



دانشگاه آزاد اسلامی واحد

واحد تهران غرب

West Tehran Branch, Islamic Azad University

عنوان

**بهینه سازی استوار مسئله تولید کارگاهی منعطف با در نظر گرفتن عملیات
نگهداری و تعمیرات و نرخ خرابی احتمالی**

نگارش

وحید صوفیانی

استاد راهنما

آقای دکتر آرش معتقدی لاریجانی



IslamicAzad University
West Tehran Branch, Islamic Azad University

Subject

**Robust Optimization for flexible job shop scheduling
with considering maintenance operations and
probabilistic breakdown**

By
Vahid Soofiani

Supervisor
Arash Motaghedi-Larijani

بسم الله الرحمن الرحيم

فهرست

فصل اول:	۱
۱-۱ مقدمه و طرح فصل	۲
۲-۱ بیان مسئله	۳
۳-۱ هدف اصلی مسائل زمان‌بندی	۵
۴-۱ اهمیت و ضرورت پژوهش	۵
۵-۱ اهداف تحقیق	۷
۶-۱ سوالات تحقیق	۸
۷-۱ نوآوری‌های این پژوهش	۸
۸-۱ روش تحقیق	۹
۹-۱ تعاریف واژه‌ها و اصلاحات پایه تحقیق	۹
۱۰-۱ نحوه سازماندهی این پژوهش	۱۰
فصل دوم:	۱۱
۱-۲ طرح کلی فصل	۱۲
۲-۲ برنامه‌ریزی تولید	۱۲
۳-۲ زمان‌بندی	۱۳
۱-۳-۲ تاریخچه زمان‌بندی و توالی عملیات	۱۳
۲-۳-۲ زمان‌بندی در مسائل تولید	۱۴
۴-۲ انواع مسائل زمان‌بندی و اهمیت آن	۱۵
۵-۲ مدل‌های زمان‌بندی	۱۷
۱-۵-۲ زمان‌بندی تک ماشین	۱۷
۲-۵-۲ زمان‌بندی ماشین‌های موازی	۱۷
۳-۵-۲ زمان‌بندی زمان‌بندی کار کارگاهی	۱۷
۴-۵-۲ زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف	۱۸
۵-۵-۲ زمان‌بندی جریان کارگاهی	۱۸

۱۹	۶-۵-۲ زمان‌بندی جریان کارگاهی منعطف
۱۹	۷-۵-۲ زمان‌بندی کار کارگاهی عمومی
۱۹	۶-۲ خرابی ماشین
۲۰	۷-۲ سیستم‌های نگهداری و تعمیرات (نت)
۲۱	۸-۲ مرور منابع مرتبط با مسئله زمان‌بندی
۲۱	۱-۸-۲ مرور منابع مسائل زمان‌بندی در حالت کلی
۲۸	۲-۸-۲ مرور منابع مسائل زمان‌بندی کارگاهی منابع دوگانه
۳۳	۹-۲ مرور منابع مرتبط با مسئله نگهداری و تعمیرات
۳۳	۱-۹-۲ مرور منابع نت پیشگیرانه
۳۵	۲-۹-۲ مرور منابع نت پیشگیرانه در سیستم تولید کارگاهی
۳۷	۱۰-۲ شکاف تحقیقاتی و انگیزه‌های تحقیق جاری
۴۰	فصل سوم:
۴۱	۱-۳ مقدمه
۴۱	۲-۳ بیان مسئله
۴۲	۳-۳ مدل FJSP پایه
۴۴	۴-۳ توسعه مدل FJSP با سناریوهای خرابی ماشین و نت پیشگیرانه (FJSP-PMB)
۴۵	۱-۴-۳ رویکرد بهینه‌سازی سناریو محور استوار Mulvey
۴۷	۲-۴-۳ مدل RSP پیشنهادی برای مسئله FJSP-MB
۵۰	۵-۳ روش حل اپسیلون محدودیت تکمیل شده (AEC)
۵۳	۶-۳ جمع‌بندی فصل
۵۴	فصل چهارم:
۵۵	۱-۴ طرح کلی فصل
۵۵	۲-۴ مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB موردنظر تحقیق
۵۸	۳-۴ زمان‌بندی اسمی و استوار
۶۳	۴-۴ تحلیل ضریب استواری مدل بهینه‌سازی استوار پیشنهادی
۶۷	۵-۴ تحلیل ارزش استواری و در نظر گرفتن خرابی ماشین‌ها

فصل پنجم:	۷۳
۱-۵ جمع بندی و نتیجه گیری	۷۴
۲-۵ فرصت تحقیقات آتی	۷۶
مراجع	۷۷

فهرست جداول

جدول ۱-۲. مقایسه پژوهش حاضر با برخی از مقالات مرتبط	۳۸
جدول ۱-۴. کارها و عملیات مرتبط با هر کار در مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB موردنظر تحقیق	۵۶
جدول ۲-۴. مدت زمان پردازش عملیات توسط ماشین اول در مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB موردنظر تحقیق ...	۵۶
جدول ۳-۴. مدت زمان پردازش عملیات توسط ماشین دوم در مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB موردنظر تحقیق ...	۵۶
جدول ۴-۴. مدت زمان پردازش عملیات توسط ماشین سوم در مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB موردنظر تحقیق ..	۵۷
جدول ۵-۴. مدت زمان پردازش عملیات توسط ماشین چهارم در مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB موردنظر تحقیق	۵۷
جدول ۶-۴. مدت زمان پردازش عملیات توسط ماشین پنجم در مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB موردنظر تحقیق .	۵۷
جدول ۷-۴. مدت زمان پردازش عملیات توسط ماشین ششم	۵۸
جدول ۸-۴. اطلاعات مرتبط با سناریوهای خرابی و زمان تعمیر ماشین آلات	۵۸
جدول ۹-۴. اندازه/ابعاد مثال عددی	۵۹
جدول ۱۰-۴. نحوه واگذاری عملیات به ماشین‌ها در حالت غیر استوار (رویکرد مقدار اسمی/متوسط)	۵۹
جدول ۱۱-۴. توالی انجام عملیات و اگذارشده به هر ماشین (رویکرد مقدار اسمی/متوسط)	۵۹
جدول ۱۲-۴. پاسخ‌های پارتو روش AEC برای موازنه اهداف زمان تکمیل و هزینه نت در مسئله FJSP-PMB	۶۱
جدول ۱۳-۴. نحوه واگذاری عملیات به ماشین‌ها در حالت استوار (پاسخ استوار رویکرد RSP پیشنهادی)	۶۲
جدول ۱۴-۴. توالی انجام عملیات و اگذارشده به هر ماشین (پاسخ استوار رویکرد RSP پیشنهادی)	۶۳
جدول ۱۵-۴. تحلیل حساسیت ضریب ω در RFS در مدل RSP پیشنهادی	۶۴
جدول ۱۶-۴. تحلیل ضریب استواری بهینگی (γ) در مدل RSP پیشنهادی	۶۶
جدول ۱۷-۴. مقدار تابع هدف رویکرد RSP، مقدار متوسط (EV) در مقایسه با مقدار بهینه هر سناریو	۷۰
جدول ۱۸-۴. معیارهای VSS، RVSS و EVPI برای نشان دادن ارزش مدل RSP پیشنهادی	۷۰
جدول ۱۹-۴. مقدار تابع هدف رویکرد RSP و مقدار متوسط/اسمی (EV) در مقایسه با مقدار بهینه هر سناریو	۷۲

فهرست اشکال

- شکل ۴-۱. چارت زمان‌بندی عملیات واگذارشده به هر ماشین (رویکرد مقدار اسمی/متوسط)..... ۶۰
- شکل ۴-۲. نمودار جبهه پارتو با روش AEC برای موازنه اهداف زمان تکمیل و هزینه نت در مسئله FJSP-PMB. ۶۱
- شکل ۴-۳. مقایسه جواب‌های پارتو روش AEC برای انتخاب بهترین جواب ۶۲
- شکل ۴-۴. چارت زمان‌بندی عملیات واگذارشده به هر ماشین (پاسخ استوار رویکرد RSP پیشنهادی) ۶۳
- شکل ۴-۵. تحلیل ضریب استواری شدنی بودن در مدل RSP پیشنهادی ۶۵
- شکل ۴-۶. تغییرات در متوسط و بیشینه هزینه مدل RSP پیشنهادی نسبت به تغییر ضریب استواری (γ) ۶۶
- شکل ۴-۷. تنظیم بهینه بازه تغییرات ضریب استواری بهینگی (γ) در مدل RSP پیشنهادی ۶۷
- شکل ۴-۸. مقایسه مقادیر هزینه با رویکردهای RSP و مقدار متوسط در مقابل مقدار بهینه هر سناریو ۷۱
- شکل ۴-۹. مقایسه انحراف بهینگی حاصل از زمان‌بندی استوار رویکرد RSP و زمان‌بندی رویکرد اسمی ۷۲

چکیده

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی منابع، تعیین توالی کارها و واگذاری سفارشات به منابع موجود (به طور خاص ماشین‌ها) از مهمترین مسائل در سیستم‌های تولیدی مانند سیستم تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر است. از طرف دیگر، برای مقابله با خرابی غیرمنتظره ماشین‌ها و ریسک عملیاتی پردازش عملیات مرتبط با کارها/سفارشات، باید زمان‌بندی کارها دارای استواری و تحت سناریوهای اختلال/خرابی ماشین‌ها باشد تا در صورت وقوع اختلال و بیشتر شدن زمان پردازش نسبت به مقدار متوسط آن، کارایی قابل قبولی داشته باشد و از راه‌کار/زمان‌بندی بهینه انحراف کمتری داشته باشد. در توسعه مدل‌های زمان‌بندی سیستم‌های تولیدی منعطف یا FJSP، در این تحقیق به مسئله FJSP تحت محدودیت و خرابی احتمالی ماشین پرداخته می‌شود و مسئله FJSP-PMB با پنجره زمانی نرم تحویل سفارشات مطرح می‌شود. در مسئله موردنظر این تحقیق، اولاً خرابی ماشین‌ها در نظر گرفته می‌شود و ثانیاً در کنار تابع هدف اصلی کمینه‌سازی زمان تکمیل کارها، تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌های نت مورد توجه قرار می‌گیرد تا مدل و رویکرد حل پیشنهادی این تحقیق برای حل مسائل واقعی کاربرد بیشتری داشته باشد. در این مسئله، باید نحوه واگذاری کارها به ماشین‌ها و توالی عملیات واگذارشده به هر ماشین بر روی آن به گونه‌ای صورت پذیرد که تحت هر سناریو محتمل خرابی ماشین‌ها، کمترین زمان تکمیل کارها رخ دهد و متوسط عملکرد سیستم تولیدی بهینه باشد و تحت سناریو بدبینانه خرابی ماشین‌ها، بیشترین زمان تکمیل کارها و واریانس/نوسانات نیز کمینه باشید تا استواری پاسخ برقرار باشد. برای این منظور، با در نظر گرفتن خرابی ماشین‌ها به صورت سناریوهای تصادفی، از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریومحور استوار (RSP) برای مدل‌سازی این مسئله استفاده شده است. همچنین، از آنجا که در کنار هزینه کمینه‌سازی زمان، تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌های نت و تاخیر در پنجره زمانی موعد سفارشات نیز آورده شده است، از روش محدودیت افسیلون تکمیل‌شده (AEC) برای موازنه بین تابع هدف استفاده شده است و سپس بهترین جواب کارا و استوار انتخاب شده و یک زمان‌بندی استوار از آن استخراج شده است. از آنجا که مدل RSP پیشنهادی به همراه روش AEC به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته (MILP) بیان می‌شود از CPLEX Solver در GAMS برای حل آن استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل و روش حل پیشنهادی، یک مطالعه عددی طراحی شده است و تحلیل نتایج عددی نشان می‌دهد که RSP پیشنهادی کارایی مناسبی برای حل مسئله FJSP-PMB در شرایط خرابی ماشین‌ها دارد و پاسخ آن نسبت به رویکرد اسمی (که خرابی را در نظر نمی‌گیرد)، استواری بسیار بالایی دارد.

واژه‌های کلیدی

زمان‌بندی سیستم تولیدی منعطف (FJSP)، خرابی ماشین، برنامه‌ریزی سناریومحور استوار (RSP)، بهینه‌سازی دوهدفه، روش محدودیت افسیلون تکمیل‌شده (AEC)، پنجره زمانی نرم

فصل اول:

کلیات پژوهش

۱-۱ مقدمه و طرح فصل

در محیط‌های کسب و کار امروزی، پاسخگویی سریع به تغییرات در زمینه‌های تجاری، خدماتی، تولیدی و ایجاد محصولات با کیفیت بالاتر و هزینه‌های کمتر یکی از عوامل و مزیت‌های رقابتی در بین شرکت‌های تولیدی می‌باشد، بنابراین توالی کارها بر روی گروهی از ماشین‌ها با هدف تمرکز بر حداقل کردن هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری مورد توجه قرار می‌گیرد. مسئله توالی کارها و زمانبندی از آن جهت مورد اهمیت می‌باشد که یکی از معیارهای مهم عملکرد برای واحدهای تولیدی، تحویل به موقع محصول است به‌طوریکه کارها نباید زودتر و دیرتر تکمیل شوند زیرا باعث بوجود آمدن هزینه‌های زودکرد و دیرکرد و می‌شوند.

عدم اختلال و فعالیت بهینه در هر کارخانه در یک سیستم تولیدی/خدماتی مستلزم عدم خرابی در تجهیزات آن است. در نظر گرفتن تصمیمات نگهداری و تعمیرات (نت) در کنار زمانبندی تولید (در هر سیستم تولید از جمله سیستم تولید کار کارگاهی منعطف) به دو دلیل حائز اهمیت است؛ اول آنکه طول عمر تجهیزات افزایش یافته و از خرابی تجهیزات و صرف هزینه مجدد برای خرید آنها پیش‌گیری می‌کند، و دوم قابلیت احتمال اختلال در کل سیستم کاهش و قابلیت اطمینان آن افزایش می‌یابد.

در زمانبندی تولید به تعیین اولویت و تخصیص سفارشات مشتریان به منابع محدود در دسترس (اعم از نیروی کار، ماشین آلات، ابزار و تجهیزات و ...) به منظور انجام مجموعه‌ای از عملیات و سفارشات محوله می‌پردازد. برنامه‌ریزی‌های مرتبط با نت و زمانبندی تولید اغلب به صورت جداگانه انجام می‌پذیرد که در اینصورت می‌تواند به ارائه یک برنامه ناموجه برای واحد تولیدی شود. لذا برنامه‌ریزی به صورت یکپارچه از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود. از سوی دیگر عدم قطعیت در پارامترهای درگیر در برنامه‌ریزی امری اجتناب‌ناپذیر، در مسائلی مربوط به دنیای واقع است، که از آن جمله می‌توان به عدم قطعیت در عوامل بیرونی نظیر میزان تقاضا و یا عوامل داخلی نظیر نرخ خرابی و دسترس‌پذیری ماشین آلات و منابع تجدیدپذیر، مدت زمان پردازش کارها و ... دسترس اشاره کرد. به منظور مدیریت هر چه بهتر عدم قطعیت در حوزه‌های مذکور استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی مبتنی بر عدم قطعیت، به طور حتم موثر واقع خواهد شد. همچنین به منظور دستیابی به برنامه‌ای جامع و موثر در مدیریت هر چه بهتر منابع در دست، زمانبندی یکپارچه برای تصمیمات تولید و نت امری ضروری است.

بنابراین با توجه به کاربرد عمومی و گسترده این مسئله در سازمان‌های گوناگون و همچنین اهمیت سلامت/عدم خرابی منابع یا ماشین آلات موجود در سیستم تولی، در این تحقیق به مطالعه مسئله زمانبندی کار کارگاهی منعطف با در نظر گرفتن خرابی احتمالی/سناریو محور ماشین آلات پرداخته می‌شود و هدف آن کمینه کردن زمان تکمیل آخرین کار تحت شرایط عدم قطعیت و همچنین کمینه‌سازی هزینه نگهداری و

تعمیرات پیشگیرانه است به طوری که این پاسخ حاصل از مدل پیشنهادی دارای خاصیت استواری تحت عدم قطعیت باشد.

در ادامه این فصل، ابتدا به تشریح کلیات مسئله مورد نظر این تحقیق پرداخته می‌شود و سپس اهمیت پرداختن به آن توضیح داده می‌شود. سپس اهداف تحقیق بیان می‌شود و متناظر با اهداف تحقیق، سوالات مربوطه مطرح می‌شوند. همچنین روش تحقیق و نوآوری‌های پیش‌بینی شده حاصل از این تحقیق بیان می‌شوند. در پایان فصل نیز نحوه سازماندهی سایر فصول این پایان‌نامه آورده می‌شود.

۲-۱ بیان مسئله

در این تحقیق، در توسعه مسائل زمان‌بندی کارگاهی (JSP^1) به مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف ($FJSP^2$) تحت عدم قطعیت مرتبط با خرابی ماشین پرداخته می‌شود. در واقع، در توسعه مدل‌های $FJSP$ ، ما به بهینه‌سازی استوار در مسئله $FJSP$ تحت خرابی ماشین با نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (به اختصار مسئله $FJSP-PMB^3$) می‌پردازیم که در آن خرابی ماشین‌ها در نظر گرفته می‌شود و زمان‌بندی (تخصیص ماشین‌ها به کارها) باید به صورت انجام شود که تحت سناریوهای مختلف خرابی ماشین‌ها، اولاً متوسط عملکرد (زمان اتمام) بهینه باشد و ثانياً واریانس خروجی تحت سناریوهای مختلف کمینه باشد در حالی که کمینه هزینه نگهداری و تعمیرات (نت) پیشگیرانه حاصل شود.

با توجه به خاصیت انعطاف‌پذیری این مسئله $FJSP-PMB$ ، برای انجام هر عملیات از هر کار می‌تواند بیش از یک ماشین در کارگاه موجود باشد؛ اما نکته مهم این است که هر منبع/ماشین لزوماً قابلیت انجام پردازش روی هر عملیات را ندارد. به عبارت دیگر، بر هر عملیات مرتبط با هر کار، تنها تعداد محدودی از ماشین‌ها می‌تواند پردازش را انجام دهد.

در این تحقیق به زمان‌بندی یکپارچه تولید و نت در یک سیستم تولید کارگاهی منعطف پرداخته می‌شود که در آن سفارشات از پیش مشخص است و انجام هر سفارش مستلزم پردازش چندین عملیات روی یک یا چند ماشین است. در یک سیستم تولیدی کارگاهی انعطاف‌پذیر، مجموعه‌ای از مراکز کاری وجود دارد که هر یک دارای تعدادی ماشین همسان و موازی است. فرآیند انجام هر کار مسیر مشخصی را داشته و مستلزم اجرای آن است تا به خروجی مورد نظر مبدل شود. به منظور دستیابی به بهره‌وری و سودآوری بالا در سیستم تولیدی، محصولات می‌بایست در موعدهای تعیین شده و به تعداد مورد نیاز تهیه و به مشتری ارائه شوند. مدت زمان پردازش هر کار روی هر ماشین معین/قطعی در نظر گرفته می‌شود ولی باید سناریوهای خرابی ماشین‌آلات نیز مورد توجه قرار گیرد.

¹ Jobshop Scheduling Problem

² Flexible Jobshop Scheduling Problem

³ Flexible Job-shop Scheduling Problem with Preventive Maintenance under Machine-Breakdown (FJSP-PMB)

از آنجا که امروزه موفقیت بسیار از سازمان‌های تولیدی مستلزم برنامه یکپارچه در زمانبندی سفارشات (اعم از تصمیمات تخصیص کارها به ماشین‌ها و تعیین توالی آنها) و زمانبندی نت ماشین‌ها است، در این تحقیق به حل مسئله یکپارچه زمانبندی و نت در یک سیستم تولید کارگاهی منعطف پرداخته شده است و مسئله FJSP-PMB مطرح می‌شود.

در مسئله FJSP-PMB موردنظر این تحقیق، تصمیمات/زیر مسائل زیر مورد توجه قرار گرفته است:

- تخصیص کارها و عملیات مربوط به آنها به ماشین‌ها
 - تعیین توالی فعالیت سفارشات تخصیص داده شده به هر ماشین
 - فعالیتهای نت هر ماشین با توجه به خرابی احتمالی برای هر ماشین و زمانبندی نت
- به طور خلاصه، در مسئله مورد نظر پایان‌نامه، یک سیستم تولیدی کارگاهی در نظر گرفته می‌شود که در آن J کار مختلف که هر کار به اندازه O_j عملیات دارد، باید روی N ماشین مختلف پردازش که ماشین‌ها ناهمگون هستند. در زمانبندی کارها و تخصیص آن به ماشین‌ها باید توجه کنیم که: اولاً؛ احتمال خرابی در ماشین‌ها وجود دارد و این تعداد دفعات خرابی آنها تابعی از میزان فعالیت آنهاست. ثانیاً؛ هدف اصلی کمینه سازی زمان اتمام کل کارها است ولی برای کارها (سفارشات) یک موعد تحویل نرم در نظر گرفته می‌شود. از جمله مهمترین مفروضاتی و مشخصات مسئله FJSP-PMB موردنظر این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- (۱) تفاوت در سرعت، عملکرد و تخصیص ماشین‌ها و انسان‌ها برای پردازش کارهای مختلف وجود دارد
- (۲) برای خدمات سفارش داده شده موعد تحویل از پیش تعیین شده در نظر گرفته نمی‌شود
- (۳) در قابلیت ماشین‌ها محدودیت وجود دارد و قادر به انجام هر کاری نیستند
- (۴) ماشین‌ها لزوماً هر زمان در دسترس نیستند و احتمال خرابی ماشین‌ها و اختلال در کارگاه وجود دارد
- (۵) هیچ ماشینی نمی‌تواند بیش از یک پردازش را در یک زمان انجام دهد. به عبارت دیگر امکان انجام چند خدمت توسط یک ماشین در یک زمان مشخص وجود ندارد
- (۶) توابع هدف

- کمینه‌سازی زمان انجام تمام سفارشات (TCT^1)
- کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های نت و جریمه‌های تاخیر است.

¹Total Completion Time (Makespan)

۳-۱ هدف اصلی مسائل زمان‌بندی

زمان‌بندی یک فرآیند تصمیم‌گیری می‌باشد که در بسیاری از صنایع خدماتی و تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. منابع و وظایف در یک سازمان، می‌تواند دارای اشکال مختلفی باشد. منابع می‌تواند به صورت ماشین‌آلات در یک کارگاه تولیدی، واحدهای پردازشی در محیط‌های محاسباتی و ... باشد. همینطور وظایف می‌تواند به صورت عملیات در یک فرآیند، اجرا کردن در برنامه‌های کامپیوتری و ... باشد. در مسائل زمان‌بندی هدف از یافتن توالی انجام فعالیت‌ها ممکن است متفاوت باشد مثلاً یک هدف ممکن است حداقل کردن زمان تکمیل فعالیت آخر و دیگری می‌تولند حداقل کردن تعداد کارهای تکمیل شده بعد از زمان مقرر آن‌ها و همینطور حداقل کردن زمان جریان کل باشد. بنابراین زمان‌بندی نقش مهمی را در بیشتر سیستم‌های ساخت و تولید و همچنین در بیشتر محیط‌های پردازش اطلاعات ایفا می‌کند.

همینطور در محیط‌های حمل و نقل و توزیع و سایر صنایع خدماتی دارای نقش قابل توجهی می‌باشد (پیندو^۱، ۱۹۹۵). در مجموعه اصطلاحات مربوط به زمان‌بندی، معانی عبارت‌های توالی، زمان‌بندی و سیاست برنامه‌ریزی با یکدیگر متفاوت می‌باشند. توالی عملیات معمولاً جایگشت n کار یا ترتیبی که در آن کارها بر روی ماشین در نظر گرفته شده پردازش می‌شوند، تعریف می‌شود. عبارت زمان‌بندی معمولاً مربوط به تخصیص کارها در چیدمان‌های پیچیده‌تری از ماشین‌آلات مربوط می‌شود. مفهوم سیاست برنامه‌ریزی معمولاً در چیدمان‌های اتفاقی یا تصادفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک سیاست برنامه‌ریزی، اقدام مناسب برای هر کدام از حالت‌های سیستم را مشخص می‌کند. در مدل‌های قطعی معمولاً از مفاهیم زمان‌بندی و یا برنامه‌ریزی استفاده می‌شود و از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند.

۴-۱ اهمیت و ضرورت پژوهش

مسئله زمان‌بندی در طی سال‌های اخیر با گسترش فضای رقابتی و توسعه روزافزون فرآیندها و تکنولوژی‌های نوین در محیط‌های ساخت، تولید و خدمات، اهمیت چشمگیری یافته است. مسائل زمان‌بندی در دنیای واقع، عمدتاً با تخصیص بهینه منابع به فعالیت‌ها در طول زمان اجرای پروژه، از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار می‌باشند. عصر کنونی با تحولات گوناگون در فضای کسب و کار، چالش‌های عدیده‌ای را بر مسئله زمان‌بندی وارد کرده است.

در دنیای واقعی و در کارگاه‌هایی که از مدل کار کارگاهی جهت تولید محصولات خود استفاده می‌نمایند، همواره انسان و ماشین جزو محدودیت‌های کارگاه و همچنین برنامه‌ریزی کارها موجود بر روی ماشین در نظر گرفته می‌شوند. لذا در تحقیق پیشرو با بررسی همزمان محدودیت‌های ماشین در برنامه زمان‌بندی، محدودیت‌های مسئله هرچه بیشتر به محیط واقعی نزدیک شده‌اند. همچنین کار کرد روزانه

¹ Pinedo

ماشین آلات باعث استهلاک و نهایتاً از کار افتادگی موقت یا دائمی دستگاه خواهد شد. لذا خرابی ماشین آلات در حین انجام عملیات غیر قابل اجتناب خواهد بود. در تحقیق پیش رو با در نظر گرفتن ویژگی خرابی ماشین مسئله بصورت واقعی تر بررسی خواهد شد.

امروزه موفقیت و پیشرفت در عرصه رقابت، نیازمند برنامه ریزی است و چنانچه برنامه ریزی در سازمان صورت نگیرد مسائل و مشکلات فراوانی گریبان گیر سازمان خواهد شد. هدف از برنامه ریزی و زمان بندی عملیات استفاده ی مطلوب از منابع انسانی، تجهیزات و ظرفیت به منظور ارضای تقاضای مشتریان در طول یک دوره معین است. از جمله موثرترین سیستم های تولیدی در فضای رقابتی امروز، سیستم های تولیدی منعطف کارگاهی است، که در اصل به عنوان توسعه ای بر رویکرد کارگاهی کلاسیک معرفی شده است. در یک سیستم تولیدی کارگاهی منعطف، هر کار مسیر مخصوص به خود را داشته و از بین مجموعه ای از ماشین ها، یک ماشین برای انجام عملیات خاص یک کار مورد استفاده قرار می گیرد، و پس از طی آن، می تواند خروجی خود را ارائه کند.

به دلیل وجود اهداف متعدد و پارامترها و عوامل گوناگون موثر بر بهره وری سیستم، این الگوی کلی تنها زمانی مثمر ثمر واقع خواهد شد که در چارچوب یک رویکرد عملی و جامع، مدل سازی و برنامه ریزی شود که با نگاهی به ادبیات این حوزه، قطعاً ارائه یک مدل بهینه سازی ریاضی بهترین راهکار خواهد بود. امروزه سازمان ها و کارخانه های کشور به منظور تداوم کسب و کار، موقعیت رقابتی در محیط پیچیده و متغیر صنعت و پاسخگویی مناسب به نوسانات موجود، خود را بیش از پیش نیازمند به کارگیری روش های علمی در مدیریت و برنامه ریزی می بینند. لذا به کار بستن یک روش علمی در برنامه ریزی تولید می تواند گامی مؤثر در جهت علمی شدن تمام سطوح برنامه ریزی تولید در این بخش باشد.

همچنین به منظور مدیریت هر چه بهتر عدم قطعیت در حوزه خرابی ماشین آلات، می توان از استراتژی های نگهداری و تعمیرات به صورت یکپارچه با برنامه ریزی و زمان بندی تولید بهره برد. ارتباط بین واحدهای نگهداری و تولید، ذاتاً متعارض و ناسازگار است. مدیران تولید همواره می خواهند ماشین ها در کلیه ساعات در دسترس باشند در حالی که مدیران نگهداری نیاز دارند تا ماشین ها به منظور نگهداری و تعمیر در ساعاتی متوقف باشند. این در حالی است که یک خرابی غیرمنتظره برای یک تجهیز (ماشین)، می تواند میزان بهره وری سیستم را تا حد قابل ملاحظه ای کاهش داده و باعث شود تا برنامه زمان بندی شده تولید جاری، مختل گردد. این امر نیاز به تغییر و زمان بندی دوباره را به همراه خواهد داشت؛ این مسئله لزوم توجه همزمان پارامترهای تولید (برنامه ریزی، زمان بندی، بودجه ریزی و...) و مسئله مدیریت نگهداری و تعمیرات را خاطرنشان می سازد. ادغام و یکپارچگی مدیریت نگهداری با زمان بندی تولید می تواند اثربخشی مدیریت را در پاسخگویی به تعهدات زمانی بهبود و ارتقا بخشد. چرا که بدون یکپارچگی این دو مهم، نمی توان پایداری و استواری یک برنامه زمان بندی تولید را تضمین نمود.

استراتژی‌ها و دیدگاه‌های موجود در صنایع درباره نگهداری و تعمیرات (نت)، روند پرافت‌وخیزی را در قرن اخیر طی کرده و دگرگونی‌های زیادی در این عرصه به وجود آمده است. به‌طور خلاصه باید گفت دیدگاه موجود در زمینه نگهداری و تعمیرات (نت) از یک نگرش منفعلانه در اوایل قرن ۲۰ به یک نگرش پیشگیرانه در آغاز قرن ۲۱ مبدل شده است. بسیاری از این تغییرات در ۳۰ سال اخیر (از دهه ۷۰ میلادی) ایجاد شده‌اند و نیروی محرکه اصلی این تحولات، تغییر سطح توقعات و انتظاراتی است که از سازمان‌نت مورد انتظار است. به‌طور خلاصه، مدل‌های برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی عملیات معمولاً به دنبال ایجاد تعادل بین هزینه‌های راه‌اندازی سیستم با هزینه‌های تولید و نگهداری مواد و همچنین بهره‌وری و زمان تحویل خدمات هستند، درحالی‌که مدل‌های تعمیر و نگهداری معمولاً به دنبال ایجاد تعادل بین هزینه‌ها و سود برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات به منظور بهینه‌سازی عملکرد سیستم تولید هستند. اما موضوع ترکیب این دو بخش (برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در بخش بزرگی از مدل‌های برنامه‌ریزی تولید فرض می‌شود که سیستم در حداکثر کارایی خود در طول افق برنامه‌ریزی قرار دارد و به‌طور مشابه در بخش بزرگی از مدل‌های برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات فرض می‌شود که ظرفیت تولید به‌صراحت نیازهای تولید را در نظر نمی‌گیرد. لذا ارائه یک مدل یکپارچه برای واحد تولیدی، به گونه‌ای که تمامی عوامل مذکور را در خود گنجانده و یک برنامه جامع به مدیران واحدهای تولیدی ارائه نماید از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود

با توجه به موارد مطرح شده در بالا، مواردی، خرابی ماشین آلات جزو مواردی است که از قبل جهت آن‌ها برنامه‌ریزی صورت نگرفته است و با توجه به درخواست مشتری میبایست کارها جهت تکمیل برنامه ریزی شوند در غیر اینصورت در محیط‌های رقابتی فعلی کارگاه مذکور امکان پاسخ‌گویی مناسب به مشتری را نخواهد داشت که این امر موجب نارضایتی و حتی از دست دادن مشتری خواهد شد. لذا در نظر گرفتن خرابی ماشین آلات محیط مسئله را بیش از پیش به محیط واقعی نزدیک کرده و جواب‌های واقعی‌تری را بوجود می‌آورند.

