

## زمان بندی تعمیر محصولات برگشتی به همراه تعیین اندازه و زمان سفارش دهی قطعات یدکی آنها در لجستیک معکوس دوسطحی

سید حسام‌الدین ذگردی\*<sup>۱</sup>، محسن صادق عمل‌نیک<sup>۲</sup> و محمد یآوری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار بخش مهندسی صنایع - دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> دانشجوی دکترای مهندسی صنایع - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۹۱/۷/۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۹۱/۷/۲۲، تاریخ تصویب ۹۱/۷/۲۳)

### چکیده

در این مقاله، سیستم تولیدی دمونتاژ- مونتاژ سه مرحله‌ای در لجستیک معکوس از مطالعه صنعت هوایی شناسایی و معرفی شده است. همچنین زمان بندی تعمیر محصول برگشتی و تعیین اندازه و زمان سفارش انباشته قطعات یدکی به طور همزمان در آن بررسی شده است. تصمیم گیرنده، به دنبال کمینه کردن مجموع هزینه‌ها، شامل میانگین وزنی اتمام کارها (تعمیر بالگردهای برگشتی) و هزینه‌های موجودی قطعات یدکی است. یک مدل یکپارچه از طریق مدل سازی برنامه ریزی عدد صحیح مختلط خطی برای مسئله توسعه داده شده است. سپس حل مدل و حساسیت جواب‌ها نسبت به تغییرات پارامترهای کلیدی برای مسئله پایه در صنعت هوایی بررسی شده است. استراتژی‌های مختلف تعمیر قطعات یدکی، توسط مونتاژگر، به عنوان سناریوهای جایگزین با استراتژی تعویض قطعه با قطعات دریافتی از تولیدکننده، در ۱۲۰ مسئله نمونه‌ای مقایسه شده است. با وجود عملکرد بهتر استراتژی تعمیر قطعات مشترک به طور میانگین، نتایج، مؤید لزوم اتخاذ استراتژی‌های مختلف در دوره‌های مختلف عمر قطعات برگشتی است.

**واژه‌های کلیدی:** لجستیک معکوس، زمان بندی مونتاژ دو مرحله‌ای، برنامه ریزی عدد صحیح مختلط خطی، اندازه انباشته و زمان بندی

### مقدمه

تشخیص داده شده است. [۳] در سطح استراتژیک می توان به تحقیقاتی که به تازگی در طراحی شبکه لجستیک معکوس از جمله [۲]، [۴]، [۵]، [۶]، [۷] و [۸] انجام شده است، اشاره کرد.

در سطح عملیات، زمان بندی و مدیریت موجودی از جمله تصمیمات اصلی هستند که در لجستیک معکوس مسائل نوپایی محسوب شده و ابعاد جدیدی دارند که آنها را از سایر مسائل مطرح در ادبیات موضوع متمایز کرده است.

در بسیاری از تحقیقات انجام گرفته، فعالیت‌های انجام شده روی محصول برگشتی، تک مرحله‌ای در نظر گرفته شده است. در حالی که در بسیاری از مسائل واقعی، محصولات از گروهی از اجزای اصلی (مجموعه) تشکیل شده‌اند و ممکن است مسئله زمان بندی و موجودی آن تا سطوح مختلف محصول مورد نیاز باشد. تیونتر و همکاران در مقاله خود، مسئله تعیین اندازه انباشته اقتصادی و

در سالیان اخیر، زنجیره تأمین بسته و لجستیک معکوس، به عنوان زمینه تحقیقاتی، مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. منافع اقتصادی ناشی از به کارگیری دوباره محصولات برگشتی، الزامات قانونی و تمایل بیشتر مشتریان به استفاده از محصولات حافظ محیط زیست، به عنوان سه عامل پیش برنده برای ایجاد شبکه لجستیک معکوس و برگشت محصولات در صنایع مختلف ذکر شده‌اند. [۱] همچنین قوانین حاکمیتی، تولیدکنندگان را ملزم به کاهش اثرات زیست محیطی فعالیت‌های خود کرده است. [۲] با بررسی صنعت هوایی (بالگرد) در ایران، می توان یک عامل دیگر برای برگشت محصولات در لجستیک معکوس را با عنوان فراخوان برای تعمیرات اساسی در نظر گرفت. اگر چه در سطح استراتژیک، فواید لجستیک معکوس و توجه به محصولات برگشتی واضح است؛ با این حال مدیریت جریان محصولات برگشتی در سطح عملیات، کاری مشکل

وجود نباشد، عملیات روی مجموعه شروع نمی‌شود. مونتاژ نهایی مجموعه‌های بالگرد برگشتی پس از اتمام عملیات تعمیر همه مجموعه‌های بالگرد، در کارگاه‌های مربوطه آغاز می‌شود.

در این مقاله مسئله با دو سطح مختلف تصمیم‌گیری شامل زمان‌بندی تعمیر محصولات برگشتی و همچنین تعیین اندازه و زمان‌بندی سفارش انباشته قطعات یدکی به طور همزمان در سیستم تولیدی دمونتاژ- مونتاژ سه‌مرحله‌ای در صنعت هوایی بررسی می‌شود.

### مرور ادبیات

شرح مسئله ذکر شده از صنعت هوایی، مسئله دمونتاژ- مونتاژ سه‌مرحله‌ای، به‌گونه‌ای حالتی تعمیم‌یافته از مسئله زمان‌بندی مونتاژ دو مرحله‌ای است که مسئله معروفی در ادبیات زمان‌بندی است که ترکیبی از ساخت و مونتاژ است. مسئله مونتاژ دو مرحله‌ای به این ترتیب است که در مرحله اول، عملیات‌های ساخت مجموعه‌های مختلف محصول به طور جداگانه و مستقل انجام می‌شود و در مرحله دوم، مجموعه‌های ساخته‌شده روی هم مونتاژ می‌شوند. در مرحله اول برای ساخت هر نوع مجموعه، ماشین‌های اختصاصی وجود دارد و هر محصول پس از اتمام عملیات ساخت همه مجموعه‌های آن در مرحله اول، برای شروع عملیات مونتاژ روی ماشین مونتاژ مرحله دوم آماده می‌شود. [۱۲] مسئله زمان‌بندی مونتاژ دو مرحله‌ای، تعمیم‌یافته مسئله کارگاهی دو ماشین است. زمان‌بندی مونتاژ دو مرحله‌ای حتی زمانی که تعداد ماشین‌ها در مرحله اول دو ماشین باشد، یک مسئله NP-hard است. [۱۳] همچنین پوتس و همکاران (۱۹۹۵) ثابت کرده‌اند که همواره یک جواب بهینه با توالی یکسان کارها روی همه ماشین‌ها برای این مسئله وجود دارد. [۱۳] کاربردهای مختلفی برای مسئله مونتاژ دو مرحله‌ای در صنایع مختلف از جمله ساخت ماشین‌های آتش‌نشانی [۱۴]، کامپیوترهای خانگی [۱]، زمان‌بندی جستجوی بانک‌های اطلاعاتی توزیع‌شده [۱۵] و تولید مبلمان [۱۶] ذکر شده است. توابع هدف مختلفی از جمله کمینه‌کردن زمان تکمیل کارها [۱۲]، مجموع وزنی زمان در جریان بودن کارها [۱۷]، حداکثر دیر کردها [۱۵] و مجموع وزنی زمان اتمام کارها و حداکثر دیرکرد کارها [۱۹] در مسئله مونتاژ

زمان‌بندی تولید چندمحصولی (تولید یک مرحله‌ای) را با امکان پاسخگویی به تقاضای قطعی از دو منبع تولید و بازتولید در یک خط مشترک بررسی کرده‌اند. [۹] در تحقیق دیگری تیونتر و همکاران این مسئله را در سیستمی با دو خط مجزا برای تولید و بازتولید مورد بررسی قرار داده‌اند. [۱]

تحقیقات انجام گرفته در مسائل تعیین اندازه انباشته در لجستیک معکوس، اغلب مسائل تک‌سطحی را مورد بررسی قرار داده‌اند و تحقیقات اندکی در مسائل دوسطحی انجام شده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به مقاله میترا اشاره کرد که یک سیستم موجودی دوسطحی- چندمحصولی، شامل توزیع‌کننده و انبار میانی را بررسی کرده است. در این سیستم، توزیع‌کننده پاسخگوی تقاضای مشتریان است. توزیع‌کننده، محصولات را از انبار میانی تأمین می‌کند و انبار میانی تقاضای توزیع‌کننده را از دو منبع بازتولید قطعات برگشتی و خرید قطعه جدید از یک منبع با ظرفیت نامحدود تأمین می‌کند. میترا در مقاله خود سیستم موجودی با برگشت را در دو حالت تقاضای قطعی و احتمالی بررسی کرده است. [۱۰]

