

برنامه‌ریزی دمونتاژ چندمحصولی و چنددوره‌ای مبتنی بر اشتراک‌گذاری قطعات و مجاز بودن دمونتاژ جزئی تحت محدودیت ظرفیت

ساجد زارع^۱، محمدباقر فخرزاد^{۲*}، حسن حسینی‌نسب^۳، حسن خادمی زارع^۴

۱. دانشجوی دکترا، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۲. استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۳. استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۴. استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

خلاصه

بهره‌گیری از محصولات و مواد استفاده شده و جلوگیری از ورود آن‌ها به محیط زیست در زنجیره تأمین سبز، سبب محافظت از محیط زیست گردیده است. مهم‌ترین بخش در زنجیره تأمین حلقه بسته، بازیابی محصولات کارکرده و استفاده مجدد آن‌ها در فرآیند تولید محصولات جدید با استفاده از دمونتاژ آن‌ها می‌باشد. در این مقاله برنامه‌ریزی دمونتاژ چندمحصولی و چنددوره‌ای مبتنی بر اشتراک‌گذاری قطعات و مجاز بودن دمونتاژ جزئی تحت محدودیت ظرفیت مورد بررسی قرار گرفته است. امکان دمونتاژ جزئی و جداسازی قطعات تا به دست آمدن قطعه موردنظر مهم‌ترین نوآوری این مقاله می‌باشد. براین اساس یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در هر دوره با توجه به حالت دمونتاژ جزئی جهت برآورد تقاضای موجود ارائه گردیده است. در مدل ارائه شده دمونتاژ به صورت جزئی انجام گردیده و جداسازی قطعات بدون تقاضا انجام نمی‌شود، بنابراین صرفه‌جویی زیادی در زمان و هزینه دمونتاژ صورت می‌گیرد. حل مدل توسعه داده شده توسط حل‌کننده سیپلکس صورت گرفته و از تحلیل حساسیت برای اعتبارسنجی و تعیین نتایج کاربردی مدل استفاده گردیده است. آزمایش‌های عددی نشان می‌دهد حل‌کننده سیپلکس برای حل مدل توسعه داده شده در ابعاد کوچک و متوسط کارایی مناسبی دارد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۱/۰۲/۲۵

پذیرش ۱۴۰۱/۰۶/۰۵

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

برنامه‌ریزی دمونتاژ

دمونتاژ جزئی

اشتراک‌گذاری قطعات

چندمحصولی

چنددوره‌ای

۱. مقدمه

میزان از محصولات منجر به مصرف بالای انرژی، استفاده بیش از حد از منابع طبیعی و ایجاد آلودگی زیست‌محیطی و همچنین دور ریختن محصولات از رده خارج شده و دفن زباله‌های آن، شده است. براساس پژوهش‌های بررسی شده، میزان زباله الکترونیکی تولید شده از ۲۵ میلیون تن در سال ۲۰۱۶ به بیش از ۶۳ میلیون تن در سال ۲۰۱۹ رسیده است [۱] بنابراین مزیت‌های زیست‌محیطی و اقتصادی و همچنین قوانین اجبارکننده، توجه به موضوع بازیافت را بیش از پیش افزایش داده است [۲]، به طوری که در سال ۲۰۱۹، ارزش بازیافت در کشور آمریکا ۳۱۰ میلیارد دلار معادل ۸/۸٪ کل فروش بوده است. این

رشد سریع فناوری در سالیان اخیر باعث شده است که شکل زندگی انسان‌ها تغییر کند و آن‌ها وابستگی زیادی به انواع مختلف وسایل الکترونیکی داشته باشند. این وسایل باعث راحتی زندگی انسان‌ها شده است بنابراین مورد تقاضای عموم مردم هستند و باید به صورت انبوه تولید شوند. از طرفی سرعت بالای توسعه فناوری باعث شده است بسیاری از این وسایل مانند گوشی تلفن همراه، تلوزیون و محصولات مشابه، قبل از پایان عمر مفیدشان دور ریخته شوند و با نمونه به روز جایگزین شوند که همین امر نیاز به تولید این محصولات را بیشتر کرده است. تولید این

* نویسنده مسئول: محمدباقر فخرزاد

تلفن: ۰۳۵-۳۱۲۳۲۴۰۵؛ پست الکترونیکی: mfakhrzad@yazd.ac.ir

پژوهش برای برنامه‌ریزی دمونتاژ خود استفاده کند. باتوجه به اینکه در این مدل دمونتاژ به صورت جزئی امکان‌پذیر است، در صورتی که محصولات بازگشتی از انواع مختلف با قطعات مشابه باشند، مدل ارائه شده سوالات زیر را پاسخ می‌دهد.

- (۱) باتوجه به محدودیت زمان، قطعات ریشه در هر دوره در چه سطحی باید دمونتاژ شوند تا تعادل بین محدودیت زمان و هزینه نگهداری برقرار شود؟
- (۲) باتوجه به تفاوت زمان و هزینه دمونتاژ قطعات یکسان در چند محصول، جهت بهترین ارضای تقاضای قطعات، در هر دوره کدام محصول انتخاب شود؟
- (۳) در صورتی که انتخاب قطعات یکسان با زمان‌های دمونتاژ متفاوت، امکان‌پذیر باشد، تعادل زمان و هزینه چگونه انجام خواهد شد؟
- (۴) در ادامه ابتدا پیشینه تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد و بعد از تعریف مسأله و مشخص شدن مفروضات اساسی، مدل‌سازی مسأله انجام می‌شود. سپس روش حل ارائه می‌گردد و با ارائه مثال عددی و تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مدل، عملکرد روش‌های حل ارائه شده مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت نتایج به دست آمده تشریح می‌شود.

۲. پیشینه تحقیق

برای بررسی پیشینه تحقیق، ابتدا جایگاه مسأله برنامه‌ریزی دمونتاژ در مسائل مربوط به دمونتاژ مشخص می‌گردد.

دمونتاز به معنی یک روش سیستماتیک برای جداسازی و تبدیل یک محصول به طور مثال خودرو به قطعات، مجموعه‌ها و زیرمونتاژهای آن می‌باشد. دمونتاژ می‌تواند در یک کارگاه کوچک، یک سلول کارگاهی یا خط دمونتاژ انجام شده و باعث طرح مسائل مختلف و متنوعی در این زمینه گردد [۶]. در پژوهش‌های انجام شده در حوزه فرآیندهای دمونتاژ مسائل زیادی مانند طرح‌ریزی دمونتاژ^۲، برنامه‌ریزی دمونتاژ^۳، توالی دمونتاژ^۴ و متعادل‌سازی خط دمونتاژ^۵ مورد بررسی قرار گرفته است [۷].

طرح‌ریزی دمونتاژ شامل تعیین کاربرد قطعات جدا شده و مسائل مربوط به طراحی و بازطراحی آن می‌شود [۷]. از طرف دیگر توالی دمونتاژ به دنبال تعیین بهترین ترتیب امکان‌پذیر برای انجام فرآیندهای دمونتاژ است و به مسائلی مانند هزینه خرید و تأمین، هزینه انبار و نگهداری و تقاضای پس‌افت نمی‌پردازد [۸]. از دیگر مسائل حوزه دمونتاژ، متعادل‌سازی خط دمونتاژ است. هدف مسأله متعادل‌سازی خط دمونتاژ، به‌کارگیری مؤثر منابع خط برای پاسخ‌گویی به تقاضا است. استفاده مؤثر منابع می‌تواند به صورت یافتن کمترین تعداد ایستگاه کاری موردنیاز، تخصیص بهینه فرآیندهای دمونتاژ به ایستگاه‌های کاری و بهبود چیدمان و حمل‌ونقل مواد و ابزار باشد [۹-۱۱]. برخی از توابع هدف مطرح شده در مسائل متعادل‌سازی خط دمونتاژ مانند مسائل متعادل‌سازی خط دمونتاژ می‌باشد. برای مثال می‌توان به کمینه کردن

مقدار در سال ۲۰۰۹ حدود ۱۲۰ میلیارد دلار بوده است [۳]. براین اساس ایجاد زنجیره‌های تأمین حلقه بسته به‌عنوان یک زنجیره‌تأمین سبز با استفاده از مزیت بهره‌گیری از مواد استفاده شده و جلوگیری از ورود این زباله‌ها به محیط، نقش کاملاً چشم‌گیری در محافظت از محیط زیست داشته است. در زنجیره‌تأمین حلقه بسته نقطه ابتدایی همان نقطه پایانی در زنجیره‌تأمین مستقیم یعنی مشتری است. محصولات استفاده شده از مشتریان جمع‌آوری می‌شود و برای تولید محصولات جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. یکی از مهم‌ترین بخش‌های زنجیره‌تأمین حلقه بسته، بازیابی محصولات^۱ کارکرده و استفاده مجدد از آن‌ها در فرآیند تولید محصولات جدید است. جهت بازگشت مجدد محصولات استفاده شده به چرخه تولید، باید قطعات تشکیل دهنده آن‌ها از یکدیگر جدا (دمونتاژ) شوند. بنابراین همان‌طور که تأمین منابع بکر برای تولید نیاز به برنامه‌ریزی دارد، باید برنامه‌ریزی دمونتاژ هم انجام شود. در برنامه‌ریزی دمونتاژ مشخص می‌شود که در هر دوره از هر نوع محصول بازگشتی، چه تعداد و تا چه عمقی باید دمونتاژ شود تا نیاز فرآیند بازتولید به قطعات ارضا گردد. در پژوهش کیم [۵] برنامه‌ریزی دمونتاژ در یک ساختار دمونتاژ به صورت «تعیین تعداد و زمان‌بندی دمونتاژ همه قطعات والد برای ارضای تقاضای قطعات ریشه در یک افق زمانی مشخص با دوره‌های زمانی گسسته» تعریف شده است.

در این پژوهش مسأله برنامه‌ریزی دمونتاژ برای یک تولیدکننده که قصد دارد کلیه قطعات مصرفی یا بخشی از قطعاتی که برای تولید محصولات جدید نیاز دارد را از طریق بازیابی محصولات استفاده شده بازگشتی تأمین نماید، مورد بررسی قرار می‌گیرد. برنامه ارائه شده برای افق زمانی مورد نظر تولیدکننده برای هر دوره مشخص می‌کند که چه تعداد محصول بازگشتی باید خریداری شود، کدام یک از محصولات یا زیرمونتاژها باید برای جداسازی انتخاب شوند و هر عملیات جداسازی تا چه عمقی باید انجام شود. برنامه ارائه شده، تأمین به موقع تقاضای قطعات در هر دوره را تضمین می‌کند و با در نظر گرفتن محدودیت زمان در دسترس برای انجام عملیات جداسازی، هزینه‌های فرآیندی، خرید و نگهداری را کمینه می‌نماید. مهم‌ترین تصمیمی که در این مسأله برای آن برنامه‌ریزی می‌شود، تعیین عمق دمونتاژ یا دمونتاژ جزئی است.

در دمونتاژ جزئی برای جداسازی یک قطعه مورد تقاضا، نیاز نیست که کلیه قطعات و زیرمونتاژهای محصول به صورت کامل جداسازی شوند. به طور مثال برای جداسازی دکمه پاور از یک دستگاه پرینتر، نیاز نیست که تمام قطعات آن دمونتاژ شود؛ بنابراین در این مقاله هدف بررسی برنامه‌ریزی دمونتاژ است که در آن دمونتاژ به صورت جزئی امکان‌پذیر است و نوآوری اصلی این پژوهش، ارائه یک مدل جدید برای در نظر گرفتن دمونتاژ جزئی در برنامه‌ریزی دمونتاژ است.

