

DOI: <https://dx.doi.org/10.22084/IER.2024.5563>

## برنامه‌ریزی تولید یک سیستم ترکیبی تولید/بازتولید پویا با در نظر گرفتن تصمیمات قیمت‌گذاری و وارانتهی در شرایط رقابت بین محصولات نو و بازتولیدی

آتنا ناصری<sup>۱</sup>، سید احمد یزدیان<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناسی‌ارشد مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
۲. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

### خلاصه

با افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی در اثر دفع محصولات مستعمل در محیط زیست، بازیابی این‌گونه محصولات در پایان چرخه عمرشان تبدیل به یکی از موضوعات مهم در حوزه لجستیک معکوس و تولید پایدار شده است. بازتولید یکی از گزینه‌های بازیابی محصولات مستعمل، با مزیت‌های اقتصادی بالا و کمترین اثرات مخرب زیست‌محیطی می‌باشد. برنامه‌ریزی همزمان تولید محصولات نو و بازتولید محصولات مستعمل، یک سیستم ترکیبی تولید/بازتولید را شکل داده که در زمره مسائل پیچیده در حوزه برنامه‌ریزی سیستم‌های تولیدی قرار می‌گیرد که تاکنون در این حوزه، قیمت‌گذاری، وارانتهی و همچنین رقابت به‌صورت جدی بررسی نشده است. هدف این پژوهش ایجاد یک برنامه تولید بهینه برای یک سیستم ترکیبی تولید/بازتولید چنددوره‌ای است که در آن تولیدکننده در خصوص قیمت، میزان تولید و مدت زمان وارانتهی برای محصولات نو و بازتولیدی به‌صورت همزمان تصمیم می‌گیرد. برای دستیابی به این هدف، یک مدل ریاضی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) چنددوره‌ای ساخته می‌شود. در دوره اول تنها محصول نو تولید و به‌فروش می‌رسد، سپس از دوره‌های بعد محصولات مستعمل (هسته‌ها) در سطوح کیفیتی متفاوت از مشتریان خریداری شده و در نتیجه بازتولید به مدل اضافه می‌گردد. از آنجا که هر دو نوع محصول در یک بازار به‌فروش می‌رسند، بین آن‌ها در کسب سهم بیشتر بازار رقابت وجود دارد، که این موضوع در مدل لحاظ شده است. با توجه به پیچیدگی مدل توسعه‌یافته، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات و شبیه‌سازی تبرید برای حل آن استفاده می‌شود. نتایج عددی، کارایی و اثربخشی مدل پیشنهادی و رویکردهای حل را نشان می‌دهند.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۲/۵/۳

پذیرش ۱۴۰۲/۱۰/۳

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

سیستم ترکیبی تولید/بازتولید

قیمت‌گذاری

وارانتهی

رقابت

برنامه‌ریزی غیرخطی عدد

صحیح مختلط

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام

ذرات

### ۱. مقدمه

طی دو دهه گذشته، میزان مصرف محصولات به‌طور مداوم در حال افزایش بوده است، و در نتیجه میزان مواد اولیه‌ای که استفاده شده و به هدر می‌رود در حال افزایش است [۱]. با توسعه فناوری‌های تعمیر، برخی از شرکت‌هایی که در ابتدا درگیر خرید و نگهداری محصول استفاده شده بودند، به تدریج به بازتولیدکنندگان شخص ثالث (3PR)

تبدیل شدند. به‌عنوان مثال، شرکت McGriff Treading، که جزء پنج تولیدکننده برتر کامیون در ایالات متحده است، در زمینه خرید و بازتولید محصولات استفاده شده و همچنین تحقیق و توسعه فناوری‌های جدید برای بازتولید فعالیت می‌کند [۲]. به‌علاوه، با توجه به مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی بازتولید، بسیاری از تولیدکنندگان شروع به بررسی فرآیندهای بازیابی و بازتولید محصولات کرده‌اند و آن

\* نویسنده مسئول: سید احمد یزدیان

تلفن: ۰۲۱-۴۴۸۶۸۴۰۴؛ پست الکترونیکی: [ahmad.yazdian@srbiau.ac.ir](mailto:ahmad.yazdian@srbiau.ac.ir)

محصولات بازتولیدی تمایل نشان می‌دهند، چراکه بازتولید در جهت حفظ محیط زیست عمل کرده و آلودگی و مصرف منابع و انرژی را کاهش می‌دهد. اما مصرف‌کنندگان آگاهانه برای انتخاب محصول، بیشتر کارایی و قیمت محصول را مورد توجه قرار می‌دهند.

در زمینه قیمت‌گذاری محصولات بازتولیدی پژوهش‌هایی انجام شده است. اما تنها قیمت‌گذاری مناسب برای جلب توجه مصرف‌کنندگان کافی نیست. با افزایش روزافزون بازار محصولات بازتولیدی، وارانتهی برای محصولات بازتولیدی، از دیدگاه مشتریان مورد استقبال قرار می‌گیرد. با این حال، محصولات بازتولیدی معمولاً هزینه‌های خدمات وارانتهی را برای فروشندگان افزایش می‌دهند، زیرا آن‌ها دارای خرابی‌های بیشتری نسبت به محصولات نو هستند [۱۰]. امروزه وارانتهی محصول به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از استراتژی‌های بازاریابی مطرح است و محققین مختلفی در مطالعات خود در زمینه بازتولید به بررسی و ارائه سیاست‌های وارانتهی برای جلب اعتماد و نظر مصرف‌کنندگان پرداخته‌اند. قیمت‌گذاری و وارانتهی محصول نه تنها تصمیمات بازاریابی برای افزایش فروش محصول هستند، بلکه مکانیسم‌هایی برای ایجاد تعادل بین عرضه هسته‌ها با تقاضای محصولات در سیستم‌های بازتولیدی نیز می‌باشند.

مصرف‌کنندگان معمولاً بر این باورند که کیفیت محصولات بازتولیدی نسبت به محصولات تولیدی نو بسیار پایین‌تر است و به همین دلیل وجود یک سیاست برای تضمین کیفیت محصولات بازتولیدی ضروری است. به‌علاوه، بسیاری از کشورها فروش محصولات بازتولیدی را به‌عنوان محصول نو ممنوع اعلام کرده‌اند. به‌عنوان مثال، دولت فدرال در ایالات متحده قانونی را تصویب کرد که محصولات بازتولیدی به‌عنوان محصولات نو به بازار عرضه نشوند [۱۱]. همچنین، در بسیاری از پژوهش‌های جایگزینی تقاضا، به‌منظور جلوگیری از بروز کمبود، محصولات نو جایگزین محصولات بازتولیدی می‌شوند. در ادامه این مقاله، در بخش دوم مرور ادبیات، بخش سوم مدل ریاضی، در بخش چهارم نتایج عددی و در بخش پایانی جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

## ۲. مرور ادبیات

بازتولید یک فناوری مهم و نوظهور است که برای ایجاد یک محیط تولید سازگار با محیط زیست و به‌صرفه از نظر اقتصادی حائز اهمیت است. امروزه بازتولید به‌عنوان یک راه‌حل برای مقابله با کمبود منابع و همین‌طور سازگاری با محیط زیست مورد توجه قرار گرفته است [۱۲]. [۱۴]. بازتولید برای اولین بار توسط لوند در سال ۱۹۸۳ پیشنهاد شده است، و از آن زمان در بسیاری از صنایع تولیدی مانند، دستگاه‌های چاپگر و عکس، تولید کارتریج، تولید تجهیزات پزشکی، تولید قطعات خودرو، رایانه و سایر وسایل الکترونیکی به‌کار رفته است [۱۵]. همچنین، شرکت‌های خودروسازی مانند تویوتا، جنرال موتورز و فولکس واگن، بازتولید را برای موتورهای خودرو، جعبه دنده و دینام انجام می‌دهند [۸].

را به‌عنوان یک تصمیم استراتژیک و ضروری در نظر گرفته‌اند [۳]. به‌عنوان مثال، ولوو دارای شش کارخانه بازتولید در سراسر جهان است که محصولات مستعمل (هسته‌ها) را خریداری کرده و مجدداً تولید می‌کند و همچنین BMW سال‌ها است که بعضی از قطعات را بازتولید می‌کند [۴، ۵].

افزایش روند تولید زباله و پر شدن زمین از آن‌ها که همراه با نابودی مواد اولیه خام و منابع با ارزش است، منجر به بروز بسیاری از مسائل زیست‌محیطی و پایداری در دهه‌های اخیر شده است. این روند ضمن افزایش آگاهی عمومی، دولت‌ها را در سراسر جهان بر آن داشته است که قوانین مختلفی را برای حفاظت از محیط زیست به تصویب برسانند [۶]. طبق پژوهش‌های انجام شده و آمار ارائه شده میزان زباله الکترونیکی تولید شده از ۲۵ میلیون تن در سال ۲۰۱۶ به بیش از ۶۳ میلیون تن در سال ۲۰۱۹ رسیده است [۷]. یکی از راه‌هایی که در کاهش تولید زباله و همچنین کمک به محیط زیست امروزه مطرح است بازتولید محصولات مستعمل می‌باشد. در نتیجه این تحولات، در سال‌های اخیر گرایش محققین به مطالعه و پژوهش در حوزه بازتولید محصولات مستعمل روبه افزایش بوده است. در میان گزینه‌های بازاریابی محصولات مستعمل، بازتولید به‌عنوان بخشی از زنجیره تأمین معکوس، توجه زیادی را در دو دهه گذشته دریافت کرده است. بازتولید فرآیندی است که در آن محصولات مستعمل دمونتاژ شده و قطعات و اجزای آن‌ها پس از تمیزکاری و بازرسی، مجدداً پردازش شده و مورد استفاده واقع می‌شود. تحقیقات و مطالعات بسیاری در این حوزه صورت گرفته است، که در این بین توجه و تمرکز بسیاری از پژوهشگران در زمینه سیستم‌های ترکیبی تولید/بازتولید (HMRS) عمدتاً بر کنترل موجودی، برنامه‌ریزی تولید و برنامه‌ریزی شغلی بوده است [۸].

بازتولید از این جهت دارای اهمیت است که امروزه حفاظت از محیط زیست در بین دولت‌ها و دوست‌داران محیط زیست در حال افزایش است. بازتولید محصول با کاهش مصرف مواد خام اولیه و آب، انرژی و منابع را حفظ می‌کند که از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر این فرآیند بازتولید نقش مهمی در کاهش میزان دفع زباله‌ها و کاهش آلودگی آب‌وهوا دارد. تولید نه‌تنها مواد محتوای محصول را حفظ می‌کند، بلکه موجب صرفه‌جویی در حدود ۸۵ درصد از انرژی مورد استفاده در تولید محصول جدید می‌شود و معمولاً ۴۰ تا ۶۰ درصد ارزان‌تر از تولید یک محصول جدید است [۹]. از این رو به‌عنوان یک فعالیت دوستدار محیط زیست تلقی می‌شود.

