

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت

پایان نامه کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی

مدل سازی و حل مساله زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف پذیر با ماشین های موازی غیر مرتبط و رویکرد کاهش هزینه های عملیاتی

نگارنده: علی حسینی

استاد راهنما

دکتر سید محمد حسن حسینی

شهریور ۱۳۹۹

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند.

تقدیم اثر

این پایان‌نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می‌نمایم به محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه‌ی تلاش‌های محبت‌آمیزشان و همچنین استادان فرزانه و فرهیخته‌ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند. از پروردگار مهربان تقاضا دارم به همه ما توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران سربلند عنایت فرماید.

تشکر و قدردانی

برخود لازم می‌دانم از استاد گرانقدر، جناب آقای دکتر سید محمد حسن حسینی به خاطر راهنمایی‌های ارزشمندشان در به ثمر رسیدن این پروژه تحقیقاتی تشکر و قدردانی نمایم.

تعمدنامه

اینجانب **علی حسینی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مدیریت صنعتی** دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **کارشناسی ارشد تحت راهنمایی دکتر سید محمد حسن حسینی** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این مطالعه مساله زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با مراحل پردازش وابسته به ماشین بررسی می‌شود. ماشین‌های موازی در مرحله اول به صورت نامرتب و با سطوح مختلف تکنولوژی در کنار هم قرار گرفته‌اند. برخی از این ماشین‌ها چند منظوره بوده و می‌توانند چند پردازش مختلف را روی کارها انجام دهند. بنابراین، کارهایی که به این ماشین‌ها تخصیص داده می‌شوند نیاز به پردازش در برخی مراحل بعدی ندارند. این مساله با الهام از یک مساله واقعی، برگرفته از صنعت فنرسازی تعریف می‌شود. علاوه بر این، زمان راه‌اندازی وابسته به توالی در نظر گرفته شده و محدودیت دسترسی به ماشین‌ها نیز لحاظ شده است. همچنین زمان‌های ترخیص و آماده بودن کارها متفاوت و غیر صفر در نظر گرفته می‌شود. برای حل این مساله سه مدل ریاضی عدد صحیح مختلط پیشنهاد گردید. مدل اول با هدف بهینه‌سازی هزینه تولید و حداکثر زمان تکمیل به صورت توأم مورد مطالعه قرار گرفت. به دلیل اهمیت فراوان مسائل زیست محیطی، در مدل دوم به بررسی کاهش مصرف انرژی و به صورت همزمان کاهش هزینه تولید پرداخته شد. در مدل سوم نیز تاثیر محدودیت منابع کمکی بر زمانبندی تولید به عنوان یک فاکتور متغیر که توسط مدل اندازه‌گیری می‌شود، با هدف حداقل کردن حداکثر زمان تکمیل مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که مدل‌های مورد بررسی در کلاس مسائل سخت (NP-hard) طبقه‌بندی می‌شوند، بنابراین جهت حل آنها در ابعاد متوسط و بزرگ، الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک چند هدفه مبتنی بر مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و تکاملی مبتنی بر قدرت پاراتو (SPEA-II) برای مسائل دو هدفه و الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک (GA) و شبیه‌سازی تبرید (SA) برای حل مساله تک هدفه پیشنهاد گردید. نتایج آزمایشات انجام شده نشان داد که هر سه مدل پیشنهاد شده توانسته‌اند کارها را با در نظر گرفتن محدودیت‌های اعمال شده به خوبی زمانبندی کنند. همچنین با اندازه‌گیری شاخص‌های ارزیابی مشخص گردید الگوریتم NSGA-II در مقابل الگوریتم SPEA-II و الگوریتم GA در مقابل الگوریتم SA از عملکرد بهتری برخوردار بوده و به پاسخ‌های مناسب‌تری دست یافته‌اند.

کلمات کلیدی (۵ تا ۷ کلیدواژه): زمانبندی، جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، مراحل پردازش وابسته به ماشین، ماشین‌های موازی نامرتب، هزینه‌های تولید، مصرف انرژی، محدودیت منابع کمکی.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- A bi-objective flexible flow shop scheduling problem with machine-dependent processing stages: trade-off between production costs and energy consumption (Accept).
- ۲- Scheduling in a flexible flow shop with unrelated parallel machines and machine-dependent process stages: trade-off between Makespan and production costs (Revise)
- ۳- Minimizing the operational costs in a flexible flow shop scheduling problem with unrelated parallel machines (Under review).
- ۴- Optimization the number of required auxiliary resource in a flexible flow shop scheduling problem with machine-dependent process stage and machine eligibility restrictions (Under review).

۵- یک مدل دوهدفه برای زمانبندی سبز در محیط جریان کارگاهی انعطاف پذیر با مراحل پردازش وابسته به ماشین و محدودیت دسترسی به ماشین ها (در حال داوری).

فهرست مطالب

د	فهرست جداول
و	فهرست اشکال
ح	فهرست علائم
۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۱-۲ شرح مساله و مفروضات پژوهش
۴	۱-۳ ضرورت و اهمیت پژوهش
۵	۱-۴ نوآوری پژوهش
۶	۱-۵ سوالات پژوهش
۶	۱-۶ اهداف پژوهش
۶	۱-۷ روش پژوهش
۷	۱-۸ ساختار پژوهش
۹	فصل ۲: مروری بر ادبیات پژوهش
۱۰	۲-۱ مقدمه
۱۰	۲-۲ مبانی نظری
۱۰	۲-۲-۱ مدل سازی
۱۱	۲-۲-۲ زمانبندی
۱۱	۲-۲-۳ اصطلاحات رایج در زمانبندی

۱۲..... ۲-۲-۴ انواع الگوهای پردازش در محیط تولید

۱۶..... ۲-۲-۵ محدودیت‌ها

۱۷..... ۲-۲-۶ معیارهای عملکرد

۱۷..... ۲-۲-۷ سابقه تحقیقات

۲۴..... ۲-۲-۸ بررسی روش‌های حل مساله زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر

۲۷..... ۲-۲-۹ جمع‌بندی

۲۹ فصل ۳: روش‌شناسی تحقیق و مدل‌سازی ریاضی

۳۰..... ۳-۱ مقدمه

۳۰..... ۳-۲ مدل‌سازی ریاضی مساله

۳۲..... ۳-۲-۱ تعریف پارامترها

۳۳..... ۳-۲-۲ مدل ریاضی FFS-I

۳۶..... ۳-۲-۳ مدل ریاضی FFS-II

۳۹..... ۳-۲-۴ مدل ریاضی FFS-III

۴۲..... ۳-۳ روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه

۴۲..... ۳-۳-۱ روش بهینگی پارتو

۴۴..... ۳-۳-۲ روش محدودیت افسیلون تعمیم یافته

۴۵..... ۳-۳-۳ بهینه‌سازی چند هدفه تکاملی (EMO)

۴۶..... ۳-۴ رویکرد حل مساله در ابعاد کوچک

۴۶..... ۳-۵ روش‌های فراابتکاری برای حل مساله در ابعاد متوسط و بزرگ

۴۶..... ۳-۵-۱ نحوه کدینگ مساله برای حل مدل

۴۷..... ۳-۵-۲ الگوریتم NSGA-II

۵۱..... ۳-۵-۳ الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پاراتو ۲ (SPEA-II)

۵۲	۳-۵-۴ الگوریتم ژنتیک (GA).....
۵۴	۳-۵-۵ الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (SA).....
۵۶	۳-۵-۶ تنظیم پارامترها با استفاده از روش تاگوچی.....
۶۱	۳-۶ جمع‌بندی

فصل ۴: پیاده‌سازی روش تحقیق و تحلیل نتایج ۶۳

۶۴	۴-۱ مقدمه
۶۴	۴-۲ مطالعه موردی.....
۶۷	۴-۳ ارزیابی و تحلیل نتایج
۶۸	۴-۳-۱ شاخص‌های ارزیابی عملکرد در ابعاد کوچک
۶۹	۴-۳-۲ شاخص‌های ارزیابی عملکرد در ابعاد متوسط و بزرگ
۷۱	۴-۳-۳ ارزیابی و تحلیل نتایج مدل FFS-I.....
۷۷	۴-۳-۴ ارزیابی و تحلیل نتایج مدل FFS-II.....
۸۴	۴-۳-۵ ارزیابی و تحلیل نتایج مدل FFS-III.....
۹۴	۴-۴ جمع‌بندی

فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی ۹۵

۹۶	۵-۱ مقدمه
۹۶	۵-۲ نتیجه‌گیری
۹۹	۵-۳ پیشنهادات آتی

مراجع ۱۰۰

فهرست جداول

جدول ۱-۲. طبقه بندی توابع هدف در محیط FFS	۲۲
جدول ۱-۳. سطوح پارامترهای الگوریتم NSGA-II و SPEA-II	۵۷
جدول ۲-۳. سطوح پارامترهای GA و SA	۵۹
جدول ۱-۴. زمان پردازش هر کار در هر مرحله کاری	۶۵
جدول ۲-۴. پارامتر هزینه برای هر کار در هر مرحله کاری	۶۵
جدول ۳-۴. نیازمندی پردازش کارها مطابق ماشین تخصیص یافته در ایستگاه	۶۶
جدول ۴-۴. زمانهای آماده‌سازی در مطالعه موردی با ابعاد کوچک	۶۶
جدول ۵-۴. مشخصات تعداد ماشین و تعداد کار برای تست مدلها در ابعاد متوسط و بزرگ	۶۷
جدول ۶-۴. پارامتر زمان پردازش و زمان راه اندازی در ابعاد متوسط و بزرگ	۶۷
جدول ۷-۴. جدول Payoff برای مدل FFS-I	۷۱
جدول ۸-۴. جدول نتایج الگوریتم های پیشنهادی در ابعاد کوچک برای مدل FFS-I	۷۱
جدول ۹-۴. مقدار توابع هدف در هر راه حل برای مسالهی S-I و S-II	۷۳
جدول ۱۰-۴. نتایج محاسباتی مقادیر معیارهای عملکرد الگوریتمهای NSGA-II و SPEA-II در ابعاد متوسط و بزرگ	۷۴
جدول ۱۱-۴. دامنه تغییرات توابع هدف در جواب های جبهه پاراتو	۷۷
جدول ۱۲-۴. مشخصات هزینه فرآیند و مصرف انرژی کارها در مدل FFS-II	۷۷
جدول ۱۳-۴. مقایسه عملکرد الگوریتم های پیشنهادی در مسائل با ابعاد کوچک (مدل FFS-II)	۷۸
جدول ۱۴-۴. مقایسه عملکرد الگوریتم های پیشنهادی در مسائل با ابعاد کوچک (مدل FFS-II)	۷۸
جدول ۱۵-۴. جزئیات راه‌حلها در مسائل S-I و S-II برای مدل FFS-II	۸۱
جدول ۱۶-۴. نتایج محاسباتی مقادیر معیارهای عملکرد الگوریتمهای NSGA-II و SPEA-II در ابعاد متوسط و بزرگ (مدل FFS-II)	۸۳
جدول ۱۷-۴. زمان پردازش هر کار در هر مرحله کاری برای مدل FFS-III	۸۴
جدول ۱۸-۴. زمان راه اندازی هر کار در ابعاد کوچک برای مدل FFS-III	۸۵
جدول ۱۹-۴. نتایج راه حلها در مدل FFS-III در ابعاد کوچک	۸۵
جدول ۲۰-۴. پارامترهای مدل FFS-III در ابعاد متوسط و بزرگ	۸۸
جدول ۲۱-۴. مقایسه نتایج راه حل ها ی الگوریتم های پیشنهادی در ابعاد متوسط و بزرگ (مدل FFS-III)	۸۹
جدول ۲۲-۴. سطوح در نظر گرفته شده برای پارامتر تعداد ماشین (مدل FFS-III)	۹۲

جدول ۲۳-۴. مقایسه راه حل ها با توجه به شاخص AEM و محدودیت نیروی کار متخصص و محدودیت
هزینه‌ای (مدل FFS-III) ۹۲

فهرست اشغال

شکل ۱-۱. جریان کارگاهی.....	۴
شکل ۱-۲. شماتیک مساله مورد مطالعه.....	۴
شکل ۲-۱. شکل الگوی تک ماشین.....	۱۳
شکل ۲-۲. شکل الگوی ماشین‌های موازی.....	۱۳
شکل ۲-۳. شکل الگوی جریان کارگاهی.....	۱۴
شکل ۲-۴. شکل الگوی خط جریان.....	۱۵
شکل ۲-۵. نمای شماتیک الگوی پیوندی.....	۱۶
شکل ۲-۶. توزیع تحقیقات انجام شده بر روی مساله FFS با تمرکز بر انواع ماشین‌های موازی.....	۱۹
شکل ۲-۷. توزیع روش‌های حل در تحقیقات انجام در حوزه FFS.....	۲۷
شکل ۳-۱. شماتیک مساله مورد مطالعه.....	۳۱
شکل ۳-۲. طبقه‌بندی هزینه تولید در تابع هدف.....	۳۳
شکل ۳-۳. حالات مختلف مرز بهینه.....	۴۴
شکل ۳-۴. کروموزوم ایجاد شده برای نمایش جواب.....	۴۷
شکل ۳-۵. رشته اول کروموزوم راه‌حل.....	۴۷
شکل ۳-۶. فلوچارت الگوریتم حل NSGA-II.....	۴۸
شکل ۳-۷. عملگر ترکیب تک نقطه‌ای پیشنهاد شده.....	۵۰
شکل ۳-۸. اپراتورهای استفاده شده جهت اجرای عملگر جهش.....	۵۱
شکل ۳-۹. شبه کد الگوریتم SPEA-II.....	۵۲
شکل ۳-۱۰. فلوچارت الگوریتم ژنتیک (GA).....	۵۴
شکل ۳-۱۱. فلوچارت الگوریتم SA.....	۵۶
شکل ۳-۱۲. نمودار میانگین نسبت SN برای دو الگوریتم NSGA-II و SPEA-II.....	۵۹
شکل ۳-۱۳. نمودار میانگین نسبت SN برای دو الگوریتم GA و SA.....	۶۰
شکل ۴-۱. نمونه خط تولید فنر در مطالعه موردی.....	۶۴
شکل ۴-۲. نقاط نامغلوب شناسایی شده توسط سه الگوریتم در مساله S-I و S-II (مدل FFS-I).....	۷۲
شکل ۴-۳. مقدار ظرفیت اشغال شده از ماشین‌ها در هر راه حل.....	۷۳
شکل ۴-۴. مقدار میانگین و ماکزیمم شاخص ONVG.....	۷۵
شکل ۴-۵. راه حل‌های جبهه پاراتو برای مسائل در ابعاد متوسط.....	۷۶
شکل ۴-۶. راه حل‌های جبهه پاراتو برای مسائل در ابعاد بزرگ.....	۷۶
شکل ۴-۷. نقاط نامغلوب شناسایی شده توسط سه الگوریتم در مساله S-I و S-II (مدل FFS-II).....	۷۹

- شکل ۴-۸. جواب‌های جبهه پاراتو در حالت محدود شدن متغیر C_{max} ۷۹
- شکل ۴-۹. مقدار ظرفیت اشغال شده ماشین‌ها در هر راه‌حل برای مسائل S-I و S-II (مدل FFS-II) .. ۸۰
- شکل ۴-۱۰. درصد تغییرات توابع هدف برای مساله S-I و S-II (مدل FFS-II) ۸۲
- شکل ۴-۱۱. جواب‌های جبهه پاراتو در مسائل با ابعاد متوسط (مدل FFS-II) ۸۳
- شکل ۴-۱۲. جواب‌های جبهه پاراتو در مسائل با ابعاد بزرگ (مدل FFS-II) ۸۴
- شکل ۴-۱۳. نمودار گانت حالت بهینه (مدل FFS-III) ۸۶
- شکل ۴-۱۴. مقایسه تاثیر منابع کمکی بر تابع هدف (مدل FFS-III) ۸۶
- شکل ۴-۱۵. نمودار گانت مدل FFS-III در حالت $ARv \leq 3$ ۸۷
- شکل ۴-۱۶. نمودار گانت مدل FFS-III در حالت $ARv \leq 2$ ۸۷
- شکل ۴-۱۷. نمودار گانت مدل FFS-III در حالت $ARv \leq 1$ ۸۷
- شکل ۴-۱۸. مقایسه تاثیر محدودیت منابع کمکی در شاخص هزینه (مدل FFS-III) ۸۸
- شکل ۴-۱۹. نحوه همگرایی دو الگوریتم پیشنهادی در مساله VII (مدل FFS-III) ۹۰
- شکل ۴-۲۰. مقایسه شاخص ضریب تغییرات در الگوریتم‌های GA و SA ۹۰
- شکل ۴-۲۱. میانگین زمان CPU برای دو الگوریتم پیشنهادی (مدل FFS-III) ۹۱
- شکل ۴-۲۲. سطح بهینه ماشین‌ها با توجه به شاخص AEM (مدل FFS-III) ۹۲
- شکل ۴-۲۳. مقایسه راه حل‌های شدنی با اعمال محدودیت‌های بودجه‌ای (مدل FFS-III) ۹۳

فصل ۱ : کلیات

۱-۱ مقدمه

زمانبندی، فرآیند تخصیص منابع به فعالیت‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی به منظور بهینه‌سازی یک یا چند هدف می‌باشد. زمانبندی به عنوان یک فرایند تصمیم‌گیری مهم، مبنای کار بسیاری از صنایع تولیدی و خدماتی محسوب می‌شود. تخصیص کارای منابع به فعالیت‌ها، زمینه‌ساز بهبود عملکرد سیستم-های تولیدی و خدماتی می‌باشد و ضرورتی برای بقا در فضای به شدت رقابتی بازار امروز به شمار می‌آید. همچنین اقتصادی بودن این سیستم‌ها منوط به بکارگیری صحیح و درست منابع یا همان داشتن یک برنامه تعیین توالی و زمان بندی مناسب می‌باشد.

با گسترش روزافزون صنایع تولیدی و خدماتی و درهم تنیدگی بیش از پیش آن با علم و مباحث تئوریک، لزوم استفاده از تئوری زمانبندی در صنعت اهمیت ویژه‌ای یافت. تئوری زمانبندی در ارتباط با مدل‌های ریاضی است که فرایند زمانبندی را تشریح می‌کند و یک نگرش کمی برای بدست آوردن ساختار مسائل در چهارچوب مدل‌های ریاضی به دست می‌دهد که این امر با تشریح منابع و فعالیت‌ها و تبدیل اهداف تصمیم‌گیری به یک تابع هدف، صورت می‌پذیرد. در نتیجه منابع، فعالیت‌ها و توابع هدف عناصر کلیدی مدل‌های زمانبندی محسوب می‌شوند. منابع بر حسب قابلیت‌های کمی و کیفی خود مشخص می‌شوند بطوریکه هر مدل نشان‌دهنده نوع و میزان منابع بکار رفته در آن می‌باشند. از سوی دیگر فعالیت‌ها بر حسب اطلاعاتی از قبیل منابع مورد نیاز، مدت زمان انجام، زمان آغاز، زمان پایان و درجه اهمیت یا اولویت آنها توصیف می‌شوند توابع هدف نیز در برگیرنده هزینه‌های سیستم برای اجرای تصمیمات مربوط به تخصیص منابع به فعالیت‌ها می‌باشند. تصمیمات عمده در فرآیند زمانبندی شامل بهره‌برداری کارا از منابع، پاسخگویی سریع به تقاضا و انطباق دقیق زمان‌های تحویل با موعدهای تحویل تعیین شده می‌شوند.

بطور کلی، مسائل زمانبندی به صورت مسائل بهینه‌سازی محدودیت‌دار بیان می‌شوند که در آنها به بررسی تصمیمات مربوط به تخصیص ماشین‌ها و توالی پردازش کارها پرداخته می‌شود. در حالتی که تنها یک ماشین موجود است، تعیین توالی پردازش کارها یک برنامه زمانی کامل را تشکیل می‌دهد. مسائل تک ماشین به وجود سادگی ذاتی، سنگ بنای درک فراگیر مفاهیم زمانبندی را تشکیل می‌دهند. در مقابل زمانبندی مسائل چند ماشین شامل سیستم‌های موازی، سیستم‌های جریان کارگاهی و سیستم‌های جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر می‌باشد. در سیستم‌های موازی، هر یک از کارها با انجام یک عملیات همانند مسائل تک ماشین بر روی یکی از ماشین‌های موازی موجود پردازش می‌شوند و به دنبال آن تخصیص ماشین‌ها به کارها موضوعیت پیدا می‌کند. این در حالی است که در سیستم‌های جریان کارگاهی و جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر کارها با انجام چند عملیات بر روی ماشین‌ها پردازش می‌شوند و مسائل مربوطه، ساختار نسبتاً پیچیده‌تری را تجربه می‌کنند.

در این پژوهش، به مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی نامرتبط و زمان راه‌اندازی وابسته به توالی به عنوان دسته مهمی از مسائل زمان‌بندی که دارای اهمیت و کاربرد فراوان است، پرداخته

می‌شود. مسائل جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، ترکیبی از حالت ماشین‌های موازی و ماشین‌های متوالی محسوب می‌شوند. تکنیک‌های به کار رفته در بهینه‌سازی این نوع مسائل با اعمال رویه‌های ترکیبی در مسائل زمانبندی پیچیده‌تر استفاده می‌شوند. در بخش‌های آتی این فصل، شرح تفصیلی مسأله مورد بررسی این تحقیق ارائه می‌شوند

۲-۱ شرح مساله و مفروضات پژوهش

مساله‌ی زمان‌بندی به معنای تعیین توالی انجام دادن کارهاست به گونه‌ای که هدف معینی را در سیستمی مفروض برآورده کند. هر دو مورد کار و ماشین ممکن است دارای خصوصیات و محدودیت های خاصی باشند که می‌تواند بر بهره‌وری منابع و هزینه تولید تأثیر بگذارد. یکی از انواع سیستم‌های تولید، سیستم تولید مبتنی بر سفارش (MTO)^۱ می‌باشد که پیچیدگی موارد فوق در آن ملموس‌تر است. همچنین جریان کارگاهی^۲، از جنبه های مهم سیستم تولید سفارشی است که کاربردهای زیادی در دنیای واقعی دارد به طوری که بسیاری از چیدمان‌های کارخانجات صنعتی از جمله خطوط مونتاژ به صورت جریان کارگاهی می‌باشد. در جریان کارگاهی، استقرار تجهیزات تولید بر اساس مراحل تولید هر محصول است و مواد در مسیر حرکت خود در هر مرحله تکمیل‌تر و نهایتاً به محصول نهایی تبدیل می‌شوند (شکل ۱-۱). در این سیستم تولیدی اگر در حداقل یک مرحله بیش از یک ماشین به صورت موازی قرار داشته باشد، این سیستم را سیستم جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر یا جریان کارگاهی ترکیبی می‌نامند. به عبارت دیگر، جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر به جریان کارگاهی گفته می‌شود که از ماشین‌های موازی در یک یا تعدادی از مراحل استفاده شده باشد. ماشین‌های موازی می‌توانند یکسان^۳، یکنواخت^۴ و یا نامرتبط^۵ باشند [۱].

در صورت اتمام کار فعلی بر روی ماشین، جهت اختصاص کار جدید، ماشین به زمانی تحت عنوان زمان راه‌اندازی^۶ نیازمند است. در بیشتر صنایع مانند صنایع نساجی، تولید فنر، تولید کاشی و سرامیک و صنایع رنگ، زمان‌های راه‌اندازی وابسته به توالی عملیات می‌باشند.

¹ Make to order

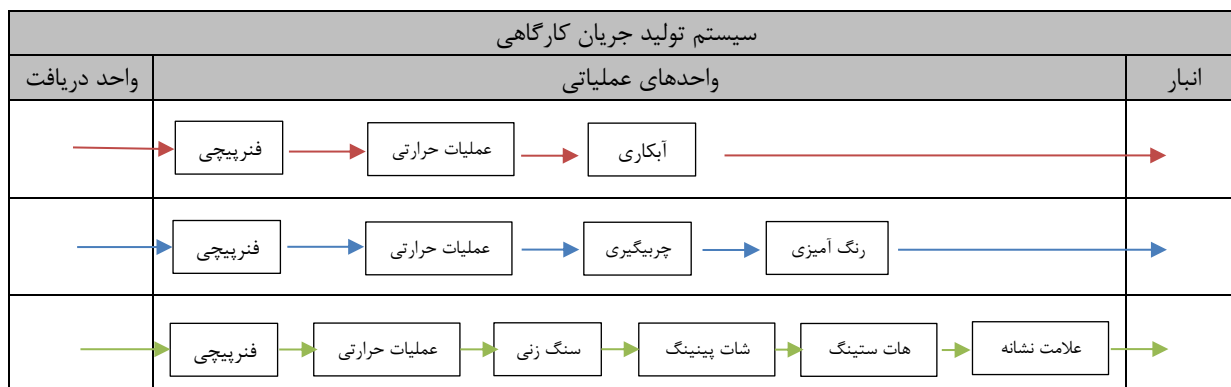
² Flow shop

³ Identical Machines in Parallel

⁴ Parallel Machines with different speeds

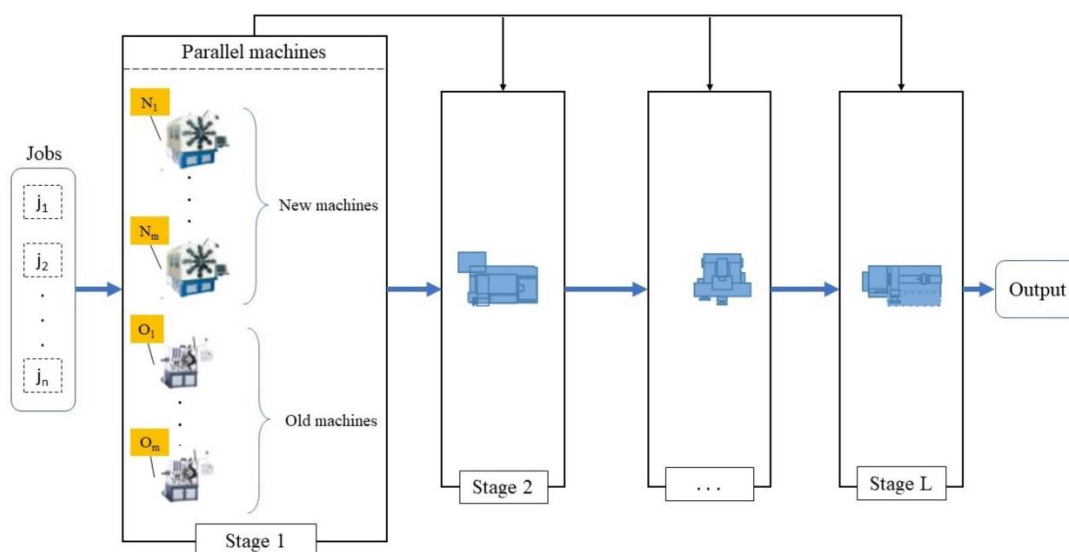
⁵ Unrelated Machines in Parallel

⁶ Setup time



شکل ۱-۱. جریان کارگاهی

در مساله مورد مطالعه در این تحقیق، تعدادی کار به صورت سفارش دریافت شده و می‌بایست در یک سیستم جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر انجام شود. در هر لحظه هر ماشین حداکثر می‌تواند یک کار را پردازش کند و هر کار را باید تعدادی از ماشین‌های متوالی پردازش نمایند. توالی محصولات و تخصیص منابع دو فعالیت مهم در فرایند زمانبندی محسوب می‌شوند. توالی مربوط به ترتیب پردازش کارها در هر ماشین یا مرحله است و تخصیص به انتخاب ماشین برای پردازش هر کار اطلاق می‌شود. شماتیک مساله مورد بررسی به صورت شکل ۱-۲ می‌باشد.