حل کارای مسائل لجستیک معکوس همانند زنجیره تأمین، نیازمند حل مسائل پیچیده مرتبط با هم از قبیل زمان‌بندی، مدیریت موجودی و مسیریابی است. هر یک از این مسائل در حالت مجزا و حتی برای یک سیستم تولیدی تک ماشین مسائل دشواری هستند. [۱۱] برای مسائل واقعی، در نظر گرفتن ارتباط بین سطوح تصمیم‌گیری و همچنین مدل‌سازی سیستم‌های تولیدی با ماشین‌های مرتبط با هم، پیچیدگی مسئله را افزایش می‌دهد. محصولات برگشتی در صنعت هوایی، به صورت سالیانه برای انجام تعمیرات اساسی فراخوان می‌شوند. پس از برگشت بالگردها به مونتاژگر، بالگردها به مجموعه‌های اصلی دمونتاژ شده و هر یک از آنها برای انجام تعمیرات لازم به کارگاه‌های تخصصی مربوط به خود ارسال می‌شوند. مجموعه‌های هر بالگرد پس از اتمام تعمیرات مورد نیاز برای خط مونتاژ، برای مونتاژ دوباره ارسال می‌شوند. لازم به ذکر است که تعمیرات هر مجموعه ممکن است نیازمند تعویض یک یا چند قطعه از مجموعه باشد که در این صورت قطعه مورد نظر از انبار دریافت و برای کارگاه مربوطه برای تعویض در مجموعه ارسال می‌شود. در صورتی که قطعه مورد نیاز مجموعه، در انبار

ماده اولیه از میزان مصرف مورد نیاز، شروع نمی‌شود.

[۲۶]

بریسکورن و همکاران، مسئله تک‌ماشینه با محدودیت موجودی غیرمنفی را با اهداف مختلف از جمله کمینه‌کردن مجموع وزنی زمان تکمیل کارها، حداکثر تأخیر و تعداد کارهای دارای دیرکرد را در نظر گرفته و پیچیدگی این مسائل را در حالت‌های خاص بررسی کرده‌اند. در مسئله آنها انجام عملیات برخی از کارها موجب کاهش موجودی و عملیات سایر کارها باعث افزایش موجودی می‌شود و کارهایی که باعث کاهش موجودی می‌شوند، فقط در صورتی عملیات آنها شروع می‌شود که سطح موجودی به اندازه کافی باشد. [۲۷]

در بیشتر تحقیقات گذشته، مسئله زمان‌بندی مونتاژ دو مرحله‌ای بدون در نظر گرفتن نیاز به قطعات یدکی بررسی شده است و در تحقیقات اندکی از جمله مقاله ترخوف و همکاران [۱۱] موجودی و زمان دریافت قطعات یدکی لحاظ شده است. اما در این تحقیقات نیز موجودی و زمان دریافت قطعات یدکی، نه به عنوان متغیر تصمیم‌گیری، بلکه به عنوان محدودیت در مسئله زمان‌بندی محصول در نظر گرفته شده است. در این مقاله، میزان و زمان دریافت انباشته قطعات یدکی، متغیر تصمیم‌گیری بوده و به طور همزمان با زمان‌بندی تعمیر محصولات برگشتی بررسی می‌شود.

همچنین در این تحقیق با بررسی سیستم تولیدی صنعت هوایی، مسئله جدید دموونتاژ- مونتاژ سه‌مرحله‌ای که تعمیر یافته مسئله مونتاژ دو مرحله‌ای است، معرفی شده است. در این سیستم، محدودیت‌های تولیدکننده قطعات یدکی نیز به عنوان یک سطح در لجستیک معکوس در مدل گنجانده شده و تأثیر آنها بررسی شده است.

### شرح مسئله

شمایی کلی از مسئله دموونتاژ- مونتاژ سه‌مرحله‌ای که ترکیبی از یک ماشین دموونتاژ، یک تولیدکننده قطعه،  $m$  ماشین تعمیر مجموعه‌ها و یک ماشین مونتاژ است، در شکل (۱) نشان داده شده است.

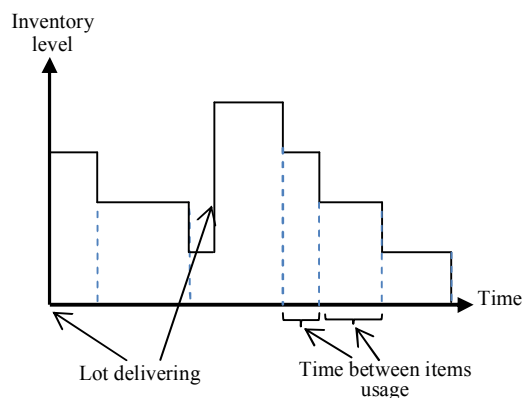
لازم به ذکر است مسئله معرفی‌شده در این مقاله، با مسئله مونتاژ سه‌مرحله‌ای ارائه‌شده توسط کولاماس و کپاریسیس [۲۲] متفاوت است و اضافه شدن مرحله

دومرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. الانزی و اللهوری زمان‌های راه‌اندازی را مجزا از زمان‌های عملیات در سه تحقیق با توابع هدف کمینه‌سازی زمان اتمام کارها [۲۰] مجموع زمان‌های تکمیل [۲۱] و حداکثر دیرکرد [۱۶] برای مسئله مونتاژ دو مرحله‌ای در نظر گرفته‌اند.

لازم به ذکر است که در سیستم تولیدی مونتاژ دومرحله‌ای، کاربردها و توسعه‌هایی در مسئله نیز ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به معرفی مسئله مونتاژ سه‌مرحله‌ای با اضافه‌شدن یک مرحله میانی بین دو مرحله ساخت و مونتاژ، شامل جمع‌آوری و انتقال قطعات ساخته شده در کارگاه‌های مختلف ساخت، به مرحله مونتاژ اشاره کرد. [۲۲] در تحقیقی دیگر کولاماس و کاپریسیس، مسئله مونتاژ دو مرحله‌ای را با این ویژگی در نظر گرفتند که برای انجام هر یک از عملیات‌های مستقل در مرحله اول و همچنین عملیات مونتاژ در مرحله دوم، تعدادی ماشین موازی با نرخ تولید متفاوت وجود دارد. [۲۳] سانگ و جان در مقاله خود مسئله مونتاژ دو مرحله‌ای را برای محصولی با دو مجموعه اصلی در نظر گرفتند که یکی از مجموعه‌ها برون‌سپاری و دیگری در داخل تولید می‌شود. هدف تحقیق آنها کمینه‌کردن زمان تکمیل کارها با توجه به زمان دسترسی به مجموعه‌های برون‌سپاری شده بود.

[۲۴] در کنار تحقیقات ذکرشده، ترخوف و همکاران، مسئله زمان‌بندی مونتاژ دو مرحله‌ای را با در نظر گرفتن محدودیت قطعات یدکی مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها یک زنجیره تأمین دوسطحی متمرکز با دو تولیدکننده و یک مونتاژگر را بررسی کردند که هر یک از تولیدکنندگان در تولید مجموعه‌های محصول، به قطعاتی نیاز دارند. در تحقیق مذکور، زمان دریافت قطعات مورد نیاز برای ساخت مجموعه‌ها، پارامتر در نظر گرفته شده است و اندازه انباشته و زمان‌بندی قطعات، جزو متغیرهای تصمیم مدنظر نبوده است. [۱۱] مسئله زمان‌بندی با محدودیت قطعات یدکی در سایر سیستم‌های تولیدی نیز در ادبیات تحقیق بررسی شده است. نیومن و شویندت نشان دادند که مسئله کمینه‌کردن زمان اتمام کارها با در نظر گرفتن محدودیت موجودی، یک مسئله به طور کامل NP-hard است. [۲۵] گریگوروف و همکاران، یک مسئله تک‌ماشینه با محدودیت مواد اولیه را بررسی کردند که در آن عملیات روی کار در صورت پایین‌تر بودن سطح موجودی

انباشته دریافتی محاسبه می‌شود که همگی جزو متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله هستند. بنابراین تصمیمات مربوط به موجودی قطعات یدکی از جمله زمان و میزان سفارش آنها و تصمیمات برنامه زمانی و توالی انجام عملیات تعمیر محصولات برگشتی، بر یکدیگر تأثیر گذارند.



