مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۳۹۳)
دوره‌ی ۱ - ۳۰، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۴۱-۵۰

Original Article

ارائه‌ی یک مدل ترکیبی برنامه‌ریزی تولید ـ کنترل موجودی غیر قطعی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته

علیرضا طاهری مقدم* (دانشجوی کارشناسی ارشد)
راشد صحرائیان (استادیار)
دانشکده‌ی فنی‌مهندسی، دانشگاه شاهد

در این پژوهش یک مدل غیر قطعی زنجیره‌ی تأمین با حلقه‌ی بسته، توسعه داده شده است. تابع هدف در این مدل، بیشینه‌سازی سود کل زنجیره با در نظر گرفتن هزینه‌های تولید، بازتولید، برگشت، موجودی، برون‌سپاری (تولید، بازتولید، برگشت)، دورریز و بازیافت است. به‌دلیل در نظر گرفتن هزینه‌های موجودی، مدل مذکور چنددوره‌یی است و سعی شده نسبت به مدل‌های قبل کمی به واقعیت نزدیک‌تر باشد. برای یافتن جواب بهینه در این مدل، از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در انتها نیز چندین مثال عددی با این روش حل شده که نتایج آن بیان‌گر کارایی خوب رویکرد پیشنهادی و قابلیت‌ها و فواید آن در تصمیم‌گیری‌های میان‌مدت است.

واژگان کلیدی: زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته، الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی تولید، کنترل موجودی، مدل‌سازی عدم قطعیت.

a.taherimoghadam@shahed.ac.ir
sahraeian@shahed.ac.ir

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر از یک سو به‌دلیل افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و وضع قوانینی در این زمینه از سوی دولت‌ها، و از سوی دیگر با مد نظر داشتن محدودیت منابع کره زمین، شاهد توجهات روزافزون محققین به زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته هستیم، به‌طوری که در این زمینه صدها پژوهش در نشریات معتبر عملیاتی و مدیریتی به چاپ رسیده است.[۱] علاوه براین، زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته در صنعت نیز کاربرد گسترده‌یی دارد. در ایالات متحده ۷۳۰۰۰ شرکت و مؤسسه به نوعی از زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته بهره می‌برند.[۲]

در بسیاری از صنایع، تولیدکنندگان قطعات یدکی (OEM)[۱] به‌خوبی از مزایای بازیافت و بازتولید بهره می‌برند، چرا که این‌گونه شرکت‌ها دانش بیشتری نسبت به بازار و محصول دارند. همچنین شرکت‌های فعال در این زمینه قادرند با هدف بهینه‌سازی ارزش کل زنجیره (حلقه‌بسته) به‌طور هم‌زمان به فعالیت‌های تولید و بازتولید بپردازند.[۳] به‌عنوان مثال شرکت کداک[۲] دوربین‌های یک‌بار مصرف استفاده شده را برای استفاده‌ی مجدد از مشتریان (بازار) جمع‌آوری می‌کند.[۴] استراتژی‌های مشابه بسیاری را می‌توان در صنایع مختلف ــ نظیر چاپگرها، ماشین‌های الکترونیکی و قطعات ماشین ــ مشاهده‌کرد.[۴و۵] بازتولید محصولات استفاده شده و برگرداندن آن‌ها به بازار، نه‌تنها برای محیط زیست و مشتریان سودآور است، بلکه با این کار هزینه‌های تولید نیز کاهش خواهد یافت.

در برنامه‌ریزی برای پیاده‌سازی یک سیستم حلقه‌بسته، شرکت‌ها با چالش‌های بسیاری روبه‌رو هستند که اولین آن‌ها «تأمین تقاضا»ست. در این سیستم دو راه برای تأمین تقاضا وجود دارد: ۱. تولید محصول با استفاده از مواد خام؛ ۲. بازتولید محصولات مستعمل (استفاده‌ی مجدد از قطعات سالم و تعویض قطعات معیوب). دومین چالش پیش روی شرکت‌ها «عدم قطعیت» است؛ یعنی تقاضا و برگشت هردو دارای عدم قطعیت‌اند. سومین چالش مربوط به «ظرفیت» است که معمولاً ظرفیت تولید و بازتولید محدود است. هنگامی که ظرفیت محدود است، دست‌یابی به سیاست تخصیص بهینه دشوار خواهد بود. به‌علاوه کیفیت و زمان بازتولید محصولات برگشتی (مستعمل) کاملاً غیرقطعی است.[۳] محققین مدلی پیشنهاد می‌دهند[۶] که در آن برنامه‌ریزی جمع‌آوری محصولات برگشتی جریان برگشت را کنترل می‌کند. به‌طوری که تولیدکننده طبق برنامه‌ریزی صورت‌گرفته کیفیت و میزان برگشت را کنترل می‌کند. به این ترتیب از عدم قطعیت کیفیت، کمیت و همچنین زمان بازتولید کاسته خواهد شد.

در دهه‌های اخیر جنبه‌های مختلفی از زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته (CLSC)[۳] مورد تحقیق قرار گرفته است؛ ازجمله پیش‌بینی، برنامه‌ریزی تولید، کنترل موجودی، مدیریت و مکان‌یابی. در این تحقیق هدف بیشینه‌سازی سود کل زنجیره است و در آن، جنبه‌های جمع‌آوری محصولات مستعمل، برنامه‌ریزی تولید/بازتولید، کنترل موجودی، برون‌سپاری (تولید، بازتولید، برگشت)، دورریز و بازیافت مد نظر بوده است.

هنگامی که فعالیت‌های تولید و بازتولید در یک سیستم حلقه‌بسته می‌گنجد،

---

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۲/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۱/۲۸، پذیرش ۱۳۹۲/۳/۲۵.

اصلی‌ترین چالش «هماهنگی بین فرایندهای تولید و بازتولید» است. محققین برای برنامه‌ریزی تولید و کنترل موجودی یک سیستم حلقه‌بسته مدلی پیشنهاد داده‌اند[۷] که در آن فعالیت‌های تولید و بازتولید به‌طور همزمان در نظر گرفته شده و از تمامی محصولات (تولیدی و بازتولیدی) می‌توان برای برآورده‌سازی تقاضای مشتریان بهره‌مند شد. آن‌ها در مطالعات خود دو استراتژی کنترل را مورد بررسی قرار داده‌اند: ۱. استراتژی فشارکه در آن تمامی محصولات برگشتی در اولین فرصت بازتولید می‌شوند؛ ۲. استراتژی کششی که در آن تمامی محصولات برگشتی حتی‌الامکان دیرتر بازتولید می‌شوند (تا زمانی که تقاضا نداشته باشند، تولید نمی‌شوند). در یکی از بررسی‌های انجام‌شده درخصوص حالت‌های بهینه‌ی یک سیستم هیبریدی تولید/بازتولید،[۸] محصولات نو می‌توانند هنگام کمبود جایگزین محصولات بازتولیدی شوند و چنانچه میزان بازتولید به حد کافی زیاد باشد، محصولات نو تولید نخواهد شد.

در یکی از سیستم‌های ترکیبی پیشنهادی برای تولید و بازتولید،[۹] با استفاده از نظریه‌ی کنترل و شبیه‌سازی، عملکرد پویای سیستم ترکیبی تجزیه و تحلیل می‌شود. همچنین پژوهش‌گران یک چهارچوب مدل‌سازی برای تجزیه و تحلیل استراتژی‌های توالی (تقدم و تأخر) و هماهنگی بین تولید و بازتولید در یک سیستم هیبریدی معرفی کرده‌اند.[۴] از سوی دیگر یک مدل عدد صحیح (MIP) چنددوره‌یی و چندمحصولی ارائه کرده‌اند[۵] که در آن محصولات برگشتی برای بازتولید دمونتاژ می‌شوند. در این مدل، تولیدکننده برای تأمین قطعات دو انتخاب دارد: ۱. درخواست قطعه از تأمین‌کنندگان سطح بالاتر؛ ۲. انجام تعمیرات اساسی روی محصولات مستعمل و استفاده‌ی دوباره از آن‌ها. دیگر محققین نیز یک مدل عددصحیح جایابی تسهیلات را در حوزه‌ی لجستیک معکوس بسط دادند.[۱۰] نقطه‌ی قوت مدل آن‌ها ارتباط قیمت محصولات با زمان است.

