

# مدل شبکه‌ی لجستیک معکوس چند محصولی - چندسطحی در شرایط احتمالی

راهله ایرجی (کارشناس ارشد)

سعیده غلامی\* (استادیار)

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، تابستان ۱۳۹۴  
دوری ۱ - ۳۱، شماره ۱، ص. ۶۳-۵۳

به منظور مدیریت جریان بازگشت محصول از شبکه‌ی لجستیک معکوس استفاده می‌شود. در این نوشتار یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح احتمالی شبکه‌ی لجستیک معکوس ارائه می‌شود، که یک چارچوب تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی معیارهای عملکرد هزینه و مجموع زمان‌های تأخیر است. در مدل پیشنهادی نرخ تقاضا و محصولات برگشتی احتمالی است، و چند محصول با سطوح کیفیت متفاوت از مراحل متفاوت زنجیره‌ی تأمین، مانند مراکز مشتریان، بازار ثانویه، مواد بازیافتی جمع‌آوری و بین سایر مراکز توزیع می‌شود. هرکدام از مراکز با توجه به سطوح کیفیت دارای چند سطح ظرفیت است. در نتیجه مدل پیشنهادی این نوشتار به مسائل واقعی شبیه‌تر است. برای تحلیل مدل چند مثال عددی با استفاده از نرم‌افزار GAMS به صورت دقیق حل شده است. با توجه به NP-Hard بودن مسئله، یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر NSGA-II توسعه یافته که برای تنظیم پارامترها، روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها به کار رفته است.

واژگان کلیدی: لجستیک معکوس احتمالی، برنامه‌ریزی عدد صحیح احتمالی، الگوریتم فراابتکاری.

## ۱. مقدمه

مقررات و قوانین بین‌المللی، و نیز قوانین حاکم بر مدیریت پسماندها باعث توجه روزافزون به بسیاری از مباحث نظیر کاهش زباله‌ها، و بازیافت مواد شده است. به همین دلیل اکثر واحدهای صنعتی در کنار شبکه‌ی لجستیک رو به جلو، شبکه‌ی لجستیک معکوس را نیز مد نظر قرار داده‌اند. یکی از مسائل مهم و استراتژیک در مدیریت زنجیره‌ی تأمین، پیکربندی شبکه‌ی لجستیک است که اثرات مهمی بر عملکرد کل زنجیره‌ی تأمین دارد. علاوه بر تعاریف سنتی موجود برای شبکه‌ی لجستیک، تعریف کامل‌تری برای لجستیک معکوس ارائه شده که عبارت است از: فرایند برنامه‌ریزی، اجرا، کنترل مؤثر و کارای جریان برگشتی، ذخیره کردن کالاهای ثانویه و ارائه‌ی گزارش به منظور افزایش تعداد کالای ارائه شده به مشتریان، بهبود کیفیت محصولات، و دفع مطلوب ضایعات.<sup>[۱]</sup> از شبکه‌ی لجستیک معکوس در صنایع و محصولات گوناگون نظیر: بازیافت وسایل برقی و الکترونیکی،<sup>[۲]</sup> بازیافت فرش،<sup>[۳]</sup> بازیافت کاغذهای باطله،<sup>[۴]</sup> جداسازی و پاک‌سازی شن و ماسه،<sup>[۵]</sup> بازیافت قطعات وسایل نقلیه<sup>[۶]</sup> و... استفاده شده است. لجستیک معکوس یک اصطلاح عام است که تمام عملیات مرتبط با مصرف مجدد کالا و مواد را در بر می‌گیرد. مدیریت شبکه‌ی لجستیک معکوس نیز می‌تواند به بهبود مدیریت توزیع و جمع‌آوری کالا و مواد منتهی شود.<sup>[۷]</sup> در واقع لجستیک معکوس به معنای فرایند

یکی از محدودیت‌هایی که در اکثر مدل‌های لجستیک معکوس وجود دارد، قطعی بودن پارامترهایی مانند تقاضا و محصولات برگشتی است. این در حالی است که طراحی و استقرار شبکه‌ی لجستیک یک تصمیم‌گیری استراتژیک است و پارامترهای مربوط به محیط کسب و کار (تقاضای مشتریان) قطعی نیستند و پارامترهایی مانند کمیت و کیفیت محصولات برگشتی نیز از بالاترین درجه عدم قطعیت برخوردارند. با توجه به این موضوع، در این نوشتار تقاضا و نرخ محصولات برگشتی به صورت احتمالی فرض شده است.

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۳/۱۳، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱/۱۵، پذیرش ۱۳۹۲/۲/۲۰.

rahil.iraji@yahoo.com  
s\_gholami@kntu.ac.ir

## ۲. مرور ادبیات

در مطالعات و بررسی‌های انجام شده درخصوص لجستیک معکوس، محققین و پژوهش‌گران برای لجستیک معکوس دو مدل طراحی و ارائه کرده‌اند:<sup>[۷]</sup>

-- مدل لجستیک معکوس<sup>۱</sup> (مدل مستقل):

-- مدل لجستیک معکوس و لجستیک رو به جلو (مدل لجستیک یکپارچه)<sup>۲</sup>.

مدل لجستیک معکوس تمام فعالیت‌های لجستیک را از مراکز مصرف در بر می‌گیرد، به طوری که محصولات برگشتی مجدداً به محصولات قابل استفاده تبدیل شود. مدل لجستیک یکپارچه، مدلی است که در آن جریان لجستیک معکوس و رو به جلو به طور همزمان در نظر گرفته می‌شود. اکثر مدل‌های ارائه شده از نوع مدل مستقل است و در چند سال اخیر مدلی از نوع مدل لجستیک یکپارچه ارائه شده است. مدل‌های مستقل را می‌توان به صورت مدل‌های حلقه‌بسته<sup>۳</sup> و حلقه‌باز<sup>۴</sup> طبقه‌بندی کرد. در مدل لجستیک حلقه‌بسته محصولات برگشتی برای تولید مجدد به تولیدکنندگان اولیه برگردانده می‌شود و در مدل لجستیک حلقه‌باز محصولات برگشتی به تولیدکنندگان اولیه برگردانده نمی‌شود و تأمین‌کنندگان جانبی (طرف سوم) عهده‌دار وظیفه‌ی تولید مجدد محصولات هستند.

فلایشمن یک مدل عمومی برای طراحی شبکه‌ی لجستیک معکوس پیشنهاد کرده است؛<sup>[۸]</sup> این مدل برای شبکه‌های جریان و تسهیلات، بدون محدودیت ظرفیت به صورت قطعی طراحی شده است؛ تولید محصولات نیز با استفاده از مواد و قطعات اولیه یا مواد بازیافتی انجام می‌شود. این مدل مرجعی برای بسیاری از تحقیقات بعدی است. سپس فلایشمن مدل خود را توسعه داد و مدل جدیدی با در نظر گرفتن گزینه‌های بازیافت محصولات از قبیل تعمیرات و ساخت مجدد ارائه کرد. او یک مدل عمومی مکان‌یابی تسهیلات براساس برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی<sup>۵</sup> برای شبکه‌ی لجستیک معکوس و رو به جلو ارائه کرد، و برای این که کل برگشتی‌ها از کل تولیدات تجاوز نکنند، محدودیت‌هایی در مدل در نظر گرفت.<sup>[۸]</sup> در ادامه سالما و همکاران نیز یک مدل عمومی برای شبکه‌ی لجستیک معکوس ارائه کردند، که در آن ظرفیت‌ها محدود، چندمحصولی، تقاضای محصولات برگشتی به صورت عدم اطمینان در نظر گرفته شده است.<sup>[۹]</sup> کتان و همکاران یک الگوریتم عمومی برای حل مدل زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته به صورت چنددوره‌یی - چندمحصولی حلقه‌بسته با هدف کمینه‌کردن کل هزینه - شامل هزینه‌های تدارکات، تولید، توزیع، موجودی، جمع‌آوری، انهدام، جداسازی قطعات و هزینه‌ی بازیافت - ارائه کردند، و مدل ارائه شده را در زمینه‌ی تولید باتری در کشور هند مورد بررسی قرار دادند.<sup>[۱۰]</sup> چلتن و همکاران مشکلات و مسائل لجستیک معکوس را برای صنایع خودروسازی در زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته در آلمان بررسی و فرمول‌بندی کردند. آنها در مطالعات‌شان از مراکز جمع‌آوری طرف سوم استفاده کردند و مفاهیم طراحی شبکه را برای جداسازی و پردازش مجدد قطعات ارزیابی کردند. همچنین به منظور کاهش هزینه پیشنهاد کردند که بازیافت توسط تولیدکننده انجام شود.<sup>[۱۱]</sup> ساپواسکن لجستیک حلقه‌بسته و لجستیک حلقه‌باز را برای جمع‌آوری محصولات برگشتی مقایسه کرد و به این نتیجه رسید که اگر تولیدکننده جمع‌آوری محصولات برگشتی را انجام دهد، مناسب‌تر و سودآورتر است.<sup>[۱۲]</sup> باروز و همکاران شبکه‌ی لجستیک معکوسی برای بازیافت شن و ماسه در کشور هلند طراحی کردند. در این مدل فرض شد که بازیافت شن و ماسه را تأمین‌کننده‌ی طرف سوم انجام می‌دهد، در نتیجه می‌توان این مدل را شبکه‌ی لجستیک معکوس حلقه‌باز در نظر گرفت. از مفروضات دیگر مدل دوسطحی بودن و محدود بودن ظرفیت تسهیلات است.<sup>[۱۳]</sup>