شکل ۲: الگوی موجودی قطعات یدکی در مونتاژگر

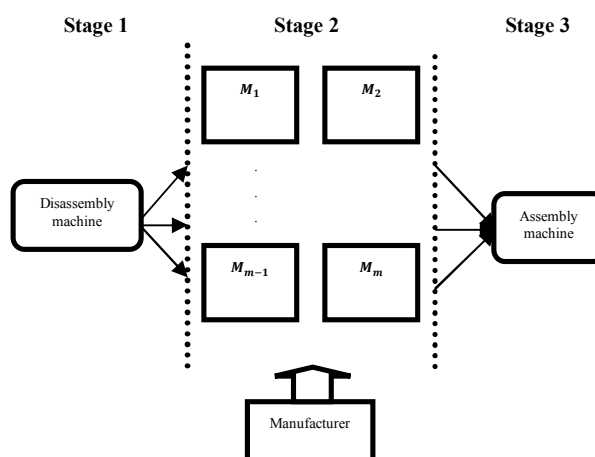
رویکردهای زمان‌بندی و برنامه‌ریزی تولید همزمان به سه دسته رویکرد سلسله‌مراتبی، رویکرد بازگشتی (رفت و برگشتی) و رویکرد فرموله‌کردن یکپارچه دسته‌بندی می‌شوند. [۲۸] در این تحقیق از رویکرد فرموله‌کردن یکپارچه برای تصمیمات همزمان موجودی و زمان‌بندی استفاده شده است. در ادامه این تحقیق برای مدل‌سازی مسئله، نخست تابع هدف مسئله فرموله‌بندی می‌شود. سپس یک مدل‌سازی عدد صحیح خطی مختلط برای مسئله ارائه می‌شود. همچنین محدودیت‌های مونتاژگر و تولیدکننده نیز برای اعمال در مدل معرفی شده‌اند.

### مفروضات مسئله و نمادهای به کار رفته

پارامترهای ورودی مسئله به شرح زیر هستند:

شمارنده محصولات برگشتی	$i$ :
شمارنده مجموعه‌ها (ماشین‌های تعمیر)	$j$ :
شمارنده قطعات	$v$ :
تعداد محصولات برگشتی	$n$ :
تعداد مجموعه‌ها (تعداد ماشین‌های تعمیر)	$m$ :
تعداد قطعات	$V$ :
وزن محصول $i$ (هزینه نگهداری محصول برگشتی در مونتاژگر در واحد زمان)	$W_i$ :
هزینه نگهداری واحد قطعه $v$ در واحد زمان در مونتاژگر	$h_v$ :

دمونتاژ به قبل از دو مرحله مسئله مونتاژ دومرحله‌ای، آن را متمایز کرده است که کاربرد وسیعی نیز در لجستیک معکوس دارد.



شکل ۱: مسئله دمونتاژ-مونتاژ سه‌مرحله‌ای در لجستیک معکوس

در این مسئله، تقاضای قطعات یدکی توسط تولیدکننده پاسخ داده می‌شود. توالی عملیات تعمیر مجموعه‌های محصولات مختلف در کارگاه‌های مختلف و همچنین اندازه سفارش انباشته و زمان‌بندی دریافت قطعات مختلف، باید به گونه‌ای تعیین شود که مجموع هزینه‌ها شامل هزینه‌های نگهداری (شامل هزینه‌های نگهداری محصولات برگشتی و هزینه‌های نگهداری قطعات یدکی) و هزینه‌های سفارش‌دهی قطعات با توجه به محدودیت‌های ظرفیت در مونتاژگر و تولیدکننده کمینه شود.

موجودی قطعات یدکی در این مسئله به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم بر تابع هدف تأثیرگذار است. از طرفی قطعات یدکی در صنعت هوایی به دلیل گران‌قیمت بودن آنها، هزینه‌های سفارش‌دهی و نگهداری قابل توجهی دارند و از سوی دیگر تصمیمات مربوط به قطعات یدکی بر زمان‌بندی تعمیر بالگردهای برگشتی و در نتیجه، زمان تکمیل آنها (زمان خواب محصولات برگشتی) در تابع هدف تأثیرگذار خواهد بود.

الگوی موجودی قطعه در مونتاژگر به صورت شکل (۲) است. در شکل (۲) خطوط خط‌چین، زمان‌های شروع عملیات روی مجموعه‌های محصولات مختلف است که نیاز به قطعه دارند. متوسط موجودی قطعه، معادل با سطح زیر نمودار است. سطح زیر نمودار بر اساس سه متغیر زمان‌های شروع عملیات روی مجموعه‌ها (زمان مصرف قطعه)، زمان‌های دریافت انباشته‌های جدید قطعه و اندازه

در این مسئله، با توجه به پایین بودن زمان دمونتاز و مونتاژ دوباره مجموعه‌ها نسبت به زمان تعمیر آنها و همچنین نبود محدودیت ظرفیت در دمونتاز و مونتاژ دوباره (با توجه به حجم بالگردهای برگشتی)، زمان دمونتاز و مونتاژ دوباره مجموعه‌ها، بدون لطمه به عمومیت مسئله، صفر در نظر گرفته شده است.

در صنعت هوایی، تعمیر قطعات مجموعه‌ها توسط مونتاژگر، جزو زمان انجام عملیات تعمیر مجموعه در نظر گرفته شده است و قطعاتی که قابل تعمیر نیستند با قطعاتی تولیدی تولیدکننده جایگزین می‌شوند و همان طور که ذکر شد، عملیات تعمیر روی مجموعه‌ها، زمانی آغاز می‌شود که قطعات مورد نیاز مجموعه در انبار موجود باشد؛ در غیر این صورت تا زمان دریافت قطعه، عملیات تعمیر مجموعه شروع نخواهد شد. به عبارتی کمبود قطعه مجاز و از نوع پس‌افت است. هزینه نگهداری قطعات، تابعی خطی از سطوح موجودی آنها است. همچنین مدت زمان تحویل قطعات، صفر در نظر گرفته شده است. در هر لحظه، فقط عملیات یک مجموعه روی یک ماشین انجام می‌گیرد و هر ماشین فقط مجموعه تخصصی از بالگردهای مختلف را تعمیر می‌کند. استقلال زمان و هزینه‌های آماده‌سازی عملیات کامپوننت‌ها از یکدیگر از جمله سایر مفروضات مسئله است.

### مدل‌سازی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

در این بخش به عنوان اولین گام، تابع هدف مسئله (مجموع هزینه‌های نگهداری و سفارش‌دهی در مونتاژگر) مورد بررسی قرار می‌گیرد. اغلب، میانگین موجودی، تابعی از حاصل ضرب میزان سفارش و طول دوره تولید (مصرف) است. از این رو میانگین موجودی و به دنبال آن هزینه نگهداری موجودی حاصل ضرب دو متغیر تصمیم و تابعی غیرخطی است. در این مسئله نیز هزینه نگهداری قطعات یدکی در مونتاژگر تابعی غیرخطی از حاصل ضرب دو متغیر تصمیم‌گیری شامل سطح موجودی و مدت زمان بین دو مصرف متوالی از قطعات است که سطح موجودی وابسته به میزان سفارش و زمان دریافت انباشته قطعه و زمان بین دو مصرف متوالی از قطعه یدکی وابسته به زمان‌بندی انجام عملیات مجموعه‌های نیازمند قطعه هستند (رجوع شود به شکل ۲). در این مقاله به جای تعریف متغیر برای زمان سفارش‌دهی و میزان سفارش،

هزینه سفارش‌دهی انباشته قطعه  $V$  برای مونتاژگر  
 $A_v$ :  
 زمان عملیات مجموعه  $J$  از محصول  $i$  در کارگاه  $J$   
 $P_{ij}$ :  
 زمان راه‌اندازی عملیات مجموعه  $J$  از محصول  $i$  در کارگاه  $J$   
 $S_{ij}$ :  
 ضریب مصرف قطعه  $V$  در تعمیر کامپوننت  $J$  از محصول  $i$   
 $\varphi_{ijv}$ :  
 یک عدد بسیار بزرگ  
 $M$ :

متغیرهای تصمیم‌گیری مدل بدین شرح تعریف شده‌اند:  
 $C_i$ : زمان اتمام همه عملیات‌های محصول برگشتی  $i$   
 $X_{ij}$ : زمان اتمام عملیات مجموعه  $J$  از محصول  $i$  در کارگاه  $J$   
 $Y_{ikj}$ : متغیر صفر و یک، که اگر عملیات محصول  $i$  بعد از عملیات محصول  $k$  در کارگاه  $J$  انجام شود مقدار یک و در غیر این صورت، مقدار صفر خواهد داشت.