در مدل توأمان EOQ و EPQ که محققین برای کنترل موجودی در یک سیستم حلقه‌بسته ارائه داده‌اند[۱۱] می‌توان تقاضا را از طریق خرید محصولات نو یا بازتولید محصولات مستعمل ارضاء کرد. در مطالعات به‌عمل آمده درخصوص سیستم لجستیک معکوس در محیط تولید ناب[۱۲] هماهنگی ظرفیت بین تولید و بازتولید مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و درباره‌ی یافتن سیاست بهینه برای این‌گونه سیستم‌ها بحث شده است.

در یک سیستم حلقه‌بسته تولیدکننده علاوه بر ایجاد هماهنگی در فرایند تولید، باید به ایجاد توازن در عدم قطعیت تقاضا و برگشت نیز توجه داشته باشد. ازجمله مواردی که باعث ایجاد پیچیدگی در سیستم‌های بازتولید می‌شوند، می‌توان به ایجاد توازن بین تقاضا و برگشت، و نیز عدم قطعیت در کیفیت و کمیت محصولات برگشتی اشاره کرد.[۱۳] در تجزیه و تحلیل مسئله‌ی کنترل موجودی در سیستم‌های حلقه‌بسته[۱۴] محققین فرض کردند که تقاضا و برگشت به یکدیگر وابسته نیستند و از توزیع پواسون تبعیت می‌کنند. در مطالعه‌ی کنترل موجودی در یک مدل لجستیک معکوس،[۱۵] با استفاده از فرایند مارکوف تأثیر میزان برگشت محصول بر برنامه‌ی بهینه‌ی موجودی بررسی شد. مطالعه درخصوص چالش‌های بازیافت محصول در یک سیستم حلقه‌بسته[۱۶] نشان داد که توازن فعالیت‌های تولید، بازیافت و معدوم کردن محصولات باید با درنظرگرفتن عدم‌قطعیت تقاضا و برگشت صورت گیرد.

محققین در مطالعات خود چهارچوبی برای تحلیل جذابیت‌های اقتصادی بالفعل بازتولید محصولات ارائه کردند.[۶] تجربیات آن‌ها نشان می‌دهد که بهتر است هنگام جمع‌آوری محصولات مستعمل به کیفیت آن‌ها توجه شود؛ همچنین می‌توان از مدیریت برگشت محصولات مستعمل به‌عنوان اصلی‌ترین ابزار کنترل میزان برگشت استفاده کرد. در سیستم بازتولیدی که آنان[۱۷] پیشنهاد می‌کنند کیفیت و کمیت محصولات برگشتی به قیمت برگشت (قیمت خرید محصولات مستعمل از بازار) بستگی دارد. همچنین آن‌ها برای ارزیابی مدل خود، از آن در صنعت تلفن همراه بهره گرفته‌اند.

در مطالعات بعدی، محققین یک مدل جامع تولید ـ بازیافت ارائه کردند[۱۸] که هدف آن کمینه‌سازی هزینه‌ی کل بود. نتایج حاصل از این مطالعه بیان می‌دارد که بهتر است تولیدکننده فقط محصولاتی را که قابل بازیافت و بازتولید است جمع‌آوری کند. در مدل غیرخطی که برای مدل‌سازی مسئله‌ی برنامه‌ریزی تولید معکوس و قیمت‌گذاری در صنعت اتومبیل‌سازی پیشنهاد شد،[۱۹] میزان برگشت محصولات مستعمل تابعی است از قیمت برگشت محصولات. به‌علاوه، قیمت برگشت نیز براساس هزینه‌های تولید و میزان پیش‌بینی شده برای قیمت فروش محصولات بازتولید شده تعیین می‌شود. برای ارزیابی قیمت برگشت محصولات مستعمل نیز مدلی ارائه شده است.[۲۰] مدیریت برگشت محصولات مستعمل، ابزار شناخته شده و کارایی است برای کنترل عدم قطعیت کیفیت، کمیت و زمان‌بندی میزان برگشت، ولی هنوز خلاءهایی در زمینه‌ی چگونگی تجمیع آن با برنامه‌ریزی تولید و فعالیت‌های دیگر زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته وجود دارد.[۳]

در بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۵ بیش از ۱۸۰ پژوهش در زمینه‌ی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته منتشر شده است.[۱] سیستم‌های حلقه‌بسته شامل ورودی، فرایند، ساختار و خروجی هستند که همگی آن‌ها به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. ولی اکثر مدل‌های ریاضی موجود در این زمینه، قطعی بوده و به ذات غیرقطعی تقاضا و برگشت در این‌گونه مسائل توجه کافی نشده است.[۲۱] برای بیشینه‌سازی سود زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته، دسترسی به مدلی جامع لازم و ضروری است. از سوی دیگر، هنگامی که جنبه‌های مختلف در یک مدل تجمیع می‌شوند، حل آن بسیار پیچیده می‌شود. بنابراین ارائه‌ی یک شیوه‌ی حل کارا برای مدل جامع بسیار ضروری است.[۳] محققین یک مدل حلقه‌بسته‌ی برنامه‌ریزی تولید چندمحصولی ارائه کردند[۳] که در آن میزان تقاضا و برگشت غیرقطعی است، و میزان و کیفیت محصولات برگشتی تابعی از قیمت برگشت در نظر گرفته شده است. در این مدل تولیدکننده توانایی تعیین قیمت برگشت محصولات و همچنین کیفیت محصولات برگشتی را دارد. برای حل این مدل رویکرد آزادسازی لاگرانژ پیشنهاد شده که روش خوبی برای یافتن جواب نزدیک به بهینه به نظر می‌رسد. با حل مدل مذکور توسط الگوریتم ژنتیک[۲۲] نیز، کیفیت جواب بهبود بخشیده شد.

در جدول ۱ نمایی از ادبیات این حوزه به‌صورت خلاصه ارائه شده است. با توجه به آنچه که در ادبیات موضوع مشاهده می‌شود، هنوز خلاءهایی در زمینه‌های کنترل موجودی و عدم قطعیت در مدل‌ها مشاهده می‌شود. البته در حوزه‌های دیگر زنجیره‌ی تأمین، به‌خوبی به مبحث کنترل موجودی پرداخته شده ولی در حوزه‌ی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته و با در نظرگرفتن عدم قطعیت، تحقیقاتی که کنترل موجودی را نیز در مدل خود گنجانده باشند بسیار معدودند.

هزینه‌های موجودی یکی از مهم‌ترین هزینه‌ها در بنگاه‌های تولیدی محسوب شده و کنترل آن‌ها می‌تواند میزان سرمایه در گردش و بالتبع آن میزان سودآوری، رقابت‌پذیری و سطح خدمت را افزایش دهد. از طرف دیگر معمولاً نمی‌توان در هر دوره میزان ظرفیت کارخانه را تغییر داد و در نظرگرفتن ظرفیت بالا در همه‌ی دوره‌ها نیز هزینه‌های سربار را افزایش خواهد داد. به‌همین دلیل به نظر می‌رسد در مدل‌های غیر قطعی یکی از بهترین روش‌ها برای پاسخ‌گویی به تقاضا، در نظرگرفتن موجودی باشد. البته این قابلیت باعث افزایش پیچیدگی مدل نیز خواهد شد. برای در نظرگرفتن موجودی، مدل باید چنددوره‌یی فرض شود؛ برای مدل‌های تک‌دوره‌یی هزینه‌ی موجودی معنایی ندارد. همچنین در مدل‌های غیر قطعی، به‌دلیل عدم قطعیت تقاضا، محاسبه‌ی میزان موجودی و هزینه‌ی آن پیچیدگی مدل را افزایش می‌دهد. برای محاسبه‌ی هزینه‌ی موجودی از دو روش می‌توان بهره جست. روش

جدول ۱. مرور برخی از مدل‌های حوزه‌ی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌ی بسته.