شکل ۱-۲. شماتیک مساله مورد مطالعه

۱-۳ ضرورت و اهمیت پژوهش

برنامه‌ریزی و کنترل تولید یکی از بیشترین فعالیت‌های مدیران عملیاتی می‌باشد و با توجه به افزایش اثرات عوامل داخلی و خارجی در محیط رقابت امروزی، اهمیت برنامه‌ریزی تولید افزایش یافته است. با توجه به روند رو به افزایش هزینه تولید و بازاریابی، ضروری است که واحدهای تولیدی برای افزایش بهره‌وری منابع به عنوان یک رویکرد رقابتی، یک برنامه تولید جامعی داشته باشند. به دلیل رقابت شدید و محدودیت منابع

در محیط پیرامون، زمانبندی به عنوان یک فعالیت مهم در زمینه برنامه‌ریزی کارگاه، یکی از مهمترین مباحث در سیستم های برنامه‌ریزی و کنترل تولید است که در تعامل با عوامل داخلی و خارجی یک سیستم تولیدی می‌باشد [۲] و [۳]. تعیین برنامه زمانبندی و توالی عملیات در چرخه تولید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و به عنوان یکی از عوامل کلیدی موفقیت در هر سازمان تولیدی، نقش مهم و موثری دارد. زمانبندی تولید موجب جلوگیری از انباشت سرمایه، تقلیل ضایعات، کاهش و یا حذف زمان بیکاری ماشین آلات و تلاش برای استفاده بهتر از آنها به منظور پاسخگویی به موقع به سفارش‌های مشتریان، تأمین مواد اولیه و دسترسی به اهداف سازمانی دارد. زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر به دلیل کاربردهای فراوان در صنایع، در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است [۴]. لذا در این خصوص هرچه بتوان به شرایط دنیای واقعی نزدیک‌تر شد می‌توان نتایج مؤثرتر و کاربردی‌تری را بدست آورد. در مجموع، انگیزه اصلی طرح مساله حاضر عدم توجه به گروه عظیمی از مسائل زمانبندی در دنیای واقعی در ادبیات موضوع و در نظر نگرفتن هزینه عملیاتی و تاثیر تکنولوژی در زمانبندی می‌باشد که با توجه به کاربردی بودن آن می‌تواند به عنوان یک ضرورت در تحقیق مطرح باشد. مسلماً چنین توجهی به مسائل زمانبندی در صنایع با توجه به فرضیات واقعی آن می‌تواند فاصله عمیقی که بعضاً میان مسائل دنیای واقعی و مباحث علمی وجود دارد را کاهش داده و سرفصل جدیدی را جهت این دسته از مسائل بگشاید. عمده تولیدات علمی در زمینه مسائل زمانبندی در سابقه موضوع براساس شرایط بسیار محدود از دنیای واقعی بوده و انگیزه اصلی در پرداختن به آنها عمدتاً شکست روش‌های ابتکاری با توسعه بیشتر آنها می‌باشد.

۴-۱ نوآوری پژوهش

با توجه به پیشینه ادبیات موضوع در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، عمده پژوهش‌ها در این حوزه با در نظر گرفتن اهداف وابسته به کار و وابسته به زمان انجام شده است. موضوع کاهش هزینه‌های عملیاتی در مسائل زمانبندی به عنوان یک فاکتور مهم در فعالیت‌های سازمان تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا، در این پژوهش سعی می‌شود فرضیات در نظر گرفته شده در مدل ریاضی تا حد امکان منطبق بر شرایط دنیای واقعی باشد و از بهینه‌سازی هزینه‌های پردازش به عنوان یکی از اهداف پژوهش استفاده شود. همچنین با توجه به اهمیت فراوان موضوعات زیست محیطی، بحث مصرف انرژی در کنار هزینه‌های پردازش مورد بررسی قرار می‌گیرد. از نوآوری‌های دیگر در این پژوهش وابسته بودن توالی فرآیند کارها به ماشین است یعنی به دلیل اختلاف سطح تکنولوژی ماشین‌ها در ایستگاه موازی، فرآیند پردازش کارها در مراحل بعدی می‌تواند تغییر کند که این موضوع کاربرد فراوانی در صنعت از جمله صنعت فنر سازی دارد. بر خلاف تحقیقات قبلی در این پژوهش به موضوع محدودیت منابع کمکی در کنار منابع اصلی به عنوان یک متغیر که مقدار آن توسط مدل بدست می‌آید پرداخته می‌شود و در ادامه سعی می‌شود با توجه به محدودیت در به کارگیری منابع کمکی زمانبندی مجدد صورت پذیرد. همچنین به بحث شایستگی ماشین در پردازش کارها و زمان آماده سازی کارها نیز پرداخته می‌شود.

۵-۱ سوالات پژوهش

سوال اصلی و سوالات فرعی تحقیق عبارتند از:

سوال اصلی: چگونه می‌توان با استفاده از مدل ریاضی، مساله زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف پذیر را با

هدف کاهش هزینه عملیاتی مدلسازی و حل نمود؟

در جهت پاسخگویی به سوال اصلی باید برای سوالات فرعی زیر نیز به دنبال پاسخ گشت:

(۱) پارامترهای مساله مورد مطالعه کدام است؟

(۲) متغیرهای مساله مورد مطالعه کدام است؟

(۳) تابع هدف مسئله مورد مطالعه چگونه قابل تعریف می باشد؟

(۴) چگونه می توان مسئله فوق را در قالب برنامه ریزی ریاضی مدل سازی کرد؟

(۵) چگونه می توان مسئله فوق را با مثال های عددی حل کرد و چه نتایجی از آن گرفته می‌شود؟

۶-۱ اهداف پژوهش

هدف اصلی و اهداف فرعی تحقیق حاضر به شرح زیر می‌باشد:

هدف اصلی تحقیق: توسعه مدلی جهت زمانبندی کارها در محیط جریان کارگاهی انعطاف پذیر با

ماشین‌های موازی نامرتبط و با رویکرد کاهش هزینه‌های عملیاتی

اهداف فرعی:

شناسایی پارامترهای موثر مسئله

شناسایی و تعریف متغیرهای تصمیم مسئله

تعریف تابع هدف مسئله

مدل سازی ریاضی مسئله

حل مسئله و تحلیل نتایج همراه با مثال عددی و مطالعه موردی

۷-۱ روش پژوهش

از دیدگاه ماهیت تحقیق، این تحقیق را می‌توان در زمره پژوهش‌های کمی دانست. دلایل اصلی این مطلب

را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

(۱) مفاهیم اصلی تحقیق را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از متغیرها و پارامترهای مشخص نشان داد.

(۲) داده‌های مورد نیاز برای محاسبه پارامترها به شکل عددی قابل جمع‌آوری هستند.

(۳) فرایندهای خروجی تحقیق به صورت استاندارد و تکرارپذیر قابل انجام هستند.

(۴) تحلیل‌ها و نتیجه‌گیری‌های تحقیق در قالب مفاهیم ریاضی قابل بیان هستند.

با توجه به کمی بودن ماهیت این تحقیق، استفاده از روش‌های تحقیق کمی برای انجام این پژوهش امری ضروری است. همچنین رویکرد اصلی این تحقیق رویکرد کاربردی است چرا که هدف اصلی تحقیق ایجاد ارتباط بین مفاهیم نظری تحقیق در عملیات با مسائل کاربردی در دنیای صنعت است.

روش تحقیقات انجام شده در زمینه مسائل بهینه‌سازی از دیدگاه روش شناختی را می‌توان به ۲ دسته کلی روش‌های تحقیق غیرتجربی^۱ شامل فن‌های تحقیق مفهومی^۲، اثبات قضایا^۳، و شبیه‌سازی^۴، و نیز روش‌های تحقیق در مرز روش‌های تحقیق علمی/تفسیرگرا^۵ شامل فن مطالعه موردی^۶ تقسیم نمود. با این حال مهم‌ترین روش تحقیق مورد استفاده برای حل مسائل بهینه‌سازی را می‌توان روش تحقیق مفهومی و یکی از ابزارهای مشهور آن یعنی تحقیق در عملیات^۷ دانست. لذا با توجه به ماهیت طرح تحقیق که نیازمند جداسازی مدل مورد مطالعه از دنیای واقعی است، فن تحقیق اصلی مدنظر برای این تحقیق فن تحقیق در عملیات است. قلمرو موضوعی این پژوهش زمانبندی کارها در سیستم تولید جریان کارگاهی بوده و قلمرو مکانی آن تحقیق به صورت کتابخانه ای می‌باشد.

۸-۱ ساختار پژوهش

مطالب ارائه شده در این تحقیق در پنج فصل سازماندهی شده است. فصل دوم به مرور ادبیات تحقیق زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر پرداخته می‌شود و از سه منظر: جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های نامرتب، زمانبندی با منابع کمکی و توابع هدف به کار رفته در مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر مطالعات گذشته مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل سوم سه مدل ریاضی با سه رویکرد متفاوت تشریح شده و چند الگوریتم فراابتکاری برای حل آنها پیشنهاد می‌گردد. در فصل چهارم مدل ریاضی اعتبار سنجی شده و عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نهایتاً در فصل پایانی تحقیق به نتیجه گیری و پیشنهاداتی برای مطالعات آتی پرداخته می‌شود.

¹. Non-Empirical Research

². Conceptual Research

³. Theorem Proof

⁴. Simulation

⁵. Research Techniques at Scientific/Interpretivist Boundary

⁶. Case Study

⁷. Operations Research

فصل ۲ : مروری بر ادبیات پژوهش

۱-۲ مقدمه

بررسی تحقیقات صورت گرفته یکی از راه‌های نشان دادن ضرورت یک پژوهش علمی است. تحقیقات متعددی در رابطه با زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر صورت گرفته است که همین موضوع موجب توسعه ادبیات موضوع مورد بررسی شده است. در سال‌های ابتدایی قرن گذشته، با مطالعات صورت گرفته توسط هنری لارنس گانت تئوری زمانبندی پدید آمد و به کمک سایر پیشگامان این عرصه در کانون توجه-هات قرار گرفت. در سال‌های آغازین دهه‌ی پنجاه میلادی، مطالعاتی در زمینه توالی عملیات که انگیزه آنها از زمانبندی تولید ناشی می‌شد، منجر به ارائه الگوریتم‌های مهمی گردید. در طول دهه شصت با پدید آمدن مسائل پیچیده‌تر تعداد قابل ملاحظه‌ای از تحقیقات به روش‌های دقیق چون برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی پویا معطوف شد. پس از انتشار مقاله مشهور ریچارد کارپ در زمینه نظریه پیچیدگی، محققان دریافتند که الگوریتم‌های دقیق در مدت زمان معقول قادر به یافتن جواب بهینه در مسائل پیچیده نیستند و در نتیجه در طول دهه هفتاد میلادی بخش عمده‌ی تحقیقات بر روی سلسله مراتب پیچیدگی مسائل زمانبندی متمرکز شد. در دهه‌های هشتاد و نود میلادی، یکی از عمده‌ترین موضوعات تحقیقاتی، توسعه و آنالیز الگوریتم‌های غیردقیق نظیر تبرید شبیه‌سازی شده، جستجوی ممنوع، الگوریتم ژنتیک و سایر تکنیک‌های محاسبات تکاملی به منظور حل مسائل زمانبندی در زمان محاسباتی معقول بوده است. از آن زمان تاکنون تحقیق در حوزه زمانبندی متحمل فراز و نشیب‌های فراوان شده‌است و امروزه حجم عظیمی از دانش زمانبندی در دسترس محققان قرار دارد.

در این پژوهش تلاش بر این بوده تا مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی زمان بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی نامرتبط به صورت کامل و موجز بیان شود. در این فصل ابتدا مفاهیم و مبانی نظری بیان می‌شود. سپس مساله زمان بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مطالعات و پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی زمان بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر از سه منظر: جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های نامرتبط، زمانبندی با محدودیت منابع کمکی در کنار منابع اصلی و توابع هدف به کار رفته در مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از آن در ارتباط با روش‌های حل دسته‌بندی‌هایی صورت گرفته و در نهایت به جمع بندی رسیده و شکاف تحقیقاتی برای ادامه‌ی پژوهش بدست آمده است.

۲-۲ مبانی نظری

۱-۲-۲ مدل سازی

به طور کلی یک مدل یک نمایش انتزاعی و ساده شده از یک واقعیت گسترده و پیچیده می‌باشد. از این رو مدل سازی فرآیندی است که در آن مدل‌های ذهنی و انتزاعی از یک واقعیت تولید و در اختیار محققین

قرار می‌گیرد. یک مدل زمان‌بندی یک انتزاع از یک مساله زمان‌بندی (تولید) است که با در نظر گرفتن سیستم کارها/ عملیات‌ها، محدودیت‌های پردازش و معیارها توصیف می‌شود [۵].

۲-۲-۲ زمانبندی

زمانبندی در محیط‌های تولیدی به تصمیم‌گیری توأمان در مورد توالی^۱ کارها و تخصیص منابع^۲ اشاره دارد. توالی اغلب به ترتیب پردازش کارها بر روی یک ماشین اطلاق می‌شود، در صورتی که تخصیص منابع به انتخاب هر دستگاه برای پردازش هر کار اشاره دارد [۶]. تصمیم‌گیری‌های زمانبندی جهت حذف ضایعات، بهبود استفاده از منابع، کاهش هزینه‌های تولید و در مجموع افزایش بهره‌وری انجام می‌شود [۷].

۲-۲-۳ اصطلاحات رایج در زمانبندی

تعریف ۱-۲. ایستگاه: یک ایستگاه بخشی از یک خط تولید است که در آن بخش مشخصی از کل کار لازم برای مونتاژ محصول نهایی انجام می‌گردد. ایستگاه‌های کاری معمولاً با ابعاد و ماشین آلات موجود در آن مشخص می‌شود. ایستگاه‌های کاری را می‌توان به دو دسته‌ی خودکار یا دستی تقسیم‌بندی کرد. در ایستگاه‌های کاری دستی، کار مورد نظر با استفاده از ابزارهای ساده یا با استفاده از ماشین‌آلات نیمه خودکار تکمیل می‌شود. اغلب مکان‌هایی از خط تولید که در آن عملیات انجام می‌پذیرد ایستگاه کاری نامیده می‌شود [۵].

تعریف ۲-۲. عملیات:^۳ هر کار دارای یک یا چند عملیات از پیش تعیین شده است. این عملیات‌ها دست کم بر روی یک ماشین صورت می‌پذیرد. عملیات باید زمانبندی شود. یعنی هر عملیات در نتیجه زمانبندی یک زمان شروع و پایان پیدا خواهد کرد [۵].

تعریف ۳-۲. مسیر پردازش:^۴ هر کار یک مسیر پردازش از پیش تعیین شده برای تولید دارد. این مسیر عبارتست از لیستی مرتب از ماشین‌هایی که باید یک کار بر روی آنها پردازش شود [۵].

تعریف ۴-۲. زمان پردازش:^۵ این کمیت نشان دهنده زمان مورد نیاز برای پردازش کار i بر روی ماشین m است. ماشین m در این مدت مشغول پردازش کار i خواهد بود [۵].

تعریف ۵-۲. زمان آمادگی^۶ (دسترسی): عبارتست از لحظه‌ای از زمان که کار i پس از آن می‌تواند آغاز شود. به عبارت دیگر یک کار پس از این لحظه برای پردازش در دسترس قرار می‌گیرد [۸].

¹ Sequencing
² Resource allocation
³ Operation
⁴ Processing Route
⁵ Due Date
⁶ Release Date

تعریف ۶-۲. شایستگی (قابلیت) ماشین^۱: معمولاً در ایستگاه‌های کاری همه ماشین‌ها توانایی پردازش همه کارها را ندارند این کمیت باینری نشان می‌دهد آیا ماشین m توان پردازش کار i را دارد یا خیر [۸].

تعریف ۷-۲. هزینه‌های تولید^۲: هزینه‌های تولید به هزینه‌های صورت گرفته توسط یک کسب و کار از قبیل تولید محصول یا ارائه خدمت گفته می‌شود. طبقه‌بندی‌های متفاوتی در مورد هزینه‌های تولید وجود دارد که یکی از شناخته شده‌ترین آنها، این هزینه‌ها را به سه دسته تقسیم می‌کند [۹]:

- هزینه‌های مستقیم مواد اولیه^۳
- هزینه‌های مستقیم نیروی کار^۴
- هزینه سربار تولید^۵

لازم به ذکر است، هزینه‌هایی که خارج از تسهیلات تولیدی باشد شامل: هزینه‌های بازاریابی و فروش، هزینه‌های عمومی و اداری جزء هزینه‌های تولید محسوب نمی‌شود. به طور کلی، هزینه‌های مستقیم مواد اولیه، مستقیماً به کار (قطعات/ محصولات) بستگی دارد و مستقل از عوامل دیگری مانند ماشین و زمان است. بعلاوه کارکنان معمولاً به طور مداوم درگیر یک فرآیند هستند و زمان صرف شده توسط آنها به بخش بدهی حساب فرآیند ارسال می‌شود. با این حال، این عنصر هزینه که به زمان بستگی دارد، معمولاً بخش بسیار کمی از هزینه‌های تولید در صنایع تولیدی را شامل می‌شود. در نهایت سربار تولید، کلیه هزینه‌های غیر مستقیم از قبیل استهلاک تجهیزات استفاده شده در تولید، اجاره بها و مالیات بر دارایی تسهیلات تولید، نگهداری تعمیرات، هزینه‌های مصرف انرژی و موارد دیگر است.

۴-۲-۲ انواع الگوهای پردازش^۶ در محیط تولید

معمولاً براساس نحوه چیدمان ماشین‌ها و همچنین بر طبق مسیرهای پردازش، الگوهای پردازش دسته بندی می‌شوند. در ادامه تعدادی از الگوهای پردازش مرتبط با این پژوهش معرفی می‌شوند.

۱-۴-۲-۲ الگوی تک ماشین^۷

در این الگو فرآیند تولید، تنها شامل یک ماشین است پس هر کار باید دقیقاً یک بار بر روی این ماشین پردازش شود. لذا در این مساله هیچ مسیر پردازشی وجود ندارد. هر یک از کارها در یک مدل تک ماشینی

1 machine eligibility

2 Production costs

3 Direct material

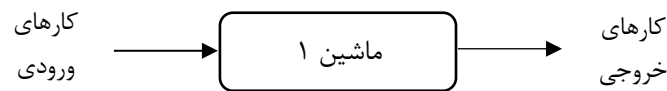
4 Direct labor

5 Manufacturing overhead

6 Processing Layout

7 Single Machine Layout

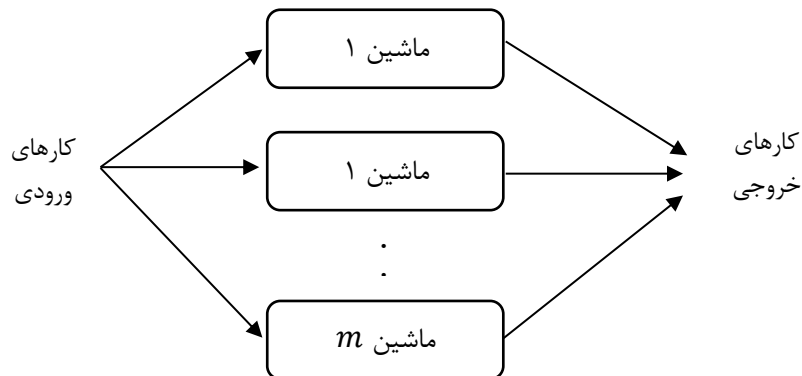
به اندازه زمان پردازش خود ماشین را مشغول کرده و پس از تکمیل، ماشین را ترک می‌کنند. شکل ۲-۱ الگوی تک ماشین را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۱. شکل الگوی تک ماشین

۲-۲-۴-۲ الگوی ماشین‌های موازی^۱

مانند شکل ۲-۲ این الگو یک تعمیم از الگوی تک ماشین است که فرض می‌شود چندین ماشین به موازات یکدیگر قرار می‌گیرند. در این صورت لازم است هر کار بر روی یکی از m ماشین موازی در دسترس، پردازش شود. جریان کاری در این الگو به این شکل است که کارها وارد کارگاه شده و به یکی از m ماشین اختصاص می‌یابند و پس از پردازش، کارگاه را ترک می‌کنند.



شکل ۲-۲. شکل الگوی ماشین‌های موازی

الگوی ماشین‌های موازی به طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند:

➤ ماشین‌های موازی یکسان^۲: در این مدل زمان پردازش هر کار به ماشینی که به آن تخصیص داده می‌شود بستگی ندارد. به این معنی که همه ماشین‌ها از حیث سرعت یکسان هستند. لذا هر کار را می‌توان به اولین ماشین در دسترس تخصیص داد [۱۰].

➤ ماشین‌های موازی یکنواخت^۳: در این الگو ماشین‌ها با سرعت‌های مختلف کار می‌کنند. یعنی بعضی از ماشین‌ها کندتر و بعضی تندتر کارها را انجام می‌دهند. به منظور محاسبه زمان پردازش، به هر ماشین یک ضریب سرعت v_i اختصاص می‌یابد. سپس زمان پردازش کار j بر روی ماشین i به صورت $p_{ij} = p_j / v_i$ مشخص می‌شود [۱۰].

¹ Parallel Machine Layout

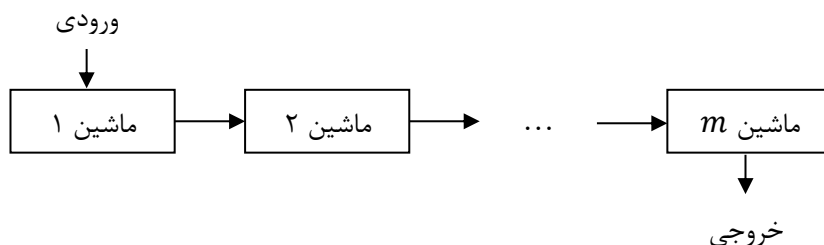
² Identical Parallel Machines

³ Uniform Parallel Machine

➤ ماشین های موازی نامرتبط^۱: اگر زمان پردازش کار j بر روی ماشین i (p_{ij}) برای همه i و j ها اختیاری باشد، آنگاه به عنوان مدل زمانبندی ماشین های نامرتبط شناخته می شود. در این مدل هیچ ارتباطی بین زمان های پردازش یک کار بر روی ماشین های موازی وجود نخواهد داشت. این امر ممکن است از تفاوت تکنولوژی ماشین ها یا دلایل دیگر حادث شده باشد [۱۰].

۳-۲-۲ الگوی جریان کارگاهی^۲

یکی از شناخته شده ترین مسائل زمانبندی مسئله زمانبندی جریان کارگاهی است. این مسئله بیش از پنجاه سال است که در میان محققین جایگاه ویژه ای دارد. در این مسئله m مرحله بصورت سری و در هر مرحله یک ماشین یا بیشتر وجود دارد (شکل ۳-۲). n کار باید بر روی m ماشین پردازش شوند. هر کار بر روی هر ماشین، یک زمان پردازش مثبت دارد. در جریان کارگاهی، همه کارها با یک ترتیب بر روی ماشین آلات پردازش می شوند. زمان پردازش هر کار در هر مرحله می تواند متفاوت باشد. در کل برای مسئله جریان کارگاهی، $(n!)^m$ توالی ممکن وجود خواهد داشت. یک ساده سازی در این ارتباط، حفظ ترتیب پردازش کارها از ماشین ۱ تا ماشین m است. این بدان معنی است که کارها با یک ترتیب بر روی همه ماشین آلات پردازش شوند. چنین مسئله ای تحت عنوان مسئله جریان کارگاهی جایگشتی شناخته می شود. در این حالت به اندازه $n!$ توالی برای کارها وجود خواهد داشت که با این شرایط مسئله تحت عنوان مسئله کاملاً سخت شناخته می شود [۱۱].

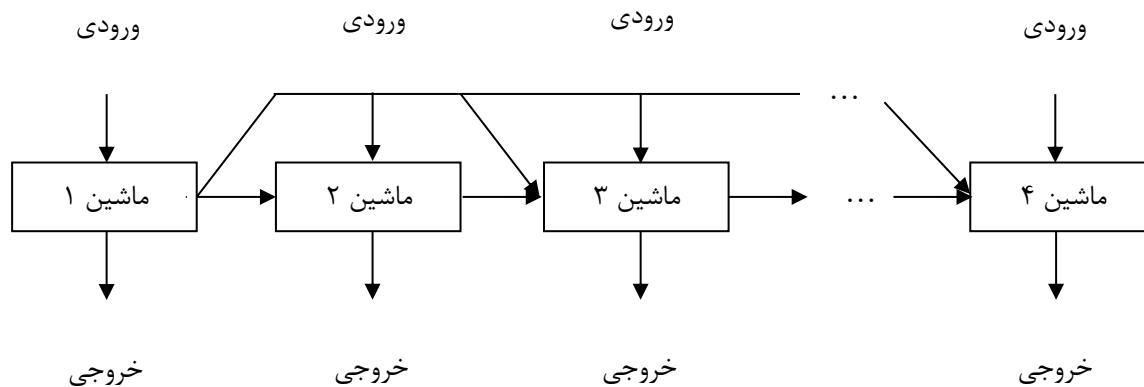


شکل ۳-۲. شکل الگوی جریان کارگاهی

¹ Unrelated Parallel Machine

² Flow Shop Layout

یک نمونه دیگر از مدل جریان کارگاهی جایگشتی، مدل خط جریان^۱ است که در آن مسیر پردازش کارها بر روی ماشین‌ها یکسان است اما بعضی از کارها می‌توانند از بعضی از ماشین‌ها بدون پردازش عبور کنند [۵]. شکل ۴-۲ نمونه این الگوی پردازشی را نشان می‌دهد.



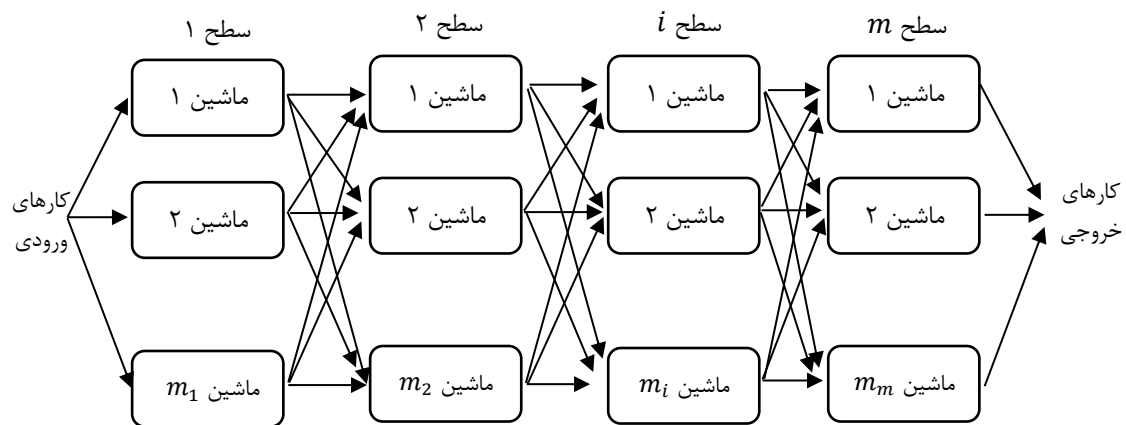
شکل ۴-۲. شکل الگوی خط جریان

۴-۲-۲ الگوهای پیوندی^۲

معمولاً در دنیای واقعی مشاهده می‌شود که در کارخانه‌ها از هر ماشین مهم بیش از یک عدد وجود دارد که به صورت موازی در کنار هم قرار می‌گیرند. این موضوع باعث شده مدل ماشین‌های موازی و محیط کارگاهی با یکدیگر ادغام شود به گونه‌ای که در هر مرحله از تولید به جای یک ماشین، شماری از ماشین‌ها به موازات یکدیگر قرار گیرند. به بیان دقیق‌تر m سطح وجود دارد که هر یک از آنها دارای m_i ماشین موازی هستند (شکل ۵-۲). ماشین‌های موجود در هر سطح می‌تواند یکسان، یکنواخت یا نامرتب باشند. تعداد ماشین‌های موازی در هر سطح می‌تواند متفاوت از سطح دیگر باشد. الگوهای پیوندی باعث شده است علاوه بر بعد اولویت بندی ترتیب کار، بعد تصمیم‌گیری در خصوص تخصیص هر کار به هر ماشین به مسائل زمانبندی افزوده شود.

^۱ Flow Line

^۲ Hybrid Layouts



شکل ۵-۲. نمای شماتیک الگوی پیوندی

۵-۲-۲-۲ سیستم‌های تولید انعطاف پذیر^۱

برای تولید قطعات با حجم کم و تنوع بالا نیاز است از سیستم‌های تولیدی استفاده شود که در آن انعطاف پذیری بالایی در خصوص مسیر پردازش قطعات وجود داشته باشد. سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر یا FMS، به منظور پاسخ‌گویی به تغییرات سریع محصولات طراحی می‌شوند [۵].