۵-۱ اهداف تحقیق

اهداف علمی اهداف علمی و کاربردی این تحقیق به صورت زیر می‌باشد:

- توسعه مدل‌های ارائه شده در زمینه برنامه‌ریزی سیستم‌های تولید کارگاهی منعطف و ارائه یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه استوار در حوزه زمان‌بندی کارگاهی منعطف تحت عدم قطعیت مرتبط اختلال/خرابی ماشین (مسئله FJSP-PMB)
- پرداختن به اهمیت در نظر گرفتن خرابی ماشین آلات در زمان‌بندی کارگاهی منعطف

لازم به توضیح است که هر کارگاه و کارخانه‌ای که از سیستم کار کارگاهی برای تولید محصولات خود استفاده می‌نماید می‌تواند از مدل ارائه شده جهت برنامه‌ریزی کارها بر روی ماشین آلات استفاده نماید.

۶-۱ سوالات تحقیق

مهمترین سوالات این تحقیق عبارتند از:

- متغیرهای تصمیم‌گیری و پارامترهای تاثیرگذار در یک مدل بهینه‌سازی برای مسئله زمانبندی سیستم تولیدی منعطف تحت خرابی (FJSP-PMB) ماشین‌ها کدام هستند؟
- ویژگی‌های اصلی رویکرد برنامه‌ریزی/بهینه‌سازی ریاضی برای مدل‌سازی و حل مسئله FJSP-PMB چیست؟
- چگونه می‌توان با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی سناریومحور، به مدل‌سازی سناریوهای اختلال/خرابی ماشین‌ها پرداخت؟
- مزیت و ضعف بیان سناریومحور سناریوهای اختلال کدام است؟
- مزیت در نظر گرفتن خرابی ماشین‌ها در زمان‌بندی چیست و در صورت عدم توجه به آن چه چالشی رخ می‌دهد؟
- آیا رویکرد برنامه‌ریزی سناریو تصادفی استوار رویکرد باارزشی برای مدل‌سازی مسئله FJSP-PMB و ارزش استواری پاسخ آن چه مقدار است؟
- چگونه می‌توان یک توازن بهینه بین اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های نت و کمینه‌سازی زمان تکمیل کارها در یک سیستم تولید منعطف ایجاد کرد؟

۷-۱ نوآوری‌های این پژوهش

نوآوری‌های این تحقیق را به طور خلاصه می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- ارائه یک مدل بهینه‌سازی جدید برای حل مسئله زمانبندی کارگاهی منعطف به طوری که در آن خرابی احتمالی ماشین آلات نیز در نظر گرفته می‌شود و همچنین برای موعد تحویل سفارشات/کارهای پنجره زمانی نرم ایجاد شود.
- در نظر گرفتن عدم قطعیت مرتبط با اختلال/خرابی احتمالی ماشین‌ها با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریومحور استوار
- در نظر گرفتن برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه ماشین‌ها در کنار زمانبندی تولید آنها. یعنی در کنار هدف کمینه‌سازی زمان اتمام کارها، هدف کمینه‌سازی هزینه‌های مرتبط با ماشین‌ها نیز مورد توجه قرار می‌گیرد.

۸-۱ روش تحقیق

تحقیق حاضر به دنبال بسط مطالعات موجود انجام گرفته و این نوع تحقیق به عنوان تحقیق کمی به شمار می‌رود. در ابتدا در مورد موضوع مورد مطالعه تحقیقات کتابخانه‌ای صورت گرفته و مقالات و کتب مربوط به موضوع کارگاهی مورد بررسی قرار گرفت و مدل‌های موجود بررسی شد. سپس مدل‌های کارگاهی که به صورت همزمان محدودیت انسان و ماشین را بررسی نموده است، مطالعه و بررسی گردید.

به لحاظ رویکرد تحقیقی، در مراحل انجام این پژوهش از دو رویکرد استقرایی و استنتاجی استفاده خواهد شد. همچنین با استفاده از رویکرد شناخت به منظور کسب آگاهی از شرایط دنیای واقعی و همچنین رویکرد اعتبارسنجی به منظور تطابق با واقعیت و همچنین صحت‌سنجی داده‌ها استفاده خواهد شد. از منظر مدل‌سازی، با توجه به اینکه در تمامی تحقیقات مرور شده، از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی استفاده شده است، در این رو پیش‌بینی می‌شود که بهترین راه برای مدل‌سازی پژوهش حاضر نیز استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی ریاضی و عدم قطعیت خواهد بود.

لازم به توضیح است که این تحقیق یک تحقیق کتابخانه‌ای و توسعه‌ای-کاربردی است. با مطالعه مقالات و کتب مورد نیاز به بررسی مدل‌های مربوطه پرداخته می‌شود و به توسعه و بهبود آنها خواهیم پرداخت به طوری که قابلیت بکارگیری آنها برای حل مسائل واقعی بیشتر شود. از منظر نرم‌افزار نیز در این تحقیق نرم‌افزارهای GAMS و MATLAB بیشترین استفاده را خواهند داشت.

۹-۱ تعاریف واژه‌ها و اصلاحات پایه تحقیق

- زمان‌بندی: تعیین اولویت و تخصیص سفارشات به منابع محدود در دسترس به منظور انجام مجموعه‌ای از عملیات و سفارشات محوله.
- توالی عملیات: تعیین و تغییر ترتیب انجام کارهایی که می‌بایست روی یک ماشین انجام شود
- زمان‌بندی کارگاهی: نوعی از زمان‌بندی است که در آن هر کار مسیر از پیش تعیین شده‌ای را برای اجرای عملیات مختلف مربوط به خود، طی می‌کند. در این نوع زمان‌بندی انجام هر عملیات توسط یک ماشین خاص انجام می‌شود.
- زمان‌بندی کارگاهی انعطاف‌پذیر: نوعی تعمیم یافته از زمان‌بندی کارگاهی است که در آن هر کار، مسیر اجرای عملیات خود را در تعدادی مرکز کاری طی می‌کند.
- زمان‌بندی تولید: عبارت است از برنامه‌ریزی تخصیص منابع، کارها و عملیات به منظور تولید محصول یا ارائه خدمات در زمان مقرر.

- برنامه‌ریزی و زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات (نت) : مجموعه‌ای از اقدامات که به منظور اجتناب، تشخیص و پیشگیری از نقص و یا عکس‌العمل نسبت به خرابی سیستم و زمان مقرر باید صورت می‌گیرد تا تجهیزات در وضعیت کاری قابل قبول و بهینه نگه داشته شود.
- بهینه‌سازی استوار: یک رویکرد بهینه‌سازی تحت شرایط عدم قطعیت که به مواجهه با پارامترهای غیرقطعی می‌پردازد و موجب می‌شود پاسخی با سطح محافظه‌کاری مورد نظر تصمیم‌گیرنده بدست آورده شد. در یک پاسخ استوار، اولاً نوسان خروجی‌ها کمتر می‌شود و درثانی مقدار تابع هدف در حالت بدبینانه، کنترل می‌شود.
- برنامه‌ریزی یکپارچه: هنگامی که تصمیم‌گیری راجع دو یا بیش از دو مسئله مورد نظر یک سازمان به طور همزمان مورد توجه قرار گیرد، برنامه‌ریزی یکپارچه صورت می‌پذیرد. مثلاً در این تحقیق، تصمیمات برنامه‌ریزی تولید (تخصیص فعالیت‌ها به ماشین‌ها و تعیین توالی آنها) در کنار برنامه‌ریزی نت ماشین‌ها به طور همزمان مورد توجه قرار می‌گیرد.

۱-۱۰ نحوه سازماندهی این پژوهش

محتوای این تحقیق در ۵ فصل سازماندهی می‌شود؛ در فصل بعدی (فصل دوم) به بیان تعاریف و مفاهیم نظری این تحقیق پرداخته می‌شود و مرور منابع صورت می‌پذیرد تا شکاف تحقیقاتی و نوآوری این تحقیق روشن شود. در فصل سوم به تبیین کامل مسئله FJSP-PMB مورد نظر این تحقیق پرداخته می‌شود و اهداف، قیود و جزییات آن به طور شفاف مشخص می‌شود. همچنین رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استوار برای مدل‌سازی مسئله تحت سناریوهای اختلال/خرابی ماشین‌ها توسعه داده می‌شود. با توجه به آنکه برای مسئله FJSP-PMB یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه ارائه می‌شود، با استفاده از روش اپسیلون محدودیت به موازنه توابع هدف خواهیم پرداخت. در فصل چهارم ابتدا به تشریح یک مطالعه عددی از مسئله مورد نظر این تحقیق پرداخته می‌شود و سپس مدل و رویکردهای حل پیشنهادی برای حل آن بکار گرفته می‌شود و نتایج تحلیل و بینش مدیریتی استخراج می‌شود. همچنین در این فصل به تحلیل ارزش استواری مدل پیشنهادی و اهمیت در نظر گرفتن خرابی ماشین‌ها خواهیم پرداخت. نهایتاً در فصل پنجم به جمع‌بندی تحقیق و پیشنهاد تحقیقات آتی پرداخته می‌شود.

فصل دوم:

مبانی نظری و

پیشینه پژوهش

۱-۲ طرح کلی فصل

در این فصل از تحقیق، ابتدا به تعاریف کلی و مرتبط با تحقیق در خصوص مسائل زمانبندی و برنامه‌ریزی تولید پرداخته می‌شود و سپس به طور خاص به مسئله زمانبندی کار کارگاهی تمرکز می‌شود و تحقیقات صورت گرفته در این زمینه مرور و شکاف تحقیقاتی تبیین می‌شود.

۲-۲ برنامه‌ریزی تولید

برنامه‌ریزی عبارتی است که به معنی تصمیم‌گیری برای آینده می‌باشد. یک برنامه زمانی معمولاً زمان اتفاق افتادن هر چیز و همچنین برنامه زمانی برای فعالیت‌های معین را مشخص می‌کند. با استفاده از زمانبندی، می‌توان استراتژی تولید برای برآورده کردن سفارشات را تعیین و ترتیب اولویت‌های انجام کارها را مشخص کرد. در فرآیند برنامه‌ریزی، نیاز داریم که از نوع و مقدار هر کدام از منابع اطلاع داشته باشیم، به‌طوری‌که زمان شدنی اتمام کارها مشخص شود. هنگامی که منابع مشخص گردیدند، می‌توان به طور مؤثری مرز مسئله برنامه‌ریزی را تعریف کرد. مسئله زمانبندی در صنعت، شامل مجموعه‌ای از وظایف قابل انجام و همچنین مجموعه‌ای از منابع در دسترس به منظور انجام وظایف قابل تعریف می‌باشد. با توجه به وظایف و منابع تعریف شده، مسئله اصلی تعیین زمان انجام وظایف مادامی که توانایی منابع مشخص شود می‌باشد (بیکر و تریتش^۱، ۲۰۱۳). علاوه بر آن هر وظیفه در قالب اطلاعاتی مانند نیاز به منابع، زمان، زودترین زمان شروع و زمان تکمیل توصیف می‌شود. به طور کلی، مدت زمان انجام کار نامشخص است ولی این مسئله در بیشتر مسائل برنامه‌ریزی تولید در نظر گرفته نمی‌شود. در یک مسئله برنامه‌ریزی تولید محدودیت‌های مختلفی مانند محدودیت پیش‌نیازی در میان وظایف و همچنین دو نوع محدودیت امکان‌سنجی که اولین محدودیت، مربوط به وجود محدودیت در ظرفیت ماشین‌آلات می‌باشد و، محدودیت‌های تکنیکی مربوط به اینکه کدامین کارها می‌تواند انجام شود، وجود دارد. در مسائل برنامه‌ریزی تولید، یکی از منابع ماشین‌آلات بوده و وظایف، شغل یا کار نامیده می‌شوند. گاهی اوقات کارها شامل وظایف مقدماتی هستند که به آن‌ها عملیات گفته می‌شوند. در یک مسئله برنامه‌ریزی تولید، دو مدل قطعی و تصادفی وجود دارد. در مدل‌های قطعی شرایط معلوم و مشخص در نظر گرفته می‌شود ولی در مدل‌های تصادفی مدل دارای عدم قطعیت با توزیع‌های احتمالی می‌باشد (بیکر و تریتش، ۲۰۱۳).

¹ Baker and Trietsch

۳-۲ زمانبندی

زمانبندی عبارت است از تعیین توالی فرایندها و موازنه جرمی بین مراحل مختلف تولید. یافتن زمانبندی بهینه بسته به محیط کارگاه، محدودیت های فرآیند و شاخص های عملکرد می تواند بسیار آسان و یا بسیار مشکل باشد.

تصمیم برای تعیین بهترین توالی زمانی برای تکمیل مجموعه ای از فعالیت ها و استفاده از منابع موجود در تولید (پرسنل، ماشین آلات، ابزار، مواد و تجهیزات کمکی و غیره) برای تخصیص دادن به سفارشات مشتریان و انجام آن فعالیت ها را می توان یکی از تعاریف زمانبندی در نظر گرفت (پیندو^۱، ۱۹۹۵).

هدف زمانبندی که مجموعه ای از اصول، مدل ها، روش ها و نتایج منطقی است، می تواند بهینه سازی یک و یا چند هدف تعریف گردد. زمانبندی دارای فواید مختلفی مانند جلوگیری از انباشت سرمایه، تقلیل ضایعات، کاهش و یا حذف بیکاری ماشین آلات و تلاش برای استفاده بهتر از آنها، پاسخگوئی به موقع به سفارش های مشتریان و تامین مواد اولیه و قطعات مورد نیاز در موقع مناسب برای یک واحد صنعتی می باشد. به همین دلیل زمانبندی تولید و توالی عملیات یکی از جنبه های مهم مباحث برنامه ریزی تولید در هر سازمان تولیدی می باشد.

مدل زمانبندی تولید در هر یک از سازمان های تولیدی با توجه به اهداف، اولویت های دسترسی و محدودیت های منابع تعیین می گردد. بنابراین با تعیین مدل زمانبندی مناسب در سازمان و تعیین ترتیب اولویت های انجام کار به صورت بهینه می توان هزینه ها را حداقل و بهره وری یک واحد تولیدی را افزایش داد.

۳-۲-۱ تاریخچه زمانبندی و توالی عملیات

در سال ۱۹۵۶ و ۱۹۵۷ به توسعه ی یک الگوریتم که در آخر روش زمانبندی برای شرکت دوپنت شد، پرداخته شد. برنامه ای توسعه یافته بر روی کارخانه هایی که در سال ۱۹۵۷ تعطیل شده بودند، آزمایش شد و اولین مقاله درباره زمانبندی مسیر بحرانی در ماه مارس سال ۱۹۵۹ منتشر شد. در کل تکامل مدیریت پروژه جدید حاصل دستاوردهای مستقیم برای موثر ساختن اطلاعاتی است که توسط زمانبندی ها برای کنترل و مدیریت مسیر بحرانی به کار گرفته می شد. تکامل زمانبندی ارتباط بسیار نزدیکی با توسعه رایانه ها داشت. سیستم های ابتدایی پیچیده و دارای حجم زیاد بودند و یک زمان بند تازه کار باید ماه ها صرف یاد گرفتن آن می کرد. این سیستم ها در دهه ۷۰ و ۸۰ میلادی به رایانه های کوچک منتقل شد، ولی همچنان گران بود و تنها سازمان های بزرگ قادر به داشتن دفتر زمانبندی مرکزی و سیستم های رایانه ای پشتیبان از آن ها بودند. با آمدن رایانه های میکرو (همان رایانه های شخصی) زمانبندی برای همیشه عوض شد. با تکامل رایانه های

¹ Pinedo

شخصی که پایه زمانبندی داشتند، کنترل پروژه‌ها از محیطی که گروه زمان بندهای ماهر باید با صرف هزینه‌های بسیار بالا مطمئن می‌شدند که زمانبندی درست است به موقعیتی تبدیل شد که هر شخصی با یک بسته نرم افزاری زمانبندی می‌توانست آن را یاد بگیرد. در دنیای رقابتی کنونی، برای موسسه‌ها، داشتن بهترین توالی انجام عملیات و زمانبندی مناسب فعالیت‌ها یک نیاز اساسی به منظور بقا می‌باشد. در دنیای واقعی کنونی عملاً سفارشی بدون موعد تحویل وجود ندارد. به عنوان مثال موسسه‌ها برای حفظ مشتری موظف به ارسال به موقع محصولات به مشتری هستند. موسسه‌هایی که قادر به تامین سفارش‌ها در موعد تحویل نباشند به تدریج از صحنه رقابت خارج می‌شوند. همچنین موسسه‌ها نیازمند به برنامه ریزی صحیح در استفاده از منابع محدود و ارزشمند خود به منظور حداکثر نمودن بهره‌وری می‌باشند. نمودار گانت اولین بار در قرن گذشته توسط هنری گانت^۱ در فرایندهای تولیدی مورد استفاده قرار گرفته است. (زمان در محور افقی و منابع و یا فعالیت‌ها در محور عمودی ثبت می‌شوند).

۲-۳-۲ زمانبندی در مسائل تولید

مسائل زمانبندی در صنایع تولیدی، دارای مجموعه‌ای از وظایف و منابع تخصیص داده شده برای انجام این وظایف می‌باشند. با توجه به وظایف و منابع تخصیص داده شده، مسئله به طور کلی شامل تعیین زمان انجام این وظایف و تشخیص قابلیت منابع تخصیص داده شده برای به انجام رساندن این وظایف می‌باشد. در فرآیند زمانبندی، به منظور تعیین زمان به اتمام رسیدن هر کدام از وظایف، داشتن اطلاعات راجع به نوع و میزان هر منبع ضروری می‌باشد. مرز برنامه زمانبندی را زمانی می‌توان مشخص کرد که منابع مشخص شوند. علاوه بر آن می‌توان هر وظیفه را در قالب منابع مورد نیازش، مدت زمان آن، زودترین زمانی که ممکن است شروع شود و زمانی که در آن فعالیت به اتمام می‌رسد، توصیف نمود. نظریه برنامه ریزی و زمانبندی به طور اصلی به مدل‌های ریاضی مرتبط می‌باشد. در حالت ایده‌آل، تابع هدف مدل‌های ریاضی شامل همه هزینه‌های وابسته به تصمیم‌گیری‌های زمانبندی می‌باشد. با این حال، اندازه‌گیری و شناسایی کامل این چنین هزینه‌هایی دشوار می‌باشد (بیکر و تریتش، ۲۰۱۳).

مدل‌های زمانبندی را می‌توان با مشخص کردن پیکربندی منابع و ماهیت وظایف طبقه‌بندی کرد. برای مثال، در مدل‌های یک ماشین کارها یک مرحله‌ای می‌باشند در حالی که در مدل‌هایی که چندین ماشین وجود دارد کارها چندین مرحله‌ای هستند. در هر دو مورد ممکن است ماشین‌ها در مقادیر واحد و یا به صورت موازی در دسترس باشند. علاوه بر این، دو سیستم ایستا و سیستم پویا در مسائل زمانبندی وجود دارد. در سیستم‌های ایستا، در طول فرآیند زمانبندی، مجموعه کارها جهت پردازش ثابت می‌باشد. اما در سیستم‌های پویا ممکن است در طول فرآیند زمانبندی، کارهای جدیدی به سیستم اضافه گردد (بیکر و تریتش، ۲۰۱۳).

^۱ Henry Gantt

در نهایت، وقتی که فرض می‌شود شرایط معین و قطعی است، مدل قطعی نامیده می‌شود. از سوی دیگر، اگر توزیع‌های احتمال قطعی نباشند، مدل تصادفی است. یک محیط تولیدی را در نظر بگیرید که در آن سفارشات به یک سری کارها با زمان موعد مقرر مربوطه تبدیل می‌شوند. این کارها باید بر روی ماشین‌آلات در یک مرکزکاری با توالی در نظر گرفته شده، مورد پردازش قرار بگیرند. اگر گاهی اوقات ماشین خاصی مشغول انجام کاری باشد و پیش‌دستی اتفاق بیفتد ممکن است فرآیند پردازش کارها به تعویق بیفتد. اتفاقات غیر قابل پیش‌بینی در کارگاه‌ها، مانند خرابی ماشین‌آلات و یا زمان پردازش طولانی‌تر از انتظار به دلیل تاثیر زیادی که بر زمان‌بندی دارد هم باید در نظر گرفته شوند. در چنین محیط‌هایی، گسترش یک برنامه زمان‌بندی دقیق می‌تواند به حفظ کارایی و کنترل عملیات کمک نماید (پیندو، ۱۹۹۵).

۲-۴ انواع مسائل زمان‌بندی و اهمیت آن

زمان‌بندی یک فرآیند تصمیم‌گیری می‌باشد که در بسیاری از صنایع خدماتی و تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. منابع و وظایف در یک سازمان، می‌تواند دارای اشکال مختلفی باشد. منابع می‌تواند به صورت ماشین‌آلات در یک کارگاه تولیدی، واحدهای پردازشی در محیط‌های محاسباتی و ... باشد.

امروزه موفقیت و پیشرفت در عرصه رقابت، نیازمند برنامه‌ریزی است و چنانچه برنامه‌ریزی در سازمان صورت نگیرد مسائل و مشکلات فراوانی گریبان گیر سازمان خواهد شد. هدف از برنامه‌ریزی و زمان‌بندی عملیات استفاده‌ی مطلوب از منابع انسانی، تجهیزات و ظرفیت به منظور ارضای تقاضای مشتریان در طول یک دوره معین است.

از جمله موثرترین سیستم‌های تولیدی در فضای رقابتی امروز، سیستم‌های تولیدی منعطف کارگاهی است، که در اصل به عنوان توسعه‌ای بر رویکرد کارگاهی کلاسیک معرفی شده است. در یک سیستم تولیدی کارگاهی منعطف، هر کار مسیر مخصوص به خود را داشته و از بین مجموعه‌ای از ماشین‌ها، یک ماشین برای انجام عملیات خاص یک کار مورد استفاده قرار می‌گیرد، و پس از طی آن، می‌تواند خروجی خود را ارائه کند. به دلیل وجود اهداف متعدد و پارامترها و عوامل گوناگون موثر بر بهره‌وری سیستم، این الگوی کلی تنها زمانی مثمر ثمر واقع خواهد شد که در چارچوب یک رویکرد عملی و جامع، مدل‌سازی و برنامه‌ریزی شود که با نگاهی به ادبیات این حوزه، قطعاً ارائه یک مدل بهینه‌سازی ریاضی بهترین راهکار خواهد بود. امروزه سازمان‌ها و کارخانه‌های کشور به منظور تداوم کسب‌وکار، موقعیت رقابتی در محیط پیچیده و متغیر صنعت و پاسخگویی مناسب به نوسانات موجود، خود را بیش از پیش نیازمند به کارگیری روش‌های علمی در مدیریت و برنامه‌ریزی می‌بینند. لذا به کار بستن یک روش علمی در برنامه‌ریزی تولید می‌تواند گامی مؤثر در جهت علمی شدن تمام سطوح برنامه‌ریزی تولید در این بخش باشد.

همچنین به منظور مدیریت هر چه بهتر عدم قطعیت در حوزه خرابی ماشین‌آلات، می‌توان از استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات به صورت یکپارچه با برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید بهره برد این گونه تجهیزات و فناوری‌ها عموماً بسیار گران‌قیمت و هزینه‌بر بوده و در صورت تهیه و استقرار، می‌بایست تا آنجا که ممکن است با دقت و بهره‌وری بالا، مورد استفاده قرار گرفته و تحت نگهداری و تعمیرات دقیق قرار گیرند. ارتباط بین واحدهای نگهداری و تولید، ذاتاً متعارض و ناسازگار است. مدیران تولید همواره می‌خواهند ماشین‌ها در کلیه ساعات در دسترس باشند در حالی که مدیران نگهداری نیاز دارند تا ماشین‌ها به منظور نگهداری و تعمیر در ساعاتی متوقف باشند. این در حالی است که یک خرابی غیرمنتظره برای یک تجهیز (ماشین)، می‌تواند میزان بهره‌وری سیستم را تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و باعث شود تا برنامه زمان‌بندی شده تولید جاری، مختل گردد. این امر نیاز به تغییر و زمان‌بندی دوباره را به همراه خواهد داشت؛ تغییر در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید، در شرایط اضطراری می‌تواند بسیار هزینه‌بر بوده و ممکن است میزان خروجی (تولید/ خدمت) را دستخوش تغییرات چشمگیر نماید. این مسئله لزوم توجه همزمان پارامترهای تولید (برنامه ریزی، زمان‌بندی، بودجه ریزی و...) و مسئله مدیریت نگهداری و تعمیرات را خاطرنشان می‌سازد. ادغام و یکپارچگی مدیریت نگهداری با زمان‌بندی تولید می‌تواند اثربخشی مدیریت را در پاسخگویی به تعهدات زمانی بهبود و ارتقا بخشد. چرا که بدون یکپارچگی این دو مهم، نمی‌توان پایداری و استواری یک برنامه زمان‌بندی تولید را تضمین نمود.

استراتژی‌ها و دیدگاه‌های موجود در صنایع درباره نگهداری و تعمیرات (نت)، روند پرافت‌وخیزی را در قرن اخیر طی کرده و دگرگونی‌های زیادی در این عرصه به وجود آمده است. به‌طور خلاصه باید گفت دیدگاه موجود در زمینه نگهداری و تعمیرات (نت) از یک نگرش منفعلانه در اوایل قرن ۲۰ به یک نگرش پیشگیرانه در آغاز قرن ۲۱ مبدل شده است. بسیاری از این تغییرات در ۳۰ سال اخیر (از دهه ۷۰ میلادی) ایجاد شده‌اند و نیروی محرکه اصلی این تحولات، تغییر سطح توقعات و انتظاراتی است که از سازمان نت مورد انتظار است. به‌طور خلاصه، مدل‌های برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی عملیات معمولاً به دنبال ایجاد تعادل بین هزینه‌های راه‌اندازی سیستم با هزینه‌های تولید و نگهداری مواد و همچنین بهره‌وری و زمان تحویل خدمات هستند، درحالی‌که مدل‌های تعمیر و نگهداری معمولاً به دنبال ایجاد تعادل بین هزینه‌ها و سود برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات به منظور بهینه‌سازی عملکرد سیستم تولید هستند. اما موضوع ترکیب این دو بخش (برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در بخش بزرگی از مدل‌های برنامه‌ریزی تولید فرض می‌شود که سیستم در حداکثر کارایی خود در طول افق برنامه‌ریزی قرار دارد و به‌طور مشلبه در بخش بزرگی از مدل‌های برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات فرض می‌شود که ظرفیت تولید به صراحت نیازهای تولید را در نظر نمی‌گیرد. لذا ارائه یک مدل یکپارچه برای

واحد تولیدی، به گونه‌ای که تمامی عوامل مذکور را در خود گنجانده و یک برنامه جامع به مدیران واحدهای تولیدی ارائه نماید از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود.

مسئله زمانبندی کارگاهی منعطف (FJSP) به عنوان شاخه‌ای از مسایل برنامه‌ریزی تولید بوده و مدلی توسعه یافته از مدل کار کارگاهی (JSP) می باشد (گری^۱ و همکاران ۱۹۷۶). در محیط JSP، هر عمل می‌تواند توسط یک ماشین و با توالی از پیش تعیین شده‌ای انجام شوند. در حالی که در FJSP فرض اول برداشته شده و برای هر عمل مجموعه‌ای از ماشین‌های قابل، ارائه می‌شوند. در اثر این فرض جدید، در FJSP علاوه بر تعیین توالی کارها با مسئله دیگری نیز مواجه هستیم و آن تخصیص ماشینی قابل برای هر عمل است. در نتیجه می‌توان گفت پیچیدگی FJSP به مراتب از پیچیدگی JSP بیشتر است.

۲-۵ مدل‌های زمانبندی

۲-۵-۱ زمانبندی تک ماشین^۲

حالت تک ماشین، ساده‌ترین حالت در محیط‌های ماشینی می‌باشد که در آن تنها یک ماشین وجود دارد و زمان پردازش قطعی می‌باشد. به این حالت خاص، حالت تک ماشین یا Single Machine می‌گویند مانند فروشگاه‌های با یک باجه فروش (پیندو، ۱۹۹۵).

۲-۵-۲ زمانبندی ماشین‌های موازی^۳

ماشین‌های موازی هم از نظر تئوری و هم از نظر عملی، دارای اهمیت می‌باشند. از نظر تئوری، حالت کلی ماشین‌های تک ماشین و همین‌طور حالت خاصی از مسائل Flexible Flow Shop می‌باشند. ممکن است زمانبندی ماشین‌های موازی در یک فرآیند دو مرحله‌ای انجام گیرد. در ابتدا، مشخص می‌شود که کدام کار به کدام ماشین تخصیص می‌یابد. سپس توالی کارهای تخصیص داده شده به هر ماشین تعیین می‌شود. اگر هدف حداقل کردن زمان اتمام آخرین کار باشد، بنابراین فقط فرآیند تخصیص اهمیت پیدا می‌کند. Makespan معادل زمان تکمیل آخرین کاری است که سیستم را ترک می‌کند. معمولاً کمترین Makespan نشان‌دهنده بهره‌برداری و مصرف درست و مناسب از ماشین‌ها می‌باشد (پیندو، ۱۹۹۵).

۲-۵-۳ زمانبندی زمانبندی کار کارگاهی^۴

در یک Job Shop با m ماشین، هر کار دارای مسیر از پیش تعیین شده می‌باشد. در بعضی از Job Shopها، هر کار حداکثر یک‌بار بر روی هر ماشین انجام می‌گیرد و در سایر Job Shopها، هر کار ممکن است بیشتر

¹ Garey

² Single machine

³ Parallel machine

⁴ Job shop (Jm)

از یکبار، بر روی هر ماشین انجام گیرد. مسئله زمان‌بندی Job Shop کلاسیک با مسئله Flow Shop از یک جنبه مهم دارای تفاوت می‌باشند. جریان کارها در Job Shop یکطرفه نیستند. اجزای مسئله شامل یک مجموعه از m ماشین و n کار برنامه ریزی شده می‌باشد. مانند مدل‌های Flow Shop هر کار متشکل از چندین عملیات با ساختار اولویت خطی یکسان می‌باشد. اگرچه یک کار می‌تواند دارای هر تعداد از عملیات باشد، اما متداول‌ترین قاعده و یا فرمول برای مسئله Job Shop به این صورت است که هر کار دقیقاً دارای m عملیات و هرکدام بر روی یک ماشین انجام می‌شود (پیندو، ۱۹۹۵). بنابراین در یک مدل Job Shop، m ماشین وجود دارد که هر کدام از کارها دارای مسیر و فرایند پردازش خاص خود است. یک کار می‌تواند برای پردازش به یکی از ماشین‌ها یک یا چند مرتبه مراجعه نماید. نحوه خدمت‌دهی یک شرکت بیمه به مشتریان متفاوت می‌تواند به صورت Job Shop باشد.

۲-۵-۴ زمانبندی کار کارگاهی منعطف^۱

این حالت، حالت توسعه یافته از محیط‌های Job Shop و ماشین‌های موازی می‌باشد. در این حالت، به جای وجود m ماشین در حالت سری، c مرکز کاری وجود دارد که در هر مرکز کاری، تعدادی از ماشین‌های یکسان به صورت موازی وجود دارد. هر کار دارای مسیر مخصوص به خود برای دنبال کردن از طریق کارگاه می‌باشد. کار j احتیاج به پردازش در هر مرکز کاری بر روی تنها یک ماشین دارد و هر ماشینی می‌تواند این کار را انجام دهد (پیندو، ۱۹۹۵).

۲-۵-۵ زمانبندی جریان کارگاهی^۲

در این حالت، m ماشین به صورت سری وجود دارد. هر یک از کارها باید توسط تک تک این ماشین‌ها با ترتیب مشخص و یکسان برای تمام کارها پردازش شود. تمام کارها باید مسیر یکسانی را طی کنند. برای مثال همه‌ی آن‌ها باید اول بر روی ماشین ۱، سپس ماشین ۲ و ... مورد پردازش قرار گیرد. بعد از پردازش یک کار بر روی یک ماشین، آن کار به صف ماشین بعدی می‌پیوندد مانند باز کردن حساب بانکی (ارائه درخواست، بررسی فرم‌ها، استعلام‌های مورد نیاز، تایید، چاپ دسته چک، ...). فرض می‌شود که تمامی صف‌ها، تحت قانون FIFO عمل می‌کنند (پیندو، ۱۹۹۵).

