص انجام دهد تا تغییرات و نوسانات تقاضا را در نظر بگیرد. خروجی نهایی این تحلیل در نهایت میزان سرمایه‌گذاری در بخش زیرساخت‌های زنجیره تأمین برگشتی را تعیین خواهد نمود.

با توجه به آن‌که میزان تقاضای مشتریان برای دریافت محصولات جدید پس از پیاده‌سازی سیستم جدید مدیریت جریان برگشتی افزایش خواهد یافت و استفاده از مراکز توزیع برای توزیع محصولات احیاشده و نو، نیاز به تحلیل توسعه ظرفیت در مراکز توزیع دارد. لازم به ذکر است که راه‌اندازی یک مرکز توزیع جدید نیاز به هزینه و

محدودیت تقاضا به مساله اصلی اضافه می‌شود که در نهایت منجر به ارائه یک تقریب بهتر از تابع غیرخطی  $N^{-1} \sum_{n=1}^N Q(z, \xi^n)$  خواهند شد. علاوه بر آن، جواب‌های بهتر اولیه ایجاد شده توسط الگوریتم‌های ابتکاری، با یکدیگر جهت ایجاد یک نقطه مرکزی مناسب و نزدیک‌تر به جواب بهینه ترکیب می‌شوند.



شکل ۲- نمای کلی از الگوریتم تجزیه بندرز شتاب‌یافته

## ۵- نمونه موردی

مساله موردبررسی در این مقاله متعلق به یک زنجیره تأمین تلفن همراه است که مجموعه‌ای متنوع از انواع گوشی تلفن همراه، همدست و دیگر قطعات جانبی آن‌ها را تولید می‌نماید. در این زنجیره امکان برگشت محصولات از سوی مشتریان به خرده‌فروشان تا یک مدت‌زمان مشخص پس از خرید وجود داشته و خرده‌فروشان محصولات جمع‌آوری شده را به تولیدکننده ارسال می‌نمایند. تولیدکننده موردبررسی همچنان در مرحله معرفی و رشد از دوره عمر خود قرار داشته و نیازمند است تا تأثیر استراتژی‌های گوناگون را از نظر تحلیل منفعت و هزینه، مورد ارزیابی قرار دهد. در حال حاضر هیچ نوع قانون مدیریت ضایعات توسط دولت و دیگر نهادهای قانونی در کشور موردبررسی اعمال نمی‌شود. با این‌وجود مدیران زنجیره تأمین بر آن باور هستند که مدیریت جریان برگشتی محصولات می‌تواند منافع مادی و غیرمادی متنوعی را برای آنان به همراه داشته باشد و علاوه بر آن در صورت اعمال قوانین جدید نظارتی، میزان ریسک

شامل هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه ثابت راه‌اندازی تسهیلات، هزینه توسعه ظرفیت و موارد مشابه دیگر با توجه به اطلاعات مالی برآورد شده است.

جدول ۲- تابع توزیع پارامترهای تقاضا و نرخ برگشت

	گوشی تلفن همراه		هدست	
	نرخ برگشت	تقاضا	نرخ برگشت	تقاضا
t1r1	۰/۱۸	$N(۳۵۰, ۵۰)$	۰/۲۲	$N(۱۵۰, ۳۰)$
t1r2	۰/۱۶	$N(۴۰۰, ۴۰)$	۰/۲	$N(۲۵۰, ۳۵)$
t2r1	۰/۱۶	$N(۴۰۰, ۴۰)$	۰/۱۴	$N(۱۸۰, ۳۰)$
t2r2	۰/۰۹	$N(۴۲۰, ۵۰)$	۰/۱	$N(۱۲۷, ۴۰)$
t3r1	۰/۰۸	$N(۲۵۰, ۲۸)$	۰/۱۲	$N(۱۱۰, ۲۰)$
t3r2	۰/۴	$N(۳۱۵, ۴۰)$	۰/۳۹	$N(۱۵۰, ۳۰)$