۵-۲-۲-۲ محدودیت‌ها

در ادبیات زمانبندی تولید، محدودیت‌ها را می‌توان به چهار دسته کلی تقسیم کرد.

- محدودیت‌های پردازش شامل محدودیت‌های پیشین‌سازی برای کار یا عملیات، زمان‌های آماده‌سازی یا تعویض^۲، توالی‌های جایگشتی، دسترسی و خرابی ماشین و.. می‌باشد.
- محدودیت‌های مربوط به عملیات که شامل قطع کار یا عملیات، زمان‌های آمادگی، موعدهای تحویل و ضرب‌الاجل‌ها، زمان‌های آماده‌سازی خاص و .. می‌باشد.
- محدودیت‌های حمل و نقل
- محدودیت‌های انبارش

یکی از محدودت‌های مهم که در این پژوهش از آن استفاده شده است، محدودیت زمان آماده‌سازی می‌باشد. آماده‌سازی شامل کلیه فعالیت‌هایی است که جهت راه‌اندازی ماشین، فرآیند و یا یک سیکل باید انجام گیرد. فعالیت‌هایی چون دستیابی به ابزار، تنظیم و سوار کردن قطعه، عودت ابزار، تمیزکاری، تنظیم دستگاه و تست می‌توانند در زمره عملیات‌های مرتبط با آماده‌سازی قرار گیرند [۵]. فرآیند تنظیم و راه‌اندازی ماشین یک عامل ارزش افزوده نیست، لذا زمان و هزینه‌های آن می‌بایست صراحتاً مورد توجه قرار گیرد. زمان‌های آماده‌سازی در برخی صنایع صرفاً به کاری که باید تنظیم شود وابسته است که تحت عنوان

¹ Flexible Manufacturing Systems

² Setup time

توالی‌های مستقل^۱ شناخته می‌شود. از سوی دیگر در صنایعی مانند صنعت فنر سازی پارامترهایی مانند کششی یا فشاری بودن فنر، قطر مفتول، چپ‌گرد یا راست‌گرد بودن فنر، می‌تواند در زمان آماده‌سازی تاثیرگذار باشند. برای مثال اگر فنرهایی با قطر مفتول یکسان به صورت متوالی به یک ماشین تخصیص یابد، برای پردازش هر کار نیازی به تعویض غلطک‌های ماشین نمی‌باشد لذا زمان آماده‌سازی کاهش می‌یابد. در نتیجه در اینگونه صنایع زمان آماده‌سازی علاوه بر کار مطروحه، به کاری که بلافاصله قبل از آن پردازش شده نیز وابسته است که این مورد تحت عنوان توالی‌های وابسته^۲ شناخته می‌شود.

۲-۲-۶ معیارهای عملکرد

براساس آخرین مطالعه مروری در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر (لی ۲۰۱۹) [۱۲]، توابع هدف را می‌توان به صورت زیر دسته بندی نمود

- توابع هدف وابسته به زمان: که شامل حداکثر زمان دوره ساخت^۳، میانگین زمان تکمیل کار یا زمان تکمیل کل کارها، مجموع زمان تکمیل موزون یا زمان تکمیل موزون کل کارها
- توابع هدف وابسته به کار: شامل میانگین دیرکرد یا دیرکرد کل کارها، تعداد کارهای دارای تاخیر، ماکسیمم دیرکرد کارها، میانگین موزون یا مجموع موزون تاخیر کارها
- توابع چند هدفه^۴: در اینگونه مسائل غالباً سعی می‌شود چندین تابع هدف نامتجانس توأمان بهینه شوند.

بیشینه زمان پایان یا دوره ساخت که با C_{max} نشان داده می‌شود را می‌توان به عنوان زمان مورد نیاز برای تکمیل کل فرآیند تولید در نظر گرفت زیرا این تابع هدف مدت زمان سپری شده مابین شروع نخستین کار تا پایان آخرین کار بر روی آخرین ماشین را نشان می‌دهد.

۲-۲-۷ سابقه تحقیقات

از آنجایی که این پژوهش با هدف حل مساله‌ی زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با ویژگی‌های عملی مختلف است. مطالعات مربوط به ادبیات در ۳ بخش ارائه می‌شود. در بخش اول مطالعات مربوط به جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر در حالت کلی و حالت ماشین‌های موازی نامرتب بررسی می‌شود. پس از آن مطالعات مربوط به مساله زمانبندی با محدودیت منابع کمکی بررسی شده و در نهایت توابع هدف استفاده شده در مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

¹ Sequence-independent

² Sequence-dependent

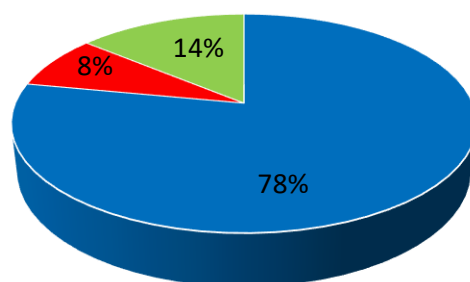
³ Makespan

⁴ Multi-objective Optimization

۱-۲-۷-۲ بررسی ادبیات در مورد زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر

مسئله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با توجه به کاربرد زیاد آن در صنایع مختلف تولیدی از دیرباز مورد توجه محققین زیادی بوده است. از جمله تحقیقات قدیمی در این زمینه می‌توان به مطالعه گاپتا و همکاران اشاره نمود که در سال ۱۹۹۸ به معرفی و حل مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر دومرحله‌ای در شرایطی پرداختند که مرحله اول شامل تعدادی ماشین موازی یکسان بوده و در مرحله دوم یک ماشین قرار دارد. ایشان این مساله را با تابع هدف کمینه‌سازی بیشترین زمان تکمیل کارها (Makespan) بررسی کرده‌اند [۱۳]. بعد از آن، لیو و چانگ یک روش دقیق و یک روش ابتکاری برای حل مسئله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی ارائه کردند [۱۴]. تران و مینگ ننگ بعدها همین مساله را در دو حالت با اعمال محدودیت در ظرفیت انبارهای میانی و بدون در نظر گرفتن آن با هدف‌های کمینه‌سازی بیشترین زمان تکمیل، مجموع موزون زمان در جریان ساخت و مجموع موزون زمان‌های تاخیر بررسی و یک الگوریتم فراابتکاری برای حل آن در ابعاد کاربردی و در زمانی معقول ارائه کردند [۱۵]. نادری و همکاران (۲۰۰۹) برای مسئله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر چند هدفه با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و زمان حمل و نقل، الگوریتمی ترکیبی مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید و یک روش جستجوی ساده ارائه کردند [۱۶]. حسینی [۱۷] مساله‌ی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با یک مرحله مونتاژ را به صورت دو هدفه (حداقل کردن حداکثر زمان تولید و مجموع زودکرد/دیرکرد کارها) مورد بررسی قرار داد. همچنین به دلیل NP-hard بودن مساله، برای حل آن در ابعاد بزرگ از الگوریتم ژنتیک چند هدفه (MOGA) استفاده کرد. اسدی و نهاوندی [۱۸] مساله‌ی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر را با هدف کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها مورد توجه قرار دادند و برای حل آن از روش آزادسازی لاگرانژ استفاده کردند. ماری چلوم و همکاران (۲۰۲۰) [۱۹] مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های یکسان و تاثیر فاکتور عوامل انسانی را در یک کارخانه‌ی خودروسازی مورد توجه قرار دادند. آنها سطوح مختلف کار و تاثیرات یادگیری و فراموشی را با اهداف به حداقل رساندن حداکثر زمان تولید و زمان کل جریان مورد بررسی قرار دادند. همچنین از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات جهت حل مساله استفاده کردند.

مساله جریان کارگاهی منعطف با ماشین‌های موازی نامرتبب حالت خاصی از مساله جریان کارگاهی می‌باشد که کمتر به آن پرداخته شده است [۲۰]. شکل ۶-۲ نشان می‌دهد که در بین انواع سه حالت ماشین‌های موازی در این مساله، کمترین تحقیق انجام شده مربوط به حالت نامرتبب آن می‌باشد.



■ ماشین های یکسان ■ ماشین های یکنواخت ■ ماشین های غیر مرتبط

شکل ۶-۲. توزیع تحقیقات انجام شده بر روی مساله FFS با تمرکز بر انواع ماشین‌های موازی [۱۲]

در بین تحقیقات انجام شده پیرامون این مساله، می‌توان به مقاله یواریما و همکاران اشاره نمود که در مطالعه خود این مساله را با در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی، محدودیت زمان‌های در دسترس بودن ماشین‌آلات و محدودیت انبارهای میانی بررسی کرده و یک رویکرد مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل آن با هدف کمینه‌سازی مجموع زمان‌های تکمیل ارائه کردند [۲۱]. همچنین بهنامیان و زندیه (۲۰۱۱) همین مساله را با در نظر گرفتن محدودیت زمان انتظار بررسی و یک الگوریتم رقابت استعماری گسسته برای حل این مساله با هدف کمینه‌سازی مجموع زودکرد و دیرکرد ارائه کردند [۲۲]. لی و همکاران نیز مساله جریان کارگاهی منعطف با ماشین‌های موازی نامرتب را برای حالت چندمرحله پردازش و در نظر گرفتن حرکت دسته‌ای کارها بررسی و یک مدل دوهدفه برای حداقل کردن همزمان زمان تکمیل کارها و مجموع وزنی دیرکرد کارها ارائه کردند [۲۳]. شهواری و همکاران مساله جریان کارگاهی منعطف با جریان دسته‌ای کارها را در شرایطی بررسی نمودند که در ایستگاه‌های گلوگاه از ماشین‌های موازی نامرتب استفاده شده و یک الگوریتم جستجوی ممنوع تقویت شده^۱ برای حل آن در حالت دوهدفه ارائه کردند [۲۴].

لی و همکاران یک مطالعه مروری کامل بر روی مساله جریان کارگاهی منعطف انجام داده و در مقاله خود اظهار داشتند که این مساله در حالت عمومی در رده مسائل سخت (NP-hard) قرار داشته و در نظر گرفتن عملیات و زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی، در مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، موجب پیچیده‌تر شدن این مساله می‌شود [۱۲]. منابع محدودی به مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی نامرتب و در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به مطالعه ابراهیمی و همکاران [۲۵] و قراویتو و همکاران در سال ۲۰۱۹ اشاره کرد [۲۶].

۲-۲-۷-۲ بررسی ادبیات در مورد مساله‌ی زمانبندی با محدودیت منابع کمکی

محدودیت‌های عدم دسترسی به منابع کمکی مورد نیاز تاثیرات اساسی بر نتیجه‌ی بهینه‌سازی مسائل زمانبندی دارد و بنابراین، این موضوع در چند سال گذشته یکی از مباحث مورد علاقه بسیاری از محققان بوده است. در ابتدا ونتورا و کیم [۲۷] یک مساله برنامه‌ریزی ماشین‌های موازی یکسان را با محدودیت

^۱. Enhanced tabu search algorithm

منابع اضافی در سال ۲۰۰۰ شناسایی و یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی تهیه کردند تا حداقل انحراف کل زمان تکمیل کارها در مورد تاریخ تحویل خاص را به حداقل برسانند. آنها نشان می‌دهند که این مساله می‌تواند در زمان چندجمله‌ای حل شود، به شرط اینکه یک نوع منبع کمکی وجود داشته باشد و منابع مورد نیاز به صورت دودویی باشند. پس از آن، ادیس و اوزکاراهان (۲۰۱۱) [۲۸] مساله محدودیت منابع کمکی را در یک مساله زمانبندی ماشین‌های موازی یکسان با توجه به محدودیت شایستگی ماشین^۱ حل نمودند. آنها برای حل این مساله سه مدل بهینه‌سازی توسعه دادند: یک مدل برنامه نویسی عدد صحیح (IP)، یک مدل برنامه‌نویسی محدودیت (CP)، و یک مدل ترکیبی (IP/CP). ترابی و همکاران (۲۰۱۳) [۲۹] مساله زمانبندی ماشین‌های موازی را با توجه به محدودیت منابع کمکی، زمان انتشار غیر صفر کارها و زمان تنظیم وابسته به توالی در یک محیط فازی در نظر گرفتند. آنها یک مدل چند هدفه با بهینه سازی ازدحام ذرات ارائه دادند تا بتوانند سه تابع هدف از جمله تاخیرات موزون کل، زمان جریان موزون کل و تغییرات بار ماشین‌ها را به صورت مستقیم به حداقل برسانند. یک بررسی جامع درباره مساله‌ی زمانبندی ماشین‌های موازی با منابع کمکی توسط ادیس، اوگوز و اوزاکاراهان ارائه شده است [۳۰]. افضل‌ی راد و رضائیان [۸] با الهام گرفتن از مساله نصب بلوک در یک شرکت کشتی‌سازی، مساله زمانبندی ماشین‌های موازی را با محدودیت منابع کمکی و زمان ستاپ وابسته به توالی با تاریخ انتشار متفاوت کارها مورد بررسی قرار دادند. آنها یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط جدید را با هدف حداقل کردن زمان تکمیل ارائه دادند. همچنین جهت حل مساله در ابعاد بزرگ دو الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک و سیستم ایمنی مصنوعی را توسعه دادند. فانجول-پیرو^۲ و همکاران (۲۰۱۷) [۳۱] مساله زمانبندی ماشین‌های موازی نامرتب با منابع اضافی را با هدف به حداقل رساندن حداکثر زمان تکمیل مورد مطالعه قرار دادند. آنها فرض نمودند ماشین‌های موازی به برخی منابع اضافی محدود و ثابت در طول افق تولید نیاز دارند. دو مدل برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح جدید برای تدوین مساله در مقاله خود تهیه کردند و سه استراتژی فرا ابتکاری برای حل آن در ابعاد متوسط و بزرگ معرفی کردند. یک تحقیق مشابه توسط اربویی و یلویی^۳ (۲۰۱۸) [۳۲] در مورد مساله زمانبندی ماشین‌های موازی نامرتب با منابع اضافی انجام شد که در آن منابع در یک مقدار محدود و به صورت تجدیدپذیر در دسترس هستند. آنها این مساله را با استفاده از یک مدل برنامه‌نویسی محدودیت، فرمول‌بندی کردند و نشان دادند که مدل پیشنهادی آنها از روش‌های موجود بهتر است.

علاوه بر موارد فوق، برخی مطالعات دیگر همانند این پژوهش منابع انسانی را به عنوان منابع کمکی برای ماشین‌ها در نظر گرفتند. کاستا و همکاران (۲۰۱۳) [۳۳] مساله زمانبندی ماشین‌های موازی نامرتب با منابع انسانی محدود را مورد بررسی قرار دادند. آنها یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط و یک روش راه حل جدید مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل آن پیشنهاد دادند. عملیات راه اندازی به صورت وابسته به توالی فرض شده است که توسط کارگران با سطح مهارت‌های مختلف انجام می‌شود. در یک

¹ Machine eligibility

² Fanjul-Peyro

³ Arbaoui and Yalaoui

تحقیق مشابه کاپادانا، کاستا و فیچر (۲۰۱۳) [۳۴] مساله زمانبندی دسته‌ای با نیروی کار محدود با هدف مینیمم‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها را در محیط ماشین‌های موازی نامرتبط مورد بررسی قرار دادند. تاثیر محدودیت نیروی کار در تمیزکاری و رسیدگی به وظایف که در بخش آسپتیک^۱ یک سیستم داروسازی فعالیت می‌کنند، توسط کاستا (۲۰۱۴) [۳۵] مورد بررسی قرار گرفت، که در آن یک رمزگذاری خاص دو مرحله‌ای برای الگوریتم ژنتیک ترکیبی با هدف به حداقل رساندن حداکثر زمان تکمیل ارائه شد. کاستا و همکاران (۲۰۲۰) [۲۹] در ادامه پژوهش‌های خود، مسئله جریان کارگاهی انعطاف پذیر را با محدودیت منابع انسانی مورد مطالعه قرار دادند و فرض نمودند تعداد کارگران در هر مرحله از تعداد ماشین‌ها در همان مرحله کمتر است. آنها برای حل این مساله یک الگوریتم جستجوی عقب گرد جدید که با جستجوی تابو به وسیله‌ی یک سیستم رمزگذاری جدید با نام BSATS تقویت شده، طراحی نمودند. همچنین یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به منظور حل بهینه مجموعه‌ای از موارد تست در ابعاد کوچک را توسعه دادند. جنگ و همکاران (۲۰۲۰) [۳۰] نیز یک تحقیق بر روی محیط جریان کارگاهی انعطاف پذیر با محدودیت منابع دوگانه را با اهداف حداقل کردن حداکثر زمان تولید، حداقل کردن کل تاخیرها و متعادل سازی بار کار روی کارگران انجام دادند. سپس یک الگوریتم ممتیک چند هدفه‌ی بهبود یافته جهت حل مساله پیشنهاد نمودند. بعد از مقایسه‌ی الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های فراابتکاری MODE، NSGA-II و MOMVO، مشخص شد الگوریتم پیشنهادی از نظر همگرایی، تنوع و تسلط بر راه‌حل‌های غیرغالب از سایر الگوریتم‌ها به طور قابل توجهی برتر است.

۳-۲-۲-۲ بررسی ادبیات در خصوص توابع هدف به کار رفته در مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان، مشخص گردید مطالعات کمی از جنبه‌های هزینه بر روی محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر انجام شده است. هان و همکاران [۳۶] با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های تولید، یکی از معدود مطالعات بر روی مساله زمانبندی کارها در فضای FFS با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های تولید بوده است. تابع هدف در مدل آنها شامل هزینه پردازش، هزینه تاخیر و هزینه انبارش محصولات بوده است. به هر حال آنها عملیات آماده‌سازی را حذف کرده و فرآیندهای تولید را مانند این مطالعه وابسته به ماشین در نظر نگرفته‌اند. آنها از برخی قوانین محلی برای تعیین زمان شروع کار و دنباله پردازش در هر مرحله استفاده کردند. علاوه بر این یک الگوریتم زمانبندی بر پایه الگوریتم PSO با هدف بهینه‌سازی هزینه تولید ارائه کردند. جیانگ و همکاران [۳۷] مساله‌ی زمانبندی ریخته‌گری مداوم در فولادسازی (SCC^۲) را به عنوان نمونه‌ای از مساله زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر پیچیده بررسی کرده که شامل زمان پردازش کنترل پذیر با چند تابع هدف از جمله زمان تاخیر کل، زودکرد/دیرکرد و هزینه‌های تنظیم بوده است. آنها برای پرداختن به این موضوع مساله زمانبندی را به دو زیر مساله تقسیم

¹ aseptic area

² Steelmaking-continuous casting

کردند: یک مساله زمانبندی ماشین موازی (PMSP^۱) در آخرین مرحله و یک مساله HFSSP در مراحل بالا دست. همچنین ابتدا یک الگوریتم تکاملی دیفرانسیل ترکیبی (HDE)^۲ همراه با جستجوی تجزیه همسایگی متغیر برای زیر مساله اول پیشنهاد نمودند و سپس الگوریتم IBLIS^۳ را برای حل زیر مساله‌ی دوم ارائه نمودند.

برخی از مطالعات جدید مساله هزینه‌ی مصرف انرژی را در زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر در نظر گرفتند. به عنوان مثال شولز [۳۸] در محیط HFS تحقیقاتی را برای به حداقل رساندن تاخیر ها و زمان اتمام کل با تاثیر یک فاکتور هزینه‌ای با عنوان هزینه مصرف برق در تابع هدف انجام داد. او در ادامه یک مطالعه دیگر با هزینه‌های انرژی وابسته به زمان سعی در حداقل سازی هزینه تولید کل نمود [۳۹]. با توجه به ویژگی های مختلف این مساله، توابع هدف مختلفی برای بهینه‌سازی آن مورد بررسی قرار گرفته است. این توابع هدف را می‌توان با عناوین توابع هدف وابسته به زمان، مرتبط با کار و چند هدفه طبقه بندی نمود. جدول ۱-۲ انواع مختلفی از توابع هدف را در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر تا سال (۲۰۲۰) نشان می‌دهد. این اطلاعات با اضافه کردن مطالعات جدید از پژوهش لی و لونگ (۲۰۱۹) [۱۲] بدست آمده است.

جدول ۱-۲. طبقه بندی توابع هدف در محیط FFS

درصد	نمونه مقالات	تعداد	سال انتشار	تابع هدف	
				زیر گروه	گروه
۵۵٪	[۴۰]، [۴۱]، [۴۲]، [۴۳]	۱۸	قبل از ۲۰۰۶		وابسته به
	[۴۴]، [۴۵]، [۴۶]	۱۳	۲۰۰۶-۲۰۱۳	حداکثر زمان تکمیل	زمان
	[۴۷]، [۴۸]، [۴۹]، [۵۰]	۱۳	۲۰۱۴-۲۰۲۰		
	[۵۱]	۳	قبل از ۲۰۰۶		میانگین زمان تکمیل کار یا
	[۵۲]	۳	۲۰۰۶-۲۰۱۴		زمان تکمیل کل کارها
	[۵۳]	۱	۲۰۱۴-۲۰۲۰		
	[۵۴]	۱	۲۰۰۸	مجموع زمان تکمیل موزون یا	
	[۵۵]	۱	۲۰۰۹	زمان تکمیل موزون کل کارها	
	[۵۶]، [۵۷]	۷	قبل از ۲۰۰۶	میانگین دیر کرد یا دیر کرد	وابسته به
	[۵۸]	۱	۲۰۱۵	کل کارها	کار
۱۵٪	[۱۳]	۱	۱۹۹۸	تعداد کارهای دارای تاخیر	
	[۵۹]	۱	۲۰۰۰	ماکسیمم دیر کرد کارها	
	[۶۰]	۳	۲۰۰۴-۲۰۰۷		

¹ Parallel machine scheduling problem

² Hybrid differential evolution

³ Iterative backward list scheduling

میانگین موزون یا مجموع موزون تاخیر کارها		۲۰۱۵-۲۰۲۰	۲	[۶۱]، [۶۲]
چند هدفه (توابع بر پایه زمان، توابع بر پایه کار، توابع بر پایه انرژی و توابع بر پایه هزینه)		۲۰۰۵-۲۰۱۴	۴	[۶۳]
		۲۰۱۵-۲۰۱۷	۵	[۶۴]، [۶۵]، [۶۶]، [۶۷]
		۲۰۱۸-۲۰۲۰	۱۱	[۶۸]، [۶۹]، [۷۰]، [۷۱]، [۱]

نتایج نشان می دهد توابع هدف وابسته به زمان شامل مینیمم سازی زمان تکمیل کل (Makespan) زمان تکمیل هر کار، زمان چرخه و زمان جریان می باشد. توابع وابسته به کار نیز با زودکرد/ دیرکرد کارها شناخته می شود [۱۲]. اگر چه مدل هایی با یک تابع هدف نمی تواند دقیقاً موقعیت شرایط دنیای واقعی را نشان دهند اما آخرین مطالعات نشان می دهد تعداد پژوهش های کمی با توابع هدف چندگانه انجام شده است. به عنوان یک مسئله بهینه سازی دو هدف مشابه برای کار ما ، می توانیم به مختاری و همکاران (۲۰۱۱) مراجعه کنیم که در آن یک مساله زمان بندی جریان کارگاهی را با توجه به Makespan و هزینه های کل منابع به عنوان دو تابع هدف متضاد مورد پژوهش قرار دادند. آنها برای روشن تر شدن مساله یک مدل برنامه ریزی خطی مختلط عدد صحیح (MIP) ارائه کردند. علاوه بر این ، یک رویکرد تکامل دیفرانسیل گسسته هیبریدی جدید (HDDE) برای مقایسه مسائل بزرگ پیشنهاد دادند [۷۲].

برخی مطالعات که بیشتر در محیط کار کارگاهی انعطاف پذیر بوده است، موضوع برنامه های تولید چند فرآیندی^۱ را مورد بررسی قرار دادند که با توجه به وابسته بودن فرآیندهای پردازش به ماشین در این پژوهش، می تواند شباهت هایی با آن داشته باشد. کیم و همکاران مساله زمان بندی چندین کار با فرآیندهای تولید چندگانه را در محیط کار کارگاهی مطرح کردند. آنها این مساله را با یک رویکرد ریاضی، مدل سازی و حل نمودند. همچنین دو الگوریتم برای حل ساده تر مدل توسعه دادند [۷۳]. هی و همکاران با هدف برنامه ریزی و انتخاب برنامه های چند فرآیندی در محیط برنامه ریزی به کمک کامپیوتر، یک نوع کلی ارزیابی جامع فازی با توجه به اصل رابطه ثابت فازی و ماتریس سازگار فازی و همبستگی نظریه سیستم خاکستری ارائه دادند. آنها سه نوع برنامه فرآیند با روش ارزیابی جامع فازی را بررسی نمودند و یک ماژول برآورد مصنوعی فازی براساس کیفیت محصول، هزینه ساخت و چرخه تولید ایجاد کردند [۷۴]. لیو و همکاران، زمان بندی تولید واگرا (DPS^۲) با مسیر های تولید چندگانه و محدودیت موجودی را مورد بررسی قرار دادند و به دو چالش در صنعت آلومینیوم پرداختند. چالش اول این است که می توان یک محصول را با پیروی از مسیرهای مختلف فرآیند، تولید کرد که ممکن است دارای قابلیت ها و ظرفیت های کمی متفاوت باشند. و چالش دوم، ظرفیت محدود موجودی، شامل: مواد اولیه، مواد در جریان ساخت و محصول نهایی می باشد. آنها برای حل مساله در گام اول یک مدل ریاضی عدد صحیح برای برنامه ریزی نوع و کمیت

¹ Multi-process plans

² Divergent production system

عملیات ایجاد کردند و در گام دوم برای برنامه‌ریزی عملیات تعیین شده در گام اول، بهینه‌سازی ازدحام ذرات را پیشنهاد نمودند. نتایج محاسباتی براساس داده‌های واقعی تولید نشان داده است که راه‌حل پیشنهادی دو مرحله‌ای برای مساله برنامه‌ریزی DPS در شرکت مناسب و سودمند است [۷۵]. گوا و همکاران (۲۰۱۹) مساله بهینه‌سازی مسیرهای پردازش چند فرآیندی در محیط کار کارگاهی انعطاف‌پذیر را با هدف کاهش مصرف انرژی مورد مطالعه قرار دادند. آنها مصرف انرژی را به دو دسته مصرف انرژی مستقیم و مصرف انرژی غیر مستقیم تقسیم کردند و با در نظر گرفتن مصرف انرژی تولید و زمان پردازش به عنوان توابع هدف، یک مدل برنامه‌ریزی زمانبندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر از مسیرهای تولید چند فرآیندی معرفی نمودند. سپس جهت حل مدل از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده کردند [۷۶].

همانطور که در ادبیات اشاره شده مشهود است، اکثر مسائل زمانبندی مرسوم در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با زمان یا کار به عنوان دو تابع هدف اصلی سروکار دارند. علاوه بر این، به دلیل توجه بیشتر به جنبه‌های زیست محیطی در دهه‌های اخیر، تلاش‌های زیادی در زمینه مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های مرتبط با آن انجام شده است تا به رشد پایدار اقتصادی در همه بخش‌ها دست یافت [۷۷]. دانش به دست آمده نشان می‌دهد در محیط FFS هیچ پژوهشی به صورت همزمان دو موضوع حداقل سازی زمان اتمام کل کارها (C_{max}) و کاهش هزینه‌های تولید را به عنوان دو تابع هدف مهم، مورد مطالعه قرار نداده است. با در نظر گرفتن استفاده از ماشین‌های نامرتب با سطح تکنولوژی متفاوت در برخی مراحل، هزینه فرآیند، زمان پردازش و مسیر فرآیند هر کار براساس ماشین تخصیصی متفاوت خواهد بود. اگرچه هر دو تابع هدف منجر به کاهش هزینه کل می‌شود اما هزینه فرآیند یک مساله مهم در استفاده از ماشین‌های موازی نامرتب است که با C_{max} در تضاد می‌باشد. به حداقل رساندن زمان اتمام کل باعث بهینه‌سازی عوامل وابسته به زمان مانند بهره‌وری منابع، هزینه فرصت و شرایط استهلاک مبتنی بر زمان می‌شود. از طرف دیگر، ما می‌خواهیم از طریق یک تابع هدف جدید هزینه‌های تولید را که مستقیماً به زمان پردازش مانند هزینه‌های نگهداری، مواد و قطعات مصرفی و هزینه منابع کمکی وابسته است را بهینه‌سازی کنیم. همچنین می‌خواهیم در یک مدل جداگانه موضوع مصرف انرژی را با هزینه‌های پردازش به طور توأمان کمینه‌سازی کنیم و در نهایت، در یک مدل مستقل دیگر مقدار Makespan را در شرایطی که منابع کمکی به عنوان یک منبع محدودیت کننده در کنار ماشین قرار دارد بهینه‌سازی کنیم.