¹ Flexible job shop (FJc)

² Flow shop (Fm)

۶-۵-۲ زمانبندی جریان کارگاهی منعطف^۱

این حالت، حالت توسعه یافته از محیط‌های Flow Shop و ماشین‌های موازی می‌باشد. در این حالت به جای وجود m ماشین سری، c مرحله به صورت سری وجود دارد که در هر مرحله، تعدادی ماشین یکسان به صورت موازی وجود دارد. هر کار ابتدا باید در مرحله اول سپس در مرحله دوم و به همین ترتیب پردازش گردد. در هر مرحله کار j تنها بر روی یک ماشین انجام می‌شود و هر ماشینی می‌تواند این کار را انجام دهد (پیندو، ۱۹۹۵).

۷-۵-۲ زمانبندی کار کارگاهی عمومی^۲

در این حالت، m ماشین وجود دارد. هر کار باید دوباره بر روی یکی از m ماشین انجام شود. با این حال ممکن است زمان پردازش بعضی از این کارها، صفر شود. در این حالت هیچ محدودیتی در رابطه با مسیر هر کار وجود ندارد. فردی که زمانبندی را انجام می‌دهد می‌تواند مسیر را برای هر کار تعیین کند. هر کار دارای مسیرهای متفاوت می‌باشد (پیندو، ۱۹۹۵).

۶-۲ خرابی ماشین

در دنیای واقعی شرایط ماشین همواره ثابت نخواهد بود. در هنگام انجام عملیات بر روی ماشین، ماشین‌ها همواره سالم نبوده و در دسترس نخواهند بود و ممکن است که در بین زمان‌های برنامه ریزی شده جهت انجام فعالیت‌ها، ماشین به طور اتفاقی دچار خرابی شود. در این شرایط تا رفع کامل خرابی ماشین، برنامه زمانبندی شده جهت تکمیل کار به تاخیر می‌افتد. در این حالت در صورتی که کاری بر روی ماشین در حال انجام باشد، آن انجام کار قطع شده و بعد از تعمیر مجدد ماشین ادامه کار انجام خواهد شد. در زمان رخداد خرابی ماشین دو حالت در نظر گرفته می‌شود. ۱- زمان انجام تعمیر از قبل مشخص است ۲- زمان انجام تعمیر از قبل مشخص نیست. بدیهی است که حالت دوم به دنیای واقعی نزدیک تر است. همچنین واضح است که در این حالت زمان تعمیر جهت هر ماشین یکسان نخواهد بود.

خرابی ماشین باعث قطع شدن کارها، به تعویق افتادن برنامه زمانبندی و در نتیجه تاخیر زمان تکمیل کارها و متناظر با آن تاخیر در زمان تحویل محصول خواهد شد.

^۱ Flexible flow shop (Ffc)

^۲ Open shop (Om)

۷-۲ سیستم‌های نگهداری و تعمیرات (نت)

سیستم‌های تعمیرات و نگهداری به منظور اطمینان پیدا کردن از اینکه سیستم موثر و قابل استفاده باقی می‌ماند و یا به منظور بازیابی سیستم از کار افتاده به حالت عملیاتی، به کار برده می‌شوند. بهینه‌سازی تعمیرات و نگهداری به معنی تصمیم‌گیری درباره اینکه کدام فعالیت تعمیرات و نگهداری اجرا گردد و در چه زمانی این اتفاق بیفتد به طوریکه اهداف متعدد بهینه شوند می‌باشد. مدل‌های بهینه‌سازی تعمیرات و نگهداری سیستم شامل یک و یا چندین اجزا از جمله تعمیرات و جایگزینی قطعات و اجزا و همچنین بازرسی و نظارت بر شرایط دستگاه می‌شود که به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (گوستاوسون^۱ و همکاران، ۲۰۱۴).

نگهداری و تعمیرات تکنیکی است که اجازه می‌دهد تجهیزات و یا ماشین‌آلات به یک وضعیت مشخص نگهداری و یا بازیابی شوند. معمولاً، برنامه ریزی عملیات نگهداری و توالی تولید در بسیاری از تحقیقات بررسی شده و در بسیاری از صنایع به صورت جداگانه در نظر گرفته شده‌اند. این دو فعالیت با هم در تضاد می‌باشند. فعالیت‌های نگهداری باعث صرف زمان تولید شده در حالیکه تاخیر در فعالیت‌های نگهداری تا زمانی که توالی تولید دارای زمان آزاد برای انجام این کار نباشد احتمال خرابی ماشین‌آلات را افزایش می‌دهند (رویز^۲ و همکاران، ۲۰۰۷). در صنعت، هدف شرکت‌ها به طور کلی، بدست آوردن سیستم تولیدی قابل اعتمادتر و در دسترس‌پذیری بالاتر می‌باشد. قابلیت اطمینان و نگهداری نقش مهم و حیاتی را در حصول اطمینان از عملیات موفق‌آمیز فرایندها ایفا می‌کنند که نتیجتاً به طرز قابل توجهی به روند اقتصادی و امنیتی کمک می‌نمایند. سیاست تعمیرات و نگهداری نقش مهمی را در بدست آوردن اثربخشی عملیاتی سیستم‌ها با حداقل هزینه ایفا می‌کند. رویکرد رایج و سنتی برای برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات شامل انتخاب سیاست بهینه از استراتژی‌های مشخص تعمیرات و نگهداری مانند بازرسی برنامه ریزی شده، نگهداری پیشگیرانه، نگهداری اصلاحی و غیره می‌باشد. عملیات نگهداری به دو گروه تقسیم می‌شوند: (۱) نگهداری اصلاحی (۲) نگهداری پیشگیرانه.

نگهداری اصلاحی مربوط به انجام فعالیت‌هایی است برای مواقعی که شکست قبلاً اتفاق افتاده است. نگهداری پیشگیرانه شامل اقداماتی می‌باشد برای مواقعی که سیستم هنوز در حال اجرای عملیات می‌باشد. این عملیات به منظور حفظ سیستم در سطح قابل قبولی از عملیات انجام می‌گیرد. عملیات نگهداری پیشگیرانه شامل اجرای عملیات بر روی ماشین‌آلات و تجهیزات در فواصل زمانی از پیش تعیین شده قبل از اینکه خرابی رخ دهد می‌باشد. هدف از عملیات نگهداری پیشگیرانه جلوگیری از شکست قبل از اتفاق افتادن و حداقل کردن احتمال شکست می‌باشد. برتری عملیات نگهداری پیشگیرانه بر عملیات نگهداری اصلاحی این

¹ Gustavsson

² Ruiz

است که سیستم همیشه در وضعیت مناسب و قابل قبولی باقی می ماند بنابراین ریسک شکست های غیرمنتظره هم کاهش می یابد. اهداف نگهداری پیشگیرانه به صورت زیر تعریف می شود:

- افزایش قابلیت اطمینان ماشین آلات و در نتیجه کاهش خرابی در طول عملیات که شامل کاهش در هزینه ها و بهبود در دسترس پذیری می باشد.
- افزایش عمر عملیاتی تجهیزات
- بهبود برنامه ریزی تولید و مدیریت
- افزایش اطمینان از ایمنی

۸-۲ مرور منابع مرتبط با مسئله زمانبندی

۸-۲-۱ مرور منابع مسائل زمانبندی در حالت کلی

گری^۱ و همکاران (۱۹۷۶) عنوان کرده اند که زمانبندی مسائل کارگاهی یکی از شناخته شده ترین و مهم ترین مسائل موجود در مبحث زمانبندی می باشد که در آن هر کار از فعالیت های متفاوتی با مسیر پردازش مشخص بر روی ماشین ها تشکیل شده است. در این نوع مسائل n کار باید روی m ماشین با حفظ توالی و در نظر گرفتن روابط پیش نیازی انجام گیرد. هدف اصلی در این گونه مسائل تعیین زمانبندی و توالی مناسب کارها بر روی ماشین آلات مورد استفاده با توجه به معیار بهینه سازی، می باشد. این مسئله جز مسائل NP-hard دسته بندی می شود

شن و یاو (۲۰۱۵) بررسی کردند که برنامه ریزی کارها بر روی ماشین ها و توالی انجام آنها بر روی ماشین هایی که توانایی انجام چند کار را داشته باشند چگونه خواهد بود. پزلا^۲ و همکاران (۲۰۰۸) یک الگوریتم ژنتیک برای مسائل زمانبندی کارگاهی انعطاف پذیر FJSP ارائه داده اند. در واقع هدف در اینگونه مسائل تخصیص و توالی مناسب و در نهایت زمانبندی بهینه با توجه به معیارهای بهینه سازی مورد مطالعه است. الگوریتم ارائه شده استراتژی های مختلف را برای تولید جمعیت اولیه، انتخاب افراد برای تولید مثل و تولید افراد جدید، ادغام می نماید. نتایج محاسباتی نشان می دهد که ادغام استراتژی های بیشتر در چارچوب ژنتیکی با توجه به دیگر الگوریتم های ژنتیک منجر به بدست آمدن جواب های بهتر می گردد. علاوه بر این، نتایج کاملاً قابل مقایسه با نتایج بدست آمده توسط الگوریتم های شناخته شده دیگر بر اساس جستجوی ممنوعه می باشد. این دو نتیجه همراه با انعطاف پذیری الگوی ژنتیکی ثابت می کند که الگوریتم های ژنتیک برای حل مسائل FJSP موثر هستند. در مقاله ای که توسط ماتی^۳ و ژی^۴ (۲۰۰۴) انجام گرفته است، مسائل

¹ Garey

² Pezzella

³ Mati

⁴ Xie

زمان‌بندی برای دو کار با ماشین‌های چند منظوره نامرتب مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، یک مسئله NP-hard برای مواقعی که هر دو کار انعطاف‌پذیر باشند را به اثبات رسانده است. سپس یک مورد خاص با تنها یک کار انعطاف‌پذیر را مورد بررسی قرار داده است. در چنین مسائلی، دو کار به منظور به حداقل رساندن تابع هدف زمان‌بندی می‌شود. هر کار از یک توالی عملیات که باید مطابق با فرآیند تولید تکمیل شود، تشکیل شده است. هر فعالیت می‌تواند توسط هر ماشین از مجموعه ماشین‌آلات مرتبط با عملیات اجرا گردد و زمان تکمیل بستگی به ماشین انتخاب شده دارد. مسائل حداقل‌سازی زمان اتمام آخرین کار و زمان تکمیل کل، جز مسائل NP-hard می‌باشند. زمان‌بندی برای مسائل کارگاهی منعطف در هر دو زمینه مدیریت تولید و بهینه‌سازی ترکیبی امری مهم می‌باشد. با این حال بدست آوردن یک جواب بهینه برای این مسائل در اندازه واقعی و متوسط با رویکردهای بهینه‌سازی رایج با توجه به پیچیدگی محاسباتی بالا، امری دشوار می‌باشد. برای حل مسائل حقیقی با بیش از دو کار و از آنجاییکه مسائل FJSP جز مسائل NP-hard می‌باشند، دو نوع از روش‌های هیوریستیک برای حل در اندازه واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد: روش‌های سلسله‌مراتبی^۱ و روش‌های یکپارچه^۲. در روش سلسله‌مراتبی، تخصیص عملیات به ماشین‌ها و توالی عملیات بر روی منابع یا ماشین‌آلات به طور جداگانه و مستقل در نظر گرفته می‌شود. در حالیکه در رویکرد یکپارچه، تخصیص و توالی متمایز نیستند. در مقاله‌ای که توسط فتاحی و همکاران (۲۰۰۷) انجام گرفته است، یک مدل ریاضی و رویکردهای هیوریستیک برای مسائل زمان‌بندی کارگاهی منعطف در نظر گرفته شده است. مدل ریاضی برای بدست آوردن جواب بهینه برای مسائل با اندازه کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد. شش ساختار جستجوی ترکیبی مختلف، وابسته به روش جستجو و هیوریستیک در این مقاله ارائه شده است. آزمایش‌های عددی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم توسعه داده شده، استفاده شده است. می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم سلسله‌مراتبی نسبت به الگوریتم یکپارچه دارای عملکرد بهتری می‌باشد و الگوریتمی که به ترتیب از الگوریتم جستجوی ممنوعه و شبیه‌سازی تبرید استفاده می‌کند از دیگر الگوریتم‌ها مناسب‌تر است. همچنین مشاهدات عددی کیفیت الگوریتم‌های پیشنهادی را تایید می‌کند. تشکیل سلول یکی از قدیمی‌ترین مسائل در سیستم‌های تولیدی سلولی^۳ (CMS) می‌باشد که شامل قطعات تخصیص داده شده، ماشین‌ها و اپراتورهای سلول‌ها است. تولید سلول شامل تعدادی از سلول‌ها می‌باشد که در آن هر سلول مسئول پردازش قطعات مشابه می‌باشد. یکی دیگر از جنبه‌های مهم تشکیل سلول، تخصیص کارگران به سلول‌ها است.

از آنجایی که اپراتورها برای یک مدت طولانی با یکدیگر کار می‌کنند پیشنهاد می‌شود که ویژگی‌های فردی هر اپراتور برای افزایش رضایت و بهره‌وری سیستم در نظر گرفته شود. در این مقاله که توسط آزاده و همکارانش (۲۰۱۵) انجام گرفته است سبک‌های تصمیم‌گیری اپراتور (به عنوان شاخص ویژگی‌های شخصی

¹ Hierarchical Approach

² Integrated Approach

³ Cellular Manufacturing Systems

اپراتور) در نظر گرفته شده و یک مدل برنامه ریزی ریاضی برای خوشه‌بندی قطعات، ماشین‌آلات و کارگر به طور همزمان ارائه شده است. مدل شامل دو هدف می‌باشد: (۱) به حداقل رساندن حرکت‌ها و هزینه‌های داخل سلول (۲) به حداقل رساندن سبک‌های تصمیم‌گیری در میان اپراتورها در هر سلول. در این مقاله از روش ϵ -constraint برای حل مسئله و جمع‌آوری راه‌حل‌های غیر سلطه‌ای مانند راه حل بهینه پارتو استفاده گردیده است. علاوه بر این، از روش تحلیل پوششی داده^۱، روش تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره وزنی^۲ (MCDA) برای انتخاب بهترین راه‌حل از میان جواب‌های بهینه پارتو که با حل مدل ریاضی بدست آمده است، استفاده شده است. با توسعه سریع تکنولوژی در عرصه کامپیوتر، تکنیک مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی برای حل مسائل زمان‌بندی به طور قابل توجهی مورد توجه محققین قرار گرفته است. اگرچه با توجه به ساختار NP-hard این مسائل، این روش حل کارآمد نمی‌باشد ولی فرمول‌بندی برنامه ریزی ریاضی اولین گام در توسعه یک روش هیوریستیک کارآمد می‌باشد. مطالعات مقایسه‌ای متعددی برای مسائل زمان‌بندی مختلف در طول سالیان متمادی انجام گرفته است. اما در مرور ادبیات موجود، بررسی کاملی که مربوط به فرمول‌های ریاضی مسائل زمان‌بندی کارگاهی منعطف باشد، وجود ندارد. دمیر^۳ و ایسلین^۴ (۲۰۱۳) در مقاله ارائه داده شده، چهار فرمول ریاضی از مسائل FJSP که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد را گردآوری کرده‌اند و یک مدل شاخص زمانی^۵ برای مسائل FJSP ارائه داده‌اند.

این فرمول‌های ریاضی تحت سه دسته که توسط نوع متغیر باینری که در توالی عملیات بر روی ماشین مورد استفاده قرار می‌گیرد، ارزیابی می‌شوند. مدل‌ها بر روی آزمون‌هایی با اندازه مختلف استفاده شده‌اند. در آزمایش‌ها، هر چقدر که تعداد عملیات و ماشین‌ها افزایش یابد، زمان محاسبه هم به صورت نمایی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، به منظور بدست آوردن جواب بهینه در مدل‌هایی که بر اساس شاخص زمانی هستند، فواصل زمانی باید تا حد امکان کوچک در نظر گرفته شوند حتی هر واحد زمانی باید برابر با یک ثانیه در نظر گرفته شود. این مورد، زمان محاسبه را به طرز قابل توجهی افزایش می‌دهد و باعث می‌شود که بدترین مدل محاسباتی زمانی بدست آید. دوست‌حقی و همکاران (۲۰۱۳) یک مدل برنامه ریزی غیرخطی مختلط عدد صحیح^۶ (MINLP) برای انباشته اقتصادی و مسائل زمان‌بندی تحویل در یک کارگاه منعطف با ماشین‌آلات موازی نامرتبط که در آن طول افق زمانی محدود است و هر محصول دارای عمر مفید بدون خرابی می‌باشد را ارائه داده‌اند. این مسئله شامل اندازه انباشته و توالی‌ای که در آن تامین‌کننده محصولات متعددی را در یک کارگاه انعطاف‌پذیر تولید می‌کند و قطعات مختلف محصولات را به محل مونتاژ تحویل می‌دهد،

¹ Data Envelopment Analysis Method

² Weighted Multicriteria Decision Analysis

³ Demir

⁴ Isleyen

⁵ Time – Indexed Model

⁶ Mixed – Integer Nonlinear Programing

می‌باشد. مدل MINLP ارائه شده بر اساس استراتژی دوره ای^۱ با در نظر گرفتن عمر مفید است. حل این مسائل به دلیل سختی و اندازه بزرگ در یک زمان منطقی پیچیده می‌باشد. بنابراین از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات ترکیبی^۲ (PSO) استفاده گردیده است. نتایج محاسباتی بدست آمده به ترتیب با جواب های بهینه و کران پایین برای مسائل با اندازه کوچک و بزرگ مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد روش PSO ترکیبی پیشنهادی، برای این گروه مسائل مناسب می‌باشد. این الگوریتم برای ترتیب‌دهی و زمان‌بندی محصولات بر روی مسیر تولید به عنوان قوانین^۳ FAM و SPT توضیح داده شده است. همچنین نتایج نشان داده شده است که قانون FAM جواب های بهتری را در مقایسه با قانون SPT می‌دهد. بر اساس نتایج بدست آمده، کیفیت جواب ها و همچنین زمان محاسباتی بدست آمده با استفاده از الگوریتم^۴ HPSO بهتر از LINGO می‌باشد. تغییرات سیستماتیک همسایگی در یک الگوریتم جستجوی محلی تصادفی، یک الگوریتم متاهوریستیک موثر برای بهینه‌سازی ترکیبی که جستجوی همسایگی متغیر^۵ (VNS) نامیده می‌باشد را عرضه می‌کند.

هانسن^۶ و ملادنوویچ^۷ (۲۰۰۱) یک طرح اولیه با استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی ارائه داده‌اند. اثربخشی این طرح با حل تعدادی از مسائل بهینه‌سازی و ترکیبی کلاسیک نشان داده شده است. در نهایت، چگونگی اثبات الگوریتم ایجاد ستون^۸ با کمک VNS و همچنین استفاده از VNS در تئوری گراف نشان داده شده است. به طور معمول تصمیمات تخصیص و زمان‌بندی در سطوح مختلف چارچوب مدیریت تولید به طور جداگانه گرفته می‌شود. ترکیب چنین تصمیماتی باعث ارائه مسائل پیچیده جدید شده است. کاسم^۹ و همکاران (۲۰۰۲) در مقاله ارائه شده دو روش جدید برای حل مسائل زمان‌بندی کارگاهی و تخصیص به طور مشترک (با انعطاف پذیری کامل یا نسبی) را پیشنهاد داده‌اند. روش اول رویکرد محلی‌سازی^{۱۰} می‌باشد. این رویکرد حل مسائل مربوط به تخصیص منابع را ممکن و یک مدل تخصیصی ایده آل می‌سازد. روش دوم یک رویکرد تکاملی کنترلی با مدل تخصیصی می‌باشد (ساخته شده توسط روش اول). در چنین رویکردی، از الگوریتم ژنتیک پیشرفته برای بهبود جواب استفاده شده است. همچنین در این مقاله، برخی ملاحظات عملی و تئوری در تشکیل کدگذاری قوی‌تر برای ساخت مسئله کارگاهی انعطاف پذیر با استفاده از الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شده است. دو مثال برای نشان دادن کارایی دو روش پیشنهاد شده، ارائه گردیده است. روش استفاده شده در این مقاله باعث تشکیل جواب‌هایی با کیفیت بالا در یک زمان محاسباتی منطقی می‌شود.

¹ Period Strategy

² Particle Swarm Optimization

³ First Available Machine

⁴ Hybrid Particle Swarm Optimization

⁵ Variable Neighborhood Search

⁶ Hansen

⁷ Mladenovic

⁸ Column Generation Algorithm

⁹ Kacem

¹⁰ Approach By Localization

گام اول اعمال AL^1 ، برای حل مسئله تخصیص منابع و ساخت یک طرح تخصیص است. گام دوم اعمال یک الگوریتم کنترل شده رویکرد تکاملی^۲ می‌باشد. جمعیت اولیه از مجموعه تخصیص‌هایی که در مرحله اول هستند، ساخته می‌شوند. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید یک روش بهینه‌سازی تصادفی است که به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقاله ارائه شده برگرفته از روشی در زمینه بهینه‌سازی رایج هیورستیک می‌باشد و مطالعات تجربی کارایی محاسباتی قابل کاربرد برای مسائل فروشنده دوره‌گرد و جزءبندی گراف را ارائه می‌دهند. کرکپاتریک^۳ (۱۹۸۴) در این مقاله، مطالعات تجربی از بهره‌وری محاسباتی که در مسائل فروشنده دوره‌گرد و جزءبندی گراف قابل کاربرد است را ارائه داده است.

روش جستجوی همسایگی متغیر یک روش هیورستیک برای حل مسائل بهینه‌سازی و ترکیبی است که ایده اساسی آن تغییرات سیستماتیک همسایگی است. در این مقاله که توسط ملادنویچ و هانسن (۱۹۹۷) انجام گرفته است قوانین ابتدایی VNS و مسائل مربوط به گسترش این روش ارائه داده شده است. علاوه بر این برنامه‌های کاربردی به طور خلاصه توضیح داده شده است. این برنامه‌ها شامل راه‌حل ابتکاری مسائل متعدد بهینه‌سازی، راه‌هایی برای سرعت بخشیدن به الگوریتم‌های دقیق و تجزیه و تحلیل فرآیندهای اکتشافی می‌باشد. مسئله زمان‌بندی کارگاهی انعطاف‌پذیر FJSP حالت توسعه داده شده مسئله زمان‌بندی کارگاهی کلاسیک می‌باشد. تخصیص هر عملیات به یک ماشین از مجموعه ماشین‌های موجود و تعیین توالی عملیات بر روی ماشین‌آلات در مسائل مربوط به FJSP گنجانده شده است. امیری و همکاران (۲۰۱۰) در این مقاله یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر موازی^۴ (PVNS) که مسئله FJSP را برای حداقل کردن زمان اتمام آخرین فعالیت حل می‌کند، ارائه داده است. موازی بودن در این الگوریتم بر اساس استفاده از جستجوهای متعدد مستقل که شناسایی در فضای جستجو را افزایش می‌دهد، می‌باشد. الگوریتم PVNS پیشنهادی از ساختارهای همسایگی مختلف که مسئول ایجاد تغییر در توالی و تخصیص عملیات برای تولید جواب همسایگی می‌باشد، استفاده می‌کند. نتایج بدست آمده از مطالعات عددی نشان دهنده این است که الگوریتم پیشنهادی یک رویکرد قابل قبول و موثر برای مسائل FJSP می‌باشد. در روش بهینه‌سازی پیشنهادی، حلقه خارجی، شرط توقف الگوریتم را کنترل و حلقه داخلی فرآیند جستجو را اجرا می‌کند. برای جستجوی فضای جواب، حلقه داخلی از دو روش جستجوی محلی و لرزش^۵ استفاده می‌کند. علاوه بر این، دو ساختار همسایگی مربوط به مسئله توالی و سه ساختار همسایگی مربوط به مسئله تخصیص برای تولید جواب‌های همسایگی در روش‌های جستجوی محلی و لرزش از الگوریتم ارائه شده، به کار گرفته شده است. حالت موازی در الگوریتم پیشنهادی، باعث بهبود در فرآیند جستجو می‌شود.

¹ Approach By Localization

² Controlled Evolutionary Algorithm

³ Kirkpatrick

⁴ Parallel Variable Neighborhood Search

⁵ Shake Procedures

توکلی مقدم و مهدی زاده (۲۰۰۷) یک مدل برنامه ریزی مختلط عدد صحیح خطی جدید برای مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی یکسان با در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی کارها که کل زمان جریان ساخت وزنی^۱ (TWFT) را حداقل می‌کند، ارائه کرده‌اند. بیشتر مطالعات موجود محدود به کارهای مستقل می‌باشد و همین‌طور بیشتر روش‌های بهینه‌سازی متداول متمرکز بر روی مسائل زمان‌بندی ماشین‌های موازی بدون در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی و روابط بین کارها می‌باشند. از آنجایی که بدست آوردن یک جواب بهینه برای این نوع مسائل پیچیده NP-hard با مقیاس بزرگ در یک زمان محاسباتی معقول کار دشواری می‌باشد، یک روش فرا ابتکاری بر اساس الگوریتم ژنتیک پیشنهاد گردیده است و برای بدست آوردن یک جواب نزدیک به جواب بهینه مخصوصاً در مسائل با اندازه بزرگ اعمال می‌شود. بعلاوه کارایی الگوریتم پیشنهادی بر اساس چند مسئله‌ی نمونه با نرم افزار لینگو نسخه ۸ مورد مقایسه قرار می‌گیرد. حاجی‌پور و همکاران (۲۰۱۴) یک الگوریتم بهینه‌سازی ارتعاشی تعدیلی (VDO) برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه برای اولین بار ارائه داده‌اند. به این منظور از دو مفهوم مرتب‌سازی سریع غیر سلطه‌ای^۲ و فاصله ازدحامی برای پیدا کردن جواب بهینه پارتو استفاده شده است. اعتبار الگوریتم VDO با استفاده از چند مثال نشان داده شده است. نتایج با الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید چند هدفه^۳ و NSGA-II مورد مقایسه قرار گرفته است و نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم MOVDO^۴ با اختلاف زمانی قابل توجهی زمان محاسباتی می‌باشد درحالی‌که NSGA-II در پیدا کردن جواب پارتو بهتر عمل می‌کند. الگوریتم MOVDO همچنین قادر به تولید جواب‌های درست و توزیع شده بهینه پارتو می‌باشد.

هدف مطالعه انجام شده توسط مهدی‌زاده و همکاران (۲۰۱۰) ارائه یک الگوریتم ترکیبی بر اساس دو الگوریتم فراابتکاری با نام‌های الگوریتم VDO و الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله تصادفی تخصیص مکان^۵ می‌باشد. برای حل مدل به صورت کارتر، الگوریتم سیمپلکس، شبیه‌سازی تصادفی و الگوریتم ترکیبی پیشنهادی برای طراحی یک الگوریتم هوشمند ترکیبی، با هم ترکیب شده‌اند. در نهایت کارایی الگوریتم پیشنهادی، با تعدادی مثال عددی مشخص و اثبات شده است که الگوریتم پیشنهادی قادر به بدست آوردن جواب‌های مناسبی می‌باشد. سرنی^۶ (۱۹۸۵) یک الگوریتم مونت کارلو برای پیدا کردن جواب‌های تقریبی مسئله فروشنده دوره‌گرد ارائه داده است. الگوریتم به طور تصادفی جایگشت‌های ایستگاه‌های سفر فروشنده دوره‌گرد با احتمال وابسته به طول مسیر، تولید می‌کند. همچنین از توزیع بولتزمن-گیبز^۷ استفاده شده است. با استفاده از این الگوریتم جواب‌های بدست آمده بسیار نزدیک به جواب‌های بهینه می‌باشد که این امر

¹ Total Weighted Flow Time

² Non Dominated Storing

³ Multi – Objective Simulated Annealing

⁴ Multi – Objective Vibration Damping Optimization

⁵ Stochastic Capacitated Location – Allocation Problem

⁶ Cerny

⁷ Boltzmann – Gibbs

توسط مثال‌های متعددی نشان داده شده است. همچنین نشان داده شده است که استفاده از قیاس ترمودینامیکی باعث ارائه دیدگاه جدیدی در مسائل بهینه‌سازی و همین‌طور الگوریتم‌های کارتر برای حل می‌شود. در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت، اهداف باید تا حدودی متناقض و مختلف در نظر گرفته شوند. از مشخصات یک برنامه ساخت کارآمد، داشتن کارکردی است که منجر به ایجاد یک مسئله بهینه‌سازی چند معیاره NP-hard می‌شود. در دهه‌های گذشته، الگوریتم‌های به اصطلاح فراابتکاری در مسائل زمان‌بندی به منظور پیدا کردن جواب‌های نزدیک به جواب بهینه در مدت زمان معقول توسعه یافته‌اند. هام^۱ و همکارانش (۲۰۰۹) در این مقاله، مفهوم شبیه‌سازی تبرید را برای تعیین زمان‌بندی ساخت نزدیک به جواب بهینه ارائه داده است. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، یک رویکرد بهینه‌سازی متاهوریستیک شناخته شده‌ی حل مسائل ترکیبی پیچیده می‌باشد. برای حل بسیاری از اهداف بهینه‌سازی متعدد، مفهوم بهینه‌سازی پارتو استفاده می‌شود. بنابراین نتیجه بهینه‌سازی مجموعه‌ای از زمان‌بندی بهینه پارتو است که برای انتخاب دقیقاً یک زمان‌بندی معقول و عملی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در این مقاله یک رویکرد شبیه‌سازی مبتنی بر محدودیت برای تولید جواب‌های همسایگی ممکن در طول فرآیند بهینه‌سازی استفاده شده است.

رویکرد کلی مورد استفاده در این مقاله، بر اساس بهینه‌سازی پارتو و شبیه‌سازی تبرید در ترکیب با بهینه‌سازی مبتنی بر محدودیت است. شبیه‌سازی مبتنی بر محدودیت برای تولید زمان‌بندی معتبر و جواب‌های همسایگی در یک مدت زمان معقول استفاده می‌شود. براه^۲ و همکاران (۱۹۹۱) در این مقاله معیارهای موثر بر تصمیم‌گیری زمان‌بندی و توسعه یک مدل هزینه زمان‌بندی را ارائه داده‌اند. علاوه بر آن مدل‌های ریاضی برای اکثر موارد زمان‌بندی نیز توسعه داده شده است که شامل مسائل ماشین تکی، ماشین‌های موازی، Flow Shop و ... می‌باشند. تابع هدف در این نوع مسائل شامل حداقل کردن هزینه بر اساس مدل هزینه زمان‌بندی جامع می‌باشد. همچنین این مدل‌ها شامل تابع هدف واحد و یا چندگانه متشکل از معیارهای مختلف برنامه ریزی هستند. این مقاله شامل مباحثی راجع به استفاده از روش آزادسازی لاگرانژی برای حل مدل‌های ریاضی به منظور بدست آوردن جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه است.

فتاحی و فلاحی (۲۰۱۰) عوامل غیر قطعی در حین تولید همانند ورود تصادفی کارها، افزایش زمان پردازش و خرابی ماشین‌آلات را بررسی نمودند. پزلاو همکاران (۲۰۰۸) یک الگوریتم ژنتیک را برای مسئله FJSP توسعه دادند. در الگوریتم پیشنهادی استراتژی‌های مختلفی برای تولید جمعیت اولیه ارائه گردید. جائو^۳ و همکاران (۲۰۰۸) یک الگوریتم ژنتیک هیبریدی را برای مسئله FJSP توسعه دادند و در آن روش‌های مختلف جستجوی همسایگی را برای پیدا کردن جواب بهتر مورد بررسی قرار دادند. لی و گوا (۲۰۱۵) یک الگوریتم را برای بررسی مسئله زمان‌بندی چند هدفه ارائه کردند. هدف در این مسئله مینیمم

¹ Hamm

² Brah

³ Gao

کردن حداکثر زمان تکمیل کار و مینیم کردن ماکسیمم زمان کار کرد ماشین میباشد. در این تحقیق نیروی کار منعطف در نظر گرفته شده است. شن^۱ و همکاران (۲۰۱۸) یک الگوریتم جستجوی ممنوعه را برای مدل FJSP با در نظر گرفتن زمان آماده سازی وابسته به توالی ارائه نمودند. کرس^۲ و همکاران (۲۰۱۹) فرض کردند که زمان انجام عملیات وابسته به ماشین و مهارت کارگر می باشد. برای حل این مسئله برای این مسئله، برنامه زمانبندی به دو بخش تقسیم شده است: یک مسئله مسیریابی ماشین با محدودیت های پیشینازی و یک مسئله تخصیص اپراتور.