همان‌طور که توضیح داده شد، در صورتی که یک تولیدکننده بخواهد برای خود زنجیره حلقه بسته توسعه دهد و از محصولات بازگشتی در تولید محصولات جدید استفاده کند می‌تواند از مدل ارائه شده در این

4. Disassembly sequencing
5. Disassembly line balancing

1. Product Recovery
2. Disassembly planning
3. Disassembly scheduling

گرفته اند. مدل آن‌ها مشابه معکوس برنامه‌ریزی انباشته^۱ است با این حال به دلیل وجود تقاضا برای قطعات مختلف موجود در ساختار محصول، روش‌های ارائه شده برای مسئله تعیین اندازه انباشته برای مسائل دمونتاژ کاربرد ندارد. آن‌ها در پژوهش خود فرض کرده‌اند که زمان در دسترس برای دمونتاژ در هر دوره مشخص و محدود است علاوه بر آن تقاضای قطعات برگ غیرقطعی و دارای توزیع احتمالی مشخص است. آن‌ها برای ساده شدن مدل فرض کرده‌اند محصولات قابل دمونتاژ، دوسطحی می‌باشند، به این معنی که یک سطح ریشه، و سطح بعد قطعات برگ است و محصولات، زیرمونتاژ ندارند. فرض مهم دیگر در مدل آن‌ها، مجاز بودن تقاضای از دست رفته می‌باشد. براین اساس یک هزینه جریمه برای عدم تأمین تقاضا در نظر گرفته شده و تابع هدف به صورت کمینه کردن جمع هزینه‌های آماده‌سازی، نگهداری و تقاضای از دست رفته بررسی گردیده است. کیم و همکاران [۲۰] در پژوهش خود به بررسی برنامه‌ریزی دمونتاژ چندمحصولی با امکان‌پذیر بودن اشتراک‌گذاری قطعات پرداخته‌اند. در مدل ارائه شده تابع هدف به صورت کمینه کردن مجموع هزینه‌های آماده‌سازی، دمونتاژ و نگهداری تعریف شده است. در این پژوهش فرض بر این است که محصولات بازگشتی به اندازه موردنیاز در لحظه تأمین می‌شوند، قطعات با کیفیت بوده و طی فرآیند دمونتاژ خرابی ندارد، تقاضا قطعی بوده و امکان پس‌افت تقاضا وجود ندارد. کیم و همکاران برای حل مدل از یک روش ابتکاری دومرحله‌ای استفاده نموده‌اند به طوری که در مرحله اول با آزادسازی مدل و تبدیل به برنامه‌ریزی خطی جواب اولیه به دست می‌آید. سپس در مرحله بعد با استفاده از تکرار و برنامه‌ریزی پویا جواب به دست آمده بهبود داده می‌شود و در هر مرحله شدنی بود آن نیز بررسی می‌شود. در اکثر پژوهش‌های بررسی شده، یکی از مهم‌ترین مفروضات، تأمین محصولات بازگشتی در هر دوره به میزان لازم و با قیمتی ثابت است. لازم به ذکر است در پژوهش کیم و همکاران [۲۰] دمونتاژ نیمه کامل است؛ به این معنی که برای رسیدن به یک قطعه نیاز به دمونتاژ کل محصول نیست ولی در هر مرحله کلیه زیرمونتاژها باید کامل جداسازی شوند و زمانی که یک زیرمونتاژ جداسازی می‌شود، باید تمامی قطعات از هم جدا شوند.

در تعدادی از پژوهش‌های پیشین، برای اینکه یک برنامه‌ریزی کلی در یک زنجیره بازتولید را مورد مطالعه قرار بدهند، مسائل برنامه‌ریزی جداسازی، پردازش و مونتاژ مجدد را به صورت توأمان مدل‌سازی کرده‌اند. ترکمن و فاطمی [۲۱] فرآیندهای تولید و بازتولید را به صورت متوالی در نظر گرفتند و یک برنامه‌ریزی چندمرحله و چندمحصولی و چنددوره‌ای در زنجیره تأمین حلقه بسته را مورد مطالعه قرار دادند و برای حل این مدل چهارالگوریتم حل ابتکاری و فرا ابتکاری ارائه دادند. دوه و لی [۲۲] در پژوهش خود یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای برنامه‌ریزی ادغامی جداسازی و پردازش مجدد ارائه داده‌اند. در مسئله مورد بررسی این پژوهش، فرض شده است که یک ایستگاه کاری برای جداسازی قطعات وجود دارد که محصولات بازگشتی را جداسازی

تعداد ایستگاه‌های کاری، کمینه کردن کل زمان انتظار، بیشینه کردن بهره‌وری خط و متعادل‌سازی نیروی کار اشاره کرد.

باتوجه به گستردگی هریک از حوزه‌های مطرح شده در زمینه دمونتاژ و پژوهش‌های زیادی که در هر گروه انجام شده است، در ادامه به بررسی پژوهش‌های حوزه برنامه‌ریزی دمونتاژ پرداخته می‌شود.

مسئله پایه برنامه‌ریزی دمونتاژ برای اولین بار در سال ۱۹۹۴ توسط گوپتا و تالب [۱۲] معرفی گردید. مسئله پایه به صورت تولید برخی محصولات از طریق بازتولید قطعات موردنیاز توسط تولیدکننده تعریف شده است. تولیدکننده در هر دوره، تقاضای مشخصی برای محصولات خود داشته به طوری که باتوجه به این تقاضا و تعداد قطعات لازم برای تولید، تقاضای هر قطعه برگ را مشخص می‌کند. برای ارضای این تقاضا و باتوجه به تعداد قطعات برگ که در یک ریشه وجود دارد، تعداد ریشه‌ای که باید در آن دوره دمونتاژ شود، مشخص می‌گردد. به این ترتیب برنامه‌ریزی جهت دمونتاژ انجام می‌گیرد. لی و ژبروچاکیس [۱۳] با استفاده از روش برنامه‌ریزی احتیاجات مواد (MRP) یک روش ابتکاری دومرحله‌ای را براساس الگوریتم گوپتا و تالب [۱۲] توسعه داده، به طوری که با طرح تکرار بهبود، یک جواب بهینه یا نزدیک بهینه برای مسائل برنامه‌ریزی دمونتاژ به دست آمده است. کیم و همکاران [۱۴] در مسئله مطرح شده، حالت تک‌محصولی و بدون اشتراک‌گذاری قطعات را با تابع هدف کمینه‌سازی جمع هزینه‌های نگهداری، آماده‌سازی و نصب محصولات استفاده شده، در نظر گرفتند. آن‌ها در پژوهش خود اثبات کردند که مسئله برنامه‌ریزی دمونتاژ مطرح شده از نوع NP-hard بوده و برای حل آن نیاز به روش‌های ابتکاری است. آن‌ها یک الگوریتم شاخه‌وکران با آزادسازی لاگرانژین برای پیدا کردن جواب بهینه مسائل متوسط ارائه کرده و روش ابتکاری موجود را برای مسائل بزرگ بهبود داده‌اند. لی و همکاران [۱۵] در پژوهش خود با هدف نزدیک‌تر کردن برنامه‌ریزی دمونتاژ به واقعیت، محدودیت زمان برای فرآیندهای دمونتاژ را در نظر گرفته‌اند. برنامه‌ریزی عدد صحیح ارائه شده توسط آن‌ها در واقع معکوس مسئله چندسطحی اندازه انباشته با محدودیت ظرفیت بوده به طوری که تابع هدف آن بر پایه هزینه است. روش حل ارائه شده برای مسائل با اندازه بزرگ کاربرد ندارد به همین دلیل پس از این پژوهش، چندین پژوهش دیگر برای کاهش زمان محاسبه این مسئله در اندازه‌های بزرگ ارائه شده است. براین اساس، کیم و همکاران [۱۶] از یک روش ابتکاری دومرحله‌ای بر پایه آزادسازی لاگرانژین استفاده نموده‌اند. روش آن‌ها برای محاسبه جواب مسائل با اندازه کاربردی در زمان منطقی، عملکرد مناسبی دارد. کیم و همکاران [۱۷] و همچنین جون و همکاران [۱۸] یک الگوریتم ابتکاری دومرحله‌ای ارائه نموده به طوری که ابتدا با آزادسازی محدودیت ظرفیت جواب مسئله را مشخص می‌کند، سپس با تکرار و اصلاح، محدودیت ظرفیت را برآورده می‌سازد.

کیم و ژبروچاکیس [۱۹] مدل برنامه‌ریزی دمونتاژ با هدف تعیین برنامه زمان و تعداد محصولات استفاده شده که در یک افق زمانی مشخص برای ارضای تقاضای قطعات برگ باید جداسازی شوند را در نظر

چیان و ژانگ [۲۷] به مدل‌سازی یک مسأله برنامه‌ریزی دمونتاژ با محدودیت ظرفیت پرداخته‌اند به طوری که در آن میزان محصولات بازگشتی قابل تأمین به قیمت خرید این محصولات بستگی دارد. بدین ترتیب قیمت به‌عنوان یکی از متغیرهای تصمیم مدل در نظر گرفته شده است. مدل ارائه شده به‌صورت چندمحصولی در نظر گرفته شده و اشتراک‌گذاری قطعات امکان‌پذیر نیست. آن‌ها برای حل مدل از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ استفاده کرده‌اند. پورساحیان و همکاران [۲۸] در پژوهش خود بر روی موضوع تعیین اندازه انباشته در مسائل برنامه‌ریزی دمونتاژ متمرکز شدند. از نظر آن‌ها ارضا تقاضای قطعات از طریق دمونتاژ باعث می‌شود قطعاتی که تقاضای کمتری دارند نیز دمونتاژ شوند به طوری که نگهداری آن‌ها باعث تحمیل هزینه‌های بالایی گردیده است. براین اساس در پژوهش خود به ارائه مدل‌هایی پرداخته شده که امکان تصمیم‌گیری در مورد دور ریختن این قطعات وجود دارد. اسلاما و همکاران [۲۹] در کنار در نظر گرفتن اندازه انباشته برای برنامه‌ریزی دمونتاژ، موضوع عدم قطعیت در زمان فرآیند نوسازی را هم مطرح نمودند. دارغوث [۳۰] در پژوهش خود یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندمحصولی و چنددوره‌ای (MILP) با اشتراک‌گذاری قطعات را برای در نظر گرفتن انتخاب فناوری جداسازی ارائه کرده است. در این پژوهش هدف تعیین تصمیم‌های بهینه در مورد زمان‌بندی و انتخاب فناوری جداسازی قطعات برای پاسخ‌گویی به تقاضا برای اقلام برگ است. جی و همکاران [۳۱] با هدف شناسایی نکات مدیریتی مرتبط با حوزه دمونتاژ و ارائه یک رویکرد مؤثر برای برنامه‌ریزی دمونتاژ محصولات بازگشتی تحت شرایط مجاز بودن اشتراک‌گذاری قطعات، محدود بودن ظرفیت دمونتاژ و همچنین در نظر گرفتن هزینه آماده‌سازی مرتبط با تغییر بین محصولات مختلف مدل خود را ارائه کرده‌اند. این مسأله با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مدل شده است و برای حل مسأله از روش ابتکاری آزادسازی لاگرانژین استفاده گردیده است.

می‌کند. قطعات جدا شده نیاز به پردازش مجدد دارند که این پردازش توسط چند ایستگاه کاری موازی انجام می‌شود تا تقاضای قطعات را تأمین نمایند. در این مسأله که به‌صورت تک‌محصولی و بدون اشتراک‌گذاری قطعات مطرح شده است هدف تعیین بهترین اندازه انباشته جداسازی و بهترین اندازه انباشته پردازش مجدد است. فو و همکاران [۲۳] نیز یک برنامه‌ریزی ادغامی جداسازی، پردازش آماده‌سازی قطعات جدا شده و مونتاژ مجدد را مورد بررسی قرار دادند. در مدل بررسی شده، باتوجه به اینکه در واقعیت، زمان‌های جداسازی، پردازش و مونتاژ مجدد به‌طور دقیق از قبل مشخص نیست، به‌صورت غیرقطعی است. برای حل مدل مطرح شده، الگوریتم مگس میوه به‌کار گرفته شده است.