اولین نکته‌ای که در بازتولید حائز اهمیت است بحث بازاریابی و فروش این محصولات است. سوالاتی که اغلب مطرح می‌شود عبارتند از: آیا محصول بازتولید شده قابلیت فروش در بازار را دارد؟ آیا محصول بازتولیدی همانند محصول نو مورد استقبال مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرد؟ محصولات بازتولیدی باید با چه قیمتی به بازار عرضه شوند؟ و... مصرف‌کنندگان را می‌توان به دو گروه مصرف‌کنندگان سبز و مصرف‌کنندگان آگاهانه تقسیم‌بندی کرد. مصرف‌کنندگان سبز در انتخاب خود عامل زیست‌محیطی را در نظر می‌گیرند، و از این رو به

در مطالعات گذشته، محققین اثرات قیمت خرید هسته‌ها و همچنین فروش محصولات را بر سود مورد بررسی قرار داده‌اند و مزایای قیمت‌گذاری و بازده فروش را قبل از اتخاذ این تصمیمات تحلیل کرده‌اند. فررر بیان کرده است که قیمت محصول بازتولیدی به قیمت اجزای آن، تاریخ تولید و هزینه‌های بازتولید وابسته است. تاریخ تولید بدین جهت دارای اهمیت است که برای برخی از محصولات مانند رایانه ممکن است نسخه قدیمی آن‌ها هنگام بازتولید در بازار موجود نباشد [۱۶]. لی و همکاران باتوجه به تأثیر مالیات و تعرفه‌های کربن بر زنجیره‌های تأمین حلقه بسته فراملی، این مقاله سه حالت تولید مجدد یک سازنده تجهیزات اصلی (OEM) و تصمیمات بهینه قیمت‌گذاری و کاهش انتشار کربن OEM بررسی و تحلیل می‌کند [۱۷]. یتکارانسی و همکاران به بیان علل پیچیدگی بازتولید پرداخته‌اند که عبارتند از: عدم قطعیت در زمان بندی و مقدار هسته‌های بازگشتی، متعادل سازی بازگشت هسته‌ها با تقاضا، جداسازی هسته‌ها، میزان بازیابی هسته‌های نامطلوب، نیاز به لجستیک معکوس، مشکل تطبیق مواد، عدم قطعیت مسیرهای مواد، عدم اطمینان از زمان پردازش [۱۸]. مائو و همکاران یک سیستم تولیدی و بازتولید متشکل از تولیدکننده، بازتولیدکننده و خرده‌فروش را با هدف بررسی پیامدهای سیاست سهمیه انتشار کربن بر کیفیت، فروش و قیمت محصول ارائه نمودند [۱۹]. لاهمار و همکاران مسأله برنامه‌ریزی تولید در سیستم بازتولید را بررسی می‌کنند. هدف آن‌ها تعیین بهترین ترکیب بین تولید محصولات جدید و بازتولید محصولات بازیافتی براساس ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی است [۲۰]. گاید و همکاران قیمت‌گذاری مناسب محصول بازتولیدی را مورد توجه قرار داده و برای حل آن از یک رویکرد ابتکاری استفاده کرده‌اند [۲۱]. پوخارل و لیانگ یک مدل تحلیلی برای ارزیابی قیمت بهینه پیشنهاد داده‌اند که براساس کیفیت هسته‌های دریافتی مدل‌سازی شده است. لی و همکاران در مورد قیمت‌گذاری در یک سیستم بازتولید با عملکرد تصادفی و تقاضای تصادفی مدل‌هایی ارائه کرده‌اند [۲۲، ۲۳]. محمودزاده و همکاران یک مدل چنددوره‌ای تولید و بازتولید با قیمت‌گذاری پویا و تقاضا و بازگشت غیرقطعی ارائه داده‌اند [۲۴]. جنا و سارما همکاری و رقابت در یک زنجیره‌تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن بازتولید را بررسی می‌کنند [۲۵]. کای و همکاران به بررسی برنامه‌ریزی تولید یک سیستم ترکیبی تولید/بازتولید با دریافت هسته‌ها در دو سطح کیفیتی، قیمت‌گذاری و سیاست تولید پویا می‌پردازند [۲۶]. کی و یان یک مدل دودوره‌ای ارائه داده‌اند که در آن تأثیر تغییرات قیمت محصولات بر تصمیمات یک تولیدکننده اصلی تجهیزات (OEM) و یک بازتولیدکننده که محصولات قابل تعویض (محصول نو و بازتولیدی) را به گروهی از مصرف‌کنندگان می‌فروشد، مورد بررسی قرار گرفته است [۲۷]. اولاه و سرکار یک مدل دوکاناله (کانال سنتی و کانال مبتنی بر شناسایی با امواج رادیویی یا به اختصار RFID) را برای جمع‌آوری محصولات مستعمل در یک سیستم ترکیبی تولید-بازتولید پیشنهاد کرده و نتیجه‌گیری کردند که استراتژی ترکیبی برای جمع‌آوری هسته‌ها، با ۸۵٪ سهم کانال سنتی و ۱۵٪

سهم کانال RFID منجر به جواب بهینه می‌شود [۲۸]. تانگ و همکاران یک زنجیره‌تأمین حلقه بسته با بازتولید در یک بازار رقابتی را بررسی کرده و قیمت مناسب محصولات را تعیین کرده‌اند [۲۹]. لیو و همکاران به بررسی یک سیستم ترکیبی تولید/بازتولید تصادفی با هدف تولید بهینه با جایگزینی تقاضا پرداختند [۸]. پژوهش صورت گرفته توسط پولتسکی و همکاران به بررسی یک سیستم ترکیبی تولید/بازتولید تحت بازگشت و تقاضای متغیر می‌پردازد که شامل دو ماشین است و محصولات تولید شده توسط هر دو ماشین یکسان هستند و در یک انبار برای تأمین تقاضای بازار جمع‌آوری می‌شوند. محصولات بازگشتی در انبار بازگشتی جمع‌آوری شده و یا می‌توانند برای بازتولید (با استفاده از ماشین دوم) استفاده شوند [۳۰]. لیائو و همکاران در یک سیستم ترکیبی تولید و بازتولید به بررسی عدم قطعیت در مقدار کمیت، کیفیت و تقاضای بازار پرداختند. آن‌ها روابط بین شاخص‌های تولید و بازتولید نسبت به استراتژی‌های بهینه را ایجاد کردند [۳۱]. دو همکاران یک سیستم ترکیبی دودوره‌ای را بررسی کرده‌اند که در دوره اول محصولات جدید تولید می‌شود و در دوره دوم تحت مقررات مالیات کربن، که قیمت مالیات در دو دوره متفاوت است، تولید و بازتولید انجام می‌شود [۳۲]. جنا و همکاران تأثیری را که برند محصول بازتولید شده بر سود کلی شرکت دارد بررسی کرده‌اند. برای این منظور، چهار حالت در زنجیره‌تأمین حلقه بسته در نظر گرفته شده است: (الف) رقابت بین محصولات بازتولیدی با نام تجاری برتر و محصولات نو با نام تجاری پایین برای خرده‌فروش، (ب) رقابت بین ادغام تولیدکننده محصولات نو با نام تجاری پایین و خرده‌فروش با تولیدکننده محصولات نو با نام تجاری پایین، (ج) رقابت بین ادغام تولیدکننده محصولات با نام تجاری پایین و خرده‌فروش با تولیدکننده محصولات با نام تجاری برتر و (د) سیستم متمرکز. در این پژوهش تأثیر برند و قیمت رقابت بر سود کلی بین برند برتر برای محصولات بازتولیدی و برند پایین برای محصولات نو صورت گرفته است [۳۳]. در پژوهشی دیگر که سونگ و هان انجام داده‌اند، یک مدل زنجیره‌تأمین بازتولیدی متشکل از دو شرکت رقیب را ارائه داده‌اند که هر دو محصولات نو و بازتولیدی را عرضه می‌کنند. آن‌ها ابتدا تقاضای بازار را در ترکیب‌های مختلف استراتژی‌های قیمت‌گذاری باتوجه به ترجیحات مصرف‌کننده و انواع مصرف‌کننده تحلیل می‌کنند. سپس به تحلیل تصمیمات قیمت‌گذاری می‌پردازند. آن‌ها همچنین تأثیر مصرف‌کنندگان سبز و مصرف‌کنندگان آگاهانه را مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند [۳۴]. لی و همکاران یک مطالعه تحلیلی در مورد طراحی کانال بازتولید و قیمت‌گذاری خدمات پس از فروش انجام داده‌اند که به‌طور مشترک بر پایداری و سودآوری زنجیره‌تأمین اثر می‌گذارد [۲]. وانگ و همکاران یک زنجیره‌تأمین حلقه بسته (CLSC) با بازار بازیافت رقابتی (جمع‌آوری‌کنندگان رقابتی) و بازار محصول (محصولات جدید و بازتولیدی) در نظر گرفته‌اند و استراتژی قیمت‌گذاری بهینه را برای سناریوهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند [۳۵]. ژو و سان یک سیستم ترکیبی تولید و بازتولید تصادفی چنددوره‌ای را در نظر گرفته‌اند. آن‌ها رابطه بین فروش

محصول نو و بازتولید محصولات بازگشتی ارائه داده‌اند که سود کل را باتوجه به محدودیت انتشار کربن حداکثر می‌کنند [۴۵]. سو و وانگ راهبردهای بهبود قابلیت اطمینان و سیاست‌های وارانتهی دوبعدی (2D) مستطیلی و L شکل را در قالب یک مدل تصادفی بررسی کرده‌اند [۱۰]. یزدیان و همکاران مدلی برای بهینه‌سازی قیمت و تصمیمات وارانتهی برای محصولات مستعمل را مورد توجه قرار داده‌اند [۴۶]. لی و همکاران استراتژی‌های مختلف خرید محصولات مستعمل و قیمت‌گذاری محصولات نو و بازتولیدی را در سیستم‌های مختلف تولید-بازتولید با یکدیگر مقایسه کرده و اثر زمان‌بندی بازتولید را بر سود و محیط زیست مطالعه کردند [۴۷]. الگوز و همکاران تصمیمات تولید و سطح پایداری را در سیستم تولیدی خالص و سیستم ترکیبی تولید-بازتولید با لحاظ سیاست مالیات کربن، بررسی کرده‌اند. آن‌ها حالت‌های مختلفی که در آن بازتولید به‌ترتیب، توسط تولیدکننده، خرده‌فروش و بازتولیدکننده مستقل انجام می‌شود را مورد توجه قرار داده و دریافته‌اند که تولیدکننده می‌تواند از سطح تولید محصول به‌عنوان یک قدرت استراتژیک برای رقابت با خرده‌فروش یا بازتولیدکننده مستقل استفاده کند [۴۸]. آسید و همکاران مسأله برنامه‌ریزی و کنترل تولید را در یک سیستم ترکیبی تولید-بازتولید نامطمئن مورد توجه قرار داده و نرخ تولید، بازتولید و سیاست مورد استفاده برای انتقال بین مودهای مختلف بازتولید محصولات بازگشتی در سطوح کیفیتی مختلف را با استفاده از تئوری کنترل بهینه و روش‌های کمی تعیین کردند [۴۹].

لو و همکاران تأثیر سیاست‌های مالیات کربن را بر تصمیمات تولید و بازتولید در زنجیره تأمین حلقه بسته با استفاده از مدل‌های تئوری بازی بین یک تولیدکننده و یک بازتولیدکننده ارزیابی کردند. آن‌ها تصمیمات زنجیره را در دو حالت سرمایه‌گذاری و عدم سرمایه‌گذاری در فناوری کاهش کربن، در زنجیره تأمین حلقه بسته متمرکز و غیرمتمرکز بررسی کردند [۵۰]. سرکار و بونیا مدلی برای انعطاف‌پذیری نرخ تولید در یک سیستم ترکیبی تولید-بازتولید باتوجه به معیارهای سرویس‌دهی به مشتریان و پایداری ارائه کردند [۵۱]. به‌عنوان مقالات مروری اخیر در این حوزه، انگو و همکاران مروری بر چالش‌های فعلی و فرصت‌های آتی در تولید پایدار و بازتولید در صنایع کشور مالزی انجام داده‌اند [۵۲]. مجیا-مونکایو و همکاران مروری بر توسعه معماری هوشمند برای یک سیستم تولید-بازتولید پایدار داشته‌اند [۵۳].