۲-۸-۲ مرور منابع مسائل زمانبندی کارگاهی منابع دوگانه (DRCJSP)

رن^۳ و همکاران (۲۰۰۹) یک مدل مسئله زمانبندی کارگاهی با منابع دوگانه محدود (ماشین و قالب) را بر اساس عوامل واقعی زمانبندی کارگاهی فرایند قالب ریزی و تزریق ارائه داده اند. یک الگوریتم فعال هیوریستیک همراه با قوانین اولویت دار^۴ به منظور بدست آوردن جواب بهینه مورد استفاده قرار گرفته است. مزیت اصلی این الگوریتم این است که یک راه حل قابل قبول در یک بازه زمانی موثر را بدست می آورد، بنابراین این الگوریتم برای حل این مسائل به کار گرفته می شود. این الگوریتم همچنین برای مسائل بهینه سازی منابع چندگانه محدود می تواند مورد استفاده قرار بگیرد. در نهایت در این مقاله یک مثال برای توضیح الگوریتم که در آن نتایج زمانبندی با نمودار گانت نشان داده شده است، آورده شده است.

به منظور حل مسئله بهینه سازی دو هدفه زمانبندی کارگاهی با منابع دوگانه محدود، یک الگوریتم ژنتیک جانشینی^۵ توسط جینگیاو^۶ و همکارانش (۲۰۱۰) ارائه شده است. تجربه تکاملی جمعیت والد با استفاده از مکمل جمعیت شاخه ای^۷ بر اساس فرومون ها برای سرعت بخشیدن به نرخ همگرایی به ارث برده شده اند. در همین حال، الگوریتم رمزگشایی بر اساس مقایسه میان پنجره های زمانی، عملگر تقاطع منابع^۸ و عملگر جهش منابع^۹ که همگی بر اساس روش کدگذاری چهار بعدی^{۱۰} ساخته شده اند با اشاره به ویژگی منابع دوگانه محدود برای بهبود کلی توانایی جستجو، مورد استفاده قرار می گیرد. علاوه بر این، استراتژی انتخاب قهرمان^{۱۱} بر اساس شاخص پارتو، تاثیر سطح پارتو بر روی کروموزوم ها را به طور آشکارا ضعیف می کند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که عملکرد الگوریتم ژنتیک ارثی دو هدفه، موثر و کارآمد است. در نتیجه الگوریتم

¹ Shen

² Kress

³ Ren

⁴ Priority Rules

⁵ Inherited Genetic Algorithm

⁶ Jingyao

⁷ Branch Population Supplement

⁸ Resource Crossover Operator

⁹ Resource Mutation Operator

¹⁰ Four-Dimensional Coding Method

¹¹ Championship Selection Strategy

DOIGA^۱ با الگوریتم RWSACO^۲ مقایسه گردیده است و با توجه به نتایج بدست آمده، نشان داده شده است که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی برای بهینه‌سازی عملکرد تولیدی تحت شرایط واقعی تحمیل شده توسط محدودیت های کارگر و ماشین سودمند می‌باشد.

لی^۳ و همکاران (۲۰۱۱) در مقاله پیش‌رو یک رویکرد زمان‌بندی بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان^۴ که برای مسائل زمان‌بندی در سیستم‌های تولیدی محدود شده توسط ماشین‌آلات و کارگران ناهمگن که مسئله زمان‌بندی کارگاهی منابع دوگانه با کارگران ناهمگن^۵ نامیده می‌شود را توسعه داده‌اند. این الگوریتم ترکیبی، از ترکیب الگوریتم شبیه‌سازی تبرید^۶ و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان بهره می‌برد و یک مکانیزم کنترلی تطبیقی بر اساس جریان مورچه از مسیر انتخابی به منظور بهبود توانایی جستجوی فضای جواب را پیشنهاد می‌کند. دو طرح تطبیقی از پارامترهایی که به ترتیب بر اساس دفعات تکرار و کیفیت جواب‌های بدست آمده می‌باشند، برای عملی کردن بهینه‌سازی عملکرد توسط مراحل، تحمیل شده‌اند. بنابراین عملکرد روش‌های بهینه با استراتژی‌های تخصیص منابع مختلف با آزمایش‌های شبیه‌سازی شده بر روی مثال‌های واقعی و معیارهای تصادفی مقایسه شده است. هدف بدست آوردن برخی از دیدگاه‌ها از تاثیر استراتژی‌های تخصیص منابع بر روی نتایج زمان‌بندی و بهبود بر روی عملکرد همگرایی با پارامترهای تنظیمی تطبیقی^۷ می‌باشد. بر اساس آزمایشات شبیه‌سازی، استراتژی تخصیص منابع نقش مهمی را در ساخت جواب‌های سودمند دارد در حالی که EFTMAC^۸ به طور عمده بر روی شاخص زمانی جواب می‌دهد و در درجه دوم بر روی شاخص هزینه، منجر به عملکرد بهتر می‌گردد. در این مقاله تنها شاخص هزینه در نظر گرفته شده است در حالی که شاخص زمان معیار مهم دیگری برای ارزیابی می‌باشد. جیانینگ^۹ (۲۰۰۵) یک مسئله زمان‌بندی کارگاهی با محدودیت منابع دوگانه بر اساس الگوریتم ژنتیک را مورد مطالعه قرار داده‌اند. الگوریتم ارائه شده ترکیبی از الگوریتم‌های ژنتیک و کاهش با قوانین توزیع می‌باشد که به طور منطقی منابع ماشین‌آلات و کارگر را به کارها تخصیص می‌دهد و جواب بهینه را برای بعضی از پارامترها بدست می‌آورد. الگوریتم ارائه داده شده در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها بر روی متوسط زمان جریان جواب بهتری می‌دهد و کدگذاری اطلاعات مربوط به کارگران و ماشین‌آلات را در بر ندارد. یک الگوریتم ترکیبی بر اساس الگوریتم کلونی مورچگان که برای مسائل زمان‌بندی کارگاهی منابع دوگانه محدود با کارگران ناهمگن توسعه داده شده است، پیشنهاد داده‌اند. الگوریتم یک مجموعه‌ای از جواب‌های پویا را، بر اساس محدودیت تکنولوژی

¹ Double-Objective Inherited Genetic Algorithm

² Random Weight Sum Ant Colony Optimal

³ Li

⁴ Ant Colony Optimization

⁵ Dual Resource Constrained Job Shop Scheduling Problem With Heterogeneous Workers

⁶ Simulated Annealing Algorithm

⁷ Adaptive Adjusting Parameters

⁸ Earliest Finish Time-Minimum Additional Cost

⁹ Jianying

برای هر مورچه به منظور بهبود بهره‌وری محاسبه‌ی الگوریتم ایجاد می‌کند. در همین حال، الگوریتم با بهره‌گیری از الگوریتم شبیه‌سازی تبریدی به عنوان مکانیزم جستجوی محلی به افزایش کیفیت جواب بهینه می‌پردازد.

در مطالعه انجام شده از روش زمان‌بندی پیشنهاد شده، برای مقایسه عملکرد چهار قاعده توزیع برای ماشین‌آلات و کارگرانی که به کارها تخصیص داده شده‌اند، استفاده شده است. با استراتژی بهینه مرتب‌سازی منابع^۱، الگوریتم پیشنهاد شده با سایر الگوریتم‌های کلونی مورچگان در نمونه‌های تصادفی قابل توجه مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که طرح‌های زمان‌بندی بهینه‌تری با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان ترکیبی در بیشتر موارد بدست می‌آید. نتایج تحلیل واریانس حاکی از آن است که الگوریتم SPT^۲ برای حل مسائل DRCJSP-HW^۳ مناسب می‌باشد. در نتیجه الگوریتم TACOSA^۴ با الگوریتم EAS^۵ مقایسه شده است و نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی برای بهینه‌سازی عملکرد تولید تحت شرایط واقعی بسیار سودمند می‌باشد. مسئله زمان‌بندی کارگاهی معمولاً شامل بهینه‌سازی اهداف چندگانه با چندین محدودیت منابع و زمان غیرقطعی عملیات، قطعات برای پردازش دستگاه، کارگرانی که با دستگاه کار می‌کنند و سایر عوامل می‌باشد.

در مقاله لی^۶ و هوآنگ^۷ (۲۰۱۶) یک رویکرد زمان‌بندی جدید بر اساس الگوریتم ژنتیک ارائه داده شده است. این الگوریتم برای مسائل زمان‌بندی در سیستم‌های تولیدی که توسط ماشین‌آلات و کارگران ناهمگون محدود شده‌اند توسعه داده شده است.

در این الگوریتم تجربه تکاملی کروموزوم‌های والد توسط جمعیت انشعابی یا شاخه‌ای^۸ به ارث برده می‌شود که از ژن‌های نارس یا نابهنگام جلوگیری می‌کند و یک ژن عالی را حفظ می‌نماید. سایر مکانیزم‌های بهینه‌سازی مانند عملگر تکاملی نخبه^۹، عملگر انتخابی چرخه رولت با تقسیم بخش‌ها^{۱۰}، استراتژی زمان‌بندی بر اساس بازه زمانی فشرده^{۱۱}، برای بهبود الگوریتم پیشنهاد شده است. عملکرد رویکرد پیشنهادی بر اساس آزمایش‌های شبیه‌سازی با مثال‌های تصادفی اعتبارسنجی گردیده است. در نتیجه اثبات شده است که الگوریتم زمان‌بندی توسعه داده شده برای مسائل زمان‌بندی DRCJSP تحت شرایط واقعی تحمیل شده توسط

¹ Optimal Resource Collocating Strategy

² Shortest Paths Trees

³ Dual-Resource Constrained Job Shop Scheduling Heterogeneous Workers

⁴ Template Assembly Of Complex Structures

⁵ Elite Ant System

⁶ Li

⁷ Huang

⁸ Branch Population

⁹ Elite Evolutionary Operator

¹⁰ Roulette Selection Operator With Sector Partition Time Window

¹¹ Scheduling Strategy Based On Compressed Time Window

محدودیت ماشین و کارگر در دسترس، مفید می‌باشد. در مقاله لی^۱ و گو^۲ (۲۰۱۵) مسئله زمان‌بندی کارگاهی محدودیت منابع دوگانه با زمان پردازش فاصله‌ای^۳ و منابع ناهمگن^۴ مورد بررسی قرار گرفته است. یک روش جستجوی دینامیکی DNS^۵ که از دو مرحله تشکیل شده نیز پیشنهاد داده شده است. همچنین از نمایش دو رشته‌ای استفاده شده است و کروموزوم‌های آن شامل رشته مبتنی بر عملیات و رشته منابع می‌باشد. چندین راه حل اولیه، تولید و در مرحله اول بهبود داده شده است و تنها یک جواب در مرحله دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. چهار ساختار همسایگی و مکانیزم انتقال دینامیکی آن‌ها برای تولید جواب‌های جدید مورد استفاده قرار گرفته است. روش DNS بر روی تعدادی از مثال‌ها مورد آزمایش و با الگوریتم‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که این روش می‌تواند نتایج امیدوارکننده‌ای را برای مسئله فراهم کند. سیستم‌های تولید در دنیای واقعی با توجه به سطح قابل توجهی از محدودیت منابع عمل می‌کند. یکی از مدل‌هایی که هم محدودیت کارگر و هم محدودیت ماشین‌آلات را در نظر می‌گیرد سیستم‌های DRC نامیده می‌شوند. در مقاله فاسیو^۶ و همکارانش (۲۰۱۵) تعدادی از ماشین‌آلات توسط تعدادی از اپراتورها اداره می‌شوند. مطالعه موردی در این پژوهش یک شرکت تولیدی ایتالیایی می‌باشد که از تعدادی ماشین‌های موازی یکسان که توسط مجموعه‌ای از کارگران اداره می‌شود، استفاده می‌کند. هر کارگر بر روی یک ماشین با زمان‌های پردازش بارگذاری و تخلیه مربوطه، زمان‌بندی شده است. رویکرد پیشنهادی یک رویکرد شبیه‌سازی تبرید برای حل اینگونه مسائل می‌باشد. تحلیل حساسیت مربوطه برای مجموعه‌ای از پارامترهای الگوریتم که برای حل طرح‌های DRC استفاده شده، انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت n_{mach}/n_{op} بر روی عملکرد سیستم تولیدی تاثیر می‌گذارد n_{mach} (تعداد ماشین‌آلات و n_{op} تعداد عملیات می‌باشد).

همچنین تاثیر نسبت منابع محدود برای طرح‌های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و نشان داده شده است که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای مسائل با محدودیت منابع تکی (واحد) بهتر عمل می‌کند. در مقاله ژانگ^۷ و همکارانش (۲۰۱۵) یک الگوریتم شبیه‌سازی ازدحام ذرات ترکیبی^۸ جدید برای حل مسائل زمان‌بندی منابع دوگانه محدود با انعطاف‌پذیری منابع ارائه شده است. ذرات بر اساس طرح برنامه نویسی کروموزوم سه بعدی از توالی عملیات و تخصیص منابع نشان داده شده است. در مرحله اول، یک روش مقداردهی جمعیت مختلط برای ذرات استفاده شده است. آن‌گاه یک رویکرد گسسته بهینه‌سازی ازدحام ذرات به عنوان فرایند جستجو با در نظر گرفتن ویژگی‌های محدودیت منابع دوگانه طراحی شده است. علاوه بر

¹ Lei

² Guo

³ Interval Processing Time

⁴ Heterogeneous Resources

⁵ Dynamical Neighborhood Search

⁶ Faccio

⁷ Zhang

⁸ Hybrid Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm

این، یک رویکرد شبیه‌سازی تبرید با ساختار همسایگی متغیر برای بهبود توانایی جستجوی محلی برای الگوریتم پیشنهادی معرفی شده است. در نهایت، نتایج تجربی برای نشان دادن اثربخشی الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است. در مقاله فلن^۱ و همکاران (۱۹۹۳) دو استراتژی افزایش سطح نیروی کار و افزایش انعطاف‌پذیری کارگر مورد استفاده قرار گرفته است. داشتن نیروی کار آموزش دیده به مدیران اجازه انتقال کارگران برای تنظیم همپوشانی^۲ موجود در کارگاه‌ها را می‌دهد. یک رویکرد دیگر برای افزایش انعطاف‌پذیری از طریق اضافه کردن نیروی کار می‌باشد. اضافه کردن نیروی کار جدید باعث افزایش انعطاف‌پذیری می‌شود زیرا میانگین استفاده در کارگاه‌ها و در نتیجه آن احتمال وجود همپوشانی در مرحله اول هم کاهش می‌یابد. این مقاله مزایای توسعه نیروی کار چندمهارته با مزایای نیروی کار اضافه را مورد بررسی قرار داده است. هر دو روش باعث توسعه در شبیه‌سازی مسئله کارگاهی ترکیبی با محدودیت منابع دوگانه‌ی فرضی می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که توسعه نیروی کار چند مهارته یک رویکرد محافظه‌کارانه‌تری برای بهبود تولید نسبت به افزایش سطح نیروی انسانی می‌باشد. با این حال استفاده از نتایج نیروی کار اضافی باعث بهبود بیشتری نسبت به تعلیم نیروی کار می‌شود. همچنین هزینه مرتبط با این بهبودها بیشتر از کارگران آموزش‌دیده می‌باشد. بهترین تصمیم ترکیب این دو استراتژی است.

لوبو^۳ و همکارانش (۲۰۱۳) در مقاله پیش‌رو عنوان کرده‌اند که یک عملیات صنعتی رایج به صورت یک کارگاه با منابع محدود دوگانه می‌باشد جایی که الف) هدف حداقل کردن حداکثر دیرکرد کار^۴ باشد ب) ماشین‌آلات به صورت گروهی سازمان یافته‌اند. ج) هر کارگر به یک گروه ماشین‌آلات خاص اختصاص داده می‌شود. به دلیل اینکه این مسئله در گروه مسائل NP-hard طبقه‌بندی می‌شود، پیدا کردن راه‌حل‌های بهینه توسط شمارش غیرعملی می‌باشد. این مقاله جزئیات یک روش برای محاسبه حد پایین L_{max} برای ارزیابی عملکرد مطلق راه‌حل‌های ابتکاری را ارائه داده است. فلن و فلر^۵ (۲۰۰۱)، در مقاله ارائه شده شرایطی که در آن کارگران سطوح مختلف آموزش را در واحد‌های مختلف دریافت میکنند و همچنین سطوح مختلف کارایی در هر وظیفه را دارا می‌باشند، را مورد بررسی قرار میدهند. نتایج تحقیقات نشان میدهد که حتی در سطوح یکسان از انعطاف‌پذیری کارگاه، ترکیبی از آموزش کارگران دارای تاثیر قابل توجهی بر روی عملکرد کارگاه دارند. در حقیقت نتایج نشان میدهد که ترکیب کارگران بدون انعطاف و کارگران با انعطاف‌پذیری بالا بهتر از کارگران با انعطاف‌پذیری یکسان است.

¹ Felan

² Overlap

³ Lobo

⁴ The Maximum Job Lateness

⁵ Fry

در مقاله‌ای که توسط لی^۱ و گو^۲ (۲۰۱۴) ارائه شده است مسئله زمان‌بندی کارگاهی انعطاف‌پذیر با منابع دوگانه محدود FJSP^۳ در نظر گرفته شده است و یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر تاثیرگذار VNS^۴ که در آن جواب مسئله به عنوان یک رشته چهارتایی از عملیات مرتب‌شده و منابعشان نشان داده شده است ارائه گردیده است. دو روش جستجوی همسایگی به طور پی در پی به منظور تولید جواب‌های جدید برای دو زیرمسئله از مسئله مورد نظر به ترتیب اجرا گردیده است. روش VNS بر روی مثال‌های مختلفی مورد آزمایش قرار گرفته و با دیگر روش‌ها مقایسه شده است. نتایج محاسباتی، مزیت قابل توجه روش VNS در مسئله مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در واقع روش VNS به منظور حداقل‌سازی زمان اتمام آخرین کار^۵ مورد استفاده قرار می‌گیرد و از دو روش جستجوی همسایگی^۶ و مکانیزم راه اندازی مجدد^۷ تشکیل شده است.

۹-۲ مرور منابع مرتبط با مسئله نگهداری و تعمیرات

۹-۲-۱ مرور منابع نت پیشگیرانه

مقدم و آش^۸ (۲۰۱۱) مدل‌های جدید بهینه‌سازی را برای تعیین برنامه‌های نگهداری پیشگیرانه‌ی بهینه و جایگزینی در سیستم‌های تعمیرات و نگهداری مورد مطالعه قرار داده‌اند. هدف تعیین طرحی برای هر یک از اجزا در سیستم با حداقل کردن هزینه کل و حداکثر کردن قابلیت اطمینان سیستم در افق برنامه ریزی می‌باشد. آزمایش‌های انجام گرفته تاثیر پارامترها را بر ساختار طرح‌های جایگزینی و نگهداری پیشگیرانه در سیستم‌های چندجزئی مورد بررسی قرار می‌دهند. علاوه بر آن، آزمایش گسترده‌ای برای تجزیه و تحلیل و مقایسه کارایی و صحت الگوریتم‌های متاهوریستیک و دقیق طراحی شده است. مقدم و آش^۸ در همان سال مدل‌های ریاضی و یک رویکرد جواب برای تعیین برنامه تعمیرات نگهداری پیشگیرانه برای یک سیستم سری تعمیرات و نگهداری با در نظر گرفتن نرخ افزایشی میزان وقوع شکست^۹ را ارائه داده‌اند.

افق برنامه ریزی تعمیرات و نگهداری به دوره‌های مجزا و دارای اندازه یکسان تقسیم می‌شود و در هر دوره، سه عمل ممکن برای هر جز (نگهداری، جایگزینی و انجام ندادن اقدام) در نظر گرفته شده است. به طور خاص، به حداقل رساندن هزینه کل با توجه به محدودیت بر روی قابلیت سیستم و حداکثر کردن قابلیت اطمینان سیستم در محدودیت مربوط به بودجه بر روی هزینه کلی مدل‌سازی شده است. به عنوان روش

¹ Lei

² Guo

³ Flexible Job Shop Scheduling Problem

⁴ Variable Neighborhood Search

⁵ Makespan

⁶ Neighbourhood Search Procedures

⁷ Restarting Mechanism

⁸ Usher

⁹ Rate of Occurrence of Failure

بهینه‌سازی، روش برنامه ریزی پویای ترکیبی با روش شاخه و کران استفاده شده است و کارایی رویکرد استفاده شده از طریق مثال عددی نشان داده شده است.

چنگ^۱ و همکارانش (۲۰۱۱) مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی نامرتبط با فعالیت‌های تعمیرات رو به خرابی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. هر ماشین حداکثر دارای یک فعالیت نگهداری می‌باشد که در هر بازه زمانی در افق زمانی تولید اتفاق می‌افتد. زمان انجام فعالیت نگهداری به صورت خطی با زمان شروع آن افزایش می‌یابد. هدف حداقل کردن زمان تکمیل کل یا کارکرد کلی ماشین می‌باشد. نشان داده شده است که هر دو مسئله را می‌توان در زمان چندجمله‌ای حل نمود.

نورالفتح و چاتلت^۲ (۲۰۱۲) ر مقاله ارائه شده، مسئله یکپارچه‌سازی نگهداری پیشگیرانه و برنامه ریزی تولید تاکتیکی^۳ برای یک سیستم تولیدی متشکل از اجزای موازی، در حضور وابستگی اقتصادی و دلایل شکست، را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه از مدل فاکتور β برای نشان دادن دلایل شایع شکست استفاده شده است. به این معنی که دو عامل احتمالی برای شکست وجود دارد: شکست مستقل هر یک از قطعات^۴ و علت شکست شایع تمام اجزا به طور همزمان. علاوه بر این، حداقل تعمیرات در میان جایگزینی‌های دوره‌ای بر روی قطعات از کار افتاده یا شکست خورده انجام گرفته است. هدف تعیین استراتژی یکپارچه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اندازه انباشته^۵ می‌باشد که مجموع هزینه تعمیرات نگهداری پیشگیرانه و اصلاحی، هزینه‌های راه اندازی، هزینه‌های نگهداری، هزینه‌های تولید را در حالی که تقاضا برای تمام محصولات در طول افق زمانی را برآورده می‌کند، حداقل می‌نماید. از مثال‌های عددی برای نشان دادن رویکرد پیشنهادی استفاده شده است. در بیشتر مطالعات صورت گرفته، برنامه ریزی تولید و برنامه ریزی تعمیرات و نگهداری معمولاً به صورت جداگانه انجام گرفته است و به عنوان یک مدل یکپارچه مورد مطالعه انجام نشده است. بنابراین پان^۶ و همکارانش (۲۰۱۰) در این مطالعه، یک مدل زمان‌بندی یکپارچه با ترکیب برنامه ریزی تولید و برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای مسائل تک ماشین با هدف حداقل کردن حداکثر تاخیر وزنی ارائه شده است. در این مدل، یک زمان نگهداری متغیر با توجه به خرابی ماشین‌ها در نظر گرفته شده و در نهایت یک مثال عددی با استفاده از مدل برنامه‌ریزی تولید بهبود یافته نشان داده شده است. نتایج محاسباتی نشان‌دهنده کارایی مدل پیشنهادی می‌باشد. هنگامی که مدل‌های تعمیرات و نگهداری برای سیستم‌های عملیاتی مستمر پیچیده با ضرر و زیان تولیدی بالا مورد توسعه قرار می‌گیرند، مدت زمان برنامه تعمیرات و نگهداری به منظور ارائه یک برنامه

¹ Cheng

² Châtelet

³ Tactical Production Planning

⁴ Independent Failure Of Single Components

⁵ Lot Sizing

⁶ Pan

تعمیرات و نگهداری موثر و کارا، مورد توجه قرار می‌گیرد. لاگون^۱ و همکارانش (۲۰۱۰) در این مقله، یک مدل نگهداری پیشگیرانه برای هماهنگی اجزاء جایگزینی در یک سیستم چند جزئی ارائه داده‌اند. مدل بر اساس سیاست نوسازی دوره‌ای جزئی^۲ می‌باشد. در هر تکرار جزئی، گروهی از قطعات جایگزین تعریف شده است. این مدل برای زمان‌های جایگزینی غیر قابل اغماض و با فرضیات مختلف در نظر گرفته شده است. اثر مربوط به زمان نگهداری بر روی سیاست بهینه توسط نتایج عددی نشان داده می‌شود.

۲-۹-۲ مرور منابع نت پیشگیرانه در سیستم تولید کارگاهی

گل‌مکانی و نمازی (۱۳۹۱) مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی چند مسیره^۳ با محدودیت در دسترس نبودن ماشین‌آلات در دوره‌های زمانی از قبل تعیین شده را مورد بررسی قرار داده‌اند. هدف در این مطالعه، کاهش زمان انجام کارها می‌باشد. همچنین آن‌ها یک الگوریتم ابتکاری بر مبنای الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی را ارائه داده‌اند. علاوه بر آن، از ۳۰ در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی بوسیله الگوریتم مذکور حل گشته و مشخص شده است که الگوریتم پیشنهادی از نظر زمان مورد نیاز برای حل و مقدار بدست آمده برای تابع هدف، مطلوب می‌باشد.

مرادی و همکارانش (۲۰۱۱) در مقاله پیشنهادی به بررسی مسئله یکپارچه زمان‌بندی Job Shop انعطاف پذیر و با در نظر گرفتن فعالیت های تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه^۴ با استفاده از روش های بهینه سازی چند هدفه پرداخته‌اند. آن‌ها همچنین پیدا کردن راه حلی بین اهداف تولیدی و همچنین تعمیرات نگهداری را مورد بررسی قرار داده‌اند. به منظور انجام فعالیت های تعمیرات و نگهداری، از مدل های قابلیت اطمینان استفاده شده است. در این مقاله به طور همزمان دو هدف در نظر گرفته شده است: حداقل کردن زمان تکمیل آخرین فعالیت برای بخش تولیدی و به حداقل رساندن عدم دسترس پذیری برای قسمت تعمیرات نگهداری. بنابراین دو تصمیم به صورت همزمان گرفته شده است: (۱) پیدا کردن تخصیص مناسب برای n شغل بر روی m ماشین به منظور حداقل کردن Makespan و (۲) تصمیم برای اجرای فعالیت های تعمیرات و نگهداری به منظور حداقل کردن عدم دسترس پذیری. در این مقاله چهار روش بهینه سازی چند هدفه، به منظور پیدا کردن بهینه پارتو در مقابل مسائل انعطاف پذیر Job Shop مورد مقایسه قرار گرفته است.

در مطالعه انجام گرفته توسط وانگ^۵ و یو^۶ (۲۰۱۰) یک مسئله زمان‌بندی Job Shop انعطاف پذیر با محدودیت در دسترس پذیری ماشین در نظر گرفته شده است. در این مطالعه عملیات تعمیرات و نگهداری بر روی هر ماشین در طول دوره برنامه ریزی انجام گرفته است. همچنین زمان شروع فعالیت های تعمیرات و

¹ Laggoune

² Partial Periodic Renewal Policy

³ Multiple Route Job Shop

⁴ Preventive Maintenance

⁵ Wang

⁶ Yu

نگهداری هم به صورت انعطاف‌پذیر و هم به صورت ثابت در یک بازه زمانی در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، دو محدودیت تعمیرات و نگهداری مورد بررسی قرار گرفته است: منابع تعمیرات و نگهداری کافی در دسترس^۱ و یا تنها یک منبع تعمیرات و نگهداری در دسترس. در این مسئله، از الگوریتم جستجوی فیلتر پرتو جستجو^۲ بر اساس الگوریتم هیوریستیک پیشنهاد شده است. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده این است که الگوریتم جستجوی پیشنهادی یک رویکرد قابل قبول و موثر برای مسائل FJSP با فعالیت‌های نگهداری می‌باشد.

شی^۳ و جنگ^۴ (۲۰۱۶) در این مقاله یک استراتژی شرایط محور فرصت طلب در حالت پویا برای سیستم‌های چند جزئی ارائه داده است. این استراتژی بر اساس پیش‌بینی زمان واقعی از عمر مفید باقی مانده تحت ملاحظات همزمان وابستگی تصادفی و اقتصادی می‌باشد. با توجه به داده‌های پایش وضعیت، تاثیر سطح تخریب یک جزء بر روی عمر مفید باقی مانده سایر اجزا مدل سازی شده است.

سپس یک مدل بهینه‌سازی با انتخاب منطقه تعمیرات فرصت طلب در حالت پویا و ساختار گروهی بهینه که متوسط هزینه نگهداری بلند مدت سیستم را حداقل می‌کند ساخته می‌شود. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که روش ارائه شده کارایی تولید را با فرض قابلیت اطمینان سیستم افزایش و هزینه‌های نگهداری و عملیاتی سیستم را کاهش می‌دهد.

چن^۵ (۲۰۱۱) در مطالعه پیش‌رو یک استراتژی نگهداری پیشگیرانه دینامیک را برای سیستم تولیدی رو به زوال چند مرحله‌ای ارائه داده است. از ماتریس احتمالی انتقال حالت وابسته به زمان برای توصیف سیستم پیری و رو به وخامت استفاده شده است. ماتریس انتقال احتمال فعلی و عامل پیری بر اساس داده‌های تاریخی برآورد شده‌اند. اقدام تعمیرات و نگهداری بهینه در هر حالت عملیاتی و در هر زمان معین با کمترین هزینه کل مورد انتظار به ازای هر واحد زمانی در طول یک بازه زمانی محدود بدست می‌آید.

هو^۶ و ژیانگ^۷ (۲۰۱۶) یک رویکرد تعمیر و نگهداری پیشگیران فرصت طلب برای یک سیستم چند ماشینه با تولید دسته‌ای الگوی کششی ارائه شده است. یکی از اهداف این مطالعه ارائه مدل تکاملی از قابلیت اطمینان و نرخ مخاطره زمانی که شرایط عملیاتی تغییر می‌کند و توسعه یک مدل نگهداری و تعمیرات ناقص از عملیات ماشین‌ها می‌باشد با شرایط عملیاتی متغیر، می‌باشد. هدف بعدی ارائه یک سیاست تعمیرات و نگهداری پویا برای بهینه‌سازی تعمیرات و نگهداری گروه ماشین‌ها در هر شیفت دسته‌ای می‌باشد. در انتها یک مثال عددی برای تایید اثربخشی مدل پیشنهادی ارائه شده است.

¹ Sufficient Maintenance Resource Available

² A Filtered Beam Search Algorithm

³ Shi

⁴ Zeng

⁵ Chen

⁶ Hu

⁷ Jiang

لیو^۱ و همکارانش (۲۰۱۴) یک سیاست تعمیرات و نگهداری پویا با اجزا رو به فرسایش پیوسته را مورد بررسی قرار داده‌اند. متفاوت از سیاست تعمیرات و نگهداری هزینه محور رایج، استراتژی نگهداری پیشنهادی از لحاظ اندازه و مقدار فرمولبندی شده است. در مرحله اول، اهمیت بازده-هزینه برای انتخاب مهمترین جز معرفی شده است. در مرحله دو، سطح بهینه نگهداری و تعمیرات با حداکثر کردن ارزش خالص تعمیرات و نگهداری بدست می‌آید. در نهایت یک مثال عددی برای نشان دادن سیاست پیشنهادی ارائه شده است. همانطور که اشاره شد، این تحقیق به توسعه مدل های FJSP تحت خرابی احتمالی ماشین‌ها می‌پردازد و مسئله FJSP-PMB تعریف شده است. از جمله پژوهش اخیر (از سال ۲۰۲۰ به بعد) و مرتبط با این موضوع نیز می‌توان به بایکاسقلو و همکاران^۲، (۲۰۲۰)، بایکاسقلو و مادنوقلو^۳، (۲۰۲۱)، ژانگ و همکاران^۴، (۲۰۲۲) و حاجی بابایی و بهنامیان، (۲۰۲۳) اشاره کرد.