سال انتشار	نویسنده	خصوصیات مدل					متغیرها				توابع هدف		
		تعداد سطوح	چند دوره‌یی	چند محصولی	پارامترها: قطعی	پارامترها: غیرقطعی	ارضای تقاضا	مکان یابی ـ تخصیص	ظرفیت	حمل و نقل	موجودی	سود/ هزینه	پاسخ گویی	زیست محیطی
۲۰۰۹	لی و همکاران	۴			•			•		•		•		
۲۰۰۹	ینگ و همکاران	۶			•			•		•	•	•		
۲۰۰۹	پوخارل و همکاران	۵	•			•	•	•	•	•		•		
۲۰۰۹	آمارو و همکاران	۴	•			•				•	•	•		
۲۰۰۹	پن و همکاران	۵	•		•		•		•	•	•	•		
۲۰۰۹	متوم و کنگپول	۳		•	•		•			•		•	•	
۲۰۱۰	السید	۷	•		•			•		•		•		
۲۰۱۰	پیشوایی و همکاران	۵			•			•	•	•		•		
۲۰۱۰	ونگ و همکاران	۶			•			•		•		•		
۲۰۱۰	پیشوایی و ترابی	۵	•			•		•		•	•	•	•	
۲۰۱۰	ویلیام و همکاران	۴	•	•	•			•				•		
۲۰۱۰	کانان و همکاران	۶	•	•	•			•		•		•		
۲۰۱۰	ینگ و همکاران	۴			•			•		•		•		
۲۰۱۰	ونگ و همکاران	۵				•	•			•		•		
۲۰۱۱	شی و همکاران	۴		•		•	•					•		
۲۰۱۱	پیشوایی و همکاران	۵				•	•	•		•	•	•		
۲۰۱۱	کنه و همکاران	۷	•			•				•	•	•		
۲۰۱۱	لاندین و همکاران	۴				•	•	•	•	•		•		
۲۰۱۱	پاکسوی و همکاران	۱۰		•	•					•		•		
۲۰۱۱	وی و همکاران	۴				•	•		•			•		
۲۰۱۲	ونگ و همکاران	۳		•	•			•		•		•		•
۲۰۱۲	نیلر و همکاران	۲		•	•		•			•				•
	مدل پیشنهادی	۵	•			•	•		•		•	•		•

اول در نظر گرفتن یک سطح خدمت است؛ به‌عنوان مثال در سطح خدمت ۹۵ درصد، همیشه مقداری موجودی اطمینان در انبار ذخیره شده تا مطمئن شویم ۹۵ درصد تقاضاها با کمبود مواجه نخواهند شد. در روش دوم می‌توان روی ارضای تقاضا سناریو تعریف کرد. در این مطالعه از روش دوم استفاده شده است که در آن، هنگام دریافت تقاضا چنانچه موجودی کافی باشد، آن را ارضا کرده و در صورتی که تقاضا بیش از موجودی باشد، فقط به‌اندازه‌ی میزان موجودی عرضه خواهیم داشت و مابقی تقاضا با کمبود (فروش از دست رفته) مواجه می‌شود. به این ترتیب تابع هدف میزان موجودی را در حد بهینه نگه‌داری کرده و نیازی به تعریف سطح خدمت نیست.

در این مقاله مدل ارائه شده توسط شی و همکاران[۳] (که قبلاً توضیح داده شد)، با هدف گنجاندن قابلیت‌های کنترل موجودی و برون‌سپاری (تولید، بازتولید، برگشت) بسط داده شده است. همچنین در مدل شی و همکاران[۳] فرض شده است که تمامی محصولات برگشتی قابل بازتولیدند ولی در این مدل این فرض نقض شده و با این فرض که ممکن است درصدی از محصولات برگشتی قابل بازتولید نباشند، مدل‌سازی انجام شده است. به‌همین دلیل هزینه‌هایی نیز تحت هزینه‌های بازیافت و دورریز در نظر گرفته می‌شوند. البته پس از بازیافت محصولات مستعمل، می‌توان آن‌ها را به‌عنوان مواد خام به فروش رساند و مقداری از این هزینه‌ها را جبران کرد. برای حل این مدل، از رویکرد الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

نتایج حاصله حاکی از این امر است که با رویکرد حل مورد نظر، جواب‌های بسیار نزدیک به جواب بهینه به‌خوبی پیدا شده و اطلاعات مفیدی در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار خواهد گرفت. این اطلاعات برای تصمیمات سطوح میان‌مدت بسیار مفید خواهد بود.

ساختار این مقاله به این صورت است: در قسمت بعد مدل و فرضیات آن معرفی می‌شود. سپس مدل معرفی شده به‌صورت برنامه‌ریزی غیرخطی مدل‌سازی می‌شود (بخش سوم). در ادامه، در بخش چهارم به معرفی رویکرد حل پرداخته‌ایم و در قسمت پنجم برای توضیح بیشتر مدل، رویکرد حل و ارزیابی آن، یک مثال عددی حل شده است. در قسمت ششم برای ارزیابی روش حل، ۳۶۰ مثال عددی شدنی به‌صورت تصادفی تولید و حل شده است. قسمت پایانی نیز به نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای تحقیقات آتی اختصاص داده شده است.

۲. معرفی مدل

مدل پیشنهاد شده در این نوشتار یک مدل برنامه‌ریزی تولید و کنترل موجودی تک‌دوره‌یی برای یک سیستم حلقه‌بسته است که در آن تقاضا و برگشت غیرقطعی‌اند. از جمله کاربردهای این مدل می‌توان به محصولات با طول عمر کم ــ مانند دوربین‌های

یک‌بار مصرف، کارتریج‌های پرینتر و دستگاه کپی و قطعات رایانه ــ اشاره کرد.

در این مدل فرایند تولید انعطاف‌پذیر، و تولیدکننده قادر به تولید یا بازتولید محصولات فرض می‌شود. در فرایند بازتولید، محصولات مستعمل از دارندگان آن‌ها خریداری شده و در موجودی‌های قابل بازیافت ذخیره خواهد شد. سپس به‌ترتیب سفارشات، محصولات مستعمل وارد سایت تولید می‌شوند. در سایت تولید محصولات مستعمل دمونتاژ و بازرسی می‌شوند، و اجزایی که عملکرد خوبی دارند مجدداً مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این حالت اجزاء با کیفیت پایین‌تر تعمیر یا تعویض می‌شوند، و اجزایی که قابلیت بازتولید ندارند نیز بازیافت یا معدوم می‌شوند. بازیافت و معدوم کردن قطعات هزینه‌بر است، اما قطعات بازیافتی را می‌توان در بازار به‌عنوان مواد خام به فروش رساند. در این نوشتار فرض بر این است که تمامی قطعات، قابل بازیافت (به مواد خام) هستند و این ظرفیت واحد بازیافت است که میزان بازیافت را محدود می‌کند. پس از فرایند بازتولید، محصولات برگشتی مانند محصولات نو فرض می‌شوند و به‌همراه محصولات نو در رده‌ی موجودی محصولات قابل فروش قرار خواهند گرفت. معمولاً مقدار محصولات بازتولیدی کم‌تر از مقدار تقاضاست و به‌همین دلیل تولیدکننده مجبور است محصولاتی را نیز با استفاده از مواد خام تولید کند. این مدل یک مدل ترکیبی تولید/بازتولید محسوب می‌شود. مفروضات مدل عبارت است از:

- بین محصولات نو و محصولات بازتولیدی تفاوتی وجود ندارد و این محصولات باهم و با یک قیمت عرضه می‌شوند.
- تمامی محصولات برگشتی قابل بازتولید نیستند.
- تقاضای محصولات احتمالی است و در دوره‌های مختلف تغییر خواهد کرد. ولی تقاضای دوره‌های مختلف به یکدیگر وابسته نیست.
- مقدار برگشت وابسته به قیمت و احتمالی است. همچنین رابطه‌ی بین مقدار برگشت و قیمت برگشت محصولات مستعمل، مقداری معلوم است و از این رابطه به‌دست می‌آید: $a + bPr_i + u$ که در آن Pr_i قیمت برگشت محصول در دوره i بوده و u عددی تصادفی است که از توزیع یکنواخت گسسته در بازه $[ar, br]$ تبعیت می‌کند؛ به‌علاوه $a \geq 0$ و $b > 0$ است.[۳]
- هزینه‌ی بازتولید شامل هزینه‌ی صرف شده برای برگشت محصولات نیست. ولی هزینه‌های دمونتاژ، بازرسی، تضمین کیفیت، تعمیر، بازتولید، هزینه‌ی قطعاتی که باید تعویض شوند و سایر هزینه‌های مدیریتی را شامل می‌شود.[۳]
- هزینه‌ی تولید محصول جدید هزینه‌های تولید، مواد خام و قطعات، مونتاژ و سایر هزینه‌های مدیریتی را شامل می‌شود.[۳]
- از آنجا که در این مدل هزینه‌های موجودی نیز مد نظر قرار می‌گیرند، برخلاف مدل شی و همکاران،[۳] این مدل چنددوره‌یی است و کمبود موجودی غیرمجاز فرض می‌شود.
- به‌علت پیچیدگی مدل در حالت چنددوره‌یی و برای اجتناب از پیچیدگی بیش از حد، این مدل تک‌محصولی فرض شده، ولی قابلیت تبدیل به مدل چندمحصولی را دارد.
- در این مدل قیمت‌گذاری محصولات تولیدی نیز جزء متغیرهای تصمیم بوده و رابطه‌ی آن با تقاضای محصول به‌صورت $\mu_i^d = -Prs_i \times coee + Prz_i$ فرض می‌شود، که پارامترهای آن در قسمت مدل‌سازی معرفی شده است.
- به‌دلیل غیرمجاز بودن کمبود در این مدل، فرض می‌شود تولیدکننده قادر است قسمتی از برگشت را برون‌سپاری کند تا به این طریق میزان کمبود را جبران سازد. قیمت برون‌سپاری جمع‌آوری محصولات مستعمل متأثر از قیمت برگشت محصول است و رابطه‌ی $Bo_i = coe \times Pr_i$ بین آن‌ها برقرار است. پارامترهای این رابطه نیز در قسمت سوم معرفی شده است.