باتوجه به مرور ادبیات انجام شده، خلأهای تحقیقاتی شناسایی شده عبارتند از:

۱. بررسی سیستم ترکیبی تولید و بازتولید؛
۲. قیمت‌گذاری همزمان برای محصولات تولید شده و بازتولیدی و تعیین قیمت مناسب برای خرید هسته‌های بازگشتی؛
۳. ایجاد فضای رقابتی برای قیمت‌گذاری محصولات جدید و بازتولیدی
۴. ایجاد فضای رقابتی بین شرکت‌های تولیدکننده و بازتولیدکننده؛

محصولات و بازگشت آن‌ها و همچنین تأثیرات دو جانبه در بازگشت محصولات مستعمل (هسته‌ها) و تقاضا را مورد بررسی قرار داده‌اند [۳۶]. زارع و همکاران یک سیستم تولیدی چندمحصولی و چنددوره‌ای مبتنی بر دمونتاژ را در نظر گرفتند که تولیدکننده همه یا بخشی از قطعات مصرفی خود برای تولید محصول را از طریق بازیابی و دمونتاژ جزئی محصولات بازگشتی تأمین می‌کند [۳۷]. تورکی و همکاران یک سیستم تولید/بازتولید با امکان ذخیره‌سازی تحت کنترل کربن و سیاست تجاری را باتوجه به تفاوت بین اقلام جدید و بازتولید شده، نقص‌های تصادفی ماشین، محدودیت‌های کربن و خواسته‌های متمایز مشتریان برای هر دو نوع محصول را مورد بررسی قرار داده‌اند [۳۸]. لیاو و همکاران به تجزیه و تحلیل انتشار کربن بین تمام ماشین‌آلات بازتولیدی و فرسودگی بین بازتولید و بازسازی پرداختند. آن‌ها همچنین رابطه بین وضعیت کیفیت و مزایای زیست‌محیطی سیستم بازتولید را مورد بررسی قرار می‌دهد [۳۹]. گری و همکاران یک زنجیره تأمین دوسطحی حلقه بسته با یک تولیدکننده و یک خرده‌فروش در نظر گرفته و دو مدل ارائه دادند. آن‌ها در مدل اول تقاضا را وابسته به قیمت فروش و دوره وارانتهی در نظر گرفته، درحالی که مدل دوم تقاضا را وابسته به سطح سبز بودن علاوه بر قیمت فروش و دوره وارانتهی می‌داند [۴۰]. هو و همکاران به مطالعه یک سیستم ترکیبی تولید/بازتولید پرداخته‌اند که در آن محصول می‌تواند در قیمت‌های خاص برای سطوح مختلف کیفیت فروخته شود. در این تحقیق، علاوه بر رقابت داخلی بین این دو نوع محصول، رقابت خارجی محصولات مشابه نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۴۱]. لیو و همکاران یک مدل ریاضی برای بررسی راهکارهای بهینه تولید و قیمت‌گذاری برای یک تولیدکننده انحصاری که بازتولید نیز انجام می‌دهد ارائه کرده‌اند [۴۲]. لیاو و دنگ یک مدل توسعه‌یافته EOQ را تحت تقاضای نامحدود توسعه داده و چهار استراتژی را برای به‌دست آوردن مقدار سفارش مطلوب مورد توجه قرار داده‌اند. در استراتژی‌های اول، دوم و سوم هدف به حداقل رساندن هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی بوده و در استراتژی چهارم هدف حداکثر کردن سود کلی تحت عدم قطعیت تقاضا می‌باشد. به‌علاوه، آن‌ها تأثیر جریمه برای انتشار کربن را نیز بررسی کردند [۴۳]. یزدیان و همکاران مدلی توسعه داده‌اند که در آن یک بازتولیدکننده مستقل (IR) هسته‌های چندمؤلفه‌ای را در کلاس‌های مختلف کیفیت دریافت کرده، آن‌ها را بازتولید کرده و محصولات بازتولیدی را همراه با وارانتهی به‌فروش می‌رساند. بهینه‌سازی قیمت خرید هسته‌ها در گروه‌های مختلف کیفیت، قیمت فروش محصول بازتولید شده و طول دوره وارانتهی جهت نیل به حداکثر سود ممکن مورد توجه قرار گرفته‌اند [۶]. فاطمی قمی و ترکمن یک سیستم ترکیبی تولیدی و بازتولیدی را تحت شرایط چندمرحله‌ای، چندمحصولی و چنددوره‌ای در زنجیره تأمین حلقه بسته را مورد مطالعه قرار دادند [۴۴]. وانگ و همکاران استراتژی جایگزینی بین محصولات نو و بازتولید شده را در یک سیستم تولیدکننده/بازتولیدکننده مورد بررسی قرار داده و مدل‌های ریاضی برای تعیین مقادیر بهینه تولید



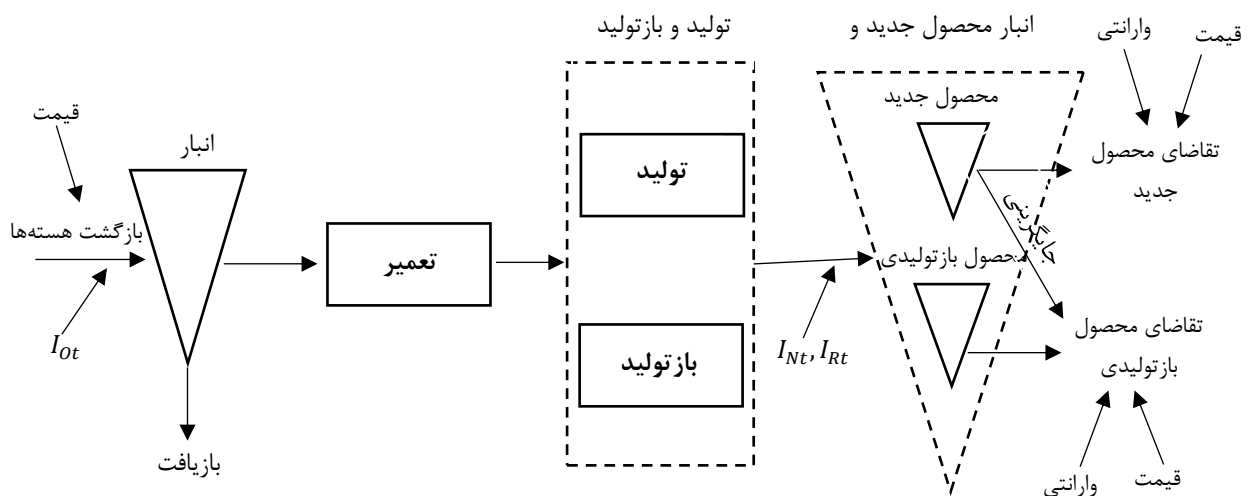
## ۳. تعریف مسأله و مدل‌سازی ریاضی

بازگشتی تابعی از قیمت خرید هسته‌ها می‌باشد که برای هر سطح کیفیتی متفاوت است. از این جهت، قیمت‌گذاری مناسب هسته‌ها در سطوح کیفیتی مختلف یکی از تصمیمات این مسأله می‌باشد. پس از جمع‌آوری هسته‌ها، آن‌ها بازرسی شده و در سطوح کیفیتی مختلف دسته‌بندی می‌شوند. فرآیند مرتب‌سازی هسته‌ها را می‌توان با توجه به لیستی از معیارهای کیفیت که از پیش تعیین شده است، انجام داد [۵۴]. در مرحله بعد، در هر سطح کیفیتی، درصدی از هسته‌ها که امکان بازتولید شدن دارند، پردازش شده تا به سطح کیفیتی محصول نو ارتقا پیدا کنند. محصولات بازتولیدی نیز با وارانتهی FRW به فروش می‌رسند. از این‌رو، با توجه به فضای رقابتی بین محصولات باید در خصوص طول دوره بهینه وارانتهی هر دو نوع محصول نو و بازتولیدی تصمیم‌گیری نمود. همچنین، هنگامی که حجم هسته‌های جمع‌آوری شده بیش از ظرفیت انبار باشد، هسته‌های مازاد برای بازیافت به فروش می‌رسند.

لازم به ذکر است، قیمت فروش و طول دوره وارانتهی محصولات نو و بازتولیدی نه تنها بر تقاضای خود این محصولات تأثیرگذار است، بلکه بر حجم تقاضای محصول رقیب نیز اثر می‌گذارد. به عبارت دقیق‌تر، هر چه قیمت محصولات بازتولیدی پایین باشد، محصولات بازتولیدی برای طیف گسترده‌تری از افراد جذابیت پیدا کرده و از این‌رو، تقاضای محصول نو کاهش می‌یابد و بالعکس. در نقطه مقابل، هر چه قیمت محصول نو پایین‌تر باشد تقاضای محصول نو افزایش پیدا کرده و تقاضای محصول بازتولیدی کاهش می‌یابد. همین استدلال در مورد طول دوره وارانتهی محصولات نو و بازتولیدی نیز برقرار است. به این صورت که هر چه طول دوره وارانتهی محصول نو بیشتر باشد تقاضا برای محصول نو افزایش یافته و تقاضای محصول بازتولیدی کاهش می‌یابد. در طرف مقابل، هر چه طول دوره وارانتهی محصول بازتولیدی بیشتر باشد تقاضای محصول بازتولیدی افزایش یافته و تقاضای محصول نو کاهش پیدا می‌کند و بالعکس.

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است در این مقاله یک سیستم ترکیبی تولید/بازتولید چنددوره‌ای با جایگزینی تقاضای محصول بازتولیدی توسط محصول نو در شرایط کمبود در نظر گرفته شده است. تقاضای محصولات نو و بازتولیدی به قیمت و طول دوره وارانتهی وابسته است. در این سیستم، دو فعالیت اصلی تولید و بازتولید وجود دارد و موجودی شامل هسته‌های بازگشتی، محصولات نو و محصولات بازتولیدی می‌باشد. هسته‌های بازگشتی در واقع محصولات مستعملی هستند که توسط بازتولیدکننده از مصرف‌کننده‌ها در بازار خریداری می‌شود. محصولات نو تولیدی در درجه اول برای تأمین تقاضای بازار برای محصول نو استفاده می‌شوند. محصولات بازتولیدی از پردازش هسته‌های بازگشتی جمع‌آوری شده در شبکه لجستیک معکوس برای برآورده کردن تقاضای محصول بازتولیدی تأمین می‌شوند. در نهایت، در صورت کمبود موجودی محصول بازتولیدی، با توجه به نیاز بازار و در راستای تولید پایدار و به منظور حفظ و چسبندگی مشتری با در نظر گرفتن هزینه‌های نگهداری محصول نو مازاد در پایان هر دوره، می‌توان از موجودی محصول نو جهت تأمین تقاضای محصولات بازتولیدی با همان قیمت محصول بازتولیدی استفاده کرد که منتج به سودآوری کمتری و درعین حال باعث خلق ارزش برای سازمان می‌شود، اما عکس آن برقرار نمی‌باشد. هر دو محصول نو و بازتولیدی در یک بازار به فروش می‌رسند و از این جهت بین آن‌ها در کسب سهم بیشتری از بازار رقابت وجود دارد. در این شرایط، تولیدکننده باید در مورد سطوح بهینه تولید محصولات نو و بازتولیدی تصمیم‌گیری نماید.

در این مدل در دوره اول تنها تولید صورت می‌گیرد و محصول نو با وارانتهی تعمیر رایگان (FRW) فروخته می‌شود. از دوره دوم، بازتولید نیز به سیستم اضافه می‌شود. روند بازتولید محصولات EOL، با خرید هسته‌ها در گروه‌های کیفیتی مختلف آغاز می‌شود. مقدار هسته‌های



شکل (۱). مدل مفهومی مسأله

به‌طور خلاصه، در این مسأله تصمیمات زیر باید اتخاذ شوند:

۱. قیمت‌های بهینه خرید محصولات مستعمل (هسته‌ها) در سطوح کیفیتی مختلف
۲. میزان محصول نو که باید تولید شود
۳. میزان محصول بازتولیدی که باید تولید شود
۴. قیمت فروش محصول نو
۵. طول دوره وارانتهی محصول نو
۶. قیمت فروش محصول بازتولیدی
۷. طول دوره وارانتهی محصول بازتولیدی

در این سیستم ترکیبی، هنگامی که محصول بازتولیدی موجودی ندارد، برای جلوگیری از وقوع فروش از دست رفته و مدیریت هزینه‌های نگهداری محصولات نو در هر دوره، می‌توان برای تأمین تقاضای محصول بازتولیدی، محصول نو را جایگزین کرد. به عبارت دیگر، در صورت لزوم، یک محصول نو را می‌توان با قیمت یک محصول بازتولیدی در اختیار مشتری قرار داد [۵۵]. در نهایت به دلیل اهمیت سازگاری فعالیت‌های تولید و بازتولید با موضوع تولید پایدار، برای هر واحد محصول تولید شده و بازتولید شده به جهت ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی، هزینه‌ای در نظر گرفته شده است.

در ادامه اندیس‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم و مفروضات مدل آورده شده و سپس مدل ریاضی مسأله توسعه داده می‌شود.