۲-۲-۸ بررسی روش‌های حل مساله زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر

رویکردهای حل در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر را می‌توان در چهار دسته الگوریتم‌های دقیق^۱، ابتکاری قطعی^۲، فرا ابتکاری^۳ و ترکیبی^۴ طبقه‌بندی کرد [۱۲].

^۱ Exact algorithms

^۲ deterministic heuristics

^۳ metaheuristic

^۴ hybrid

الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند اما در مورد مسائل بهینه‌سازی سخت کارایی ندارند و زمان حل آنها در این مسائل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. از الگوریتم شاخه و کران به عنوان یک الگوریتم دقیق در محیط FFS استفاده می‌شود. طراحی و استفاده از حد پایین و حد بالا در این الگوریتم، با هدف ارزیابی شاخه‌ها و توقف شاخه‌هایی انجام می‌شود که از جواب بهینه فاصله دارند. بنابراین سرعت حل و کارایی الگوریتم، وابستگی زیادی به کیفیت طراحی این دو عبارت دارد [۷۸]. این روش اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسط لند و دویگ [۷۹] پیشنهاد شد و به یکی از ابزارهای رایج برای حل مسائل NP-hard تبدیل گردید. در ادامه علویی و آرتیبا الگوریتم شاخه و کران را برای حل مسائل در ابعاد کوچک مورد بحث قرار دادند اما در ابعاد بزرگ روش‌های ابتکاری LS^۱ و LPT^۲ را پیشنهاد نمودند. حسنی و حسینی [۱] برای حل دقیق مساله دو هدفه جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با فرآیند پردازش وابسته به ماشین در ابعاد کوچک الگوریتم محدودیت اپسیلون را پیشنهاد نمودند. این الگوریتم از جمله روش‌های حل متداول برای رسیدن به جبهه‌ی پاراتو بهینه در مسائل دو هدفه می‌باشد. آنها همچنین برای مسائل متوسط و بزرگ الگوریتم NSGA-II و SPEA-II را پیشنهاد نمودند.

روش‌های ابتکاری، فرآیندی برای جستجوی راه‌حل‌های رضایت‌بخش برای اهداف معین است که تضمینی برای یافتن پاسخ بهینه ندارند. این روش می‌تواند برای حل مساله، سیستم‌های یادگیری و سیستم‌های بهینه‌سازی استفاده شود. گروه ابتکاری‌ها به دو دسته روش‌های سازنده^۲ و روش‌های بهبود دهنده^۳ تقسیم می‌شوند. روش‌های سازنده برپایه کار یا برپایه مرحله آغاز به کار می‌کنند ولی روش‌های بهبود دهنده به روش‌هایی گفته می‌شود که یک راه حل اولیه را بهبود می‌دهند. متداول‌ترین نوع روش ابتکاری، روش قوانین توزیع^۴ است. مفهوم توزیع قوانین مجموعه‌ای از قوانین اولویت برای رتبه‌بندی و اختصاص کار به ماشین‌های مربوطه است [۱۲]. محققان زیادی به این مجموعه توزیع قوانین پرداخته‌اند. راجندان و هلدیوس [۸۰] به مطالعه خوب با عنوان انواع قوانین توزیع بخصوص در محیط پویا ارائه دادند، آنها این قوانین را به پنج دسته طبقه‌بندی کردند که شامل (۱): زمان پردازش (۲): زمان‌های تحویل (۳): بدون زمان پردازش و زمان تحویل (۴): شرایط کف کارگاه (۵): ترکیبی از چند دسته قبلی می‌باشد. یک روش رمزگشایی جدید نیز با نام زمان‌بندی رو به جلو (FS) براساس قوانین اولویت‌بندی توسط وانگ و همکاران برای حل مساله FFS با کارهای چند پردازنده پیشنهاد شد. آنها در این روش رمزگشایی راه حل را براساس ترتیب زمان تکمیل در مراحل قبلی انجام دادند تا طبق مراحل تعریف شده، دستور پردازش در مراحل بعدی تعیین شود [۸۱]. کوریتکوفسکی و همکاران [۸۲] یک روش ابتکاری بر پایه شبیه‌سازی تکاملی برای جستجوی تخصیص بهینه قوانین توزیع در خطوط تولید را توسعه دادند. نگوین و همکاران [۸۳] یک قانون توزیع ارائه دادند که می‌تواند به طور تکراری زمان‌بندی‌ها را از زمان‌بندی‌های تکمیل شده اولیه بهبود دهد.

¹ List algorithm

² Constructive procedures

³ Improvement procedures

⁴ Dispatching rules

مشکل الگوریتم های ابتکاری، توقف آنها در جواب بهینه محلی است. درحالی که اکثر الگوریتم های تکرارشونده همیشه سعی می کنند برای دستیابی به راه حل بهتر از یک جواب بهینه محلی فرار کنند. الگوریتم های فراابتکاری فرآیندهای تکراری دارند که به طور تکراری راه حل های بالقوه را بهبود می دهند. به عبارت دیگر، روش فراابتکاری مجموعه ای از ایده های ریاضی است که می تواند برای مجموعه ی گسترده ای از مسائل متفاوت استفاده شود. برخی از محققان در تلاشند تا با ایجاد برنامه پیش بینی، این روش ها را برای پاسخ به عدم قطعیت های غیرمنتظره به کارگیرند. الگوریتم های ژنتیک ابزاری کارآمد برای بدست آوردن راه حل با بهترین سازگاری هستند. کاستا و همکاران یک الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رمزگشایی هوشمند (SGA) را برای به حداقل رساندن حداکثر زمان تکمیل جهت زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف پذیر با محدودیت پردازشگرهای نامرتبط، محدودیت ظرفیت ماشین ها و محدودیت واجد شرایط بودن ماشین توسعه دادند. در این روش پیشنهادی از یک اپراتور ترکیب توسعه یافته به نام EOX استفاده شده است که تمایل دارد بدون هیچ تغییری هر مجموعه از کارهای یکسان را در یک راه حل مشخص به صورت آشفته نگه دارد. حسینی و همکاران [۸۴] یک مدل دو هدفه یکپارچه برای برنامه ریزی تولید با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت انبار ارائه دادند. آنها در این مدل از دو تابع هدف مجموع کل هزینه های سیستم و مجموع تغییرات نیروی کار در طول دوره برنامه ریزی استفاده کردند. از آنجایی که این مدل NP-hard می باشد برای حل آن در ابعاد بزرگ الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) و الگوریتم رقابت استعماری چند هدفه (MOICA) را ارائه دادند. ارزیابی های صورت گرفته با شاخص های متداول در مسائل چند هدفه نشان داد که کیفیت جواب های حاصل از الگوریتم MOICA بهتر از الگوریتم NSGA-II است هرچند که زمان حل الگوریتم NSGA-II کوتاه تر است. جونز و همکاران اظهار داشتند که ۷۰٪ مقالات از الگوریتم های ژنتیک به عنوان فراابتکاری پایه به دلیل انعطاف پذیری، ۲۴٪ از الگوریتم تبرید شبیه سازی شده^۱ و فقط ۶٪ از جستجوس تابو^۲ استفاده کرده اند [۱۲].

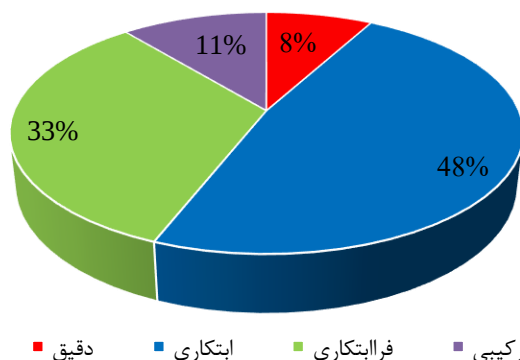
رویکرد ترکیبی را می توان به عنوان ترکیبی از دو یا چند رویکرد تعریف کرد. هر رویکرد منفرد جوانب مثبت و منفی خاص خود را دارد. برای مثال الگوریتم ژنتیک سنتی دارای نقص همگرایی زودرس است و همچنین ساختار توابع برازندگی^۳ و وابستگی پارامترها از دیگر مشکلات آن می باشد [۱۲]. جولای و همکاران الگوریتم رقابت استعماری انطباقی (AICA) و الگوریتم تبرید شبیه سازی شده بر پایه جمعیت (PBSA) را بررسی کرده و به عنوان یک رویکرد واحد با هم ترکیب کردند. از AICA برای ساختار روش بهره برداری و از PBSA برای اکتشاف روش بهره برداری کردند. لی و همکاران یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی (HVNS) که ترکیبی از بهینه سازی واکنش شیمیایی (CRO) و برآورد توزیع (EDA) بود را در محیط جریان کارگاهی انعطاف پذیر پیشنهاد دادند.

¹ Simulated annealing

² Tabu search

³ Fitness functions

شکل ۲-۷ توزیع روش‌های حل را براساس مطالعه لی و لونگ (۲۰۱۹) [۱۲] نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که بیش از ۴۸٪ کل ادبیات متمرکز بر روش‌های ابتکاری و به دنبال آن فراابتکاری، ترکیبی و دقیق است.



شکل ۲-۷. توزیع روش‌های حل در تحقیقات انجام در حوزه FFS

۲-۲-۹ جمع‌بندی

همانطور که از ادبیات موجود مشهود است، اکثر مسائل زمانبندی در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با زمان و کار به عنوان اصلی‌ترین توابع هدف سر و کار دارند. علاوه بر این به دلیل توجه بیشتر به جنبه‌های زیست محیطی در دهه‌های گذشته، تلاش‌های زیادی در زمینه مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های مرتبط انجام شده است. به عنوان یک دانش مهم نویسنده، هیچ مطالعه‌ای در خصوص به حداقل رساندن زمان تکمیل کارها و به حداقل رساندن هزینه‌های تولید به صورت همزمان به عنوان تابع هدف مهم در مساله FFS انجام نشده است. در این پژوهش به عنوان یک کار جدید و پرکاربرد در صنعت، با در نظر گرفتن ماشین‌های نامرتبط با سطح تکنولوژی متفاوت در برخی مراحل، هزینه فرآیند، زمان پردازش و مسیر فرآیند هر کار بر اساس ماشین تعیین شده متفاوت فرض شده است. همچنین بررسی ادبیات پژوهش در خصوص زمانبندی با محدودیت منابع کمکی نشان می‌دهد اکثر پژوهش‌های انجام شده منابع کمکی محدود را به عنوان یک پارامتر در نظر می‌گیرند ولی در این پژوهش منابع کمکی ابتدا به صورت متغیر در نظر گرفته شده و مقدار آن توسط مدل بدست می‌آید سپس با در نظر گرفتن محدودیت‌های بودجه‌ای و به کارگیری منابع کمکی سعی در زمانبندی مجدد، شده است.

فصل ۳ : روش‌شناسی تحقیق و مدل‌سازی ریاضی

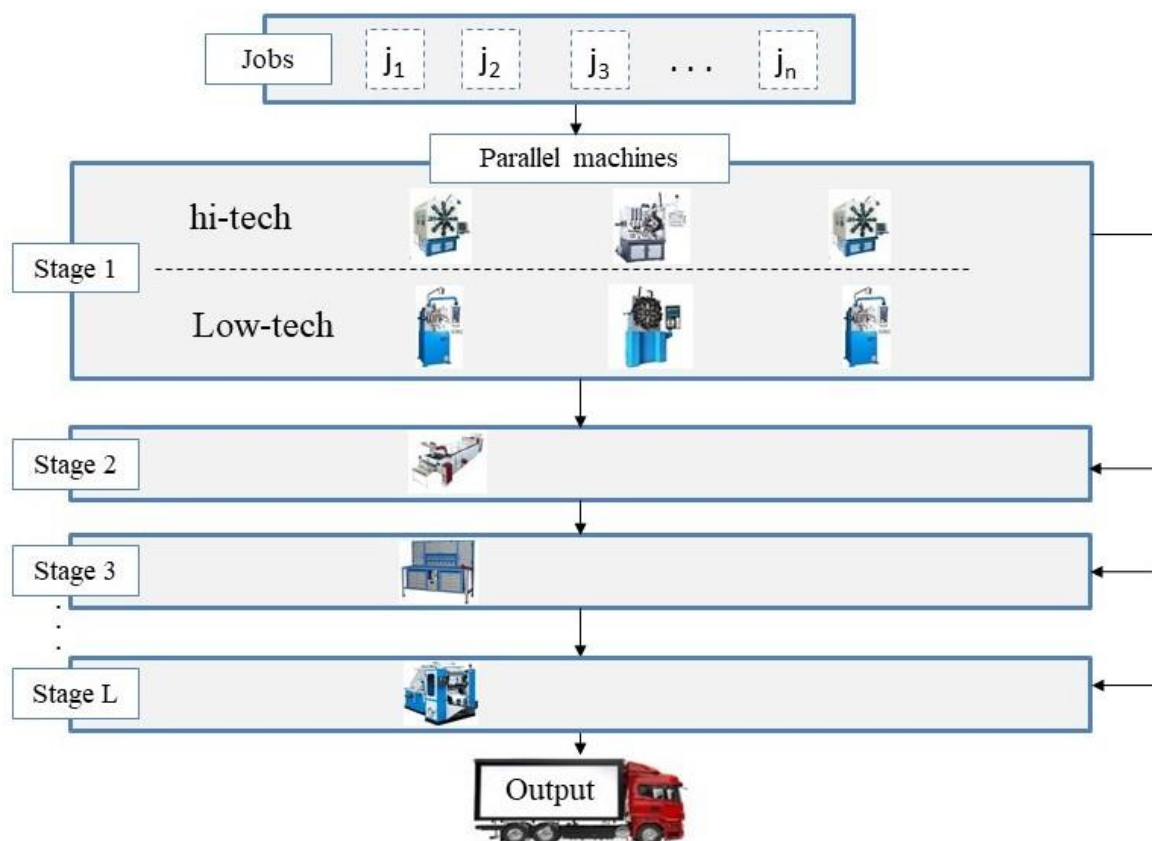
۱-۳ مقدمه

دو دسته کلی از روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی شامل روش‌های دقیق و روش‌های تقریبی وجود دارند. روش‌های دقیق راه حل‌های بهینه را بدست می‌آورند و شرایط بهینگی را تضمین می‌کنند. اینگونه روش‌ها عموماً برای مسائل ساده و با تعداد متغیرهای کم به کار می‌روند و برای مسائل با ابعاد بزرگ و پیچیده، عملکرد آنها کاهش می‌یابد. رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح به عنوان یکی از روش‌های دقیق شناخته می‌شود که البته با توجه به کاستی‌هایی که این گونه از روش‌ها در محیط‌های پیچیده و بزرگ دارند، اغلب از آنها برای توسعه و اعتبارسنجی عملکرد رویکردهای ابتکاری و فراابتکاری استفاده می‌شود. به منظور حرکت از یک تعریف مفهومی به یک فرمول‌سازی شفاف برای یک مسأله زمانبندی، مدل‌سازی ریاضی بهترین انتخاب است. چرا که تمام جنبه‌های مختلف یک مسأله را می‌توان با زبان دقیق ریاضیات مشخص نمود. جدا از شفاف‌سازی دقیق مسأله، مدل‌های ریاضی می‌توانند به عنوان یک روش حل نیز مورد توجه قرار گیرند. با توجه به ایجاد نرم‌افزار و کامپیوترهای خاص و ویژه، اینگونه سیستم‌ها توانایی حل مسائل با ابعاد کوچک و یا حتی متوسط را دارند. بعلاوه مدل‌های ریاضی عموماً بعنوان یک نقطه شروع برای بسیاری از الگوریتم‌های حل از قبیل روش شاخه و کران مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این فصل ابتدا تعریفی از مساله مورد مطالعه ارائه می‌شود و در ادامه فرضیات عمومی مساله و نمادهای بکار رفته معرفی می‌گردند. سپس ۳ مدل ریاضی عدد صحیح مختلط با توابع هدف گوناگون جهت حل مساله در ابعاد کوچک پیشنهاد می‌شود. با توجه به پیچیدگی بالای مساله دو الگوریتم فرا ابتکاری برای مسائل دو هدفه و دو الگوریتم فراابتکاری برای مساله تک هدفه ارائه می‌گردد.

۲-۳ مدل‌سازی ریاضی مساله

مسئله اصلی مورد بررسی در این تحقیق، زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با فرآیندهای وابسته به ماشین است. شکل ۱-۳ شماتیک مساله مورد بررسی را نشان می‌دهد. در این مساله تعدادی کار وارد یک محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر می‌شوند به طوری که در ایستگاه اول تعدادی ماشین موازی نا مرتبط با سطح تکنولوژی متفاوت وجود دارد. و ایستگاه‌های دیگر به صورت تک ماشین می‌باشند. فرآیند پردازش در این سیستم وابسته به ماشین بوده و مسیر پردازش هر قطعه بستگی به نوع ماشین انتخابی در ایستگاه موازی دارد.



شکل ۱-۳. شماتیک مساله مورد مطالعه

از معیارهای مختلفی برای حل اینگونه مسائل استفاده می‌شود که از جمله آنها می‌توان به حداقل کردن حداکثر زمان تکمیل، میانگین دیرکرد یا دیرکرد کل کارها، تعداد کارهای دارای تاخیر و ... اشاره کرد. با توجه به اهمیت داشتن موضوع هزینه در فعالیت‌های تولیدی، در این پژوهش از معیار هزینه در کنار سایر موارد استفاده شده است. در ادامه سه مدل با سه رویکرد متفاوت برای حل مساله فوق پیشنهاد می‌گردد. این مدل‌ها جزء مدل‌های برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط می‌باشند که با بکارگیری آنها می‌توان جواب بهینه در مسائل کوچک را در زمان منطقی بدست آورد. با توجه به توضیحات ارائه شده، ابتدا فرضیات مسئله و متغیرهای آن بیان شده و سپس به توضیح کامل مدل‌ها خواهیم پرداخت.

مفروضات عمومی مساله به شرح زیر می‌باشد:

- ماشین‌های موازی در مرحله‌ی یک نامرتب بوده و همه‌ی آنها در ابتدای دوره برنامه‌ریزی در دسترس هستند.
- در هر زمان، هر ماشین می‌تواند فقط یک کار را پردازش کند و یک کار نمی‌تواند همزمان روی دو ماشین پردازش شود.
- هر کار را در صورتی می‌توان پردازش نمود که دستگاه مورد نیاز آن در زمان پردازش در دسترس باشد.
- زمان‌های راه‌اندازی وابسته به توالی در نظر گرفته شده است.

- جهت بیان زمان راه‌اندازی اولیه، فرض شده است کار صفر به عنوان یک کار مصنوعی با زمان آماده‌سازی صفر در ابتدای کارها قرار می‌گیرد.
- از زمان حمل و نقل کارها بین ماشین‌ها و مراحل صرف نظر شده است.

۱-۲-۳ تعریف پارامترها

برای هر سه مدل مساله مورد بررسی، اندیس‌ها و پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

j, i, h شماره کارها $(j, i, h = 0, 1, 2, \dots, N)$

k, m شماره ماشین‌ها $(k, m = 1, 2, \dots, K_l)$

l شماره مراحل $(l = 1, 2, \dots, L)$

پارامترها

$P_{kj}^{(l)}$ زمان پردازش کار j با ماشین k در مرحله l .

$S_{ijk}^{(l)}$ زمان آماده‌سازی ماشین k جهت تغییر کار از i به j .

$CP_{kj}^{(l)}$ هزینه هر ساعت پردازش کار j توسط ماشین k در مرحله l .

$VCH_{kj}^{(l)}$ هزینه وابسته به فرایند برای هر ساعت پردازش ماشین k بر روی کار j .

$FCH_k^{(l)}$ هزینه وابسته به زمان برای هر ساعت پردازش ماشین k بر روی کار j .

$Eg_{kj}^{(l)}$ پارامتر دودویی، مقدار آن یک است اگر ماشین k توان پردازش کار j را داشته باشد، در غیر این صورت صفر.

Res_{kv} تعداد منبع تجدیدپذیر از نوع v که ماشین k در هنگام پردازش به آن نیاز دارد.

Y_{jkl} پارامتر دودویی، مقدار آن یک است اگر کار j بعد از پردازش با ماشین k در مرحله یک نیاز به پردازش در مرحله l داشته باشد، در غیر این صورت صفر.

$ECR_k^{(l)}$ نرخ مصرف انرژی ماشین k در مرحله l در زمان مشغول به کار.

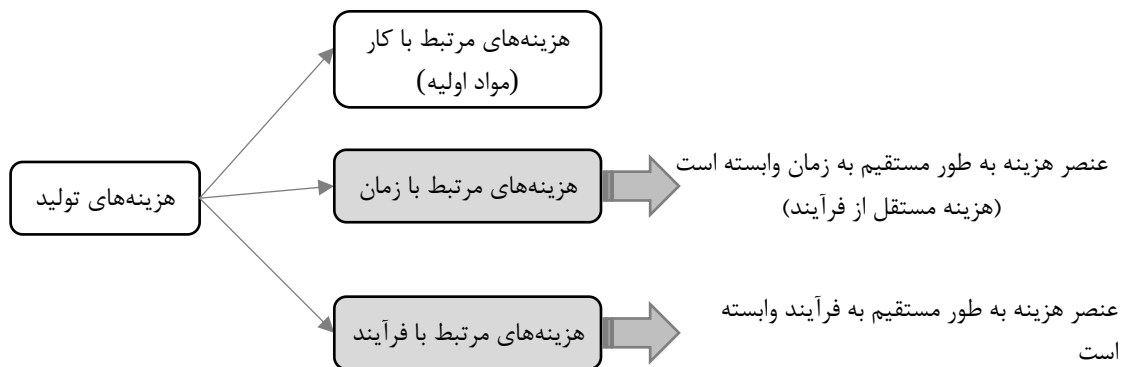
$SECR_k^{(l)}$ نرخ مصرف انرژی ماشین k در مرحله l در زمان بیکاری.

R_j زمان در دسترس بودن کار j در ابتدای دوره برنامه‌ریزی.

M عدد بزرگ.

۳-۲-۲ مدل ریاضی FFS-I

این مدل به صورت دو هدفه طراحی شده است و اهداف آن مینیمم سازی همزمان هزینه‌های تولید و حداکثر زمان تکمیل (*Makespan*) می‌باشد. در این مدل دو دسته از عناصر هزینه‌ای شامل هزینه‌های مرتبط با زمان و هزینه‌های مرتبط با فرآیند در تابع هدف به کار گرفته شده‌اند. شکل ۳-۲ طبقه‌بندی بکار رفته در این مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲. طبقه‌بندی هزینه تولید در تابع هدف

علاوه بر مفروضات عمومی اشاره شده، مفروضات اختصاصی این مدل و متغیرهای تصمیم آن به صورت زیر است:

- ماشین‌ها در ایستگاه یک دارای سطح تکنولوژی متفاوت می‌باشند، لذا برخی از آنها می‌توانند پردازش‌های بیشتری روی کار انجام دهند. در نتیجه کارها ممکن است برای تکمیل شدن به بعضی مراحل وارد نشوند.
- هزینه‌های پردازش به دو دسته، هزینه‌های وابسته به زمان و هزینه‌های وابسته به پردازش در نظر گرفته شده است.

متغیرهای تصمیم

متغیر دودویی، مقدار آن یک است اگر کار j به ماشین k در مرحله یک تخصیص داده شود، در غیر این صورت صفر. Z_{jk}

متغیر دودویی، مقدار آن یک است اگر کار j بلافاصله بعد از کار i به ماشین k در مرحله l تخصیص داده شود، در غیر این صورت صفر. X_{ijkl}

زمان تکمیل کار j در مرحله l . $C_j^{(l)}$

زمان اتمام آخرین کار در مرحله l . $C_{max}^{(l)}$

هزینه پردازش وابسته به فرآیند برای کار j در مرحله l $VPC_j^{(l)}$

هزینه کل وابسته به زمان برای ماشین k در مرحله l $FPC_k^{(l)}$

هزینه کل تولید (مجموع هزینه‌های وابسته به زمان و وابسته به فرآیند) TPC

با توجه به مطالب گفته شده مدل ریاضی FFS – I به شرح زیر می باشد:

$$\text{Min } Z_1 = \text{TPC} \quad (3-1)$$

$$\text{Min } Z_2 = C_{\max} \quad (3-2)$$

Subject to:

$$\sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^K X_{ijkl} = 1 \quad \forall l = 1, j \neq i \quad (3-3)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^K X_{ijkl} - \sum_{k=1}^K Z_{jk} \times Y_{jkl} = 0 \quad \forall l > 1, j \neq i \quad (3-4)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ijkl} \leq 1 \quad \forall k, l, i \neq j \quad (3-5)$$

$$\sum_{i=0}^N X_{ihkl} - \sum_{j=1, j \neq i}^N X_{hjk l} = 0 \quad \forall k, l, h, h \neq i, j \quad (3-6)$$

$$C_j^{(l)} \geq X_{ijkl} \times (P_{kj}^{(l)} + S_{ijk}^{(l)}) \quad \forall k, l = 1, i, j, i \neq j \quad (3-7)$$

$$C_i^{(l)} + \sum_{k=1}^K X_{ijkl} \times (P_{kj}^{(l)} + S_{ijk}^{(l)}) + M \left(\sum_{k=1}^K X_{ijkl} - 1 \right) \leq C_j^{(l)} \quad \forall l, i, j, i \neq j \quad (3-8)$$

$$C_j^{(l-1)} + X_{ijkl} \times (P_{kj}^{(l)} + S_{ijk}^{(l)}) \leq C_j^{(l)} \quad \forall k, l > 1, i \neq j \quad (3-9)$$

$$C_j^{(l-1)} + M \times (1 - X_{ijkl}) \geq C_i^{(l-1)} \quad \forall k, l > 1, i \neq j \quad (3-10)$$

$$Z_{jk} = \sum_{i=0}^N X_{ijkl} \quad \forall k, l, j \neq i \quad (3-11)$$

$$VPC_j^{(l)} \geq VCH_{kj}^{(l)} \times (P_{kj}^{(l)} + (S_{ijk}^{(l)} \times X_{ijkl})) \quad \forall l = 1, i, j, i \neq j \quad (3-12)$$

$$VPC_j^{(l)} \geq VCH_{kj}^{(l)} \times (P_{kj}^{(l)} + (S_{ijk}^{(l)} \times X_{ijkl})) - M \times \left(1 - \sum_{m=1}^K Z_{jm} \times Y_{jml} \right) \quad \forall l > 1, k, i, j, i \neq j \quad (3-13)$$

$$VPC_j^{(l)} - M \times \left(\sum_{k=1}^K Z_{jk} \times Y_{jkl} \right) \leq 0 \quad \forall l > 1, k, j \quad (3-14)$$

$$FPC_k^{(l)} \geq FCH_k^{(l)} \times C_{max}^{(l)} \quad \forall l, k \quad (3-15)$$

$$TPC = \sum_{l=1}^L \sum_j^N VPC_j^{(l)} + \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K FPC_k^{(l)} \quad (3-16)$$

$$C_j^{(l)} \leq C_{max}^{(l)} \quad \forall l, j \quad (3-17)$$

$$X_{ijkl}, Z_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, l \quad (3-18)$$

$$FPC_k^{(l)}, VPC_j^{(l)}, TPC, C_j^{(l)} \geq 0 \quad \forall j, k, l \quad (3-19)$$

روابط (۳-۱) و (۳-۲) توابع هدف مدل را نشان می‌دهند:

رابطه (۳-۱): حداقل نمودن هزینه‌های پردازش کل

رابطه (۳-۲): حداقل نمودن حداکثر زمان تکمیل یا Makespan

محدودیت (۳-۳) اطمینان می‌دهد که در مرحله ۱ هر کار j به ماشین k تخصیص یابد. با توجه به نوع ماشین پردازشگر کار j در مرحله ۱ محدودیت (۳-۴) تضمین می‌کند کارها برای تکمیل شدن از مراحل ۲ تا l عبور کنند. محدودیت (۳-۵) بیان می‌کند که کار j در هر مرحله و بر روی هر ماشین حداکثر یک بار می‌تواند پردازش شود. با توجه به توالی کارها محدودیت (۳-۶) تضمین می‌کند هر کار فقط یک بار در مرحله l پردازش شده است. محدودیت (۳-۷) بیان می‌کند زمان تکمیل کار j حداقل برابر مجموع زمان آماده‌سازی و زمان پردازش آن کار می‌باشد. اگر کار j بلافاصله بعد از کار i روی ماشین k تخصیص یابد، محدودیت (۳-۸) تضمین می‌کند زمان تکمیل کار j بزرگتر از زمان تکمیل کار i باشد. محدودیت (۳-۹) اطمینان می‌دهد زمان تکمیل کار j بزرگتر یا مساوی زمان تکمیل آن در مرحله قبل بعلاوه مجموع زمان آماده‌سازی و پردازش می‌باشد. با توجه به قانون جایگشت بین مراحل، محدودیت (۳-۱۰) اطمینان می‌دهد اگر زمان تکمیل کار j بزرگتر یا مساوی زمان تکمیل کار i در مرحله $l-1$ باشد، در مرحله l کار i در توالی، قبل از کار j قرار می‌گیرد. محدودیت (۳-۱۱) نشان می‌دهد در هر مرحله فقط یک ماشین به کار j تخصیص یافته است. محدودیت (۳-۱۲) نحوه محاسبه هزینه پردازش وابسته به فرآیند برای هر کار در مرحله‌ی یک را نشان می‌دهد. محدودیت (۳-۱۳) نحوه محاسبه هزینه پردازش وابسته به فرآیند در مراحل ۲ تا l را نشان می‌دهد. محدودیت (۳-۱۴) نیز برای محاسبه هزینه پردازش وابسته به فرآیند ضروری می‌باشد. معادله (۳-۱۵) هزینه‌های وابسته به زمان را برای هر ماشین در هر مرحله محاسبه می‌کند. محدودیت (۳-۱۶) نشان می‌دهد هزینه کل پردازش از مجموع هزینه‌های پردازش وابسته به فرآیند و

هزینه‌های وابسته به زمان بدست می‌آید. معادله (۳-۱۷) مقدار $C_{max}^{(l)}$ را محاسبه می‌کند. معادله‌های (۳-۱۸) و (۳-۱۹) ابعاد متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

۳-۲-۳ مدل ریاضی FFS-II

این مدل نیز همانند مدل قبل به صورت دو هدفه طراحی شده است. در این مدل مستقیماً مصرف انرژی کل و هزینه پردازش به صورت توأمان مینیم‌سازی می‌شود. در این مدل آن دسته از هزینه‌های تولید که وابسته به فرآیند هستند در تابع هدف لحاظ شده‌اند و از هزینه‌های وابسته به زمان چشم‌پوشی شده است.