برخی از پژوهش‌های جدید به بررسی روش‌های حل مدل‌های برنامه‌ریزی دمونتاژ پرداخته‌اند. ژو و هی [۲۴] در پژوهش خود برنامه‌ریزی دمونتاژ با فرض تصادفی بودن تقاضا و زمان عملیات را بررسی کرده و یک الگوریتم هیبریدی تکاملی اکتشافی (HGA) را برای یافتن بهترین جواب این مسأله پیشنهاد کرده است. اسلاما [۲۵] یک سیستم جداسازی قطعات دوطرفی را مورد مطالعه قرار داده و چندین روش بهینه‌سازی را براساس شبیه‌سازی مونت کارلو و الگوریتم ژنتیک برای مسأله جداسازی چنددوره‌ای تصادفی پیشنهاد کرده است. یونگ و همکاران [۲۶] در پژوهش خود با هدف بررسی واقعی‌تر برنامه‌ریزی دمونتاژ، یک مدل برنامه‌ریزی جداسازی چندهدفه ارائه کردند که در آن مدت زمان پردازش به‌صورت فازی در نظر گرفتند و با استفاده از الگوریتم مگس میوه، برای حل مسائل در ابعاد بزرگ روش ابتکاری ارائه کردند.

در برخی از پژوهش‌ها در کنار مدل اصلی برنامه‌ریزی دمونتاژ، متغیرهای تصمیم مثل قیمت محصولات بازگشتی، انتخاب فناوری جداسازی و دور ریز قطعات بدون تقاضا را مورد بررسی قرار داده‌اند.

جدول (۱). خلاصه پژوهش‌های مرور شده

| مقاله | سال | ظرفیت | اشتراک قطعات | چندمحصولی | تک‌محصولی | چنددوره‌ای | دمونتاژ فازی | ظرفیت محدودترین ریشه‌ها | هدف |
|----------------------|------|-------|--------------|-----------|-----------|------------|--------------|-------------------------|---|
| لی و همکاران [۳۲] | ۲۰۰۴ | - | ✓ | ✓ | ✓ | - | - | - | برنامه‌ریزی ارضای تقاضای قطعات جدید از محصولات استفاده شده در یک افق زمانی مشخص |
| کیم و همکاران [۱۴] | ۲۰۰۹ | - | - | - | ✓ | ✓ | - | - | توسعه یک روش ابتکاری برای حل مسائل برنامه‌ریزی دمونتاژ |
| لی و همکاران [۱۵] | ۲۰۰۲ | زمان | - | - | ✓ | ✓ | - | - | در نظر گرفتن محدودیت زمان برای فرآیندهای دمونتاژ در جهت نزدیک‌تر کردن برنامه‌ریزی دمونتاژ به واقعیت |
| کیم و همکاران [۲۰] | ۲۰۰۶ | - | ✓ | ✓ | - | - | - | - | برنامه‌ریزی دمونتاژ چندمحصولی با اشتراک‌گذاری قطعات |
| کیم و ژیروچاکیس [۱۹] | ۲۰۱۰ | زمان | - | ✓ | - | ✓ | - | - | توسعه مدل برنامه‌ریزی دمونتاژ درحالتی که تقاضای قطعات برگ غیرقطعی باشد |

1. PSO (Particle Swarm Optimization)

| مقاله | سال | ظرفیت | اشتراک قطعات | چند محصولی | تک محصولی | چند دوره‌ای | دمونتاژ جزئی | ظرفیت ریشه‌ها محدودیت | هدف |
|----------------------------|------|-------|--------------|------------|-----------|-------------|--------------|-------------------------|---|
| جی و همکاران [۳۱] | ۲۰۱۶ | تعداد | ✓ | ✓ | - | ✓ | - | - | هدف شناسایی نکات مدیریتی مرتبط با حوزه دمونتاژ و برنامه‌ریزی دمونتاژ با در نظر گرفتن اشتراک‌گذاری قطعات، ظرفیت دمونتاژ محدود و هزینه آماده‌سازی |
| چیان و ژانگ [۲۷] | ۲۰۱۹ | زمان | - | ✓ | - | ✓ | - | وابسته به قیمت باز خرید | پیدا کردن بهترین قیمت باز خرید محصولات بازگشتی و مناسب‌ترین زمان بندی و تعداد قطعات دمونتاژی |
| پورمسیاحیان و همکاران [۲۸] | ۲۰۲۰ | - | ✓ | ✓ | - | ✓ | - | - | در نظر گرفتن اندازه انباشته و تصمیم‌گیری در مورد موجودی مازاد |
| ژو و همکاران [۲۴] | ۲۰۲۱ | تعداد | - | - | ✓ | ✓ | - | - | الگوریتم هیبریدی تکاملی اکتشافی (HGA) |
| اسلاما و همکاران [۲۵] | ۲۰۲۱ | زمان | - | - | ✓ | ✓ | - | - | ارائه چند روش حل مختلف برای برنامه‌ریزی دمونتاژ غیر قطعی |
| دارغوث [۳۰] | ۲۰۲۱ | تعداد | ✓ | ✓ | - | ✓ | - | - | در نظر گرفتن انتخاب نوع فناوری دمونتاژ |
| فو و همکاران [۲۳] | ۲۰۲۱ | - | - | - | ✓ | ✓ | - | - | برنامه‌ریزی ادغامی جداسازی، پردازش آماده‌سازی قطعات جدا شده و مونتاژ مجدد |
| دوه و لی [۲۲] | ۲۰۲۲ | زمان | - | - | ✓ | ✓ | - | - | برنامه‌ریزی ادغامی جداسازی و پردازش مجدد |
| اسلاما و همکاران [۲۹] | ۲۰۲۲ | زمان | - | - | ✓ | ✓ | - | - | در نظر گرفتن عدم قطعیت در زمان فرآیند نوسازی |
| یونگ و همکاران [۲۶] | ۲۰۲۲ | تعداد | - | ✓ | - | ✓ | - | - | در نظر گرفتن عدم قطعیت فازی در زمان فرآیند دمونتاژ |
| مقاله حاضر | - | زمان | ✓ | ✓ | - | ✓ | ✓ | - | ارائه یک مدل جدید برای برنامه‌ریزی دمونتاژ چند محصولی و چند دوره‌ای با در نظر گرفتن اشتراک‌گذاری قطعات و مجاز بودن دمونتاژ جزئی تحت محدودیت ظرفیت |

جدید با در نظر گرفتن دمونتاژ جزئی ارائه گردیده است. در مدل‌های موجود در ادبیات موضوع متغیر تصمیم در هر مرحله نشان می‌دهد کدام زیرمونتاژ به‌طور کامل جداسازی می‌شود، اما مدل این مقاله مشخص می‌کند کدام حالت دمونتاژ جزئی باید انجام شود تا تقاضای موجود ارضا شود.

در این پژوهش محصولات بازگشتی می‌توانند از انواع مختلفی باشند که در ساختار خود قطعات مشابهی دارند. در برنامه‌ریزی دمونتاژ چند محصولی که اشتراک‌گذاری قطعات مجاز است، یک قطعه می‌تواند والد‌های مختلفی داشته باشد که دمونتاژ آن از هر یک از این والد‌ها به دلیل اینکه ممکن است به تجهیزات یا مهارت مختلفی نیاز داشته باشد هزینه و زمان متفاوتی خواهد داشت. مدل ارائه شده در نظر گرفتن زمان و هزینه متفاوت برای هر حالت دمونتاژ را امکان‌پذیر می‌کند.

۳. تعریف مسأله

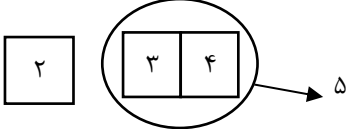
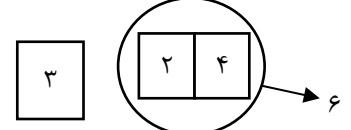
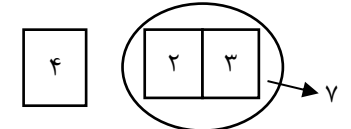


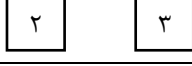
در این پژوهش، فرض می‌شود یک تولیدکننده همه یا بخشی از قطعات مصرفی خود برای تولید محصول را از طریق بازیابی و دمونتاژ

در جدول (۱) خلاصه‌ای از پژوهش‌ها دسته‌بندی و مقایسه شده‌اند تا خلأهای موجود در پژوهش‌های قبلی مشخص گردند. در برخی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه متعادل‌سازی خط دمونتاژ و توالی دمونتاژ، فرض مجاز بودن دمونتاژ جزئی در نظر گرفته شده است؛ ولی باتوجه به پیشینه تحقیق بررسی شده در زمینه برنامه‌ریزی دمونتاژ که مربوط به این پژوهش است، تا به حال دمونتاژ جزئی مورد بررسی قرار نگرفته و فرض بر دمونتاژ کامل است. در حالت دمونتاژ کامل زمانی که یک ریشه برای دمونتاژ انتخاب می‌شود، فرآیند دمونتاژ به‌طور کامل انجام گرفته و تمام قطعات تشکیل‌دهنده دمونتاژ می‌شوند. برخلاف پژوهش‌های بررسی شده، تمرکز اصلی پژوهش حاضر بر روی دمونتاژ جزئی است، فرآیند جداسازی تا رسیدن به قطعه مورد تقاضا انجام می‌شود و یکی از تصمیمات مسأله، تعیین این موضوع است که در هر دوره هر ریشه تا چه عمقی دمونتاژ شود. این حالت در شرایط واقعی کاملاً منطقی می‌باشد؛ به‌طور مثال در شرایط واقعی در دمونتاژ یک دستگاه چاپگر برای جداسازی یک کلید روشن/خاموش لازم نیست کل قطعات چاپگر دمونتاژ شوند. براین اساس در این مقاله یک مدل‌سازی

باتوجه به ساختار ساده ارائه شده از محصول در حالت دمونتاژ جزئی، حالت‌های موجود برای دمونتاژ جزئی محصول و ماتریس ارتباط دمونتاژ آن به‌ترتیب در جدول (۲) و (۳) به‌صورت زیر نشان داده شده است. جدول (۲) نشان می‌دهد که وقتی ساختار محصول مطابق شکل (۱) باشد، ۶ حالت دمونتاژ خواهیم داشت. به‌عنوان مثال حالت ۱ نشان می‌دهد که اگر فقط قطعه ۲ را جدا کنیم، دو عدد قطعه ۲ و یک زیرمونتاژ جدید از قطعات ۳ و ۴ خواهیم داشت که این قطعه جدید را به‌عنوان زیرمونتاژ ۵ شماره‌گذاری می‌کنیم. همچنین در حالت دمونتاژ ۴ واضح است که اگر زیرمونتاژ ۵ جداسازی شود، قطعات ۳ و ۴ از هم جدا می‌شوند.

ماتریس رابطه نشان داده شده در جدول (۳) براساس ساختار محصول و ضریب مصرف هر یک از قطعات است. به‌عنوان مثال، در حالت دمونتاژ شماره ۱، یک محصول شماره ۱ استفاده می‌شود و در نتیجه دو عدد قطعه شماره ۲ و یک زیرمونتاژ شماره ۵ به‌دست می‌آید.