#### اندیس‌ها

$t$ : اندیس دوره برنامه‌ریزی،  $t=1,2,\dots,T$

$j$ : اندیس نوع محصول  $j \in \{N,R,O\}$

$N$ : محصول نو

$R$ : محصول بازتولیدی

$O$ : محصول بازگشتی

$k$ : اندیس سطح کیفیتی محصول بازگشتی،  $k=1,2,\dots,K$  (اعداد کوچکتر نشان‌دهنده سطوح کیفیتی بهتر می‌باشند)

#### پارامترها

$C_t^f$ : هزینه راه‌اندازی برای تولید در دوره  $t$

$C_t^{fr}$ : هزینه راه‌اندازی برای بازتولید در دوره  $t$

$C_t^m$ : هزینه تولید هر واحد محصول نو در دوره  $t$

$C_{jt}^w$ : متوسط هزینه هر تعمیر مشمول وارانتهی در طول دوره وارانتهی

برای هر واحد محصول  $j$  در دوره  $t$   $j \in \{N,R\}$

$C_t^h$ : هزینه نگهداری هر واحد محصول نو و بازتولیدی در دوره  $t$

$C_{Ot}^h$ : هزینه نگهداری هر واحد هسته بازگشتی در دوره  $t$

$C_{tk}^r$ : هزینه بازتولید هسته بازگشتی در سطح کیفیتی  $k$  در دوره  $t$

$C_{jt}^e$ : هزینه‌های متناظر با ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی برای تولید

هر واحد محصول  $j$  در دوره  $t$   $j \in \{N,R\}$

$E^o$ : ظرفیت انبار برای هسته‌های بازگشتی

$E$ : ظرفیت انبار برای محصولات نو و بازتولیدی

$U_t$ : کل ظرفیت موجود برای تولید و بازتولید در دوره  $t$  (ساعت)

$UR_t$ : کل ظرفیت موجود برای بازتولید هسته‌ها در دوره  $t$  (ساعت)

$S_t$ : بهای فروش هسته بازگشتی برای بازیافت در دوره  $t$

$\alpha_t$ : حداقل احتمال جایگزینی محصول نو با محصول بازتولیدی در دوره  $t$

$\xi_{tk}$ : حداکثر درصد هسته‌های بازگشتی در دسترس در سطح کیفیتی  $k$  که در دوره  $t$  بازتولید می‌شوند (سیاست مدیریتی)

#### متغیرهای تصمیم

$V_{tk}$ : قیمت خرید هسته بازگشتی در سطح کیفیتی  $k$  در دوره  $t$

$P_{jt}$ : قیمت فروش محصول  $j$  در دوره  $t$   $j \in \{N,R\}$

$W_{jt}$ : طول دوره وارانتهی برای محصول  $j$  در دوره  $t$  (سال)  $j \in \{N,R\}$

$X_{jt}$ : تعداد واحد تولیدی محصول  $j$  در دوره  $t$   $j \in \{N,R\}$

$y_t = \begin{cases} 1 & \text{اگر در دوره } t \text{ محصول نو تولید شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

$yp_{tk} = \begin{cases} 1 & \text{اگر در دوره } t \text{ هسته با سطح کیفیتی } k \text{ بازتولید شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

$yz_t = \begin{cases} 1 & \text{اگر در دوره } t \text{ بازتولید انجام شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

$UP_{Nt}$ : مقدار ظرفیت اختصاص یافته به تولید

$UP_{Rt}$ : مقدار ظرفیت اختصاص یافته به بازتولید

$Z_{tk}$ : تعداد هسته‌های بازگشتی در سطح کیفیتی  $k$  که در دوره  $t$  برای بازیافت فروخته می‌شوند

$I_{jt}$ : موجودی انبار محصول  $j$  در پایان دوره  $t$   $j \in \{N,R,O\}$

$M_t$ : میزان محصول نو فروخته شده

$R_t$ : میزان محصول بازتولیدی فروخته شده

$MR_t$ : میزان محصول نویی که در دوره  $t$  جایگزین محصول بازتولیدی، فروخته شده است

$O_{tk}$ : تعداد هسته‌های بازتولید شده در سطح کیفیتی  $k$  در دوره  $t$

#### مفروضات

(۱) تقاضای محصول نو در دوره  $t$ ، بر مبنای توسعه مدل ارائه شده توسط ادید و پراکس [۵۶] و یزدیان و همکاران [۶] تابعی خطی از قیمت فروش و طول دوره وارانتهی محصول نو و بازتولیدی است و به صورت  $D_{Nt} = \eta_t - \theta_t P_{Nt} + \delta_t P_{Rt} + \rho_t W_{Nt} - \nu_t W_{Rt}$  نمایش داده می‌شود که در آن پارامترهای  $\eta_t, \theta_t, \delta_t, \rho_t, \nu_t$  غیرمنفی هستند.

(۲) به همین ترتیب تقاضای محصول بازتولیدی در دوره  $t$ ، تابعی خطی از قیمت فروش و طول دوره وارانتهی محصول نو و بازتولیدی است و به صورت  $D_{Rt} = c_t - d_t P_{Rt} + e_t P_{Nt} + f_t W_{Rt} - g_t W_{Nt}$  نمایش داده می‌شود که در آن پارامترهای  $c_t, d_t, e_t, f_t, g_t$  غیرمنفی می‌باشند.

(۳) مقدار هسته‌های بازگشتی جمع‌آوری شده در دوره  $t$ ، تابعی خطی از قیمت خرید هسته‌ها در سطوح کیفیتی متفاوت است و به صورت  $RC_{tk} = a_{tk} + b_{tk} V_{tk}$  نشان داده می‌شود که در آن  $b_{tk}$  یک ثابت غیرمنفی است [۶].

$$I_{Rt} = I_{R(t-1)} + X_{Rt} - R_t \quad t \geq 2 \quad (5)$$

$$I_{Ot} = I_{O(t-1)} + \sum_{k=1}^K (RC_{tk} - Z_{tk}) - X_{Rt} \quad t \geq 2 \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K yp_{tk} \leq Kyz_t \quad t \geq 2 \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K yp_{tk} \geq yz_t \quad t \geq 2 \quad (8)$$

$$X_{Nt} \leq UP_{Nt}y_t \quad \forall t \quad (9)$$

$$X_{Rt} \leq UP_{Rt}yz_t \quad t \geq 2 \quad (10)$$

$$UP_{Rt} \leq UR_t \quad t \geq 2 \quad (11)$$

$$UP_{Nt} + UP_{Rt} \leq U_t \quad \forall t \quad (12)$$

$$\sum_{j \in \{N,R\}} I_{jt} \leq E \quad \forall t \quad (13)$$

$$I_{Ot} \leq E^0 \quad t \geq 2 \quad (14)$$

$$M_t \leq D_{Nt} \quad \forall t \quad (15)$$

$$R_t + MR_t \leq D_{Rt} \quad t \geq 2 \quad (16)$$

$$MR_t \leq \text{Max}\{0, D_{Rt} - I_{Rt} - R_t\} \quad t \geq 2 \quad (17)$$

$$\alpha_t(D_{Rt} - I_{Rt} - R_t) \leq MR_t \quad t \geq 2 \quad (18)$$

$$V_{t(k)} - V_{t(k+1)} \geq 0 \quad k \leq K-1, t \geq 2 \quad (19)$$

$$V_{tk} \geq \frac{-a_{tk}}{b_{tk}} \quad \forall k, t \geq 2 \quad (20)$$

$$P_{Rt} \leq P_{Nt} \quad t \geq 2 \quad (21)$$

$$W_{Rt} \leq W_{Nt} \quad t \geq 2 \quad (22)$$

$$\sum_{k=1}^K RC_{tk} \leq M_{t-1} + MR_{t-1} \quad t \geq 2 \quad (23)$$

$$O_{tk} \leq \xi_{tk} \left( RC_{tk} + \sum_{l|l \geq 3 \cap l \leq t} (RC_{(l-1)k} - O_{(l-1)k} - Z_{(l-1)k}) \right) yp_{tk} \quad \forall k, t \geq 2 \quad (24)$$

$$X_{Rt} = \sum_{k=1}^K O_{tk} \quad t \geq 2 \quad (25)$$

$$D_{Nt} = \eta_t - \theta_t P_{Nt} + \delta_t P_{Rt} + \rho_t W_{Nt} - v_t W_{Rt} \quad \forall t \quad (26)$$

$$D_{Rt} = c_t - d_t P_{Rt} + e_t P_{Nt} + f_t W_{Rt} - g_t W_{Nt} \quad \forall t \quad (27)$$

$$RC_{tk} = a_{tk} + b_{tk} V_{tk} \quad \forall t, k \quad (28)$$

$$X_{Nt}, X_{Rt}, UP_{Nt}, UP_{Rt}, Z_{tk} \geq 0, \text{ integer} \quad (29)$$

$$I_{Nt}, I_{Rt}, I_{Ot}, M_t, R_t, MR_t \geq 0, \text{ integer} \quad (29)$$

$$P_{Nt}, P_{Rt}, W_{Nt}, W_{Rt} \geq 0 \quad (29)$$

$$y_t, yz_t, yp_{tk} \in \{0,1\} \quad \forall t, k$$

تابع هدف (۳) نشان‌دهنده سود خالص است که از تفاضل درآمد کل و هزینه کل به‌دست می‌آید. درآمد کل از سه بخش تشکیل شده است که باتوجه به تابع هدف به‌ترتیب شامل درآمد حاصل از فروش محصولات نو، درآمد حاصل از فروش محصولات بازتولیدی، درآمد حاصل از فروش محصولات نویی که جایگزین محصول بازتولیدی شده است و درآمد حاصل از فروش هسته‌های مازاد برای بازیافت است.

(۴) بازگشت هسته‌ها در هر دوره وابسته به تعداد محصولات نویی است که در دوره گذشته به‌فروش رسیده‌اند.

(۵) نرخ بازگشت هسته‌ها در هر دوره برای هر سطح کیفیت  $k$ ، مستقل از سایر سطوح کیفیتی است.

(۶) تمام محصولات تولیدی و بازتولیدی و هسته‌ها از یک نوع هستند.

(۷) محصول با سیاست وارانتهی FRW به‌فروش می‌رسد.

(۸) هرگونه خرابی در طول دوره وارانتهی معتبر است.

(۹) زمان تعمیرات بسیار ناچیز است، ازاین جهت خرابی در دوره  $t$  برای محصولات تولیدی و بازتولیدی تحت دوره وارانتهی مطابق با تابع  $r_{jt}(T)$  اتفاق می‌افتد [۵۷].

(۱۰) به‌جهت سازگاری با محیط زیست برای هر واحد تولید و بازتولید جریمه‌ای جهت آلودگی‌های زیست‌محیطی ایجاد شده در نظر گرفته شده است.