کرور و همکاران مسئله‌ی لجستیک معکوس را برای وسایل نقلیه که عمرشان<sup>۶</sup> به پایان رسیده بود، در کشور مکزیک مطالعه کردند. آنها در مطالعه‌ی خود از مراکز جمع‌آوری طرف سوم استفاده کردند و برای تعیین هزینه‌ها و جایگاه مراکز، فرض کردند مراکز حدود ۷۵٪، ۹۰٪ و ۱۰۰٪ از کل بازار مؤثرند.<sup>[۱۴]</sup> مین و کو یک مدل خطی آمیخته‌ی چندمحصولی - چنددوره‌یی با محدودیت ظرفیت تسهیلاتی ارائه کردند، و به منظور تخصیص و مکان‌یابی تسهیلات تعمیر و انبار در مورد تأمین‌کنندگان طرف سوم برنامه‌ریزی کردند.<sup>[۱۴]</sup> شیبه یک مدل جدید در قالب برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی برای بهینه‌سازی زیرساخت‌های طراحی و جریان شبکه‌ی لجستیک معکوس برای بازیافت تجهیزات الکترونیکی، با در نظر گرفتن وضعیت‌های متفاوت برای نرخ محصولات برگشتی و وضعیت عملیات ارائه کرد و هدف مدل پیشنهادی را بیشینه‌کردن سود قرار داد.<sup>[۱۵]</sup> دی یو و ایوانس مدل شبکه‌ی لجستیک مستقل چندمحصولی - چندسطحی را برای بهینه‌سازی دو هدف ارائه کردند؛ هدف نخست مانند اهداف سایر مدل‌های لجستیک، کمینه‌سازی هزینه کل و هدف دوم کمینه‌سازی زمان تأخیر است.<sup>[۱۶]</sup> در ادامه‌ی بررسی‌های صورت گرفته در زمینه‌ی لجستیک معکوس، در سال ۲۰۰۹ یک مدل احتمالی برای شبکه‌ی لجستیک یکپارچه ارائه شد؛ این مدل به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی ترکیبی برای یک شبکه‌ی لجستیک یکپارچه تک‌دوره‌یی - تک‌محصولی - چندمرحله‌یی است، که در آن مقدار و کیفیت محصولات برگشتی، تقاضا و هزینه‌ها غیر قطعی هستند.<sup>[۱۷]</sup> در سال ۲۰۱۰ نیز مدل دیگری ارائه شد که تابع هدف آن مشتمل است بر: افزایش قدرت پاسخ‌گویی و کاهش هزینه‌ها. شبکه‌ی لجستیک معکوس رو به جلو که در این مدل بررسی شده یک شبکه‌ی لجستیک چندمرحله‌یی شامل مراکز تولید، توزیع، مشتریان، جمع‌آوری/بازرسی، بازیافت و مراکز انهدام چندین سطح ظرفیت است.<sup>[۱۸]</sup> محققین یک مدل لجستیک معکوس یکپارچه ارائه کردند که در آن محصولات تولیدی با استفاده از مراکز توزیع در اختیار مشتریان قرار می‌گیرد (جریان رو به جلو). در جریان معکوس محصولات استفاده شده به دلایل مختلفی همچون کیفیت نامناسب یا معیوب بودن، به زنجیره بازمی‌گردد.<sup>[۱۹]</sup> میزان محصولات برگشتی درصدی از تقاضای مشتریان است که از قبل مشخص است. میزان تقاضای هر مشتری باید معلوم باشد و باید اطمینان حاصل شود که تمام محصولات برگشتی جمع‌آوری می‌شود. در این مدل دو راه برای تأمین قطعات وجود دارد: ۱. خریداری قطعات از تأمین‌کننده‌ی خارجی؛ ۲. جداسازی محصولات برگشتی و استفاده از قطعاتی که دارای کیفیت مناسب‌اند. تابع هدف در این مدل کمینه‌سازی هزینه‌ها - شامل هزینه‌ی تأسیس مراکز، هزینه‌ی تولید، هزینه‌ی حمل و نقل محصولات، هزینه‌ی حمل و نقل قطعات، هزینه‌ی جداسازی، انهدام، جمع‌آوری و هزینه‌ی خرید - است.<sup>[۲۰]</sup> مدل ارائه شده توسط لی و همکاران، یک شبکه‌ی لجستیک معکوس چندمرحله‌یی است که در آن ابتدا قطعات و محصولات برگشتی از هم جدا شده و سپس با توجه به کیفیت آنها، به مراکز تولید یا به مراکز انهدام ارسال می‌شوند. در مراکز تولید با استفاده از قطعات محصولات جدید تولید می‌شوند. در مدل ارائه شده دو وضعیت در نظر گرفته شده است: ۱. محصولات برگشتی با توجه به نوع محصول، مستقیماً از مراکز بازیافت به مراکز تولید ارسال می‌شوند؛ ۲. قطعات به دست آمده از جداسازی محصولات برگشتی، از مراکز جداسازی به مراکز بازیافت فرستاده می‌شود. هدف در نظر گرفته شده برای این مدل کمینه‌سازی هزینه‌های احداث مراکز جداسازی، تولید و جریان انتقال محصولات بین مراکز است.<sup>[۲۰]</sup> کارا و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی احتمالی دو مرحله‌یی برای صنعت کاغذ با در نظر گرفتن بازیافت کاغذها و با هدف بیشینه‌سازی درآمد ارائه کردند. هدف این مدل شناسایی بهترین مکان برای مراکز بازیافت است، که جریان محصول از مشتریان به مراکز بازیافت و

را ابتدا دمونتاژ می‌کنند و سپس قطعات به دست آمده را با توجه به کیفیت در دو گروه تقسیم‌بندی می‌کنند. گروه اول قطعاتی هستند که از سطح کیفیت مطلوب برخوردار نیستند و به مراکز انهدام ارسال می‌شوند. گروه دوم قطعاتی هستند که از سطح کیفیت بهتری برخوردارند و به منظور فروش به مراکز بازار باز یافتی ارسال می‌شوند یا به منظور استفاده‌ی مجدد به مراکز تولیدکنندگان منتقل می‌شوند. اگر تعداد قطعات به دست آمده از مراکز باز یافت کافی نباشد سایر قطعات از تأمین‌کنندگان خریداری می‌شود. محصولاتی که در این مراکز ساخته می‌شود برای فروش به بازار ثانویه ارسال خواهد شد. تابع هدف این مسئله کمینه‌سازی هزینه و مجموع زمان‌های تأخیر است. با حل این مسئله مکان، تعداد مراکز و همچنین مقدار جریان بین مراکز تعیین می‌شود. مفروضات مدل عبارت‌اند از:

- مکان مشتریان - تأمین‌کنندگان مشخص و ثابت است و مقدار تقاضا احتمالی است.
- مقدار محصولات برگشتی متناسب با تقاضای اولیه‌ی مشتریان است، بنابراین مقدار محصولات برگشتی نیز احتمالی است.
- مدل تک‌دوره‌ی است.
- محصولات برگشتی از سطوح کیفیت متفاوت برخوردارند؛ با توجه به سطح کیفیت محصول، برای هر کدام از محصولات در بعضی از مراکز تعمیر چندین سطح ظرفیت در نظر گرفته شده است.
- اگر مقدار قطعات به دست آمده از مراکز باز یافت برای ساخت محصولات جدید کافی نباشد، تولیدکنندگان قطعات مورد نیاز را از تأمین‌کنندگان خریداری می‌کنند.
- قیمت فروش قطعات و محصولات به دست آمده از مراکز تولیدکنندگان، مراکز تعمیر و مراکز باز یافت برابر است با: هزینه‌ی حمل و نقل بین این مراکز و مراکز فروش + درصد سود مورد انتظار.

تابع هدف اول مؤلفه‌های زیر را کمینه می‌کند:

هزینه = هزینه‌ی ثابت احداث مراکز + هزینه‌ی حمل و نقل + هزینه‌ی باز یافت + هزینه‌ی انهدام + هزینه‌ی تعمیر + هزینه‌ی ساخت مجدد + هزینه‌ی خرید قطعات از تأمین‌کننده - درآمد حاصل از فروش قطعات باز یافت شده در مراکز بازار مواد باز یافتی - درآمد فروش محصولات ساخته شده در بازار ثانویه.

تابع هدف دوم مؤلفه‌های زیر را کمینه می‌کند:

مجموع زمان‌های تأخیر = زمان انتظار مشتریان - زمان حمل محصول بین مراکز + زمان تعمیر.