متغیر عدد صحیح، که زمان دریافت قطعه  $V$  مورد نیاز مجموعه  $J$  از محصول  $i$  است به عبارتی دیگر معادل زودترین زمان شروع ممکن برای مجموعه  $J$  از محصول  $i$  است.  
 $R_{ijv}$ : متغیر صفر و یک، که اگر دریافت سفارش قطعه  $V$  برای مجموعه  $J$  از محصول  $i$  ( $R_{ijv}$ ) قبل از دوره  $t$  باشد، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر خواهد داشت.  
 $B_{vt}$ : متغیر صفر و یک، که اگر در دوره  $t$  انباشته‌ای از قطعه  $V$  دریافت شود، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر خواهد داشت.

لازم به ذکر است، در همه متغیرها و پارامترهای مسئله، واحد زمان هفته است.

از ویژگی‌های صنعت هوایی، ثبت دقیق سوابق محصولات (بالگردها) و قطعات آنها است. بنابراین تعداد محصولات برگشتی، وضعیت آنها و زمان برگشت آنها برای انجام تعمیرات اساسی قطعی است و همه محصولات برگشتی در ابتدای دوره برنامه‌ریزی نیز در دسترس هستند.

$$\text{Min } \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i C_i + \sum_{v=1}^V h_v \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \varphi_{ijv} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & * ((X_{ij} - P_{ij}) - R_{ijv}) \\ & + \sum_{v=1}^V A_v \sum_{t=1}^T B_{vt} \\ X_{ij} + P_{kj} + S_{kj} - X_{kj} & \leq M Y_{ikj} \quad \forall i, k, j \text{ \& } i \end{aligned} \quad (6)$$

$$X_{kj} + P_{ij} + S_{ij} - X_{ij} \leq M(1 - Y_{ikj}) \quad \forall i, k, j \text{ \& } i < k \quad (7)$$

$$R_{ijv} - t \leq M(1 - D_{ijvt}) \quad \forall i, j, v, t \text{ \& } \varphi_{ijv} > 0 \quad (8)$$

$$t - R_{ijv} \leq M D_{ijvt} \quad \forall i, j, v, t \text{ \& } \varphi_{ijv} > 0 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_{ijvt} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_{ijv(t-1)} \leq M B_{vt} \quad \forall v, t \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_{ijv(t-1)} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_{ijvt} \leq M(1 - B_{vt}) \quad \forall v, t \quad (11)$$

$$\sum_{v=1}^V \left( \frac{1}{P_{Rv}} \right) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \varphi_{ijv} D_{ijvt} \leq t \quad \forall t \quad (12)$$

$$\sum_{v=1}^V B_{vt} \leq 1 \quad \forall t \quad (13)$$

$$X_{ij} \geq P_{ij} + S_{ij} + R_{ijv} \quad \forall i, j, v \quad (14)$$

$$C_i \geq X_{ij} \quad \forall i, j \quad (15)$$

$$C_i \leq T \quad \forall i \quad (16)$$

$X_{ij}, C_i, R_{ijv}$  integer variables

$D_{ijvt}, Y_{ikj}, B_{vt}$  binary variables

T: number of time period & M: a large number

نامعادلات (۶) و (۷) بیانگر این محدودیت هستند که بازتولید (تعمیر) هر زوج مجموعه متوالی، در هیچ یک از کارگاه‌ها نباید همپوشانی داشته باشند.

برای محاسبه هزینه سفارش‌دهی قطعات، لازم است که متغیری برای تعداد بار سفارش قطعه تعریف شود. تعداد بار سفارش در این مسئله معادل تعداد دوره‌هایی است که در آن قطعه دریافت می‌شود. نامعادلات (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) به این منظور تعریف شده‌اند. ابتدا در نامعادلات (۸) و (۹) متغیر صفر و یک  $D_{ijvt}$  تعریف و محاسبه شده است. مقدار این متغیر بیانگر این است که آیا قطعه  $v$  مورد نیاز مجموعه  $j$  از محصول  $i$  قبل از دوره  $t$  سفارش داده شده است یا خیر؟ که در صورت سفارش، مقدار یک خواهد گرفت. به عبارتی دیگر اگر  $R_{ijv}$  کمتر از  $t$  باشد؛  $D_{ijvt}$  مقدار یک اتخاذ می‌کند. رابطه  $D_{ijvt}$  بیانگر تعداد مجموع دفعات دریافت

متغیر تصمیم دیگری تعریف شده است. در نظر بگیرید هر قطعه  $v$  برای هر مجموعه از هر محصول به طور جداگانه دریافت می‌شود. بنابراین، در صورتی که  $R_{ijv}$  برای برخی از مجموعه‌های محصولات مختلف، یکسان باشد، در این صورت مجموع قطعه  $v$  مورد نیاز این مجموعه‌ها، معادل میزان اندازه انباشته  $v$  و زمان دریافت انباشته، معادل  $R_{ijv}$  خواهد بود. با تعریف متغیر مذکور، مدت زمان نگهداری قطعه  $v$  مربوط به مجموعه  $j$  از محصول  $i$  از رابطه (۱) قابل محاسبه است:

$$\text{Holding time} = (X_{ij} - P_{ij}) - R_{ijv} \quad (1)$$

و به دنبال آن متوسط هزینه نگهداری قطعات یدکی از رابطه خطی (۲) قابل استخراج است:

$$\begin{aligned} \text{Spare parts holding cost} \\ = \sum_{v=1}^V h_v \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \varphi_{ijv} \\ * ((X_{ij} - P_{ij}) - R_{ijv}) \end{aligned} \quad (2)$$

متغیر  $R_{ijv}$  به گونه‌ای معادل زودترین زمان ممکن برای شروع عملیات مجموعه  $j$  از محصول  $i$  است؛ از این رو باید رابطه (۳) را در محدودیت‌های مسئله در نظر گرفت:

$$R_{ijv} \leq X_{ij} - (P_{ij} + S_{ij}) \quad \forall i, j, v \quad (3)$$

لازم به ذکر است عملیات روی مجموعه  $j$  زمانی آغاز می‌شود که همه قطعات یدکی مورد نیاز آن موجود باشند. از این رو زودترین زمان شروع عملیات مجموعه  $j$  از محصول  $i$  بزرگ‌تر از  $\max_v (R_{ijv})$  است. بر اساس  $R_{ijv}$ ‌های به دست آمده از مدل، می‌توان زمان و میزان سفارش قطعه  $v$  را محاسبه کرد. به این معنی که در زمان‌های  $R_{ijv}$  (غیرصفر) دریافت قطعه وجود دارد. هزینه کل نگهداری محصول برگشتی و قطعات یدکی در مونتازگر عبارت است از:

$$\begin{aligned} \text{Total holding cost} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i C_i \\ + \sum_{v=1}^V h_v \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \varphi_{ijv} \\ * ((X_{ij} - P_{ij}) - R_{ijv}) \end{aligned} \quad (4)$$

در این مسئله هر ماشین تعمیر مجموعه در هر زمان، فقط عملیات مربوط به یک مجموعه محصول را می‌تواند انجام دهد. همچنین در تولیدکننده نیز در هر واحد زمانی فقط تولید یکی از قطعات انجام می‌شود.

مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مسئله به این شکل است:

تعیین سقف برای تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی می‌تواند شرایط بهینگی مسئله را به هم بزند. از این رو برای تعداد دوره‌ها سه مقدار شامل سقف تعداد دوره‌ها ( $T_{avb}$ )، حداقل دوره‌های لازم ( $T_{min}$ ) و حداکثر دوره‌های لازم ( $T_{max}$ ) تعیین می‌شود. محدودیت تعداد دوره‌ها، جزو پارامترهای ورودی مسئله است. حداقل تعداد دوره‌های لازم برای پاسخگویی به تقاضا با حداکثر تعداد دوره لازم برای تعمیر محصولات برگشتی بدون در نظر گرفتن قطعات یدکی مورد نیاز معادل است. به عبارتی دیگر حداقل تعداد دوره‌های لازم از رابطه (۱۸) قابل محاسبه است.

$$T_{min} = \max_j \left\{ \sum_{i=1}^n (P_{ij} + S_{ij}) \right\} \quad (18)$$

در صورتی که فرض شود که تولید قطعات در همان ماشین‌های تعمیر مجموعه‌های محصول برگشتی انجام می‌شود، دیرترین زمان اتمام کارها در بین همه کارگاه‌ها را می‌توان به عنوان حداکثر تعداد دوره‌های لازم در نظر گرفت. ابتدا دیرترین زمان اتمام کارها در هر کارگاه از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود:

$$C_{max}^j = \sum_{i=1}^n (P_{ij} + S_{ij}) + \sum_{v=1}^V \left( \frac{\sum_{i=1}^n \phi_{ijv}}{Pr_v} \right) \quad (19)$$

سپس در کارگاهی که  $C_{max}^j$  بیشتری دارد، تولید قطعات خارج از کارگاه و در یک ماشین جداگانه در نظر گرفته می‌شود. دیرترین زمان اتمام کارها در این کارگاه، وابسته به عملیات تولید قطعات مورد نیاز مجموعه‌ها است که از الگوریتم جانسون محاسبه می‌شود. در این صورت ماشین تولید به عنوان ماشین اول و ماشین تعمیر مجموعه محصول برگشتی به عنوان ماشین دوم در نظر گرفته می‌شود. پس از محاسبه مجدد  $C_{max}^j$  برای کارگاه، حداکثر تعداد دوره‌های لازم از رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود:

$$T_{max} = \max_j \{ C_{max}^j \} \quad (20)$$

بنابراین تعداد دوره‌های لازم عبارت است از:

$$T = \min (T_{avb}, T_{max}) \quad (21)$$

همان طور که ذکر شد، در این مدل از رویکرد فرموله‌کردن یکپارچه برای تصمیم‌های موجودی و زمان‌بندی و جستجوی همه فضای جواب برای دستیابی به بهینگی استفاده شده است. با ثابت در نظر گرفتن مقادیر  $X_{ijz}$ ها در مدل یکپارچه ارائه شده، مقادیر بهینه اندازه و

قطعه  $v$  تا دوره  $t$  است. از این رو در نامعادلات (۱۰) و (۱۱) تفاضل مجموع سفارش‌های داده شده قطعه تا دوره  $t$  و مجموع سفارشات داده شده قطعه تا دوره  $t-1$ ، معادل میزان سفارش داده شده قطعه در دوره  $t$  است. به عبارتی دیگر در صورت دریافت قطعه در دوره  $t$ ، تفاضل مذکور مثبت بوده و در دوره  $t$  قطعه  $v$  با سفارش (دریافت) قطعه روبه‌رو بوده است و متغیر  $B_{vt}$  مقدار یک را کسب می‌کند. پس از حل نهایی مدل، میزان سفارش قطعه  $v$  در دوره زمانی  $t$  از رابطه زیر قابل محاسبه است.

Order quantity of item  $v$  at period  $t$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \phi_{ijv} D_{ijvt} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \phi_{ijv} D_{ijv(t-1)} \quad (17)$$

در صورتی که میزان سفارش دریافت‌شده قطعه در دوره  $t$  مثبت باشد، متغیر  $B_{vt}$  مقدار یک و در غیر این صورت، مقدار صفر را به دست خواهد آورد.

محدودیت‌های تعریف شده (۱۲) و (۱۳) مربوط به محدودیت‌های ظرفیت تولیدکننده در تولید قطعات هستند. محدودیت (۱۲) بیانگر محدودیت ظرفیت تولید قطعات در تولیدکننده است. لازم به ذکر است که نرخ تولید قطعه در تولیدکننده از نرخ مصرف قطعه توسط مونتاژگر بیشتر است. مطابق مفروضات مسئله، تولیدکننده در هر واحد زمانی یک نوع قطعه تولید می‌کند که این مطلب در محدودیت (۱۳) در نظر گرفته شده است. نامعادله (۱۴) تضمین می‌کند که زمان اتمام عملیات روی مجموعه  $J$  از محصول  $I$  از مجموع زمان عملیات و راه‌اندازی و زمان رسیدن قطعه مورد نیاز خود بزرگ‌تر باشد. همچنین محدودیت (۱۵) بیانگر این مطلب است که عملیات روی محصول پس از اتمام عملیات روی همه مجموعه‌های محصول پایان می‌یابد. نامعادله (۱۶) اشاره به تعهدات مونتاژگر دارد؛ به این معنی که باید عملیات همه محصولات برگشتی در طول دوره برنامه‌ریزی به پایان برسد.

تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی می‌تواند به عنوان یک محدودیت در مدل عمل کند. در این حالت تعیین تعداد دوره‌ها تأثیر قابل توجهی در ابعاد (تعداد متغیرهای) مسئله دارد. تعیین حداقل تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی برای اطمینان از یافتن یک جواب شدنی برای زمان‌بندی تعمیر محصولات برگشتی ضروری است. از منظری دیگر

در صنعت مورد بررسی، تعمیر بالگرد (به همراه تعمیر قطعات قابل تعمیر) و تولید قطعات یدکی در خطوط جداگانه‌ای به ترتیب در مونتاژگر و تولیدکننده انجام می‌گیرد. در مونتاژگر، دو کارگاه اصلی به عنوان ماشین‌های تعمیر گلوگاه محسوب می‌شوند. همچنین در میان قطعات مشترک و غیرمشترک، ۵ قطعه اصلی در دسته قطعات گران قیمت (با هزینه نگهداری بالا) در مسئله مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مشخصات و پارامترهای مسئله پایه در پیوست یک در جداول (۵) تا (۸) آمده است.

مسئله ارائه‌شده با استفاده از نرم‌افزار CPLEX و روی یک کامپیوتر خانگی با مشخصات یک گیگابایت RAM و پردازنده Intel(R) Core(TM)2 Duo حل شده است.

در صورت آزادسازی محدودیت‌های مربوط به تولیدکننده، شامل محدودیت ظرفیت تولید و محدودیت نبود همزمانی تولید قطعات، یک جواب ایده‌آل (حد پایین) برای مسئله حاصل می‌شود. به عبارتی دیگر، زمان‌بندی انجام عملیات بالگردهای برگشتی با لحاظ موجودی قطعات یدکی مورد نیاز بدون دغدغه نحوه تأمین آن به دست می‌آید و مونتاژگر بر اساس مقدار سفارش اقتصادی خود، قطعات را به تولیدکنندگان مختلف سفارش می‌دهد. جواب ایده‌آل مذکور، می‌تواند به عنوان مبنایی برای تعیین تعداد تولیدکنندگان در لجستیک معکوس صنعت هوایی (یا به عبارتی دقیق‌تر خرید چندمنبعی یا خرید از منبع با ظرفیت نامحدود) نیز مورد استفاده گیرد.

حد پایین به دست آمده برای مسئله پایه، معادل ۲۴۴۶۹,۸۲ واحد هزینه است. با در نظر گرفتن محدودیت و ظرفیت تولیدکننده، هزینه کل تا ۳۷۸۲۴,۹ واحد هزینه افزایش می‌یابد. هزینه‌های نگهداری و سفارش قطعات با افزایش ۳۷,۲٪ و هزینه نگهداری بالگردهای برگشتی با افزایش ۱۳,۵٪ روبه‌رو هستند. اما نکته قابل توجه این‌که افزایش هزینه نگهداری بالگردهای برگشتی، سهم بیش از ۹۷ درصدی در افزایش کل هزینه‌ها نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن محدودیت تولیدکننده را داراست. از این رو افزایش ظرفیت تولیدکننده و یا تأمین قطعه از چند منبع مختلف در کاهش هزینه‌های کل تأثیرگذار است.

زمان سفارش قطعه  $V$  از متغیرهای تصمیم  $R_{ijv}$  و  $B_{vt}$  قابل محاسبه است. به طور مشابه در صورتی که در مدل یکپارچه میزان و زمان سفارش‌دهی قطعات یدکی، که در این مقاله متغیر تصمیم‌گیری هستند، به عنوان پارامترهای ورودی مسئله ثابت در نظر گرفته شوند، مسئله به یک مسئله زمان‌بندی با محدودیت منابع کاهش می‌یابد. به این منظور اطلاعات سطح برنامه‌ریزی با پارامترهای  $B_{vt}$  و  $Q_{vt}$  (میزان سفارش قطعه  $V$  در دوره  $t$ ) به عنوان ورودی در مدل یکپارچه ارائه شده، در نظر گرفته می‌شوند.  $Q_{vt}$  معادل با رابطه (۱۷) است؛ از این رو محدودیت جدید (۲۲) برای مسئله زمان‌بندی تعمیر با محدودیت قطعه یدکی (به صورت پارامتر) در مدل باید وارد شود.

$$Q_{vt} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \varphi_{ijv} D_{ijvt} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \varphi_{ijv} D_{ijv(t-1)} \quad (22)$$

و از آنجا که میزان و اندازه سفارش قطعات ورودی این مسئله هستند، بنابراین محدودیت‌های تولید (۱۲) و (۱۳) محدودیت‌های اضافی خواهند بود. متغیر  $R_{ijv}$  در مدل از محدودیت‌های (۸) و (۹) مقداردهی می‌شود و در محدودیت (۱۴) به عنوان محدودیت در دسترس بودن قطعات در تعیین زمان‌بندی تعمیر قطعات و محاسبه  $X_{ij}$  لحاظ خواهد شد.