### ۳-۱. مدل سازی وارانتهی

توزیع وایبول به‌طور گسترده در مدل‌سازی زمان شکست در مطالعات قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵۸]. بنابراین، در این پژوهش فرض براین است که زمان شکست محصول نو و بازتولیدی در دوره  $t$  از توزیع وایبول با پارامتر شکل  $\beta_j$  و پارامتر مقیاس  $\lambda_{jt}$   $j \in \{N, R\}, \forall t$  تعریف می‌شود. با این فرض، تابع نرخ شکست  $r_{jt}(T)$  به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_{jt}(T) = \beta_j \lambda_{jt} (\lambda_{jt} T)^{\beta_j - 1} \quad j \in \{N, R\}, \forall t \quad (1)$$

برمبنای رابطه (۱)، متوسط تعداد ادعاهای خرابی برای یک محصول (نو و بازتولیدی) در طول دوره وارانتهی در دوره  $t$  را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:

$$E(N_{jt}) = \int_0^{W_{jt}} r_{jt}(T) dT = \lambda_{jt}^{\beta_j} (W_{jt})^{\beta_j} \quad j \in \{N, R\}, \forall t \quad (2)$$

### ۳-۲. مدل ریاضی

باتوجه به پارامترها، متغیرهای تصمیم، توابع تقاضای محصولات نو و بازتولیدی، توابع نرخ شکست و تعداد خرابی‌های محصولات نو و بازتولیدی و سایر نمادها و عبارات تعریف شده در بخش ۳، مدل ریاضی پیشنهادی مسأله را می‌توان به‌صورت زیر فرموله کرد:

$$\begin{aligned} \text{Maximize} \quad & \sum_{t=1}^T \left\{ P_{Nt} M_t + P_{Rt} (R_t + MR_t) + S_t \sum_{k=1}^K Z_{tk} \right. \\ & - \left[ \sum_{k=1}^K V_{tk} RC_{tk} + C_t^f y_t + C_t^r yz_t \right. \\ & + C_t^m X_{Nt} + \sum_{k=1}^K C_{tk}^i O_{tk} \\ & + C_t^h (I_{Nt} + I_{Rt}) + C_{Ot}^h I_{Ot} \\ & + \sum_{j \in \{N,R\}} C_{jt}^e X_{jt} \\ & \left. + C_{Nt}^w E(N_{Nt}) (M_t + MR_t) \right. \\ & \left. + C_{Rt}^w E(N_{Rt}) R_t \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

Subject to:

$$I_{Nt} = I_{N(t-1)} + X_{Nt} - M_t - MR_t \quad \forall t \quad (4)$$



خاص ممکن است منابع و امکانات موجود امکان بازتولید بیش از ۱۰ درصد هسته‌های در پایین‌ترین سطح کیفیتی را به ما ندهد. معادله (۲۵) تعداد کل محصولات بازتولید شده را در هر دوره نشان می‌دهد که برابر مجموع تعداد هسته‌های بازتولید شده در همه سطوح کیفیتی است. محدودیت‌های (۲۶) تا (۲۸) به ترتیب، توابع تقاضای محصول نو، محصول بازتولیدی و تعداد هسته‌های بازگشتی می‌باشند، که در بخش مفروضات تشریح شده‌اند. در نهایت محدودیت (۲۹) نشان‌دهنده عدد صحیح و غیرمنفی بودن متغیرها است. همچنین لازم به ذکر است در تابع هدف و محدودیت‌های مرتبط با فعالیت بازتولید مانند درآمد حاصل از فروش محصول بازتولیدی، هزینه‌های بازتولید، موجودی محصول بازتولیدی و ... باتوجه به اینکه از دوره دوم عملیات بازتولید فعال می‌شود با شرط  $t \geq 2$  در نظر گرفته شده است.

#### ۴. روش حل

باتوجه به اینکه مدل توسعه داده شده در بخش ۳ از نوع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) می‌باشد، حل آن با روش‌های دقیق و نرم‌افزارهای مرسوم بهینه‌سازی مانند GAMS امکان‌پذیر نبوده و از این رو، نیازمند طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های حل مناسب و سفارشی برای آن هستیم. بدین جهت، در این بخش، الگوریتم‌های فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و شبیه‌سازی تبرید (SA) برای حل مدل ارائه شده در بخش ۳ توسعه داده شده و جهت اعتبارسنجی خروجی‌ها، نتایج حل آن‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. هر دو الگوریتم در محیط نرم‌افزار MATLAB کدنویسی و اجرا شده‌اند.

#### ۴-۱. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) که اولین بار توسط کندی و ابرهارت در سال ۱۹۹۵ برای مسائل پیوسته و گسسته پیشنهاد شده است، یک تکنیک بهینه‌سازی تصادفی بر مبنای جمعیت می‌باشد که از رفتارهای دسته‌ای پرندگان و ماهی‌ها الهام می‌گیرد. در الگوریتم PSO ابتدا سیستم با یک جمعیتی از ذرات با جواب‌های تصادفی مقاردهی اولیه می‌شود و سپس با به‌روزرسانی هر سری از جواب‌ها برای تمامی ذرات، جواب بهینه جستجو می‌شود. در این الگوریتم جواب‌های بالقوه که ذره نامیده می‌شوند، در کل فضای مسأله با دنبال کردن موقعیت بهترین ذره کنونی به حرکت درمی‌آیند. اگر یکی از ذرات مسیر خوبی را بیابد، سایر ذرات به دنبال آن ذره حرکت می‌کنند، هرچند که از آن خیلی دور باشند. رفتار جمعی با استفاده از ذرات داخل فضای چندبعدی که دارای دو مشخصه مکان و سرعت هستند مدل می‌شود. این ذرات در کل این فضا حرکت می‌کنند و بهترین مکانی را که تاکنون ملاقات کرده‌اند به‌خاطر می‌سپارند. آن‌ها این موقعیت‌های خوب را به اطلاع یکدیگر رسانده و موقعیت و سرعت حرکت خود را براساس این موقعیت‌های خوب تعیین می‌کنند [۶۰، ۵۹]. اگر بخواهیم این روند را به‌صورت دقیق‌تر بیان کنیم، مراحل زیر را خواهیم داشت.

جمعیت ذرات در ابتدا با جمعیتی تصادفی از جواب‌ها مقاردهی

همچنین در ادامه هزینه‌های سیستم ترکیبی تولید و بازتولید در تابع هدف به‌ترتیب عبارتند از: هزینه خرید هسته‌ها در سطوح کیفیتی مختلف، هزینه‌های ثابت راه‌اندازی خطوط تولیدی، هزینه‌های متغیر تولید و بازتولید محصولات، هزینه‌های مربوط به نگهداری محصولات نو و بازتولیدی و هسته‌ها، هزینه‌های متناظر با آلودگی‌های زیست‌محیطی ایجاد شده و در نهایت هزینه‌های مربوط به تعمیرات محصولات نو و بازتولیدی در طول دوره وارانتهی آن‌ها.

محدودیت‌های (۴) تا (۶) تعادل موجودی انبار محصول نو، بازتولیدی و هسته‌ها را نشان می‌دهند. محدودیت‌های (۷) و (۸) بیانگر این هستند که اگر بازتولید انجام شود باید حداقل در یکی از سطوح کیفیتی هسته‌ها تعمیر شوند. محدودیت (۹) نشان می‌دهد میزان تولید محصول نو نباید از ظرفیت اختصاص‌یافته به تولید محصولات نو تجاوز کند. محدودیت (۱۰) همین مطلب را برای محصولات بازتولیدی نشان می‌دهد. محدودیت (۱۱) مبین این است که ظرفیت اختصاص یافته به بازتولید محصولات در هر دوره نمی‌تواند از کل ظرفیت در دسترس برای بازتولید در آن دوره تجاوز کند. در محدودیت (۱۲) مجموع ظرفیت اختصاص‌یافته به تولید و بازتولید در هر دوره با کل ظرفیت موجود خطوط تولید و بازتولید محدود شده است. محدودیت‌های (۱۳) و (۱۴)، به ترتیب، جهت کنترل موجودی محصولات و هسته‌ها متناسب با ظرفیت انبار بیان شده‌اند. محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) نشان می‌دهند میزان فروش محصولات نو و بازتولیدی، به ترتیب، نمی‌تواند بیش از تقاضای آن‌ها باشد. محدودیت (۱۷) حداکثر محصول نویی که می‌تواند جایگزین کمبود محصول بازتولیدی شود را نشان می‌دهد. مطابق با این محدودیت، به‌عنوان مثال، چنانچه در انبار محصول بازتولیدی به اندازه کافی موجود باشد، جایگزینی صورت نمی‌گیرد. محدودیت (۱۸) نشان می‌دهد که اگر تقاضای محصول بازتولیدی تأمین نشود، حداقل درصد مشخصی از تقاضای تأمین نشده با محصول نو جایگزین برآورده می‌شود. رابطه (۱۹) بیان‌کننده این است که قیمت خرید هسته یا محصول مستعمل (EOL) با سطح کیفیتی پایین‌تر نمی‌تواند بیش از قیمت خرید هسته با سطح کیفیتی بالاتر باشد. محدودیت (۲۰) حد پایین قیمت خرید هسته‌ها را در سطوح کیفیتی مختلف نشان می‌دهد. محدودیت (۲۱) بیان می‌کند که قیمت فروش محصول نو نباید کمتر از قیمت فروش محصول بازتولیدی باشد. محدودیت (۲۲) همین موضوع را در رابطه با طول دوره وارانتهی محصولات نو و بازتولیدی نشان می‌دهد. محدودیت (۲۳) حد بالای تعداد هسته‌های بازگشتی را در هر دوره نشان می‌دهد. محدودیت (۲۴) بیان می‌کند که اگر در هر سطح کیفیتی  $k$  بازتولید انجام شود، حداکثر تا درصد مشخصی از کل هسته‌های موجود در آن سطح کیفیتی می‌توانند برای بازتولید پردازش شوند. این محدودیت سیاست‌های مدیریتی در رابطه با حداکثر نرخ بازتولید هسته‌ها را در هر سطح کیفیتی اعمال می‌کند. این محدودیت همچنین حد بالایی بر روی تعداد هسته‌های در سطح کیفیتی  $k$  که باتوجه به منابع و امکانات موجود می‌توان بازتولید کرد قرار می‌دهد. به‌عنوان مثال، در یک دوره

نقض شوند و جواب دیگر شدنی نباشد. به همین دلیل از روش تعمیر متغیرها برای رسیدن به جواب موجه استفاده می‌کنیم. رویه زیر به منظور تولید جواب موجه در تکرارهای الگوریتم ارائه می‌شود:

۱. مقادیر  $W_{Rt}$ ،  $W_{Nt}$ ،  $P_{Rt}$ ،  $P_{Nt}$  را به گونه‌ای تنظیم می‌کنیم که مقادیر مثبت برای تقاضا به دست آید.

۲.  $M_t$  و  $R_t$  را مطابق با محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) تولید می‌کنیم.

۳. مقدار  $MR_t$  را مطابق با محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) تولید می‌کنیم.

۴. مقدار متغیر موجودی محصول نو ( $I_{Nt}$ ) را محاسبه می‌کنیم. در صورت کافی بودن سطح موجودی یک عدد تصادفی بین  $[0, 1]$  تولید می‌کنیم. در غیر این صورت به گام ۶ می‌رویم.

۵. در صورتی که عدد تصادفی تولید شده در گام ۴، کوچکتر از  $0.5$  بوده متغیر  $\mathcal{Y}_t$  را برابر با یک قرار داده و تولید صورت می‌گیرد و در غیر این صورت مقدار آن را برابر با صفر قرار داده و اقدام به تولید نمی‌کنیم. در نهایت به گام ۷ می‌رویم.

۶. مقدار  $\mathcal{Y}_t$  را برابر با یک قرار داده و تولید در آن دوره را انجام می‌دهیم.

۷. مقدار متغیر موجودی محصول بازتولیدی ( $I_{Rt}$ ) را محاسبه می‌کنیم. در صورت کافی بودن سطح موجودی یک عدد تصادفی بین  $[0, 1]$  تولید می‌کنیم. در غیر این صورت به گام ۹ می‌رویم.

۸. در صورتی که عدد تصادفی تولید شده در گام ۷، کوچکتر از  $0.5$  بوده متغیر  $\mathcal{Y}_t$  را برابر با یک قرار داده و بازتولید انجام می‌دهیم و در غیر این صورت مقدار آن را برابر با صفر قرار داده و اقدام به بازتولید نمی‌کنیم. در نهایت به گام ۱۰ می‌رویم.

۹. مقدار  $\mathcal{Y}_t$  را برابر با یک قرار داده و بازتولید در آن دوره را انجام می‌دهیم.

۱۰. مقادیر تولید و بازتولید را مطابق با محدودیت‌های (۵)، (۶)، (۹) و (۱۰) تعیین می‌کنیم.

۱۱. محدودیت‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) را بررسی کرده و در صورت نقض، پارامتر ناموجه بودن را فعال می‌کنیم.

۱۲. متغیر  $O_{tk}$  را باتوجه به محدودیت‌های (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) تولید می‌کنیم.

۱۳. متغیر  $I_{O_t}$  را براساس رابطه (۶) به دست می‌آوریم. باتوجه به رویه فوق، شبه کد الگوریتم PSO به صورت شکل (۲) می‌باشد.

#### ۴-۱-۵. شرط توقف

شرط توقف الگوریتم رسیدن به حداکثر تعداد تکرار از قبل تعیین شده است، که با  $Max\_iter$  نشان داده می‌شود.