## ۶- نتایج محاسباتی

### ۶-۱- ارزیابی عملکرد الگوریتم تجزیه ارائه‌شده

پیش ارائه نتایج حل مساله موردی، از الگوریتم تجزیه بندرز شتاب‌یافته برای حل مسائل نمونه جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم حل از نظر زمان محاسبه استفاده شده است. ابعاد مسائل نمونه، مقدار بهینه تابع هدف، زمان محاسباتی الگوریتم تجزیه بندرز و زمان محاسباتی صرف شده توسط نرم‌افزار گمز ۳، ۱، ۲۴ در جداول ۴ و ۵ نمایش داده شده است. الگوریتم تجزیه بندرز توانسته است زمان محاسباتی مسائل نمونه را بهبود دهد. با توجه به نتایج جدول ۴ مشاهده می‌شود که زمان محاسباتی مسائل نمونه به میزان ۵۵/۶۸ بهبود یافته است. در جداول ۵ و ۶، عملکرد الگوریتم تجزیه بندرز شتاب‌یافته با الگوریتم بندرز معمولی مقایسه شده است. نتایج حاکی از همگرایی بهتر الگوریتم بندرز شتاب‌یافته است. جدول ۵ نشان می‌دهد که الگوریتم بندرز شتاب‌یافته با فاصله کمتری نسبت به نقطه بهینه جستجوی خود را آغاز می‌کند که نشان از عملکرد مناسب برش‌های اولیه و محدودیت تقاضای اضافه‌شده دارد. همچنین تعداد کل تکرارها در جدول ۶ مقایسه شده است. ارزیابی کیفیت جواب‌های برنامه‌ریزی تصادفی با مساله قطعی نیز در جدول ۷ برای مساله با ابعاد بزرگ (مساله نمونه ۵) انجام شده است. انحراف معیارهای استاندارد برای

سرمایه‌گذاری بالاتری نسبت به توسعه ظرفیت یک تسهیل خواهد داشت. بخش مشخصی از محصولات برگشتی معیوب بوده و قابل استفاده مجدد نخواهند بود. در نتیجه، نیاز است تا یک نرخ مشخص برای هر محصول به‌عنوان نرخ امحا در نظر گرفته شود. تعیین نرخ امحا نقش معناداری در ظرفیت تسهیل احیا خواهد داشت. با توجه به نظر پنج نفر از خبرنگاران بازاریابی، نرخ برگشت محصولات به‌طور متوسط برابر با پنج درصد در نظر گرفته شده است. سایر محصولات برگشتی اگرچه معیوب هستند اما دارای قطعاتی هستند که می‌توانند به‌صورت مجدد به کار گرفته شوند. در تلاش نخست به‌منظور دریافت بازخورد از بازار، شرکت تصمیم گرفته است تا به مشتریان خود اجازه دهد تا دو نوع از محصولات خود را برگشت دهند که دارای تقاضای وابسته به هم هستند. این دو نوع محصول عبارت‌اند از یک نوع گوشی خاص و هدست مخصوص آن. با توجه به مشخصات محصولات و ظرفیت محدود تسهیلات احیا، هر محصول به یک تسهیل احیا معین تخصیص خواهد یافت. با توجه به آن‌که مکان‌های بالقوه برای تسهیلات احیا در شهرهای کوچک در نزدیکی مراکز توزیع قرار دارند، زیرساخت کافی و منابع انسانی محلی در دسترس برای احیا هر دو محصول در یک تسهیل وجود ندارد.

### ۵-۱- داده‌ها

شرکت دارای یک سایت تولید محصولات جدید بوده و محصولات خود را به مجموعه‌ای از خرده‌فروش از طریق مراکز توزیع به فروش می‌رساند. هر خرده‌فروش مواجه است با یک تابع توزیع تقاضای مشخص برای هر نوع محصول. خرده‌فروشان در مکان‌های مختلف پراکنده شده‌اند و هر کدام دارای مشتریان خاص خود و با یک رفتار مشخص از تقاضا هستند (جدول ۳). با استفاده از اطلاعات سوابق فروش خرده‌فروشان، تقاضای خرده‌فروشان را می‌توان به تابع توزیع نرمال تقریب زد. با توجه به مطالعات بازار انجام‌شده، نرخ برگشت محصولات با همبستگی ۰/۴ با میزان فروش برآورد شده است. تمامی پارامترهای هزینه‌ای

حد بالا و پايين مساله تصميم‌گيرى در تکرار ۳۱م به يکديگر همگرا شده‌اند. زمان حل مساله برابر با ۷۳ ثانيه اعلام شده است. با توجه به نتيجه اعتبارسنجى مى‌توان دريافت نمود که مدل و روش حل ارائه‌شده برای مدل طراحى شبکه زنجيره تأمين حلقه بسته جهت حل مساله در ابعاد بزرگ‌تر نيز کارآمد خواهد بود.