۳. مدل‌سازی

اندیس‌ها و پارامترهای مدل به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

i $(i = 1, ..., I)$: اندیس دوره‌ها؛

پارامترها:

h: هزینه‌ی نگه‌داری محصول تولید/بازتولید شده؛

hr: هزینه‌ی نگه‌داری محصول برگشتی؛

Cp: هزینه‌ی تولید محصول نو (با احتساب مواد اولیه)؛

Cr: هزینه‌ی بازتولید محصول برگشتی (کم‌تر از cp)؛

Cop: هزینه‌ی برون‌سپاری تولید محصول نو (با احتساب مواد اولیه)؛

cor: هزینه‌ی برون‌سپاری بازتولید محصول برگشتی (کم‌تر از Cop)؛

ms: مقدار منبع مورد نیاز برای تولید محصول؛

rs: مقدار منبع مورد نیاز برای بازتولید محصول (کم‌تر از ms)؛

PC: ظرفیت منبع؛

$f^d(i), F^d(i)$: تابع چگالی و تابع توزیع تجمعی تقاضای محصول؛

$\sigma^d(i)$: انحراف معیار تقاضای محصول؛

$f^r(i), F^r(i)$: تابع چگالی و تابع توزیع تجمعی مقدار تصادفی برگشت؛

$\mu^r(i), \sigma^r(i)$: میانگین و انحراف معیار تقاضای محصول؛

L: هزینه‌ی دورریز هر واحد محصول برگشتی غیرقابل بازتولید؛

Re: سود (ناخالص) حاصل از بازیافت هر واحد محصول برگشتی غیر قابل بازتولید به مواد خام؛

$CaRe$: ظرفیت سایت بازیافت محصولات به مواد خام؛

Mar: بیشترین میزان محصولاتی که در بازار هستند و می‌توان آن‌ها را برگرداند؛

Prz_i: تقاضای بیشینه (قیمت فروش صفر)؛

$Prz_i/coee$: قیمت بیشینه (تقاضا صفر)؛

coe: ضریب تبدیل Pr به Bo؛

rr: درصد قابل بازتولید از محصولات برگشتی (فقط برای برگشتی‌هایی که برون‌سپاری نشده‌اند)؛

متغیرهای تصمیم:

Xp_i: تولید محصول نو؛

Pr_i: قیمت برگشت محصول؛

Prs_i: قیمت فروش محصول؛

Xr_i: مقدار بازتولید؛

Xpo_i: میزان برون‌سپاری تولید محصول نو؛

Xro_i: میزان برون‌سپاری بازتولید؛

XBo_i: میزان برون‌سپاری جمع‌آوری؛

R_i: میزان بازیافت به مواد خام؛

سایر متغیرها: این‌گونه متغیرها به خودی خود متغیر تصمیم نیستند و توسط پارامترها و متغیرهای تصمیم محاسبه می‌شوند.

Ip_i: موجودی محصولات (تولید/بازتولید شده)؛

Ir_i: موجودی محصولات برگشتی؛

$\mu^d(i)$: میانگین تقاضای محصول؛

Bo_i: هزینه‌ی برون‌سپاری جمع‌آوری هر واحد محصول مستعمل.

با توجه به پارامترها و متغیرهای تعریف شده، می‌توان مسئله‌ی مورد نظر را چنین مدل‌سازی کرد:

$$Maxz = \sum_{i=1}^{I} \left\{ \begin{array}{l} \left[\int_{0}^{\infty} Prs_i \times f_i^d(D_i)\, dD_i\right] + R_i \times Re \\ -[(Xp_i \times Cp) + (Xpo_i \times Cop)] \\ -[Xr_i \times Cr + Xro_i \times cor] \\ -\left[\int_{0}^{\infty} (a + b \times Pr_i + U) \times Pr_i \times f_i^r(u)\, du + XBo_i \times Bo_i\right] \\ -[Ip_i \times h + Ir_i \times hr] \\ -\left[\left(\int_{0}^{\infty} (1 - rr)(a + b \times Pr_i + U) f_i^r(u)\, du - R_i\right) L\right] \end{array} \right\} \quad (1)$$

Subject to

$$Xp_i \times ms + Xr_i \times rs \leq PC \quad (2)$$

$$R_i \leq Min\{CaRe, (1 - rr)(a + b \times Pr_i + U)\} \quad (3)$$

$$Ip_i = [Xr_i + Xro_i] + [Xp_i + Xpo_i] + Ip_{i-1} - \int_{0}^{Xr_i + Xro_i + Xp_i + Xpo_i + Ip_{i-1}} D_i f_i^d(D_i) dD_i - (Xr_i + Xro_i + Xp_i + Xpo_i + Ip_{i-1}) \times \int_{Xr_i + Xro_i + Xp_i + Xpo_i + Ip_{i-1}}^{\infty} f_i^d(D_i) dD_i \quad (4)$$

$$Ir_i = Ir_{i-1} + [rr \times (a + b \times Pr_i + U) + XBo_i - (Xr_i + Xro_i)] \quad (5)$$

$$\mu_i^d = -Prs_i \times coee + Prz_i \quad (6)$$

$$(a + b \times Pr_i + U) + XBo_i \leq Mar \quad (7)$$

$$Bo_i = coe \times Pr_i \quad (8)$$

$$Ir_i \geq 0, \qquad Ip_i \geq 0 \quad (9)$$

تابع هدف برای بیشینه‌سازی سود کل طراحی شده است، که در آن عبارت اول برابر است با امید ریاضی کل عایدی ناشی از فروش محصولات. عبارت دوم امید ریاضی کل عایدی ناشی از فروش مواد خام حاصل از بازیافت است. عبارت سوم هزینه‌های تولید محصولات نو را شامل می‌شود. عبارت چهارم برای محاسبه‌ی هزینه‌های بازتولید به‌کار می‌رود. عبارت پنجم هزینه‌های جمع‌آوری را محاسبه می‌کند. عبارت ششم شامل هزینه‌های موجودی و انبار است. هزینه‌ی دورریز محصولات برگشتی غیر قابل استفاده نیز توسط عبارت هفتم محاسبه می‌شود. هریک از عبارات عایدی یا هزینه‌ی حاصل از یک دوره را محاسبه می‌کند و به‌همین علت تمامی عبارات، به‌ازای تمامی دوره‌ها محاسبه و با یکدیگر جمع می‌شوند.