جدول (۲). حالت‌های دمونتاژ مربوط به محصول

| والد | حالت دمونتاژ | شماره حالت |
|------|---|------------|
| ۱ |  | ۱ |
| ۱ |  | ۲ |
| ۱ |  | ۳ |
| ۵ |  | ۴ |
| ۶ |  | ۵ |
| ۷ |  | ۶ |

جدول (۳). ماتریس ارتباط حالت‌های دمونتاژ

| حالت دمونتاژ | قطعه | | | | | | |
|--------------|------|---|---|---|----|----|----|
| | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ |
| ۱ | -۱ | ۲ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ |
| ۲ | -۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ |
| ۳ | -۱ | ۰ | ۰ | ۳ | ۰ | ۰ | ۱ |
| ۴ | ۰ | ۰ | ۱ | ۳ | -۱ | ۰ | ۰ |
| ۵ | ۰ | ۲ | ۰ | ۳ | ۰ | -۱ | ۰ |
| ۶ | ۰ | ۲ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | -۱ |

محصولات بازگشتی تأمین می‌کند؛ بنابراین با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های خرید محصولات بازگشتی، نگهداری و عملیات جداسازی، یک برنامه زمان‌بندی دمونتاژ چندمحصولی و چنددوره‌ای مبتنی بر اشتراک‌گذاری قطعات و مجاز بودن دمونتاژ جزئی مورد بررسی قرار گرفته است. امکان دمونتاژ جزئی و جداسازی قطعات تا به‌دست آمدن قطعه مورد نظر مهم‌ترین نوآوری این مقاله می‌باشد. براین اساس یک مدل برنامه‌ریزی صحیح مختلط در هر دوره باتوجه به حالت دمونتاژ جزئی جهت برآورد تقاضای موجود ارائه گردیده است. در مدل ارائه شده دمونتاژ به‌صورت جزئی انجام گردیده و جداسازی قطعات بدون تقاضا انجام نمی‌شود، بنابراین صرفه‌جویی زیادی در زمان و هزینه دمونتاژ صورت می‌گیرد.

در ادامه مفروضات مسأله، پارامترها و متغیرها به‌همراه مدل‌سازی مسأله بیان می‌شود.

۳-۱. مفروضات مسأله

مفروضات مسأله به‌صورت زیر می‌باشد:

(۱) محصولات بازگشتی از انواع مختلفی هستند. به‌طور مثال رایانه همراه، تلفن همراه یا رایانه رومیزی محصولات بازگشتی هستند. این محصولات یکسان نیستند؛ ولی قطعات مشابه در ساختار مونتاژی خود دارند.

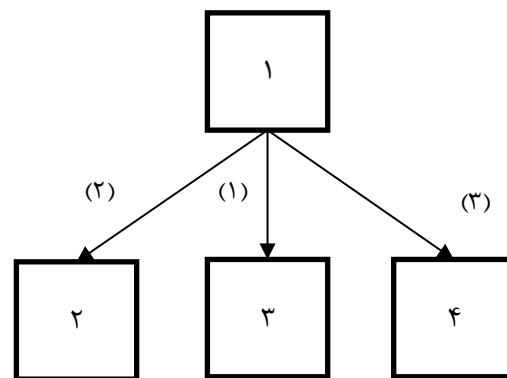
(۲) برای تأمین قطعات محصولات بازگشتی به تعداد مورد نیاز در هر دوره قابل خرید بوده و بلافاصله آماده فرآیند دمونتاژ هستند.

(۳) در این مسأله اشتراک‌گذاری قطعات مجاز بوده و هزینه دمونتاژ هر حالت، مشخص و قطعی است.

(۴) قطعات با کیفیت بوده و طی فرآیند دمونتاژ خرابی ندارند، همچنین تقاضا قطعی بوده و امکان پس‌افت تقاضا وجود ندارد.

۳-۲. مدل‌سازی مسأله

در این قسمت به ارائه مدل تک‌هدفه برای طراحی برنامه‌ریزی دمونتاژ چندمحصولی و چنددوره‌ای می‌پردازیم. برای انجام مدل‌سازی ابتدا باید قطعات به‌ترتیب شماره‌گذاری شده و سپس حالت‌های مختلفی که دمونتاژ جزئی اتفاق خواهد افتاد، مشخص گردند. شکل (۱) نشان‌دهنده تصویر شماتیک محصول هنگام دمونتاژ جزئی می‌باشد. در این شکل، اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده ضریب مصرف هر یک از قطعات در ساختار محصول است.



شکل (۱). ساختار محصول در هنگام دمونتاژ جزئی

علایم استفاده شده در مدل‌سازی مسأله، به‌صورت زیر معرفی می‌شود:

اندیس‌ها

i اندیس قطعه از ۱ تا N

t اندیس دوره از ۱ تا T

j اندیس حالت دمونتاز از ۱ تا J

پارامترها

s_j هزینه آماده‌سازی قطعه والد مربوط به حالت دمونتاز j

h_i هزینه نگهداری قطعه i

d_{it} تقاضای قطعه برگ i در دوره t

تعداد قطعات i که از حالت دمونتاز j به‌دست می‌آید

a_{ij} (براساس ماتریس ارتباط حالت‌های دمونتاز و ضریب مصرف هر قطعه در ساختار محصول)

b_i هزینه خرید هر واحد محصول بازگشتی i

I_{i0} موجودی اولیه قطعه i

اندیس آخرین نوع از محصولات بازگشتی (به‌طور مثال اگر

i_l سه نوع محصول بازگشتی یخچال، لباسشویی و ظرفشویی

داشته باشیم، برابر ۳ است)

c_j هزینه عملیاتی دمونتاز حالت دمونتاز j

o_j مدت زمان انجام دمونتاز حالت دمونتاز j

C محدودیت زمانی هر دوره

متغیرهای تصمیم

X_{jt} تعداد دفعات انجام حالت دمونتاز j در دوره t

Y_{jt} اگر $X_{jt} > 0$ برابر با ۱ در غیر این صورت برابر با صفر

I_{it} سطح موجودی قطعه i در دوره t

B_{it} تعداد محصول بازگشتی i که در دوره t باید خریداری شود

مدل ریاضی مسأله

$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T s_j \cdot Y_{jt} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T c_j \cdot X_{jt} + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T h_i \cdot I_{it} + \sum_{i=1}^{i_l} \sum_{t=1}^T b_i \cdot B_{it}$$

Subject to:

$$I_{it} = I_{i,t-1} + \sum_{j=1}^J a_{ij} \cdot X_{jt} + B_{it} \quad (1)$$

$$\text{for } i = 1, \dots, i_l \text{ and } t = 1, \dots, T$$

$$I_{it} = I_{i,t-1} + \sum_{j=1}^J a_{ij} \cdot X_{jt} - d_{it} \quad (2)$$

$$\text{for } i = i_l + 1, \dots, N \text{ and } t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{j=1}^J o_j \cdot X_{jt} \leq C \quad \text{for } t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$X_{jt} \leq M \cdot Y_{jt} \quad (4)$$

$$\text{for } j = 1, \dots, J \text{ and } t = 1, \dots, T$$

$$Y_{jt} \in \{0,1\} \text{ and } X_{jt} \geq 0 \text{ and integer} \quad (5)$$

$$\text{for } j = 1, \dots, J \text{ and } t = 1, \dots, T$$

$$I_{it} \geq 0 \quad \text{for } i = 1, \dots, N \text{ and } t = 1, \dots, T \quad (6)$$

در مدل ارائه شده، تابع هدف کاهش هزینه‌های دمونتاز است. بخش اول تابع هدف مربوط به هزینه آماده‌سازی قطعات است، بخش دوم مربوط به هزینه عملیات دمونتاز، بخش سوم نگهداری و بخش چهارم هزینه خرید محصول‌های بازگشتی است.

محدودیت (۱) مربوط به موازنه میزان خرید، دمونتاز و نگهداری هر محصول بازگشتی در هر دوره است. با استفاده از پارامتر I_i این محدودیت فقط برای محصولات بازگشتی اعمال می‌شود. در محدودیت (۲) موازنه تقاضا، دمونتاز و نگهداری مربوط به قطعات برگ نوشته شده است. در این محدودیت قطعاتی که شرط $i = i_l + 1, \dots, N$ را داشته باشند جزو قطعات جداسازی شده هستند بنابراین این محدودیت برای قطعات برگ اعمال می‌شود. مقدار a_{ij} براساس ماتریس رابطه است و وقتی قطعه ریشه i برای جداسازی در حالت دمونتاز j انتخاب می‌شود، a_{ij} منفی است. بنابراین عبارت $\sum_{j=1}^J a_{ij} \cdot X_{jt}$ در محدودیت ۱ منفی است و برابر است با مقدار محصول برگشتی که باید در دوره t دمونتاز شود. وقتی قسمت برگ i از حالت دمونتاز j به‌دست می‌آید، a_{ij} مثبت است. بنابراین $\sum_{j=1}^J a_{ij} \cdot X_{jt}$ در محدودیت ۲ مثبت است و برابر است با تعداد قطعه برگ i که از جداسازی در دوره t به‌دست می‌آید.

محدودیت (۳) ظرفیت زمانی انجام عملیات دمونتاز را کنترل می‌کند. محدودیت (۴) نیز جهت محاسبه هزینه آماده‌سازی قطعاتی که دمونتاز می‌شوند آورده شده است.

مدل ارائه شده بر پایه مدل کیم و همکاران [۲۰] توسعه یافته است. در مدل پایه یک برنامه‌ریزی عدد صحیح برای برنامه‌ریزی دمونتاز ارائه شده است که در آن برنامه‌ریزی با فرض چندمحصولی و امکان‌پذیر بودن اشتراک‌گذاری قطعات انجام می‌شود. در مدل پایه فرض بر این است که اگر یک قطعه برای دمونتاز انتخاب شود، تمامی قطعات آن به‌طور کامل جدا می‌شوند بنابراین متغیر تصمیم نمایانگر تعداد دفعاتی است که یک آیتم در هر دوره باید به‌صورت کامل دمونتاز شود.

مهم‌ترین توسعه مدل فعلی نسبت به مدل پایه، در نظر گرفتن دمونتاز جزئی است. به‌همین منظور ابتدا لازم است که انواع حالات مختلف دمونتاز جزئی مشخص گردد. به‌کمک روش شماره‌گذاری و ماتریس رابطه که در این پژوهش ارائه شد، تعیین کلیه حالات ممکن برای دمونتاز جزئی امکان‌پذیر است؛ بنابراین در این پژوهش متغیر تصمیم مشخص می‌کند که در هر دوره کدام حالت دمونتاز جزئی و با چه تعدادی باید انجام شود تا تقاضای موجود ارضا شود.

باتوجه به اینکه در این مدل، ممکن است در زمان جداسازی برای رسیدن به یک قطعه مورد تقاضا، زیرمونتازهای مختلف به‌دست آید، محدودیت‌های مربوط به نگهداری موجودی به‌گونه‌ای توسعه داده شده‌اند که میزان موجودی کلیه قطعات و زیرمونتازها، قابل کنترل باشد.

از دیگر توسعه‌های داده شده نسبت به مدل پایه، در نظر گرفتن هزینه خرید محصولات بازگشتی و همچنین محدودیت ظرفیت زمانی برای هر دوره است؛ بنابراین برخلاف مدل پایه، مدل ارائه شده یک

جدول (۵). حالت‌های مختلف دمونتاژ مسأله مثال

| شماره حالت | قطعه والد | نتیجه دمونتاژ | شماره زیرمونتاژ جدید |
|------------|-----------|---------------|----------------------|
| ۱ | ۱ | {۳} و {۴و۵} | ۱۳={۵و۴} |
| ۲ | ۱ | {۳} و {۴} | ۱۴={۳و۵} |
| ۳ | ۱ | {۳} و {۵} | ۱۵={۳و۴} |
| ۴ | ۲ | {۴} و {۵و۶} | ۱۶={۵و۶} |
| ۵ | ۲ | {۴} و {۵} | ۱۷={۴و۶} |
| ۶ | ۲ | {۴و۵} و {۶} | - |
| ۷ | ۳ | {۷} و {۸و۹} | ۱۸={۸و۹} |
| ۸ | ۳ | {۷} و {۸} | ۱۹={۹و۷} |
| ۹ | ۳ | {۷} و {۹} | ۲۰={۸و۷} |
| ۱۰ | ۴ | {۸} و {۹و۱۰} | ۲۱={۹و۱۰} |
| ۱۱ | ۴ | {۸} و {۹} | ۲۲={۸و۱۰} |
| ۱۲ | ۴ | {۱۰} و {۸و۹} | - |
| ۱۳ | ۵ | {۱۰} و {۱۱} | - |
| ۱۴ | ۶ | {۱۱} و {۱۲} | - |
| ۱۵ | ۱۳ | {۴} و {۵} | - |
| ۱۶ | ۱۴ | {۳} و {۵} | - |
| ۱۷ | ۱۵ | {۳} و {۴} | - |
| ۱۸ | ۱۶ | {۵} و {۶} | - |
| ۱۹ | ۱۷ | {۴} و {۶} | - |
| ۲۰ | ۱۸ | {۸} و {۹} | - |
| ۲۱ | ۱۹ | {۷} و {۹} | - |
| ۲۲ | ۲۰ | {۷} و {۸} | - |
| ۲۳ | ۲۱ | {۹} و {۱۰} | - |
| ۲۴ | ۲۲ | {۸} و {۱۰} | - |

سایر پارامترهای مسأله طبق جدول (۶) است. با فرض قابل تأمین بودن محصولات بازگشتی (قطعات ریشه) در هر دوره به اندازه کافی، لذا قطعات ریشه نگهداری نخواهند شد ولی زیرمونتاژها و قطعات برگ به‌دست آمده از جداسازی قطعات ریشه، نیاز به نگهداری دارند. همچنین ضریب مصرف هر قطعه فرزند در هر والد، در شکل (۲) داخل پُرانتز مشخص شده است. در این مثال موجودی اولیه کلیه قطعات صفر است. قیمت خرید محصولات بازگشتی به ترتیب ۵۰ و ۶۰ واحد در نظر گرفته شده است.