#### ۴-۲. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

ایده اولیه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA) اولین بار توسط متروپولیس و همکاران در سال ۱۹۵۳ براساس فرآیند سرمایش یا بازپخت مواد در علم ترمودینامیک آماری مطرح شد [۶۱]. کرک پاتریک و همکاران در سال ۱۹۸۳ دریافتند که می‌توان از این ایده برای مسائل بهینه‌سازی

اولیه می‌شوند. این جمعیت اولیه به صورت تکراری در کل فضای جستجو حرکت می‌کنند و به دنبال جواب‌های نو می‌گردند. برای هر ذره تابع برازندگی به منظور اندازه‌گیری کیفیت جواب محاسبه می‌شود تا بهترین ذره مشخص گردد. هر ذره دارای یک مکان و یک سرعت است که به ترتیب توسط بردارهای  $x_{id}$  و  $v_{id}$  نمایش داده می‌شوند، که  $i$  اندیس مرتبط با هر ذره و  $d$  اندیس مرتبط با بعد می‌باشد. هر ذره بهترین مکان خود تا لحظه کنونی را در بردار  $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$  و مقدار  $J_{amin}$  بعد خود را در  $p_{ij}$  ذخیره می‌کند. بهترین بردار در میان همه ذرات در بردار  $p^b$  ذخیره می‌شود و بهترین مکان دیده شده کل در  $g^b$  ذخیره می‌شود. در طول زمان تکرار، به روزرسانی سرعت از سرعت قبلی به مقدار جدید با رابطه (۳۰) و مقدار جدید برای مکان از رابطه (۳۱) محاسبه می‌شوند.

$$v_{id}^{t+1} = wv_{id}^t + c_1r_1(p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2r_2(g_{id}^t - x_{id}^t) \quad \forall i, d \quad (30)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad \forall i, d \quad (31)$$

در رابطه (۳۰)،  $w$  ضریب اینرسی نامیده می‌شود و  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی بین  $[0, 1]$  هستند.  $c_1$  و  $c_2$  به ترتیب، ضرایب اهمیت به جهت بهترین مکان دیده شده ذره ( $p^b$ ) و بهترین مکان دیده شده کل ( $g^b$ ) می‌باشند. علاوه بر این‌ها، تعداد ذرات الگوریتم را که با  $N_p$  نشان می‌دهیم، در ابتدای الگوریتم باید مشخص شود. مراحل فوق به صورت خلاصه عبارتند از:

۱. تولید جواب تصادفی برای هر ذره

۲. محاسبه مقدار تابع هدف هر یک از ذرات

۳. به روزآوری مقدار  $p^b$  هر یک از ذرات

۴. به روزآوری مقدار  $g^b$

۵. به روزآوری سرعت هر یک از ذرات

۶. به روزآوری موقعیت مکانی هر یک از ذرات

۷. اگر شرط توقف ایجاد نشده به گام ۲ برو

#### ۴-۱-۱. نمایش راه حل

در طراحی این الگوریتم، یک بردار برای متغیر تصمیم  $P_{Nt}$  ارائه می‌دهیم که باتوجه به تغییرات این متغیر تصمیم در هر تکرار متغیرهای تصمیم دیگر نیز محاسبه می‌شوند.

#### ۴-۱-۲. تولید ذرات اولیه

برای مقداردهی اولیه الگوریتم، ذرات  $N_p$  به گونه‌ای به طور تصادفی مقداردهی می‌شوند که منجر به نقض مدل ارائه شده نشود. بنابراین ذرات  $N_p$  که باید برای متغیر  $P_{Nt}$  مقداردهی شود به طور تصادفی در بازه  $[0, P_{Nt}^{max}]$  انتخاب می‌شود که  $P_{Nt}^{max}$  بیشترین مقداری است که متغیر  $P_{Nt}$  می‌تواند داشته باشد.

#### ۴-۱-۳. ضریب اینرسی

برای شروع  $w^0$  به عنوان یک ضریب اینرسی ثابت انتخاب می‌شود و سپس ضریب اینرسی به تدریج با مضربی از  $\Psi$  در تکرارهای متوالی با استفاده از رابطه  $w^{t+1} = \Psi w^t$  کاهش می‌یابد.

#### ۴-۱-۴. جواب‌های نشدنی

پس از به روزرسانی موقعیت ذرات، ممکن است هر یک از محدودیت‌ها

در این دما پایان نیافته، ادامه می‌دهیم:

۱.۳. تولید یک همسایه تصادفی از  $s$ ؛

۲.۳. محاسبه تفاضل تابع هدف حل جاری از تابع هدف حل جدید ( $\Delta E$ )؛

۳.۳. اگر حل جدید بهتر است آن را می‌پذیریم و حل جاری را به‌روز می‌کنیم؛

۴.۳. اگر حل جدید بهتر نیست، با احتمال  $e^{\frac{\Delta E}{T}}$  آن را می‌پذیریم و حل جاری را به‌روز می‌کنیم؛

۴. دما را باتوجه به تابع کاهش دما به‌روز کرده و به گام ۳ می‌رویم.

۵. با رسیدن به شرط خاتمه الگوریتم، بهترین جواب یافته شده را گزارش می‌کنیم.

## ۵. نتایج عددی

در این بخش، نتایج عددی حاصل از حل مدل ارائه شده در بخش ۳ و الگوریتم‌های توسعه داده شده در بخش ۴ ارائه می‌شوند. مدل (۳)-(۲۹) ابتدا در نرم‌افزار GAMS مدل‌سازی و تلاش شد تا با استفاده از سالورهای Bonmin و Couenne حل شود. اما باتوجه به پیچیدگی بالای مدل، هر دو سالور در رسیدن به جواب بهینه ناکام ماندند. از این‌رو، برای حل مدل، در این بخش، از الگوریتم‌های فراابتکاری توصیف شده در بخش ۴ بهره می‌گیریم. ابتدا پارامترهای الگوریتم‌های حل پیشنهادی را تنظیم می‌کنیم. در الگوریتم PSO جمعیت ذرات  $N_p = 600$ ، تعداد دفعات تکرار  $Max\_iter = 1000$  و  $\Psi = 0.99$  قرار داده شده‌اند. همچنین در الگوریتم SA تعداد دفعات تکرار  $Max\_iter = 1000$  و تعداد زیرتکرار  $Maxsub\_iter = 1000$  در نظر گرفته شده‌اند. سایر مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های PSO و SA در جدول (۲) خلاصه شده‌اند. لازم به ذکر است مقادیر مختلفی برای پارامترهای الگوریتم‌ها، براساس حل نمونه مسائل کوچک، بر روی مدل بخش ۳ آزمایش شده و بهترین مقادیر انتخاب شده‌اند.

جدول (۲). پارامترهای الگوریتم PSO و SA

پارامتر	نماد	سطح انتخابی
PSO		
بیشترین سرعت ذره	$v_{max}, 1 \leq d \leq j$	۱۴۰، ۱۰۰، ۱۵۰
ضریب اینرسی اولیه	$w^0$	۱
ضرایب اهمیت	$c_1$ و $c_2$	۲ و ۱/۷۵
SA		
دمای اولیه	$T_0$	۱۰
ضریب کاهش دما	alpha	۰/۹۹

برای مثال عددی، تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی را  $T = 3$  و تعداد سطوح کیفیتی هسته‌ها را  $K = 5$  در نظر می‌گیریم. پارامترهای تابع تقاضای محصول نو عبارتند از:  $\eta_1 = 2000$ ،  $\eta_2 = 1500$ ،  $\eta_3 = 1900$ ،  $\theta_1 = 1$ ،  $\theta_2 = 1/3$ ،  $\theta_3 = 1/2$ ،  $\delta_1 = 0$ ،  $\delta_2 = 0$ ،  $\delta_3 = 1/3$ ،  $\rho_1 = 90$ ،  $\rho_2 = 95$ ،  $\rho_3 = 115$ ،  $\nu_1 = 0$ ،  $\nu_2 = 100$  و  $\nu_3 = 80$ . همچنین پارامترهای تابع تقاضای محصول

ترکیبی سود جست و براین اساس، الگوریتم SA را پایه‌گذاری نمودند. این الگوریتم بر پایه شباهت جستجو برای جواب بهینه، با تشکیل کریستال منظم و پایدار در آبخاری فلزات طراحی شده است [۶۲]. در این الگوریتم در ابتدا باید نقطه‌ای به‌عنوان نقطه شروع انتخاب شود (حل اولیه). همچنین دمای شروع و تابع کاهش دما هم باید تعریف شوند. سپس مقدار تابع هدف در این نقطه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ادامه، با ایجاد یک تغییر تصادفی در نقطه جاری، یک نقطه در همسایگی آن تولید شده و مقدار تابع هدف در نقطه جدید نیز محاسبه می‌شود. در صورتی که مقدار تابع هدف نقطه (حل) جدید بهبود یافته باشد، حل جدید جایگزین حل جاری می‌شود. در غیر این صورت، احتمال پذیرش حل جدید از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$p_r = \exp\left(\frac{\Delta E}{T}\right) \quad (32)$$

## PSO Algorithm

Input parameters: nPop, MaxIt,  $w$ ,  $wdamp$ ,  $c_1$  and  $c_2$   
Initialize particles and assign properties using procedure P1

Set the particle with best profit as GB

For i = 1 to MaxIt

For j = 1 to nPop

Update Particle velocities:

$$PNt_{velocity}^{t+1} = w \cdot PNt_{velocity}^t + c_1 \cdot rand \cdot (PNt_{PB}^t - PNt_{Position}^t) + c_2 \cdot rand \cdot (PNt_{GB}^t - PNt_{Position}^t)$$

Update particle positions

$$PNt_{Position}^{t+1} = PNt_{Position}^t + PNt_{Velocity}^t$$

Check if positions are inside the feasible area or outside.

If any position is outside the feasible area, use mirror effect.

If  $f(\text{particle}(j)) > f(\text{GB})$

GB = particle(i)

Return GB

شکل (۲). شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

در رابطه (۳۲) دما و  $\Delta E$  تفاضل مقدار تابع هدف حل جاری از تابع هدف حل جدید است.  $p_r$  با یک عدد تصادفی  $p'_r$  که بین  $[0, 1]$  است مقایسه می‌شود. اگر  $p_r \geq p'_r$  باشد حل جدید مورد پذیرش قرار می‌گیرد و در غیر این صورت رد می‌شود. در تکرار بعد، دما مطابق با تابع کاهش دما کاهش داده شده و مراحل فوق تکرار می‌شوند. تکرارهای الگوریتم تا هنگامی که شرط توقف ارضا نشده است ادامه می‌یابند.

گام‌های الگوریتم SA به‌صورت زیر می‌باشند:

۱. تولید یک جواب اولیه  $S_0$

۲. تنظیم دمای اولیه  $T = T_{max}$

۳. تا زمانی که در دمای فعلی تعادل برقرار نشده و یا تعداد تکرار مجاز

جدول (۴). ضرایب هزینه

دوره $t$	$C_{Rt}^e$	$C_{Nt}^e$	$C_{Ot}^h$	$C_{t}^h$	$C_{Rt}^w$	$C_{Nt}^w$	$C_{t}^m$	$C_{t}^{fr}$	$C_{t}^f$
۱	۱۱	۶	۱۰	۱۲۰	۱۷	۱۵	۲۵۰	۱۱۵	۱۳۵
۲	۷	۹	۲	۷	۱۷	۱۵	۲۵۰	۱۱۵	۱۲۵
۳	۹	۱۱	۳	۴	۱۴	۹	۲۰۰	۱۱۷	۱۳۲.۵

جدول (۵). سایر پارامترهای مدل پیشنهادی

دوره $t$	$a_t$	$S_t$	$UR_t$	$U_t$
۱				۲۰۰۰
۲	۰/۴	۷۰	۹۰۰	۲۵۰۰
۳	۰/۳	۵۰	۸۵۰	۲۳۰۰

باتوجه به مقادیر عددی فوق، الگوریتم‌های PSO و SA هر یک ده بار اجرا شده و بهترین عملکرد الگوریتم‌ها در جدول (۶) گزارش شده است. باتوجه به جدول (۶) مشاهده می‌شود که هر دو الگوریتم نتایجی تقریباً مشابه دارند، اما الگوریتم PSO نسبت به الگوریتم SA عملکرد نسبتاً بهتری داشته است.