تمامی محدودیت‌ها باید به‌ازای تمامی دوره‌ها برقرار باشد. محدودیت ۲، محدودیت ظرفیت تولیدکننده برای تولید و بازتولید است. محدودیت ۳ محدودیت ظرفیت بازیافت است. محدودیت ۴ برای محاسبه‌ی میزان موجودی محصول تولید /بازتولید در هر دوره استفاده می‌شود، به‌گونه‌یی که اگر موجودی محصولات در یک دوره بزرگ‌تر مساوی مقدار تقاضا در آن دوره باشد، به میزان تقاضا و در غیر این‌صورت به‌اندازه موجودی به بازار ارسال خواهد شد. از محدودیت ۵ برای محاسبه‌ی میزان موجودی محصولات برگشتی در هر دوره، و از محدودیت ۶ برای اعمال رابطه‌ی میان تقاضا و قیمت فروش و همچنین محدود کردن قیمت فروش، استفاده می‌شود. محدودیت ۷ تضمین می‌کند که میزان محصولات برگشتی در هر دوره از حد خود فراتر نرود. محدودیت ۸ هزینه‌ی برون‌سپاری جمع‌آوری محصولات مستعمل را محاسبه می‌کند. محدودیت ۹ تضمین می‌کند میزان موجودی‌های از صفر کم‌تر نشود. همچنین یادآور می‌شود که تمامی متغیرها جزء مجموعه‌ی اعداد حسابی‌اند، به‌جز متغیرهای Pr_i و Prs_i که هر دو جزء مجموعه‌ی اعداد حقیقی و غیر منفی‌اند.

۴. رویکرد حل

مدل ارائه شده یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی NP-hard است.[۳] به‌همین دلیل حل آن مشکل است و نیازمند الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری است. محققین برای یک مدل نسبتاً ساده‌تر (حالت خاصی از این مدل) روش آزادسازی لاگرانژ را پیشنهاد داده‌اند.[۳] اما در مطالعات بعدی[۲۲] برای همان مدل الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شد که کیفیت جواب مدل آزادسازی لاگرانژ[۳] را بهبود بخشید. به‌همین دلیل برای حل مدل ارائه شده در این نوشتار از رویکرد الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. در ادامه رویکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و تعیین پارامترهای آن برای حل مدل مذکور تشریح خواهد شد.

اولین قدم در الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری طرز نمایش جواب‌ها[۴]ست؛ در الگوریتم ژنتیک برای نمایش جواب‌ها از کروموزوم استفاده می‌شود. در الگوریتم پیشنهادی کروموزوم‌ها به‌صورت برداری از اعدادند که درایه‌ی اول معرف مقدار تابع هدف به‌ازای جواب مورد نظر است و درایه‌های بعدی به‌ترتیب Xp_i، Prs_i Pr_i، Xr_i، Xpo_i، Xro_i، XBo_i و R_i هستند. تعداد جمعیت اولیه در این الگوریتم ۱۰ انتخاب شده است. یعنی ابتدا تعداد ۱۰ جواب شدنی به‌صورت تصادفی تولید می‌شود. سپس برای تغییر جمعیت اولیه و یافتن جواب‌های بهتر از سه مرحله عبور می‌شود.

در مرحله‌ی اول کروموزوم‌های جواب اولیه را دو به دو به‌عنوان والدین در نظر گرفته و با احتمال ۰٫۵ هریک از درایه‌های آن‌ها با یکدیگر تعویض می‌شوند. به‌عبارت دیگر برای هر درایه یک بار یک عدد تصادفی با توزیع برنولی و احتمال پیروزی ۰٫۵ تولید می‌شود؛ اگر این عدد برابر با ۱ بود، درایه‌ی مورد نظر را در والدین جابه‌جا می‌کنیم (جز درایه‌ی اول که مقدار تابع هدف است و باید محاسبه شود). در این مرحله دقیقاً ۱۰ فرزند تولید می‌شود.

در مرحله‌ی دوم به‌ازای هریک از فرزندان تولیدشده در مرحله‌ی اول، یک عدد تصادفی برنولی با $p = 0{,}3$ تولید می‌شود، که اگر مقدار آن ۱ بود، یکی از درایه‌های فرزند مورد نظر را با یک عدد تصادفی طوری تعویض می‌کنیم که یک جواب شدنی حاصل شود. در این مرحله حداکثر ۱۰ فرزند دیگر تولید خواهد شد.

در مرحله‌ی سوم با احتمال ۰٫۳ تمامی درایه‌های همجنس را در فرزندان مرحله‌ی اول، به‌صورت تصادفی طوری تغییر می‌دهیم که یک جواب شدنی تولید

شود. (به‌عنوان مثال تمامی Xp_iها را برای یکی از فرزندان تغییر می‌دهیم.) در این مرحله نیز حداکثر ۱۰ جواب جدید تولید می‌شود.

در مرحله‌ی آخر یک عدد تصادفی (۰٫۲و۱۰) B تولید کرده و به اندازه‌ی آن عدد، جمعیت تصادفی شدنی تولید می‌شود. به‌عنوان مثال اگر متغیر تصادفی مورد نظر برابر با ۲ شد، ۲ جواب تصادفی تولید کرده و در مجموعه‌ی فرزندان قرار می‌دهیم. در این مرحله نیز حداکثر ۱۰ جواب جدید تولید می‌شود.

پس از تولید فرزندان، مقدار تابع هدف را برای تمامی فرزندان تولید شده محاسبه، و سپس شدنی‌بودن جواب‌ها را بررسی می‌کنیم. اگر جوابی نشدنی بود، مقدار تابع هدف آن را صفر در نظر می‌گیریم. سپس جواب‌ها را به‌ترتیب از بهترین جواب به بدترین جواب مرتب می‌کنیم و جواب‌های تکراری را از مجموعه‌ی جمعیت حذف می‌کنیم. پس از آن ۱۰ جواب برتر را به‌عنوان جمعیت اولیه در نظر گرفته و همین مراحل را ۱۰۰ بار تکرار می‌کنیم. شبه کد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در شکل ۱ قابل مشاهده است.

لازم به ذکر است که الگوریتم پیشنهادی دارای ۵ پارامتر است: اندازه جمعیت (۱۰)، پارامتر مربوط به عملگر تقاطع[5] که در واقع مربوط به احتمال تعویض هریک از کروموزوم‌ها در والدین برای تولید فرزندان جدید است (۰٫۵)، پارامترهای مربوط به جهش[6] که در الگوریتم پیشنهادی دو پارامتر برای آن تعریف شده است، احتمال جهش یکی از کروموزوم‌های هریک از فرزندان (۰٫۳) و احتمال جهش کلیه‌ی کروموزوم‌های همجنس یکی از فرزندان (۰٫۳)، و بالاخره پارامتر میزان مهاجرت که در واقع عددی تصادفی است که تعداد جمعیتی که در هر تکرار به‌صورت تصادفی تولید می‌شوند را مشخص می‌کند که از تابع چگالی B (۰٫۲و۱۰) تبعیت می‌کند.

برای به دست آوردن پارامترهای الگوریتم پیشنهادی از روش آزمون و خطا استفاده شده است، به‌گونه‌یی که ۱۳۰ جایگشت از این پارامترها در نظر گرفته شده و برای هر جایگشت ۱۰ مسئله‌ی تصادفی ۳ دوره‌یی و ۱۰ مسئله‌ی تصادفی ۶ دوره‌یی حل شده و میانگین زمان حل و میزان خطای بیشینه محاسبه شده است. با توجه به این دو پارامتر و با استفاده از رابطه‌ی ۱۰، بهترین جایگشت از پارامترها انتخاب شده است. در رابطه‌ی ۱۰، CH_t همان معیار سنجش هر جایگشت است که هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌گر بهتر بودن جایگشت است. E_t میانگین بیشترین درصد خطا را در هر جایگشت مشخص می‌کند. T_t میانگین زمان حل را در هر جایگشت مشخص می‌کند. در این تصمیم‌گیری ابتدا درصد خطا و زمان حل را هم‌مقیاس کرده (در بازه صفر و یک) و سپس جایگشت‌های مختلف را ارزیابی می‌کنیم. فرض می‌شود اهمیت میزان خطا نسبت به زمان حل ۲ برابر است.

$$CH_t = ۰٫۶۶ \times \frac{E_t - \min(E_t)}{\max(E_t) - \min(E_t)} + ۰٫۳۳ \times \frac{T_t - \min(T_t)}{\max(T_t) - \min(T_t)} \quad (۱۰)$$

۵. مثال عددی

در این قسمت رویکرد پیشنهادی توسط مسئله‌یی که داده‌های آن به‌صورت تصادفی تولید شده‌اند، ارزیابی می‌شود. لازم به ذکر است، کلیه‌ی الگوریتم‌ها توسط نرم‌افزار MATLAB R۲۰۱۰a کدنویسی شده‌اند.