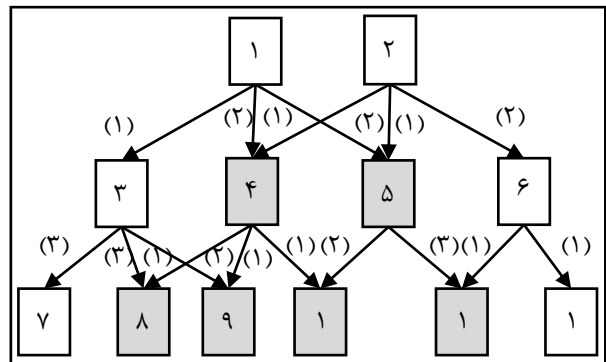
پس از حل مدل MIP مربوط به مسأله، برنامه‌ریزی بهینه دمونتاژ طبق جدول (۷) خواهد بود به طوری که هزینه مربوط به این برنامه ۹۸۰۶ واحد به‌دست می‌آید. در طول اجرای این برنامه باید ۴۵ عدد از محصول بازگشتی اول و ۴۰ عدد از محصول بازگشتی دوم خریداری شود.

جدول (۷) مشخص می‌کند که در هر دوره، حالات دمونتاژ چند بار باید انجام شود. به‌طور مثال در دوره اول باید حالت دمونتاژ ۱، ۱۹ بار انجام گیرد.

برنامه‌ریزی دمونتاژ محدود به ظرفیت است که پیچیدگی این مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط براساس پژوهش کیم و همکاران [۱۴] از نوع NP-Hard است و $T(2J + I + i_t)$ متغیر تصمیم و $T(N + (J + 1))$ محدودیت دارد. TJ عدد از این متغیرها عدد صحیح و TJ عدد نیز به‌صورت باینری است.

۴. حل مدل و یافته‌های پژوهش

باتوجه به مدل توسعه داده شده، در این بخش با استفاده از یک مثال عددی که به‌صورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده، عملکرد مدل تشریح می‌گردد. براساس ساختار مسأله مورد بررسی در شکل (۲)، محصولات ۱ و ۲ محصولات بازگشتی متفاوت هستند اما در ساختار مونتاژی خود قطعات مشترک دارند. باتوجه به اینکه دو نوع محصول بازگشتی داریم، مقدار پارمتر h_t برابر با ۲ است. در شکل (۲) قطعاتی که با رنگ خاکستری مشخص شده‌اند قطعات مشترک هستند زیرا بیش از یک والد دارند؛ بنابراین در این مسأله اشتراک‌گذاری قطعات مجاز است. در این مثال قطعات ۱ و ۲ قطعه ریشه، قطعات ۳ تا ۶ زیرمونتاژ و قطعات ۷ تا ۱۲ قطعه برگ نامیده می‌شوند.



شکل (۲). ساختار دمونتاژ مسأله مثال

در این مسأله افق زمانی برنامه‌ریزی ۳ دوره در نظر گرفته شده است و تقاضا فقط برای قطعات برگ وجود دارد. این تقاضا (d_{it}) طبق جدول (۴) است.

جدول (۴). تقاضای قطعات برگ مدل توسعه یافته

| قطعه | دوره | | |
|------|------|----|----|
| | ۱ | ۲ | ۳ |
| ۷ | ۱۹ | ۱۰ | ۱۶ |
| ۸ | ۰ | ۲۵ | ۱۴ |
| ۹ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۲ |
| ۱۰ | ۱۹ | ۵۰ | ۱۱ |
| ۱۱ | ۴ | ۹ | ۲۵ |
| ۱۲ | ۳ | ۱۳ | ۲۴ |

طبق ساختار مسأله، حالت‌های مختلف دمونتاژ طبق جدول (۵)

خواهند بود.

صرفه‌جویی زیادی در زمان و هزینه دمونتاژ اتفاق خواهد افتاد.

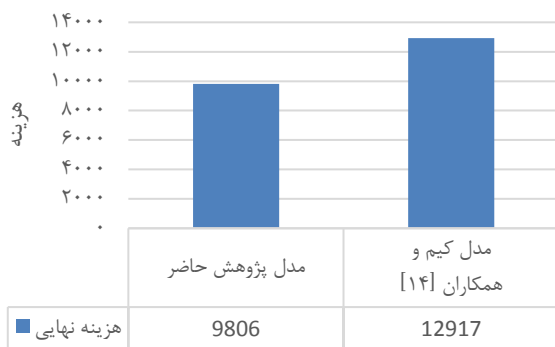
با حل مثال مطرح شده در بخش قبل با رویکرد مدل ارائه شده توسط کیم و همکاران [۲۰]، نتیجه طبق جدول (۸) برای هر دو روش به‌دست آمده است. طبق این برنامه‌ریزی به‌طور مثال در دوره اول باید ۱۹ قطعه زیرمونتاژ ۳ به‌طور کامل دمونتاژ شوند. برای اجرای این برنامه نیز باید ۴۵ عدد از محصول بازگشتی اول و ۴۰ عدد از محصول بازگشتی دوم خریداری شود. با این حال هزینه نهایی ۱۲۹۱۷ واحد خواهد بود که ۳۱۱۱ واحد بیشتر از برنامه ارائه شده توسط پژوهش حاضر خواهد بود (مشاهده شکل (۳)). بنابراین مدل توسعه یافته در این پژوهش عملکرد بهتری نسبت به مدل توسعه یافته توسط کیم و همکاران دارد.

جدول (۸). برنامه‌ریزی دمونتاژ طبق مدل کیم و همکاران [۲۰] و

مدل توسعه داده شده

| دوره قطعه والد | روش کیم و همکاران | | | روش توسعه داده شده | | |
|----------------|-------------------|----|----|--------------------|----|----|
| | ۱ | ۲ | ۳ | ۱ | ۲ | ۳ |
| ۱ | ۱۹ | ۱۰ | ۱۶ | ۱۹ | ۱۰ | ۱۶ |
| ۲ | ۳ | ۱۳ | ۲۴ | ۳ | ۱۳ | ۲۴ |
| ۳ | ۱۹ | ۱۰ | ۱۶ | ۱۹ | ۱۰ | ۱۶ |
| ۴ | ۲۴ | ۰ | ۰ | ۲۴ | ۰ | ۰ |
| ۵ | ۱۹ | ۲۶ | ۱۱ | ۱۹ | ۲۶ | ۱۱ |
| ۶ | ۳ | ۱۳ | ۲۴ | ۳ | ۱۳ | ۲۴ |

مطالعه مقایسه‌ای



شکل (۳). مطالعه مقایسه‌ای مبتنی بر هزینه

۶. آنالیز عددی

در این بخش، کارایی حل‌کننده MILP CPLEX در حل مدل ریاضی پیشنهادی بررسی شده است. پارامترهایی که باید بررسی شوند زمان حل مسئله و فاصله بین جواب به‌دست آمده و بهترین کران پایینی موجود است. چندین آزمایش محاسباتی با تمرکز بر تعداد محصولات برگشتی، ساختار جداسازی قطعات، و تعداد دوره‌ها بر روی نمونه‌های آزمایشی مختلف، از جمله پارامترهای ورودی مختلف، انجام شده است. برای ایجاد مسائل نمونه، از داده‌های موجود در پژوهش‌های پیشین استفاده شده است. مقادیر پارامترهای مسئله براساس [۱۷، ۳۳] به شرح

جدول (۶). مقدار پارامترهای مسئله

| شماره اندیس (j یا i) | s_j | h_i | شماره حالت | s_j | h_i |
|----------------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| ۱ | ۱۰ | ۰ | ۱۴ | ۶ | ۲۲ |
| ۲ | ۱۰ | ۰ | ۱۵ | ۵ | ۲۲ |
| ۳ | ۱۰ | ۲۵ | ۱۶ | ۵ | ۲۲ |
| ۴ | ۱۲ | ۲۵ | ۱۷ | ۵ | ۲۲ |
| ۵ | ۱۲ | ۲۵ | ۱۸ | ۵ | ۲۲ |
| ۶ | ۱۲ | ۲۵ | ۱۹ | ۵ | ۲۲ |
| ۷ | ۸ | ۱۸ | ۲۰ | ۵ | ۲۲ |
| ۸ | ۸ | ۱۸ | ۲۱ | ۵ | ۲۲ |
| ۹ | ۸ | ۱۸ | ۲۲ | ۵ | ۲۲ |
| ۱۰ | ۷ | ۱۸ | ۲۳ | ۵ | - |
| ۱۱ | ۷ | ۱۸ | ۲۴ | ۵ | - |
| ۱۲ | ۷ | ۱۸ | | | |
| ۱۳ | ۶ | ۲۲ | | | |

جدول (۷): برنامه دمونتاژ مسئله نمونه

| حالت دمونتاژ | دوره | | | حالت دمونتاژ | دوره | | |
|--------------|------|----|----|--------------|------|----|----|
| | ۱ | ۲ | ۳ | | ۱ | ۲ | ۳ |
| ۱ | ۱۹ | ۱۶ | ۰ | ۱۳ | ۱۱ | ۳۲ | ۱۰ |
| ۲ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۴ | ۳ | ۱۳ | ۲۴ |
| ۳ | ۱۰ | ۰ | ۰ | ۱۵ | ۸ | ۹ | ۰ |
| ۴ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۷ | ۱۰ | ۰ | ۰ |
| ۵ | ۳ | ۱۳ | ۱۱ | ۱۸ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۶ | ۱۳ | ۰ | ۰ | ۱۹ | ۳ | ۱۳ | ۱۱ |
| ۷ | ۱۹ | ۱۰ | ۴ | ۲۰ | ۱۳ | ۱۴ | ۰ |
| ۸ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۹ | ۱۲ | ۰ | ۰ | ۲۲ | ۱۲ | ۰ | ۰ |
| ۱۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲۳ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۱۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲۴ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۱۲ | ۸ | ۱۹ | ۰ | | | | |

۵. اعتبارسنجی مدل

جهت بررسی اعتبارسنجی مدل، یک مطالعه مقایسه‌ای بین مدل توسعه یافته در این مقاله و مدل کیم و همکاران [۲۰] صورت گرفته است. در این مقایسه، از مقدار پارامترهای یکسان برای هر دو مدل استفاده شده تا در شرایط یکسان نتایج بررسی گردد. برای بررسی نتایج از نرم‌افزار گمز نسخه ۲۵.۱.۲ استفاده شده است. مهم‌ترین تفاوت مدل ارائه شده در این پژوهش و مدل‌های مطرح شده در ادبیات موضوع، در نظر گرفتن دمونتاژ جزئی است. در پژوهش‌هایی که در بخش پیشینه تحقیق بررسی شد، تعداد قطعات والد که در هر دوره باید دمونتاژ شوند به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است، در حالی که در پژوهش حاضر تعداد دفعاتی که یک حالت دمونتاژ جزئی باید انجام شود، متغیر تصمیم مسئله است. در حالت در نظر گرفتن دمونتاژ جزئی، باتوجه به اینکه فقط قطعه مورد نیاز دمونتاژ خواهد شد،

- زمان عملیات دمونتاژ هر قطعه به صورت $DU[10,18]$ در نظر گرفته می‌شود.
- محدودیت زمانی برای هر دوره ۲۰۰۰ واحد است
- تعداد قطعه مشابه در هر والد (ضریب مصرف هر قطعه) از $[1,9]$ DU پیروی می‌کند.