۲-۱۰ شکاف تحقیقاتی و انگیزه‌های تحقیق جاری

در جدول زیر بر اساس ۶ مولفه مختلف به مقایسه این پژوهش با برخی از مهمترین پژوهش‌های اخیر پرداخته شده است.

- مولفه اول از منظر نوع مسئله زمانبندی است که در دو حالت JSP کلاسیک و FJSP می‌باشد که این تحقیق از نوع FJSP است.
 - (این تحقیق FJSP است)
- مولفه دوم از منظر منابع در زمانبندی می‌باشد که در دو حالت تک منبع یا SRC و منابع دوگانه محدود DRC می‌باشد، که این تحقیق از نوع DRC است.
 - (این تحقیق SRC است و محدودیت ماشین را در نظر می‌گیرد)
- مولفه سوم از منظر پرداختن به خرابی ماشین‌ها و اختلال در کارگاه است و یا عدم پرداختن به آن است
 - این تحقیق خرابی ماشین‌ها و به عبارت دیگر اختلال در کارگاه را به صورت سناریوهای تصادفی محتمل الوقوع در نظر می‌گیرد و تحت PMB است.
- مولفه چهارم از منظر کنترل عدم قطعیت و بهینه‌سازی استوار است.

¹ Liu

² Baykasoğlu

³ Baykasoğlu & Madenoğlu

⁴ Zhang et al.

○ این تحقیق با رویکرد RSP به بهینه‌سازی استوار تحت عدم قطعیت مرتبط با خرابی ماشین‌ها می‌پردازد.

● مولفه پنجم مرتبط با توابع هدف است.

○ این تحقیق به صورت دوهدفه است و در کنار هدف کمینه‌سازی زمان، کمینه‌سازی هزینه‌های نت پیشگیرانه نیز در نظر گرفته می‌شود.

● مولفه ششم به رویکرد مدل‌سازی و حل مسئله اشاره دارد.

○ در این تحقیق رویکرد RSP دو هدفه با فرمولاسیون MILP ارائه شده و از روش AEC برای موازنه توابع هدف استفاده می‌شود.

جدول ۱-۲. مقایسه پژوهش حاضر با برخی از مقالات مرتبط

پژوهش	مسئله زمانبندی		منبع (ماشین-انسان)		خرابی ماشین	مواجهه با عدم قطعیت و استواری	تابع/توابع هدف			رویکرد حل
	JSP	FJSP	SRC	DRC			SO	BO	معیار کمی	
پازلا و همکاران (۲۰۰۸)		✓	✓				✓		Makespan	GA
ژائو و همکاران (۲۰۰۸)		✓	✓				✓		Makespan	Hybrid GA & VND
لی و ژائو (۲۰۱۵)		✓	✓			✓	✓		Makespan	MA
شن و همکاران (۲۰۱۸)		✓	✓				✓		Makespan	TS
کرس و همکاران (۲۰۱۹)		✓	✓			✓		✓	Makespan & tardiness	EHD
جابر و همکاران (۲۰۱۰)		✓		✓			✓		Weighted average physical work	MILP
لی و همکاران (۲۰۱۱)		✓		✓				✓	Earliness & tardiness	ACO & SA
لی و ژائو (۲۰۱۴)		✓		✓		✓	✓		Makespan	VNS
یزدانی و همکاران (۲۰۱۵)		✓		✓			✓		Makespan	SA
لی و همکاران (۲۰۱۶)		✓		✓				✓	makespan & cost	GA
زندیه و ادیبی (۲۰۱۰)	✓		✓		✓		✓		Mean flow time	VNS
لی (۲۰۱۲)	✓		✓		✓		✓		Makespan	GA-PSO
ژیانگ و همکاران (۲۰۱۳)		✓	✓		✓	✓	✓		Makespan	MOEA
سان و همکاران (۲۰۱۴)		✓	✓		✓		✓		Maximal profit	GT
نویری و همکاران (۲۰۱۷)		✓	✓		✓		✓		Makespan	PSO
بادالا و همکاران (۲۰۱۹)		✓	✓		✓		✓		Makespan	Heuristic
بایکاسوقلو و همکاران (۲۰۲۰)		✓	✓	✓			✓		Makespan	GRAS
بایکاسوقلو و ماندقو (۲۰۲۱)		✓	✓		✓			✓	Tardiness	GRAS
ژانگ و همکاران (۲۰۲۲)	✓		✓		✓	✓		✓	Makespan & Energy	PSO
حاجی بابایی و بهنامیان (۲۰۲۳)		✓	✓		✓			✓	Makespan & Pollution	LR

تحقیق ما		☑	☑		☑	☑		☑	کمینه سازی زمان کمینه سازی هزینه نت	MILP RSP AEC
<p>راهنما:</p> <p>SO (Single Objective); BO (Bi-Objective); JSP (Job-Shop Scheduling Problem); FJSP (Flexible Job-Shop Scheduling Problem); SRC (Single-Resource Constrained); DRC (Dual-Resource Constrained); RSP (Robust Scenario-Stochastic Programming); AEC (Augmented Epsilon Constraint); LR (Lagrangian Relaxation); GRAS (Greedy randomized adaptive search); MOEA (Multi-Objective Evolutionary Algorithm); PSO (Particle Swarm Optimization); MA (Memetic Algorithm); TS (Tabu Search); (Exact Heuristic Decomposition) ; VND (Variable Neighborhood Descent); ACO (Ant Colony Optimization); VNS (Variable Neighborhood Search); GT (Game Theory); MILP (Mixed Integer Linear Programming)</p>										

به طور خلاصه با مقایسه این پژوهش با تحقیقات مشابه ملاحظه می شود که این تحقیق برای اولین بار که به حل مسئله FJSP-PMB با در نظر گرفتن خرابی ماشین آلات و در نظر گرفتن اهداف کمینه سازی زمان و کمینه سازی هزینه های نت می پردازد. همچنین ارائه یک مدل جدید مبتنی بر رویکرد RSP، در نظر گرفتن یک تابع هدف جدید و پنجره زمانی نرم از دیگر جنبه های نوآوری این پژوهش به حساب می آید.

فصل سوم:

مدل سازی و روش حل

۱-۳ مقدمه

در این فصل، ابتدا به تشریح مسئله موردنظر این تحقیق پرداخته می‌شود که یک توسعه از مسئله FJSP تحت خرابی ماشین است. سپس، ابتدا یک مدل پایه آورده می‌شود و این مدل برای مسئله موردنظر تحقیق توسعه داده می‌شود. از آنجا که مدل پیشنهادی بر پایه رویکرد بهینه‌سازی سناریو محور استوار است، این رویکرد به طور کامل تشریح و نحوه فرمولاسیون مسئله بر اساس آن توضیح داده می‌شود. در پخش پایانی نیز به روش حل و موازنه توابع هدف مسئله پرداخته می‌شود.

۲-۳ بیان مسئله

در توسعه مدل‌های زمانبندی کلاسیک JSP^1 و $FJSP^2$ ، در این تحقیق به بهینه‌سازی استوار در مسئله FJSP تحت خرابی ماشین با نگهداری و تعمیرات^۳ پیشگیرانه (به اختصار مسئله $FJSP-PMB^4$) که در آن خرابی ماشین‌ها (طی پردازش روی کارهای تخصیص داده شده به آنها) در نظر گرفته می‌شود و برنامه‌ریزی باید به صورت انجام شود که تحت سناریوهای مختلف خرابی ماشین‌ها، آولا متوسط عملکرد (زمان اتمام) بهینه باشد و ثانیا واریانس خروجی تحت سناریوهای مختلف کمینه باشد. به طور مختصر، مشخصات و مفروضاتی که در این پژوهش برای حل مسئله $FJSP-PMB$ در نظر گرفته به صورت زیر است:

- تفاوت در سرعت، عملکرد و تخصیص ماشین‌ها و انسان‌ها برای پردازش کارهای مختلف وجود دارد (UR^5)
- برای خدمات سفارش داده شده موعد تحویل از پیش تعیین شده در نظر گرفته نمی‌شود (DD^6)
- زمان آماده‌سازی مجدد به توالی کارها مرتبط نیست و زمان آماده‌سازی تقریباً ناچیز در نظر گرفته می‌شود (N_SD^7)
- در قابلیت ماشین‌ها محدودیت وجود دارد و قادر به انجام هر کاری نیستند (ER^8)
- پیش‌نیازی^۹ یا بین عملیات هر کار وجود دارد (PC^{10})
- ماشین‌ها لزوماً هر زمان در دسترس نیستند و احتمال خرابی ماشین‌ها و اختلال در کارگاه وجود دارد (B^{11})
- هیچ ماشینی نمی‌تواند بیش از یک پردازش را در یک زمان انجام دهد. به عبارت دیگر امکان انجام چند خدمت توسط یک ماشین در یک زمان مشخص وجود ندارد (N_BP^{12})

¹ Job shop Scheduling Problem

² Flexible Job shop Scheduling Problem

^۳ نگهداری و تعمیرات را در ادامه به طور خلاصه نت می‌گوییم.

⁴ Flexible Job-shop Scheduling Problem with Preventive Maintenance under Machine-Breakdown (FJSP-PMB)

⁵ Unrelated Machine

⁶ Due Date

⁷ Sequence Dependent setup time

⁸ Eligibility Restriction

⁹ Precedence

¹⁰ Precedence Constraints

¹¹ Breakdown

¹² No Batch Processing

○ هدف، کمینه‌سازی زمان انجام تمام سفارشات (TCT^1) و کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های نت و جریمه‌های تاخیر است.

۳-۳ مدل FJSP پایه

در حالت کلی، مسئله زمانبندی کار کارگاهی منعطف یا FJSP برای یک سیستم تولید با مجموعه I کار، O_i عملیات برای هر کار $i \in I$ و K ماشین برای پردازش عملیات، با تابع کمینه کردن زمان اتمام کل کارها ($Cmax$)، به صورت زیر فرموله می‌شود (کرس و مولر^۲، ۲۰۱۹؛ شن و همکاران^۳، ۲۰۱۸)

- نماد و علائم

مجموعه و اندیس	
$I = \{1, 2, \dots, N\}$	مجموعه کارها (اندیس گذاری با i, r)
$O_i = \{1, 2, \dots, n_i\}$	مجموعه عملیات مورد نیاز کار i (اندیس گذاری با j, s). از نماد O_{ij} برای نشان دادن عملیات j ام کار i استفاده می‌کنیم.
$K = \{1, 2, \dots, M\}$	مجموعه ماشین‌ها (اندیس گذاری با k)
$V^{(i,j)} \subseteq K$	زیرمجموعه ماشین‌ها که می‌توانند عملیات O_{ij} را انجام دهند.
پارامترها و متغیرها	
P_{ijk}	مدت زمان پردازش عملیات O_{ij} توسط ماشین k
Y_{ijk}	متغیر تصمیم‌گیری: اگر پردازش عملیات O_{ij} به ماشین k تخصیص یابد برابر با ۱، در غیر این صورت ۰ است
X_{ijrs}	متغیر تصمیم‌گیری: اگر عملیات O_{ij} بعد از O_{rs} پردازش شود برابر با ۱، در غیر این صورت ۰ است
C_{ij}	متغیر تصمیم‌گیری: زمان تکمیل عملیات O_{ij}
$Cmax$	متغیر هدف: زمان تکمیل کل کارها

$$\min Cmax \quad (۱-۳)$$

- تابع هدف مسئله FJSP که در آن مقدار هدف یعنی زمان تکمیل همه کارها، کمینه می‌شود.

$$Cmax \geq C_{ij} ; \forall i \in I, j \in O_i \quad (۲-۳)$$

¹Total Completion Time (Makespan)

² Kress & Müller

³ Shen et al.

○ در این رابطه C_{max} به عنوان مقدار هدف مسئله که باید کمینه شود، محاسبه می شود و برابر با حداکثر C_{ij} ها است. به عبارت دیگر C_{max} زمان تکمیل آخر آخرین کار است که در این رابطه حساب می شود.

$$\sum_{k \in V(i,j)} Y_{ijk} = 1 ; \forall i \in I, j \in O_i \quad (3-3)$$

○ این رابطه به تخصیص هر عملیات از کارهای مختلف به یک ماشین اشاره می کند و بر اساس آن هر عملیات دقیقاً به یک ماشین تخصیص داده می شود.

$$C_{ij} \geq C_{ij-1} + \sum_{k \in V(i,j)} P_{ijk} \cdot Y_{ijk} ; \forall i \in I, j \in O_i \quad (4-3)$$

• این رابطه به توالی عملیات مرتبط با هر کار می پردازد و بیان می کند که زمان تکمیل عملیات O_{ij} برابر است با مجموع زمان تکمیل عملیات O_{ij-1} و مدت زمان پردازش O_{ij}

$$X_{ijrs} \leq \frac{1}{2} (Y_{ijk} + Y_{rsk}) ; \forall i \in I, j \in O_i \quad (5-3)$$

○ این رابطه بیان می کند که توالی بین دو عملیات زمانی معنا دار است که هر دو توسط یک ماشین پردازش شوند (یعنی $Y_{ijk} + Y_{rsk} = 2$ باشد)

$$C_{ij} \geq C_{rs} + \sum_{k \in V(i,j)} P_{ijk} \cdot Y_{ijk} - M(1 - X_{ijrs}) \quad (6-3)$$

$$\forall i < N, j \in O_i ; r > i \quad s \in O_r$$

• این رابطه به توالی عملیات مرتبط با کارها مختلف می پردازد. بر اساس این رابطه، اگر عملیات O_{ij} بعد از عملیات O_{rs} باشد و هر دو توسط یک ماشین پردازش شوند، آنگاه، زمان تکمیل عملیات O_{ij} برابر است با مجموع زمان تکمیل عملیات O_{rs} و مدت زمان پردازش O_{ij} . لازم به توضیح است در این رابطه، M نشان دهنده یک عدد به اندازه کافی بزرگ است.

$$C_{rs} \geq C_{ij} + \sum_{k \in V(r,s)} P_{rsk} \cdot Y_{rsk} - M \cdot X_{ijrs} \quad (7-3)$$

$$- M(2 - Y_{ijk} - Y_{rsk}) ;$$

$$\forall i < N, j \in O_i; r > i \quad s \in O_r$$

- در تکمیل قید قبل، این رابطه نیز به توالی عملیات مرتبط با کارها مختلف اشاره دارد. بر اساس این رابطه، اگر عملیات O_{ij} بعد از عملیات O_{rs} نباشد، به عبارت دیگر O_{rs} بعد از O_{ij} باشد، آنگاه، زمان تکمیل عملیات O_{rs} برابر است با مجموع زمان تکمیل عملیات O_{ij} و مدت زمان پردازش O_{rs} .

$$Y_{ijk} \in \{0,1\} \quad (8-3)$$

$$X_{ijrs} \in \{0,1\}$$

$$C_{ij} \geq 0$$

- نهایتاً، در این رابطه متغیرهای مسئله FJSP تعریف شده است که متغیرهای باینری مرتبط با تخصیص و توالی و همچنین متغیر پیوسته مرتبط با زمان تکمیل عملیات می‌باشند.

۳-۴ توسعه مدل FJSP با سناریوهای خرابی ماشین و نت پیشگیرانه (FJSP-PMB)

در توسعه مدل FJSP، برای مسئله FJSP-PMB موردنظر این تحقیق، همانطور که اشاره شد به سناریوهای خرابی ماشین‌ها توجه می‌شود و با توجه به سناریوهای محتمل، مشخص می‌شود که برای چه ماشین‌هایی در حال حاضر عملیات نت پیشگیرانه باشد انجام شود. با توجه به آنکه عدم قطعیت مربوط به تعداد دفعات (یا مدت زمان) خرابی ماشین‌ها را به صورت چندین سناریو تصادفی با شانس‌های مختلف تعریف می‌کنیم، می‌توان از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استفاده کرد. همچنین از آنجا که در کنار متوسط عملکرد سیستم تحت سناریوها مختلف، ما به واریانس و جریمه نقض قیود پنجره زمانی نیز توجه می‌کنیم، بنابراین رویکرد برنامه‌ریزی سناریومحور استوار پیشنهادی مالوی و همکارانش^۱ (۱۹۹۵) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه، ابتدا به توضیح این رویکرد پرداخته می‌شود و سپس مدل پیشنهادی برای مسئله FJSP-PMB بر اساس آن ارائه می‌شود.

¹ Mulvey

۳-۴-۱ رویکرد بهینه‌سازی سناریومحور استوار Mulvey

در حالت کلی، رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور (SSP^1) دو مرحله‌ای به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \min E(Z) = \sum_{s \in S} \pi_s \cdot z_s \\ z_s = c_s^T \cdot x_s + d_s^T y \quad \forall s \in S \\ A_s x_s + K_s y \leq b_s \quad \forall s \in S \\ Ry = q \\ y \in Y, x_s \geq 0 \end{cases} \quad (9-3)$$

که در آن مقدار هدف تحت سناریو \mathbf{z}_s ، $s \in S$ متغیرهای وابسته به سناریو و \mathbf{y} متغیرهای مستقل از سناریو (معمولاً متغیر باینری)، $(c_s, d_s, A_s, K_s, b_s)$ مقدار پارامترهای مسئله تحت سناریو $s \in S$ ، (R, q) مقدار پارامترهای قطعی، و نهایتاً π_s احتمال وقوع سناریو $s \in S$ است (شاپیرو و همکاران^۲، ۲۰۲۱؛ وانگ و همکاران^۳، ۲۰۲۰)

در رویکرد SSP ، متوسط هدف در سناریوهای مختلف مورد توجه قرار گرفته می‌شود و تمام سناریوهای محتمل باید به طور کامل موجه باشند. در واقع، در یک مسئله SSP متغیر \mathbf{y}^* و \mathbf{x}_s^* به باید به گونه‌ای تعیین شود که هر سناریو $s \in S$ از مسئله موجه باشد و متوسط مقادیر هدف در سناریوهای مختلف کمینه باشد.

در توسعه رویکرد SSP ، مالوی و همکارانش (مالوی و همکاران^۴، ۱۹۹۵) مجموع متوسط عملکرد سیستم و انحراف معیار آن را به عنوان استواری حل^۵ یا استواری بهینگی^۶ در نظر گرفتند. مدل "برنامه‌ریزی سناریومحور استوار"^۷ (RSP) مالوی به صورت زیر است:

¹ Scenario-based Stochastic Programming

² Shapiro et al.

³ Wang et al.

⁴ Mulvey et al.

⁵ Solution Robustness

⁶ Optimality Robustness

⁷ Robust Stochastic Programming

$$\left\{ \begin{array}{l} \min E(Z) + \text{Var}(Z) + \text{Penalty} = \\ \sum_{s \in S} \pi_s \cdot z_s + \lambda \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \left(z_s - \sum_{s' \in S} \pi_{s'} \cdot z_{s'} \right)^2 + \omega \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \mathcal{L}_s^2 \\ z_s = c_s^T \cdot x_s + d_s^T y \quad \forall s \in S \\ \text{Subjec to:} \\ A_s x_s + K_s y \leq b_s + \mathcal{L}_s \quad \forall s \in S \\ Ry = q \\ y \in Y, x_s \geq 0, \xi_s \geq 0 \end{array} \right. \quad (10-3)$$

که در آن \mathcal{L}_s متغیر کمبود/مازاد در سناریو $s \in S$ ، ω ضریب استواری مدل و λ ضریب اهمیت به واریانس جواب‌ها در سناریوهای مختلف است. سایر نمادها در مدل SSP توضیح داده شده است. مدل RSP پیشنهادی مالوی یک مسئله بهینه‌سازی کوادراتیک است. یو و لی^۱ (۲۰۰۰) با جایگذاری تابع انحراف مطلق (AD^2) به جای توان دوم و همچنین مقدار اصلی نقض قیود به جای توان دوم آن، حالت خطی، مدل مالوی را توسعه داده‌اند، که مدل پیشنهادی به صورت زیر است:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min E(Z) + AD(Z) + \text{Penalty} = \\ \sum_{s \in S} \pi_s \cdot z_s + \lambda \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \left| z_s - \sum_{s' \in S} \pi_{s'} \cdot z_{s'} \right| + \omega \sum_{s \in S} \pi_s \mathcal{L}_s \\ z_s = c_s^T \cdot x_s + d_s^T y \quad \forall s \in S \\ \text{Subjec to:} \\ A_s x_s + K_s y \leq b_s + \mathcal{L}_s \quad \forall s \in S \\ Ry = q \\ y \in Y, x_s \geq 0, \xi_s \geq 0 \end{array} \right. \quad (11-3)$$

و به صورت زیر خطی‌سازی می‌شود:

¹ Yu & Li

² Absolute Deviation

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \sum_{s \in S} \pi_s \cdot z_s + \\ \lambda \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \left(2\theta_s - \left[z_s - \sum_{s' \in S} \pi_{s'} \cdot z_{s'} \right] \right) + \omega \sum_{s \in S} \pi_s \mathcal{L}_s \\ z_s = c_s^T \cdot x_s + d_s^T y \quad \forall s \in S \\ \text{Subjec to:} \\ \theta_s \geq \left[z_s - \sum_{s' \in S} \pi_{s'} \cdot z_{s'} \right] \quad \forall s \in S \\ A_s x_s + K_s y \leq b_s + \mathcal{L}_s \quad \forall s \in S \\ Ry = q \\ y \in Y, x_s \geq 0 \\ \theta_s \geq 0, \xi_s \geq 0 \end{array} \right. \quad (12-3)$$

که در آن $\theta_s \geq 0$ یک متغیر کمکی برای خطی سازی است و مقدار انحراف نسبت به میانگین در هر سناریو را محاسبه می کند. لازم به توضیح است که λ و ω به ترتیب ضرایب استواری بهینگی و استواری شدنی بودن هستند. در این تحقیق، از رویکرد RSP فوق الذکر برای مدلسازی مسئله PMB-FJSP در بخش بعدی استفاده می شود.

۳-۴-۲ مدل RSP پیشنهادی برای مسئله FJSP-MB

مسئله مورد نظر این تحقیق، به مدیریت کیفیت، هزینه و زمانبندی یک پروژه با چندین فعالیت مرتبط می پردازد:

- نماد و علائم

مجموعه و اندیس	
$\Xi = \{1, 2, \dots, \Xi \}$	مجموعه سناریوهای اختلال یا خرابی ماشین (اندیس گذاری با ξ)
$I = \{1, 2, \dots, N\}$	مجموعه کارها (اندیس گذاری با i, r)
$O_i = \{1, 2, \dots, n_i\}$	مجموعه عملیات مورد نیاز کار i (اندیس گذاری با j, s). از نماد O_{ij} برای نشان دادن عملیات j ام کار i استفاده می کنیم.
$K = \{1, 2, \dots, M\}$	مجموعه ماشین ها (اندیس گذاری با k)
$V^{(i,j)} \subseteq K$	زیرمجموعه ماشین ها که می توانند عملیات O_{ij} را انجام دهند.
پارامترها و متغیرها	
P_{ijk}	مدت زمان پردازش عملیات O_{ij} توسط ماشین k
$[\alpha_i, \beta_i]$	پنجره زمانی (موعد) تحویل سفارش/کار i

ω	جریمه تخطی از پنجره زمانی تحویل سفارشات
cm_k	هزینه نت ماشین k
r_k	مدت زمان تعمیر ماشین k در صورت خرابی
n_k^ξ	نرخ خرابی ماشین k تحت سناریو ξ در صورت عدم نت (تعداد دفعات خرابی ماشین بر واحد زمان)
ϕ_k	میزان کاهش نرخ خرابی نرخ خرابی ماشین k در صورت انجام نت پیشگیرانه
π_ξ	احتمال وقوع سناریو ξ
Y_{ijk}	متغیر تصمیم‌گیری: اگر پردازش عملیات o_{ij} به ماشین k تخصیص یابد برابر با ۱، در غیر این صورت ۰ است
X_{ijrs}	متغیر تصمیم‌گیری: اگر عملیات o_{ij} بعد از o_{rs} پردازش شود برابر با ۱، در غیر این صورت ۰ است
\mathcal{M}_k	متغیر تصمیم‌گیری: اگر نت پیشگیرانه ماشین k صورت پذیرد برابر با ۱، در غیر این صورت ۰ است
TP_k	متغیر وابسته: کل مدت پردازش کارهای توسط ماشین k
NB_k^ξ	متغیر وابسته: تعداد مرتبه خرابی ماشین k تحت سناریو ξ
C_{ij}^ξ	متغیر وابسته: زمان تکمیل عملیات o_{ij} تحت سناریو ξ
\mathcal{V}_i^ξ	متغیر وابسته: تخطی از موعد تحویل سفارش i تحت سناریو ξ (تاخیر: $\overline{\mathcal{V}_i^\xi}$ و تعجیل: $\underline{\mathcal{V}_i^\xi}$)
$Cmax^\xi$	متغیر هدف: زمان تکمیل کل کارها تحت سناریو ξ

$$\min \mathbf{O}_1 = \sum_{\xi \in \mathcal{E}} \pi_\xi \cdot Cmax^\xi + \lambda \sum_{\xi \in \mathcal{E}} \pi_\xi \cdot \left(2\theta_\xi - \left[Cmax^\xi - \sum_{\xi' \in \mathcal{E}} \pi_{\xi'} \cdot Cmax^{\xi'} \right] \right) \quad (13-3)$$

$$\min \mathbf{O}_2 = \sum_{k \in K} cm_k \cdot \mathcal{M}_k + \omega \sum_{\xi \in \mathcal{E}} \sum_{i \in I} \pi_\xi \cdot (\overline{\mathcal{V}_i^\xi} + \underline{\mathcal{V}_i^\xi}) \quad (14-3)$$

- در تابع هدف اول، طبق مدل RSP، کمینه‌سازی هزینه و واریانس انجام می‌شود. برای هد دوم نیز جریمه تخطی از قیود در کنار هزینه نت پیشگیرانه آماده است.

$$\theta_\xi \geq \left[Cmax^\xi - \sum_{\xi' \in \mathcal{E}} \pi_{\xi'} \cdot Cmax^{\xi'} \right] \forall \xi \in \mathcal{E} \quad (15-3)$$

- این قید، متغیر کمی θ_ξ برای محاسبه برای محاسبه واریانس یا به طور دقیق AD، محاسبه می‌شود.

$$\alpha_i + \underline{\mathcal{V}_i^\xi} \leq Cmax^\xi \leq \beta_i + \overline{\mathcal{V}_i^\xi} \quad \forall i \in I, \xi \in \mathcal{E} \quad (16-3)$$

- این قید نشان‌دهنده پنجره زمانی تحویل سفارشات/کارها است.

$$Cmax^\xi \geq C_{ij}^\xi ; \quad \forall i \in I, j \in O_i, \xi \in \mathcal{E} \quad (17-3)$$

- محاسبه زمان تکمیل (Cmax) تحت هر سناریو

$$\sum_{k \in V(i,j)} Y_{ijk} = 1 ; \forall i \in I, j \in O_i \quad (18-3)$$

$$C_{ij}^{\xi} \geq C_{ij-1}^{\xi} + \sum_{k \in V(i,j)} P_{ijk} \cdot Y_{ijk} ; \forall i \in I, j \in O_i, \xi \in E \quad (19-3)$$

$$X_{ijrs} \leq \frac{1}{2} (Y_{ijk} + Y_{rsk}) ; \forall i \in I, j \in O_i \quad (20-3)$$

$$C_{ij}^{\xi} \geq C_{rs}^{\xi} + \sum_{k \in V(i,j)} P_{ijk} \cdot Y_{ijk} - M(1 - X_{ijrs}) \quad (21-3)$$

$$\forall i < N, j \in O_i ; r > i \quad s \in O_r, \xi \in E$$

$$C_{rs}^{\xi} \geq C_{ij}^{\xi} + \sum_{k \in V(r,s)} P_{rsk} \cdot Y_{rsk} - M \cdot X_{ijrs} - M(2 - Y_{ijk} - Y_{rsk}) ; \quad (22-3)$$

$$\forall i < N, j \in O_i ; r > i \quad s \in O_r, \xi \in E$$

- قیود (۱۸) تا (۲۲) مشابه توضیحات مدل FJSP پایه است با این تفاوت که این بار باید تحت هر سناریو ارضاء شوند.

$$TP_k \geq \sum_{i \in N} \sum_{j \in O_i} P_{ijk} \cdot Y_{ijk} ; \forall k \in K \quad (23-3)$$

- در این رابطه کل زمان پردازش هر ماشین محاسبه می شود.

$$NB_k^{\xi} \geq n_k^{\xi} (1 - \phi_k \mathcal{M}_k) TP_k ; \forall k \in K, \xi \in E \quad (24-3)$$

- در این رابطه با در نظر گرفتن (۱) کل مدت زمان پردازش (TP_k)، (۲) انجام یا عدم انجام نت پیشگیرانه (\mathcal{M}_k)، و نهایتاً (۳) نرخ خرابی ماشین (n_k^{ξ})، تعداد دفعاتی که ممکن است هر ماشین خراب شود، محاسبه می شود.

$$Cmax^{\xi} \geq \max_{i \in I, j \in O_i} \{C_{ij}\} + \sum_{k \in K} r_k \cdot NB_k^{\xi} ; \forall \xi \in E \quad (25-3)$$

• در این قید، مقدار واقعی $Cmax^\xi$ با در نظر گرفتن زمان اتمام همه کارها در حالت معمول

$(\max_{i \in I, j \in O_i} \{C_{ij}\})$ و همچنین مدت زمان لازم برای خرابی‌های احتمالی ماشین‌ها

$(\sum_{k \in K} r_k \cdot NB_k^\xi)$ محاسبه شده است. لازم به توضیح است که این قید به صورت خطی

$$Cmax^\xi \geq C_{ij} + \sum_{k \in K} r_k \cdot NB_k^\xi$$

$$Y_{ijk} \in \{0,1\}$$

(۲۶-۳)

$$X_{ijrs} \in \{0,1\}$$

$$\mathcal{M}_k \in \{0,1\}$$

$$TP_k \geq 0$$

$$NB_k^\xi \in \mathbb{Z}_+$$

$$\underline{v}_i^\xi, \overline{v}_i^\xi \geq 0$$

$$v_i^\xi \geq 0$$

$$Cmax^\xi \geq 0$$

$$\theta_\xi \geq 0$$

• نهایتاً در قید فوق تمام متغیرهای مسئله FJSP-PMB آورده شده است. لازم به

توضیح است با توجه به آمیخته بودن نوع متغیرهای تصمیم‌گیری و همچنین خطی بودن

قیود مسئله، مدل پیشنهادی برای مسئله FJSP-PMB پیشنهادی یک مدل

برنامه‌ریزی خطی آمیخته چندهدفه ($MOMILP^1$) است و در بخش بعدی به ارائه

یک روش حل برای آن می‌پردازیم.

۳-۵ روش حل اپسیلون محدودیت تکمیل شده (AEC)

همانطور که اشاره شده، مسئله FJSP-PMB پیشنهادی این تحقیق با رویکرد RSP به

صورت یک مدل MOMILP بیان شده است. در این بخش به نحوه حل آن می‌پردازیم. در حالت کلی،

برای حل مسائل بهینه‌سازی دو/چندهدفه^۲ (MODM) رویکردهای مختلفی ارائه شده‌اند که از جمله آنها

می‌توان به روش مجموع وزن‌دار^۳ (WSM)، اپسیلون محدودیت^۴ (EC)، اپسیلون محدودیت تکامل یافته

¹ Multi-Objective Mixed Integer Linear Programming

² Multi Objective Decision Making

³ Weighted Sum Method

⁴ Epsilon Constraint

^۱ (AEC)، لکسیکوگرافیک^۲ (Lex)، و الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی (EO^۳) و ... اشاره کرد (دب^۴، ۲۰۱۴؛ گوانانتارا^۵، ۲۰۱۸؛ تیان و همکاران^۶، ۲۰۲۱)

در این تحقیق، برای بدست آوردن یک جبهه پارتو سراسری، رویکرد AEC برای موازنه توابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد که توضیحات آن به صورت زیر است.