جدول ۳- ابعاد مسائل نمونه

ابعاد مساله	نمونه موردی	مساله				
		۵	۴	۳	۲	۱
		[I]	۴۰	۳۰	۳۰	۲۰
[T]	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۳
[P]	۱۵	۱۵	۱۰	۱۰	۵	۱
[C]	۱۰	۸	۶	۴	۲	۲
[N]	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۵
[J]	۳۰	۳۰	۳۰	۲۰	۲۰	۲۰
[K]	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۲۰
[S]						۱۰۰۰

جدول ۵- مقايسه همگرایی بندرز شتاب‌يافته و معمولی (حل مساله ابعاد بزرگ- نمونه ۵)

الگوریتم	تکرار تا رسيدن به فاصله ۱۰ درصد	تکرار تا رسيدن به فاصله ۱ درصد
بندرز معمولی	۱۰۱	۱۶۰
بندرز شتاب‌يافته	۳	۱۳

جدول ۶- مقايسه تعداد کل تکرارها (حل مساله نمونه ۵)

	بندرز شتاب‌يافته	بندرز معمولی
تکرار کل	۱۶	۷۳

پارامترهای تقاضا، نرخ برگشت و امحا و هزینه‌های عملیاتی به ترتیب ۲۰، ۱۰ و ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است. برای مساله برنامه‌ریزی تصادفی، سه عدد از بهترین جواب‌های ایجادشده (رتبه ۱ الی ۳) برای محاسبه آماره‌ها انتخاب شده‌اند. نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که جواب‌های حاصل از برنامه‌ریزی تصادفی به نحو معناداری از متوسط هزینه کمتری برخوردار هستند. سطر ۲ جدول ۷ نشان می‌دهد که بدترین حالت برنامه‌ریزی تصادفی دارای وضعیت بسیار بهتری نسبت به بدترین وضعیت برنامه‌ریزی قطعی است. همچنین سطر سوم نشان می‌دهد که در بهترین حالت ممکن، تفاوت معناداری مابین عملکرد این دو الگوریتم وجود ندارد. سطر پنجم نشان می‌دهد که پراکنده‌گی جواب‌های برنامه‌ریزی قطعی بیشتر از برنامه‌ریزی تصادفی است. سطرهای ۶ و ۷ نیز نشان می‌دهند که فاصله و انحراف استاندارد جواب‌های برنامه‌ریزی تصادفی بسیار محدودتر نسبت به مساله قطعی است.

### ۲-۶- نتایج حل مساله نمونه موردی

اندازه مساله نمونه موردبررسی پیش‌ازاین در جدول ۳ نمایش داده شده است. جدول ۸ حد بالا و پايين در هر مرحله از حل مدل را با استفاده از الگوریتم تجزیه بندرز را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود،

جدول ۴- بررسی عملکرد الگوریتم تجزیه بندرز

مساله	بهبود (درصد)	زمان (گمز)	زمان (بندرز)	تکرار (بندرز)	مقدار تابع هدف
نمونه موردی	۶۶/۵۶	۰:۲۱:۳۵	۰:۷:۱۳	۳۱	۱۰۴۱۵۸۹۸۳
۱	۵۲/۹۳	۰:۲۹:۱۷	۰:۱۳:۴۷	۱۳	۱۲۰۹۸۹۶۵۸
۲	۵۳/۹۷	۰:۳۸:۱۲	۰:۱۷:۳۵	۱۹	۱۴۳۸۵۴۶۶۲
۳	۵۴/۳۵	۰:۵۱:۰۵	۰:۲۳:۱۹	۵۳	۱۷۳۰۴۵۳۴۸
۴	۵۵/۹۵	۱:۰۱:۳۲	۰:۲۷:۰۶	۵۴	۱۹۴۵۳۹۳۹۱
۵	۵۷/۵۰	۱:۱۹:۱۸	۰:۳۳:۴۲	۷۳	۲۷۵۵۰۳۲۸۹۳