مسئله‌ی تصادفی مذکور ۵ دوره‌یی است و تقاضای تمامی محصولات نرمال فرض می‌شود. همچنین u_i از توزیع یکنواخت گسسته در بازه $[ar, br]$ تبعیت می‌کند. ظرفیت منابع واحد تولیدی برابر با $PC = ۲۰۰۹۰$ در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای مسئله در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. مسئله‌ی مذکور با رویکرد پیشنهادی حل شده و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. برای ارزیابی جواب مسئله، یکی از محدودیت‌ها را در راستای بهینگی از مدل حذف کرده و آن را دوباره حل می‌کنیم. با این کار فضای جواب گسترده‌تر شده و درنتیجه جواب بهتری به دست می‌آید. در صورتی‌که جواب حاصل برای مسئله‌ی اصلی نشدنی نباشد، محدودیت حذف شده را برگردانده و محدودیت دیگری را در راستای بهینگی حذف و مسئله را دوباره حل می‌کنیم. از آنجا که جواب به دست آمده برای مسئله‌ی اصلی بهینه ولی نشدنی است، بنابراین از طریق مقایسه‌ی این دو جواب، به بیشینه خطای احتمالی که ممکن است در روش حل رخ داده باشد می‌توان پی برد و از این طریق رویکرد را ارزیابی کرد.

جدول ۲. سایر پارامترهای مسئله.

پارامتر	دوره (i)				
	۱	۲	۳	۴	۵
$\sigma^d(i)$	۲	۲	۵	۱	۱
ar_i	−۳	۵	۷	۸	۸
br_i	۱۱	۹	۱۱	۱۴	۱۷
Prz_i	۵۴۹۰	۴۳۸۰	۵۳۸۰	۴۳۷۰	۴۷۴۰

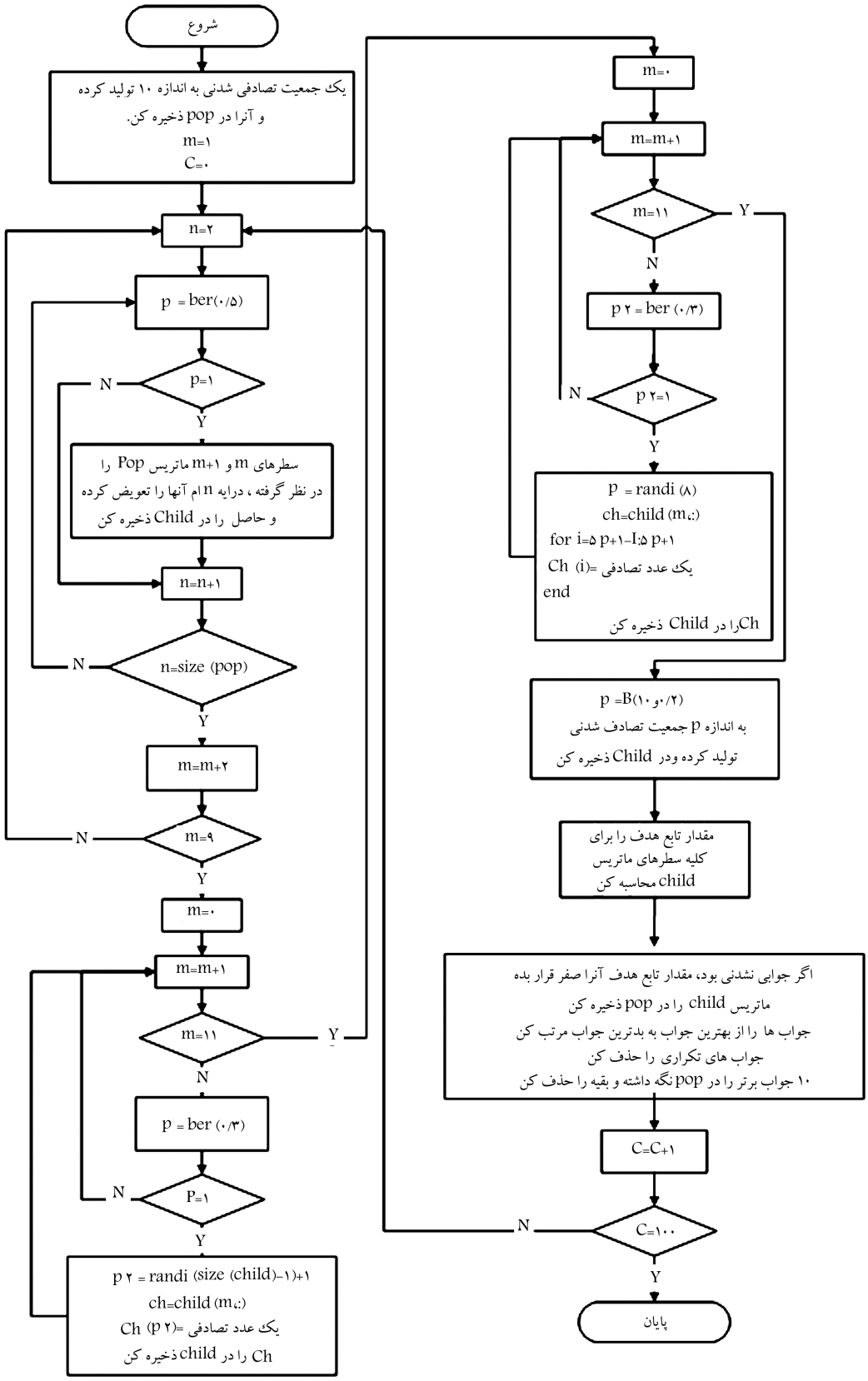
برای این کار، محدودیت ظرفیت بازیافت (محدودیت ۳) انتخاب می‌شود. دلیل این کار این است که این محدودیت بیشتر از محدودیت‌های دیگر به حد خود نزدیک شده و احتمالاً جواب بهینه روی مرز این محدودیت است. بنابراین با حذف این محدودیت، به جواب بهینه و نشدنی خواهیم رسید، که می‌توان آن را حد بالای نشدنی برای مسئله‌ی اصلی در نظر گرفت. پس از حذف این محدودیت، جواب بهینه برابر با ۳۷۳۳۸۵٫۸۳۷۸ به دست آمد که مقادیر متغیرهای تصمیم متناظر با آن در جدول ۵ ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود، در جواب مذکور، محدودیت ۳ به‌ازای دوره‌های اول و دوم برقرار نیست. بنابراین این جواب، یک جواب نشدنی است.

چنان که توضیح داده شده، حد بالای نشدنی مسئله‌ی مذکور را می‌توان ۳۷۳۳۸۵٫۸۳۷۸ در نظر گرفت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت رویکرد حل به‌خوبی عمل کرده و جواب حاصل از این رویکرد حداکثر ۲٫۷ درصد با جواب بهینه‌ی اصلی فاصله دارد.

۶. ارزیابی روش حل

در این بخش برای اعتبارسنجی مدل، ۳۶۰ مثال عددی به‌صورت تصادفی با ابعاد مختلف حل شده است. تنها پارامتر تأثیرگذار بر ابعاد مسئله، تعداد دوره‌های مورد بررسی (i) است. به‌همین دلیل، برای تغییر ابعاد مسئله فقط تعداد دوره‌ها مد نظر قرار گرفته‌اند. مسائل با ابعاد بین تک‌دوره‌یی تا دوازده‌دوره‌یی در این بخش مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

برای ارزیابی رویکرد حل در هریک از اندازه‌ها، ۳۰ مثال عددی شدنی به‌صورت تصادفی با مدل مذکور حل شده است. به‌عنوان مثال در مسئله‌ی تک‌دوره‌یی (سایز مسئله برابر با ۱) ابتدا یک مسئله‌ی تصادفی تولید شده و گام اول الگوریتم ژنتیک (یافتن ۱۰ جواب اولیه‌ی شدنی) آغاز می‌شود. پس از ۱۰۰ بار تکرار گام اول، چنانچه هیچ جواب شدنی برای مسئله یافت نشود آن مسئله نشدنی فرض شده و مسئله‌ی تصادفی دیگری با سایز ۱ تولید خواهد شد. اما چنانچه برای مسئله جواب شدنی یافت شود، بقیه‌ی گام‌های الگوریتم ژنتیک پیشنهادی تا یافتن جواب نزدیک بهینه



شکل ۱. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی.