در حالت کلی، یک مسئله MODM با دو هدف کمینه‌سازی به صورت قابل بیان است:

$$\begin{cases} \min (O_1(x), O_2(x)) \\ x \in X \end{cases} \quad (27-3)$$

که در آن $x \in X$ بیان‌کننده قیود است. فرض کنید هدف اول به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و هدف دوم به کران بالای اپسیلون محدود می‌شوند و در قیود مسئله اعمال می‌شوند. در این صورت، روش EC بکار گرفته شود و مدل تک هدفه زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{cases} \min O_1(x) \\ O_2(x) \leq e \\ x \in X \end{cases} \quad (28-3)$$

که در آن هدف اول به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده است و هدف دوم به حداکثر مقدار e محدود می‌شود. در مدل EC فوق، با تغییر مقادیر e جواب‌های مختلفی بدست می‌آید که ممکن است کارا^۷ نباشند (کارای ضعیف^۸ هستند).

با اصلاح/تکمیل جزئی مدل EC می‌توان مشکل مذکور را رفع کرد که به روش AEC معروف است (موروتاس^۹، ۲۰۰۹). برای اجرای بهتر روش AEC، می‌توان ابتدا بازه مناسب e را به روش Lex بدست آورد (آقایی و همکاران، ۲۰۱۱). در روش AEC ابتدا بازه مناسب تغییرات e مشخص شود و سپس به ازای مقادیر مختلف e در بازه بدست آمده، جبهه پارتو را بدست آورده می‌شود.

به منظور یافتن بازه مناسب برای e مربوط، ابتدا برای هر یک از اهداف به صورت جداگانه حل می‌شود و قطر اصلی ماتریس PayOff مقدار بهینه آنها می‌شود:

$$\text{PayOff}_{11} = \min_{x \in X} O_1(x) \quad (29-3)$$

$$\text{PayOff}_{22} = \min_{x \in X} O_2(x) \quad (30-3)$$

¹ Augmented Epsilon Constraint

² Lexicographic

³ Evolutionary Optimization

⁴ Deb

⁵ Gunantara

⁶ Tian et al.

⁷ Efficient

⁸ Weakly Efficient

⁹ Mavrotas

حال، مبتنی بر روش Lex مقدار یک هدف در حالت بهینه قرار می‌گیرد و هدف دیگر مشروط به بهینگی آن تا حد امکان کمینه می‌شود. برای این منظور داریم،

$$\text{PayOff}_{12} = \min_{x \in X} O_1(x) \text{ s.t. } O_2(x) = \text{PayOff}_{22} \quad (31-3)$$

$$\text{PayOff}_{21} = \min_{x \in X} O_2(x) \text{ s.t. } O_1(x) = \text{PayOff}_{11} \quad (32-3)$$

پس از بدست آوردن هاتریس PayOff، که در اینجا یک هاتریس 2×2 است، کمینه (بهترین مقدار)، بیشینه (بدترین مقدار)، و دامنه تغییرات^۱ هر هدف به صورت زیر بدست آورده می‌شود:

$$\text{PayOff} = \begin{bmatrix} \underline{O_1} & \overline{O_1} \\ \underline{O_2} & \overline{O_2} \end{bmatrix}$$

$$\underline{O_1} = \text{minimum of } O_1(x)$$

$$\overline{O_1} = \text{worst case of } O_1(x)$$

$$\underline{O_2} = \text{minimum of } O_2(x)$$

$$\overline{O_2} = \text{worst case of } O_2(x)$$

$$R_1^* = \overline{O_1} - \underline{O_1}$$

$$R_2^* = \overline{O_2} - \underline{O_2}$$

با تعریف فوق‌الذکر، بازه مناسب به روش Lex برای e به صورت $e \in [\underline{O_2}, \overline{O_2}]$ بدست آورده می‌شود. تعیین می‌شود. همچنین برای هم مقیاس شدن مقادیر تابع هدف، هر دو بر مقدار دامنه تغییرات تقسیم می‌شوند

نهایتاً، مدل روش AEC به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{cases} \min \frac{O_1(x)}{R_1^*} - v \frac{s}{R_2^*} \\ O_2(x) + s = e \\ x \in X \end{cases} \quad (33-3)$$

که در آن $s \geq 0$ یک متغیر کمکی است و $v > 0$ یک ضریب کنترلی است که معمولاً $v = 10^{-6}$ در نظر گرفته می‌شود (رضوی آل هاشم و همکاران، ۲۰۲۲)

. برای استفاده از روش AEC در موازنه اهداف مسئله FJSP-PMB این تحقیق، O_1 به عنوان اهداف اصلی یعنی کمینه‌سازی زمان تکمیل همه سفارشات، و O_2 به عنوان هدف دوم یعنی

¹ Range

کمینه‌سازی هزینه‌های نت پیش‌گیرانه و جریمه‌های تخطی بازه زمانی تحویل سفارشات در نظر گرفته می‌شود. با توجه به خطی بودن روابط ریاضی، مدل نهایی این تحقیق قابل حل توسط CPLEX Solver است.

۶-۳ جمع‌بندی فصل

در این فصل ابتدا به تعریف مسئله موردنظر این تحقیق پرداخته شد که یک توسعه از مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی منعطف است که تحت سناریوهای خرابی ماشین قرار دارد و نت پیشگیرانه در آن ملاحظه می‌شود. در این مسئله که با نام اختصاری FJSP-PMB معرفی شده است، یک مجموعه از سناریوهای محتمل برای خرابی ماشین‌ها تعریف می‌شود و در هر سناریو، نرخ خرابی و شانس رخداد سناریو مشخص می‌شود. برای مدل‌سازی مسئله موردنظر تحت سناریوهای خرابی، رویکرد برنامه‌ریزی سناریومحور استواری (RSP) مالوی مورد استفاده قرار گرفته است. فرمولاسیون نهایی مسئله بر اساس رویکرد RSP به صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته چندهدفه (MOMILP) شده است که برای حل آن و موازنه توابع هدف، از روش اپسیلون محدودیت تکمیل‌شده (AEC) استفاده کرده‌ایم و مدل نهایی توسط حل‌کننده CPLEX قابل اجرا است.

تجزیه و تحلیل

نتایج و یافته‌ها

۴-۱ طرح کلی فصل

در این فصل از پایان نامه به حل مسئله و گزارش خروجی‌ها و تحلیل نتایج پرداخته می‌شود. برای این منظور، ابتدا یک معرفی یک مطالعه/مثال عددی از مسئله FJSP-PMB مورد نظر پژوهش، که در فصل سوم به طور کامل توضیح داده شد، آورده می‌شود و داده‌های مدل پیشنهادی را مطابق با آن مقداردهی خواهیم کرد. سپس، متناظر با این مطالعه عددی، با هر یک از مدل‌ها و رویکردهای پیشنهادی انجام می‌شود و نتایج عددی حاصل شده گزارش و تحلیل می‌شود. لازم به توضیح است که تحلیل جبهه پارتو روش AEC پیشنهادی و همچنین تحلیل پارامترهای روش RSP پیشنهادی و ارزش استواری، همگی در این فصل انجام می‌شود.

از آنجا که مدل RSP پیشنهادی این پژوهش با در نظر گرفتن روش AEC پیشنهادی به صورت مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ($MILP^1$) است، از CPLEX Solver موجود در نرم‌افزار GAMS نسخه 24.7.1، برای بکارگیری مدل ریاضی پیشنهادی استفاده شده است که جواب بهینه سراسری مسئله را تضمین می‌کند. همچنین، از نرم‌افزار MATLAB 2019b برای ترسیم‌ها و تحلیل‌های استفاده شده است. برای اجرای کدهای نرم‌افزاری از یک کامپیوتر شخصی استفاده شده است.

۴-۲ مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB مورد نظر تحقیق

در این بخش، مدل RSP پیشنهادی و همچنین روش AEC برای موازنه توابع هدف، برای انجام یک مطالعه عددی از مسئله FJSP-PMB مورد نظر این تحقیق بکار گرفته می‌شود و پاسخ آن در بخش‌های بعدی تحلیل می‌شود. لازم به ذکر است که سجادی و همکاران (۲۰۱۹) و رحمتی و همکاران، (۲۰۱۳) در طراحی این مطالعه عددی و مقداردهی به پارامترهای آن مورداستفاده قرار گرفته است. در این مطالعه عددی ۱۰ سفارش/کار تعریف شده است که انجام هر یک از آنها مستلزم انجام چند عملیات است ($N = 10$) که روش ۶ ماشین موجود در سیستم تولیدی پردازش می‌شوند ($M=6$). در جدول ۴-۱ این کارها کدگذاری شده‌اند و عملیات مورد نیاز برای هر کار نیز مشخص شده است. به عنوان مثال، دو سطر زیر به ترتیب بیان می‌کند برای سفارش/کار اول باید عملیات ۱ و ۲ و ۳ انجام شود در حالیکه برای کار چهارم فقط عملیات ۱ و ۳ انجام می‌شود.

(J1 , O1)	(J1 , O2)	(J1 , O3)
(J4 , O1)	-	(J4 , O3)

در جداول ۴-۲ تا ۴-۷ ملاحظه می‌شود که عملیات مختلف مرتبط با سفارشات تعریف شده توسط هر یک از ۶ ماشین تعریف شده چه مدت زمانی پردازش می‌شود لازم به توضیح است که اعداد به صورت

¹ Mixed Integer Linear Programming

تصادفی تولید شده است؛ مثلاً (3,4) برای (J1 , O1) توسط ماشین 1 نشان می‌دهد که مدت زمان پردازش عملیات ۱ از کار ۱ توسط ماشین اول یک عدد تصادفی بین 3 تا 4 است (که در نرم افزار GAMS از تابع $\text{uniform}(3,4)$ برای تولید آنها استفاده شده است).

جدول ۱-۴. کارها و عملیات مرتبط با هر کار در مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB موردنظر تحقیق

عملیات کارها/سفارشات	O1	O2	O3	O4
J1	(J1 , O1)	(J1 , O2)	(J1 , O3)	-
J2		(J2 , O2)	(J2 , O3)	(J2 , O4)
J3	(J3 , O1)	(J3 , O2)	(J3 , O3)	(J3 , O4)
J4	(J4 , O1)	-	(J4 , O3)	-
J5	(J5 , O1)	(J5 , O2)	-	(J5 , O4)
J6	(J6 , O1)	(J6 , O2)	(J6 , O3)	-
J7	(J7 , O1)	(J7 , O2)	(J7 , O3)	(J7 , O4)
J8	(J8 , O1)	(J8 , O2)	(J8 , O3)	(J8 , O4)
J9	(J9 , O1)	(J9 , O2)	(J9 , O3)	(J9 , O4)
J10	(J10 , O1)	(J10 , O2)	(J10 , O3)	-

جدول ۲-۴. مدت زمان پردازش عملیات توسط ماشین اول در مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB موردنظر تحقیق

عملیات کارها/سفارشات	O1	O2	O3	O4
J1	(3 , 4)	(2 , 2.5)	(4 , 5)	-
J2		(6 , 7.5)	(2 , 3)	(16 , 17.5)
J3	(2 , 2.9)	(6 , 7.5)	(9 , 10.5)	(16 , 17.5)
J4	(17 , 17.5)	-	(5 , 5.9)	-
J5	(6 , 7.2)	(2 , 2.5)	-	(12 , 13)
J6	(2 , 2.9)	(2.3 , 2.8)	(5 , 7.2)	-
J7	(12 , 13.7)	(9 , 9.5)	(8 , 9.4)	(3 , 3.5)
J8	(10 , 11.7)	(8 , 9.5)	(6 , 7.2)	(3.1 , 3.5)
J9	(7 , 7.2)	(4 , 4.5)	(4 , 4.9)	(3.3 , 3.7)
J10	(5 , 5.9)	(6 , 7)	(6 , 7.1)	-

جدول ۳-۴. مدت زمان پردازش عملیات توسط ماشین دوم در مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB موردنظر تحقیق

عملیات کارها/سفارشات	O1	O2	O3	O4
J1	(3 , 3.2 , 3.5)	(2 , 2.5 , 3)	(3 , 4.5 , 5)	-
J2	-	(6.5 , 6.5 , 7)	(9.3 , 9.5 , 10)	(16.3 , 17.2 , 18.5)
J3	(2 , 2.5 , 3)	(1 , 1.1 , 1.2)	(7.2 , 7.5 , 8)	(9 , 9.2 , 10)
J4	(17 , 17.5 , 18)	-	(5 , 6 , 6.5)	-
J5	(6.5 , 6.5 , 7)	(2 , 2.2 , 2.7)	-	(13 , 13.3 , 14.5)
J6	(2.7 , 3 , 3.2)	(2.2 , 2.5 , 3)	(5.5 , 6.5 , 7)	-
J7	(12 , 12.5 , 13)	(9 , 9.5 , 10)	(7.5 , 8.5 , 9)	(3 , 3.3 , 4)
J8	(10 , 10.5 , 11)	(8 , 9 , 10)	(6.5 , 6.6 , 7)	(3 , 3.3 , 4)
J9	(7.5 , 7.8 , 8)	(4 , 4.5 , 4.7)	(4 , 4.5 , 5)	(3 , 3.5 , 4)
J10	(5.5 , 5.8 , 6)	(6 , 6.5 , 7)	(6.2 , 6.5 , 7)	-

جدول ۴-۴. مدت زمان پردازش عملیات توسط ماشین سوم در مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB موردنظر تحقیق

عملیات کارها/سفارشات	O1	O2	O3	O4
J1	(3 , 3.2, 4)	(2 , 2.2, 2.5)	(4 , 4.3, 5)	-
J2		(6 , 7, 7.5)	(2 , 2.5, 3)	(16 , 17, 17.5)
J3	(2 , 2.6, 2.9)	(6 , 7, 7.5)	(9 , 9.7, 10.5)	(16 , 17, 17.5)
J4	(17 , 17.3, 17.5)	-	(5 , 5.6, 5.9)	-
J5	(6 , 7, 7.2)	(2 , 2.2, 2.5)	-	(12 , 12.2, 13)
J6	(2 , 2.5, 2.9)	(2.3 , 2.5, 2.8)	(5 , 6, 7.2)	-
J7	(12 , 13, 13.7)	(9 , 9.3, 9.5)	(8 , 9, 9.4)	(3, 2.2, 3.5)
J8	(10 , 11, 11.7)	(8 , 8.5, 9.5)	(6 , 6.3, 7.2)	(3.1, 3.4, 3.5)
J9	(7 , 7.1, 7.2)	(4 , 4.4, 4.5)	(4 , 4.6, 4.9)	(3.3, 3.4, 3.7)
J10	(5 , 5.3, 5.9)	(6 , 6.6, 7)	(6 , 6.5, 7.1)	-

جدول ۴-۵. مدت زمان پردازش عملیات توسط ماشین چهارم در مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB موردنظر تحقیق

عملیات کارها/سفارشات	O1	O2	O3	O4
J1	(3 , 3.2, 4)	(2 , 2.2, 2.5)	(4 , 4.3, 5)	-
J2		(6 , 7, 7.5)	(2 , 2.5, 3)	(16 , 17, 17.5)
J3	(2 , 2.6, 2.9)	(6 , 7, 7.5)	(9 , 9.7, 10.5)	(16 , 17, 17.5)
J4	(17 , 17.3, 17.5)	-	(5 , 5.6, 5.9)	-
J5	(6 , 7, 7.2)	(2 , 2.2, 2.5)	-	(12 , 12.2, 13)
J6	(2 , 2.5, 2.9)	(2.3 , 2.5, 2.8)	(5 , 6, 7.2)	-
J7	(12 , 13, 13.7)	(9 , 9.3, 9.5)	(8 , 9, 9.4)	(3, 2.2, 3.5)
J8	(10 , 11, 11.7)	(8 , 8.5, 9.5)	(6 , 6.3, 7.2)	(3.1, 3.4, 3.5)
J9	(7 , 7.1, 7.2)	(4 , 4.4, 4.5)	(4 , 4.6, 4.9)	(3.3, 3.4, 3.7)
J10	(5 , 5.3, 5.9)	(6 , 6.6, 7)	(6 , 6.5, 7.1)	-

جدول ۴-۶. مدت زمان پردازش عملیات توسط ماشین پنجم در مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB موردنظر تحقیق

عملیات کارها/سفارشات	O1	O2	O3	O4
J1	(3 , 3.2, 4)	(2 , 2.2, 2.5)	(4 , 4.3, 5)	-
J2		(6 , 7, 7.5)	(2 , 2.5, 3)	(16 , 17, 17.5)
J3	(2 , 2.6, 2.9)	(6 , 7, 7.5)	(9 , 9.7, 10.5)	(16 , 17, 17.5)
J4	(17 , 17.3, 17.5)	-	(5 , 5.6, 5.9)	-
J5	(6 , 7, 7.2)	(2 , 2.2, 2.5)	-	(12 , 12.2, 13)
J6	(2 , 2.5, 2.9)	(2.3 , 2.5, 2.8)	(5 , 6, 7.2)	-
J7	(12 , 13, 13.7)	(9 , 9.3, 9.5)	(8 , 9, 9.4)	(3, 2.2, 3.5)
J8	(10 , 11, 11.7)	(8 , 8.5, 9.5)	(6 , 6.3, 7.2)	(3.1, 3.4, 3.5)
J9	(7 , 7.1, 7.2)	(4 , 4.4, 4.5)	(4 , 4.6, 4.9)	(3.3, 3.4, 3.7)
J10	(5 , 5.3, 5.9)	(6 , 6.6, 7)	(6 , 6.5, 7.1)	-

جدول ۷-۴. مدت زمان پردازش عملیات توسط ماشین ششم

عملیات کارها/سفارشات	O1	O2	O3	O4
J1	(3, 3.2, 4)	(2, 2.2, 2.5)	(4, 4.3, 5)	-
J2		(6, 7, 7.5)	(2, 2.5, 3)	(16, 17, 17.5)
J3	(2, 2.6, 2.9)	(6, 7, 7.5)	(9, 9.7, 10.5)	(16, 17, 17.5)
J4	(17, 17.3, 17.5)	-	(5, 5.6, 5.9)	-
J5	(6, 7, 7.2)	(2, 2.2, 2.5)	-	(12, 12.2, 13)
J6	(2, 2.5, 2.9)	(2.3, 2.5, 2.8)	(5, 6, 7.2)	-
J7	(12, 13, 13.7)	(9, 9.3, 9.5)	(8, 9, 9.4)	(3, 2.2, 3.5)
J8	(10, 11, 11.7)	(8, 8.5, 9.5)	(6, 6.3, 7.2)	(3.1, 3.4, 3.5)
J9	(7, 7.1, 7.2)	(4, 4.4, 4.5)	(4, 4.6, 4.9)	(3.3, 3.4, 3.7)
J10	(5, 5.3, 5.9)	(6, 6.6, 7)	(6, 6.5, 7.1)	-

نهایتاً در جدول ۴-۸، نرخ هر ماشین‌ها (تعداد دفعات خرابی ماشین بر واحد زمان) به صورت سناریو محور بیان شده است. به عنوان مثال، برای ماشین دوم ($M2$) سه سناریو در نظر گرفته شده است $(1, 0.6; 2, 0.3; 3, 0.1)$ ؛ در سناریو اول که شانس آن 0.6 است، این ماشین ۱ مرتبه طی واحد زمانی تعریف شده (در اینجا هفته است) ممکن است خراب شود، در سناریوهای دوم و سوم نیز به ترتیب با شانس 0.3 و 0.1 ممکن است ۲ مرتبه و ۳ مرتبه طی هفته، در صورت عدم انجام نت پیشگیرانه، دچار خرابی شود. به همین صورت برای همه ماشین‌های تعریف شده یک مجموعه سناریو اختلال در نظر گرفته‌ایم و از اجماع همه آنها، مجموعه سناریوهای اختلال یا $\Xi = \{1, 2, \dots, |\Xi|\}$ برای مسئله FJSP-PMB موردنظر این تحقیق تعریف می‌شود. پارامترهای cm_k ، r_k و ϕ_k نیز به صورت تصادفی در بازه $(0.2, 0.5)$ ، $(200000, 300000)$ و $(1, 0.5)$ تولید شده است. در پنجره زمانی $[\alpha_i, \beta_i]$ انجام سفارشات/کارها، α_i به صورت تصادفی در بازه $(1, 50)$ تولید شده است و $\beta_i = 1.5\alpha_i$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۸-۴. اطلاعات مرتبط با سناریوهای خرابی و زمان تعمیر ماشین آلات

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
تعداد خرابی						
و احتمال	(1, 0.8; 2, 0.2)	(1, 0.6; 2, 0.3; 3, 0.1)	(1, 0.4; 2, 0.4; 3, 0.1)	(0, 0.2; 1, 0.8)	(0, 0.1; 1, 0.9)	(0, 0.3; 1, 0.6; 2, 0.1)

۴-۳ زمان‌بندی اسمی و استوار

در بخش قبل، داده و اطلاعات مرتبط با مطالعه عددی مسئله FJSP-PMB موردنظر این تحقیق توضیح داده شد. و یک مسئله آزمایشی با ابعاد زیر تعریف شد:

جدول ۹-۴. اندازه/ابعاد مثال عددی

اندازه مسئله				
N	n_i	M	$V^{(i,j)}$	$ \Xi $
سفارشات	عملیات	ماشین‌ها	ماشین برای هر کار	سناریو برای خرابی هر ماشین
10	2,3,4	6	3,4,5	2,3

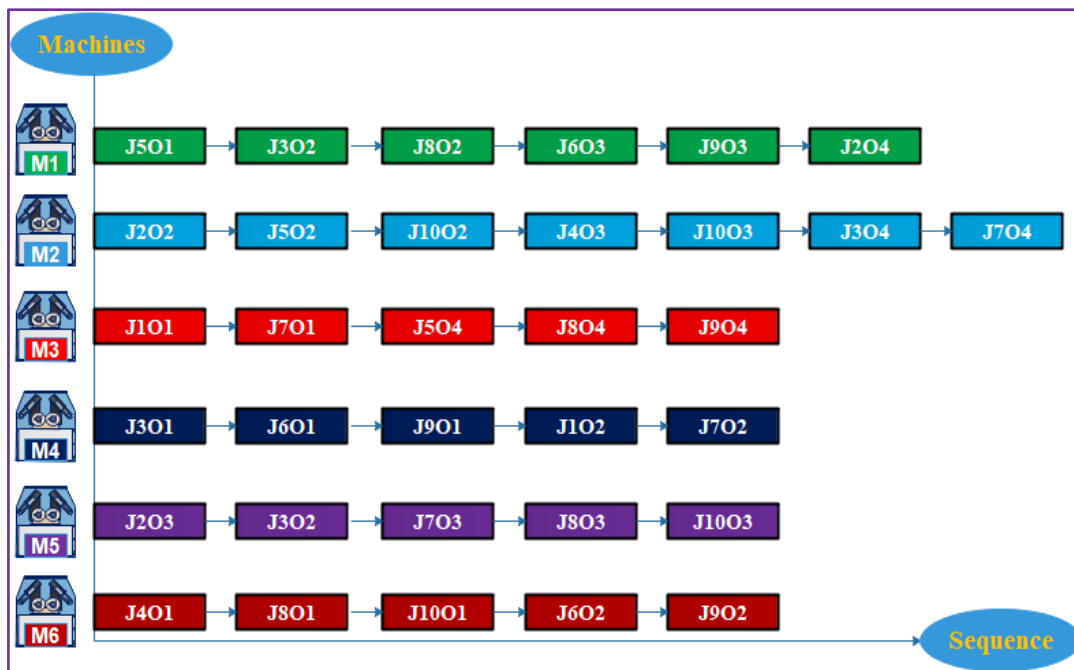
اگر از رویکرد کلاسیک (مقدار متوسط / اسمی)، که خرابی های دستگاه را در نظر نمی گیرد جهت زمانبندی استفاده شود. یک راه حل اسمی و غیراستوار بدست آورده می شود. در حالت اسمی، جدول ۴-۱۰ نحوه تخصیص منابع به سفارشات (۶ ماشین به عملیات هر یک از ۱۰ کار) را نشان می دهد. همچنین، توالی که توسط آن عملیات به هر دستگاه اختصاص داده می شود در جدول ۴-۱۱ آورده شده است؛ نهایتاً، در شکل ۴-۱. چارت زمانبندی کارها روی ماشین‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۱۰-۴. نحوه واگذاری عملیات به ماشین‌ها در حالت غیر استوار (رویکرد مقدار اسمی/متوسط)

	O1	O2	O3	O4
J1	M3	M4	M2	-
J2	-	M2	M5	M1
J3	M4	(M1,W5)	(M5,W3)	(M2,W2)
J4	(M6,W5)	-	(M2,W5)	-
J5	(M1,W2)	(M2,W5)	-	(M3,W3)
J6	(M4,W1)	(M6,W3)	(M1,W5)	-
J7	(M3,W2)	(M4,W5)	(M5,W1)	(M2,W5)
J8	(M6,W4)	(M1,W2)	(M5,W3)	(M3,W1)
J9	(M4,W3)	(M6,W2)	(M1,W3)	(M3,W4)
J10	(M6,W1)	(M2,W3)	(M5,W5)	-

جدول ۱۱-۴. توالی انجام عملیات واگذار شده به هر ماشین (رویکرد مقدار اسمی/متوسط)

ماشین	توالی کارهای تخصیص داده شده
M1	[J2O4 – J3O2 – J5O1 – J6O3 – J8O2 – J9O3]
M2	[J1O3 – J2O2 – J3O4 – J4O3 – J5O2 – J7O4 – J10O2]
M3	[J1O1 – J5O4 – J7O1 – J8O4 – J9O4]
M4	[J1O2 – J3O1 – J6O1 – J7O2 – J9O1]
M5	[J2O3 – J8O3 – J3O3 – J7O3 – J10O3]
M6	[J4O1 – J6O2 – J8O1 – J10O1 – J9O2]



شکل ۱-۴. چارت زمان‌بندی عملیات واگذار شده به هر ماشین (رویکرد مقدار اسمی/متوسط)

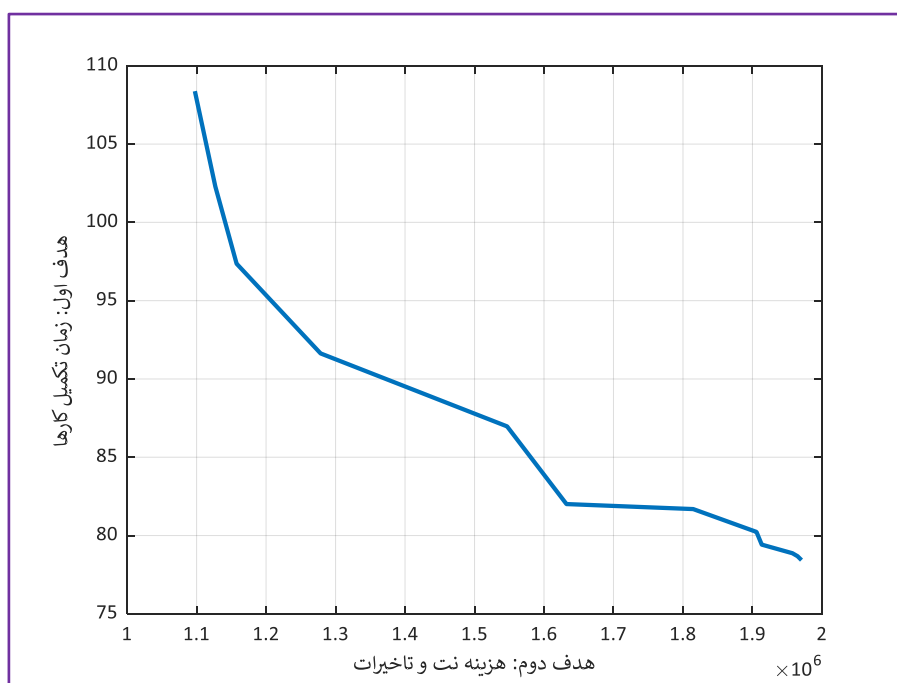
بر خلاف رویکرد اسمی، در رویکرد RSP پیشنهادی برای مدل‌سازی مسئله FJSP-PMB موردنظر، همانطور که در فصل سوم توضیح داده شد، سناریوهای اختلال در نظر گرفته می‌شود و یک زمان‌بندی استوار همراه برنامه زمانی نت بهینه بدست آورده می‌شود. برای استفاده از رویکرد RSP پیشنهادی باید اولاً پارامترهای آن (ω و γ) به ترتیب ضرایب استواری بهینگی و استواری شدنی بودن) تنظیم شود و درثانی با استفاده از روش AEC یک جبهه پارتو بین هدف کمینه‌سازی زمان و کمینه‌سازی هزینه‌های نت بدست آورده شود و این میان این جبهه پارتو، بهترین پاسخ انتخاب شود.

با تحلیل حساسیت صورت گرفته نسبت به پارامترهای ω و γ ، که در بخش بعد به طور مفصل توضیح داده می‌شود، این مقادیر روی این مقادیر به صورت $\omega = 13$ و $\gamma = 0.5$ تنظیم شده است. پس از تنظیم پارامترهای مدل RSP روش AEC برای موازنه توابع هدف (زمان تکمیل کارها و هزینه‌های نت) مورد استفاده قرار گرفته است که در جدول ۴-۱۲ نتایج آن آورده شده است.

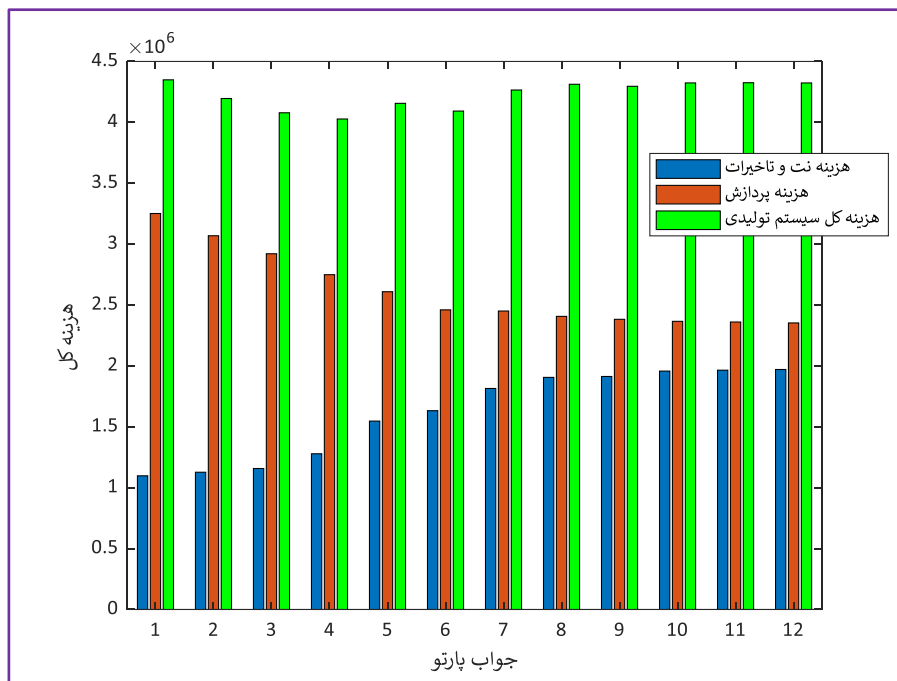
در شکل ۴-۲ جبهه پارتو ملاحظه می‌شود که از میان این جواب‌ها، باید یک جواب انتخاب شود، برای انتخاب یک جواب، ما ابتدا یک ضریب تبدیل زمان به هزینه تعریف کرده‌ایم ($\phi = 0.3 \times 10^5$) سپس کل زمان اتمام کارها به هزینه تبدیل می‌شود و با هزینه‌های نت (تابع هدف دوم) جمع می‌شود و آن پاسخ پارتو که کمترین هزینه کل پردازش و نت را داشته باشد، به عنوان بهترین جواب در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴-۳).