بنابراین مدل ارائه‌شده با ثابت کردن متغیرهای مربوطه به هر یک از دو زیرمسئله زمان‌بندی تعمیر و همچنین تعیین اندازه و زمان سفارش‌دهی قطعات قابل تبدیل است؛ بنابراین مدل ارائه‌شده تصمیمات زمان‌بندی و تعیین اندازه و زمان سفارش‌دهی قطعات را به صورت یکپارچه و جستجوی کامل در برمی‌گیرد و بهینگی را تضمین می‌کند.

## تحلیل نتایج و ارزیابی سناریوها

در این قسمت، ابتدا مسئله صنعت مورد مطالعه به عنوان مسئله پایه تشریح و حل می‌شود و سپس با تغییر پارامترهای مسئله پایه، آنالیز حساسیت روی پارامترهای مختلف مسئله انجام خواهد گرفت. همچنین برای طیف متنوعی از مسائل نمونه‌ای، سناریوهای مختلف تعمیر قطعه در محل مونتاژگر با سناریوی تعویض قطعه با قطعات جدید تولیدکننده با هم مقایسه شده‌اند.



**جدول ۱: میزان تأثیر محدودیت تولیدکننده و هزینه‌های قطعه**

هزینه نگهداری و سفارش قطعات		هزینه نگهداری بالگرد برگشتی	
بدون محدودیت ظرفیت تولیدکننده	با محدودیت ظرفیت تولیدکننده	بدون محدودیت ظرفیت تولیدکننده	با محدودیت ظرفیت تولیدکننده
۱۹۳,۸۲	۲۶۵,۹	۲۴۳۷۶	۳۷۵۵۹

جزئیات زمان‌بندی عملیات مجموعه‌های محصولات برگشتی و زمان و مقدار سفارش قطعات مختلف در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن محدودیت و ظرفیت تولیدکننده در جدول (۲) خلاصه شده است.

**جدول ۲: زمان‌بندی بهینه تعمیر مجموعه‌های محصولات برگشتی**

محصول i	مجموعه j	تولیدکننده		تولیدکننده	
		بدون محدودیت ظرفیت	با محدودیت ظرفیت	بدون محدودیت ظرفیت	با محدودیت ظرفیت
۱	۱	۵	۱۰	۵	۱۰
۱	۲	۵	۱۰	۵	۱۰
۲	۲	۱۳	۵	۱۲	۵
۳	۱	۱۷	۱۹	۱۶	۱۹
۳	۲	۱۶	۱۹	۱۶	۱۹
۴	۱	۲	۷	۲	۷
۴	۲	۲	۶	۱	۶
۵	۱	۲۸	۳۷	۲۸	۳۷
۵	۲	۲۸	۲۶	۳۷	۲۶
۶	۱	۲۱	۲۳	۲۱	۲۳
۶	۲	۲۰	۲۲	۲۰	۲۲
۷	۱	۸	۱۳	۸	۱۳
۷	۲	۸	۱۳	۸	۱۳
۸	۱	۲۴	۳۰	۲۴	۳۰
۸	۲	۲۳	۲۹	۳۰	۲۹
۹	۱	۳۲	۳۴	۳۲	۳۴
۹	۲	۳۰	۳۲	۳۰	۳۲
۱	۱	۱۰	۱۵	۱۰	۱۵
۱	۲	۱۰	۱۵	۱۰	۱۵

در ادامه با تغییر هر یک از پارامترهای مدل در مسئله پایه، میزان تأثیر آنها در هزینه کل بررسی شده است. اثر کاهش و افزایش ۲۰ درصدی هر یک از پارامترهای وزن محصولات برگشتی، نرخ هزینه نگهداری، نرخ تولید و نرخ هزینه سفارش‌دهی در دو حالت مسئله با در نظر گرفتن محدودیت‌های تولیدکننده و مسئله بدون در نظر گرفتن

محدودیت‌های تولیدکننده بررسی شده است و میزان کاهش یا افزایش در هزینه در دو ستون آخر جدول (۳) خلاصه شده است. کاهش وزن محصول، تأثیری بیشتر از حذف محدودیت‌های تولیدکننده در کاهش هزینه کل داشته است و به طور مشابه افزایش وزن محصول منجر به افزایش بیش از تأثیر محدودیت‌های تولیدکننده در هزینه کل شده است. نرخ تولید، مطابق انتظار، رابطه معکوسی با هزینه کل دارد، اما کاهش نرخ تولید نسبت به افزایش نرخ تولید تأثیر بیشتری بر هزینه کل داشته است. تغییرات نرخ سفارش‌دهی و نرخ نگهداری، چه افزایشی و چه کاهشی، تأثیری کمتر از ۰,۵ درصدی بر هزینه کل و هزینه ایده‌آل داشته است.

**جدول ۳: تحلیل حساسیت تک پارامتری پارامترهای مختلف**

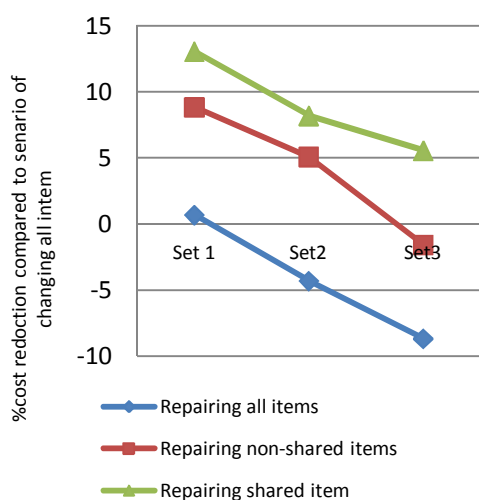
پارامتر	تغییرات	هزینه ایده‌آل	هزینه کل واقعی	درصد تغییر در هزینه کل واقعی	درصد تغییر در هزینه ایده‌آل
$W_i$	۲۰	۲۹۳۸۰	۳۳۴۴۲	۲۰,۲	۲۰,۰
$h_v$	۲۰	۲۴۵۱۹	۳۷۹۳۳	۰,۳۹	۰,۲
$Pr_v$	۲۰	۲۴۴۶۹	۳۷۷۱۲	۰,۴	۰,۱۲
$A_v$	۲۰	۲۴۴۶۹	۲۸۷۴۱	۳,۳	---
	۲۰	۲۴۵۰۳	۳۷۸۵۶	۰,۱۱	۰,۱۴
	۲۰	۲۴۴۵۷	۳۷۷۴۴	۰,۳	۰,۰۵

نتایج مسائل حل‌شده، بیانگر این مطلب است که انحراف معیار  $R_{ijv}$  برای قطعات مختلف در ۸۵٪ محصول در هر کارگاه صفر بوده و میانگین انحراف معیار کمتر از ۰,۰۸ و بیشترین انحراف معیار معادل ۰,۵۸ است. این مطلب بیانگر این نکته است که تا حد بسیار زیادی قطعات مورد نیاز یک محصول (در ماشین‌های تعمیر) در تولیدکننده اغلب پشت سر هم تولید می‌شوند. به عبارتی دیگر، می‌توان زمان ساخت قطعات مورد نیاز هر محصول را معادل یک عملیات روی ماشین ساخت (قبل از ماشین‌های، کارگاه‌های، مستقل مرحله اول) در نظر گرفت و مسئله را با تقریب خوبی معادل یک مسئله دو مرحله‌ای شامل مرحله ساخت قطعات و مرحله تعمیر مجموعه‌ها در ماشین‌های مستقل مرحله دوم در نظر گرفت و زمان‌بندی انجام کارها را در دو مرحله به طور تقریبی معادل مسئله زمان‌بندی به همراه تعیین اندازه انباشته سفارش قطعات دانست.