در شکل ۱ نمایی از مدل شبکه‌ی لجستیک معکوس مشاهده می‌شود. پارامترهای

مدل عبارت‌اند از:

$\theta$ : سطح کیفیت محصول.

$\pi\theta$ : احتمال حالت  $\theta$  (سطح کیفیت محصول با  $\theta$  مشخص می‌شود).

$d_{jk\theta}$ : تقاضای محصول  $z$  برای مشتری  $k$  در حالت  $\theta$ .

$P_{jk\theta}$ : متوسط کسر محصول برگشتی  $z$  از مشتری  $k$  در حالت  $\theta$ .

$S\theta$ : متوسط کسر محصولات قراضه‌ی قابل باز یافت در مراکز جمع‌آوری در حالت  $\theta$ .

$AD_{j\geq\theta}$ : تعداد قطعات  $z$  به دست آمده از جداسازی یک واحد محصول  $z$  در حالت  $\theta$ .

$SD_{j\geq\theta}$ : تعداد قطعات  $z$  لازم برای ساخت یک واحد محصول  $z$  در حالت  $\theta$ .

برعکس، به درستی حمایت شود.<sup>[۲]</sup> محققین برنامه‌ریزی احتمالی را با استفاده از مدل مکان‌یابی قطعی برای طراحی شبکه‌ی محصول بازگشتی در شبکه‌ی باز یافتی شن و ماسه به منظور پیشینه‌سازی سود، ارائه کردند.<sup>[۲۱]</sup> همچنین در سال ۲۰۱۱ مسئله‌ی برنامه‌ریزی زنجیره‌ی تأمین در شبکه‌ی لجستیک معکوس یکپارچه مورد مطالعه قرار گرفت؛ در مدل پیشنهادی اجزای محصول به سطوح مختلف کیفیت طبقه‌بندی می‌شود و نتیجه‌ی این بررسی‌ها ارائه‌ی یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی با هدف پیشینه‌سازی سود است. در این مدل فرض بر آن است که محصولات برگشتی و محصولات تولیدی از کیفیت متفاوت برخوردار است و هزینه‌ی تولید با افزایش تعداد اجزای محصول رابطه‌ی مستقیم دارد. در هر محصول تعداد اجزای استفاده شده مشخص است، و به‌ازای هر جزء هزینه‌ی مشخصی صرف می‌شود. در این مدل محصولات از سه سطح کیفیت برخوردارند:

$q = 1$  محصولات است که اجزای آن نواست؛

$q = 2$  محصولات است که از اجزای نو و باز یافتی ساخته شده‌اند؛

$q = 3$  محصولات است که اجزای آن همه باز یافتی است.

این مدل به دنبال یافتن ترکیب بهینه برای تولید و باز یافت محصولات در سطوح مختلف کیفیت، انتقال بهینه به مراکز توزیع، بهینه‌سازی برگشتی‌های جمع‌آوری شده از خرده‌فروشان، باز یافت و ساخت محصولات با کیفیت بالا، و با هدف پیشینه‌سازی سود است.<sup>[۲۲]</sup> آل ساید و کاربلی با فرض غیر قطعی بودن تقاضا و محصولات برگشتی احتمالی یک مدل احتمالی عدد صحیح ترکیبی چندمرحله‌ی در شرایط ریسک برای شبکه‌ی لجستیک یکپارچه ارائه کردند. شبکه‌ی ارائه شده شامل سه مرکز در مسیر مستقیم است (تأمین‌کنندگان - تسهیلات تولید و تسهیلات تولید - مراکز توزیع) و شامل دو مرکز در مسیر غیر مستقیم (مراکز جداسازی محصولات و قطعات - مراکز توزیع مجدد) است. مناطق تقاضا در مسیر جریان غیر مستقیم به صورت قطعی در نظر گرفته شده و تابع هدف پیشینه‌سازی کل سود مورد انتظار است.<sup>[۲۳]</sup> چوینارد و همکاران یک مدل احتمالی برای شبکه‌ی لجستیک معکوس یکپارچه ارائه کردند. در این مدل سطوح کیفیت محصولات برگشتی احتمالی است. آنها برای کیفیت محصولات پنج سطح در نظر گرفتند:  $s = 0$  ناشناخته،  $s = 1$  جدید،  $s = 2$  وضعیت جدید،  $s = 3$  خراب،  $s = 4$  غیر قابل استفاده.<sup>[۲۴]</sup>

مطالعات انجام شده در مورد لجستیک معکوس براساس مفروضات به صورت خلاصه در جدول ۱ نمایش داده می‌شود و در انتها مفروضات مدل پیشنهادی ارائه می‌شود.

### ۳. توصیف مدل

شبکه‌ی لجستیک حلقه‌بسته‌ی مستقل پیشنهادی، شامل مراکز مشتریان، جمع‌آوری، باز یافت، تولیدکنندگان، تعمیر، انهدام، بازار ثانویه و بازار مواد باز یافتی است. برای مراکز تعمیر، باز یافت، انهدام و جمع‌آوری، با توجه به سطح کیفیت محصولات چندین سطح ظرفیت در نظر گرفته شده است. در جریان معکوس، محصولات برگشتی از مراکز مشتریان به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌شود. در این مراکز، با توجه به کیفیت، محصولات برگشتی به دو گروه محصولات قابل باز یافت و محصولات قابل تعمیر طبقه‌بندی می‌شوند. محصولاتی که به مراکز تعمیر ارسال شده‌اند با توجه به عملیات مورد نیاز، تعمیر شده و به مراکز بازار ثانویه برای فروش ارسال می‌شوند. محصولات باز یافتنی نیز به مراکز باز یافت ارسال می‌شود. این محصولات

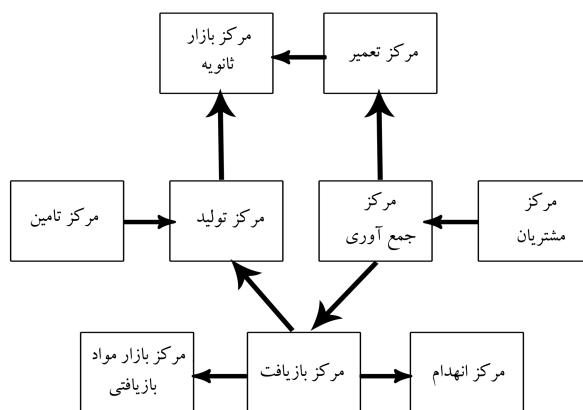
جدول ۱. طبقه‌بندی مطالعات انجام شده در لجستیک معکوس براساس مفروضات.

نحوه‌ی ارسال برگشتی‌ها	تعداد و نوع اهداف	ساختار شبکه	ماهیت بازگشت	انواع محصولات	افق زمانی	مراجع
غیر مستقیم	تک هدفه - کمینه هزینه	بسته	احتمالی	چند محصولی	تک دوره‌یی	[۹]
مستقیم	تک هدفه - کمینه هزینه	باز	احتمالی	چند محصولی	تک دوره‌یی	[۲۱]
غیر مستقیم	تک هدفه - کمینه کردن سود	بسته	قطعی - احتمالی	تک محصولی	چند دوره‌یی	[۲۳]
مستقیم	تک هدفه - کمینه کردن هزینه	باز	قطعی - احتمالی	تک محصولی	تک دوره‌یی	[۱۷]
مستقیم	تک هدفه - کمینه هزینه	باز	قطعی	چند محصولی	چند دوره‌یی	[۱۵]
مستقیم	تک هدفه - کمینه هزینه	بسته	احتمالی	چند محصولی	چند دوره‌یی	[۱۰]
مستقیم	تک هدفه - کمینه هزینه	بسته	قطعی	چند محصولی	تک دوره‌یی	[۱۹]
مستقیم	تک هدفه - کمینه هزینه	باز	احتمالی	تک محصولی	تک دوره‌یی	[۲۲]
غیرمستقیم	دو هدفه - کمینه هزینه - بیشینه قدرت پاسخ‌گویی	باز	قطعی	تک محصولی	تک دوره‌یی	[۱۷]
مستقیم	تک هدفه - کمینه هزینه	باز	احتمالی	تک محصولی و دوسطحی	تک دوره‌یی	[۵]
غیر مستقیم	تک هدفه - کمینه هزینه	بسته	قطعی	تک محصولی	تک دوره‌یی	[۱]
مستقیم	تک هدفه - کمینه هزینه	بسته	قطعی	تک محصولی	چند دوره‌یی	[۱۲]
غیرمستقیم	تک هدفه - کمینه هزینه	بسته	قطعی	چند محصولی	تک دوره‌یی	[۱۳]
**مستقیم - غیرمستقیم	دو هدفه - کمینه هزینه - بیشینه قدرت پاسخ‌گویی	بسته	احتمالی	*چند محصولی	تک دوره‌یی	مدل پیشنهادی

\* ظرفیت هرکدام از محصولات با توجه به سطح کیفیت محصول بازیافتی متفاوت است.

\*\* جریان تولید محصولات مستقیم و جریان جمع‌آوری محصولات بازیافتی غیرمستقیم است.