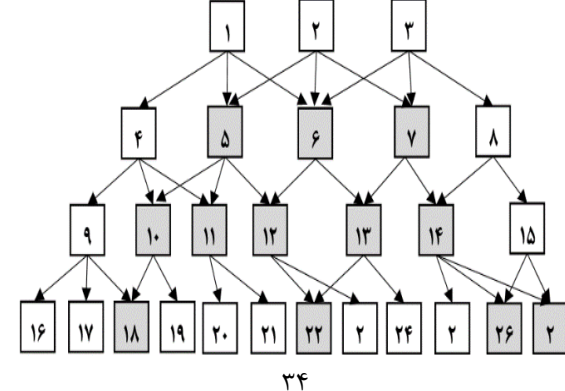
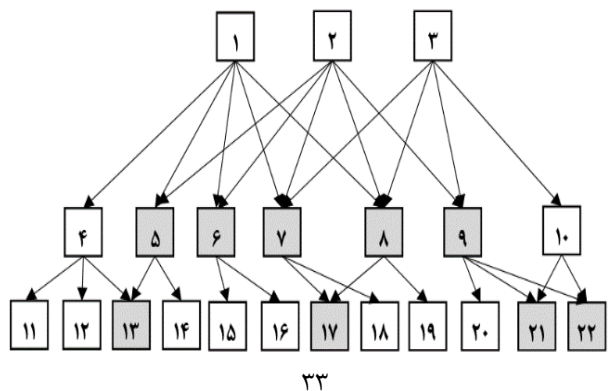
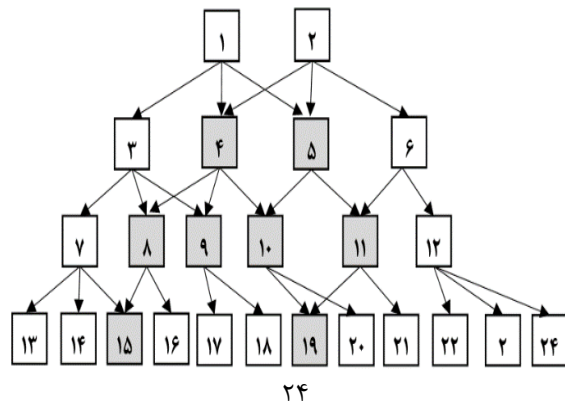
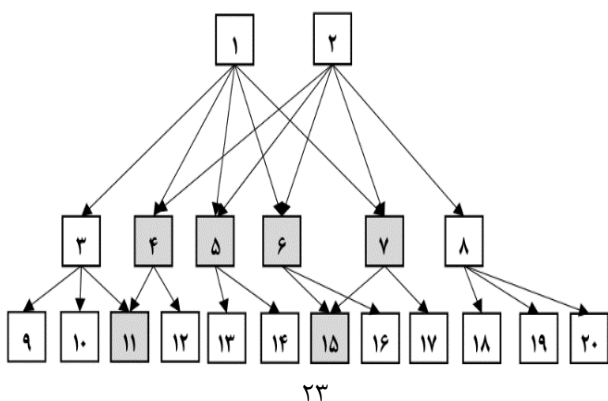
برای بررسی کارایی حل‌کننده MILP CPLEX، ده نمونه برای هر ترکیب از دو حالت برای تعداد محصولات برگشتی $(i_t = 2,3)$ ، دو حالت برای ساختار مونتاژی محصولات (ساختار ۳ سطحی و ۴ سطحی) و چهار حالت برای تعداد دوره‌ها (۳، ۵، ۱۰، ۲۰) در کل، ۱۶۰ نمونه تولید شده است.

شکل (۴) ساختار مسأله‌های نمونه را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال، در این شکل، مسأله ۲۳ نشان‌دهنده این است که در این مسأله دو نوع محصول بازگشتی با ساختار سه‌سطحی وجود دارد. باتوجه به اینکه ضریب مصرف قطعات نیز برای هر مسأله براساس توزیع یکنواخت گسسته $DU[1,9]$ تولید می‌شود و برای هر مسأله نمونه متفاوت است، بنابراین بر روی شکل نمایش داده نشده است.

آزمایش‌ها در نسخه ۲۴.۷.۴ GAMS پیاده‌سازی شده‌اند و مدل‌ها با استفاده از حل‌کننده CPLEX نسخه ۱۲.۶.۳ و بر روی رایانه‌ای با پردازنده Intel Core i7 ۲.۶ گیگاهرتز و ۸ گیگابایت رم اجرا شده‌اند. محدودیت‌های زمانی محاسبه حل‌کننده CPLEX روی ۱۰۰۰ ثانیه تنظیم شده است.

زیر است.

- هزینه جداسازی هر حالت دمونتاژ، از یک توزیع یکنواخت گسسته $DU[50,100]$ تولید می‌شود.
- هزینه نگهداری موجودی به صورت $DU[5,10]$ است.
- محصولات بازگشتی هزینه موجودی ندارند.
- براساس پژوهش کیم و همکاران [۳۴] هرچه قطعات بیشتری جدا شوند، هزینه نگهداری موجودی کمتر است، بنابراین هزینه موجودی برای قطعات اصلی براساس $DU[5,10]$ برای قطعات زیرمونتاژ براساس $DU[3,8]$ و برای قطعات برگ براساس $DU[1,5]$ تولید می‌شوند.
- هزینه نصب و آماده‌سازی هر قطعه برابر $m \cdot \bar{p} \cdot r$ است که m براساس تعداد زیرمجموعه قطعات برابر با ۱، ۲ و ۳ است. بنابراین، هرچه عمق جداسازی قطعات بیشتر باشد، هزینه کمتر می‌شود. همچنین \bar{p} برابر با میانگین هزینه‌های جداسازی قطعات است، و r پارامتری است که برای حفظ تصادفی بودن داده‌ها براساس $DU[5,15]$ تولید می‌شود.
- تقاضا برای قطعات برگ ۰ یا $DU[50,200]$ با احتمالات ۰/۱ و ۰/۹ است.
- موجودی اولیه صفر است.
- قیمت خرید هر نوع محصول بازگشتی به ترتیب ۵۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۵۵۰۰ عدد می‌باشد.



شکل (۴). ساختار مسأله‌های نمونه

جدول (۹). شکاف بین جواب‌های به‌دست آمده با استفاده از حل‌کننده CPLEX و بهترین کران پایین موجود

| مسئله | تعداد حالت‌های | دوره ۳ | | | دوره ۵ | | | دوره ۱۰ | | | دوره ۲۰ | | |
|-------|----------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | | Max | Avg | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg | Min |
| ۲۳ | ۱۲۴ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ |
| ۲۴ | ۴۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ |
| ۳۳ | ۱۴۱ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ |
| ۳۴ | ۴۷ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ | ٪۰/۰۰ |

جدول (۱۰). مدت زمان پردازش CPU (ثانیه) برای حل مدل با استفاده از حل‌کننده CPLEX

| مسئله | تعداد حالت‌های | دوره ۳ | | | دوره ۵ | | | دوره ۱۰ | | | دوره ۲۰ | | |
|-------|----------------|--------|-------|-------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | | Max | Avg | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg | Min |
| ۲۳ | ۱۲۴ | ۶/۹۴ | ۱۶/۰۴ | ۳۷/۸۹ | ۲/۵۵ | ۳۴/۳۱ | ۹۹/۱۱ | ۱۳۰/۰۲ | ۸۸۹/۴۷ | ۱۰۰۰/۰۳ | ۱۰۰۰/۰۲ | ۱۰۰۰/۰۳ | ۱۰۰۰/۰۵ |
| ۲۴ | ۴۰ | ۰/۳۰ | ۱/۷۱ | ۳/۲۴ | ۰/۸۹ | ۱۰/۷۶ | ۲۷/۹۵ | ۱۳/۱۶ | ۳۹۳/۹۹ | ۱۰۰۰/۰۳ | ۸۷/۸۱ | ۱۰۰۰/۰۳ | ۹۰۸/۸۱ |
| ۳۳ | ۱۴۱ | ۷/۱۷ | ۱۵/۱۶ | ۵۳/۳۹ | ۲۷۵/۷۵ | ۷۴۱/۹۰ | ۱۰۰۰/۰۳ | ۱۳۷/۱۴ | ۸۱۸/۵۰ | ۱۰۰۰/۰۳ | ۱۰۰۰/۰۲ | ۱۰۰۰/۰۳ | ۱۰۰۰/۰۳ |
| ۳۴ | ۴۷ | ۰/۵۲ | ۳/۰۲ | ۶/۹۸ | ۴/۹۷ | ۱۸/۶۲ | ۴۵/۷۵ | ۱۹/۷۸ | ۲۵۷/۲۰ | ۱۰۰۰/۰۳ | ۳۱/۵۲ | ۱۰۰۰/۰۳ | ۹۰۳/۱۸ |

زمان بیشتر باشد، نشان‌دهنده پیچیدگی بیشتر مسئله است. باتوجه به اینکه حداکثر زمان مجاز پردازش ۱۰۰۰ ثانیه بوده است؛ در صورتی که حداقل زمان پردازش برای یک ترکیب ۱۰۰۰ ثانیه باشد، به این معنی است که جواب بهینه برای هیچ‌یک از ۱۰ نمونه مربوط به آن ترکیب در مدت زمان معقول به‌دست نیامده است. وقتی میزان شکاف برای چند ترکیب مختلف صفر باشد، مدت زمان پردازش، پیچیدگی این ترکیب‌ها را قابل مقایسه می‌کند.

باتوجه به تحلیل عددی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد دوره‌ها، دشواری مسئله افزایش می‌یابد. بنابراین، هنگامی که تعداد دوره‌ها بیش از ۱۰ باشد، حل‌کننده CPLEX نمی‌تواند راه‌حل بهینه را برای همه مسائل در یک زمان معقول به‌دست آورد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای مسائل ۲۳ و ۳۳ نشان می‌دهد زمانی که انواع محصولات بازگشتی بیشتر می‌شود، مسئله پیچیده‌تر خواهد بود. همان‌طور که در نتایج تجزیه و تحلیل عددی مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد حالت‌های جداسازی، پیچیدگی مسئله بیشتر می‌شود و دستیابی به راه‌حل بهینه را دشوارتر می‌کند. در نتیجه، هرچه تعداد نوع محصولات بازگشتی بیشتر باشد و این محصولات ساختار پیچیده‌تری داشته باشند که باعث شود حالت‌های جداسازی قطعات بیشتری وجود داشته باشد دستیابی به راه‌حل بهینه دشوارتر می‌شود.