جدول ۳. پارامترهای مسئله.

پارامتر	I	h	hr	Cp	Cr	Cop	cor	ms	rs
مقدار	۵	۰٫۰۳۴۰۸	۰٫۰۱۲۳	۰٫۰۵۴	۰٫۰۳۲	۰٫۰۶۵۹	۰٫۰۳۹	۱۰	۶
پارامتر	L	Re	CaRe	Mar	coee	coe	rr	a	b
مقدار	۰٫۰۰۹۷	۰٫۷۹۵	۲۲۸	۲۰۶	۰٫۰۶۲۶۵	۱٫۱۸۰۲	۰٫۸۸۴	۳	۲

جدول ۴. مقدار تابع هدف در نقطه‌ی بهینه‌ی به دست آمده و مقادیر متغیرهای تصمیم متناظر با آن.

Xp_i					Pr_i					Prs_i				
۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵
۶۷	۴۵	۱۳۸	۹۷	۱۶۴	۲	۵	۳	۹	۸	۸۳۴۱	۶۹۱۸۸	۸۱۷۰۰	۶۳۸۱۰	۶۸۰۶۳
Xr_i					Xpo_i					Xro_i				
۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵
۹۸	۳۴۹	۱۶۴۰	۱۵۶	۷۰	۱۰۷	۳۶۶	۲۸۸	۹۳	۱۴۷	۹۹	۶۲	۸۵	۲۸	۱۱۶
XBo_i					R_i					مقدار تابع هدف				
۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵					
۱۸	۴	۱	۲۵	۸	۶	۳	۴	۵	۶	۳۶۳۴۶۹٫۹۳۴۱				

جدول ۵. مقدار تابع هدف در نقطه‌ی بهینه و نشدنی به دست آمده و مقادیر متغیرهای تصمیم متناظر با آن.

Xp_i					Pr_i					Prs_i				
۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵
۲۲۶	۲۸۰	۱۱۱	۹	۲۵۹	۴	۴	۶	۹	۱۳	۸۱۴۲۱	۶۷۷۹۷	۸۵۴۳۷	۶۷۶۴۷	۷۵۲۲۹
Xr_i					Xpo_i					Xro_i				
۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵
۳۴۳	۱۳۱۱	۸۹۲	۱۵۶	۲۰	۶۹۱	۳۱۹	۲۷۹	۳۰۲	۹۸	۱۰۳	۱۱۵	۱۹	۳	۲۶
XBo_i					R_i					مقدار تابع هدف				
۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵					
۵	۳۷	۱	۳	۱۸	۴	۲	۲	۲	۳	۳۷۳۳۸۵٫۸۳۷۸				

طی خواهد شد. پس از آن، مطابق روشی که در قسمت مثال عددی توضیح داده شد، یکی از محدودیت‌ها در راستای بهینه‌سازی حذف شده و دوباره گام‌های الگوریتم ژنتیک برای یافتن جواب نزدیک به بهینه‌ی مسئله‌ی جدید، طی می‌شود. چنان که قبلاً توضیح داده شد، جواب به دست آمده یک جواب نشدنی و بهینه برای مسئله‌ی اصلی است و به‌کمک آن می‌توان بیشترین درصد خطای حل را به دست‌آورد. این مراحل برای هریک از اندازه‌های مورد بررسی (مسائل تک‌دوره‌یی تا دوازده دوره‌یی) ۳۰ بار تکرار می‌شود. نتایج حاصله در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. در جدول ۶ میانگین مدت زمان مورد نیاز برای حل مسائل با ابعاد مختلف برحسب دقیقه، و در جدول ۷ میانگین و انحراف معیار بیشترین درصد خطای حل در ابعاد مختلف گزارش شده است. لازم به ذکر است تمامی محاسبات با نرم‌افزار Matlab ۲۰۱۰و با سخت‌افزار CPU: corei۷ ۱٫۷GHz، RAM: ۴GB انجام شده است. چنان که ملاحظه می‌شود، دقت الگوریتم در ابعاد پایین کمی بیشتر است ولی در ابعاد بالا نیز از دقت بالایی برخوردار است.

در روش گسترش فضای حل، میزان بیشینه خطایی که محاسبه می‌شود، بسیار به پارامترهای مسئله وابسته است؛ زیرا اگر اختلاف جواب بهینه در مسئله‌ی اصلی و مسئله‌ی گسترش‌یافته زیاد باشد، مقدار بیشترین خطای برآوردی نیز زیاد خواهد شد، هرچند که میزان خطای واقعی زیاد نباشد.

۱.۶. آنالیز حساسیت

در این قسمت برای بررسی تأثیر ظرفیت بر سیاست‌های تولید و بازتولید، تحلیل حساسیت صورت می‌گیرد. برای این منظور، مسئله‌ی مطرح شده در بخش ۵ را دوباره مورد بررسی قرار می‌دهیم. لازم به ذکر است از آنجا که هدف بررسی تأثیر ظرفیت است، سایر پارامترها را ثابت فرض کرده و با تغییر «ظرفیت» مسئله را حل می‌کنیم.

چنان که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، میزان تولید محصولات نو با افزایش ظرفیت، افزایش یافته در حالی که میزان محصولات بازتولید شده، با افزایش ظرفیت کاهش می‌یابد؛ چرا که بازتولید محصولات نسبت به تولید آن‌ها به منابع کم‌تری

جدول ۶. میانگین زمان حل مسئله در ابعاد مختلف.

سایز مسئله (تعداد دوره‌ها)	میانگین زمان حل (دقیقه)
۱	۰٫۸۶۸۴۶۵۰۵
۲	۱٫۵۰۷۴۵۰۶۶۷
۳	۳٫۳۵۲۵۷۲۷۵۱
۴	۶٫۷۲۳۶۲۹۹۸۶
۵	۸٫۰۵۴۵۷۸۱۲
۶	۹٫۱۵۶۷۰۹۸۴
۷	۱۱٫۴۶۱۱۱۹۶۷
۸	۱۳٫۷۸۸۶۶۴۷
۹	۱۶٫۴۳۷۹۷۰۳
۱۰	۱۹٫۰۲۶۴۴۰۳
۱۱	۲۳٫۹۸۴۵۲۶۱
۱۲	۲۸٫۰۱۴۴۵۱۴

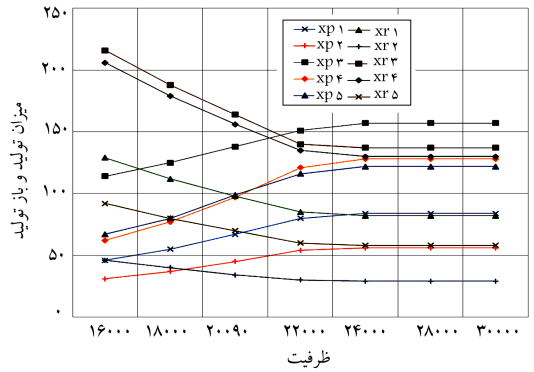
جدول ۷. میانگین و انحراف معیار بیشترین درصد خطا در ابعاد مختلف.

سایز مسئله (تعداد دوره‌ها)	میانگین حداکثر درصد خطا	انحراف معیار حداکثر درصد خطا
۱	۰٫۶۰۳۸۴	۰٫۱۶۲۱۹
۲	۰٫۶۵۸۸۰	۰٫۱۷۶۹۶
۳	۰٫۶۹۴۲۸	۰٫۱۸۵۰۱
۴	۰٫۹۰۱۷۳	۰٫۲۴۲۲۳
۵	۱٫۱۰۸۸۷	۰٫۲۹۴۹۳
۶	۱٫۷۸۳۷۲	۰٫۴۷۳۲۳
۷	۲٫۶۸۵۱۳	۰٫۶۲۶۳۷
۸	۲٫۰۴۹۴۳	۰٫۵۰۵۰۴
۹	۳٫۵۸۸۱۱	۰٫۹۸۱۶۴
۱۰	۱٫۲۵۴۰۹	۰٫۷۶۵۴۹
۱۱	۱٫۸۷۱۵۳	۰٫۷۲۷۱۷
۱۲	۲٫۲۲۴۳۰	۰٫۷۷۴۸۵

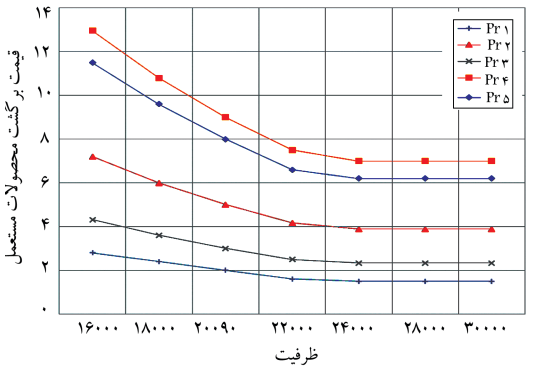
نیاز دارد. از این رو هنگامی که ظرفیت بسیار محدود می‌شود، بخش اعظمی از منابع به بازتولید اختصاص می‌یابد تا تقاضای بازار ارضاء شود. هنگامی که ظرفیت افزایش می‌یابد، تولیدکننده منابع بیشتری برای تولید محصولات نو به جای درخواست محصولات مستعمل با قیمت برگشت بالاتر خواهد داشت.