- $SF_{zsf\theta}$ : هزینه‌ی انتقال هر واحد قطعه‌ی  $z$  بین مراکز  $s$  و  $f$  در حالت  $\theta$ .
- $MD_{zmd\theta}$ : هزینه‌ی انتقال هر واحد قطعه‌ی  $z$  بین مراکز  $m$  و  $d$  در حالت  $\theta$ .
- $FG_{zfg\theta}$ : هزینه‌ی انتقال هر واحد محصول برگشتی  $z$  بین مراکز  $f$  و  $g$  در حالت  $\theta$ .
- $IG_{zigi\theta}$ : هزینه‌ی انتقال هر واحد محصول برگشتی  $z$  بین مراکز  $i$  و  $g$  در حالت  $\theta$ .
- $MR_{zmr\theta}$ : هزینه‌ی انتقال هر واحد قطعه‌ی  $z$  بین مراکز  $m$  و  $r$  در حالت  $\theta$ .
- $CR_{z\theta}$ : هزینه‌ی بازیافت هر واحد قطعه‌ی  $z$  در مرکز بازیافت در حالت  $\theta$ .
- $CD_{z\theta}$ : هزینه‌ی انهدام هر واحد قطعه‌ی  $z$  در مرکز انهدام در حالت  $\theta$ .
- $CMF_{z\theta}$ : هزینه‌ی تولید مجدد محصول  $z$  در مرکز تولیدکننده در حالت  $\theta$ .
- $CRS_{z\theta}$ : هزینه‌ی خرید هر واحد قطعه‌ی  $z$  از تأمین کننده در حالت  $\theta$ .
- $CMI_{z\theta}$ : هزینه‌ی تعمیر محصول  $z$  در مرکز تعمیر در حالت  $\theta$ .
- $FR_{\theta}^i$ : هزینه‌ی ثابت احداث مرکز احیاء  $i$  در حالت  $\theta$ .
- $H_{\theta}^l$ : هزینه‌ی ثابت احداث مرکز جمع‌آوری  $l$  در حالت  $\theta$ .
- $BD_{\theta}^m$ : هزینه‌ی ثابت احداث مرکز بازیافت  $m$  در حالت  $\theta$ .
- $DG_{\theta}^d$ : هزینه‌ی ثابت احداث مرکز انهدام  $d$  در حالت  $\theta$ .
- $ckl_{ki}$ : فاصله بین مراکز  $k$  و  $l$ .
- $cli_{li}$ : فاصله بین مراکز  $l$  و  $i$ .
- $clm_{im}$ : فاصله بین مراکز  $l$  و  $m$ .



شکل ۱. نمایی از مدل شبکه‌ی لجستیک معکوس پیشنهادی.

- $TD_{z\theta}$ : مقدار تقاضا برای قطعه‌ی  $z$  در حالت  $\theta$ .
- $KL_{jkl\theta}$ : هزینه‌ی انتقال هر واحد محصول برگشتی  $z$  بین مراکز  $k$  و  $l$  در حالت  $\theta$ .
- $LM_{jlm\theta}$ : هزینه‌ی انتقال هر واحد محصول برگشتی  $z$  بین مراکز  $l$  و  $m$  در حالت  $\theta$ .
- $LI_{jli\theta}$ : هزینه‌ی انتقال هر واحد محصول برگشتی  $z$  بین مراکز  $i$  و  $l$  در حالت  $\theta$ .

جدول ۲. مجموعه‌های تصمیم مدل.

مشتریان	K
مراکز جمع‌آوری	L
مراکز بازیافت	M
مراکز انهدام	D
مراکز بازار مواد بازیافتی	R
مراکز احیاء	I
قطعات به دست آمده از جداسازی محصول	Z
مراکز بازار ثانویه	G
تولیدکنندگان	F
تأمین‌کنندگان	S
محصولات	J
حالت‌های بالقوه برای سطح کیفیت محصول ( $\theta$ )	$\Omega$
سطوح برای تسهیلات	N

جدول ۳. متغیرهای تصمیم مدل.

مقدار محصول $z$ منتقل شده از مرکز $k$ به مرکز $l$ در حالت $\theta$	$X_{jkl\theta}$
مقدار قطعه $z$ منتقل شده از مرکز $m$ به مرکز $d$ در حالت $\theta$	$Y_{zmd\theta}$
مقدار محصول $z$ منتقل شده از مرکز $l$ به مرکز $m$ در حالت $\theta$	$M_{jlm\theta}$
مقدار قطعه $z$ منتقل شده از مرکز $s$ به مرکز $f$ در حالت $\theta$	$T_{zsf\theta}$
مقدار قطعه $z$ منتقل شده از مرکز $m$ به مرکز $f$ در حالت $\theta$	$C_{zmf\theta}$
مقدار قطعه $z$ منتقل شده از مرکز $m$ به مرکز $r$ در حالت $\theta$	$G_{zmr\theta}$
مقدار محصول $z$ منتقل شده از مرکز $i$ به مرکز $g$ در حالت $\theta$	$E_{jig\theta}$
مقدار محصول $z$ منتقل شده از مرکز $f$ به مرکز $g$ در حالت $\theta$	$N_{jfg\theta}$
مقدار محصول $z$ منتقل شده از مرکز $l$ به مرکز $i$ در حالت $\theta$	$L_{jli\theta}$
اگر مرکز $i$ در حالت $\theta$ احداث شود $1$	$W_{\theta}^i = 1$
در غیر این صورت $0$	$W_{\theta}^i = 0$
اگر مرکز $l$ در حالت $\theta$ احداث شود $1$	$Z_{\theta}^l = 1$
در غیر این صورت $0$	$Z_{\theta}^l = 0$
اگر مرکز $d$ در حالت $\theta$ احداث شود $1$	$K_{\theta}^d = 1$
در غیر این صورت $0$	$K_{\theta}^d = 0$
اگر مرکز $m$ در حالت $\theta$ احداث شود $1$	$V_{\theta}^m = 1$
در غیر این صورت $0$	$V_{\theta}^m = 0$

$cf_{fg}$ : فاصله بین مراکز  $f$  و  $g$ .

$cm_{mf}$ : فاصله بین مراکز  $m$  و  $f$ .

$cs_{sf}$ : فاصله بین تأمین‌کننده  $s$  و سازنده  $f$ .

$cmd_{md}$ : فاصله بین مراکز  $m$  و  $d$ .

$cmr_{mr}$ : فاصله بین مراکز  $m$  و  $r$ .

$SMF_{j\theta}$ : سود فروش هر واحد محصول  $j$  تولیدشده توسط مرکز  $f$  در بازار ثانویه در حالت  $\theta$ .

$SMI_{j\theta}$ : سود فروش هر واحد محصول  $j$  تولید شده توسط مرکز  $i$  در بازار ثانویه در حالت  $\theta$ .

$SRR_{z\theta}$ : سود فروش هر واحد قطعه  $z$  در مرکز بازار مواد بازیافتی در حالت  $\theta$ .

$cal_{jl}^n_{\theta}$ : ظرفیت سطح  $n$  برای محصول  $j$  در مرکز  $l$  در حالت  $\theta$ .

$cad_{zd}^n_{\theta}$ : ظرفیت سطح  $n$  برای قطعه  $z$  در مرکز  $d$  در حالت  $\theta$ .

$cal_{ji}^n_{\theta}$ : ظرفیت سطح  $n$  برای محصول  $j$  در مرکز  $i$  در حالت  $\theta$ .

$cam_{jm}^n_{\theta}$ : ظرفیت سطح  $n$  برای محصول  $j$  در مرکز  $m$  در حالت  $\theta$ .

$caf_{zf\theta}$ : ظرفیت برای قطعه  $z$  در مرکز  $f$  در حالت  $\theta$ .

$cas_{zs\theta}$ : ظرفیت برای قطعه  $z$  در مرکز  $s$  در حالت  $\theta$ .

$tej_{\theta}$ : زمان انتظار مشتری در مورد تعمیر محصول  $j$  در حالت  $\theta$ .

$tr_{j\theta}$ : زمان مورد نیاز برای تعمیر محصول  $j$  در حالت  $\theta$ .

$t\theta$ : زمان حمل و نقل هر واحد محصول در واحد مسافت در حالت  $\theta$ .

در جدول ۲ مجموعه تصمیم‌های استفاده شده در مدل پیشنهادی بیان شده

است. در جدول ۳ نیز متغیرهای تصمیم استفاده شده در مدل پیشنهادی بیان شده

است. براساس مفروضات، پارامترها، مجموعه‌ها و متغیرهای تصمیم، مدل پیشنهادی

با استفاده از روش برنامه‌ریزی ریاضی فرمول‌بندی می‌شود.