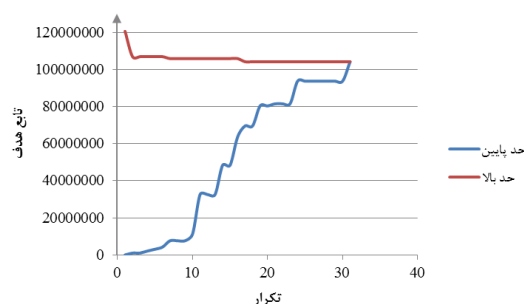
جدول ۷- مقایسه کیفیت جواب‌های برنامه‌ریزی تصادفی و قطعی

آماره‌ها	جواب قطعی	جواب احتمالی ۱	جواب احتمالی ۲	جواب احتمالی ۳
متوسط	۳۲۳۳۳۸۸۴۸۴	۲۷۵۵۱۱۰۳۴۸	۲۷۵۵۰۹۲۶۵۸	۲۷۵۵۱۰۳۹۶۷
حداکثر	۴۵۷۷۲۱۱۶۴۷	۳۵۰۷۸۰۶۴۹۵	۳۵۶۳۴۳۶۸۴۴	۳۵۴۳۰۶۳۷۰۲
حداقل	۲۲۵۹۵۹۵۳۲۷	۲۲۹۸۳۱۳۰۵۲	۲۲۸۷۰۰۲۴۱۵	۲۲۵۹۱۸۵۲۵۳
دامنه	۲۳۱۷۶۱۶۳۲۰	۱۲۰۹۴۹۳۴۴۳	۱۲۷۶۴۳۴۴۲۸	۱۲۸۳۸۷۸۴۴۹
انحراف استاندارد	۱۰۶۷۴۳۸۴۵۲	۳۵۵۸۱۲۸۱۷	۳۲۶۸۵۴۵۶۸	۳۴۳۵۶۰۹۳۰
فاصله	۱۰/۱۲	۱/۳۱	۰/۹۵	۱/۰۴
انحراف استاندارد فاصله	۱/۱۳	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۹۵

جدول ۸- حد بالا و پایین در الگوریتم تجزیه بندرز

تکرار	حد پایین	تکرار	حد بالا	تکرار	حد پایین
۱	-∞	۱۷	۱۲۰۵۷۴۴۳۸٫۷	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۶۹٫۵۲۳٫۶۵۹
۲	۹۹۶٫۷۷۹	۱۸	۱۰۶٫۸۶۳٫۳۸۶	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۶۹٫۵۲۳٫۶۵۹
۳	۱۰۰۳۱٫۱۶۶	۱۹	۱۰۶٫۸۶۳٫۳۸۶	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۸۰٫۳۱۷٫۹۶۳
۴	۲۰۱۰۷٫۱۲۳	۲۰	۱۰۶٫۸۶۳٫۳۸۶	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۸۰٫۳۱۷٫۹۶۳
۵	۳۰۰۷۴٫۵۸۲	۲۱	۱۰۶٫۸۶۳٫۳۸۶	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۸۱٫۴۵۶٫۹۷۱
۶	۴۰۲۵۱٫۲۸۳	۲۲	۱۰۶٫۸۶۳٫۳۸۶	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۸۱٫۴۵۶٫۹۷۱
۷	۷٫۶۳۱٫۷۹۴	۲۳	۱۰۵٫۸۵۰٫۷۴۴	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۸۱٫۴۵۶٫۹۷۱
۸	۷٫۶۳۱٫۷۹۴	۲۴	۱۰۵٫۸۵۰٫۷۴۴	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۹۳٫۶۷۲٫۸۱۹
۹	۷٫۶۳۱٫۷۹۴	۲۵	۱۰۵٫۸۵۰٫۷۴۴	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۹۳٫۶۷۲٫۸۱۹
۱۰	۱۱٫۲۷۳٫۳۴۸	۲۶	۱۰۵٫۸۵۰٫۷۴۴	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۹۳٫۶۷۲٫۸۱۹
۱۱	۳۲٫۵۴۷٫۲۳۹	۲۷	۱۰۵٫۸۵۰٫۷۴۴	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۹۳٫۶۷۲٫۸۱۹
۱۲	۳۲٫۵۴۷٫۲۳۹	۲۸	۱۰۵٫۸۵۰٫۷۴۴	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۹۳٫۶۷۲٫۸۱۹
۱۳	۳۲٫۵۴۷٫۲۳۹	۲۹	۱۰۵٫۸۵۰٫۷۴۴	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۹۳٫۶۷۲٫۸۱۹
۱۴	۴۸٫۳۱۹٫۳۲۸	۳۰	۱۰۵٫۸۵۰٫۷۴۴	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۹۳٫۶۷۲٫۸۱۹
۱۵	۴۸٫۳۱۹٫۳۲۸	۳۱	۱۰۵٫۸۵۰٫۷۴۴	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳	۱۰۴٫۱۵۸٫۹۸۳
۱۶	۶۳٫۵۲۷٫۱۱۴	-	۱۰۵٫۸۵۰٫۷۴۴	-	-