مفروضات اختصاصی این مدل و متغیرهای تصمیم آن به صورت زیر تعریف شده است:

- ماشین‌های موازی در ایستگاه ۱ دارای سطح تکنولوژی متفاوت بوده و فرآیند تولید هر قطعه وابسته به ماشین تخصیص یافته در ایستگاه کاری ۱ می‌باشد.
- با توجه به قابلیت‌های مختلف ماشین‌ها، همه ماشین‌ها قادر به پردازش همه کارها نمی‌باشد.
- کارها در ابتدای دوره زمانی در دسترس نیستند و به زمانی تحت عنوان زمان دسترسی نیاز دارند.
- مصرف انرژی ماشین‌ها در زمان بیکاری و راه‌اندازی یکسان بوده و با مصرف انرژی در زمان پردازش متفاوت است.

متغیرهای تصمیم

Z_{jk} متغیر دودویی، مقدار آن یک است اگر کار j به ماشین k در مرحله یک تخصیص داده شود، در غیر این صورت صفر.

X_{ijkl} متغیر دودویی، مقدار آن یک است اگر کار j بلافاصله بعد از کار i به ماشین k در مرحله l تخصیص داده شود، در غیر این صورت صفر.

$C_j^{(l)}$ زمان تکمیل کار j در مرحله l .

$C_{max}^{(L)}$ زمان اتمام آخرین کار در آخرین مرحله.

$EC_k^{(l)}$ کل مقدار انرژی مصرف شده توسط ماشین k در حالت مشغول به کار.

$SEC_k^{(l)}$ کل مقدار انرژی مصرف شده ماشین k در حالت بیکاری.

$PC_j^{(l)}$ هزینه پردازش و تولید کار j .

در نهایت مدل ریاضی مساله‌ی مورد مطالعه به صورت زیر می‌باشد.

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K_l} (EC_k^{(l)} + SEC_k^{(l)}) \quad (3-20)$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{l=1}^L \sum_j^N PC_j^{(l)} \quad (3-21)$$

Subject to:

$$\sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^K X_{ijkl} = 1 \quad (3-22)$$

$$\forall l = 1, j \neq i$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^K X_{ijkl} - \sum_{k=1}^K Z_{jk} \times Y_{jkl} = 0 \quad (3-23)$$

$$\forall l > 1, j \neq i$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ijkl} \leq 1 \quad (3-24)$$

$$\forall k, l, i \neq j$$

$$\sum_{i=0}^N X_{ihkl} - \sum_{j=1, \neq i}^N X_{hjkl} = 0 \quad (3-25)$$

$$\forall k, l, h, h \neq i, j$$

$$C_j^{(l)} \geq X_{ijkl} \times (P_{kj}^{(l)} + S_{ijk}^{(l)} + R_j) \quad (3-26)$$

$$\forall k, l = 1, i, j, i \neq j$$

$$C_i^{(l)} + \sum_{k=1}^K X_{ijkl} \times (P_{kj}^{(l)} + S_{ijk}^{(l)}) + M(\sum_{k=1}^K X_{ijkl} - 1) \leq C_j^{(l)} \quad (3-27)$$

$$\forall l, i, j, i \neq j$$

$$C_j^{(l-1)} + X_{ijkl} \times (P_{kj}^{(l)} + S_{ijk}^{(l)}) \leq C_j^{(l)} \quad (3-28)$$

$$\forall k, l > 1, i \neq j$$

$$C_j^{(l-1)} + M \times (1 - X_{ijkl}) \geq C_i^{(l-1)} \quad (3-29)$$

$$\forall k, l > 1, i \neq j$$

$$Z_{jk} = \sum_{i=0}^N X_{ijkl} \quad (3-30)$$

$$\forall k, l = 1, j \neq i$$

$$X_{ijkl} \leq Eg_{kj}^{(l)} \quad (3-31)$$

$$\forall j \neq 0, i \neq j$$

$$EC_k^{(l)} \geq ECR_k^{(l)} \times \sum_{j=1}^N (P_{kj}^{(l)} \times Z_{jk}) \quad (3-32)$$

$$\forall l = 1, k$$

$$EC_k^{(l)} \geq ECR_k^{(l)} \times \sum_{j=1}^N (P_{kj}^{(l)} \times (\sum_{m=1}^K Z_{jm} \times Y_{jml})) \quad (3-33)$$

$$\forall l > 1, k$$

$$SEC_k^{(l)} \geq SECR_k^{(l)} \times (\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, \neq i}^N S_{ijk}^{(l)} \times X_{ijkl}) \quad (3-34)$$

$$\forall l = 1, k$$

$$SEC_k^{(l)} \geq SECR_k^{(l)} \times (\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, \neq i}^N S_{ijk}^{(l)} \times X_{ijkl}) \quad (3-35)$$

$$\forall l > 1, k, i, j, i \neq j$$

$$PC_j^{(l)} \geq CP_{kj}^{(l)} \times (P_{kj}^{(l)} + (S_{ijk}^{(l)} \times X_{ijkl})) \quad (3-36)$$

$$\forall l = 1, i, j, i \neq j$$

$$PC_j^{(l)} \geq CP_{kj}^{(l)} \times (P_{kj}^{(l)} + (S_{ijk}^{(l)} \times X_{ijkl})) - M \times (1 - \sum_{m=1}^K Z_{jm} \times Y_{jml}) \quad (3-37)$$

$$\forall l > 1, k, i, j, i \neq j$$

$$PC_j^{(l)} - M \times \left(\sum_{k=1}^K Z_{jk} \times Y_{jkl} \right) \leq 0 \quad (3-38)$$

$$\forall l > 1, k, j$$

$$C_j^{(l)} \leq C_{max}^{(l)} \quad (3-39)$$

$$\forall l, j$$

$$C_{max}^{(l)} \leq V \quad (3-40)$$

$$\forall l = L$$

$$X_{ijkl}, Z_{jk} \in \{0,1\} \quad (3-41)$$

$$\forall i, j, k, l$$

$$EC_k^{(l)}, SEC_k^{(l)}, PC_j^{(l)}, C_j^{(l)} \geq 0 \quad (3-42)$$

$$\forall j, k, l$$

رابطه (۳-۲۰) و (۳-۲۱) توابع هدف مساله را نشان می‌دهند که عبارتند از:

رابطه (۳-۲۰): حداقل‌سازی مصرف انرژی کل

رابطه (۳-۲۱): حداقل‌سازی هزینه تولید کل

رابطه (۳-۲۲) تضمین می‌کند که در مرحله یک هر کار فقط به یک ماشین تخصیص داده شده است. رابطه

(۳-۲۳) تضمین می‌کند که کارها با توجه به نوع ماشین پردازش‌کننده در مرحله‌ی یک مراحل مورد نیاز

تا اتمام کار را طی می کنند. رابطه (۳-۲۴) اطمینان می دهد که کارها در هر مرحله و بر روی هر ماشین حداکثر یک بار پردازش می شود. رابطه (۳-۲۵) باعث جلوگیری از انجام کار تکراری در توالی پردازش کارها می شود. رابطه (۳-۲۶) زمان تکمیل کار z را با توجه به توالی آن براساس زمان پردازش، زمان آماده سازی و زمان دسترسی در مرحله یک نشان می دهد. رابطه (۳-۲۷) تضمین می کند که زمان تکمیل کار z و کار i به صورت متوالی محاسبه می شود اگر کار z بلافاصله بعد از کار i بر روی یک دستگاه پردازش شوند. رابطه (۳-۲۸) اطمینان می دهد که زمان تکمیل هر کار در هر مرحله بزرگتر یا مساوی زمان تکمیل آن کار در مرحله ی قبل بعلاوه زمان تنظیم و زمان پردازش آن در همان مرحله می باشد. رابطه (۳-۲۹) با توجه به قانون جایگشتی اطمینان می دهد که کار i در توالی پردازش قبل از کار z در مرحله l می باشد، اگر زمان تکمیل کار z بزرگتر یا مساوی زمان تکمیل کار i در مرحله $l - 1$ باشد. رابطه (۳-۳۰) نشان می دهد که هر کار در مرحله یک فقط به یک ماشین خاص تخصیص داده شده است. رابطه (۳-۳۱) تضمین می کند که هر کار فقط به دستگاهی که قابلیت پردازش آن کار را داشته باشد تخصیص داده می شود. روابط (۳-۳۲) و (۳-۳۳) میزان مصرف انرژی ماشین ها را در حالت مشغول به کار محاسبه می کند. رابطه (۳-۳۴) و (۳-۳۵) میزان مصرف انرژی ماشین ها را در حالت بیکاری محاسبه می کند. روابط (۳-۳۶) و (۳-۳۷) و (۳-۳۸) زمان تکمیل کارها در مراحل مختلف را محاسبه می کند. رابطه (۳-۳۹) مقدار حداکثر زمان تکمیل کارها را نشان می دهد. رابطه (۳-۴۰) محدودیت کارفرمایی جهت حداکثر زمان تکمیل کارها را نشان می دهد. در نهایت روابط (۳-۴۱) و (۳-۴۲) دامنه ی متغیرهای تصمیم را نشان می دهد.

۴-۲-۳ مدل ریاضی FFS-III

مدل ریاضی FFS-III با هدف حداقل سازی حداکثر زمان تکمیل برای بررسی تاثیر منابع کمکی (نیروی انسانی متخصص) بر زمانبندی تولید در محیط جریان کارگاهی انعطاف پذیر براساس مطالعات افصلی راد و رضائیان (۲۰۱۶) [۸] و پژوهش کاستا و همکاران (۲۰۲۰) [۸۵] طراحی شده است. نوآوری های بکار رفته در این مدل شامل وابستگی فرآیند پردازش به ماشین، استفاده از ماشین های نامرتب، تعریف کردن منابع کمکی به صورت متغیر و وابستگی زمان راه اندازی به توالی می باشد. همچنین در تحلیل های انجام شده در فصل چهارم موضوع هزینه استفاده از تسهیلات، محدودیت های بودجه ای و محدودیت در بکارگیری منابع کمکی (نیروی انسانی متخصص) مطرح شده است.

فرضیات اختصاصی و متغیرهای تصمیم در این مدل به شرح زیر تعریف می شود:

- ماشین های موازی در ایستگاه ۱ دارای سطح تکنولوژی متفاوت بوده و فرآیند تولید هر قطعه وابسته به ماشین تخصیص یافته در ایستگاه کاری ۱ است.
- ماشین ها بدون منابع کمکی امکان پردازش ندارند. لذا در زمان پردازش باید منابع کمکی مورد نیاز آن ها در دسترس باشد.
- نیروی انسانی متخصص به عنوان منبع کمکی ماشین ها در نظر گرفته شده است.

متغیرهای تصمیم

متغیر دودویی، مقدار آن یک است اگر کار j به ماشین k در مرحله یک تخصیص داده شود، در غیر این صورت صفر. Z_{jk}

متغیر دودویی، مقدار آن یک است اگر کار j بلافاصله بعد از کار i به ماشین k در مرحله l تخصیص داده شود، در غیر این صورت صفر. X_{ijkl}

یک متغیر دودویی، مقدار آن یک است اگر در مرحله یک کار j در زمان t به اتمام برسد، در غیر این صورت صفر. W_{jt}

زمان تکمیل کار j در مرحله l . $C_j^{(l)}$

تعداد منابع مورد نیاز از نوع v AR_v

با توجه به مطالب بیان شده مدل ریاضی FFS-III به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Min } Z = C_{max} \quad (3-43)$$

Subject to:

$$\sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^K X_{ijk1} = 1 \quad \forall j, j \neq i \quad (3-44)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^K X_{ijkl} - \sum_{k=1}^K Z_{jk} \times Y_{jkl} = 0 \quad \forall l > 1, j \neq i \quad (3-45)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ijkl} \leq 1 \quad \forall k, l, i \neq j \quad (3-46)$$

$$\sum_{i=0}^N X_{ihkl} - \sum_{j=1, j \neq i}^N X_{hjkl} = 0 \quad \forall k, l, h, h \neq i, j \quad (3-47)$$

$$C_j^{(1)} \geq X_{ijk1} \times (P_{kj}^{(1)} + S_{ijk}^{(1)}) \quad \forall k, i, j, i \neq j \quad (3-48)$$

$$C_i^{(l)} + \sum_{k=1}^K X_{ijkl} \times (P_{kj}^{(l)} + S_{ijk}^{(l)}) + M \left(\sum_{k=1}^K X_{ijkl} - 1 \right) \leq C_j^{(l)} \quad \forall l, i, j, i \neq j \quad (3-49)$$

$$C_j^{(l-1)} + X_{ijkl} \times (P_{kj}^{(l)} + S_{ijk}^{(l)}) \leq C_j^{(l)} \quad \forall k, l > 1, i \neq j \quad (3-50)$$

$$C_j^{(l-1)} + M \times (1 - X_{ijkl}) \geq C_i^{(l-1)} \quad \forall k, l > 1, i \neq j \quad (3-51)$$

$$Z_{jk} = \sum_{i=0}^N X_{ijkl} \quad \forall k, l, j \neq i \quad (3-52)$$

$$C_j^{(l)} \leq C_{max}^{(l)} \quad \forall l, j \quad (3-53)$$

$$\sum_{t=1}^T W_{jt} = 1 \quad \forall j \quad (3-54)$$

$$\sum_{t=P_{kj}^{(1)}}^T t * W_{jt} \geq P_{kj}^{(1)} + S_{ijk}^{(1)} + \sum_{t=P_{ki}^{(1)}}^T t * W_{it} - M \times (1 - X_{ijk1}) \quad \forall j \neq 0, i \neq j \quad (3-55)$$

$$\sum_{t=1}^T t * W_{jt} \leq C_j^{(1)} \quad \forall j \quad (3-56)$$

$$\sum_{i \neq j}^N \sum_{j \neq 0}^N \sum_{k=1}^K \sum_{s=t}^{t+P_{kj}^{(1)}+S_{ijk}^{(1)}-1} Res_{kv} \times W_{js} \times X_{ijk1} \leq AR_v \quad \forall t, v \quad (3-57)$$

$$X_{ijkl}, Z_{jk}, W_{jt} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, l \quad (3-58)$$

$$C_j^{(l)}, AR_v \geq 0 \quad \forall j, k, l \quad (3-59)$$

رابطه (۳-۴۳) تابع هدف مدل را که حداقل سازی حداکثر زمان تکمیل می باشد نشان می دهد.

رابطه (۳-۴۴) تضمین می کند که در مرحله یک هر کار فقط به یک ماشین تخصیص داده شده است.

محدودیت (۳-۴۵) تضمین می کند که کارها با توجه به نوع ماشین پردازش کننده در مرحله ی یک مراحل مورد نیاز تا اتمام کار را طی می کنند. محدودیت (۳-۴۶) اطمینان می دهد که کارها در هر مرحله و بر روی هر ماشین حداکثر یک بار پردازش می شود. محدودیت (۳-۴۷) باعث جلوگیری از انجام کار تکراری در توالی پردازش کارها می شود. معادله (۳-۴۸) زمان تکمیل کار j را با توجه به توالی آن براساس زمان پردازش، زمان آماده سازی و زمان دسترسی در مرحله یک نشان می دهد. رابطه (۳-۴۹) تضمین می کند که زمان تکمیل کار j و کار i به صورت متوالی محاسبه می شود اگر کار j بلافاصله بعد از کار i بر روی یک دستگاه پردازش شوند. محدودیت (۳-۵۰) اطمینان می دهد که زمان تکمیل هر کار در هر مرحله بزرگتر یا مساوی زمان تکمیل آن کار در مرحله ی قبل بعلاوه زمان تنظیم و زمان پردازش آن در همان مرحله می باشد. محدودیت (۳-۵۱) با توجه به قانون جایگشتی اطمینان می دهد که کار i در توالی پردازش قبل از کار j در مرحله l می باشد، اگر زمان تکمیل کار j بزرگتر یا مساوی زمان تکمیل کار i در مرحله $l-1$ باشد. محدودیت (۳-۵۲) نشان می دهد که هر کار در مرحله یک فقط به یک ماشین خاص تخصیص داده شده است. معادله (۳-۵۳) متغیر C_{max} را محاسبه می کند. محدودیت (۳-۵۴) نشان می دهد که هر کار در یک زمان خاص به اتمام می رسد. محدودیت (۳-۵۵) و (۳-۵۶) نشان می دهد که زمان تکمیل یک

کار در یک توالی روی یک ماشین حداقل برابر با مدت زمان اتمام کار قبلی، زمان تنظیم وابسته به توالی و زمان پردازش کار فعلی است. محدودیت (۳-۵۷) اطمینان می‌دهد که مقدار کل منبع تخصیص داده شده از نوع v به هر کار در هر دوره‌ی زمانی، کمتر یا مساوی موجودی در دسترس از آن منبع باشد. با توجه به اینکه دو متغیر W_{js} و X_{ijk1} در هم ضرب شده‌اند لذا این محدودیت به حالت غیر خطی تبدیل شده است. برای خطی‌سازی آن می‌بایست نامعادلات زیر جایگزین آن شوند.

$$F_{ijkt} \leq W_{jt} \quad \forall i, j, k, l \quad (3-60)$$

$$F_{ijkt} \leq X_{ijk1} \quad \forall i \neq j, j \neq 0, k \quad (3-61)$$

$$F_{ijkt} \geq X_{ijk1} + W_{jt} \quad \forall i \neq j, j \neq 0, k \quad (3-62)$$

$$\sum_{i \neq j}^N \sum_{j \neq 0}^N \sum_{k=1}^K \sum_{s=t}^{t+P_{kj}^{(1)}+S_{ijk}^{(1)}-1} Res_{kv} \times F_{ijkt} \leq AR_v \quad \forall t, v \quad (3-63)$$

در نهایت روابط (۳-۵۸) و (۳-۵۹) دامنه‌ی متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

۳-۳ روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه

بسیاری از پژوهشگران به علت پیچیدگی‌های ذاتی محیط‌های تولیدی به حل مسائل با چندین تابع هدف می‌پردازند. مطالعه این دسته از مسائل نیازمند آشنایی با مفاهیم و روش‌های چند هدفه می‌باشند. بهینه‌سازی چند هدفه فرآیند بهینه‌سازی همزمان دو یا چند معیار متضاد با در نظر گرفتن تعدادی محدودیت می‌باشد. بهینه‌سازی چند هدفه درواقع یافتن برداری از متغیرهای تصمیم می‌باشد به طوری که تابع هدف و محدودیت‌ها را ارضا کند [۸۶].

۳-۳-۱ روش بهینگی پارتو

وجود چندین تابع هدف موجب شد که ایده‌ی بهینگی پارتو تغییر پیدا کند، زیرا در بهینه‌سازی چند هدفه، هدف پیدا کردن جواب مصالحه‌ای^۱ می‌باشد تا پیدا کردن یک جواب بهینه در فضای کلی. ایده‌ی بهینگی پارتو نخستین بار توسط اجورس^۲ مطرح شد و بعدها توسط پارتو^۳ توسعه یافت. این ایده عموماً با عنوان بهینگی پارتو شناخته می‌شود. مطابق با تعریف فوق، پاسخ $x \in \Omega$ از فضای متغیرهای تصمیم بهینه‌ی پارتو خوانده می‌شود اگر هیچ $x' \in \Omega$ وجود نداشته باشد به طوری که:

¹ Trade-off solution

² Edgeworth

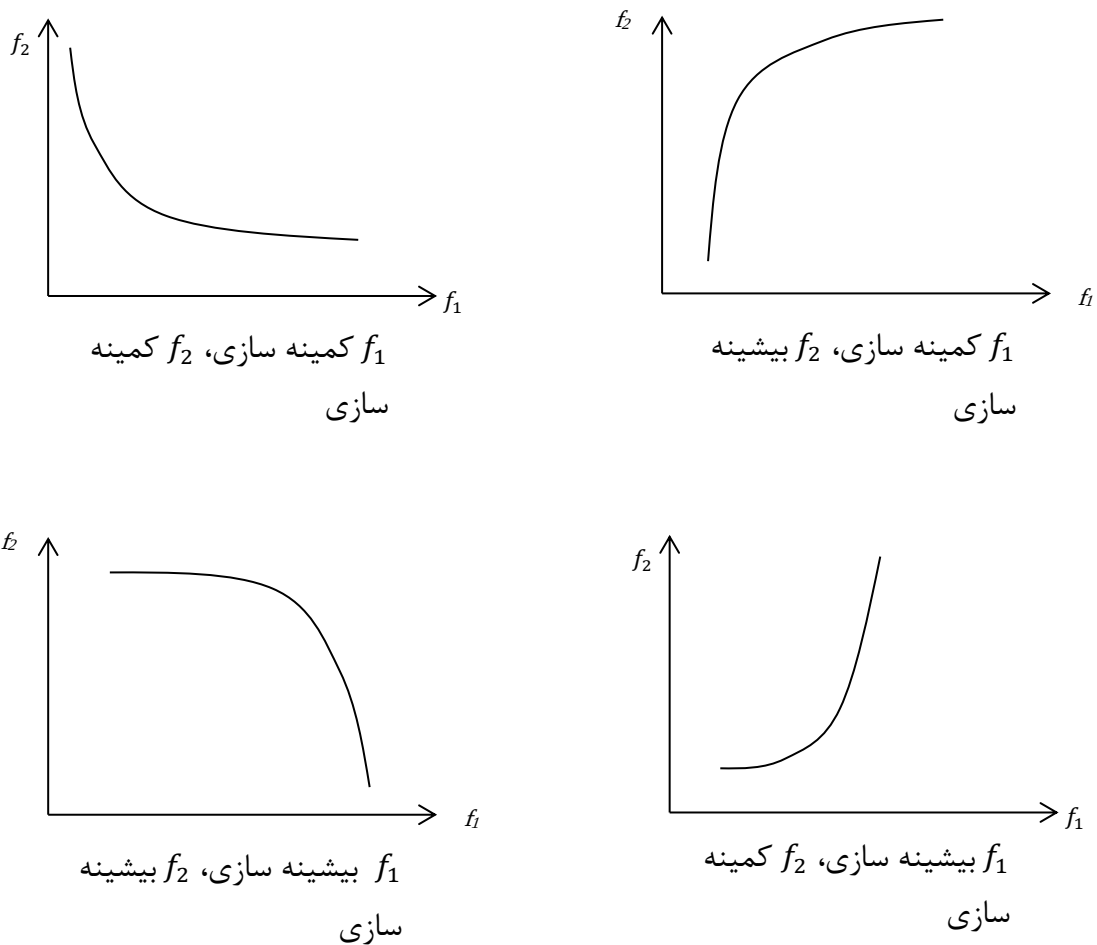
³ Pareto

به عبارت دیگر این تعریف بیان میکند که x^* بهینه شدنی است اگر هیچ بردار شدنی وجود نداشته باشد که:

- مقادیر تابع هدف آن از مقادیر تابع هدف x^* بدتر نباشد.

- بردار بهینه پاراتو برداری است که با بهبود یکی از معیارها، معیار دیگر بدتر خواهد شد.

این مفهوم عموماً مشمول مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها می‌شود که جواب بهینه پارتو خوانده می‌شود. بردارهای متناظر با این جواب بهینه نامغلوب^۱ نامیده می‌شود. در صورتیکه راه‌حل‌های موجود در جواب بهینه در فضای اهداف ترسیم شوند یک منحنی را نمایش می‌دهند که به آن جبهه پارتو^۲ گفته می‌شود [۸۶]. شکل ۳-۳ انواع مرز پارتو در مسائل بهینه‌سازی مختلف را در فضای دو بعدی نمایش می‌دهد.



¹ Non-dominated

² Pareto front

۲-۳-۳ روش محدودیت اپسیلون تعمیم یافته

روش محدودیت جزئی^۱ که در زمره روش‌های کلاسیک حل مسائل چند هدفه می‌باشد، اولین بار توسط هایمس و همکاران (۱۹۷۱) ارائه گردید. رویکرد این الگوریتم به صورتی است که مساله‌ی چند هدفه را تبدیل به مساله‌ی تک هدفه می‌کند به صورتی که یکی از توابع موجود انتخاب و حداقل سازی شده و سایر توابع هدف به محدودیت‌هایی با حد بالا تبدیل می‌شود. مدل کلی این روش به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Min } f_1(x) + \rho(f_2(x))$$

s.t

$$g(x) \leq 0 \quad (3-64)$$

$$f_2(x) \leq \varepsilon_1$$

$$x \in X$$

در رابطه (۳-۶۵)، $g(x)$ شامل همه محدودیت‌های اصلی مساله و ε_1 حد بالای به دست آمده برای تابع هدف دوم است.