توابع هدف و محدودیت‌های مرتبط طبق عبارت‌های ۱ تا ۲۲ بیان شده است.

$$\begin{aligned} \min z \ = & \sum_D \sum_{\theta} DG_{\theta}^d K_{\theta}^d + \sum_M \sum_{\theta} BD_{\theta}^m V_{\theta}^m \\ & + \sum_L \sum_{\theta} H_{\theta}^l Z_{\theta}^l + \sum_I \sum_{\theta} FR_{\theta}^i W_{\theta}^i \\ & + \sum_{\theta} \sum_J \sum_L \sum_K \pi_{\theta} KL_{jkl\theta} ckl_{kl} X_{jkl\theta} \\ & + \sum_{\theta} \sum_J \sum_L \sum_M \pi_{\theta} LM_{jlm\theta} clm_{lm} M_{jlm\theta} \\ & + \sum_{\theta} \sum_J \sum_L \sum_I \pi_{\theta} LI_{jli\theta} cli_{li} L_{jli\theta} \\ & + \sum_{\theta} \sum_Z \sum_M \sum_D \pi_{\theta} MD_{zmd\theta} cmd_{md} Y_{zmd\theta} \\ & + \sum_{\theta} \sum_J \sum_G \sum_F \pi_{\theta} FG_{jfg\theta} cfg_{fg} N_{jfg\theta} \\ & + \sum_{\theta} \sum_J \sum_I \sum_G \pi_{\theta} IG_{jig\theta} cig_{ig} E_{jig\theta} \\ & + \sum_{\theta} \sum_Z \sum_M \sum_F \pi_{\theta} MF_{zmf\theta} cmf_{mf} C_{zmf\theta} \\ & + \sum_{\theta} \sum_Z \sum_S \sum_F \pi_{\theta} SF_{zsf\theta} csf_{sf} T_{zsf\theta} \\ & + \sum_{\theta} \sum_Z \sum_M \sum_R \pi_{\theta} MR_{zmr\theta} cmr_{mr} G_{zmr\theta} \end{aligned}$$

$$\sum_I \sum_L L_{jli\theta} + \sum_L \sum_I M_{jlm\theta} = \sum_K \sum_L X_{jkl\theta} \quad \forall j, \theta \quad (15)$$

$$\sum_F \sum_M \sum_Z C_{zmf\theta} + \sum_F \sum_S \sum_Z T_{zsf\theta} = \sum_F \sum_Z \sum_G N_{jfg\theta} S D_{jz\theta} \quad \forall j, \theta \quad (16)$$

$$\sum_{\theta} W_{\theta}^i \leq 1 \quad \forall i \quad (17)$$

$$\sum_{\theta} Z_{\theta}^l \leq 1 \quad \forall l \quad (18)$$

$$\sum_{\theta} K_{\theta}^d \leq 1 \quad \forall d \quad (19)$$

$$\sum_{\theta} V_{\theta}^m \leq 1 \quad \forall m \quad (20)$$

$$Z_{\theta}^l, V_{\theta}^m, W_{\theta}^i, K_{\theta}^d \in \{0, 1\} \quad \forall i, l, m, d, \theta \quad (21)$$

$$X_{jkl\theta}, Y_{zmd\theta}, L_{jli\theta}, M_{jlm\theta}, N_{jfg\theta}, E_{jig\theta}, G_{zmr\theta}, T_{zsf\theta}, C_{zmf\theta}, P_{jik\theta} \geq 0 \quad (22)$$

رابطه‌ی ۱ تابع هدف اول است که بیان‌گر مقدار هزینه است. رابطه‌ی ۲ تابع هدف دوم است که مقدار تأخیر را بیان می‌کند. رابطه‌ی ۳ نشان‌گر مقدار محصولات برگشتی بر مبنای درصدی از تقاضا در حالت رو به جلو است. رابطه‌ی ۴ تا ۱۰ تضمین می‌کنند که جریان تنها بین مراکز در جریان است که در آنها تسهیلات احداث شده و همچنین مجموع جریان در هر مرکز نمی‌تواند از ظرفیت آن تجاوز کند. رابطه‌ی ۱۱ نشان‌گر میزان تقاضا برای قطعه  $z$  است. رابطه‌ی ۱۲ تا ۱۶ مربوط به محدودیت‌های تعادل جریان در گره‌هاست. رابطه‌ی ۱۷ تا ۲۰ تضمین می‌کنند که تنها یک سطح ظرفیت به هر تسهیل تخصیص داده شود. رابطه‌ی ۲۱ و ۲۲ محدودیت‌های مربوط به متغیرهای تصمیم مسئله است.

#### ۴. مثال عددی

در این قسمت به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی مدل چند مثال عددی ارائه شده است. مقادیر پارامترهای مثال‌های عددی در جدول ۴ و تابع توزیع احتمال پارامترهای احتمالی در جدول ۵ بیان شده است.

#### ۵. روش‌های حل مدل

##### ۱.۵. روش مجموع وزنی توابع

یکی از روش‌هایی که در حل مسائل چندمعیاره کاربرد دارد روش مجموع وزنی توابع است که برای استفاده از آن لازم است هر دو تابع هدف با یک مقیاس سنجیده شود.<sup>[۲۵]</sup> در مدل پیشنهادی تابع هدف اول هزینه است و مقیاس آن واحد پول است؛ تابع هدف دوم مجموع زمان‌های تأخیر است که مقیاس آن واحد زمان است. به منظور سنجش هر دو تابع هدف با یک مقیاس، برای محاسبه‌ی تابع هدف دوم هزینه‌ی مجموع زمان‌های تأخیر محاسبه می‌شود.

مثال‌های نمونه با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شده و برای تعیین مقدار تابع هدف کل از روش مجموع وزنی توابع استفاده شده است. نتایج حاصله نیز در جدول ۶ ارائه شده است.

$$\begin{aligned} & + \sum_{\theta} \sum_Z \sum_M \sum_F \pi_{\theta} C R_{z\theta} C_{zmf\theta} \\ & + \sum_{\theta} \sum_Z \sum_M \sum_R \pi_{\theta} C R_{z\theta} G_{zmr\theta} \\ & + \sum_{\theta} \sum_J \sum_L \sum_I \pi_{\theta} C R I_{j\theta} E_{jig\theta} \\ & + \sum_{\theta} \sum_Z \sum_M \sum_D \pi_{\theta} C R S_{z\theta} T_{zsf\theta} \\ & + \sum_{\theta} \sum_Z \sum_M \sum_D \pi_{\theta} C M F_{j\theta} N_{jfg\theta} \\ & - \sum_{\theta} \sum_Z \sum_M \sum_R \pi_{\theta} S R R_{z\theta} G_{zmr\theta} \\ & - \sum_{\theta} \sum_Z \sum_M \sum_D \pi_{\theta} S M F_{j\theta} N_{jfg\theta} \\ & - \sum_{\theta} \sum_Z \sum_M \sum_D \pi_{\theta} S M I_{j\theta} E_{jig\theta} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \min z^* = \max & \left[ \left[ \sum_{\theta} \sum_J \sum_L \sum_K t_{\theta} c k l_{kl} X_{jkl\theta} \right. \right. \\ & + \sum_{\theta} \sum_J \sum_I \sum_L t_{\theta} c l i_i L_{jli\theta} \\ & + \sum_{\theta} \sum_J \sum_I \sum_G (t_{\theta} c i g_{ig} E_{jig\theta} + t r_{j\theta} E_{jig\theta} \\ & \left. \left. - t e_{j\theta} E_{jig\theta} \right) \right], 0 \end{aligned} \quad (2)$$

S.T

$$\sum_L X_{jkl\theta} = r_{jk\theta} d_{jk\theta} \quad \forall j, k, \theta \quad (3)$$

$$\sum_K X_{jkl\theta} \leq \sum_N c a l_{jli\theta}^n Z_{\theta}^l \quad \forall j, l, \theta \quad (4)$$

$$\sum_M Y_{zmd\theta} \leq \sum_N c a d_{zsd\theta}^n K_{\theta}^d \quad \forall d, z, \theta \quad (5)$$

$$\sum_L L_{jli\theta} \leq \sum_N c a i_{jli\theta}^n W_{\theta}^i \quad \forall j, i, \theta \quad (6)$$

$$\sum_L M_{jlm\theta} \leq \sum_N c a m_{jlm\theta}^n V_{\theta}^m \quad \forall j, m, \theta \quad (7)$$

$$\sum_S \sum_F T_{zsf\theta} \leq \sum_S c a s_{zsf\theta} \quad \forall z, \theta \quad (8)$$

$$\sum_M C_{zmf\theta} + \sum_S T_{zsf\theta} \leq c a f_{zsf\theta} \quad \forall z, \theta, f \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \sum_F \sum_M C_{zmf\theta} + \sum_D \sum_M Y_{zmd\theta} + \sum_M \sum_R G_{zmr\theta} \\ & \leq \sum_M \sum_L M_{jlm\theta} A D_{jz\theta} \quad \forall z, \theta, j \end{aligned} \quad (10)$$

$$\sum_S \sum_F T_{zsf\theta} + \sum_M \sum_F C_{zmf\theta} = T D_{z\theta} \quad \forall z, \theta \quad (11)$$

$$\sum_L \sum_M M_{jlm\theta} = s_{\theta} \sum_K \sum_L X_{jkl\theta} \quad \forall j, \theta \quad (12)$$

$$\sum_L \sum_I L_{jli\theta} = (1 - s_{\theta}) \sum_K \sum_L X_{jkl\theta} \quad \forall j, \theta \quad (13)$$

$$\sum_G \sum_I E_{jig\theta} = \sum_I \sum_L L_{jli\theta} \quad \forall j, \theta \quad (14)$$

جدول ۵. مقادیر پارامترها برای مثال‌های نمونه.