وقتی ظرفیت بیشتر از ۲۴۰۰۰ واحد شود، تغییری در سیاست تولید و بازتولید رخ نخواهد داد. این امر نشان می‌دهد که تولیدکننده دیگر قادر نیست حتی با داشتن ظرفیت بیشتر، سود بیشتری کسب کند. و در این حالت تقاضا عامل محدودکننده‌ی سود است.

تأثیر میزان ظرفیت بر قیمت برگشت در شکل ۳ نشان داده شده است. چنان که ملاحظه می‌شود، با افزایش ظرفیت، قیمت برگشت محصولات مستعمل کاهش می‌یابد. هنگامی که ظرفیت از ۲۴۰۰۰ واحد فراتر رود، افزایش یا کاهش آن تأثیری



شکل ۲. بررسی میزان تولید و بازتولید بهینه در ظرفیت‌های مختلف.



شکل ۳. بررسی قیمت برگشت محصولات مستعمل در ظرفیت‌های مختلف.

بر قیمت برگشت نخواهد داشت. در این محدوده میزان تقاضای بازار تعیین‌کننده‌ی میزان سود خواهد بود و تغییر ظرفیت تأثیری بر آن نخواهد گذاشت.

۷. نتیجه‌گیری

در این نوشتار یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی تولید چندمحصولی در یک سیستم زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته معرفی شد. متغیرهای تصمیم این مدل عبارت‌اند از: میزان تولید محصولات نو، میزان بازتولید محصولات مستعمل، قیمت برگشت محصولات از بازار، قیمت فروش محصولات، میزان بازیافت محصولات مستعمل به مواد خام و میزان برون‌سپاری (تولید، بازتولید و جمع‌آوری). تابع هدف نیز، بیشینه‌سازی سود کل زنجیره است. میزان تقاضا و برگشت در این مدل غیر قطعی فرض شده‌اند و مدل مذکور با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک حل شده است.

برای ارزیابی روش حل، ۳۶۰ مسئله‌ی تصادفی با این رویکرد حل شده و نقطه‌ی نزدیک بهینه‌ی آن به‌خوبی پیدا شد. همچنین میانگین فاصله‌ی نقاط به دست آمده نسبت به حد بالای (نشدنی) آن‌ها حداکثر ۳٫۵۹٪ محاسبه می‌شود که نشان‌گر عملکرد خوب روش حل است.

به‌عنوان تحقیقات آتی می‌توان مواردی ازجمله پیش‌بینی دقیق‌تر میزان برگشت با استفاده از شبکه‌ی عصبی یا سایر روش‌های سری‌های زمانی را نام برد. همچنین می‌توان مدل را به‌صورت چندهدفه نیز مورد بررسی قرار داد. به نظر می‌رسد می‌توان توابع هدف از جنس کمینه‌سازی تأثیر زنجیره بر محیط زیست یا کمینه‌سازی استفاده از مواد خام را به‌عنوان گزینه‌های خوب مد نظر قرار داد، چراکه یکی از اهداف اصلی شکل‌گیری زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته حفاظت از محیط زیست است.

پانوشت‌ها

1. original equipment manufacturer
2. Kodak
3. closed-loop supply chain (CLSC)
4. solution representation
5. cross-over
6. mutaton

منابع (References)

1. Rubio, S., Chamorro, A. and Miranda, F. "Characteristics of the research on reverse logistics (1995-2005)", *International Journal of Production Research,* **46**(4), pp. 1099-1120 (2008).
2. Guide Jr, V.D.R., Jayaraman, V., Srivastava, R. and Benton, W.C. "Supply chain management for recoverable manufacturing systems", *Interfaces*, **30**, pp. 125-142 (2000).
3. Shi, J., Zhang, G. and Sha, J. "Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return", *Computers & Operations Research*, **38**, pp. 641-650 (2011).
4. Aras, N., Verter, V. and Boyaci, T. "Coordination and priority decisions in hybrid manufacturing/remanufacturing systems", *Production and Operations Management*, **15**(4), pp. 528-543 (2006).
5. Kim, K., Song, I., Kim, J. and Jeong, B. "Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics system", *Computers & Industrial Engineering*, **51**, pp. 279-287 (2006).
6. Guide Jr, V.D.R. and Van Wassenhove, L.N. "Managing product returns for remanufacturing", *Production and Operations Management*, **10**(2), pp. 142-155 (2001).
7. Van Der Laan, E., Salomon, M., Dekker, R. and Van Wassenhove, L. "Inventory control in hybrid systems with remanufacturing", *Management Science*, **45**(5), pp. 733-747 (1999).
8. Inderfurth, K. "Optimal policies in hybrid manufacturing/remanufacturing systems with product substitution", *International Journal of Production Economics*, **90**(3), pp. 325-343 (2004).
9. Zhou, L, Naim, M.M., Tang, Q. and Towill, Q.R. "Dynamic performance of a hybrid inventory system with a Kanban policy in remanufacturing process", *Omega*, **34**, pp. 585-598 (2006).
10. Lieckens, K. and Vandaele, N. "Reverse logistics network design with stochastic lead times", *Computers and Operations Research*, **34**(2), pp. 395-416 (2007).
11. Choi, D.W., Hwang, H. and Koh, S.G. "A generalized ordering and recovery policy for reusable items", *European Journal of Operational Research*, **182**(2), pp. 764-774 (2007).
12. Rubio, S. and Corominas, A. "Optimal manufacturing–remanufacturing policies in a lean production environment", *Computers and Industrial Engineering*, **55**(1), pp. 234-242 (2008).
13. Guide Jr, V.D.R. "Production planning and control for remanufacturing: Industry practice and research needs", *Journal of Operations Management*, **18**(4), pp. 467-483 (2000).
14. Fleischmann, M., Kuik, R. and Dekker, R. "Controlling inventories with stochastic item returns: a basic model", *European Journal of Operational Research*, **138**(1), pp. 63-75 (2002).
15. Fleischmann, M. and Kuik, R. "On optimal inventory control with independent stochastic item returns", *European Journal of Operational Research*, **151**(1), pp. 25-37 (2003).
16. Inderfurth, K. "Impact of uncertainties on recovery behavior in a remanufacturing environment: A numerical analysis", *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, **35**(5), pp. 318–336 (2005).
17. Guide Jr, V.D.R., Teunter, R.H. and Van Wassenhove, L.N. "Matching demand and supply to maximize profits from remanufacturing", *Manufacturing and Service Operations Management*, **5**(4), pp. 303-316 (2003).
18. Dobos, I. and Richter, K. "A production/recycling model with quality consideration", *International Journal of Production Economics*, **104**(2), pp. 571-579 (2006).
19. Qu, X. and Williams, J.A.S. "An analytical model for reverse automotive production planning and pricing", *European Journal of Operational Research*, **190**(3), pp. 756-767 (2008).
20. Liang, Y., Pokharel, S., Lim, G.H. "Pricing used products for remanufacturing", *European Journal of Operational Research*, **193**(2), pp. 390-395 (2009).
21. Pokharel, S. and Mutha, A. "Perspectives in reverse logistics: A review", *Resources, Conservation and Recycling*, **53**(4), pp. 175-182 (2009).
22. Taheri Moghadam, A. and Sahraeian, R. "A new method for solving an uncertain closed-loop supply chain", *5th International Conference of Iranian Operations Research Society*, Tabriz (2012).