جواب‌های حاصله از روش اپسیلون محدودیت کلاسیک معمولاً کارا نیستند. برای رفع این نقیصه روش AUGMECON توسط ماوروتاس در سال ۲۰۰۹ مطرح گردید که کارا بودن جواب‌های حاصله را تضمین می‌کند [۸۷]. این روش محدودیت‌های غیر تساوی مربوط به اهدافی که به میزان محدودیت به مدل اضافه شده‌اند، توسط متغیرهای کمبود یا مازاد به محدودیت‌های تساوی تبدیل شده و با بهبود تابع هدف یا اضافه نمودن جمع وزنی این متغیرها مساله را تعریف می‌کند. با توجه به اطلاعاتی که از متغیرهای کمبود یا مازاد به دست آمده است، ماوروتاس و فلوریوس [۸۸] در سال ۲۰۱۳ روش AUGMECON2 را ارائه کردند که در این روش جهت کنترل حلقه میانی، متغیری به نام ضریب عبور تعریف کرده‌اند که باعث می‌گردد تعداد زیر مساله‌هایی که توسط این روش بایستی حل گردد از روش AUGMECON کمتر شود. هدف این روش ارائه و ارزیابی بهبودی بر روش محدودیت اپسیلون است که برای برخورد با مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح چند هدفه مناسب است. این روش با تنظیم پارامترهای خود توانایی تولید مجموعه پارتو را به صورت دقیق دارد. در روش محدودیت اپسیلون توسعه یافته تبدیل محدودیت‌ها به تساوی با ترکیب متغیرهای کمبود و یا اضافی بر جواب‌های ناکارآمد غلبه می‌کند و همزمان این متغیرها به عنوان عبارت دوم در تابع هدف بکار گرفته می‌شود و مدل را مجبور به تولید فقط جواب‌های موثر می‌کند.

¹ ε -Constraint

۳-۳-۳ بهینه‌سازی چند هدفه تکاملی (EMO)^۱

بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی، یکی از حوزه‌های نوظهوری است که می‌کوشد تا با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مبادرت به حل مسائل چند هدفه نماید. قابلیت الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسائل بهینه سازی چند هدفه، نخستین بار توسط روزنبرگ^۲ مطرح شد. اما اولین پیاده‌سازی رسمی از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه تکاملی توسط شفر^۳ و در اواسط دهه‌ی ۱۹۸۰ صورت گرفت. از آن زمان تاکنون تعداد زیادی از الگوریتم‌های چندهدفه تکاملی مطرح شده است که به طور کلی می‌توان آنها را به سه دسته تقسیم کرد:

➤ روش ادغام (روش وزن دهی)

➤ رهیافت‌های مبتنی بر جمعیت

➤ رهیافت‌های مبتنی بر پارتو

۳-۳-۳-۱ روش ادغام (روش وزن دهی)

در این روش مسائل چند هدفه با استفاده از عملگرهای جمع، ضرب و ترکیبی از آنها به مساله‌ی تک هدفه تبدیل می‌شود. یک مثال از این روش، مجموع خطی وزن‌ها است. معادله‌ی (۳-۶۴) بیان ریاضی این روش را نشان می‌دهد.

$$\min \sum_{i=1}^k w_i \times f_i(x) \quad (3-65)$$

در معادله‌ی (۳-۶۵)، $w_i \geq 0$ ، ضرایب وزن می‌باشند که اهمیت نسبی توابع هدف مساله را نشان می‌دهند. معمولاً فرض می‌شود که مجموع اوزان برابر یک است. توابع مجموع می‌توانند خطی یا غیرخطی باشند. عمده ضعف این گونه روش‌ها این است که توابع مجموع خطی معمولاً قادر به تولید بخش غیر محدب جبهه پارتو نیستند. این در حالی است که مجموعه‌های غیرخطی دارای چنین نقیصه‌هایی نیستند. درواقع این کاستی سبب شده تا روش‌های مجموع نسبت به سایر روش‌ها، کمتر از سوی پژوهشگران این حوزه مورد توجه قرار بگیرند.

۳-۳-۳-۲ رهیافت‌های مبتنی بر جمعیت

در این تکنیک‌ها یک روش تکاملی برای تنوع بخشی به جستجو به کار گرفته می‌شود اما ایده‌ی غلبه پارتو مستقیماً در فرآیند انتخاب بکار گرفته نمی‌شود. یک مثال متعارف از این روش‌ها، الگوریتم ژنتیک با ارزیابی برداری می‌باشد که توسط شفر پیشنهاد شده است. عمده‌ترین مشکل الگوریتم VEGA^۴ آن است که ساختار

¹ Evolutionary multi-objective optimization

² Rosenberg

³ Schaffer

⁴ Vector Evaluated Genetic Algorithm

انتخابش در تعارض با ایده غلبه پارتو است. برای مثال اگر یک فرد دارای مقادیر خوبی در تمامی توابع هدف باشد، اما در هیچ یک از آنها بهترین نباشد، از جامعه حذف خواهد شد. این در حالی است که این جواب به دلیل آنکه بهینه پارتو می باشد، باید حفظ شود.

۳-۳-۳ رهیافت های مبتنی بر پارتو

گلدبرگ با توجه به کاستی های VEGA، الگوریتم ژنتیک پارتو را برای فائق آمدن به مسائل بهینه سازی چند هدفه پیشنهاد داد. رویه او متشکل از یک سازوکار انتخاب است که مبتنی بر ایده ی بهینگی پارتو می باشد. به عبارت دیگر در این روش، راه حل های موجود در یک جمعیت با توجه به جبهه پارتویی که بر آن واقع شده است رتبه بندی می شوند.

۳-۴ رویکرد حل مساله در ابعاد کوچک

در این پژوهش با توجه به دو هدفه بودن مدل های FFS-I و FFS-II، برای حل دقیق در ابعاد کوچک از الگوریتم محدودیت جزئی یا اپسیلون محدودیت استفاده شده است. همچنین برای حل مدل تک هدفه FFS-III، حل کننده CPLEX در نرم افزار گمز بکار رفته است.

۳-۵ روش های فراابتکاری برای حل مساله در ابعاد متوسط و بزرگ

حل مساله برنامه ریزی عدد صحیح مختلط در اندازه های کوچک توسط نرم افزارهای CPLEX و Gurobi به آسانی صورت می پذیرد. اما هر چه ابعاد مساله بزرگتر می شود زمان حل افزایش می یابد و حل مسائل بسیار بزرگ با این نرم افزارها به دلیل محدودیت های حافظه دچار مشکل می شود. لذا در این پژوهش برای حل مدل های FFS-I و FFS-II در ابعاد متوسط و بزرگ، الگوریتم ژنتیک چند هدفه مبتنی بر مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) و الگوریتم تکاملی مبتنی بر قدرت پارتو (SPEA-II) پیشنهاد شده است. همچنین برای حل مدل FFS-III، الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم تبرید شبیه سازی شده (SA) ارائه می شود.

۳-۵-۱ نحوه کدینگ مساله برای حل مدل

به منظور کدنویسی مساله برای حل با الگوریتم های فراابتکاری، شیوه نمایش راه حل به صورت ذیل شرح داده می شود.

۳-۵-۱-۱ شیوه نمایش یک راه حل

نحوه نمایش یک پاسخ می تواند در کیفیت پاسخ های بدست آمده توسط الگوریتم ها تاثیر بسزایی داشته باشد. در این پژوهش، باید چندین کار در محیط جریان کارگاهی انعطاف پذیر با ماشین های موازی نامرتبط

در مرحله اول مورد زمانبندی و پردازش قرار گیرند به طوری که مراحل پردازش هر کار وابسته به سطح تکنولوژی ماشین‌های پردازشگر در مرحله یک می‌باشد. لذا با توجه به این جنبه‌ها، ساختار شماتیک مناسب نمایش جواب شامل l رشته است که در رشته اول یک جایگشت از کارهای j و $k-1$ ژن جهت جداکننده کارهای هر ماشین در نظر گرفته می‌شود. کارها در رشته‌های دوم تا l نیز براساس ماشین تخصیص یافته به هر کار مشخص شده و در یک جایگشت قرار می‌گیرند. شکل ۴-۳ یک مثال از این ساختار را نشان می‌دهد.

تخصیص کارها و توالی ماشین‌ها در مرحله ۱	3	4	1	8	2	6	9	7	5
توالی ماشین‌ها در مرحله ۲	5	3	7	4	1	8	8	8	8
توالی ماشین‌ها در مرحله ۳	2	7	6	5	8	8	8	8	8
توالی ماشین‌ها در مرحله ۴	3	4	1	5	2	6	8	8	8
توالی ماشین‌ها در مرحله ۵	3	4	1	5	2	6	8	8	8

شکل ۴-۳. کروموزوم ایجاد شده برای نمایش جواب

هر رشته‌ی کروموزوم نشان دهنده یک مرحله‌ی کاری است و از آنجایی که در مسالهی مورد بررسی تعداد ۵ ایستگاه کاری وجود دارد تعداد ۵ رشته برای کروموزوم در نظر گرفته شده است. برای مثال شکل ۵-۳ رشته اول کروموزوم را با ۷ کار و ۳ ماشین نشان می‌دهد. کارهای ۳، ۴ و ۱ به ترتیب به ماشین یک، کارهای ۲ و ۶ به ماشین دو و کارهای ۷ و ۵ به ماشین ۳ تخصیص یافته است.

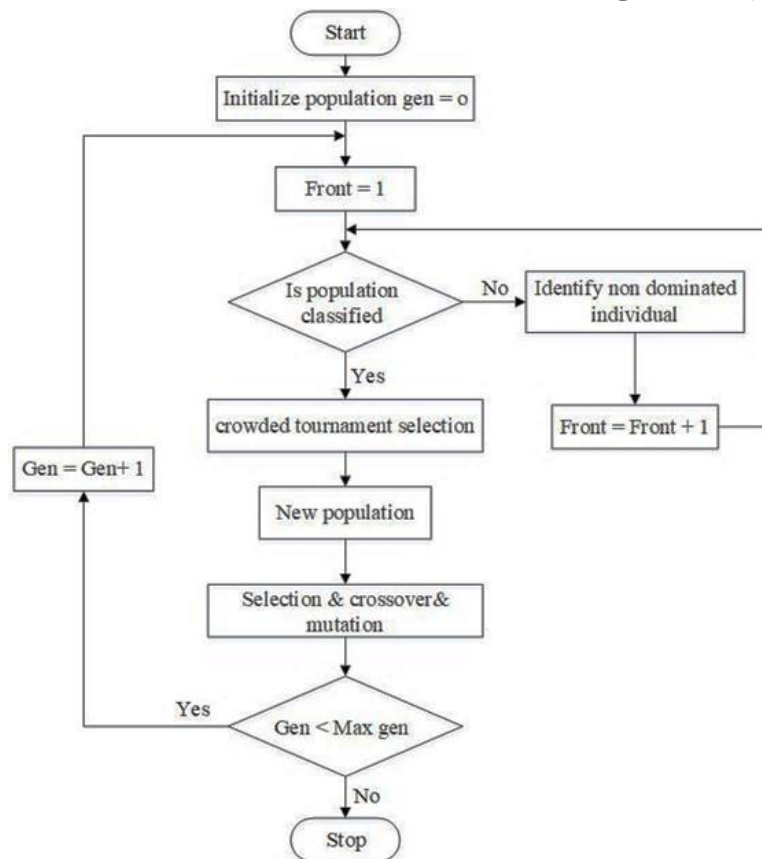
توالی کارهای ماشین ۱			توالی کارهای ماشین ۲			توالی کارهای ماشین ۳		
3	4	1	8	2	6	9	7	5

شکل ۵-۳. رشته اول کروموزوم راه حل

۲-۵-۳ الگوریتم NSGA-II

یک روش متداول برای حل مسائل با چند تابع هدف، الگوریتم NSGA است که اساس آن بر مبنای الگوریتم ژنتیک می‌باشد. این الگوریتم روشی کارآمد برای حل مسائل چند هدفه ارائه می‌دهد، اما از دو جهت دارای ضعف است: اول پیچیدگی محاسباتی و دوم انتخاب ذره‌های غالب. از این رو روش اصلاح شده‌ای از این الگوریتم توسط دب و همکاران [۲۶] تحت عنوان NSGA-II توسعه داده شد. نحوه عملکرد الگوریتم به این صورت است که در آغاز یک جمعیت اولیه P تصادفی تولید می‌شود. عملگرهای ترکیب و جهش بر روی جمعیت P جهت تولید جمعیتی Q انجام می‌شود. اگر شرایط خاتمه محقق شود الگوریتم متوقف شده و P_t برگردانده می‌شود. الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب سریع بر روی اجتماع جمعیت والد و فرزندان

فلوچارت این الگوریتم را نشان می‌دهد [۹۰]. $R_t = P_t \cup Q_t$ به منظور شناسایی جبهه‌های نامغلوب $F_1, \dots, F_k$ به کار گرفته می‌شود. شکل ۳-۶



شکل ۳-۶. فلوچارت الگوریتم حل NSGA-II

۳-۵-۲-۱ ایجاد جمعیت اولیه

اکثر الگوریتم‌های تکاملی از یک یا چند روش تصادفی برای ایجاد اولین مجموعه راه‌حل‌ها به عنوان جمعیت اولیه استفاده می‌کنند. با توجه به اهمیت قابل توجه راه‌حل‌های اولیه و تاثیر آنها بر راه‌حل نهایی بهتر است در ایجاد آنها از برخی قوانین مناسب پیروی شود. از این رو در این پژوهش برای ایجاد جمعیت اولیه مناسب و شدنی از روشی که در ادامه توضیح داده می‌شود استفاده شده است. در روش پیشنهادی ابتدا کارها در مرحله‌ی یک به طور تصادفی به یکی از ماشین‌های موازی تخصیص داده می‌شود. سپس با توجه به قانون وابستگی مراحل پردازش به ماشین تخصیص داده شده در ایستگاه اول، کارها به مراحل بعد وارد می‌شوند. نوع توالی آنها در مراحل ۲ تا L نیز براساس زمان تکمیل کارها و قانون اولین خروجی اولین ورودی، می‌باشد. گام‌های ایجاد جمعیت اولیه به صورت زیر می‌باشد:

گام اول: تعداد n کار را در نظر بگیرید.

گام دوم: در مرحله ۱ با توجه به تعداد ماشین‌ها، کارها را به صورت تصادفی به هر ماشین اختصاص دهید.

گام سوم: لیست کارهای هر ماشین را استخراج کرده و زمان تکمیل هر کار را محاسبه کنید.

گام چهارم: کارها را با توجه به قانون وابستگی مراحل به ماشین و قانون جایگشتی به مراحل ۲ تا L اختصاص دهید.

۳-۵-۲-۲ محاسبه مقدار برآزش

در این الگوریتم، مقدار برآزش براساس رتبه‌بندی تسلط و مقدار فاصله ازدحامی^۱ مشخص می‌شود. ایده اصلی در مورد روش مرتب‌سازی نامغلوب، انتخاب نقاط بهتر با توجه به رتبه‌بندی نقاط براساس میزان غلبه است. بنابر این در این مطالعه ابتدا سطح نامغلوب برای هر راه حل منحصر به فرد مشخص می‌شود. سپس فاصله‌ی ازدحامی برای شناسایی راه‌حل‌های بهتر محاسبه می‌شود. دبی و همکاران [۸۹] روش مرتب‌سازی نامغلوب را برای رتبه‌بندی راه‌حل‌ها در سال ۲۰۰۰ ارائه دادند.

۳-۵-۲-۳ انتخاب اعضا برای نسل جدید

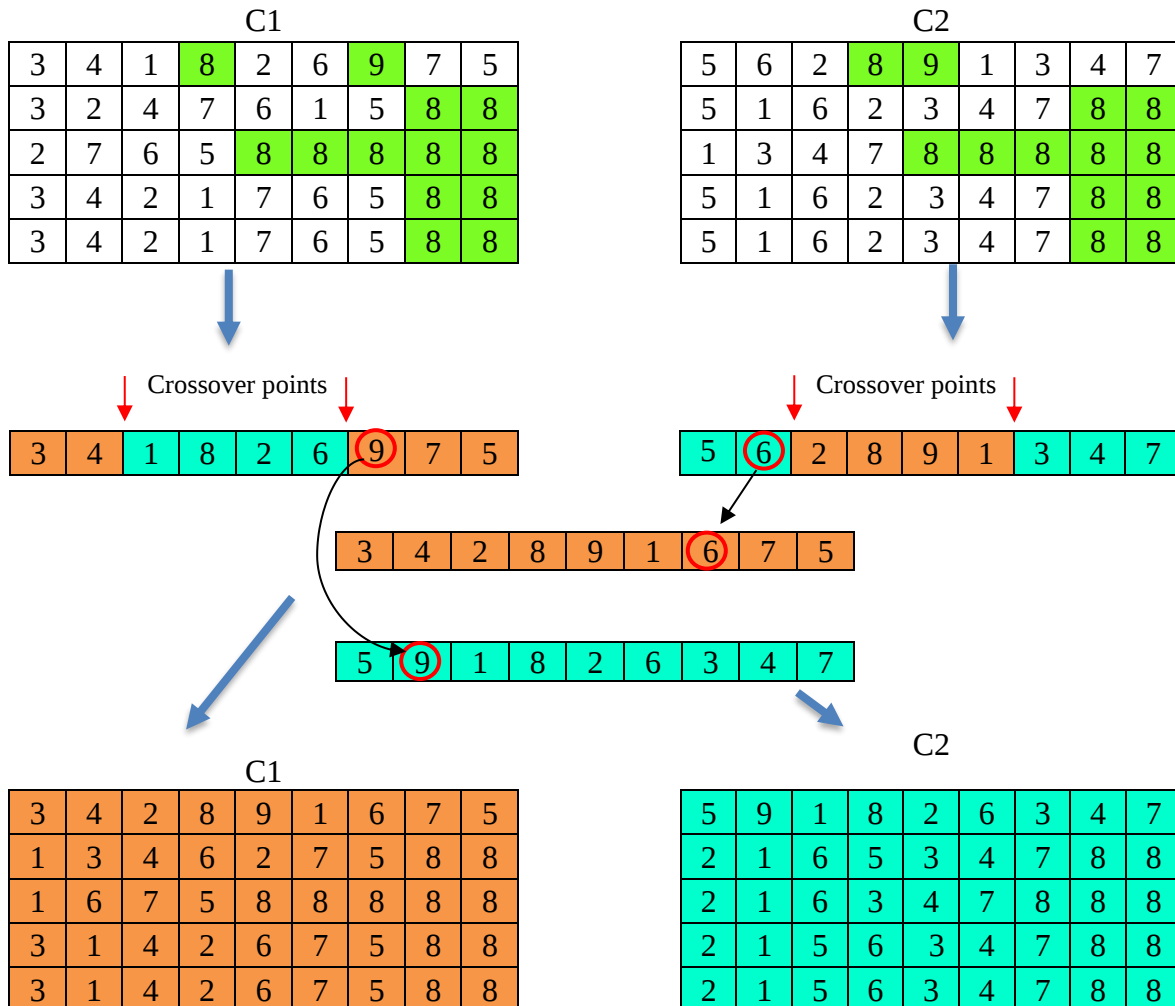
پس از جبهه‌بندی اعضا بر مبنای میزان مغلوب کردن سایر اعضا، به منظور ایجاد نسل بعدی، تعدادی از آنها باید انتخاب شوند. در این پژوهش برای تعیین اعضا از روش دودویی استفاده شده است. بدین منظور ابتدا دو عضو به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و بین آنها مقایسه انجام می‌گیرد و هرکدام که بهتر بود در مخزن جوابها اضافه می‌شود. ملاک بهتر بودن جوابها به این صورت است که ابتدا جواب‌هایی که دارای رتبه پایین‌تر یا جبهه‌ی پایین‌تر هستند انتخاب می‌شوند، زیرا اعضای این جبهه‌ها می‌توانند عضوهای بیشتری را مغلوب کنند. سپس در بعضی موارد که اعضا دو عضو رتبه یکسان دارند، از معیار فاصله ازدحامی استفاده می‌شود. این معیار باعث می‌شود پاسخ‌هایی که نظم جبهه‌ی پاراتو را بیشتر رعایت می‌کنند، حفظ شوند.

۳-۵-۲-۴ عملگر ترکیب

مهمترین عملگر در این الگوریتم، عملگر ترکیب است. ترکیب فرآیندی است که در آن نسل قدیمی کروموزوم‌ها با یکدیگر مخلوط و ترکیب می‌شوند تا نسل تازه‌ای بوجود بیاید. جفت‌های والد انتخاب شده ژن‌هایشان را با هم مبادله می‌کنند و اعضای جدید بوجود می‌آورند. ترکیب در الگوریتم‌های فراابتکاری باعث از بین رفتن پراکندگی یا تنوع ژنتیکی جمعیت می‌شود زیرا اجازه می‌دهد ژن‌های خوب یکدیگر را بیابند. اپراتور ترکیب اعمال شده بر روی کروموزوم‌ها در این پژوهش، ترکیب دو نقطه‌ای (2PX) می‌باشد که در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. روش اجرا در مساله حاضر به این صورت است که ابتدا دو والد از جمعیت انتخاب می‌شود. رشته اول از هر کدام از والدها جدا شده و سپس تمامی ژن‌های قبل از نقطه تقاطع اول و ژن‌های بعد از نقطه تقاطع دوم از والد اول و تمامی ژن‌های میان نقاط تقاطع اول و دوم از والد دوم به فرزند اول کپی شده و بعد از حذف ژن‌های تکراری و شدنی کردن کروموزوم، رشته اول فرزند

¹ Crowding distance

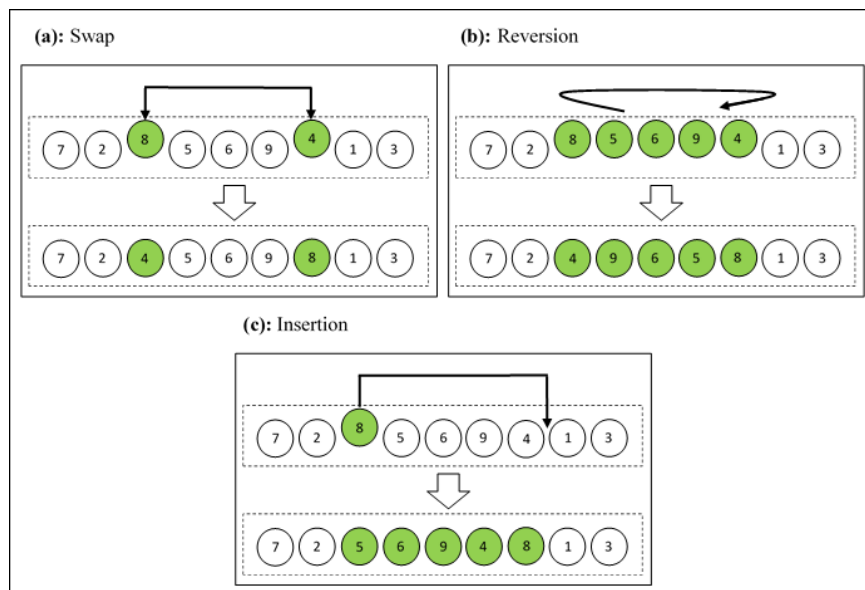
اول ایجاد می‌شود. رشته اول فرزند دوم نیز به صورت مشابه تولید می‌شود. در نهایت براساس نوع تخصیص و توالی ژن‌ها در رشته اول و براساس قانون جایگشتی، رشته‌های دوم تا L ام کروموزوم فرزندان تولید می‌شود.



شکل ۷-۳. عملگر ترکیب تک نقطه‌ای پیشنهاد شده.

۵-۲-۳-۵ عملگر جهش

جهش نیز عملگر دیگریست که جواب‌های ممکن دیگری را ایجاد می‌کند. در الگوریتم‌های ژنتیک بعد از اینکه یک عضو در جمعیت جدید بوجود آمد هر ژن آن با احتمال جهش، جهش می‌یابد. برای انجام عملگر جهش در این مساله، از سه اپراتور Swap، Reversion و Insertion به صورت تصادفی استفاده شده است. شکل ۸-۳ عملکرد این سه اپراتور را نشان می‌دهد. همانند عملگر ترکیب در اجرای این عملگر نیز ابتدا اپراتورهای انتخاب شده بر روی رشته اول والد اجرا شده و رشته اول فرزند ایجاد می‌شود. سپس براساس نوع تخصیص و قانون جایگشتی، رشته‌های دیگر فرزند تولید می‌شود.



شکل ۸-۳. اپراتورهای استفاده شده جهت اجرای عملگر جهش

۳-۵-۳ الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پاراتو ۲ (SPEA-II)

الگوریتم‌های SPEA^۱ و SPEA-II از جمله الگوریتم‌های کارایی هستند که از یک آرشیو خارجی^۲ برای ذخیره پاسخ‌های نامغلوبی که در طی جستجوی الگوریتم یافت می‌شوند، استفاده می‌کنند. در الگوریتم SPEA ضعف‌هایی در محاسبه مقادیر قوت و برازندگی وجود داشت. همچنین معیار ثانویه‌ای برای مقایسه پاسخ‌های نامغلوب در آن گنجانده نشده بود. از این رو زیتزلر و همکاران [۲۷]، نسخه ثانویه این الگوریتم را ارائه نمودند. چارچوب کاری این الگوریتم در قالب شبه کد مطابق شکل ۹-۳ نشان داده شده است.

N_E : بیشترین اندازه آرشیو پاسخ‌های نامغلوب E N_P : اندازه جمعیت K : پارامتر محاسبه تراکم $(K = \sqrt{N_E + N_P})$ σ_i^k : فاصله بین پاسخ i و k امین همسایگی نزدیک به آن	آغاز الگوریتم SPEA-II یک جمعیت از پاسخ‌های اولیه P_0 ایجاد کنید و $E_0 = \emptyset$ قرار دهید. برازندگی خام پاسخ i را محاسبه کنید. $R(i) = \sum_{j \in P_t \cup E_t \& j > i} S(j)$ مقدار قوت پاسخ $S(i)$ را بدست آورید. $s(i) = \{j \mid j \in P_t \cup E_t \& i > j\} $ $D(i) = \frac{1}{\sigma_{i+2}^k}$ تراکم پاسخ i را محاسبه کنید. مقدار برازندگی را از جمع برازندگی خام و تراکم پاسخ i بدست آورید. $F(i) = R(i) + D(i)$ تمام پاسخ‌های نامغلوب موجود در مجموعه $P_t \cup E_t$ را به E_{t+1} کپی کنید. دو حالت رخ می‌دهد.
--	--

¹ Strength pareto evolutionary algorithm

² External Archive

حالت اول: اگر $|E_{t+1}| > N_E$ ، به تعداد $|E_{t+1}| - N_E$ پاسخ را با روش تکراری حذف پاسخ با معیار σ^k ، حذف کنید

حالت دوم: اگر $|E_{t+1}| \leq N_E$ ، به تعداد $N_E - |E_{t+1}|$ پاسخ مغلوب شده را براساس مقادیر برازندگی آن ها از مجموعه $E_t \cup P_t$ به مجموعه E_{t+1} انتقال دهید

اگر شرایط خاتمه فراهم باشد، الگوریتم متوقف شده و پاسخ E_{t+1} را بر می گرداند
با استفاده از روش رقابت دوتایی والدین را از مجموعه E_{t+1} انتخاب کنید.

اپراتور ترکیب و جهش را روی والدین به کار برده و فرزندان را به مجموعه P_{t+1} کپی کرده و $t = t + 1$ قرار دهید.

شکل ۹-۳. شبه کد الگوریتم SPEA-II

در این الگوریتم از عملگر ترکیب برای پیدا کردن ترکیب ژن های برتر و از عملگر جهش برای فرار از جواب های بهینه محلی استفاده می شود. در این پژوهش برای اجرای عملگرهای ترکیب و جهش در الگوریتم SPEA-II از همان روش توضیح داده شده در قسمت الگوریتم NSGA-II استفاده می شود.

۴-۵-۳ الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک (GA) یک رویکرد فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است که توسط هلند (۱۹۷۵) براساس رویکرد تکاملی معرفی شد. این الگوریتم کار خود را با یک جمعیت اولیه به عنوان یک راه حل شدنی ابتدایی، شروع می کند. پس از آن دو عملگر از جمله ترکیب و جهش اقدام به ایجاد فرزندان به عنوان راه حل جدید می کنند. عملگر ترکیب برای ترکیب ویژگی های خوب والدین به منظور تولید فرزندان مناسب تر اعمال می شود. عملگر جهش نیز به الگوریتم کمک می کند تا تنوع درون جمعیت را حفظ کند و احتمال گیر افتادن الگوریتم در بخش های بهینه محلی را کم کند. از مجموع کل راه حل های قدیمی و جدید جمعیتی با اندازه مشخص به عنوان نسل جدید انتخاب می شود. این روند تا وقتی که ملاک توقف برآورده شود، تکرار می شود [۱۷].