پارامترها	مقادیر
$d_{jk\theta}$	Uniform (۲۵۰۰ و ۲۰۰۰)
$r_{jk\theta}$	Uniform (۰٫۷ و ۰٫۹)
$TD_{z\theta}$	Uniform (۲۵۰ و ۳۰۰)
$AD_{jz\theta}$	Uniform (۲ و ۵)
$SD_{jz\theta}$	Uniform (۲ و ۵)
$CD_{z\theta}$	Uniform (۲۰۰ و ۲۵۰)
$CR_{z\theta}$	Uniform (۲۵۰ و ۳۰۰)
$CMF_{j\theta}$	Uniform (۱۳۰ و ۱۶۰)
$CRS_{z\theta}$	Uniform (۴۵۰ و ۵۵۰)
$CMI_{j\theta}$	Uniform (۱۰۰ و ۱۵۰)
$SMF_{j\theta}$	Uniform (۹۰ و ۲۰۰)
$SMI_{j\theta}$	Uniform (۲۵۰ و ۴۰۰)
$H_{\theta}^1$	Uniform (۳۵ و ۴۵)
$DG_{\theta}^d$	Uniform (۴۰ و ۵۰)
$BD_{\theta}^m$	Uniform (۳۰ و ۵۰)
$FR_{\theta}^i$	Uniform (۳ و ۳۵)
$cas_{z\theta}$	Uniform (۶۵۰ و ۹۰۰)
$cad_{z\theta}^d$	Uniform (۱۲۰ و ۲۰۰)
$cal_{j\theta}^n$	Uniform (۴۰۰ و ۶۵۰)
$cam_{j\theta}^m$	Uniform (۵۰۰ و ۷۰۰)
$caf_{z\theta}$	Uniform (۱۱۰۰ و ۱۵۰۰)
$cai_{j\theta}^n$	Uniform (۴۰۰ و ۶۵۰)
$te_{j\theta}$	Uniform (۳ و ۵)
$t_{j\theta}$	Uniform (۰٫۳ و ۰٫۵)
$t_{\theta}$	Uniform (۳ و ۴)

جدول ۶. تابع هدف.

مسئله نمونه	تابع هدف ۱	تابع هدف ۲	زمان حل (s)
۱	۳۲۱۹۶۰۳۷٫۳۷	۱۵۶۰۸۲۲۳٫۴۸	۰٫۵۶
۲	۱۲۷۴۲۶۹۹۶٫۷۸	۷۷۷۶۱۶۶٫۱	۱٫۵
۳	۳۰۸۷۵۷۵۷۶٫۷۶	۲۰۶۸۷۶۷۰۷٫۶۰	۱۰٫۴۵۳
۴	۳۵۹۱۷۳۹۷۸٫۶۳	۲۵۹۰۵۴۰۳۱٫۸۶	۱۴٫۹۶۹
۵	۷۶۲۸۲۶۱۲۰٫۳۰	۷۱۵۸۰۹۴۱۵٫۳۳	۲۵٫۳۶۰
۶	۱۳۳۷۶۴۴۴۵۵٫۳۰	۱۲۶۴۳۵۱۸۲۵٫۲۲	۳۸٫۳۷۵

جدول ۴. مشخصات مثال‌های نمونه.

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
تعداد محصول	۳	۵	۸	۱۰	۱۵	۲۰
تعداد قطعه	۴	۴	۸	۱۰	۱۰	۱۰
تعداد مشتریان	۳	۶	۱۰	۱۰	۱۵	۲۰
تعداد مراکز جمع‌آوری	۳	۶	۱۰	۱۰	۱۵	۱۵
تعداد مراکز انهدام	۳	۴	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
تعداد مراکز بازیافت	۲	۴	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
تعداد مراکز تعمیر	۳	۶	۶	۶	۱۰	۱۵
تعداد مراکز بازار ثانویه	۲	۴	۱۰	۱۰	۱۵	۱۵
تعداد تأمین‌کنندگان	۳	۶	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
تعداد تولیدکنندگان	۳	۶	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
تعداد مراکز بازار مواد بازیافتی	۲	۴	۱۰	۱۰	۱۵	۱۵
تعداد سطوح ظرفیت	۲	۳	۳	۴	۶	۸
تعداد حالت‌ها	۳	۴	۴	۴	۵	۵

مدل پیشنهادی با روش برنامه‌ریزی عدد صحیح فرمول‌بندی شده است که به مسئله‌ی جایابی تجهیزات با ظرفیت محدود، کاهش می‌یابد و اثبات شده است این مسئله NP-Hard است. [۲۶] نتایج حاصل از حل مثال‌های عددی نیز بیان‌گر این مطلب است. با توجه به پیچیدگی مسئله‌ی لجستیک معکوس برای حل آن پیشنهاد می‌شود از روش‌های فراابتکاری استفاده شود. در بخش بعدی روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)، برای حل مدل پیشنهادی ارائه می‌شود.

## ۲.۵ روش NSGA-II

برای حل مسائل چندهدفه می‌توان از روش الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) استفاده کرد که خصوصیات آن عبارت است از: [۲۷]

- جوابی که هیچ جواب دیگری بهتر از آن نباشد، دارای امتیاز بیشتری است. جواب‌ها براساس این که چند جواب بهتر از آنها وجود داشته باشند، مرتب می‌شوند.
- شایستگی (برازندگی) برای جواب‌ها برحسب رتبه‌ی آنها و عدم غلبه‌ی سایر جواب‌ها تعیین می‌شود.
- با تعریف فاصله‌ی ازدحام  $\gamma$  برای جواب‌ها، پراکندگی جواب‌ها طوری تنظیم شود که جواب‌ها به‌طور یکنواخت در فضای جست‌وجو پراکنده شوند.
- از عملگر انتخاب تورنمنت دودویی استفاده می‌شود.
- جواب‌های نامغلوب که در مراحل قبلی الگوریتم به‌دست آمده‌اند ذخیره‌سازی می‌شود (نخبه‌گرایی).

• این الگوریتم با استفاده از اصل عدم غلبه<sup>۸</sup> و محاسبه‌ی فاصله‌ی ازدحام، نقطه‌ی بهینه‌ی پارتو را به دست می‌آورد.

الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله‌ی لجستیک معکوس در شکل ۲ نمایش داده شده است.

#### ۱.۲.۵. تنظیم پارامترها

به منظور تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش از طراحی آزمایش‌ها و طرح‌های آرایه‌ی متعامد استاندارد تاگوجی استفاده می‌شود. در الگوریتم NSGA-II به کار رفته در این پژوهش سازوکار انتخاب تورنمنت دودویی است؛ اپراتور تقاطع دارای پنج سطح است؛ اپراتورهای جهش، اندازه جمعیت، احتمال جهش، احتمال تقاطع، و بیشترین تعداد تکرارها هر کدام سه سطح دارند. هر آزمایش چهار مرتبه اجرا می‌شود و بنابراین تعداد آزمایش‌هایی که باید انجام شود برابر است با  $4 \times 51 \times 35$  که با توجه به زمان و هزینه‌ی لازم برای اجرای این تعداد آزمایش توصیه می‌شود از طرح‌های آرایه‌ی متعامد استاندارد تاگوجی استفاده شود. در اینجا با توجه به تعداد سطوح عوامل مختلف در آزمایش تعداد درجات آزادی تعیین می‌شود. در این طرح آزمایش یک درجه آزادی برای میانگین کل، چهار درجه آزادی برای عامل پنج‌سطحی و دو درجه آزادی برای عامل سه‌سطحی لازم است. بنابراین مجموع درجات آزادی برابر است با:

$$15 = (2 \times 5) + 4 + 1$$

پس باید آرایه‌ی انتخاب شود که دارای ۱۵ درجه آزادی باشد. آرایه‌ی متعامد L۱۸ این شرط را دارد.

چون تعداد عامل پنج‌سطحی در این طرح آزمایش با تعداد عوامل پنج‌سطحی در آرایه‌ی متعامد استاندارد L۱۸ تطابق ندارد، از روش‌های تطبیقی استفاده می‌شود. در این شرایط از روش سطح مجازی استفاده می‌شود و یک ستون شش‌سطحی به یک ستون پنج‌سطحی تبدیل می‌شود. در جدول ۷ آرایه‌ی متعامد L۱۸ و آرایه‌ی متعامد اصلاح‌شده‌ی مناسب برای الگوریتم NSGA-II ارائه شده است.

با اجرای طرح‌های آزمایش مقدماتی، سطوح مناسب پارامترها و عملگرهای الگوریتم تعیین می‌شود. در جدول ۸ پارامترها و سطوح مختلف آن‌ها برای الگوریتم NSGA-II پیشنهادی نمایش داده شده است. با توجه به مشخصه‌های طرح‌های آزمایش و مدل پیشنهادی شبکه‌ی لجستیک معکوس، مسائل نمونه طراحی شد که نتایج اجرای الگوریتم NSGA-II پیشنهادی برای این مسائل نمونه در جدول ۹ ارائه شده است.