۷. تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت نتایج نشان‌دهنده تأثیر تغییرات بر روی مقدار تابع هدف می‌باشد. در این بخش دو پارامتر کلیدی ظرفیت زمان دمونتاز و هزینه نگهداری قطعات جهت انجام تحلیل حساسیت انتخاب شده و روند تأثیر تغییرات آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته شده است. جهت بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای C و h_i بر روی مقدار تابع هدف، سایر مقادیر پارامترها را ثابت در نظر گرفته و با تغییر این دو پارامتر در

جدول (۹) شکاف بین جواب‌های به‌دست آمده با استفاده از حل‌کننده CPLEX و بهترین کران پایین موجود را به‌صورت خلاصه نشان می‌دهد. شکاف بهینگی با استفاده از معادله زیر محاسبه شده است. در این رابطه، Z_{lp}^* مقدار تابع هدف مسئله خطی‌سازی شده (ریلکس شده) مدل پیشنهادی است که بهترین کران پایین است، درحالی‌که Z_{mitp} مقدار هدف به‌دست آمده از مدل MILP پیشنهادی است.

$$\text{Relative GAP} = \frac{|Z_{lp}^* - Z_{mitp}|}{\max\{|Z_{lp}^*|, |Z_{mitp}|\}}$$

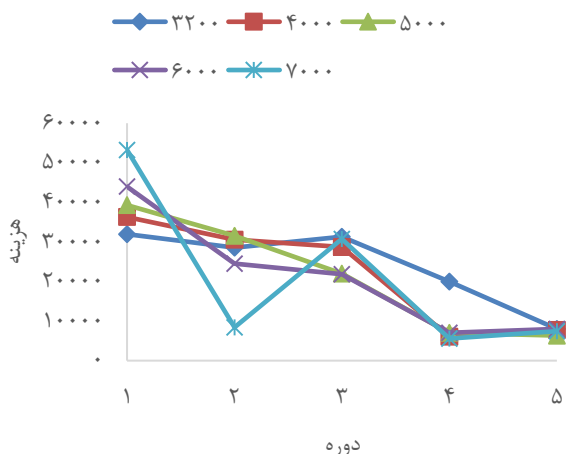
باتوجه به اینکه برای هر ترکیب از حالت‌های مختلف ۱۰ نمونه مسئله تولید و حل شده است، میزان شکاف به‌صورت کمینه، میانگین و بیشینه شکاف‌های به‌دست آمده برای این ۱۰ نمونه، در جدول (۹) گزارش شده است. به‌طور مثال میانگین شکاف برای مسئله ۳۴ (۴) سطحی و ۳ محصول بازگشتی) با افق زمانی ۱۰ دوره، ۲/۵۱٪ است. در جدول (۹)، زمانی که حداقل شکاف مثبت است، به این معنی است که حل‌کننده نتوانسته است پاسخ بهینه را برای هیچ‌یک از نمونه‌ها در زمان مجاز بیابد. زمانی که مقدار حداکثر شکاف صفر است به این معنی است که حل‌کننده راه‌حل بهینه را برای هر ده نمونه به‌دست آورده است. در مواردی که مقدار حداکثر، مثبت است اما حداقل صفر است، جواب بهینه تنها برای برخی موارد به‌دست آمده است.

باتوجه به جدول (۹)، زمانی که افق زمانی سه دوره است، تمام مسئله‌ها برای همه مسائل توسط حل‌کننده CPLEX در یک زمان محاسباتی معقول حل می‌شود. هنگامی که افق زمانی پنج دوره است، فقط برای برخی از نمونه‌های مسئله ۳۳ شکاف وجود دارد. برای دوره‌های زمانی ۱۰ و ۲۰، برای همه مسائل شکاف وجود دارد.

مدت زمان پردازش CPU برای حل مدل با استفاده از حل‌کننده CPLEX در جدول (۱۰) گزارش شده است. هرچقدر که این مدت

اولیه، موجودی قطعات برگ این دوره‌ها افزایش می‌یابد که کل هزینه‌های نگهداری را بالا می‌برد؛ بنابراین، باید بین هزینه‌های آماده‌سازی و نگهداری یک مبادله ایجاد شود. همچنین باید در زمان تصمیم‌گیری هزینه‌های افزایش ظرفیت مانند خرید ماشین‌آلات جدید، آموزش کارکنان موجود یا استخدام کارکنان جدید با میزان کاهش هزینه حاصل از افزایش ظرفیت مقایسه شود.

شکل (۶) هزینه‌های کلی هر حالت از میزان ظرفیت را به تفکیک هر دوره زمانی نشان می‌دهد.

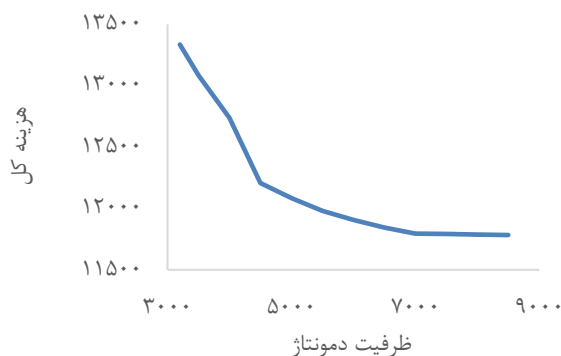


شکل (۶). تقسیم بندی هزینه‌ها در هر دوره

براساس شکل (۶)، زمانی که ظرفیت محدودتر است، هزینه‌ها به شکل هموارتری بین دوره‌های مختلف تقسیم می‌شوند و در حالت‌هایی که محدودیت زمان کمتر است، هزینه‌ها در دوره‌های مختلف تغییرات شدیدتری دارند. دلیل این موضوع تجمیع جداسازی‌ها در یک دوره برای کاهش هزینه‌های آماده‌سازی و نصب است. نکته مدیریتی ۱: نکته مهمی که تصمیم‌گیرندگان باید در نظر داشته باشند این موضوع است که همان‌طور که گفته شد با افزایش ظرفیت دمونتاژ ممکن است هزینه‌های دمونتاژ در برخی دوره‌ها متمرکز شود که باید در بحث مدیریت بودجه مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، در برخی دوره‌ها، ممکن است بخش بزرگی از ظرفیت بدون استفاده رها شود و در نتیجه بهره‌وری کلی کاهش یابد.

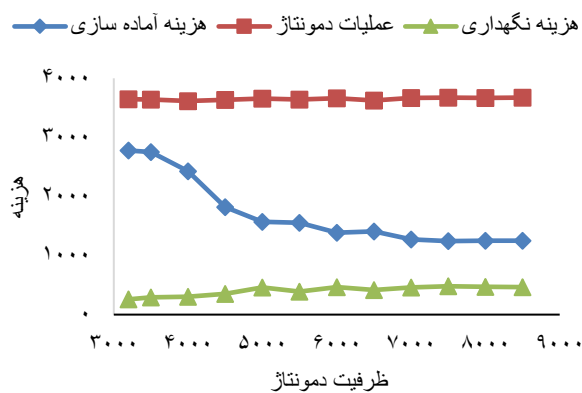
شکل (۷) تغییرات هزینه کل را نسبت به افزایش هزینه نگهداری هر قطعه نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، هزینه کل با هزینه نگهداری بالاتر برای هر قطعه افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۸)، هزینه نگهداری بالاتر به ازای هر قطعه، کل هزینه نگهداری را افزایش می‌دهد و در نتیجه هزینه‌های آماده‌سازی را افزایش می‌دهد. افزایش هزینه‌های آماده‌سازی به این دلیل است که هرچه هزینه نگهداری بیشتر باشد، موجودی قطعات برگ در پایان دوره باید کاهش یابد، بنابراین دمونتاژ هر قطعه به دوره‌ای که برای آن تقاضا وجود دارد موکول می‌گردد که در نتیجه تعداد دفعات آماده‌سازی قطعات والد بیشتر می‌شود. به‌طور مشابه زمانی که هزینه نگهداری هر قطعه کم

بازه‌های مشخص، تغییرات تابع هدف بررسی می‌شود. شکل (۴) تغییرات هزینه کل را نسبت به تغییر در ظرفیت زمان دمونتاژ نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، با افزایش ظرفیت، هزینه کل کاهش می‌یابد. این کاهش در ابتدا دارای شیب تند است، اما زمانی که محدودیت ظرفیت به اندازه کافی کاهش یابد، هزینه کل ثابت خواهد ماند.



شکل (۴). تأثیر تغییرات در ظرفیت زمان دمونتاژ بر هزینه کل

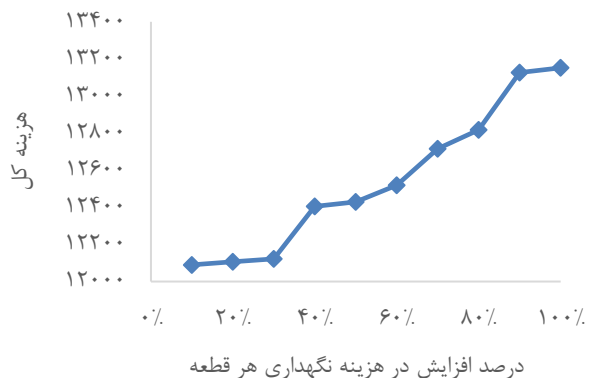
مطابق شکل (۵)، هزینه عملیات جداسازی با افزایش ظرفیت زمان جداسازی، روندی تقریباً ثابت خواهد داشت. هزینه راه‌اندازی ابتدا برای کاهش می‌یابد و سپس روند صعودی خواهد داشت.



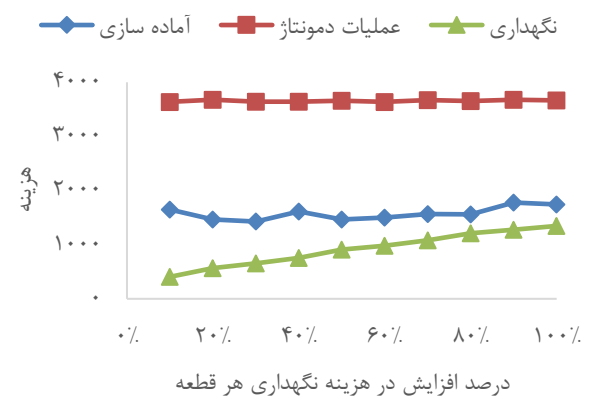
شکل (۵). تأثیر تغییرات در ظرفیت زمان بر هزینه‌های راه‌اندازی، دمونتاژ و نگهداری

باتوجه به تحلیل‌های مربوط به ظرفیت دمونتاژ، در مواقعی که ظرفیت کم باشد، در هر دوره با اولویت تأمین نیاز دوره جاری، دمونتاژ انجام می‌شود، بنابراین تعداد آماده‌سازی قطعات والد در دوره‌های مختلف افزایش می‌یابد که کل هزینه‌های آماده‌سازی را افزایش می‌دهد. هنگامی که محدودیت ظرفیت آزاد شود، تقاضای مربوط به دوره‌های بعدی نیز در نظر گرفته می‌شوند. این امر هزینه‌های آماده‌سازی را کاهش می‌دهد که در نهایت منجر به کاهش کل هزینه می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت با افزایش ظرفیت دمونتاژ، جداسازی قطعات به دوره‌های اولیه منتقل می‌گردد. با انتقال دمونتاژ به دوره‌های

باشد، بیشتر هزینه‌های راه‌اندازی و آماده‌سازی به دوره اول منتقل می‌شود.