بازتولیدی عبارتند از:  $d_2 = 1, d_3 = 1/2, c_3 = 650, c_2 = 800, e_3 = 0.9, e_2 = 1/1, g_3 = g_2 = 80, f_3 = 90, f_2 = 100, e_3 = 0.9, e_2 = 1/1$ . پارامترهای تابع تعداد هسته‌های بازگشتی در جدول (۳) و سایر پارامترهای مرتبط با تولید و بازتولید در جدول (۴) نشان داده شده‌اند. ظرفیت انبار برای هسته‌های بازگشتی  $E^0 = 750$  و ظرفیت انبار محصول نو و بازتولیدی  $E = 1700$  می‌باشند. پارامترهای مرتبط با مدل وارانتی در توزیع وایبول عبارتند از: پارامترهای شکل  $\beta_N = 1$  و  $\beta_R = 3$  و پارامتر مقیاس  $\lambda_{N1} = 0/2, \lambda_{N2} = 0/24, \lambda_{R3} = 0/34$  و سایر پارامترها در جدول (۵) آورده شده‌اند.

جدول (۳). پارامترهای هسته‌های بازگشتی

دوره $t$	سطح کیفیتی $k$	$a_{tk}$	$b_{tk}$	$C_{tk}^r$	$\xi_{tk}$
۲	۱	-۵۰۰	۲	۲۲	۰/۹
	۲	-۳۵۰	۱/۵	۲۴	۰/۹
	۳	۰	۱/۳	۲۸	۰/۷
	۴	۵۰	۱/۱	۳۰	۰/۷
	۵	۵۰	۱	۳۰	۰/۷
۳	۱	-۴۸۰	۱/۵	۲۲	۰/۸
	۲	-۲۵۰	۱/۴	۲۲	۰/۸
	۳	۱۰	۱/۲	۲۶	۰/۷
	۴	۶۰	۱/۱	۲۹	۰/۷
	۵	۹۵	۱	۳۱	۰/۷

جدول (۶). نتایج عددی به دست آمده از الگوریتم‌های PSO و SA

سود کل	شبه‌سازی تیرید (SA)			بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)			سطح کیفیتی $k$
	۳	۲	۱	۳	۲	۱	
دوره $t$	۳	۲	۱	۳	۲	۱	
متغیرها							
$D_{Nt}$	۱۵۳۸	۱۲۱۹	۱۷۵	۱۵۹۳	۱۱۳۴	۱۶۹	
$D_{Rt}$	۴۴۹	۱۱۵۸		۳۸۳	۱۲۱۳		
$P_{Nt}$	۱۹۰۰	۱۳۰۸/۱۷	۲۰۰۰	۱۸۹۹/۹۹	۱۳۲۵/۵۲	۱۹۹۶/۲۱	
$P_{Rt}$	۱۵۰/۱/۷۸	۱۰۵۷/۹۰		۱۵۷۰/۴۸	۱۰۱۴/۵۸		
$W_{Nt}$	۲/۷۵۹۸	۱/۴۰۳۵	۱/۸۵۳۵	۲/۶۵۵۳	۱/۵۶۱۲	۱/۸۳۵۴	
$W_{Rt}$	۰/۶۳۵۷	۱/۰۱		۰/۷۴۵۲	۱/۱		
$X_{Nt}$	۱۵۲۶	۰	۱۳۱۱	۱۵۹۶	۰	۱۳۳۷	
$X_{Rt}$	۱۹۲	۹۵		۱۸۸	۹۰		
$M_t$	۱۵۳۸	۵۹۱	۱۷۵	۱۵۹۳	۵۸۶	۱۶۹	
$R_t$	۱۹۲	۹۵		۱۸۸	۹۰		
$MR_t$	۸۲	۴۵۱		۷۷	۴۴۹		
$I_{Nt}$	۰	۹۴	۱۱۳۶	۰	۷۴	۱۱۶۸	
$I_{Rt}$	۰	۰		۰	۰		
$I_{Ot}$	۰	۳۳		۰	۳۶		
$Z_{tk}$	۱	۰		۱	۰	۱	
	۲	۰		۴	۰	۲	
	۴۸	۰		۵۰	۰	۳	
	۴۲	۱		۴۰	۰	۴	
	۸۲	۵		۸۴	۷	۵	

شبه‌سازی تبرید (SA)		بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)		سطح کیفیتی $k$	
۳۲۶	۲۵۰	۳۲۴	۲۵۰	۱	$V_{tk}$
۱۸۵/۷۱۴۲	۲۳۵/۳۳۳۳	۱۸۷/۱۴۲۹	۲۳۴	۲	
۱۰۷/۵	۱۳/۸۴۶۱	۱۰۹/۱۶۶۷	۱۴/۶۱۵۴	۳	
۱۰/۹۰۹۰	۱۴/۵۴۵۴	۹/۰۹۰۹	۱۱/۸۱۸۲	۴	
۴	۰	۵	۰	۵	
۹	۰	۵	۰	۱	$O_{tk}$
۹	۲	۹	۰	۲	
۹۷	۱۲	۹۹	۱۱	۳	
۵۰	۴۶	۴۹	۴۴	۴	
۲۷	۳۵	۲۴	۳۵	۵	
۱۰	۰	۶	۰	۱	$RC_{tk}$
۱۰	۳	۱۲	۱	۲	
۱۳۹	۱۸	۱۴۱	۱۹	۳	
۷۲	۶۶	۷۰	۶۳	۴	
۹۹	۵۰	۱۰۰	۵۰	۵	

پیشنهادی می‌باشند.

برای تحقیقات آتی در راستای موضوع این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- در این پژوهش برای وارانتی سیاست FRW در نظر گرفته شده است، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی دیگر سیاست‌های وارانتی را در نظر گرفت.
  - باتوجه به اینکه در دنیای واقعی بازگشت هسته‌ها به‌صورت قطعی و مشخص نیست، می‌توان در تحقیقات آینده بازگشت هسته‌ها را در حالت عدم قطعیت در نظر گرفت.
- در این پژوهش محصول نو و بازتولیدی تک‌جزئی در نظر گرفته شده‌اند، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی محصولات را به‌صورت چندجزئی در نظر گرفت.

#### مراجع

- [1] Bulmus, S. C., Zhu, S. X., & Teunter, R. (2014). Competition for cores in remanufacturing. *European Journal of Operational Research*, 233(1), 105-113. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.025>
- [2] Li, K., Li, Y., Gu, Q., & Ingersoll, A. (2019). Joint effects of remanufacturing channel design and after-sales service pricing: an analytical study. *International Journal of Production Research*, 57(4), 1066-1081. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1500722>
- [3] Xu, F., Li, Y., & Feng, L. (2019). The influence of big data system for used product management on manufacturing–remanufacturing operations. *Journal of Cleaner Production*, 209, 794-782. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.240>
- [4] Bhatia, M. S., & Srivastava, R. K. (2018). Analysis of external barriers to remanufacturing using grey-DEMATEL approach: An Indian perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.03.021>
- [5] Thierry, M., Salomon, M., Van Nunen, J., & Van Wassenhove, L. (1995). Strategic issues in product

#### ۶. جمع‌بندی و پیشنهاد برای تحقیقات آتی

در دهه‌های اخیر موضوع بازتولید محصولات مستعمل به‌دلیل صرفه‌جویی در منابع و مصرف انرژی و همچنین مزایای اقتصادی هم از سوی محققین و هم از سوی دولت‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. سیستم ترکیبی تولید/بازتولید نوعی سیستم تولیدی است که در آن سازمان هم محصولات نو را از مواد اولیه نو تولید می‌کند و هم محصولات بازگشتی یا هسته‌ها را پس از دمونتاژ، تعمیر و مونتاژ مجدد کرده و در سطح محصول نو بازیابی می‌کند. با این حال، این سیستم دارای جنبه‌های متفاوتی از جمله قیمت‌گذاری، سیاست‌گذاری وارانتی، ایجاد رقابت بین محصول نو و بازتولیدی و ... است.

در این پژوهش برنامه‌ریزی تولید در یک سیستم ترکیبی تولید/بازتولید پویا با در نظر گرفتن قیمت‌گذاری، وارانتی و رقابت در شرایطی که هسته‌های بازگشتی دارای سطوح کیفیتی متفاوتی هستند، مورد توجه قرار گرفته است. مدل ارائه شده در این پژوهش به‌صورت چنددوره‌ای در نظر گرفته شده است جایی که در دوره اول تنها تولید صورت می‌گیرد و محصولات با وارانتی و قیمت مناسب به‌فروش می‌رسند و سپس در دوره‌های بعدی هسته‌های بازگشتی متناسب با سطح کیفی‌شان با قیمت‌های متفاوت خریداری شده و بازتولید می‌شوند. در ادامه محصولات بازتولید شده با قیمت مناسب و ارزان‌تر از محصول نو و مدت زمان وارانتی مناسب به‌فروش می‌رسند. شروع فرآیند بازتولید از دوره دوم به بعد باعث ایجاد رقابت در بازار فروش محصول نو و بازتولیدی می‌شود و بدین جهت تعیین میزان فروش، قیمت و طول دوره وارانتی مناسب برای هر دو نوع محصول به‌طوری که بتواند بیشترین سود ممکن را برای سازمان به ارمغان آورد از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. برای حل این مسأله یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) ارائه شد. باتوجه به پیچیدگی مدل توسعه داده شده الگوریتم‌های PSO و SA برای حل ارائه شدند. نتایج عددی نشان‌دهنده کارایی و اثربخشی الگوریتم‌های