با توجه به این که تابع هدف مسئله کمینه‌سازی است از نسبت:

$$\frac{S}{N_S} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

استفاده می‌شود، که در آن  $y_i$  مقدار خروجی به‌ازای آزمایش  $i$  است، و  $n$  تعداد تکرار آزمایش‌هاست. براساس مقادیر  $\frac{S}{N_S}$  برای هر سطح عوامل در الگوریتم پیشنهادی بهترین سطح هر کدام از عوامل تعیین می‌شود. نتایج حاصل در جدول ۱۰ ارائه شده است.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده برای اجرای نهایی الگوریتم پیشنهادی، پارامترها و عملگرهای الگوریتم پیشنهادی طوری تنظیم می‌شوند که بهترین

#### Algorithm NSGA-II algorithm

**procedure** NSGA-II( $N, g, f_i(x)$ )  $\triangleright N$ , members evolved  $g$  generations to solve  $f(x)$

Initialize Population  $P$

Generate random population – size  $N$

Evaluate Objective Values

Assign Rank (level) Based on Pareto dominance – *sort*

Generate Child Population

Binary Tournament Selection

Recombination and Mutation

**for**  $i = 1$  to  $g$  **do**

**for each** Parent and Child in Population **do**

Assign Rank (level) based on Pareto – *sort*

Generate sets of non-dominated vectors along PF $_{known}$

Loop (inside) by adding solutions to next generation starting from the *first* front until  $N$  individuals found determine crowding distance between points on each front

**end for**

Select points (elitist) on the lower front (with lower rank) and are outside a crowding distance

Create next generation

Binary Tournament Selection

Recombination and Mutation

**end for**

**end procedure**

شکل ۲. شبه‌کد الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب.



جدول ۷. آرایه‌ی متعامد L18 و آرایه‌ی متعامد اصلاح شده مناسب برای الگوریتم NSGA-II.

شماره نمونه	A	B	C	D	E	F	شماره نمونه	A	B	C	D	E	F
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۲
۳	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱	۳	۳	۳	۳	۳
۴	۲	۱	۲	۳	۳	۳	۴	۲	۱	۲	۳	۳	۳
۵	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۵	۲	۲	۳	۳	۳	۳
۶	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۶	۲	۳	۳	۳	۳	۳
۷	۳	۱	۲	۳	۳	۳	۷	۳	۱	۲	۳	۳	۳
۸	۳	۲	۲	۳	۳	۳	۸	۳	۲	۲	۳	۳	۳
۹	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۹	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۱۰	۴	۱	۲	۳	۳	۳	۱۰	۴	۱	۲	۳	۳	۳
۱۱	۴	۲	۲	۳	۳	۳	۱۱	۴	۲	۲	۳	۳	۳
۱۲	۴	۳	۳	۳	۳	۳	۱۲	۴	۳	۳	۳	۳	۳
۱۳	۵	۱	۲	۳	۳	۳	۱۳	۵	۱	۲	۳	۳	۳
۱۴	۵	۲	۲	۳	۳	۳	۱۴	۵	۲	۲	۳	۳	۳
۱۵	۵	۳	۳	۳	۳	۳	۱۵	۵	۳	۳	۳	۳	۳
۱۶	۱	۱	۱	۳	۳	۳	۱۶	۱	۱	۱	۳	۳	۳
۱۷	۱	۲	۲	۳	۳	۳	۱۷	۱	۲	۲	۳	۳	۳
۱۸	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۱۸	۱	۳	۳	۳	۳	۳

آرایه متعامد اصلاح شده

جواب‌ها به دست آمد. مقادیر بهینه‌ی پارامترها و عملگرهای الگوریتم پیشنهادی در جدول ۱۱ بیان شده است.

جدول ۸. عوامل و سطوح مختلف آن‌ها در الگوریتم NSGA-II.

عامل	سطوح	نماد	نوع سطوح
تقاطع	۵	A(۱)	وزنی - نگاشته
		A(۲)	بخشی - نگاشته
		A(۳)	چرخه‌یی
		A(۴)	یکتواخت
		A(۵)	ترتیب
اندازه جمعیت	۳	B(۱)	۵°
		B(۲)	۷°
		B(۳)	۹°
احتمال جهش	۳	C(۱)	۱۱°
		C(۲)	۱۵°
		C(۳)	۲۱°
جهش	۳	D(۱)	جابه‌جایی
		D(۲)	جاگذاری
		D(۳)	درهم آمیخته
بیشینه تعداد تکرارها	۳	E(۱)	۵
		E(۲)	۱۰
		E(۳)	۱۵
احتمال تقاطع	۳	F(۱)	۹۱°
		F(۲)	۸۵°
		F(۳)	۸۱°

## ۶. نتیجه‌گیری

در این نوشتار مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح احتمالی شبکه‌ی لجستیک معکوس به‌گونه‌ی توسعه داده شد که چارچوب تصمیم‌گیری برای احداث مراکز جمع‌آوری، بازیافت، تعمیر، انهدام و تعیین مقدار قطعات و محصولات جابه‌جا شده بین مراکز مشتریان، جمع‌آوری، بازیافت، بازار ثانویه، تولیدکنندگان، تأمین کنندگان معیارهای عملکرد هزینه و مجموع زمان‌های تأخیر را بهینه کند.

مدل ارائه شده در این نوشتار به مسائل واقعی شبیه‌تر است؛ در مدل پیشنهادی نرخ تقاضا و محصولات برگشتی احتمالی است، چند محصول با سطوح کیفیت متفاوت از مراحل متفاوت زنجیره‌ی تأمین -- مانند مراکز مشتریان، بازار ثانویه، مواد بازیافتی -- جمع‌آوری شده و بین سایر مراکز توزیع می‌شود. هر کدام از مراکز با توجه به سطوح کیفیت چند سطح ظرفیت دارند.

برای تحلیل و اثبات کارایی مدل چند مثال عددی با استفاده از نرم‌افزار GAMS به صورت دقیق حل شد. با توجه به NP-Hard بودن مسئله، یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر NSGA-II توسعه داده شد. برای تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی از روش ناگوشی در طراحی آزمایش‌ها استفاده شد.

مسائل نمونه با استفاده از الگوریتم NSGA-II و پارامترها و عملگرهای بهینه حل شد که نتایج آن در جدول ۱۲ ارائه شده است. تعداد جواب‌های بهینه‌ی پارتو بیان‌گر کارایی الگوریتم پیشنهادی برای حل مسائل است.

جدول ۹. طراحی آزمایش با استفاده از روش تاگوچی.

شماره نمونه	A	B	C	D	E	F	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$\frac{S}{N_S}$
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۸۷,۰۲	۱۸۷,۳۷	۱۹۱,۶۳	۱۸۹,۷۷	-۴۵,۵۳
۲	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۵۵۵,۸۵	۵۵۵,۰۸	۵۵۴,۰۹	۵۵۴,۱۹	-۵۴,۸۸
۳	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۱۰۵۸,۵۲	۱۰۵۲,۳۸	۱۰۱۳,۴۶	۱۰۱۰,۷۱	-۶۰,۲۹
۴	۲	۱	۲	۳	۳	۲	۵۵۰,۱۹	۵۶۸,۰۷	۵۷۳,۱۷	۵۶۵,۲۹	-۵۵,۰۳
۵	۲	۲	۳	۱	۱	۳	۲۵۹,۸۸	۲۵۸,۸۱	۲۵۹,۷۲	۲۵۹,۳۹	-۴۸,۲۸
۶	۲	۳	۱	۲	۲	۱	۶۸۳,۵۳	۶۷۳,۸۲	۶۸۵,۸۸	۶۴۷,۸۳	-۵۶,۵۵
۷	۳	۱	۳	۲	۲	۳	۳۳۳,۹۲	۳۳۴,۱۵	۳۳۶,۰۱	۳۳۲,۸۴	-۵۰,۴۸
۸	۳	۲	۱	۳	۳	۱	۷۰۲,۷۱	۷۱۸,۰۵	۷۳۲,۸۸	۷۳۰,۹۴	-۵۷,۱۶
۹	۳	۳	۲	۱	۱	۲	۳۱۳,۵۸	۳۱۲,۵۹	۳۱۳,۷۸	۳۱۱,۷۷	-۴۹,۹۱
۱۰	۴	۱	۲	۲	۲	۱	۱۷۶,۸۹	۱۷۵,۰۸	۱۷۴,۶۹	۱۷۵,۸۶	-۴۴,۸۹
۱۱	۴	۲	۳	۳	۳	۲	۴۹۱,۰۲	۴۹۱,۸۶	۴۹۳,۲۸	۴۹۳,۵۹	-۵۳,۸۵
۱۲	۴	۳	۱	۱	۱	۳	۹۴۸,۳۴	۹۶۴,۱۵	۹۶۱,۷۵	۹۷۸,۳۶	-۵۹,۶۷
۱۳	۵	۱	۱	۳	۳	۱	۱۸۲,۷۷	۱۸۰,۴۹	۱۸۰,۵۶	۱۸۱,۷۸	-۴۵,۱۷
۱۴	۵	۲	۲	۱	۱	۲	۵۱۴,۱۳	۵۱۷,۰۲	۴۹۹,۳۶	۴۹۷,۹۵	-۵۴,۱۰
۱۵	۵	۳	۳	۳	۲	۳	۹۶۸,۳۷	۹۶۶,۹۰	۹۵۸,۲۸	۸۹۶,۴۳	-۵۹,۵۳
۱۶	۱	۱	۳	۱	۱	۳	۱۷۸,۸۵	۱۷۸,۰۲	۱۷۷,۳۳	۱۷۹,۵۸	-۴۵,۰۳
۱۷	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۵۱۲,۶۴	۵۱۱,۵۲	۵۱۲,۰۴	۵۳۸,۰۶	-۵۴,۳۰
۱۸	۱	۳	۲	۳	۳	۲	۱۰۳۴,۰۸	۱۰۳۱,۴۵	۱۰۳۶,۹۸	۱۰۴۰,۴۷	-۶۰,۳۰

جدول ۱۲. مقادیر به دست آمده برای مسائل نمونه با استفاده از الگوریتم NSGA-II با توجه به پارامترها و عملگرهای بهینه.