ارائه شده است. تعیین مکان تسهیلات و ظرفیت آن‌ها با هدف دستیابی به حداقل هزینه کل مدیریت زنجیره تأمین انجام خواهد شد. در سطح عملیاتی نیز مدیریت جریان مابین تسهیلات و سطح موجودی آن‌ها انجام می‌شود. مدل ارائه شده با توجه به نمونه موردی بررسی شده قابل انطباق با فضای تصمیم‌گیری در عمده صنایع تولیدکننده تجهیزات الکترونیک خواهد بود. با توجه به ماهیت حل مساله طراحی شبکه که دارای پیچیدگی‌های زیاد است، از یک رویکرد مبتنی بر الگوریتم تجزیه بندرز شتاب‌یافته جدید برای حل مدل ارائه شده است. همچنین با استفاده از رویکرد میانگین تقریب نمونه، تعداد سناریوهای در نظر گرفته شده برای حل مساله کاهش یافته است. نتایج حل حاکی از کارایی



شکل ۳- نمودار همگرایی حد بالا و پایین

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دو مرحله‌ای برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند دوره‌ای و چند محصولی تحت عدم قطعیت پارامترهای تقاضا، میزان برگشت و مجموعه هزینه‌های عملیاتی



محصولات نیز تحت تأثیر کیفیت آن‌ها خواهد بود. قیمت‌گذاری محصولات بر مزیت رقابتی زنجیره تأمین تأثیر می‌گذارد. در نتیجه لحاظ نمودن فضای رقابتی می‌تواند به عنوان فرصت تحقیقاتی دیگر معرفی شود. توسعه روش حل کارا با افزایش پیچیدگی‌های مدل و افزایش ابعاد آن مبتنی بر بهبود الگوریتم تجزیه بندرز جهت دستیابی به همگرایی بهتر و همچنین الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مساله در ابعاد بسیار بزرگ می‌تواند به عنوان دیگر فرصت تحقیقات آتی برای علاقه‌مندان معرفی شود.

الگوریتم تجزیه بندرز شتاب‌یافته برای حل مدل پیشنهاد شده از زمان حل و کیفیت جواب است. همچنین جواب‌های حاصل از مدل تصادفی از استواری بهتری نسبت به جواب‌های حل مدل قطعی برخوردار هستند. به عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آتی می‌توان لحاظ نمودن تصمیم‌گیری‌های محصولات به عنوان یک عامل مهم در جذب تقاضا و ایجاد انگیزه در مشتریان برای ارائه محصولات به زنجیره تأمین را معرفی نمود. همچنین با توجه به عدم قطعیت کیفیت محصولات برگشتی، قیمت‌گذاری