۴-۵-۳-۱ ایجاد جمعیت اولیه

الگوریتم ژنتیک یک روش ابتکاری مبتنی بر جمعیت است، بنابراین برای شروع به یک جمعیت اولیه شدنی نیازمند است. این جمعیت اولیه را می توان یا به وسیله الگوریتم های دیگر و یا به روش تصادفی ایجاد کرد. در این پژوهش از روش تصادفی برای ایجاد جمعیت اولیه استفاده شده است.
پس از تولید جمعیت اولیه، برای هر راه حل (کروموزوم) مقدار تابع هدف (C_{max}) محاسبه می شود. سپس راه حل ها براساس مقدار برازش^۱ رتبه بندی می شوند.

¹ Fitness value

۳-۵-۴-۲ روش انتخاب والدین

پس از رتبه‌بندی راه‌حل‌ها نوبت به انتخاب آنها می‌رسد. الگوی انتخاب والد مشخص می‌کند که کروموزم‌ها چگونه برای عمل ترکیب از جمعیت فعلی انتخاب شوند. روش‌های گوناگونی برای انتخاب وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به قانون چرخ رولت^۱، نمونه برداری فراگیر شانس^۲، انتخاب محلی^۳، انتخاب برشی^۴ و انتخاب مسابقه‌ای^۴ اشاره کرد. در این پژوهش پس از محاسبه مقدار برازش هر راه‌حل، از قانون چرخ رولت برای انتخاب والد‌ها استفاده شده است.

در این الگوریتم نیز برای بدست آوردن ترکیب مناسب زن‌ها و همچنین قرار نگرفتن الگوریتم در دام جواب بهینه محلی از عملگرهای ترکیب و جهش استفاده می‌شود. در این الگوریتم برای انجام این دو عملگر از همان روش اشاره شده در الگوریتم NSGA-II استفاده شده است.

۳-۵-۴-۳ انتخاب نسل جدید P_{t+1}

نسل جدید از والدین و فرزندان انتخاب می‌شود. اما فقط براساس مقدار تابع برازش نیست. در این پژوهش نسل جدید از جاگزینی ۵۰٪ جمعیت جدید با جمعیت قدیم ساخته می‌شود. بر این اساس هیچ تضمینی وجود ندارد که بهترین راه‌حل‌های ایجاد شده همیشه از راه‌حل‌های جمعیت فعلی بهتر باشند. این روش باعث می‌شود الگوریتم به سمت جستجوی مناطق مختلف حرکت کند و از شکل‌گیری همگرایی زودرس جلوگیری می‌کند.

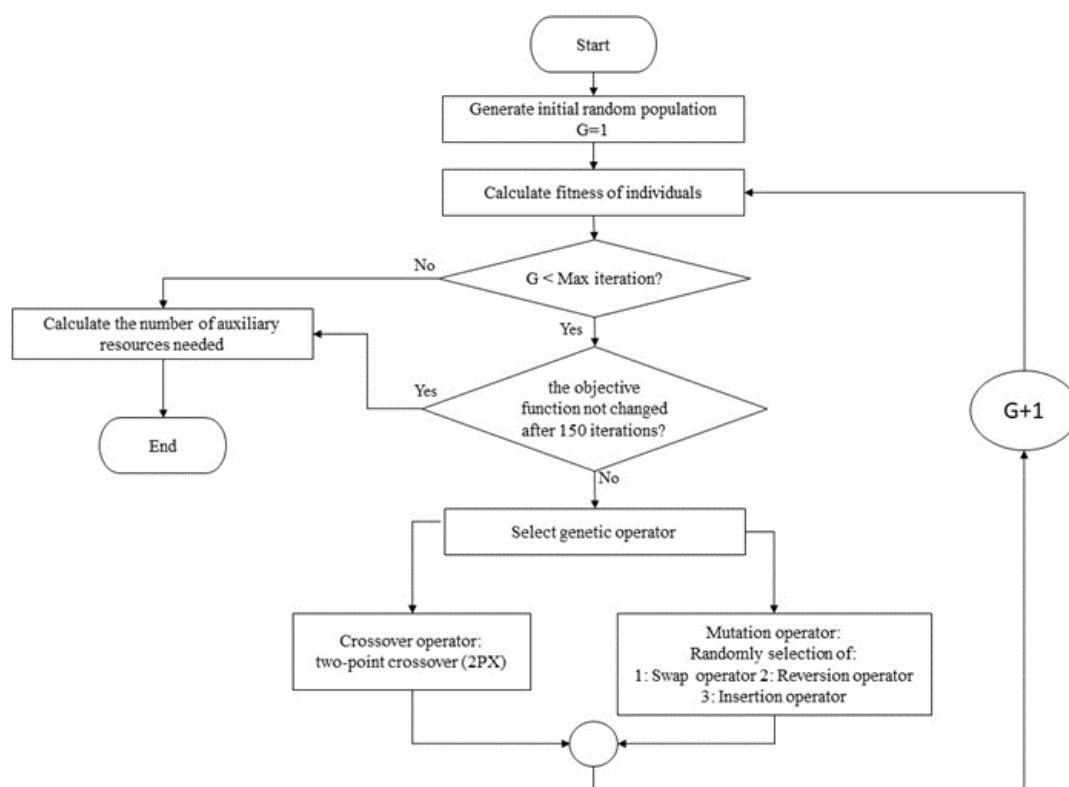
شکل ۱۰-۳، فلوچارت الگوریتم ژنتیک پیشنهادی با قابلیت محاسبه مقدار منابع کمکی مورد نیاز و دو شرط توقف شامل ماکزیمم تکرار و ۱۵۰ تکرار بدون بهبود در تابع هدف را نشان می‌دهد.

¹ Roulette-wheel rule

² Stochastic universal sampling

³ Truncation selection

⁴ Tournament selection



شکل ۱۰-۳. فلوچارت الگوریتم ژنتیک (GA)

۵-۳ الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (SA)

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA)^۱ در اوایل دهه ۱۹۸۰ به وسیله کرکپاتریک و همکارانش [۹۲] ارائه شد. طی فرآیند شبیه‌سازی تبرید، یک ماده تا دمایی بیشتر از دمای ذوب خود گرم می‌شود و سپس به تدریج دمای آن پایین آورده می‌شود. نحوه‌ی کاهش دما بسیار کند و در حدی است که ماده در تعادل ترمودینامیکی است. به عبارت دیگر در هر دمای ایجاد شده اتم‌ها تنها به اندازه‌ای می‌توانند جا به جا شوند که بیشترین پایداری را ایجاد کنند، یعنی اگر ماده با کندی بیشتری سرد شود اتم‌ها قادر به آزادسازی انرژی بیشتر و قرارگیری در جهت بیشترین پایداری را خواهند داشت. در هر صورت سرد کردن سریع باعث می‌شود که ذرات فرصت پایین آمدن انرژی و در کنار هم قرار گرفتن‌شان کافی نباشد، لذا خیلی شکننده می‌شوند. با این حال سرد کردن ملایم ذرات، موجب می‌شود که ذرات فرصت پیدا کنند تا سطح انرژی خود را به حداقل برسانند و در کنار هم آرایش مناسبی داشته باشند. این فرآیند آهسته سرد کردن برای رسیدن به خواص عالی را «آنیل کردن» گویند. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید یکی از اولین روش‌های فراابتکاری جستجوی جواب‌های همسایگی می‌باشد که دارای استراتژی صریحی در اجتناب از قرارگیری در دام جواب‌های بهینه موضعی است [۹۳].

¹ Simulated Annealing

۱-۵-۳ مفاهیم پایه ای الگوریتم شبیه سازی تبرید

پارامترها و مفاهیم کلیدی به کار رفته در ساختار الگوریتم شبیه سازی تبرید به صورت زیر می باشد:

جواب همسایگی: به مجموعه ای از جواب های شدنی اطلاق می گردد که با اعمال عملیات تصادفی بر روی جواب جاری و در یک همسایگی^۱ آن تولید می شود. عملیات به کار رفته در تولید همسایگی در اصطلاح انتقال^۲ نامیده می شود [۹۳].

دما: دمای اولیه از نقطه نظر تئوری باید به اندازه ای بالا باشد که تمامی انتقالات جواب ها پذیرفته شوند. با این وجود، به دلیل این که دمای بالا منجر به صرف زمان زیادی در تکرارهای الگوریتم می شود، دما باید به طریق مناسبی کنترل و تنظیم شود. بدین ترتیب دمای مناسب با در نظر گرفتن میزان انتقالات پذیرفته شده در طول اجرای الگوریتم و دستیابی به مطلوب ترین جواب بهینه تعیین شود.

کاهش دما: کیفیت جواب های بدست آمده در همسایگی جواب جاری به نرخ کاهش دما بستگی دارد، به طوری که هر چقدر دما آهسته تر کاهش یابد امکان جستجوی بیشتر فضای جواب وجود خواهد داشت. عموماً برای کاهش دما از رابطه ی (۳-۶۶) استفاده می شود:

$$T_k = \alpha T_{k-1} \quad K = 1, 2, \dots; \quad 0 < \alpha < 1 \quad (3-66)$$

در این رابطه، T_k دمای تکرار k ام و α نرخ کاهش دما در طول اجرای الگوریتم می باشد. و تجربه نیز نشان داده که مقادیر $0.8 \leq \alpha \leq 0.9$ برای نرخ کاهش دما مناسب است.

احتمال پذیرش جواب ها: براساس قواعد ترمودینامیک، احتمال افزایش انرژی سیستم به میزان ΔE در دمای T برابر است با:

$$P(\Delta E) = e^{\frac{-\Delta E}{KT}} \quad (3-67)$$

که در آن k ثابت بولتزمن^۳ است. در الگوریتم شبیه سازی تبرید نیز احتمال پذیرش جواب های غیر بهبود دهنده در هر دما از رابطه فوق محاسبه می شود.

تکرار در هر دما: به طور معمول تعداد تکرار در هر دما با اندازه همسایگی و یا فضای جواب مسئله مرتبط می باشد و ممکن است برای دماهای مختلف متفاوت باشد. یکی از روش های موجود این است که تعداد تکرار ثابتی در هر دما داشته باشیم. روش دیگر نیز می تواند این باشد که تعداد تکرارها به صورت پویا با پیشروی الگوریتم تغییر یابد.

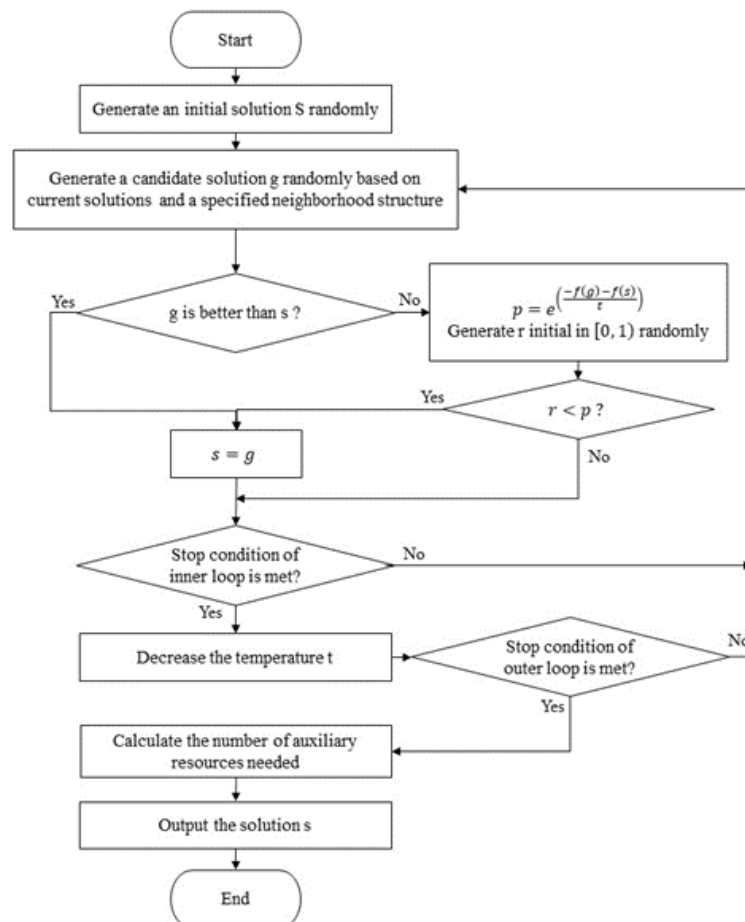
• **شرط توقف:** الگوریتم شبیه سازی تبرید با فراهم کردن شرط توقف، که از نظر تئوری رسیدن به دمای صفر درجه است، خاتمه می یابد. این الگوریتم زمان زیادی را در دماهای پایین صرف می کند و به همین

¹ Neighborhood

² Move

³ Boltzmann

خاطر در عمل حداکثر تعداد انتقال دما و یا عدم بهبود جواب بهینه در طول تعداد مشخصی انتقالات دما به عنوان شرط توقف الگوریتم منظور می‌شود. فلوجارت الگوریتم SA پیشنهادی که علاوه بر پیدا کردن راه حل مناسب، مقدار منابع کمکی مورد نیاز را نیز محاسبه می‌کند در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۱. فلوجارت الگوریتم SA

۳-۵-۶ تنظیم پارامترها با استفاده از روش تاگوچی

تنظیم پارامتر در الگوریتم‌های فراابتکاری به معنای پیدا کردن مقادیر مناسبی برای پارامترهای آن الگوریتم است. این مساله به این دلیل بسیار حائز اهمیت است که عملکرد الگوریتم‌های تکاملی به مقادیر پارامتر وابسته است و این وابستگی از مساله‌ای به مساله‌ی دیگر متفاوت است.

روش تاگوچی که توسط بایرن و تاگوچی [۹۴] ارائه شد، یکی از روش‌هایی است که بر روی حداقل کردن تغییر پذیری تاکید دارد. در طراحی آزمایش‌های تاگوچی هدف اصلی پیدا کردن ترکیبی از سطوح مختلف است به طوری که با ثابت نگه‌داشتن میزان متغیر پاسخ بر روی هدف، تغییر پذیری متغیر پاسخ حداقل گردد. بعد از اینکه مشخص شد کدام متغیر پاسخ تغییر پذیری بیشتری را ایجاد می‌کند، می‌توان ترکیبی

از سطوح را که تغییرپذیری کمتری ایجاد می‌کنند و همچنین نسبت به تغییر در عوامل غیر قابل کنترل حساسیت کمتری نشان می‌دهند را انتخاب کرد.

در روش تاگوچی برای حداقل کردن تغییرپذیری، شاخصی معرفی شده است به نام نسبت سیگنال به نویز^۱ (S/N) که نحوه محاسبه آن بسته به هدف طراحی آزمایش متفاوت است. به دلیل اینکه توابع هدف در این پژوهش از نوع مینیمم‌سازی است از رابطه (۳-۶۸) برای محاسبه این نسبت استفاده می‌شود. هرچه این نسبت کمتر باشد بهتر است.

$$-10 \times \log \left(\sum (Y^2/n) \right) \quad (3-68)$$

۳-۵-۶-۱ تنظیم پارامترهای الگوریتم NSGA-II و SPEA-II

با توجه به اینکه الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II قرار است برای مسائل دو هدفه استفاده شوند لذا جهت کالیبره کردن پارامترهای آنها از شاخصی تحت عنوان میانگین «فاصله از نقطه ایده‌آل^۲» (MID) استفاده می‌شود. رابطه (۳-۶۹) نحوه محاسبه این شاخص را نشان می‌دهد.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n} \quad (3-69)$$

$$\text{When } c_i = \sqrt{f_{i1}^2 + f_{i2}^2} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

برای تنظیم پارامترهای این دو الگوریتم یک مساله در ابعاد بزرگ با تعداد ۱۵۰ کار، ۱۰ ماشین پیشرفته، ۱۰ ماشین قدیمی و ۵ مرحله کاری طراحی گردید. پارامترهایی که قرار است در این الگوریتم تنظیم شوند شامل: ماکزیمم تعداد تکرار ($Max-it$)، اندازه جمعیت (N)، نرخ ترکیب (Pc) و نرخ جهش (Pm) و پارامترهای الگوریتم SPEA-II شامل: ماکزیمم تعداد تکرار ($Max-it$)، اندازه جمعیت (N)، نرخ ترکیب (Pc) و نرخ جهش (Pm) می‌باشد. با توجه به ادبیات موضوعی، سطوح در نظر گرفته شده برای این پارامترها به صورت جدول ۳-۱ است.

جدول ۳-۱. سطوح پارامترهای الگوریتم NSGA-II و SPEA-II

الگوریتم	پارامتر	سطوح فاکتورها		
		۱	۲	۳
NSGA-II	Max-it	۳۵۰	۵۰۰	۸۰۰
	Population size (N)	۴۰	۵۰	۶۰
	Crossover rates (Pc)	۰/۵	۰/۷	۰/۸
	Mutation rates (Pm)	۰/۱	۰/۲	۰/۳
SPEA-II	Maximum Number of Iterations ($Max - it$)	۳۵۰	۵۰۰	۸۰۰

^۱ Signal to noise ratio

^۲ Mean Ideal Distance

Population size (N)	۴۰	۵۰	۶۰
Crossover rates (P_c)	۰/۵	۰/۷	۰/۸
Mutation rates (P_m)	۰/۱	۰/۲	۰/۳

شکل ۱۲-۳ نتایج اجرای آزمایشات تاگوچی را نشان می دهد. بر این اساس برای الگوریتم NSGA-II پارامترها به صورت زیر تنظیم گردید:

✓ ماکزیمم تعداد تکرار (Max-it) = ۵۰۰

✓ اندازه جمعیت (N) = ۵۰

✓ نرخ ترکیب (P_c) = ۰/۷

✓ نرخ جهش (P_m) = ۰/۲

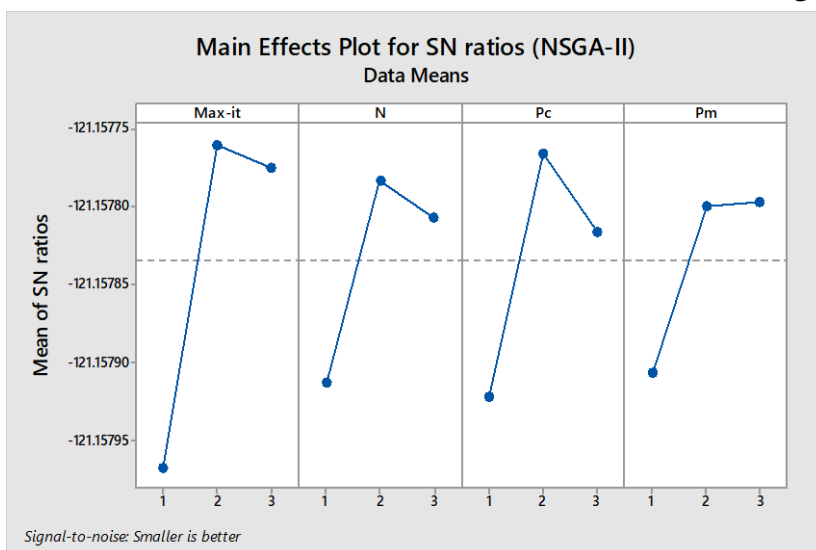
همچنین برای الگوریتم SPEA-II داریم :

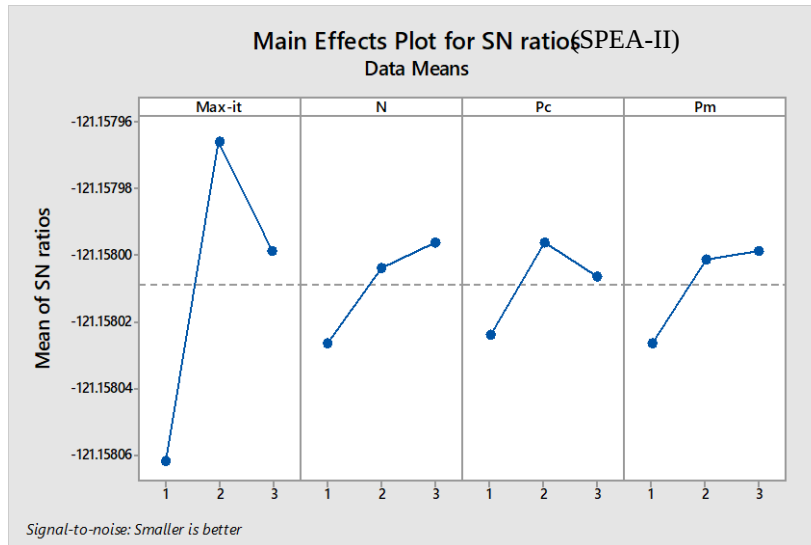
✓ ماکزیمم تعداد تکرار (Max-it) = ۵۰۰

✓ اندازه جمعیت (N) = ۶۰

✓ نرخ ترکیب (P_c) = ۰/۷

✓ نرخ جهش (P_m) = ۰/۳





شکل ۱۲-۳. نمودار میانگین نسبت S/N برای دو الگوریتم SPEA-II و NSGA-II

۳-۵-۶-۲ تنظیم پارامترهای الگوریتم GA و SA

برای تنظیم پارامترهای این دو الگوریتم یک مساله در ابعاد بزرگ با تعداد ۱۵۰ کار، ۱۰ ماشین پیشرفته، ۱۰ ماشین قدیمی و ۵ مرحله کاری طراحی گردید. پارامترهایی که قرار است در GA تنظیم شوند شامل: ماکزیمم تعداد تکرار (Max-it)، اندازه جمعیت (N)، نرخ ترکیب (Pc) و نرخ جهش (Pm) و پارامترهای الگوریتم AS شامل: دمای نهایی (T_f)، ماکزیمم تعداد تکرار داخلی (II)، دمای اولیه (T_0)، نرخ کاهش دما (α) می باشد. با توجه به ادبیات موضوعی، سطوح در نظر گرفته شده برای این پارامترها به صورت جدول ۳-۲ است.

جدول ۳-۲. سطوح پارامترهای GA و SA

الگوریتم	پارامتر	سطوح فاکتورها		
		۱	۲	۳
GA	Max-it	۳۵۰	۵۰۰	۸۰۰
	Population size (N)	۴۰	۵۰	۶۰
	Crossover rates (Pc)	۰/۵	۰/۷	۰/۸
	Mutation rates (Pm)	۰/۱	۰/۲	۰/۳
SA	Final temperature (T_f)	1×10^{-14}	1×10^{-9}	2×10^{-5}
	Maximum number of inner iterations (II)	۱۰	۲۰	۳۰
	Initial Temperature (T_0)	۱۰	۱۵	۲۰
	Temperature Damping Rate (α)	۰/۹	۰/۹۵	۰/۹۸

شکل ۱۳-۳ نتایج اجرای آزمایشات تاگوچی را نشان می دهد. بر این اساس برای الگوریتم ژنتیک پارامترها به صورت زیر تنظیم گردید:

✓ ماکزیمم تعداد تکرار (Max-it) = ۸۰۰

✓ اندازه جمعیت (N) = ۵۰

✓ نرخ ترکیب (Pc) = ۰/۷

✓ نرخ جهش (Pm) = ۰/۲

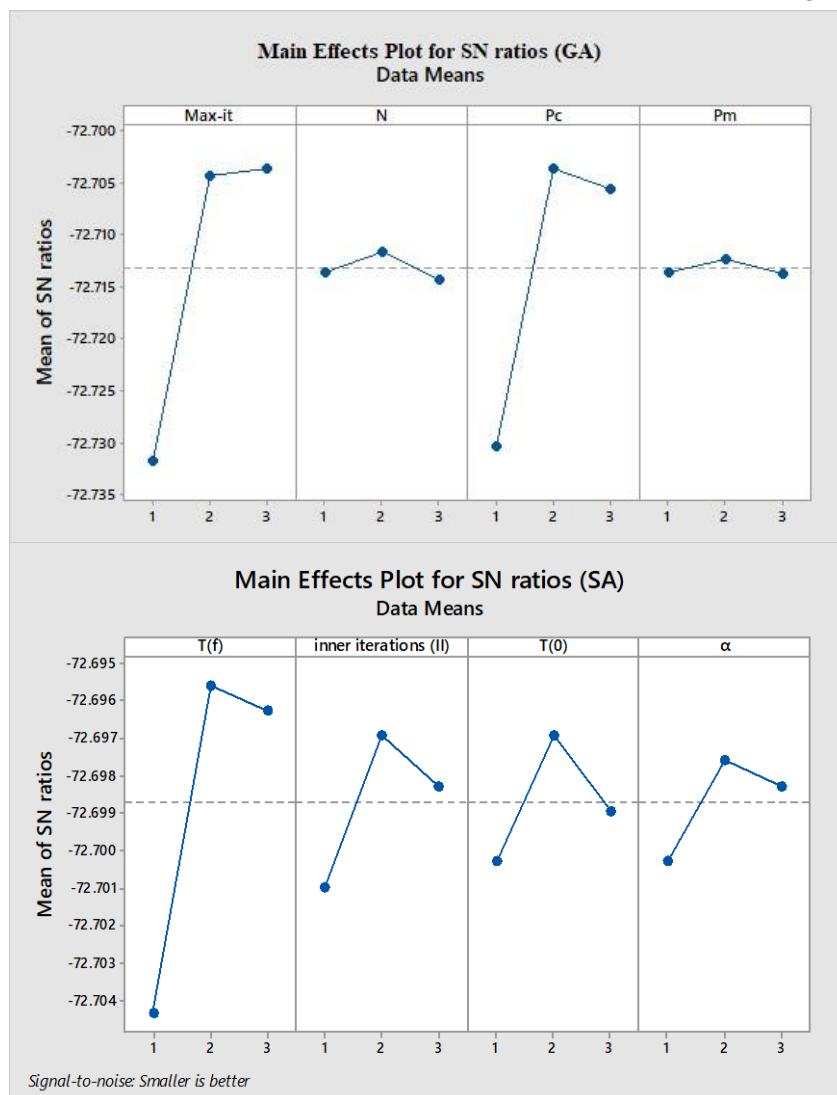
برای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نیز پارامترها به صورت زیر تنظیم شد:

✓ دمای نهایی (T_f) = 1×10^{-9}

✓ ماکزیمم تعداد تکرار خارجی (II) = ۲۰

✓ دمای اولیه (T_0) = ۱۵

✓ نرخ کاهش دما (α) = ۰/۹۵



شکل ۱۳-۳. نمودار میانگین نسبت SN برای دو الگوریتم GA و SA

۳-۶ جمع‌بندی

در این فصل، مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با مراحل پردازش وابسته به ماشین و زمان آماده‌سازی وابسته به توالی مورد بررسی قرار گرفت. تعداد ۳ مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای حل مساله در ابعاد کوچک پیشنهاد گردید. مدل اول (FFS-I) با هدف کاهش همزمان مجموع هزینه‌های پردازش و حداکثر زمان تکمیل، مدل دوم (FFS-II) با هدف حداقل کردن مصرف انرژی کل و هزینه پردازش به صورت توانمند با در نظر گرفتن شایستگی پردازش ماشین و زمان دسترسی کارها و مدل (FFS-III) با هدف حداقل کردن حداکثر زمان تکمیل با در نظر گرفتن منابع کمکی ارائه شدند. از آنجایی که مدل‌های مورد بررسی در کلاس مسائل NP-hard طبقه‌بندی می‌شوند، بنابراین حل این مدل‌ها برای نمونه‌های با ابعاد واقعی با استفاده از رویکردهای حل دقیق در یک زمان محاسباتی معقول امکان‌پذیر نمی‌باشند. از این رو الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و SPEA-II برای حل مدل‌های دو هدفه و الگوریتم‌های فراابتکاری GA و SA برای حل مدل تک هدفه پیشنهاد شدند. همچنین برای کالیبره کردن پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی از روش طراحی آزمایشات تاگوچی استفاده گردید.