جدول ۴-۱۲. پاسخ‌های پارتو روش AEC برای موازنه اهداف زمان تکمیل و هزینه نت در مسئله FJSP-PMB

جواب پارتو	زمان تکمیل کارها (هدف ۱)	هزینه نت و تاخیرات (هدف ۲)	هزینه پردازش (تبدیل هدف ۱ به هزینه)	کل هزینه (مجموع هزینه نت و پردازش)
1	108.38	1097540.40	3251400.00	4348940.40
2	102.29	1126986.82	3068700.00	4195686.82
3	97.36	1157613.08	2920800.00	4078413.08
4	91.63	1278498.22	2748900.00	4027398.22
5	86.97	1546881.52	2609100.00	4155981.52
6	82.01	1632359.25	2460300.00	4092659.25
7	81.69	1814723.69	2450700.00	4265423.69
8	80.23	1905791.94	2406900.00	4312691.94
9	79.42	1913375.86	2382600.00	4295975.86
10	78.87	1957506.84	2366100.00	4323606.84
11	78.68	1964888.54	2360400.00	4325288.54
12	78.43	1970592.78	2352900.00	4323492.78



شکل ۴-۲. نمودار جبهه پارتو با روش AEC برای موازنه اهداف زمان تکمیل و هزینه نت در مسئله FJSP-PMB



شکل ۳-۴. مقایسه جواب‌های پارتو روش AEC برای انتخاب بهترین جواب

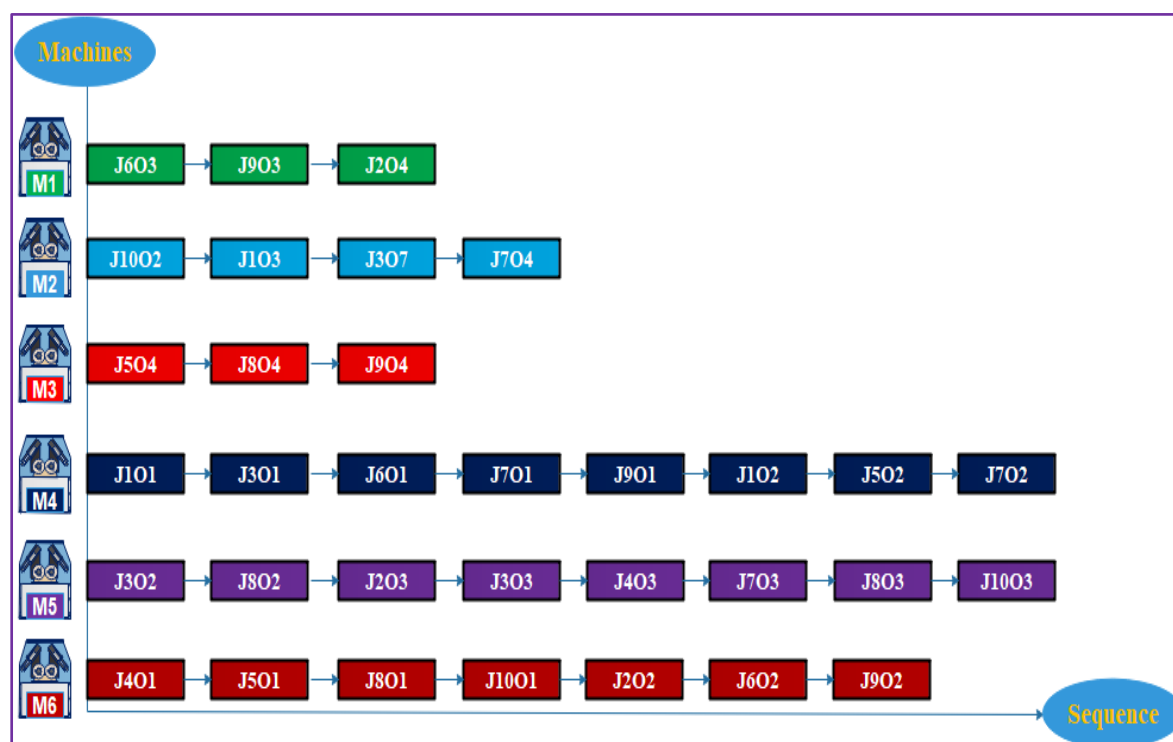
پس از تنظیم پارامترهای مدل RSP و همچنین انتخاب جواب پارتو شماره ۴ (که ملاحظه می‌شود کمترین هزینه کل در آن رخ می‌دهد) نتایج حل بر اساس این رویکرد RSP در ادامه آورده می‌شود و زمانبندی استوار بدست آورده می‌شود. جدول ۴-۱۳ تخصیص ماشین‌ها به سفارشات را در حالت استوار مبتنی بر رویکرد RSP و موازنه اهداف با AEC را نشان می‌دهد؛ همچنین توالی عملیات روی هر دستگاه در جدول ۴-۱۵ آورده شده است و نهایتاً در شکل ۴-۴ زمانبندی کارها روی ماشین‌ها مختلف بر اساس پاسخ استوار رویکرد RSP ملاحظه می‌شود.

جدول ۴-۱۳. نحوه واگذاری عملیات به ماشین‌ها در حالت استوار (پاسخ استوار رویکرد RSP پیشنهادی)

	O1	O2	O3	O4
J1	(M4,W1)	(M4,W3)	(M2,W2)	-
J2	-	(M6,W5)	(M5,W1)	(M1,W3)
J3	(M4,W4)	(M5,W5)	(M5,W3)	(M2,W2)
J4	(M6,W5)	-	(M5,W5)	-
J5	(M6,W2)	(M4,W5)	-	(M3,W3)
J6	(M4,W1)	(M6,W3)	(M1,W5)	-
J7	(M4,W2)	(M4,W5)	(M5,W1)	(M2,W5)
J8	(M6,W4)	(M5,W2)	(M5,W3)	(M3,W1)
J9	(M4,W3)	(M6,W2)	(M1,W3)	(M3,W4)
J10	(M6,W1)	(M2,W3)	(M5,W5)	-

جدول ۴-۱۴. توالی انجام عملیات واگذارشده به هر ماشین (پاسخ استوار رویکرد RSP پیشنهادی)

ماشین	توالی کارهای تخصیص داده شده
M1	[J204- J603- J903]
M2	[J103- J304- J704- J1002]
M3	[J504- J804 - J904]
M4	[J102- J301 - J601 - J702 - J901- J502 - J701 - J101]
M5	[J203 - J803 - J303 - J703 - J1003- J403- J302- J802]
M6	[J401 - J602 - J801 - J1001- J902- J501- J202]



شکل ۴-۴. چارت زمان‌بندی عملیات واگذارشده به هر ماشین (پاسخ استوار رویکرد RSP پیشنهادی)

۴-۴ تحلیل ضریب استواری مدل بهینه‌سازی استوار پیشنهادی

در حالت فشرده، مدل RSP مورد استفاده در این تحقیق در حالت کلی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$RSP(\omega, \gamma) := [\min_{x \in X} \mathbb{E}(z(x)) + \gamma \mathbb{M}(z(x)) + \omega V(x)]$$

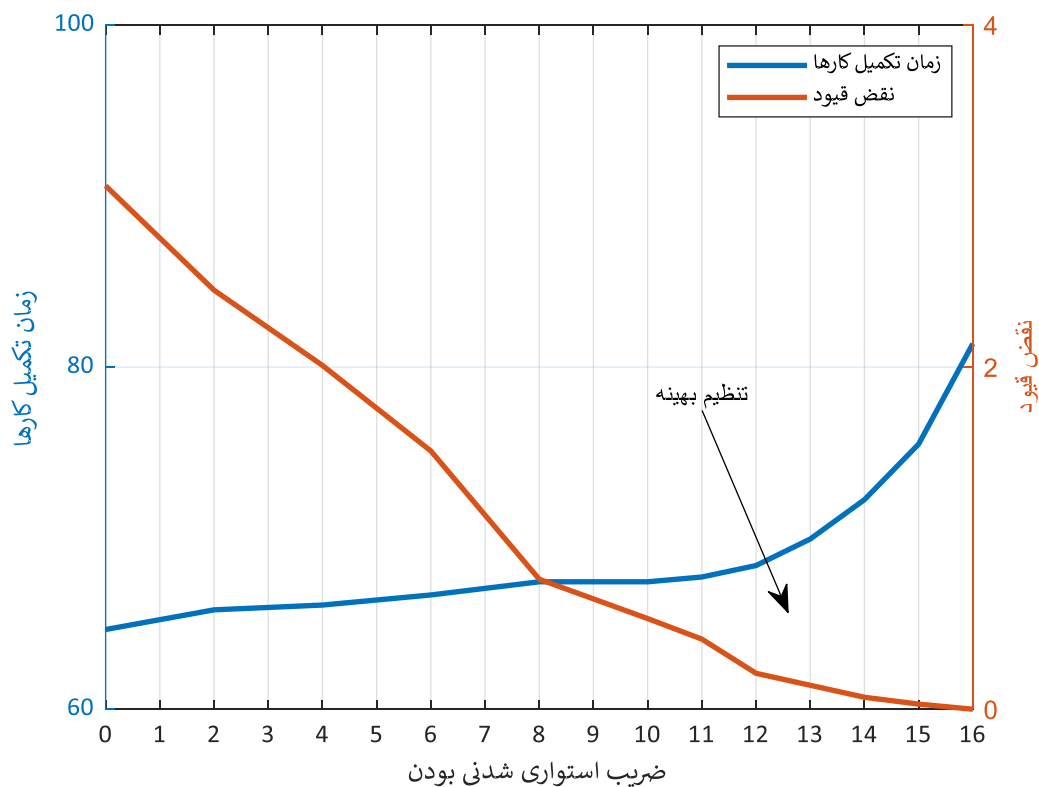
که در آن γ ضریب ریسک‌گریزی/استواری بهینگی مدل برای کنترل نوسانات و مقادیر هزینه/زمان در سناریوهای بدبینانه است و ω ضریب استواری شدنی بودن مدل است. همچنین منظور از \mathbb{E} ، \mathbb{M} و V به ترتیب متوسط هزینه/زمان، نوسانات و بیشینه هزینه/زمان و نهایتاً نقض قیود است. در این بخش به تحلیل این پارامترها و نحوه تنظیم بهینه آنها پرداخته می‌شود.

به طور موقت، قرار می‌دهیم $\gamma = 0$ و ابتدا مقدار ω را تنظیم می‌کنیم. واضح است که مقدار بیشتر ω باعث استواری بیشتر می‌شود و احتمال نقض محدودیت (تأخیر یا V) را کاهش می‌دهد. با این حال، محافظه کاری بیش از حد ممکن است مقدار متوسط زمان تکمیل کارها (E) را افزایش دهد. جدول ۴-۱۵ مقدار متوسط زمان تکمیل کارها و میزان تأخیر با ازای ω های مختلف را نشان می‌دهد. برای $\omega \geq 16$ ، استواری شدنی بودن مدل ۱۰۰٪ و احتمال نقض (نقض قیود پنجره زمانی در تکمیل کارها) برابر ۰ است. با این وجود، در این شرایط محافظه کاری بیش از حد در اختصاص کارها به ماشین‌ها باعث می‌شود که متوسط عملکرد سیستم در زمان اتمام کارها در مقایسه با شرایط غیرمحافظه کاری یا $\omega = 0$ به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد (۲۶٪).

با کاهش ω ، اگرچه مقدار زمان تکمیل کارها کاهش می‌یابد، اما، ممکن است درصد استواری جواب در مقایسه با $\omega = 16$ کاهش یابد، و ممکن تأخیرها افزایش یابند. در جدول ۴-۱۵ ملاحظه می‌شود که، $\omega \geq 13$ برای فاکتور استواری شدنی بودن مدل مقداری مناسب است زیرا استواری با سطح اطمینان بالاتر از ۹۵٪ برقرار است. شکل ۴-۵ تحلیل حساسیت زمان تکمیل کارها و تأخیر/عدم استواری شدنی را نسبت به ضریب استواری ω نشان می‌دهد، و بیان می‌کند که $\omega = 13$ مقداری مناسب برای ضریب استواری $\omega = 1$ است.

جدول ۴-۱۵. تحلیل حساسیت ضریب ω در RFS در مدل پیشنهادی RSP

ω	زمان تکمیل کارها	نقض پنجره زمانی (تأخیرات)	استواری (عدم نقض) (%)	افزایش تکمیل کارها (%)
0	64.66	3.06	0.00	0.00
2	65.81	2.45	19.78	1.78
4	66.09	2.01	34.16	2.21
6	66.68	1.51	50.71	3.12
8	67.45	0.76	75.15	4.31
10	67.45	0.53	82.58	4.31
11	67.73	0.41	86.45	4.75
12	68.40	0.21	93.02	5.78
13	69.95	0.14	95.43	8.18
14	72.25	0.07	97.83	11.74
15	75.50	0.03	99.12	16.76
16	81.37	0.00	100.00	25.84
> 16	81.37	0	100	25.84

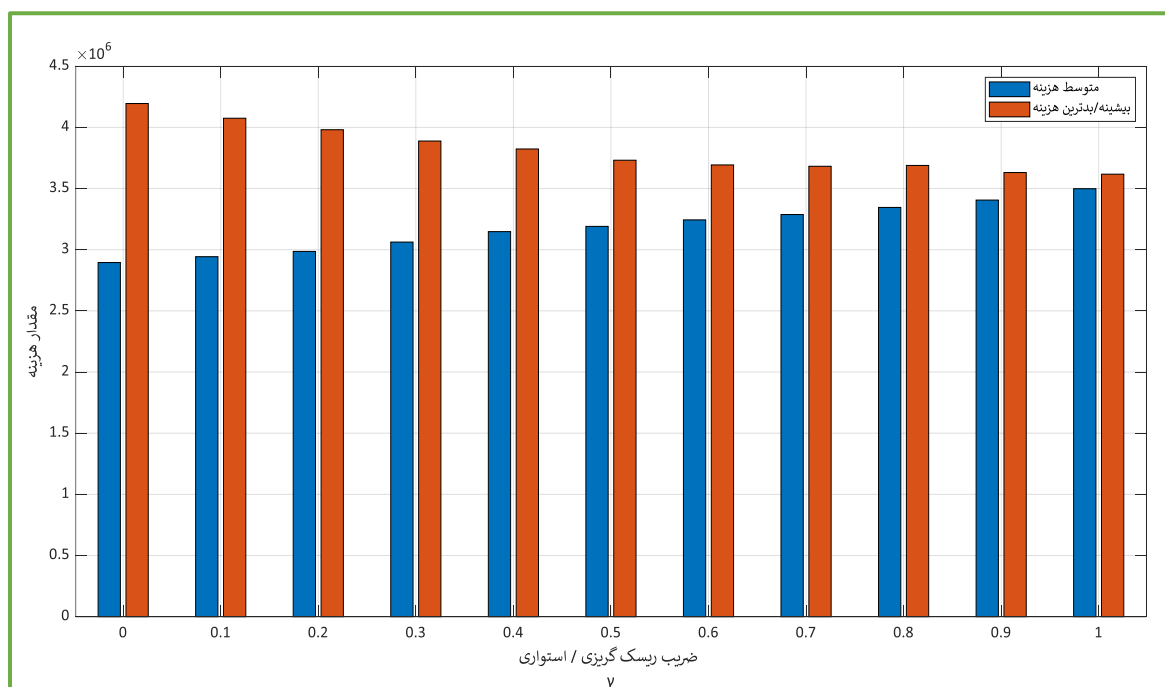


شکل ۴-۵. تحلیل ضریب استواری شدنی بودن در مدل RSP پیشنهادی

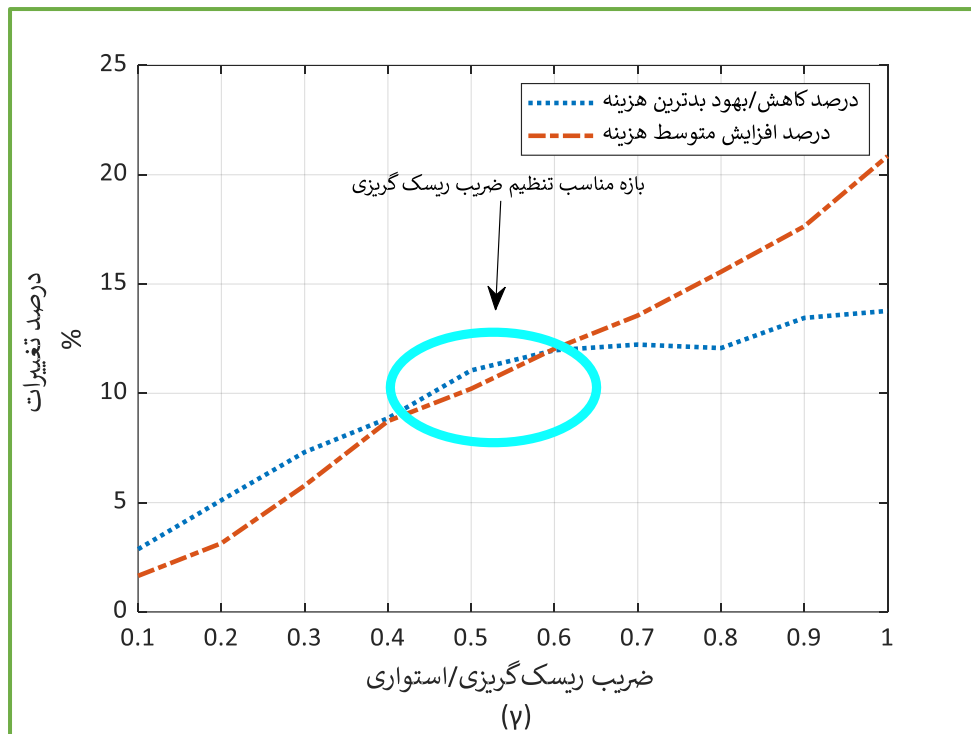
پس از تنظیم ضریب w ، در جدول ۴-۱۶ به تحلیل مقدار γ روی تابع هدف پرداخته‌ایم و برای هر $0 \leq \gamma \leq 1$ مقدار متوسط هزینه کل (مجموعه هزینه‌های نت و پردازش یا $E(z)$) و بیشینه/بدترین هزینه $MI(z)$ گزارش شده است. ملاحظه می‌شود که برای حالت $\gamma = 0$ که مدل کاملاً در حالت ریسک-خنثی است، مقدار $E(z)$ در بهترین حالت خود قرار دارد ولی $MI(z)$ به دلیل عدم استواری، مقدار بالایی دارد. در مقابل، در حالت $\gamma = 1$ اگر چه مقدار $MI(z)$ کاهش و بهبود قابل ملاحظه‌ای داشته است، ولی به دلیل ریسک‌گریزی بیش از حد، مقدار متوسط عملکرد بشدت بدتر شده است. در شکل‌های ۴-۶ و ۴-۷، برای مقادیر $\gamma \in [0.4, 0.6]$ ملاحظه می‌شود که نه تنها بهبود قابل ملاحظه‌ای در $MI(z)$ ایجاد شده است، بلکه $E(z)$ هم نسبت به حالت $\gamma = 0$ از مقدار قابل قبولی برخوردار است. در این تحقیق $\gamma = 0.5$ را به عنوان ضریب ریسک‌گریزی و تضمین استواری بهینگی برای کنترل حالت بدبینانه در نظر می‌گیریم (لازم به توضیح است که $\gamma = 0.4$ و $\gamma = 0.6$ هم می‌توانستند گزینه‌های دیگری باشند که به ترتیب ریسک‌پذیرتر و ریسک‌گریزتر از انتخاب حال حاضر هستند).

جدول ۱۶-۴. تحلیل ضریب استواری بهیئگی (γ) در مدل RSP پیشنهادی

γ	متوسط هزینه ($E(z)$)	بیشینه/بدترین هزینه ($MI(z)$)	درصد کاهش $MI(z)$ %	درصد افزایش $E(z)$ %
0	2895041.46	4195041.39	–	–
0.1	2942809.64	4074643.77	2.87	1.65
0.2	2985945.76	3980674.84	5.11	3.14
0.3	3062374.86	3888383.93	7.31	5.78
0.4	3147778.58	3823360.79	8.86	8.73
0.5	3190625.19	3731489.38	11.05	10.21
0.6	3243604.45	3692895.00	11.97	12.04
0.7	3287609.08	3681987.89	12.23	13.56
0.8	3345509.91	3688699.96	12.07	15.56
0.9	3405726.77	3630808.38	13.45	17.64
1	3498657.60	3617384.25	13.77	20.85



شکل ۴-۶. تغییرات در متوسط و بیشینه هزینه مدل RSP پیشنهادی نسبت به تغییر ضریب استواری (γ)



شکل ۷-۴. تنظیم بهینه بازه تغییرات ضریب استواری بهینگی (γ) در مدل RSP پیشنهادی

بنابراین، از شکل‌های ۵-۴ و ۷-۴ ملاحظه می‌شود که $RSP(\omega, \gamma)$ با $(\omega = 13, \gamma = 0.5)$ می‌تواند بهترین عملکرد را از منظر استواری بهینگی و شدنی بودن داشته باشد. در بخش بعدی به اعتبارسنجی پاسخ رویکرد RSP می‌پردازیم. برای این منظور، ابتدا چند معیار ارزیابی تعریف می‌شود و پاسخ این رویکرد نسبت به حالت اسمی (که اختلال در کارگاه و عدم قطعیت عملیاتی را در نظر نمی‌گرفت) مقایسه می‌شود و نشان داده می‌شود که ارزش رویکرد پیشنهادی در توجه به خرابی ماشین‌ها و عدم قطعیت عملیاتی به چه میزان است و زمانبندی استوار حاصل از این رویکرد به چه میزان از رویکرد اسمی بهتر است.

۵-۴ تحلیل ارزش استواری و در نظر گرفتن خرابی ماشین‌ها

همانطور که اشاره شد، در مدل RSP پیشنهادی، سناریوهای تصادفی مرتبط با خرابی ماشین‌ها در نظر گرفته می‌شود و یک پاسخ استوار حاصل می‌شود. در بخش‌های قبل، زمان‌بندی غیراستوار/اسمی مرتبط با رویکرد مقدار اسمی (که سناریوهای تصادفی خرابی ماشین‌ها در نظر گرفته نمی‌شود) و زمان‌بندی استوار حاصل از رویکرد RSP آورده شد. در این بخش به تحلیل ارزش در نظر گرفتن سناریوهای تصادفی خرابی ماشین‌ها و ارزش استواری مدل پیشنهادی پرداخته می‌شود. برای این منظور، از معیارهای ارزش راه حل

تصادفی (VSS^1) و همچنین ارزش انتظاری اطلاعات کامل ($EVPI^2$) به عنوان دوم معیار اصلی برای تحلیل اهمیت پرداختن به عدم قطعیت تصادفی حاکم بر این مسئله استفاده می‌کنیم.

برای این منظور، از مجموعه سناریوهای محتمل برای خرابی ماشین‌ها، تعداد $N=30$ سناریو به صورت تصادفی واقعی سازی^۳ می‌شود و پاسخ مدل RSP پیشنهادی و رویکرد مقدار متوسط/اسمی در هر یک از این سناریوها قرار می‌گیرد و با مقدار بهینه آنها مقایسه می‌شوند. برای مقایسه، دو معیار ارزش راه‌حل تصادفی (VSS) و سپس ارزش انتظاری اطلاعات کامل ($EVPI$) محاسبه می‌شود.

نحوه محاسبات معیارهای VSS و $EVPI$ به صورت زیر می‌باشد:

■ تعیین VSS و $EVPI$

- زمان‌بندی کارها، از رویکرد RSP، به دست آورده می‌شوند. این مقادیر به عنوان پاسخ مرحله نخست رویکرد RSP یا Y^{RSP} در نظر گرفته می‌شود.
- سناریوهای خرابی ماشین‌ها نادیده گرفته می‌شود یا یک مقدار متوسط برای زمان خرابی هر ماشین لحاظ می‌شود و پاسخ رویکرد مقدار متوسط (EV^4)، به دست آورده می‌شود. این مقادیر به عنوان پاسخ رویکرد مقدار متوسط/اسمی یا Y^{EV} در نظر گرفته می‌شود.
- مقدار Y^{RSP} در هر سناریو واقعی سازی شده $\xi \in \Xi$ قرار می‌گیرد و مقدار بهینه آن سناریو در صورت زمان‌بندی استوار Y^{RSP} بدست آورده می‌شود. این مقدار به صورت Z_{ξ}^{MRSP} ذخیره می‌شود.
- به طور مشابه با مرحله قبل، این بار زمان‌بندی Y^{EV} در هر سناریو واقعی سازی شده $\xi \in \Xi$ قرار می‌گیرد قرار می‌گیرد مشابه با حالت قبل مقدار بهینه آن سناریو در صورت تصمیم‌گیری Y^{EV} ، بدست آورده می‌شود و این مقدار به صورت Z_{ξ}^{EV} ذخیره می‌شود.
- مقدار VSS از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$VSS = \sum_{\xi \in \{1,2,3,\dots,30\} \subseteq \Xi} \pi_{\xi} Z_{\xi}^{EV} - \sum_{\xi \in \{1,2,3,\dots,30\} \subseteq \Xi} \pi_{\xi} Z_{\xi}^{RSP}$$

¹ Value of Stochastic Solution

² Expected Value of Perfect Information

³ Realization

⁴ Expected Value

▪ لازم به توضیح است که هرچه مقدار VSS بیشتر باشد، ارزش رویکرد RSP پیشنهادی بیشتر

است. همچنین مقدار VSS نسبی یا RVSS¹ به صورت $RVSS = 100 \times \left| \frac{VSS}{\sum_{\xi \in \{1,2,3,\dots,30\} \subseteq \Xi} \pi_{\xi} Z_{\xi}^{EV}} \right|$

عنوان درصد بهبود جواب اسمی توسط رویکرد تصادفی است.

○ مقدار بهینه هر سناریو $\xi \in \Xi$ به دست آورده می شود و Z_{ξ}^* ذخیره می شود.

○ مقدار EVPI از رابطه زیر حساب می شود:

$$EVPI = \sum_{\xi \in \{1,2,3,\dots,30\} \subseteq \Xi} \pi_{\xi} Z_{\xi}^{RSP} - \sum_{\xi \in \{1,2,3,\dots,30\} \subseteq \Xi} \pi_{\xi} Z_{\xi}^*$$

▪ لازم به توضیح است که هرچه مقدار EVPI کمتر باشد، نشان می دهد که با استفاده از رویکرد

RSP توانسته ایم به مقدار قابل توجهی، عدم قطعیت را کنترل کنیم. هرچه این مقدار بیشتر

باشد، نشان می دهد هزینه کردن و به دست آوردن اطلاعات بیشتر در مورد داده های مسئله

یک تصمیم اقتصادی است.

در جدول ۴-۱۷ مقادیر Z_{ξ}^* ، Z_{ξ}^{RSP} و Z_{ξ}^{EV} برای هر یک از ۳۰ سناریوی واقع سازی شده

$\xi \in \{1,2,3,\dots,30\} \subseteq \Xi$ مرتبط با عدم قطعیت ناشی از خرابی ماشین ها، محاسبه شده است.

در جدول ۴-۱۸ مقدار هر یک از معیارهای VSS و RVSS و EVPI محاسبه شده است که نشان دهنده

اعتبار و ارزش قابل قبول رویکرد تصادفی پیشنهادی است. شکل ۴-۸ نیز مقایسه مقادیر تابع هدف Z_{ξ}^* ،

Z_{ξ}^{RSP} و Z_{ξ}^{EV} را نشان می دهد و مشخص است که مقدار تابع هدف Z_{ξ}^{RSP} عمدتاً به مقدار بهینه Z_{ξ}^* نزدیک

است در حالی که Z_{ξ}^{EV} بشدت نوسان دارد.

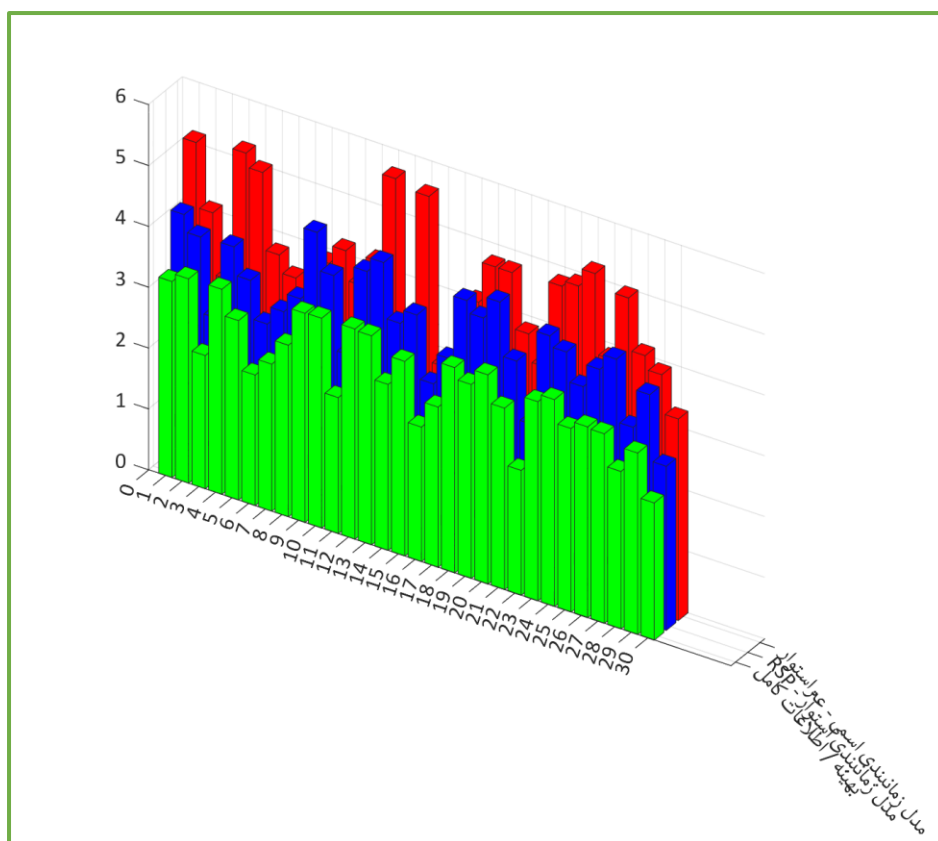
¹ Relative Value of Stochastic Solution

جدول ۱۷-۴. مقدار تابع هدف رویکرد RSP، مقدار متوسط (EV) در مقایسه با مقدار بهینه هر سناریو

سناریو ($\xi \in \Xi$)	Z_{ξ}^*	Z_{ξ}^{RSP}	Z_{ξ}^{EV}
1	3222085.53	4160386.54	5182646.07
2	3358687.91	3883874.41	4119172.90
3	2190480.22	2640371.12	3109577.10
4	3370063.78	3906693.46	5285234.22
5	2948538.87	3448099.07	5059679.44
6	2146310.61	2821736.45	3796081.69
7	2417747.33	3116393.44	3509011.99
8	2820322.28	3422235.17	3205975.46
9	3436260.25	4604741.34	3934368.11
10	3447332.80	3988182.14	4234294.61
11	2236419.62	2768125.86	3751263.57
12	3455889.17	4237997.30	4236219.54
13	3435750.42	4477137.91	5693036.10
14	2728063.47	3571144.15	3321456.09
15	3200420.70	3800098.00	5586439.92
16	2212829.51	2761506.96	2875544.28
17	2632641.92	3262152.00	3110146.15
18	3373603.29	4315724.52	4127045.53
19	3188310.99	4118892.78	4796349.67
20	3439238.64	4474233.96	4795785.84
21	2983611.05	3595863.00	3881015.08
22	2053567.52	2640765.71	3428919.81
23	3273693.96	4193666.13	4847205.93
24	3400989.87	4021746.53	4942614.97
25	3018102.73	3542647.59	5240148.04
26	3136610.20	3919736.48	3921064.00
27	3114698.70	4179766.16	5024146.60
28	2588340.53	3152798.44	4168189.57
29	2983216.84	3779895.48	3946626.73
30	2256780.03	2696315.90	3311198.81
میانگین	2935686.96	3650097.60	4214681.93

جدول ۱۸-۴. معیارهای VSS، RVSS و EVPI برای نشان دادن ارزش مدل RSP پیشنهادی

VSS	RVSS	EVPI
4214681.93	VSS	3650097.60
-	/	-
3650097.60	4214681.93	2935686.96
=	=	=
564584.33	0.13	714410.64



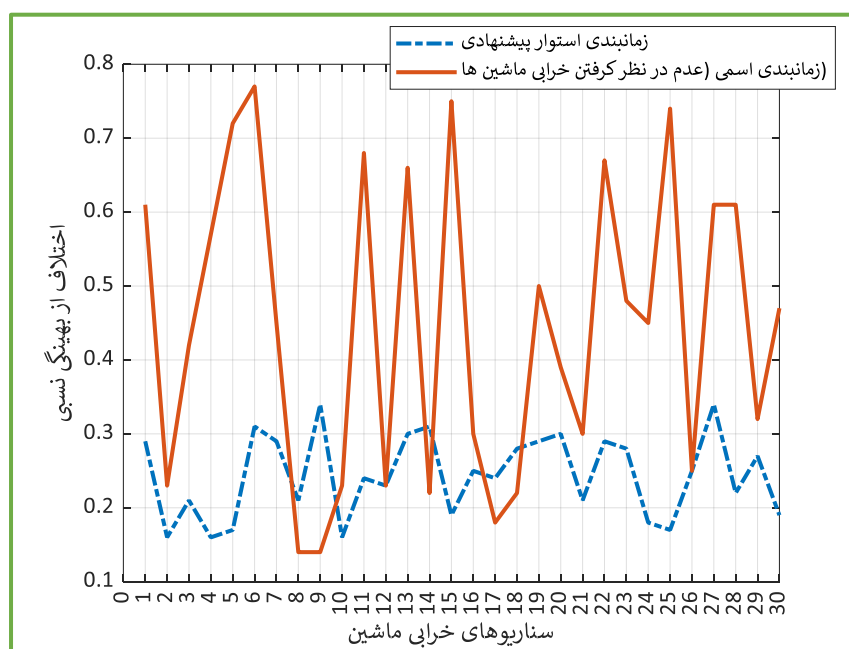
شکل ۸-۴. مقایسه مقادیر هزینه با رویکردهای RSP و مقدار متوسط در مقابل مقدار بهینه هر سناریو

علاوه بر معیارهای شناخته شده فوق، در جدول ۴-۱۹ مقدار انحراف از بهینگی نسبی (ROD^1) در هر سناریو برای رویکرد RSP پیشنهادی در مقابل با رویکرد مقدار متوسط آورده شده است. همانطور که در این جدول و همینطور شکل ۴-۹ ملاحظه می شود، در رویکرد RSP پیشنهادی نه تنهای متوسط ROD بلکه بیشینه ROD به طور قابل ملاحظه ای نسبت به رویکرد اسمی کمتر است و این خود نشان دهنده ارزش این رویکرد در مواجهه با عدم قطعیت تصادفی مرتبط با سناریوهای خرابی ماشین ها در مسئله FJSP-PMB موردنظر این تحقیق است.