- products. *International Journal of Production Economics*, 266, 109058. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.109058>
- [20] Lahmar, H., Dahane, M., Mouss, N. K., & Haoues, M. (2022). Production planning optimisation in a sustainable hybrid manufacturing remanufacturing production system. *Procedia Computer Science*, 200, 1244-1253. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.325>
- [21] Guide Jr, V. D. R., Teunter, R. H., & Van Wassenhove, L. N. (2003). Matching demand and supply to maximize profits from remanufacturing. *Manufacturing & Service Operations Management*, 5(4), 303-316. <https://doi.org/10.1287/msom.5.4.303.24883>
- [22] Pokharel, S., & Liang, Y. (2012). A model to evaluate acquisition price and quantity of used products for remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, 138(1), 170-176. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.019>
- [23] Li, X., Li, Y., & Cai, X. (2015). Remanufacturing and pricing decisions with random yield and random demand. *Computers & Operations Research*, 54, 195-203. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.01.005>
- [24] Mahmoudzadeh, M., Sadjadi, S. J., & Mansour, S. (2013). Robust optimal dynamic production/pricing policies in a closed-loop system. *Applied Mathematical Modelling*, 37(16-17), 8141-8161. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.03.008>
- [25] Jena, S. K., & Sarmah, S. P. (2014). Price competition and co-operation in a duopoly closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 156, 346-360. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.06.018>
- [26] Cai, X., Lai, M., Li, X., Li, Y., & Wu, X. (2014). Optimal acquisition and production policy in a hybrid manufacturing/remanufacturing system with core acquisition at different quality levels. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 374-382. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.07.017>
- [27] Ke, C., & Yan, B. (2020). Trade-in value effects of used products in remanufacturing with considering consumer purchase behavior. *Journal of the Operational Research Society*, 73(3), 608-633. <https://doi.org/10.1080/01605682.2020.1848362>
- [28] Ullah, M., & Sarkar, B. (2020). Recovery-channel selection in a hybrid manufacturing-remanufacturing production model with RFID and product quality. *International Journal of Production Economics*, 219, 360-374. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.07.017>
- [29] Tang, S., Wang, W., & Zhou, G. (2020). Remanufacturing in a competitive market: A closed-loop supply chain in a Stackelberg game framework. *Expert Systems with Applications*, 161, 113655. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113655>
- [30] Polotski, V., Kenné, J. P., & Gharbi, A. (2019). Production control of hybrid manufacturing-remanufacturing systems under demand and return variations. *International Journal of Production Research*, 57(1), 100-123. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1461272>
- [31] Liao, H., Deng, Q., & Shen, N. (2019). Optimal remanufacture-up-to strategy with uncertainties in acquisition quality, quantity, and market demand. *Journal of Cleaner Production*, 206, 987-1003. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.167>
- [32] Dou, G., Guo, H., Zhang, Q., & Li, X. (2019). A two-period carbon tax regulation for manufacturing and remanufacturing production planning. *Computers & recovery management. California management review*, 37(2), 114-136. <https://doi.org/10.2307/41165792>
- [6] Yazdian, S. A., Shahanaghi, K., & Naini, S. G. J. (2017). Integrated marketing and operational decisions in remanufacturing of end-of-life products: model and hybrid solution algorithms. *International Journal of Operational Research*, 29(1), 34-66. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2017.083174>
- [7] Peng, P., & Shehabi, A. (2022). Waste Electronics in the United States: Future Trends and Economical Potential. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1297140/v1>
- [8] Liu, W., Ma, W., Hu, Y., Jin, M., Li, K., Chang, X., & Yu, X. (2019). Production planning for stochastic manufacturing/remanufacturing system with demand substitution using a hybrid ant colony system algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 213, 999-1010. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.205>
- [9] Lu, Z., & Bostel, N. (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: the case of remanufacturing activities. *Computers & Operations Research*, 34(2), 299-323. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.002>
- [10] Su, C., & Wang, X. (2016). Optimal Upgrade Policy for Used Products Sold with Two-dimensional Warranty. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(8), 2889-2899. <https://doi.org/10.1002/qre.1973>
- [11] Ahiska, S. S., Gocer, F., & King, R. E. (2017). Heuristic inventory policies for a hybrid manufacturing/remanufacturing system with product substitution. *Computers & Industrial Engineering*, 114, 206-222. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.10.014>
- [12] Guide Jr, V. D. R., & Van Wassenhove, L. N. (2009). OR FORUM—The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations Research*, 57(1), 10-18. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0628>
- [13] Deng, Q. W., Liao, H. L., Xu, B. W., & Liu, X. H. (2017). The resource benefits evaluation model on remanufacturing processes of end-of-life construction machinery under the uncertainty in recycling price. *Sustainability*, 9(2), 256. <https://doi.org/10.3390/su9020256>
- [14] Ji, X., Li, G., & Wang, Z. (2017). Impact of emission regulation policies on Chinese power firms' reusable environmental investments and sustainable operations. *Energy Policy*, 108, 163-177. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.035>
- [15] Guide Jr, V. D. R., Jayaraman, V., & Srivastava, R. (1999). Production planning and control for remanufacturing: a state-of-the-art survey. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 15(3), 221-230. [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(99\)00020-4](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(99)00020-4)
- [16] Ferrer, G. (1997). The economics of personal computer remanufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, 21(2), 79-108. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(97\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(97)00030-X)
- [17] Li, W., Wang, P., Cheng, W., & Nie, K. (2024). Transnational remanufacturing decisions under carbon taxes and tariffs. *European Journal of Operational Research*, 312(1), 150-163. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.06.019>
- [18] Sitcharangsie, S., Ijomah, W., & Wong, T. C. (2019). Decision makings in key remanufacturing activities to optimise remanufacturing outcomes: a review. *Journal of Cleaner Production*, 232, 1465-1481. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.204>
- [19] Mao, H., Wang, W., Liu, C., Xu, Y., & Zhao, S. (2023). Effects of the carbon emission quota policy on the quality and sales of manufactured and remanufactured

- چندمرحله‌ای در زنجیره تأمین حلقه بسته همراه با راه‌اندازی‌های وابسته به توالی و انتقال راه‌اندازی». نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۹(۴): ۲۳۹-۲۵۵. doi:10.22084/IER.2017.9535.1451
- Fatemi Ghomi, S. M. T., Torkaman, S. (2017). Multi-Stage Production Planning with Sequence-Dependent Setups and Setup Carry Over in Closed-Loop Supply Chain. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 4(9), 239-255. doi: 10.22084/ier.2017.9535.1451 (In Persian).
- [45] Wang, Y., Chen, W., & Liu, B. (2017). Manufacturing/remanufacturing decisions for a capital-constrained manufacturer considering carbon emission cap and trade. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1118-1128. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.058>
- [46] Yazdian, S.A., Shahanaghi, K., & Makui, A. (2016). Joint optimisation of price, warranty and recovery planning in remanufacturing of used products under linear and non-linear demand, return and cost functions. *International Journal of Systems Science*, 47(5), 1155-1175. <https://doi.org/10.1080/00207721.2014.915355>
- [47] Li, K., Liu, J., Fu, H., & Liu, B. (2020). Acquisition and pricing strategies in hybrid manufacturing-remanufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 57, 217-230. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.09.006>
- [48] Alegoz, M., Kaya, O., & Bayindir, Z. P. (2021). A comparison of pure manufacturing and hybrid manufacturing-remanufacturing systems under carbon tax policy. *European Journal of Operational Research*, 294(1), 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.018>
- [49] Assid, M., Gharbi, A., & Hajji, A. (2021). Production planning and control of unreliable hybrid manufacturing-remanufacturing systems with quality-based categorization of returns. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127800. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127800>
- [50] Luo, R., Zhou, L., Song, Y., & Fan, T. (2022). Evaluating the impact of carbon tax policy on manufacturing and remanufacturing decisions in a closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 245, 108408. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108408>
- [51] Sarkar, B., & Bhuniya, S. (2022). A sustainable flexible manufacturing-remanufacturing model with improved service and green investment under variable demand. *Expert Systems with Applications*, 202, 117154. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117154>
- [52] Ngu, H. J., Lee, M. D., & Osman, M. S. B. (2020). Review on current challenges and future opportunities in Malaysia sustainable manufacturing: Remanufacturing industries. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123071. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123071>
- [53] Mejía-Moncayo, C., Kenné, J. P., & Hof, L. A. (2023). On the development of a smart architecture for a sustainable manufacturing-remanufacturing system: a literature review approach. *Computers & Industrial Engineering*, 180, 109282. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109282>
- [54] Van Wassenhove, L. N., & Zikopoulos, C. (2010). On the effect of quality overestimation in remanufacturing. *International Journal of Production Research*, 48(18), 5263-5280. <https://doi.org/10.1080/00207540903150585>
- Industrial Engineering*, 128, 502-513. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.064>
- [33] Jena, S. K., Sarmah, S. P., & Sarin, S. (2019). Price competition between high and low brand products considering coordination strategy. *Computers & Industrial Engineering*, 130, 500-511. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.03.008>
- [34] Song, H., & Han, S. (2019). Pricing Strategies for Remanufacturers: Considering Both Consumer Preference and Competition. In *2019 16th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)* (pp. 1-8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2019.8887717>
- [35] Wang, N., He, Q., & Jiang, B. (2019). Hybrid closed-loop supply chains with competition in recycling and product markets. *International Journal of Production Economics*, 217, 246-258. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.01.002>
- [36] Zhou, Y. C., & Sun, X. C. (2019). Robust optimal inventory and acquisition effort decisions in a hybrid manufacturing/remanufacturing system. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 36(5), 335-350. <https://doi.org/10.1080/21681015.2019.1650836>
- [۳۷] زارع، ساجد، فخرزاد، محمدباقر، حسینی نسب، حسن و خادمی زارع، حسن. (۱۴۰۱). «برنامه‌ریزی دمونتاژ چندمحصولی و چنددوره‌ای مبتنی بر اشتراک‌گذاری قطعات و مجاز بودن دمونتاژ جزئی تحت محدودیت ظرفیت». نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۲۱(۱): ۳۵-۴۹. doi: 10.22084/IER.2023.27084.2099
- Zare, S., Fakhrzad, M. B., Hosseini Nasab, H., & Khademi Zare, H. (2023). Capacitated Multi-Period Multi-Product Disassembly Scheduling with Parts Commonality and Partial Disassembly. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 10(21), 35-49. doi:10.22084/ier.2023.27084.2099 (In Persian).
- [38] Turki, S., Sauvey, C., & Rezg, N. (2018). Modelling and optimization of a manufacturing/remanufacturing system with storage facility under carbon cap and trade policy. *Journal of Cleaner Production*, 193, 441-458. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.057>
- [39] Liao, H., Deng, Q., Wang, Y., Guo, S., & Ren, Q. (2018). An environmental benefits and costs assessment model for remanufacturing process under quality uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 178, 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.256>
- [40] Giri, B. C., Mondal, C., & Maiti, T. (2018). Analysing a closed-loop supply chain with selling price, warranty period and green sensitive consumer demand under revenue sharing contract. *Journal of Cleaner Production*, 190, 822-837. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.092>
- [41] Ho, J. W., Huang, Y. S., & Hsu, C. L. (2018). Pricing under internal and external competition for remanufacturing firms with green consumers. *Journal of Cleaner Production*, 202, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.109>
- [42] Liu, Z., Chen, J., & Diallo, C. (2018). Optimal production and pricing strategies for a remanufacturing firm. *International Journal of Production Economics*, 204, 290-315. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.07.015>
- [43] Liao, H., & Deng, Q. (2018). A carbon-constrained EOQ model with uncertain demand for remanufactured products. *Journal of Cleaner Production*, 199, 334-347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.108>
- [۴۴] فاطمی قمی، سیدمحمدتقی و ترکمن، سمیه. (۱۳۹۵). «برنامه‌ریزی تولید

- International Conference on Neural Networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- [60] Kennedy, J., & Eberhart, R. C. (1997, October). A discrete binary version of the particle swarm algorithm. In *1997 IEEE International conference on systems, man, and cybernetics. Computational cybernetics and simulation* (Vol. 5, pp. 4104-4108). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.1997.637339>
- [61] Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., & Teller, E. (1953). Simulated annealing. *Journal of Chemical Physics*, 21(161-162), 1087-1092.
- [62] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- [55] Ahiska, S. S., & Kurtul, E. (2014). Modeling and analysis of a product substitution strategy for a stochastic manufacturing/remanufacturing system. *Computers & Industrial Engineering*, 72, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.02.015>
- [56] Adida, E., & Perakis, G. (2006). A robust optimization approach to dynamic pricing and inventory control with no backorders. *Mathematical Programming*, 107, 97-129. <https://doi.org/10.1007/s10107-005-0681-5>
- [57] Ascher, H., & Feingold, H. (1984). Repairable systems reliability: modeling, inference, misconceptions and their causes (p. 232). New York: M. Dekker.
- [58] Ebeling, C. E. (1997). Reliability and Maintainability Engineering: An Introduction. New York: McGraw-hill.
- [59] Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, November). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-*





DOI: <https://dx.doi.org/10.22084/IER.2024.5563>

## Production Planning of a Dynamic Hybrid Manufacturing/Remanufacturing System Considering Pricing and Warranty Decisions Under Competition Between New and Remanufactured Products

Atena Naseri<sup>1</sup>, Seyyed Ahmad Yazdian<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> M.S. in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### *Article history:*

Received 25 July 2023

Accepted 1 January 2024

#### *Keywords:*

Hybrid  
manufacturing/Remanufacturing  
System  
Pricing  
Warranty  
Competition  
Mixed-Integer Nonlinear  
Programming  
Particle Swarm Optimization  
Algorithm

### ABSTRACT

With the increase in environmental pollution due to the disposal of used products in the environment, recovery of such products at the end of their life cycle has become one of the important issues in the field of reverse logistics and sustainable production. Remanufacturing is one of the options for used products recovery with high economic advantages and the least harmful environmental effects. The simultaneous planning of the production of new products and remanufacturing of used ones forms a combined manufacturing/remufacturing system, which is among the complex issues in the field of production systems planning. The combined pricing, warranty, and competition considerations has so far not been seriously investigated in this field. The aim of this research is to create an optimal production plan for a multi-period hybrid manufacturing/remufacturing system, where the producer decides on the price, the amount of production and the warranty period for both new and remanufactured products. To achieve this goal, a multi-period mixed integer non-linear programming (MINLP) model is built. Only new products are produced and sold in the first period, then the used products (cores), in different quality levels, are purchased from customers in the following periods, and hence, remanufacturing is added to the model. Both types of products are sold in the same market, so there is competition between them to gain more market share. Due to the complexity of the developed model, particle swarm optimization (PSO), and simulated annealing (SA) algorithms are used for its solution. Numerical results show the efficiency and effectiveness of the proposed model and solution approaches.

\* Corresponding author. S.A. Yazdian

Tel.: 021-44868404; E-mail address: [ahmad.yazdian@srbiau.ac.ir](mailto:ahmad.yazdian@srbiau.ac.ir)