جدول ۴: نرخ هزینه نگهداری و سفارش‌دهی مسائل نمونه‌ای

قطعه		
۱) (فقط مورد نیاز مجموعه یک)	۱,۸۴	۳
۲) (فقط مورد نیاز مجموعه دو)	۰,۷	۶
۳) (قطعه مشترک مجموعه‌های یک و دو)	۰,۸	۲

در مسائل نمونه‌ای حل شده، هیچ یک از سناریوها همیشه سناریوی غالب نشده‌اند، هر چند به طور میانگین در هر سه دسته مسائل یک، دو و سه سناریوی تعمیر قطعه مشترک در ماشین‌های مستقل یک و دو و تعویض قطعات غیر مشترک برای مجموعه‌های یک و دو در محصولات برگشتی به طور متوسط بیشترین کاهش را در هزینه‌ها داشته است. لازم به ذکر است که این سناریو برای قطعات دسته سوم، تفاوت چندانی با سناریوی تعویض همه قطعات به جای تعمیر ندارد. در شکل (۳) میانگین کاهش هزینه برای سناریوهای مختلف نسبت به سناریوی تعویض قطعات نشان داده شده است.



شکل ۳: درصد کاهش هزینه سناریوهای مختلف نسبت به سناریوی تعویض قطعات

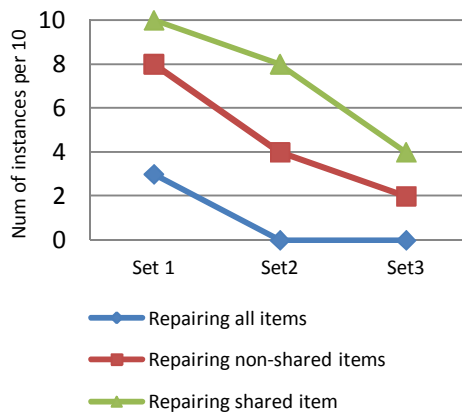
در مسائل نمونه‌ای حل شده برای دسته مسائل دو و سه، که مدت زمان مورد نیاز تعمیر قطعات بیشتر بوده است، سناریوی انجام تعمیر همه قطعات در خط تعمیر مجموعه‌ها همواره سناریوی مغلوب بوده است و هزینه بیشتری نسبت به سه سناریوی دیگر داشته است.

همان‌طور که در تحلیل نتایج و بررسی میزان تأثیر اعمال و یا آزادسازی محدودیت‌های تولیدکننده ذکر شد، ظرفیت و محدودیت‌های تولیدکننده در مقدار تابع هدف تأثیرگذار است که دو رویکرد اصلی شامل رویکرد برون‌سپاری و رویکرد تعمیر قطعات یدکی در محل مونتاژ (توسط مونتاژگر) برای بهبود تابع هدف، می‌تواند توسط تصمیم‌گیرنده اتخاذ شود. با توجه به محدودیت‌ها و ویژگی‌های صنعت هوایی از جمله تحریم، تصمیم‌گیرنده در کوتاه‌مدت می‌تواند روی بررسی و اتخاذ استراتژی مناسب برای تعمیر و یا تعویض قطعات یدکی در محل مونتاژگر تمرکز کند. در صورتی که مونتاژگر تصمیم به تعمیر قطعه به جای تعویض آن بگیرد، به طور متوسط معادل نیمی از زمان تولید قطعه در تولیدکننده برای تعمیر قطعه نیاز دارد که این زمان به زمان عملیات تعمیر مجموعه اضافه می‌شود. در این بخش، سناریوی تعویض قطعه با قطعه جدید با سناریوهای سه‌گانه تعمیر قطعه، شامل تعمیر همه قطعات، تعمیر قطعه مشترک بین مجموعه‌های مختلف و تعمیر قطعات غیرمشترک برای سه دسته مسائل مختلف، بر اساس دوره‌های مختلف چرخه حیات قطعات مورد نیاز تعمیر، مقایسه شده است. در صورت تعمیر قطعات به جای تعویض، زمان تعمیر در سه دسته مسائل A، B و C به ترتیب از تابع یکنواخت گسسته  $U[1,10]$ ،  $U[5,15]$  و  $U[10,20]$  پیروی می‌کند. لازم به ذکر است که محصولات برگشتی برای تعمیرات اساسی با توجه به دوره عمر خود و افزایش تدریجی مدت زمان مورد نیاز برای تعمیر قطعات آنها، به تدریج از دسته A به دسته C وارد می‌شوند. برای هر دسته مسائل ذکر شده ۴۰ مسئله نمونه و در مجموع ۱۲۰ مسئله، با مشخصات تابع زمان عملیات مجموعه با تابع یکنواخت گسسته  $U[0,100]$  و وزن هر محصول برگشتی با تابع یکنواخت گسسته  $U[1,10]$  حل شده است. مجموعه‌های محصولات برگشتی در هر یک از دو ماشین مستقل تعمیر، ممکن است به یک نوع قطعه غیر مشترک و یک نوع قطعه مشترک بین دو ماشین نیاز داشته باشند. تعداد قطعات یدکی مورد نیاز هر محصول برگشتی از یک تابع یکنواخت گسسته  $U[0,3]$  پیروی می‌کند. نرخ هزینه نگهداری و سفارش‌دهی قطعات به صورت جدول (۴) است.

یعنی زمان‌بندی تعمیر محصولات برگشتی و همچنین سفارش قطعات یدکی و از سوی دیگر در لجستیک معکوس شامل تولیدکننده قطعه و مونتاژگر، با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت تولیدکننده قطعات، انجام گرفته است.

مسئله معرفی شده در این مقاله، یک مسئله کاربردی از صنعت هوایی است که با به کارگیری ابتکاراتی در مدل‌سازی یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به صورت خطی برای حل آن ارائه و حساسیت خروجی‌های مدل نسبت به پارامترهای اصلی مسئله بررسی شد. میزان تأثیر محدودیت‌های تولیدکننده با اعمال و آزادسازی محدودیت‌های ظرفیت تولیدکننده مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج و تأثیرگذار بودن محدودیت‌های تولیدکننده، در این راستا استراتژی‌های مختلف تعمیر قطعات یدکی در محل (در مونتاژگر) در قیاس با استراتژی تعویض قطعه با قطعات یدکی دریافت شده از تولیدکننده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. به این منظور، مسائل نمونه‌ای گسترده‌ای برای مقایسه استراتژی‌های تعویض قطعه و یا تعمیر آنها توسط مونتاژگر توسعه داده شد. نتایج بیانگر این مطلب است که سناریوی تعمیر قطعه مشترک به طور میانگین، عملکرد بهتری نسبت به سایر استراتژی‌ها دارد، اما این سناریو همواره سناریوی غالب نیست و برای دسته سوم مسائل که مدت زمان تعمیر قطعات بیشتر است، این سناریو با سناریوی تعویض قطعه تفاوت چندانی ندارد. همچنین سناریوی تعمیر همه قطعات به همراه تعمیر مجموعه‌ها یک سناریوی نامناسب و مغلوب است.

همچنین این سناریو در همه مسائل نمونه‌ای از دو سناریوی تعمیر قطعه مشترک و تعمیر قطعات غیر مشترک همواره جواب بدتری ارائه کرده است. در شکل (۴) تعداد مسائلی نمونه‌ای (از ۱۰) که هر سناریو هزینه کمتری نسبت به سناریوی تعویض همه قطعات داشته‌اند نشان داده شده است.