¹ Relative Optimality Deviation

جدول ۴-۱۹. مقدار تابع هدف رویکرد RSP و مقدار متوسط/اسمی (EV) در مقایسه با مقدار بهینه هر سناریو

سناریو ($\xi \in \Xi$)	مقدار ROD رویکرد	مقدار ROD رویکرد
	EV	MSSP
1	0.61	0.29
2	0.23	0.16
3	0.42	0.21
4	0.57	0.16
5	0.72	0.17
6	0.77	0.31
7	0.45	0.29
8	0.14	0.21
9	0.14	0.34
10	0.23	0.16
11	0.68	0.24
12	0.23	0.23
13	0.66	0.30
14	0.22	0.31
15	0.75	0.19
16	0.30	0.25
17	0.18	0.24
18	0.22	0.28
19	0.50	0.29
20	0.39	0.30
21	0.30	0.21
22	0.67	0.29
23	0.48	0.28
24	0.45	0.18
25	0.74	0.17
26	0.25	0.25
27	0.61	0.34
28	0.61	0.22
29	0.32	0.27
30	0.47	0.19
میانگین	0.44	0.24
پیشینه	0.77	0.34



شکل ۴-۹. مقایسه انحراف بهینگی حاصل از زمانبندی استوار رویکرد RSP و زمانبندی رویکرد اسمی

فصل پنجم:

نتیجه گیری و تحقیقات آتی

۵-۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در برنامه‌ریزی سیستم‌های تولید، زمان‌بندی کارها/سفارشات ورودی سیستم یکی از مهمترین مسائل عملیاتی برای مدیران هر واحد تولیدی به حساب می‌آید. در یک سیستم تولیدی با N کار/سفارش که باید توسط M ماشین پردازش شود، مسئله زمان‌بندی در حالت کلی دربرگیرنده ۳ زیرمسئله مهم است، اول آنکه ماشین‌ها به چه کارهایی تخصیص داده شود (Assignment)، دوم آنکه توالی کارهای واگذار شده به هر ماشین به چه صورت باشد (Sequencing) و نهایتاً آنکه زمان انجام هر کار واگذار شده به هر ماشین کی باشد (Timing). مسئله زمان‌بندی کارکارگاهی منعطف (FJSP) یک مسئله مهم از مسائل زمان‌بندی سیستم‌های تولیدی است که در آن عملیات مرتبط با هر کار باید توسط زیرمجموعه‌ای از ماشین‌ها با یک ترتیب مشخص پردازش شود. لازم به توضیح است در مسئله FJSP، برخلاف نسخه کلاسیک JSP که منعطف نیست، این امکان وجود دارد که برای هر عملیات بیش از یک ماشین وجود داشته باشد و لزومی ندارد همه عملیات مشابه روی یک ماشین پردازش شود.

یکی از مهمترین چالش‌ها در پرداختن به مسئله FJSP، در نظر گرفتن خرابی احتمالی ماشین‌ها است که ممکن است طی برنامه زمانی مرتبط با پردازش کارها، یک یا چند ماشین خراب شود و در سیستم تولیدی اختلال ایجاد شود. از این رو، در این تحقیق، مسئله FJSP تحت خرابی احتمالی ماشین‌ها مطرح شده است و یک مسئله جدید تحت عنوان FJSP-PMB تعریف، مدل‌سازی و حل می‌شود.

در مسئله FJSP-PMB موردنظر این تحقیق، برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات (نت) پیشگیرانه نیز به صورت همزمان و یکپارچه شده با تصمیمات زمان‌بندی کارها موردتوجه قرار می‌گیرد. در این مسئله، در کنار هدف کلاسیک کمینه‌سازی زمان تکمیل کارها (یا makespan)، کمینه‌سازی هزینه‌های مرتبط با نت نیز موردتوجه قرار می‌گیرد و یک مسئله بهینه‌سازی دوهدفه مطرح می‌شود. همچنین، برای هر یک از سفارشات یک موعد تحویل به صورت پنجره زمانی نرم مطرح می‌شود که در صورت نقض آن، به هزینه‌های سیستم تولیدی افزوده می‌شود. بنابراین، هدف دوم به صورت مجموع هزینه‌های نت و هزینه‌های تاخیر از پنجره زمانی نرم مرتبط با تحویل سفارشات است.

در این تحقیق، با فرض آنکه خرابی ماشین‌ها از یک توزیع تصادفی مشخص پیروی می‌کند، خرابی احتمالی ماشین‌ها به صورت یک مجموعه از سناریوهای احتمالی خرابی ماشین‌ها تعریف می‌شود که هر سناریو بیان می‌کند که نرخ خرابی ماشین در یک بازه زمانی مشخص به چه میزان است. با توجه به بیان سناریومحور خرابی احتمالی ماشین‌ها، از رویکردهای برنامه‌ریزی تصادفی سناریومحور می‌توان برای مدل‌سازی مسئله FJSP-PMB تحت سناریوهای خرابی ماشین‌ها استفاده کرد. با این وجود، با توجه به آنکه رویکرد کلاسیک برنامه‌ریزی تصادفی سناریومحور فقط متوسط عملکرد را موردتوجه قرار می‌دهد، در این

تحقیق از نسخه استوار آن، تحت عنوان برنامه‌ریزی سناریو محور تصادفی استوار (RSP) استفاده شده است که با استفاده از پارامترهای استواری بهینگی و استواری شدنی بود، نه تنها موجب می‌شود بهینگی مسئله تحت سناریوهای مختلف بیشتر باشد، بلکه بر شدنی بودن تحویل سفارشات در بازه زمانی مورد نظر آنها نیز تمرکز می‌کند. در واقع، در رویکرد RSP پیشنهادی این تحقیق، اولاً متوسط زمان تکمیل کارها تحت سناریوهای مختلف کمینه می‌شود، ثانیاً نوسان/انحراف معیار خروجی کاسته می‌شود که این خود سبب جلوگیری از هزینه‌های بیش از حد در سناریوهای بدبینانه می‌شود، ثالثاً مجموعه هزینه‌های نت و تاخیرات در تحویل سفارشات تحت سناریوهای مختلف را کمینه می‌کند.

با توجه به آنکه مدل RSP پیشنهادی این تحقیق به صورت بهینه‌سازی دوهدفه بوده است، از روش محدودیت اِپسیلون تکمیل شده (AEC) برای موازنه توابع هدف استفاده شده است. برای این منظور، ابتدا پارامترهای استواری مدل RSP به صورت بهینه تنظیم می‌شود و سپس با استفاده از روش AEC یک جبهه پارتو بدست آورده می‌شود. حال از میان جواب‌های پارتو، با تبدیل زمان تکمیل کارها به هزینه پردازش (که برای آن کل زمان پردازش در یک ضریب مشخص ضرب می‌شود)، مجموعه هزینه‌های مرتبط با تابع هدف اول (یعنی هزینه پردازش ناشی از زمان تکمیل کارها) و هدف دوم (یعنی هزینه‌های نت و تاخیر) با هم جمع می‌شود و آن جواب پارتو که کمترین هزینه کل را داشته باشد، به عنوان بهترین جواب پارتو انتخاب شده است و زمان‌بندی استوار بر اساس آن بدست آورده شده است.

برای ارزیابی مدل RSP و روش AEC پیشنهادی این تحقیق برای حل مسئله FJSP-PMB تعریف شده، یک مطالعه عددی تعریف شده است و داده‌های مرتبط با آن توضیح داده شده است. ابتدا با استفاده از رویکرد اسمی یا مقدار متوسط، بدون در نظر گرفتن سناریوهای اختلال یا خرابی ماشین‌ها، یک زمان‌بندی اسمی یا غیراستوار به دست آورده شده است. سپس، با به کارگیری مدل و روش حل پیشنهادی این تحقیق، زمان‌بندی استوار برای همان مسئله به دست آورده شده است. برای ارزیابی و سنجش ارزش زمان‌بندی استوار پیشنهادی این تحقیق، پاسخ استوار حاصل از مدل RSP را با زمان‌بندی غیراستوار/اسمی در ۳۰ واقع‌سازی (Realization) تصادفی از مسئله قرار داده‌ایم و مجموع هزینه کل (هزینه پردازش + هزینه نت + هزینه تاخیرات) را برای هر یک از پاسخ‌ها به دست آورده‌ایم. پس از آن، با محاسبه معیارهایی همچون VSS و EVPI نشان داده‌ایم که روش پیشنهادی این تحقیق برای مواجهه با سناریوهای تصادفی خرابی ماشین‌ها ارزشمند است و مجموع هزینه‌ها را در مقایسه با رویکرد مقدار اسمی، بشدت کاهش می‌دهد. همچنین با استفاده از معیار اختلاف نسبی بهینگی (ROD) نشان داده‌ایم که در رویکرد RSP پیشنهادی نه تنها متوسط اختلاف بهینگی کاهش می‌یابد، بلکه در سناریوهای بدبینانه نیز اختلاف بهینگی آن بسیار کم می‌شود که این خود نشان‌دهنده خاصیت استواری زمان‌بندی حاصل از این رویکرد است.

۲-۵ فرصت تحقیقات آتی

مهمترین مواردی که برای توسعه این تحقیق در فرصت‌های تحقیقاتی آتی می‌توان به آن اشاره کرد، عبارتند از:

- در نظر گرفتن دیگر منابع لازم برای پردازش کارها، مثل انسان، و در نظر گرفتن وابستگی آنها
- در نظر گرفتن سفارشات لحظه‌ای که ممکن است طی پردازش سفارشات در دست، سفارش جدیدی برای سیستم تولیدی وارد شود.
- توسعه روش‌های حل فراابتکاری برای حل نموده‌های اندازه بزرگ مسئله FJSP-PMB
- اضافه کردن قابلیت لغو برخی از سفارشات در صورت بروز سناریوهای بدبینانه خرابی ماشین و پرداختن جریمه لغو شدن بجای پذیرش هزینه تاخیر از پنجره زمانی نرم تعریف‌شده
- در نظر گرفتن قابلیت جایگزینی و اضافه کردن ماشین جدید در صورت بروز خرابی مکرر برای یک ماشین طی پردازش کارها

گل مکانی حمید رضا و علی نمازی ، (۱۳۹۱) ، زمان‌بندی کار کارگاهی چند مسیره با در نظر گرفتن محدودیت نگهداری و تعمیرات (نت)، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، شماره ۴، دوره ۲۳، صفحه ۴۶۰-۴۷۰.

یزدانی مهدی، مصطفی زندیه، رضا توکلی مقدم، (۱۳۹۳)، یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی برای مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین، فصلنامه علمی - پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی، شماره ۳۳، دوره ۱۲، صفحه ۷۴-۴۳.

Al-Hinai, N., & ElMekkawy, T. Y. (2011). Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns using a hybrid genetic algorithm. *International Journal of Production Economics*, 132(2), 279-291.

Aghaei, J., Amjady, N., & Shayanfar, H. A. (2011). Multi-objective electricity market clearing considering dynamic security by lexicographic optimization and augmented epsilon constraint method. *Applied Soft Computing*, 11(4), 3846-3858.

Azadeh, A., Rezaei-Malek, M., Evazabadian, F., & Sheikhalishahi, M. (2015). Improved design of CMS by considering operators decision-making styles. *International Journal of Production Research*, 53(11), 3276-3287.

Baker, K. R., & Trietsch, D. (2013). Principles of sequencing and scheduling: John Wiley & Sons.

Behnamian, J., & Fatemi Ghomi, S. M. T. (2013). The heterogeneous multi-factory production network scheduling with adaptive communication policy and parallel machine. *Information Sciences*, 219, 181-196.

Behnamian, J., & Fatemi Ghomi, S. M. T. (2016). A survey of multi-factory scheduling. *Journal of intelligent manufacturing*, 27(1), 231-249. doi:10.1007/s10845-014-0890-y

Behnamian, J., Zandieh, M., & Ghomi, S. F. (2009). Parallel-machine scheduling problems with sequence-dependent setup times using an ACO, SA and VNS hybrid algorithm. *Expert Systems with Applications*, 36(6), 9637-9644.

Bokhorst, J. A., & Gaalman, G. J. (2009). Cross-training workers in Dual Resource Constrained systems with heterogeneous processing times. *International Journal of Production Research*, 47(22), 6333-6356.

Bokhorst*, J., Slomp, J., & Gaalman, G. (2004). On the who-rule in dual resource constrained (DRC) manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 42(23), 5049-5074.

Brah, S., Hunsucker, J., & Shah, J. (1991). Mathematical modeling of scheduling problems. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 12(1), 113-137.

Buddala, R., & Mahapatra, S. S. (2019). Two-stage teaching-learning-based optimization method for flexible job-shop scheduling under machine breakdown. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(5-8), 1419-1432.

Baykasoğlu, A., & Madenoğlu, F. S. (2021). Greedy randomized adaptive search procedure for simultaneous scheduling of production and preventive maintenance activities in dynamic flexible job shops. *Soft Computing*, 25(23), 14893-14932.

Baykasoğlu, A., Madenoğlu, F. S., & Hamzadayı, A. (2020). Greedy randomized adaptive search for dynamic flexible job-shop scheduling. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 425-451.

- Černý, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of optimization theory and applications*, 45(1), 41-51.
- Chen, C.-T. (2011). Dynamic preventive maintenance strategy for an aging and deteriorating production system. *Expert Systems with Applications*, 38(5), 6287-6293.
- Cheng, T. E., Hsu, C.-J., & Yang, D.-L. (2011). Unrelated parallel-machine scheduling with deteriorating maintenance activities. *Computers & Industrial Engineering*, 60(4), 602-605.
- Cocozza-Thivent, C. (2000). A model for a dynamic preventive maintenance policy. *International Journal of Stochastic Analysis*, 13(4), 321-346.
- Deb, K. (2014). Multi-objective optimization. In *Search methodologies* (pp. 403-449): Springer.
- Demir, Y., & İşleyen, S. K. (2013). Evaluation of mathematical models for flexible job-shop scheduling problems. *Applied Mathematical Modelling*, 37(3), 977-988.
- Dousthaghi, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Makui, A. (2013). Solving the economic lot and delivery scheduling problem in a flexible job shop with unrelated parallel machines and a shelf life by a proposed hybrid PSO. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(5-8), 1401-1416.
- ElMaraghy, H., Patel, V., & Abdallah, I. B. (1999). A genetic algorithm based approach for scheduling of dual-resource constrained manufacturing systems. *CIRP Annals*, 48(1), 369-372.
- Elsayed, E., & Dhillon, B. S. (1979). Repairable systems with one standby unit. *Microelectronics Reliability*, 19(3), 243-245.
- Esmailian, G., SeddighiManesh, M., & Hamed, M. Binary integer formulation for mixed-model U-line assembly line with the approach of dual resource constrained.
- Faccio, M., Ries, J., & Saggiorno, N. (2015). Simulated annealing approach to solve dual resource constrained job shop scheduling problems: layout impact analysis on solution quality. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 7(6), 609-629.
- Farrokh, M., Azar, A., Jandaghi, G., & Ahmadi, E. (2018). A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty. *Fuzzy Sets and Systems*, 341, 69-91.
- Fattahi, P., & Fallahi, A. (2010). Dynamic scheduling in flexible job shop systems by considering simultaneously efficiency and stability. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(2), 114-123.
- Fattahi, P., Mehrabad, M. S., & Jolai, F. (2007). Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems. *Journal of intelligent manufacturing*, 18(3), 331-342.
- FELAN III, J., Fry, T., & Philipoom, P. (1993). Labour flexibility and staffing levels in a dual-resource constrained job shop. *International Journal of Production Research*, 31(10), 2487-2506.
- Felan, J. T., & Fry, T. D. (2001). Multi-level heterogeneous worker flexibility in a Dual Resource Constrained (DRC) job-shop. *International Journal of Production Research*, 39(14), 3041-3059.
- Gao, J., Sun, L., & Gen, M. (2008). A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job shop scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 35(9), 2892-2907.
- Garey, M. R., Johnson, D. S., & Sethi, R. (1976). The complexity of flowshop and jobshop scheduling. *Mathematics of operations research*, 1(2), 117-129.
- Givi, Z., Jaber, M. Y., & Neumann, W. P. (2015). Production planning in DRC systems considering worker performance. *Computers & Industrial Engineering*, 87, 317-327.

- Gunantara, N. (2018). A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. *Cogent Engineering*, 5(1), 1502242.
- Gustavsson, E., Patriksson, M., Strömberg, A.-B., Wojciechowski, A., & Önnheim, M. (2014). Preventive maintenance scheduling of multi-component systems with interval costs. *Computers & Industrial Engineering*, 76, 390-400.
- Hajibabaei, M., & Behnamian, J. (2023). Fuzzy cleaner production in assembly flexible job-shop scheduling with machine breakdown and batch transportation: Lagrangian relaxation. *Journal of Combinatorial Optimization*, 45(5), 112.
- Hajipour, V., Mehdizadeh, E., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014). A novel Pareto-based multi-objective vibration damping optimization algorithm to solve multi-objective optimization problems. *Scientia Iranica. Transaction E, Industrial Engineering*, 21(6), 2368.
- Hamed, M., Esmaeilian, G., Ismail, N., & Ariffin, M. (2012). Capability-based virtual cellular manufacturing systems formation in dual-resource constrained settings using Tabu Search. *Computers & Industrial Engineering*, 62(4), 953-971.
- Hamm, M., Beißert, U., & König, M. (2010). Simulation-based optimization of construction schedules by using pareto simulated annealing: Professur Angewandte Mathematik.
- Hansen, P., & Mladenović, N. (2001). Variable neighborhood search: Principles and applications. *European Journal of Operational Research*, 130(3), 449-467.
- Hu, J., & Jiang, Z. (2016). A dynamic maintenance policy for production system with variable operational condition. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1394-1399.
- Jaber, M. Y., & Neumann, W. P. (2010). Modelling worker fatigue and recovery in dual-resource constrained systems. *Computers & Industrial Engineering*, 59(1), 75-84.
- Jianying, S. Z. Z. (2005). Intelligent optimization for job shop scheduling of dual-resources [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 3.
- Kacem, I., Hammadi, S., & Borne, P. (2002). Approach by localization and multiobjective evolutionary optimization for flexible job-shop scheduling problems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 32(1), 1-13.
- Kirkpatrick, S. (1984). Optimization by simulated annealing: Quantitative studies. *Journal of statistical physics*, 34(5-6), 975-986.
- Kress, D., Müller, D., & Nossack, J. (2019). A worker constrained flexible job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times. *OR Spectrum*, 41(1), 179-217.
- Kress, D., & Müller, D. (2019). Mathematical Models for a Flexible Job Shop Scheduling Problem with Machine Operator Constraints. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 94-99.
- Laggoune, R., Chateauneuf, A., & Aissani, D. (2010). Preventive maintenance scheduling for a multi-component system with non-negligible replacement time. *International Journal of Systems Science*, 41(7), 747-761.
- Lambert, B. K., Walvekar, A. G., & Hiras, J. P. (1971). Optimal redundancy and availability allocation in multistage systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 20(3), 182-185.
- Lang, M., & Li, H. (2011). Research on dual-resource multi-objective flexible job shop scheduling under uncertainty. Paper presented at the 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC).
- Lanza, G., Niggenschmidt, S., & Werner, P. (2009). Behavior of dynamic preventive maintenance optimization for machine tools. Paper presented at the 2009 Annual Reliability and Maintainability Symposium.
- Lei, D., & Guo, X. (2014). Variable neighbourhood search for dual-resource constrained flexible job shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 52(9), 2519-2529.

- Lei, D., & Guo, X. (2015). An effective neighborhood search for scheduling in dual-resource constrained interval job shop with environmental objective. *International Journal of Production Economics*, 159, 296-303.
- Lei, D., & Tan, X. (2016). Local search with controlled deterioration for multi-objective scheduling in dual-resource constrained flexible job shop. Paper presented at the 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC).
- Li, J., Huang, Y., & Niu, X. (2016). A branch population genetic algorithm for dual-resource constrained job shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 102, 113-131.
- Li, J., Sun, S., & Huang, Y. (2011). Adaptive hybrid ant colony optimization for solving dual resource constrained job shop scheduling problem. *Journal of Software*, 6(4), 584-594.
- Lin, S.-W., & Ying, K.-C. (2015). A multi-point simulated annealing heuristic for solving multiple objective unrelated parallel machine scheduling problems. *International Journal of Production Research*, 53(4), 1065-1076.
- Liu, B., Xu, Z., Xie, M., & Kuo, W. (2014). A value-based preventive maintenance policy for multi-component system with continuously degrading components. *Reliability Engineering & System Safety*, 132, 83-89.
- Liu, C., Wang, J., Leung, J. Y.-T., & Li, K. (2016). Solving cell formation and task scheduling in cellular manufacturing system by discrete bacteria foraging algorithm. *International Journal of Production Research*, 54(3), 923-944.
- Liu, X. X., Liu, C. B., & Tao, Z. (2011). Research on bi-objective scheduling of dual-resource constrained flexible job shop. Paper presented at the Advanced Materials Research.
- Lobo, B. J., Hodgson, T. J., King, R. E., Thoney, K. A., & Wilson, J. R. (2013). An effective lower bound on Lmax in a worker-constrained job shop. *Computers & Operations Research*, 40(1), 328-343.
- Mati, Y., & Xie, X. (2004). The complexity of two-job shop problems with multi-purpose unrelated machines. *European Journal of Operational Research*, 152(1), 159-169.
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465.
- Mehdizadeh, E., Tavarroth, M. R., & Mousavi, S. M. (2010). Solving the stochastic capacitated location-allocation problem by using a new hybrid algorithm. Paper presented at the Proceedings of the 15th WSEAS international conference on Applied mathematics.
- Mladenović, N., & Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, 24(11), 1097-1100.
- Moghaddam, K. S., & Usher, J. S. (2011a). Preventive maintenance and replacement scheduling for repairable and maintainable systems using dynamic programming. *Computers & Industrial Engineering*, 60(4), 654-665.
- Moghaddam, K. S., & Usher, J. S. (2011b). Sensitivity analysis and comparison of algorithms in preventive maintenance and replacement scheduling optimization models. *Computers & Industrial Engineering*, 61(1), 64-75.
- Moradi, E., Ghomi, S. F., & Zandieh, M. (2011). Bi-objective optimization research on integrated fixed time interval preventive maintenance and production for scheduling flexible job-shop problem. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 7169-7178.
- Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*, 43(2), 264-281.
- Nouiri, M., Bekrar, A., Jemai, A., Trentesaux, D., Ammari, A. C., & Niar, S. (2017). Two stage particle swarm optimization to solve the flexible job shop predictive scheduling

- problem considering possible machine breakdowns. *Computers & Industrial Engineering*, 112, 595-606.
- Nourelfath, M., & Châtelet, E. (2012). Integrating production, inventory and maintenance planning for a parallel system with dependent components. *Reliability Engineering & System Safety*, 101, 59-66.
- Ou, J., Zhong, X., & Wang, G. (2015). An improved heuristic for parallel machine scheduling with rejection. *European Journal of Operational Research*, 241(3), 653-661.
- Pan, E., Liao, W., & Xi, L. (2010). Single-machine-based production scheduling model integrated preventive maintenance planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(1-4), 365-375.
- Patel, V., Elmaraghy, H., & Ben-Abdallah, I. (1999). Scheduling in dual-resources constrained manufacturing systems using genetic algorithms. Paper presented at the 1999 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings ETFA'99 (Cat. No. 99TH8467).
- Pezzella, F., Morganti, G., & Ciaschetti, G. (2008). A genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 35(10), 3202-3212.
- Pinedo, M., & Hadavi, K. (1992). Scheduling: theory, algorithms and systems development. In *Operations Research Proceedings 1991* (pp. 35-42): Springer.
- Pishvae, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 206, 1-20.
- Rahmati, S. H. A., Zandieh, M., & Yazdani, M. (2013). Developing two multi-objective evolutionary algorithms for the multi-objective flexible job shop scheduling problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 915-932.
- Razavi Al-e-hashem, S. A., Papi, A., Pishvae, M. S., & Rasouli, M. (2022). Robust maintenance planning and scheduling for multi-factory production networks considering disruption cost: a bi-objective optimization model and a metaheuristic solution method. *Operational Research*, 22(5), 4999-5034.
- Ren, H., Jiang, L., Xi, X., & Li, M. (2009). Heuristic optimization for dual-resource constrained job shop scheduling. Paper presented at the 2009 International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics.
- Rishel, T. D., & Christy, D. (1996). Incorporating maintenance activities into production planning; integration at the master schedule versus material requirements level. *International Journal of Production Research*, 34(2), 421-446.
- Ruiz, R., García-Díaz, J. C., & Maroto, C. (2007). Considering scheduling and preventive maintenance in the flowshop sequencing problem. *Computers & Operations Research*, 34(11), 3314-3330.
- Sajadi, S. M., Alizadeh, A., Zandieh, M., & Tavan, F. (2019). Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns: multi-objectives genetic algorithm approach. *International journal of mathematics in operational research*, 14(2), 268-289.
- Shapiro, A., Dentcheva, D., & Ruszczyński, A. (2021). *Lectures on stochastic programming: modeling and theory*: SIAM.
- Shen, L., Dauzère-Pérès, S., & Neufeld, J. S. (2018). Solving the flexible job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, 265(2), 503-516.
- Shen, X.-N., & Yao, X. (2015). Mathematical modeling and multi-objective evolutionary algorithms applied to dynamic flexible job shop scheduling problems. *Information Sciences*, 298, 198-224.

- Shi, H., & Zeng, J. (2016). Real-time prediction of remaining useful life and preventive opportunistic maintenance strategy for multi-component systems considering stochastic dependence. *Computers & Industrial Engineering*, 93, 192-204.
- Sohn, S. Y., & Yoon, K. B. (2010). Dynamic preventive maintenance scheduling of the modules of fighter aircraft based on random effects regression model. *Journal of the Operational Research Society*, 61(6), 974-979.
- Tavakoli, M. R., & Mahdizadeh, E. (2007). A new ILP model for identical parallel-machine scheduling with family setup times minimizing the total weighted flow time by a genetic algorithm.
- Tian, Y., Si, L., Zhang, X., Cheng, R., He, C., Tan, K. C., & Jin, Y. (2021). Evolutionary large-scale multi-objective optimization: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(8), 1-34.
- Van Horenbeek, A., & Pintelon, L. (2013). A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 120, 39-50.
- Wang, S., & Yu, J. (2010). An effective heuristic for flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities. *Computers & Industrial Engineering*, 59(3), 436-447.
- Wang, Z., Jochem, P., & Fichtner, W. (2020). A scenario-based stochastic optimization model for charging scheduling of electric vehicles under uncertainties of vehicle availability and charging demand. *Journal of Cleaner Production*, 254, 119886.
- Wen-zhu, L., Er-shun, P., & Li-feng, X. (2007). Dynamic preventive maintenance policy based on health index. Paper presented at the 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.
- Woo, Y.-B., Jung, S., & Kim, B. S. (2017). A rule-based genetic algorithm with an improvement heuristic for unrelated parallel machine scheduling problem with time-dependent deterioration and multiple rate-modifying activities. *Computers & Industrial Engineering*, 109, 179-190.
- Xianzhou, C., & Zhenhe, Y. (2011). An improved genetic algorithm for dual-resource constrained flexible job shop scheduling. Paper presented at the 2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation.
- Xu, J., Xu, X., & Xie, S. (2011). Recent developments in Dual Resource Constrained (DRC) system research. *European Journal of Operational Research*, 215(2), 309-318.
- Xu, J., & Zhou, X. (2013). Approximation based fuzzy multi-objective models with expected objectives and chance constraints: Application to earth-rock work allocation. *Information Sciences*, 238, 75-95.
- Yazdani, M., Amiri, M., & Zandieh, M. (2010). Flexible job-shop scheduling with parallel variable neighborhood search algorithm. *Expert Systems with Applications*, 37(1), 678-687.
- Yu, C.-S., & Li, H.-L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International journal of production economics*, 64(1-3), 385-397.
- Zhang, G., Lu, X., Liu, X., Zhang, L., Wei, S., & Zhang, W. (2022). An effective two-stage algorithm based on convolutional neural network for the bi-objective flexible job shop scheduling problem with machine breakdown. *Expert Systems with Applications*, 203, 117460.
- Zhang, G., Hu, Y., Sun, J., & Zhang, W. (2020). An improved genetic algorithm for the flexible job shop scheduling problem with multiple time constraints. *Swarm and Evolutionary Computation*, 54, 100664.
- Zhang, J., Wang, W., & Xu, X. (2017). A hybrid discrete particle swarm optimization for dual-resource constrained job shop scheduling with resource flexibility. *Journal of intelligent manufacturing*, 28(8), 1961-1972.

- Zheng, X.-l., & Wang, L. (2016). A knowledge-guided fruit fly optimization algorithm for dual resource constrained flexible job-shop scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 54(18), 5554-5566.
- Zhou, X., Lu, Z., & Xi, L. (2012). Preventive maintenance optimization for a multi-component system under changing job shop schedule. *Reliability Engineering & System Safety*, 101, 14-20.