شکل (۷). اثر افزایش هزینه نگهداری هر قطعه بر هزینه کل



شکل (۸). تأثیر افزایش هزینه نگهداری هر قطعه بر هزینه‌های راه‌اندازی، ديمونتاژ و نگهداری

حلقه بسته شده است، این مقاله به برنامه‌ریزی زمان‌بندی ديمونتاژ قطعات که بخش مهمی از زنجیره تأمین حلقه بسته است پرداخته شده است. به همین منظور یک مسأله برنامه‌ریزی ديمونتاژ چندمحصولی و چنددوره‌ای با مجاز بودن اشتراک‌گذاری قطعات تحت محدودیت ظرفیت مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش‌های بررسی شده، ديمونتاژ به صورت کامل انجام می‌گردد، بدین ترتیب که اگر در یک دوره یک ریشه جهت ديمونتاژ انتخاب شود باید تمام قطعات یا تمام زیرمونتاژهای آن ديمونتاژ شوند. مهم‌ترین نوآوری این پژوهش در نظر گرفتن امکان ديمونتاژ جزئی است. با در نظر گرفتن این نوآوری، جداسازی قطعات فقط تا به دست آمدن قطعه مورد نظر انجام می‌شود. باتوجه به اینکه در شرایط واقعی نیز ديمونتاژ به صورت جزئی انجام می‌شود، مدل توسعه داده شده تطبیق بهتری با شرایط واقعی دارد. براین اساس در این پژوهش یک مدل جدید برای در نظر گرفتن ديمونتاژ جزئی ارائه شده است. در این مدل برخلاف مدل‌های موجود در ادبیات موضوع که متغیر تصمیم نشان‌دهنده ديمونتاژ کامل هر زیرمونتاژ در هر مرحله می‌باشد، مشخص می‌کند جهت ارضای تقاضای موجود کدام حالت ديمونتاژ جزئی باید انجام شود. سپس با استفاده از یک مثال عددی عملکرد مدل مورد بررسی قرار گرفت و تحلیل حساسیت جهت بررسی روند تغییر مقدار تابع هدف مبتنی بر پارامترها انجام گردید. باتوجه به اینکه در مدل ارائه شده ديمونتاژ به صورت جزئی انجام گرفته و جداسازی قطعات بدون تقاضا صورت نمی‌گیرد، لذا باتوجه به مقادیر به دست آمده، صرفه‌جویی زیادی در زمان و هزینه انجام ديمونتاژ صورت می‌گیرد. جهت بررسی اعتبارسنجی مدل، یک مطالعه مقایسه‌ای بین مدل توسعه یافته در این مقاله و مدل توسعه یافته توسط کیم و همکاران [۲۰] صورت گرفت و نتایج نشان دادند که هزینه مدل توسعه یافته در این پژوهش ۹۸۰۶ بوده، لذا ۳۱۱۱ واحد از مدل کیم و همکاران کمتر بوده و عملکرد بهتری نسبت به مدل توسعه یافته توسط کیم و همکاران دارد.

در مدل پیشنهادی، فرض بر این است که تمامی پارامترهای ورودی قطعی هستند، بنابراین در نظر گرفتن عدم قطعیت برای تقاضای قطعات برگ می‌تواند به عنوان توسعه این مدل در نظر گرفته شود. همچنین امکان خرید قطعات برگ از سایر تأمین‌کنندگان، تصمیم‌گیری در مورد فروش یا دورریز قطعات با تقاضای کم، در نظر گرفتن زمان تحویل و تسطیح منابع از دیگر توسعه‌های قابل مطالعه است.

مراجع

- [1] Peng, P. and A. Shehabi (2022). Waste Electronics in the United States: Future Trends and Economical Potential, <https://www.researchsquare.com/article/rs-1297140/v1>.
- [2] Pour-Massahian-Tafti, M., M. Godichaud, and L. Amodeo (2020). Disassembly EOQ models with price-sensitive demands, *Applied Mathematical Modelling*, 88: 810-826.
- [3] Wu, H., et al. (2018). Production and coordination decisions in a closed-loop supply chain with remanufacturing cost disruptions when retailers compete, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29: 227-235.

نکته مدیریتی ۲: باتوجه به اینکه ممکن است در ساختار محصولات بازگشتی، تعداد متفاوتی از قطعات وجود داشته باشد. بنابراین تفاوت میزان تقاضای قطعات و تفاوت در تعداد قطعات موجود در ساختار باعث می‌شود همیشه تعداد قطعاتی ديمونتاژ شوند که تقاضایی برای آن‌ها وجود ندارد. این موضوع باعث افزایش هزینه نگهداری می‌شود. از طرفی کاهش هزینه نگهداری هر قطعه و در نتیجه کل هزینه نگهداری، نقش مؤثری در کاهش تعداد دفعات آماده‌سازی قطعات والد دارد که منجر به کاهش هزینه آماده‌سازی می‌گردد. در صورتی که مدت زمان آماده‌سازی و راه‌اندازی قطعات والد را هم در محدودیت ظرفیت زمانی اعمال کنیم، تأثیر این پارامتر به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ بنابراین ایجاد یک سیستم موجودی کارآمد با کمترین هزینه ممکن، در کاهش هزینه‌های نهایی بسیار اهمیت دارد.

۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

باتوجه به اهمیت مسائل زیست‌محیطی که منجر به توسعه زنجیره تأمین

- disassembly scheduling with random demand, *International Journal of Production Research*, 48: 7177-7194.
- [20] Kim, H.J., D.H. Lee, and P. Xirouchakis (2006). Two-phase heuristic for disassembly scheduling with multiple product types and parts commonality, *International Journal of Production Research*, 44: 195-212.
- [۲۱] فاطمی قمی، سیدمحمدتقی، ترکمن، سمیه (۱۳۹۵). برنامه‌ریزی تولید چندمرحله‌ای در زنجیره‌تأمین حلقه بسته همراه با راه‌اندازی‌های وابسته به توالی و انتقال راه‌اندازی، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید. ۴ (۹): ۲۳۹-۲۵۵.
- [22] Doh, H.-H. and D.-H. Lee (2022). Integrated disassembly and reprocessing lot-sizing for multi-level structured products in remanufacturing systems, *Engineering Optimization*, 54: 1476-1493.
- [23] Fu, Y., et al. (2021). Stochastic multi-objective integrated disassembly-reprocessing-reassembly scheduling via fruit fly optimization algorithm, *Journal of Cleaner Production*, 278: 123364.
- [24] Zhou, F., et al. (2021). Capacitated disassembly scheduling with random demand and operation time, *Journal of the Operational Research Society*, 73: 1362-1378.
- [25] Slama, I., et al. (2021). Genetic algorithm and Monte Carlo simulation for a stochastic capacitated disassembly lot-sizing problem under random lead times, *Computers & Industrial Engineering*, 159: 107468.
- [26] Yuan, G., et al. (2022). Capacitated multi-objective disassembly scheduling with fuzzy processing time via a fruit fly optimization algorithm, *Environmental Science and Pollution Research*, 1-18.
- [27] Tian, X. and Z.-H. Zhang (2019). Capacitated disassembly scheduling and pricing of returned products with price-dependent yield, *Omega*, 84: 160-174.
- [28] Pour-Massahian-Tafti, M., M. Godichaud, and L. Amodio (2020). New models and efficient methods for single-product disassembly lot-sizing problem with surplus inventory decisions, *International Journal of Production Research*, 59: 6898-6918.
- [29] Slama, I., et al. (2022). Stochastic program for disassembly lot-sizing under uncertain component refurbishing lead times, *European Journal of Operational Research*, 303: 1183-1198.
- [30] Darghouth, M. and M. Abdel-Aal (2021). A capacitated disassembly scheduling problem considering processing technology selection and parts commonality, *Journal of Remanufacturing*. 11: 243-261.
- [31] Ji, X., et al. (2016). Capacitated disassembly scheduling with parts commonality and start-up cost and its industrial application, *International Journal of Production Research*, 54: 1225-1243.
- [32] Lee, D., et al. (2004). Disassembly scheduling: integer programming models, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218: 1357-1372.
- [33] Liu, K. and Z.-H. Zhang (2018). Capacitated disassembly scheduling under stochastic yield and demand, *European Journal of Operational Research*, 269: 244-257.
- [34] Kim, H.-J., et al. (2003). Disassembly scheduling with multiple product types, *CIRP Annals*, 52: 403-406.
- [۴] شفیع رودباری، عرفان، فاطمی قمی، سید محمدتقی، شیخ سجادیه، محسن (۱۳۹۹). مدل‌سازی شبکه زنجیره‌تأمین معکوس چند رده‌ای و حل توسط الگوریتم ترکیبی، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید. ۸ (۱۶): ۱۹۷-۱۸۵.
- [5] Kim, H.-J., D.-H. Lee, and P. Xirouchakis (2007). Disassembly scheduling: literature review and future research directions, *International Journal of Production Research*, 45: 4465-4484.
- [6] Güngör, A. and S.M. Gupta (2002). Disassembly line in product recovery, *International Journal of Production Research*, 40: 2569-2589.
- [7] Lee, D., J. Kang, and P. Xirouchakis (2001). Disassembly planning and scheduling: review and further research, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 215: 695-709.
- [8] Lambert, A.J. (2003). Disassembly sequencing: a survey, *International Journal of Production Research*, 41: 3721-3759.
- [9] Gungor, A., et al. (2001). Complications in disassembly line balancing, *In Environmentally conscious manufacturing*, 4193: 289-298.
- [۱۰] ریاحی، مینا، زندیه، مصطفی (۱۳۹۷). بالانس خط دمونتاژ مبتنی بر مدل کانو و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی (مورد مطالعه: خط بازیافت ضایعات الکترونیکی)، *مطالعات مدیریت صنعتی*. ۴۹ (۱۶): ۳۶-۱.
- [۱۱] درخشان، علی (۱۳۹۵). مدل‌سازی و حل مسأله زنجیره‌تأمین یکپارچه حلقه بسته چندمحصولی با در نظر گرفتن تعادل خط جداسازی قطعات، *دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه صنعتی شاهرود*.
- [12] Gupta, S.M.a.T., K.N. (1994). Scheduling disassembly, *International Journal of Production Research*, 32: 1857-1886.
- [13] Lee, D.-H. and P. Xirouchakis (2004). A two-stage heuristic for disassembly scheduling with assembly product structure, *Journal of the Operational Research Society*, 55: 287-297.
- [14] Kim, H.-J., et al. (2009). A branch and bound algorithm for disassembly scheduling with assembly product structure, *Journal of the Operational Research Society*, 60: 419-430.
- [15] Lee, D.-H., P. Xirouchakis, and R. Zust (2002). Disassembly scheduling with capacity constraints, *CIRP Annals*, 51: 387-390.
- [16] Kim, H.-J., D.-H. Lee, and P. Xirouchakis (2006). A Lagrangean heuristic algorithm for disassembly scheduling with capacity constraints, *Journal of the Operational Research Society*, 57: 1231-1240.
- [17] Kim, J.-G., et al. (2006). Disassembly scheduling with capacity constraints: minimizing the number of products disassembled, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220: 1473-1481.
- [18] Jeon, H.-B., et al. (2006). A two-stage heuristic for disassembly scheduling with capacity constraints, *Management Science and Financial Engineering*, 12: 95-112.
- [19] Kim, H.-J. and P. Xirouchakis (2010). Capacitated



DOI: 10.22084/IER.2023.27084.2099

Capacitated Multi-Period Multi-Product Disassembly Scheduling with Parts Commonality and Partial Disassembly

S. Zare¹, M. B. Fakhrazad^{2*}, H. Hosseini Nasab³, H. Khademi Zare⁴

¹. PhD candidate of industrial engineering, Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

^{2, 3, 4}. Professor, Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 May 2022

Accepted 27 Aug 2022

Keywords:

Disassembly scheduling

Partial disassembly

Parts commonality

Multi-product

Multi-period

ABSTRACT

In a green supply chain, preventing the disposal of used products and reusing them will help to protect the environment. The most important step in the closed-loop supply chain is the disassembly and recovery of used products and their reuse in producing new products. In this paper, we propose a new mixed-integer programming model to consider a multi-period multi-product disassembly scheduling problem based on parts commonality and partial disassembly. Considering partial disassembly is the main contribution of this paper. When the disassembly is partial, the parts with no demand will not disassemble; so, a lot of time and cost will be saved. The proposed model is solved using CPLEX Solver, and sensitivity analysis is deployed to validate the model and determine the proposed model's practical results. Numerical experiments shows that the CPLEX solver has a good efficiency for solving the developed model in small and medium dimensions.

* Corresponding author. M. B. Fakhrazad

Tel.: 035-31232405; E-mail address: mfakhrazad@yazd.ac.ir