## ۸- مراجع

- [1] Govindan, K., H. Soleimani, Kannan, D. (2015). "Reverse Logistics and Closed-Loop Supply Chain: A Comprehensive Review To Explore The Future". *European Journal of Operational Research*, Vol 240, pp. 603–626.
- [2] Eskandarpour, M., Masehian, E., Soltani, R., Khosrojerdi, A., (2014). "A Reverse Logistics Network For Recovery Systems and A Robust Metaheuristic Solution Approach". *Int J Adv Manuf Technol*, Vol 74, pp. 1393–1406.
- [۳] حسینی، ع.، حسینی، م.، (۱۳۹۴). "ارائه یک مدل جامع استوار دوهدفه و الگوریتم ممتیک برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی تحت شرایط عدم قطعیت". چشم‌انداز مدیریت صنعتی، شماره ۱۴، صفحه ۳۲–۹.
- [4] Hasani, A., Zegordi, S.H., Nikbakhsh, E. (2012). "Robust Closed-Loop Supply Chain Network Design For Perishable Goods in Agile Manufacturing Under Uncertainty". *International Journal of Production Economics*, Vol 50 (16), pp. 4649-4669.
- [5] Eskandarpour, M., Zegordi, S.H., Nikbakhsh, E. (2013). "A parallel multi-objective variable neighborhood search for the sustainable post-sales network design". *International Journal of Production Economics*, Vol 145 (1), pp. 117-131.
- [6] Amin, S.H., Zhang, G. (2013). "A Multi-Objective Facility Location Model For Closed-Loop Supply Chain Network Under Uncertain Demand and Return". *Appl. Math. Model.*, Vol 37, pp. 4165–4176.
- [7] Hasani, A., Zegordi, S.H., Nikbakhsh, E. (2015). "Robust Closed-Loop Global Supply Chain Network Design Under Uncertainty: The Case of The Medical Device Industry". *International Journal of Production Research*, Vol 53 (5), pp. 1596-1624.
- [8] Zegordi, S.H., Hasani, A. (2015). "A Robust Competitive Global Supply Chain Network Design under Disruption: The Case of Medical Device Industry". *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*, Vol 26 (1), 63-84.
- [9] Khatami, M., Mahootchi, M., Zanjirani Farahani, R. (2015). "Benders' Decomposition For Concurrent Redesign of Forward and Closed-Loop Supply Chain Network With Demand and Return Uncertainties". *Transportation Research Part E*, Vol 79, pp. 1–21.
- [10] Meade, L., Sarkis, J., Presley, A. (2007). "The Theory And Practice of Reverse Logistics". *Int J Logist Syst Manag*, Vol 3 (1), pp. 56–84.
- [11] Aras, N., Aksen, D. (2008). "Locating Collection Centers For Distance And Incentive Dependent Returns". *Int J Prod Econ*, Vol 111 (2), pp. 316–333.
- [12] Gou, Q., Liang, L., Huang, Z., Xu, C. (2008). "A Joint Inventory Model For An Open-Loop Reverse Supply Chain". *Int J Prod Econ*, Vol 116 (1), pp. 28–42.
- [13] Kim, H., Yang, J., Lee, K. (2009). "Vehicle Routing In Reverse Logistics For Recycling End-Of-Life Consumer Electronic Goods In South Korea". *Transp Res D*, Vol 14(5), pp. 291–299.