شکل ۴: تعداد مسائل نمونه‌ای با هزینه کمتر در سناریوهای مختلف در مقایسه با سناریوی تعویض قطعات

### بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل یکپارچه برای تصمیم‌گیری همزمان زمان‌بندی تعمیر و همچنین تعیین اندازه و زمان‌بندی سفارش انباشته قطعات مورد نیاز مجموعه‌های محصولات برگشتی در مسئله جدید زمان‌بندی دیمونتاژ-مونتاژ سه مرحله‌ای در لجستیک معکوس ارائه شد. این یکپارچه‌سازی از یک سو در سطوح تصمیم‌گیری مونتاژگر

پیوست ۱: مشخصات مسئله پایه

جدول ۵: وزن محصولات مختلف (بالگردهای برگشتی)

۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۱	۱	i
۱۳۰	۱۰۰	۱۲۷	۱۹۵	۱۶۹	۱۶۹	۱۴۲	۱۸۵	۱۹۵	۱۹۵	

جدول ۶: تعداد قطعات مورد نیاز مجموعه‌های محصولات مختلف

مصرف قطعه	مصرف قطعه ۵	مصرف قطعه ۶	مصرف قطعه ۲	مصرف قطعه ۲	مصرف قطعه ۱	مجموعه شماره j	محصول شماره i
۲	۲	۰	۰	۲	۱	۱	۱
۲	۲	۰	۱	۲	۲	۱	۱
۰	۱	۱	۰	۲	۱	۲	۲
۲	۱	۱	۰	۰	۲	۲	۲
۲	۱	۲	۱	۰	۱	۳	۳
۰	۲	۰	۰	۲	۲	۳	۳
۲	۲	۱	۲	۱	۱	۴	۴
۲	۱	۲	۰	۲	۲	۴	۴
۱	۲	۱	۰	۰	۱	۵	۵
۱	۰	۲	۱	۱	۲	۵	۵
۱	۲	۱	۲	۰	۱	۶	۶
۲	۲	۱	۰	۱	۲	۶	۶
۰	۲	۱	۲	۲	۱	۷	۷
۱	۲	۲	۱	۲	۲	۷	۷
۲	۰	۲	۰	۲	۱	۸	۸
۲	۱	۲	۲	۲	۲	۸	۸
۰	۲	۱	۱	۱	۱	۹	۹
۲	۲	۰	۰	۲	۲	۹	۹
۲	۱	۱	۲	۰	۱	۱۰	۱۰
۳	۰	۰	۲	۳	۲	۱۰	۱۰

جدول ۷: زمان‌های عملیات و راه‌اندازی مجموعه‌ها در کارگاه‌های مختلف

		مجموعه j	محصول i
۱	۲	۱	۱
۱	۳	۲	۱
۰	۳	۱	۲
۰	۲	۲	۲
۱	۳	۱	۳
۱	۳	۲	۳
۱	۱	۱	۴
۰	۱	۲	۴
۱	۳	۱	۵
۱	۳	۲	۵
۱	۳	۱	۶
۱	۲	۲	۶
۱	۲	۱	۷
۰	۳	۲	۷
۱	۲	۱	۸
۱	۲	۲	۸
۱	۳	۱	۹
۰	۳	۲	۹
۰	۲	۱	۱۰
۱	۱	۲	۱۰

جدول ۸: نرخ تولید، نگهداری و سفارش‌دهی قطعات

$A_v$	$h_v$	$Pr_v$	قطعه شماره $v$
۳	۱,۷۶	۸	۱
۶	۰,۷	۴	۲
۳	۰,۸	۶	۳
۷	۱,۶	۱۰	۴
۴	۱,۰۸	۶	۵

## مراجع

- 1 - Teunter, A., Kaparis, K. and Tang, O. (2008). "Multi-product economic lot scheduling problem with separate production lines for manufacturing and remanufacturing." *European Journal of Operational Research.*, Vol. 191, PP. 1241–1253.
- 2 - Pishvae, M.S. and Razmi, J. (2012). "Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming" *Applied Mathematical Modeling.*, Vol. 36, PP. 3433–3446.
- 3 - Guide, V.D.R. (2000). "Production planning and control for remanufacturing: Industry practice and research needs." *Journal of operations Management.*, Vol. 18, PP. 467–483.
- 4 - Pishvae, M.S, Torabi, S.A. and Razmi, J. (2012). "Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty" *Computers & Industrial Engineering.*, Vol. 62, PP.624–632.
- 5- Vahdani, B., Razmi, J. and Tavakkoli-Moghaddam, J. (2012). "Fuzzy Possibilistic Modeling for Closed Loop Recycling Collection Networks" *Environ Model Assess.*, DOI 10.1007/s10666-012-9313-7.
- 6- Özkır, V. and Baslıgil, H. (2013). "Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment" *Journal of Cleaner Production.*, Vol. 41, PP. 114-125.
- 7- Qiang, Q., Ke, K., Anderson, T. and Dong, J. (2013). "The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties" *Omega.*, Vol. 41, PP. 186-194.
- 8- Georgiadis, P. and Athanasiou, E. (2013). "Flexible long-term capacity planning in closed-loop supply chains with remanufacturing" *European Journal of Operational Research.*, Vol. 225, PP. 44–58.
- 9- Teunter, A., Tang, O., and Kaparis, K. (2008). "Heuristics for the economic lot scheduling problem with returns." *Int. J. Production Economics.*, Vol. 118, PP. 323–330.
- 10- Mitra, S. (2009). "Analysis of a two-echelon inventory system with returns." *Omega The international journal of management science.*, Vol. 37, PP. 106 – 115.
- 11- Terekhov, D., Dogru, M.K., Ozen, U. and Beck, J.C. (2012). "Solving two-machine assembly scheduling problems with inventory constraints." *Computers & Industrial Engineering.*, Vol. 63, PP. 120–134.
- 12- Hariri, A.M.A. and Potts, C. N. (1997). "A branch and bound algorithm for the two-stage assembly scheduling problem." *European Journal of Operational Research.*, Vol. 103, PP. 547-556.
- 13- Potts, C.N., Sevast'janov, S.V., Strusevich, V.A., Van Wassenhove, L.N., and Zwaneveld, C.M. (1995), "The two-stage assembly scheduling problem: complexity and approximation." *Operations Research.*, Vol. 43, PP. 346-355.
- 14- Lee, C.Y., Cheng, T.C.E., and Lin, B.M.T. (1993), "Minimizing the makespan in the 3-machine assembly-type

- flowshop scheduling problem.” *Management Science.*, Vol. 39, PP. 616-625.
- 15- Allahverdi, A. and Al-Anzi, F.S. (2006). “A PSO and a Tabu search heuristics for the assembly scheduling problem of the two-stage distributed database application.” *Computers & Operations Research.*, Vol. 33, PP. 1056–1080.
- 16- Al-Anzi, F.S. and - Allahverdi, A. (2007). “A self-adaptive differential evolution heuristic for two-stage assembly scheduling problem to minimize maximum lateness with setup times.” *European Journal of Operational Research.*, Vol. 182, PP. 80–94.
- 17- Torabzadeh, E. and Zandieh, M. (2010). “Cloud theory-based simulated annealing approach for scheduling in the two-stage assembly flowshop.” *Advances in Engineering Software.*, Vol. 41, PP. 1238–1243.
- 18- Tozkapan, A., Kirca, o. and Chung, C.S. (2003). “A branch and bound algorithm to minimize the total weighted  
Flowtime for the two-stage assembly scheduling problem.” *Computers & Operations Research.*, Vol. 30, PP. 309–320.
- 19- Al-Anzi, F.S. and Allahverdi, A. (2009). “Heuristics for a two-stage assembly flowshop with bicriteria of maximum lateness and makespan.” *Computers & Operations Research.*, Vol. 36, PP. 2682 – 2689.
- 20- Allahverdi, A. and Al-Anzi, F.S. (2006). “Evolutionary heuristics and an algorithm for the two- stage assembly scheduling problem to minimize makespan with setup times.” *International Journal of Production Research.*, Vol. 44, PP. 4713–35.
- 21- Allahverdi, A. and Al-Anzi, F.S. (2009). “The two-stage assembly scheduling problem to minimize total completion time with setup times.” *Computers & Operations Research.*, Vol. 36, PP. 3740 – 3747.
- 22- Koulamas, C. and Kyparisis, G. (2001). “The three-stage assembly flowshop scheduling problem.” *Computers & Operations Research.*, Vol. 28, PP. 689-704.
- 23- Koulamas, C. and Kyparisis, G.J. (2007). “A note on the two-stage assembly flow shop scheduling problem with uniform parallel machines” *European Journal of Operational Research.*, Vol. 182, PP. 945–951.
- 24- Sung, S.C. and Juhn, J. (2009). “Makespan minimization for a 2-stage assembly scheduling problem subject to component available time constraint.” *Int. J. Production Economics.*, Vol. 119, PP. 392–401.
- 25- Neumann, K. and Schwindt, C. (2002). “Project scheduling with inventory constraints” *Mathematical Methods of Operations Research.*, Vol. 56, PP. 513–533.
- 26- Grigoriev, A., Holthuisen, M., and Klundert, J.v.d. (2005). “Basic scheduling problems with raw material constraints” *Naval Research Logistics.*, Vol. 52, PP. 537–535.
- 27- Briskorn, D., Choi, B.C., Lee, K., Leung, J., Pinedo, M. (2010). “Complexity of single machine scheduling subject to nonnegative inventory constraints” *European Journal of Operational Research.*, Vol. 207, PP. 605–619.
- 28- Maravelias, C.T. and Sung, C. (2009). “Integration of production planning and scheduling: Overview, challenges and opportunities.” *Computers and Chemical Engineering.*, Vol. 33, PP. 1919–1930.
-