فاصله	تفاوت	تعداد جواب بهینه پارتو	شماره تکرار	مسئله
۰,۷۱	۱۰۵۱۶,۸۵	۴	۱	
۰,۵۹	۱۵۵۱۱,۸۸	۸	۲	۱
۱,۰۰	۱۸۶۳۸,۸۷	۹	۳	
۰,۷۶	۱۷۴۹۸,۸۹	۷	۱	
۰,۵۸	۲۱۳۲۳,۴۷	۹	۲	۲
۰,۷۳	۲۸۵۴۷,۲۱	۱۱	۳	
۰,۶۹	۱۷۱۱۵,۷۳	۵	۱	
۰,۸۳	۱۸۱۸۷,۴۹	۶	۲	۲
۰,۸۵	۲۲۵۵۹,۳۵	۷	۳	
۱,۰۰	۹۱۶۸,۳۱	۴	۱	
۰,۹۸	۱۵۱۵۳,۲۵	۸	۲	۴
۰,۴۷	۱۱۹۵۵,۸۰	۹	۳	
۰,۵۹	۲۳۸۲۳,۲۱	۵	۱	
۰,۵۷	۱۰۹۴۷	۶	۲	۵
۰,۸۸	۳۰۲۳۶,۸۳	۸	۳	
۰,۱۹	۲۸۰۱۵,۸۲	۶	۱	
۰,۴۹	۳۱۳۱۷,۰۵	۷	۲	۶
۱,۰۰	۴۸۶۹۹,۵۷	۹	۳	

جدول ۱۰. مقدار  $\frac{S}{N_S}$  برای هر سطح فاکتور الگوریتم NSGA-II.

بیشترین	۵	۴	۳	۲	۱	
-۵۲,۵۲	-۵۲,۹۳	-۵۲,۸۰	-۵۲,۵۲	-۵۳,۲۹	-۵۳,۳۹	A
-۴۷,۶۹	--	--	-۵۷,۷۱	-۵۳,۷۶	-۴۷,۶۹	B
-۵۲,۹۱	--	--	-۵۲,۹۱	-۵۳,۱۸	-۵۳,۰۶	C
-۵۰,۴۲	--	--	-۵۵,۳	-۵۳,۴۴	-۵۰,۴۲	D
-۵۰,۴۲	--	--	-۵۵,۳	-۵۳,۴۴	-۵۰,۴۲	E
-۵۰,۶	--	--	-۵۳,۸۸	-۵۴,۶۸	-۵۰,۶	F

جدول ۱۱. پارامترها و عملگرهای بهینه الگوریتم NSGA-II.

عامل	الگوریتم NSGA برای مسئله دوهدفه
تقاطع	چرخه‌یی
اندازه جمعیت	۵۰
احتمال جهش	۰,۲
جهش	جابه‌جایی
بیشترین تعداد تکرارها	۵
احتمال تقاطع	۰,۹

1. reverse logistics model
2. integrated model for forward/reverse logistics
3. closed loop logistics model
4. open loop logistics model
5. mixed integer linear programming
6. end-of-life (EOL)
7. crowding distance
8. non-domination

### منابع (References)

1. Fleischmann, M. "Reverse logistics network structures and design", ERIM Report Series Reference No. ERS-2001-52-LIS (2003).
2. Kara, S., Rugrungruang, F. and Kaebnick, H. "Simulation modelling of reverse logistics networks", *International Journal of Production Economics*, **106**(1), pp. 61-69 (2007).
3. Realff, M.J., Ammons, J.C. and Newton, D. "Strategic design of reverse production systems", *Computers & Chemical Engineering*, **24**(2), pp. 991-996 (2000).
4. Pati, R.K., Vrat, P. and Kumar, P. "A goal programming model for paper recycling system", *Omega*, **36**(3), pp. 405-417 (2008).
5. Barros, A.I., Dekker, R. and Scholten, V. "A two-level network for recycling sand: A case study", *European Journal of Operational Research*, **110**(2), pp. 199-214 (1998).
6. Schultmann, F., Zumkeller, M. and Rentz, O. "Modeling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from the automotive industry", *European journal of operational research*, **171**(3), pp. 1033-1050 (2006).
7. Wang, Z. and Bai, H. "Reverse logistics network: A review", In *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2010 IEEE International Conference on, pp. 1139-1143, IEEE (December 2010).
8. Fleischmann, M., Beullens, P., Bloem'hof-Ruwaard, J.M. and Wassenhove, L.N. "The impact of product recovery on logistics network design", *Production and Operations Management*, **10**(2), pp. 156-173 (2001).
9. Salema, M.I.G., Barbosa-Povoa, A.P. and Novais, A.Q. "An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty", *European Journal of Operational Research*, **179**(3), pp. 1063-1077 (2007).
10. Kannan, G., Sasikumar, P. and Devika, K. "A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling", *Applied Mathematical Modelling*, **34**(3), pp. 655-670 (2010).
11. Schultmann, F., Zumkeller, M. and Rentz, O. "Modeling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from the automotive industry", *European Journal of Operational Research*, **171**(3), pp. 1033-1050 (2006).
12. Savaskan, R.C., Bhattacharya, S. and Van Wassenhove, L.N. "Closed-loop supply chain models with product re-manufacturing", *Management Science*, **50**(2), pp. 239-252 (2004).
13. Cruz-Rivera, R. and Ertel, J. "Reverse logistics network design for the collection of end-of-life vehicles in Mexico", *European Journal of Operational Research*, **196**(3), pp. 930-939 (2009).
14. Min, H. and Ko, H.J. "The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers", *International Journal of Production Economics*, **113**(1), pp. 176-192 (2008).
15. Shih, L.H. "Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan", *Resources, Conservation and Recycling*, **32**(1), pp. 55-72 (2001).
16. Du, F. and Evans, G.W. "A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service", *Computers & Operations Research*, **35**(8), pp. 2617-2634 (2008).
17. Pishvae, M.S., Jolai, F. and Razmi, J. "A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design", *Journal of Manufacturing Systems*, **28**(4), pp. 107-114 (2009).
18. Pishvae, M.S., Farahani, R.Z. and Dullaert, W. "A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design", *Computers & Operations Research*, **37**(6), pp. 1100-1112 (2010).
19. Demirel, N.Ö. and Gökçen, H. "A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **39**(11-12), pp. 1197-1206 (2008).
20. Lee, J.E., Gen, M. and Rhee, K.G. "Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm", *Computers & Industrial Engineering*, **56**(3), pp. 951-964 (2009).
21. Listes, O. and Dekker, R. "A stochastic approach to a case study for product recovery network design", *European Journal of Operational Research*, **160**(1), pp. 268-287 (2005).
22. Das, K. and Chowdhury, A.H. "Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning", *International Journal of Production Economics*, **135**(1), pp. 209-221 (2012).
23. El-Sayed, M., Afia, N. and El-Kharbotly, A. "A stochastic model for forward-reverse logistics network design under risk", *Computers & Industrial Engineering*, **58**(3), pp. 423-431 (2010).

24. Chouinard, M., D'Amours, S. and Ait-Kadi, D. "A stochastic programming approach for designing supply loops", *International Journal of Production Economics*, **113**(2), pp. 657-677 (2008).
25. Liu, G.P., Yang, J.B. and Whidborne, J.F., *Multiple Objective Optimisation*, In Multiobjective Optimization and Control, pp. 73-123 Research Studies Press LTD, Hertfordshire, England (2004)
26. Jayaraman, V., Patterson, R.A. and Rolland, E. "The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures", *European Journal of Operational Research*, **150**(1), pp. 128-149 (2003).
27. Coello, C.A.C., Lamont, G.B. and Veldhuizen, D.A.V., *MOP Evolutionary Algorithm Approaches*, Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems: Second Edition, pp. 61-130 (2007).