- [14] Eskandarpour, M., Nikbakhsh, E., Zegordi, S.H. (2014). "Variable Neighborhood Search For The Bi-Objective Post-Sales Network Design Problem: A Fitness Landscape Analysis Approach". *Computers & Operations Research*, Vol 52, pp. 300-314.
- [15] Kannana, G., Pokharel, S., Kumarc, P. (2009). "A Hybrid Approach Using Ism And Fuzzy Topsis For The Selection of Reverse Logistics Provider". *Resour Conserv Recycl*, Vol 54(1), pp. 28–36.
- [16] Liang, Y., Pokharel, S., Lim, G. (2009). "Pricing Used Products For Remanufacturing". *Eur J Oper Res*, Vol 193(2), pp. 390–395.
- [17] Das, D., Dutta, P. (2013) "Simulation Study of an Integrated Reverse Logistics in Fuzzy Environment", in In IAENG transactions on engineering technologies. Springer: Netherlands. pp. 151–165.
- [18] Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Wassenhove, L.V. (2001). "The Impact of Product Recovery on Logistics Network Design". *Prod. Oper. Manage*, Vol 10, pp. 156–173.
- [19] Cordeau, J.F., Pasin, F., Solomon, M.M. (2006). "An Integrated Model For Logistics Network Design". *Ann. Oper. Res.*, Vol 144, pp. 59–82.
- [20] Alumur, S.A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Verter, V. (2012). "Multi-Period Reverse Logistics Network Design". *Eur. J. Oper. Res.*, Vol 220, pp. 67-78.
- [21] Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L., Karaoglan, I., (2008). "A Steady-State Genetic Algorithm For Multi-Product Supply Chain Network Design". *Computers & Industrial Engineering*, Vol 56, pp. 521-537.
- [22] You, F., Grossmann, I.E. (2011) "Multicut Benders' Decomposition Algorithm For Process Supply Chain Planning Under Uncertainty". *Ann. Oper. Res.*, Vol 198, pp. 312–340.
- [23] Salema, M.I., Póvoa, A.P.B., Novais, A.Q. (2006). "A Warehouse-Based Design Model For Reverse Logistics". *J. Oper. Res. Soc.*, Vol 57, pp. 615–629.
- [24] El-Sayed, M., Afia, N., El-Kharbotly, A. (2010). "A Stochastic Model For Forward–Reverse Logistics Network Design Under Risk". *Comput. Ind. Eng.*, Vol 58, pp. 423–431.
- [25] Vahdani, B., Razmi, J., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2012). "Fuzzy Possibilistic Modeling For Closed Loop Recycling Collection Networks". *Environ. Model. Assess*, Vol 17, 623–637.
- [26] Listes, O., (2007). "A Generic Stochastic Model For Supply-And-Return Network Design". *Comput. Oper. Res.*, Vol 34, pp. 417–442.
- [27] Roghanian, E., Pazhoheshfar, P. (2014). "An Optimization Model For Reverse Logistics Network Under Stochastic Environment By Using Genetic Algorithm". *Journal of Manufacturing Systems*, Vol 33, pp. 348–356.
- [28] Wang, H.F., Hsu, W.H. (2010). "A Closed-Loop Logistic Model With A Spanning-Tree Based Genetic Algorithm". *Computers & Operations Research*, Vol 37(2), pp. 376-389.
- [29] Lee, J.E., Gen, M., Rhee, K.G. "Network Model and Optimization of Reverse Logistics By Hybrid Genetic Algorithm. *Comput Ind Eng*, Vol 56, pp. 951–64.
- [30] Du, F., Evans, G.W. (2008). "A Bi-Objective Reverse Logistics Network Analysis For Post-Sale Service". *Comput Oper Res*, Vol 35, pp. 2617–34.
- [31] Min, H., Ko, H.J., Ko, C.S. (2006). "A Genetic Algorithm Approach To Developing The Multiechelon Reverse Logistics Network For Product Returns". *Omega*, Vol 34, pp. 56–69.
- [32]. Birge, J.R., Louveaux, F. (1997). "Introduction to Stochastic Programming". New York: Springer.
- [33] Ruszczyński, A., Shapiro, A. (2003). "Stochastic programming models. In: Ruszczyński, A., Shapiro, A. (Eds.), *Stochastic Programming*", *Handbooks in OR & MS*, vol 10, Elsevier Science.
- [34] Shapiro, A., Homem de Mello, T. (1998). "A Simulation-Based Approach To Stochastic Programming With Recourse". *Mathematical Programming*, Vol 81, pp. 301–325.
- [35] Kleywegt, A.J., Shapiro, A., Homem-De-Mello, T. (2001). "The Sample Average Approximation Method For Stochastic Discrete Optimization". *SIAM Journal of Optimization*, Vol 12, pp. 479–502.
- [36] Davis, P.S., Ray, T.L. (1969). "A Branch-And-Bound Algorithm For The Capacitated Facilities Location Problem". *Naval Research Logistics*, Vol 16, pp. 331–344.
- [37] Benders, J.F., (1962). "Partitioning Procedures for Solving Mixed Variables Programming Problems". *Numersiche Mathematik*, Vol 4, pp. 238–252.
- [38] Magnanti, T.L., Wong, R.T. (1981). "Accelerating Benders Decomposition: Algorithmic Enhancement and Model Selection Criteria". *Operations Research*, Vol 29(3), pp. 464–484.