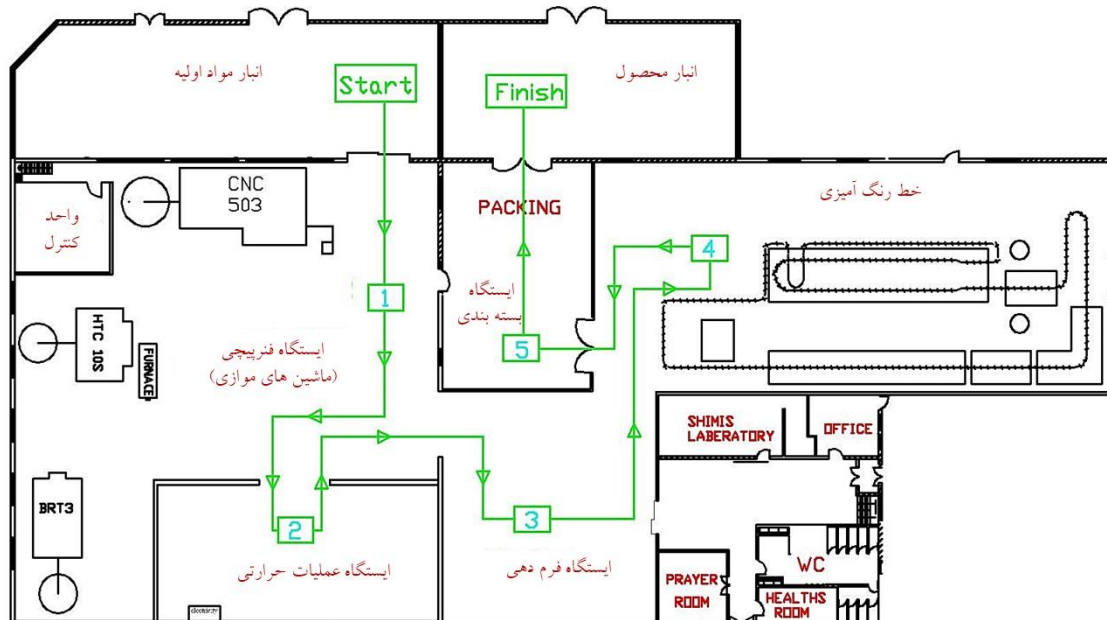
فصل ۴: پیاده سازی روش تحقیق و تحلیل نتایج

۴-۱ مقدمه

در این فصل، یک نمونه واقعی از مساله مورد بررسی معرفی می‌شود و مدل‌های ریاضی ارائه شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. سپس تاثیر برخی ویژگی‌های مسائل بر اهداف مدل‌ها بررسی می‌شوند. برای حل مسائل در ابعاد بزرگ و در یک زمان محاسباتی معقول نحوه پیاده‌سازی الگوریتم‌های پیشنهادی تشریح می‌شوند. در نهایت عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی از لحاظ کیفیت جواب‌های تولیدی و زمان محاسباتی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آن نیز ارائه می‌شود.

۴-۲ مطالعه موردی

یک شرکت تولیدی فعال در حوزه تولید فنرهای لول، یک نمونه کاربردی از مسئله‌ی مورد مطالعه می‌باشد. این شرکت به عنوان تامین کننده اصلی فنرهای خودرو برای کارخانجات خودروسازی در ایران است. این کارخانه یک واحد تولیدی کامل با گرید A می‌باشد که طیف گسترده‌ای از فنرهای کششی، فشاری و فرم دار را در ابعاد مختلف و با کیفیت بالا تولید می‌کند. شکل ۴-۱ بخشی از خط تولید این شرکت فرسازي را نشان می‌دهد. در ایستگاه فرنیچی تعدادی ماشین موازی با سطح تکنولوژی متفاوت قرار دارد. برای مثال مفتول‌هایی که با ماشین BRT3 عملیات فرنیچی روی آنها انجام می‌شود باید تمام مراحل را تا تبدیل شدن به محصول نهایی، طی کنند. اما در ماشین CNC503، به دلیل فرم‌دهی کامل، قطعات وارد مرحله ۳ نمی‌شوند و می‌توانند از مرحله ۲ مستقیماً وارد مرحله ۴ شوند، همچنین قطعاتی که به ماشین HTC10S تخصیص می‌یابند به دلیل داشتن کوره، وارد مرحله ۲ نمی‌شوند.



شکل ۴-۱. نمونه خط تولید فنر در مطالعه موردی

برای اجرای مدل‌های ریاضی و اطمینان از صحت عملکرد آن‌ها، با استفاده از پنج محصول شرکت و سه ماشین نام برده شده مسائلی در ابعاد کوچک طراحی می‌شود. نام محصولات، و زمان پردازش آنها در جدول ۴-۱ نشان داده شده است. همچنین جدول ۴-۲ پارامترهای مربوط به هزینه‌ها را برای هر کار و هر ماشین و جدول ۴-۳ زمان آماده‌سازی هر کار را نشان می‌دهد. جدول ۴-۴ نیز نیازمندی پردازش کارها را با توجه به ماشین تخصیص یافته در ایستگاه ۱ نشان می‌دهد. به دلیل حساسیت‌های شرکت در مورد افشای اطلاعات محرمانه سازمان، اعداد به کار رفته در پارامترها با نمونه واقعی متفاوت می‌باشد.

جدول ۴-۱. زمان پردازش هر کار در هر مرحله کاری

نام قطعه	کد قطعه	ایستگاه ۱			ایستگاه ۲	ایستگاه ۳	ایستگاه ۴	ایستگاه ۵
		BRT3	HTC10S	CNC503				
فنر درب صندوق عقب پژو پارس	$j - 1$	۸	۶	۴	۴	۱۰	۴	۵
فنر داشبرد پژو ۲۰۶	$j - 2$	۱۰	۸	۵	۵	۱۴	۶	۵
فنر فریم صندلی L90	$j - 3$	۶	۴	۳	۵	۱۲	۴	۴
فنر برگردان اهرم کلاچ	$j - 4$	۱۰	۸	۵	۶	۱۵	۸	۵
بست نگهدارنده شیلنگ رادیاتور	$j - 5$	۸	۶	۴	۶	۱۲	۶	۴

جدول ۴-۲. پارامتر هزینه برای هر کار در هر مرحله کاری

کد قطعه	هزینه وابسته به پردازش (VCH)					هزینه وابسته به زمان (FCH)
	$j - 1$	$j - 2$	$j - 3$	$j - 4$	$j - 5$	
CNC503	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۱۲
ایستگاه ۱ HTC10S	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۵
BRT3	۳	۳	۳	۳	۳	۲
ایستگاه ۲	۶	۶	۶	۶	۶	۳
ایستگاه ۳	۴	۴	۴	۴	۴	۲
ایستگاه ۴	۴	۴	۴	۴	۴	۲
ایستگاه ۵	۲	۲	۲	۲	۲	۱

جدول ۳-۴. نیازمندی پردازش کارها مطابق ماشین تخصیص یافته در ایستگاه

تخصیص در ایستگاه ۱	نیاز پردازش در ایستگاه های بعدی			
	۲	۳	۴	۵
$1, k_1$	۱	۰	۱	۱
$1, k_2$	۰	۱	۱	۱
$1, k_3$	۱	۱	۱	۱
$2, k_1$	۱	۰	۱	۱
$2, k_2$	۰	۱	۱	۱
$2, k_3$	۱	۱	۱	۱
$3, k_1$	۱	۰	۱	۱
$3, k_2$	۰	۱	۱	۱
$3, k_3$	۱	۱	۱	۱
$4, k_1$	۱	۰	۱	۱
$4, k_2$	۰	۱	۱	۱
$4, k_3$	۱	۱	۱	۱
$5, k_1$	۱	۰	۱	۱
$5, k_2$	۰	۱	۱	۱
$5, k_3$	۱	۱	۱	۱

$k_1 = \text{CNC503}, k_2 = \text{HTC10S}, k_3 = \text{BRT3}$

جدول ۴-۴. زمان های آماده سازی در مطالعه موردی با ابعاد کوچک

زمان های آماده سازی																	
$S_{ij1}^{(1)}$						$S_{ij2}^{(1)}$						$S_{ij3}^{(1)}$					
i/j	۱	۲	۳	۴	۵	i/j	۱	۲	۳	۴	۵	i/j	۱	۲	۳	۴	۵
۰	۱۱	۹	۸	۱۱	۹	۰	۸	۶	۵	۸	۶	۰	۶	۵	۴	۶	۵
۱		۶	۶	۹	۹	۱		۴	۴	۶	۶	۱		۳	۳	۵	۵
۲	۸		۸	۹	۹	۲	۵		۵	۶	۶	۲	۴		۴	۵	۵
۳	۹	۹		۶	۹	۳	۶	۶		۴	۶	۳	۵	۵		۳	۵
۴	۹	۸	۴		۹	۴	۶	۵	۳		۶	۴	۵	۴	۲		۵
۵	۹	۸	۶	۹		۵	۶	۵	۴	۶		۵	۵	۴	۳	۵	

زمان های آماده سازی در مراحل ۲ تا ۵ وابسته به توالی نمی باشد

$$S_{ij1}^{(2)} = ۲, \quad S_{ij1}^{(3)} = ۳, \quad S_{ij1}^{(4)} = ۴, \quad S_{ij1}^{(5)} = ۲$$

جهت حل مدل در ابعاد متوسط و بزرگ براساس مقاله حسنی و حسینی (۲۰۲۰) [۱] تعداد ۸ مساله طراحی شده است که اطلاعات مربوط به آن در جدول ۴-۵ و جدول ۴-۶ نشان داده شده است. همچنین نمادهای به کار رفته نیز در انتهای جدول توضیح داده شده است.

جدول ۴-۵. مشخصات تعداد ماشین و تعداد کار برای تست مدل‌ها در ابعاد متوسط و بزرگ

ابعاد مساله	عنوان مساله	N	K_1	K_1^{old}	K_1^{new}	$K_1^{new plus}$
متوسط	M-I	۱۰	۶	۲	۲	۲
	M-II	۱۵	۷	۳	۱	۳
	M-III	۲۰	۹	۴	۲	۳
	M-IV	۲۵	۱۲	۶	۳	۳
بزرگ	L-I	۵۰	۱۴	۷	۳	۴
	L-II	۷۵	۱۶	۸	۳	۵
	L-III	۱۰۰	۱۹	۱۰	۴	۵
	L-IV	۱۵۰	۲۰	۱۰	۵	۵

N : تعداد کارهایی که در طول دوره برنامه‌ریزی باید پردازش شوند

K_1 : تعداد ماشین‌های که در ایستگاه یک در دسترس می باشند.

K_1^{old} : تعداد ماشین‌هایی که کارهای تخصیص داده شده به آنها باید تمام مراحل را طی کنند.

K_1^{new} : تعداد ماشین‌هایی که کارهای تخصیص داده شده به آنها وارد ایستگاه ۲ نمی شوند.

$K_1^{new plus}$: تعداد ماشین‌هایی که کارهای تخصیص داده شده به آنها وارد ایستگاه ۳ نمی شوند.

جدول ۴-۶. پارامتر زمان پردازش و زمان راه اندازی در ابعاد متوسط و بزرگ

پارامترها	l_1			l_2	l_3	l_4	l_5
	K_1^{old}	K_1^{new}	$K_1^{new plus}$				
$S_{ijk}^{(l)}$	[۱, ۴]	[۸, ۴]	[۱۲, ۸]	[۳, ۲]	[۳, ۲]	[۳, ۲]	[۳, ۲]
$P_{kj}^{(l)}$	[۲۰, ۱۰]	[۳۹, ۳۰]	[۵۰, ۴۰]	[۳۰, ۲۰]	[۶۵, ۴۵]	[۲۵, ۱۵]	[۲۵, ۱۵]
$FCH_{kj}^{(1)}$	[۲, ۱]	[۵, ۳]	[۱۲, ۱۰]	[۳, ۱]	[۳, ۱]	[۳, ۱]	[۳, ۱]
$VCH_k^{(1)}$	[۲۰, ۱۰]	[۸۰, ۶۰]	[۱۴۰, ۱۲۰]	[۱۸, ۱۰]	[۱۸, ۱۰]	[۱۸, ۱۰]	[۱۸, ۱۰]

۴-۳ ارزیابی و تحلیل نتایج

برای اطمینان از صحت عملکرد مدل‌های پیشنهادی و ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری، در ادامه شاخص‌های ارزیابی معرفی شده و سپس هر یک از مدل‌ها در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ مورد بررسی

قرار می‌گیرند. برای حل مدل‌ها در ابعاد کوچک از نرم افزار گمز ورژن ۲۴.۹.۲ و حل‌کننده CPLEX و برای اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری از نرم افزار متلب ورژن (R2019b) استفاده شده است. کلیه محاسبات و تحلیل‌ها نیز با کامپیوتر PC با مشخصات Intel Core i5-4210U 2.4GHz CPU و 4GB RAM انجام شده است.

۴-۳-۱ شاخص‌های ارزیابی عملکرد در ابعاد کوچک

در ابعاد کوچک به دلیل وجود مقدار جواب پاراتو بهینه ($|PF_{known}|$)، بهینگی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی را می‌توان با شاخص‌های مختلفی مقایسه کرد. فتاحی و همکاران و تعداد دیگری از پژوهشگران شاخص‌های نرخ خطا (ER)، فاصله عمومی (GD)، نرخ نقاط نامغلوب پاراتو بهینه (ONVGR) را به عنوان شاخص‌های اندازه‌گیری عملکرد معرفی نموده و استفاده کردند. [95], [86].

در ادامه این سه شاخص برای مقایسه الگوریتم‌ها در ابعاد کوچک معرفی شده و اندازه‌گیری می‌شوند.

۴-۳-۱-۱ شاخص نرخ خطا (ER)

نرخ خطا بیانگر نسبت نقاط پاراتو نهایی مشخص شده توسط الگوریتم می‌باشد که بر روی جبهه پاراتو بهینه حاصل از حل دقیق قرار ندارند. این شاخص مطابق رابطه (۴-۱) محاسبه می‌شود.

$$ER = \frac{\sum_{i=1}^{|PF_{known}|} e_i}{|PF_{known}|} \quad (4-1)$$

در رابطه (۴-۱)، متغیر e_i یک متغیر دودویی می‌باشد بطوری که اگر جواب پاراتو مربوطه (جواب پاراتو i ام) یکی از جواب‌های واقع بر جبهه پاراتو بهینه نباشد مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار ۰ را به خود می‌گیرد. همچنین عبارت ($|PF_{known}|$) بیانگر تعداد جواب‌های پاراتو ارائه شده توسط الگوریتم می‌باشد [۱]. بنابراین اگر مقدار نرخ خطا برابر با صفر باشد بدین معناست که تمام جواب‌های پاراتو حاصل از الگوریتم بر روی جبهه پاراتو بهینه قرار دارد.

۴-۳-۱-۲ شاخص فاصله عمومی (GD)

شاخص فاصله عمومی بیانگر میانگین فاصله جواب‌های پاراتو ارائه شده توسط الگوریتم از جبهه پاراتو بهینه می‌باشد و مطابق رابطه (۴-۲) محاسبه می‌شود.

$$GD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}}{|PF_{known}|} \quad (4-2)$$

در رابطه (۴-۲)، ($|PF_{known}|$) نشان‌دهنده تعداد جواب‌ها در جبهه پاراتو بهینه و پارامتر d_i بیانگر فاصله اقلیدسی i امین جواب پاراتو الگوریتم تا نزدیکترین جواب واقع بر روی جبهه پاراتو بهینه می‌باشد.

۳-۱-۳ شاخص نرخ نقاط نامغلوب پاراتو بهینه (ONVGR)

این شاخص نسبت تعداد کل پاسخ‌های نامغلوب یافت شده بهینه را به تعداد کل پاسخ‌های بدست آمده توسط الگوریتم محاسبه می‌کند. رابطه (۳-۴) نحوه محاسبه این شاخص را نشان می‌دهد.

$$ONVGR \triangleq \frac{|PF_{known}|}{|PF_{true}|} \quad (۳-۴)$$

در رابطه (۳-۴)، $ONVGR = 1$ نشان می‌دهد که از نظر تعداد جواب هر دو پاسخ‌های بدست آمده توسط الگوریتم $|PF_{true}|$ و بهینه $|PF_{known}|$ با هم برابر هستند. ولی استنباط نمی‌شود که جبهه‌های پاراتو هر دو دقیقاً یکسان است ($PF_{true} = PF_{known}$).

۳-۲-۴ شاخص‌های ارزیابی عملکرد در ابعاد متوسط و بزرگ

استفاده از الگوریتم‌های دقیق مانند الگوریتم محدودیت جزئی در حل مسائل متوسط و بزرگ برای یافتن جبهه پاراتو غیر ممکن است. لذا در این ابعاد جواب بهینه وجود ندارد در نتیجه برای مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری باید از شاخص‌هایی استفاده شود که وابسته به جواب بهینه نباشند. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به شاخص تعداد کل نقاط نامغلوب شناسایی شده (ONVG)، شاخص متوسط فاصله از نقطه ایدال (MID)، شاخص فاصله (S)، شاخص گوناگونی (D) و شاخص ضریب تغییرات (CV) اشاره کرد [۹۵].

۱-۳-۲-۴ شاخص تعداد کل نقاط نامغلوب شناسایی شده (ONVG)

این شاخص تعداد کل جواب‌های نامغلوب یافت شده در طول اجرای الگوریتم را اندازه‌گیری می‌کند. این معیار توسط رابطه (۴-۴) تعریف می‌شود.

$$ONVG = |PF_{known}| \quad (۴-۴)$$

۲-۳-۲-۴ شاخص متوسط فاصله از نقطه ایدال (MID)

این شاخص نزدیکی پاسخ‌های پاراتو به نقطه ایدال را نشان می‌دهد. در واقع میانگین فاصله اقلیدسی پاسخ‌ها را از نقطه ایدال محاسبه می‌کند. این مقدار از رابطه (۴-۵) به دست می‌آید.

$$MID = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\sum_{g=1}^m f_{ig}^2} \quad (۴-۵)$$

در رابطه (۴-۵) f_{ig} بهترین مقادیر تابع هدف g در راه حل i می‌باشد که توسط الگوریتم‌ها بدست آمده است. این شاخص میانگین فاصله راه‌حل‌ها را از نقاط ایده آل که $(0, 0, \dots, 0)$ هستند برای مسائل مینیمم سازی ارائه می‌دهد. این شاخص معمولاً برای مسائل مینیمم سازی استفاده می‌شود.

۴-۳-۲-۳ شاخص فاصله (S)

این معیار که توسط رابطه (۴-۶) محاسبه می‌شود، پراکندگی پاسخ‌ها در یک پاراتو را نشان می‌دهد.

$$S = \sqrt{\frac{1}{|PF_{known}| - 1} \times \sum_{i=1}^{|PF_{known}|} (d_i - \bar{d})^2} \quad (4-6)$$

جایی که d_i فاصله بین i امین راه‌حل از نزدیک‌ترین راه‌حل به آن را نشان می‌دهد، که توسط رابطه (۴-۷) بدست می‌آید.

$$d_i = \min_j (|f_1^i(x) - f_1^j(x)| + |f_2^i(x) - f_2^j(x)|) \text{ for } i, j = 1, 2, 3 \dots, n \quad (4-7)$$

در رابطه (۴-۷)، $f_1(x)$ و $f_2(x)$ مقدار توابع هدف را نشان می‌دهد. همچنین $\bar{d}$ میانگین همه d_i و n تعداد پاسخ‌ها در PF_{known} را نشان می‌دهند.

هر چه مقدار S کمتر باشد مناسب‌تر بوده و نشان‌دهنده پراکندگی کمتر پاسخ‌های پاراتو می‌باشد.

۴-۳-۲-۴ شاخص پراکندگی (D)

این شاخص برای تعیین میزان جواب‌های نامغلوب یافت شده بر روی مرز بهینه استفاده می‌گردد. تعریف شاخص پراکندگی بصورت رابطه (۴-۸) می‌باشد:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^{|PF_{known}|} \max(\|X_i - X'_i\|)} \quad (4-8)$$

در رابطه (۴-۸)، $\|X_i - X'_i\|$ نشان‌دهنده فاصله اقلیدسی بین دو جواب مجاور X_i و X'_i بر روی مرز بهینه است.

۴-۳-۲-۵ شاخص ضریب تغییرات (CV)

این شاخص برای نمایش و مقایسه میزان پراکندگی بین دو جامعه یا دو متغیر به کار می‌رود. از آنجایی که کم بودن پراکندگی، نشانگر همگن بودن جامعه است، بین دو جامعه، آنکه دارای ضریب تغییرات کمتری باشد، جامعه بهتری بوده، زیرا نتایج گرفته شده از شاخص میانگین، دقت بیشتری دارد. رابطه (۴-۹) نحوه محاسبه شاخص ضریب تغییرات را نشان می‌دهد.

$$CV = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / n}{\bar{X}} \quad (4-9)$$

جایی که X_i مقدار تابع برازش در تکرار i ام و $\bar{X}$ مقدار میانگین تابع برازش در n تکرار الگوریتم را نشان می‌دهد.

۴-۳-۳ ارزیابی و تحلیل نتایج مدل FFS-I

۴-۳-۳-۱ حل مدل FFS-I در ابعاد کوچک

با استفاده از داده های بخش (۴-۲) مدل در ابعاد کوچک مورد آزمایش قرار می گیرد. با توجه به اینکه مدل FFS-I دو هدفه می باشد، جهت حل دقیق آن در ابعاد کوچک از الگوریتم محدودیت جزئی یا اپسیلون محدودیت استفاده شده است. جدول ۴-۷ دامنه تغییرات دو تابع هدف را نشان می دهد، که بر این اساس طیفی از راه حلها در جبهه پاراتو ایجاد می شود. این جدول نشان می دهد در مساله (S-I) هزینه فرآیند از ۳۱۹۷ تا ۳۹۴۵ است که ۲۳٪ تغییر را نشان می دهد و برای تابع هدف دوم (C_{max}) از ۶۷ تا ۸۷ متغیر است که نشان دهنده ۳۰٪ تغییر می باشد. در مساله (S-II) نیز در صد تغییرات تابع هدف به ترتیب برابر ۱۹٪ و ۳۴٪ می باشد.

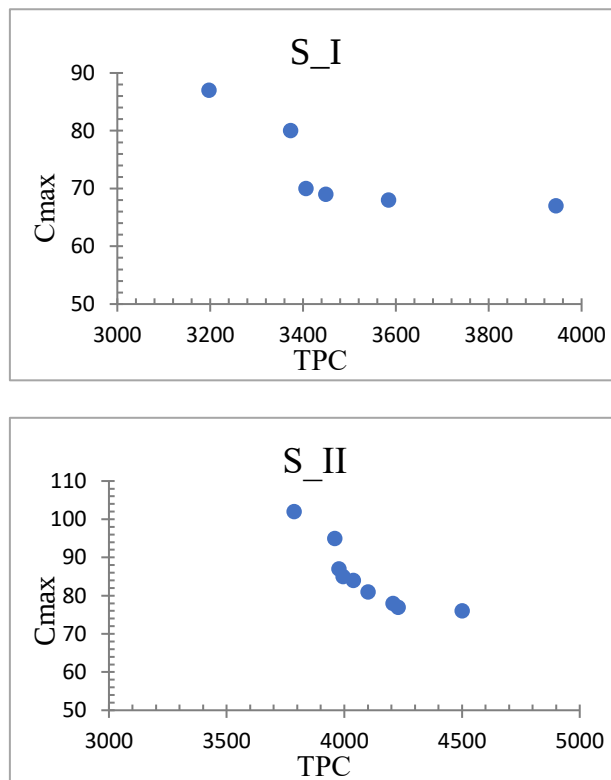
جدول ۴-۷. جدول Payoff برای مدل FFS-I

	مساله (S-I)		مساله (S-II)	
	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_1(x)$	$f_2(x)$
$\min f_1(x)$	۳۱۹۷	۸۷	۳۷۸۶	۱۰۲
$\min f_2(x)$	۳۹۴۵	۶۷	۴۵۰۰	۷۶

در جدول ۴-۸ نتایج حاصل از اجرای دو الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی و الگوریتم دقیق محدودیت جزئی را در دو مساله با ابعاد کوچک نشان می دهد. با توجه به شاخص ONVG در هر دو مساله، هر دو الگوریتم پیشنهادی توانستند به ترتیب تعداد ۶ و ۹ راه حل بر روی جبهه پاراتو کشف کنند. شاخص های ER و GD نشان می دهند که هر دو الگوریتم توانستند عملکرد یکسانی با الگوریتم دقیق داشته باشند. نهایتاً ارزیابی شاخص ONVGR، مجدداً گواه این مطلب است تعداد جواب یافت شده توسط هر دو الگوریتم فراابتکاری دقیقاً برابر تعداد جواب جبهه پاراتو بهینه می باشد. شکل ۴-۲ نقاط نامغلوب شناسایی شده توسط سه الگوریتم را نشان می دهد. با توجه به شکل هر دو الگوریتم NSGA-II و SPEA-II توانستند به جبهه پاراتوی بهینه دست پیدا کنند.

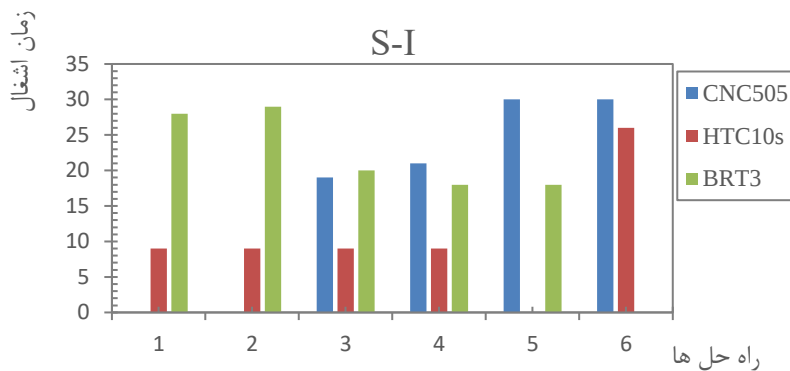
جدول ۴-۸. جدول نتایج الگوریتم های پیشنهادی در ابعاد کوچک برای مدل FFS-I

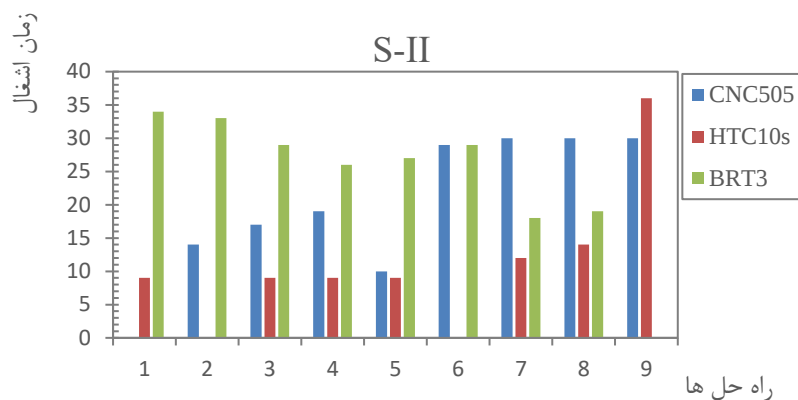
مساله	ONVG			ER			GD			ONVGR	
	ϵ -constraint II	NSGA-II	SPEA-II	ϵ -constraint-II	NSGA-II	SPEA-II	ϵ -constraint II	NSGA-II	SPEA-II	NSGA-II	SPEA-II
S-I	۶	۶	۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱
S-II	۹	۹	۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱



شکل ۲-۴. نقاط نامغلوب شناسایی شده توسط سه الگوریتم در مساله S-I و S-II (مدل FFS-I)

برای بدست آوردن نتایج بیشتر و بررسی تاثیر تخصیص‌های مختلف کارها به ماشین‌ها، شکل ۳-۴ زمان اشغال هر ماشین برای هر راه حل را در دو مساله‌ی S-I و S-II نشان می‌دهد. در هر مساله به ترتیب تعداد ۶ و ۹ راه حل وجود دارد که تصمیم گیرنده می‌تواند با توجه به اهداف و اولویت‌های سازمان یکی از آنها را انتخاب نماید. نتایج شکل ۳-۴ و جدول ۴-۹. مقدار توابع هدف در هر راه حل برای مساله‌ی S-I و S-II نشان می‌دهند هرچه کارهای بیشتری به ماشین‌های با سطح تکنولوژی بالا تخصیص یابد زمان تکمیل کارها کاهش پیدا می‌کند ولی در عوض هزینه تولید افزایش می‌یابد و بالعکس با تخصیص کارهای بیشتر به ماشین‌های قدیمی‌تر هزینه تولید کاهش یافته ولی زمان تکمیل افزایش می‌یابد.





شکل ۳-۴. مقدار ظرفیت اشغال شده از ماشین‌ها در هر راه حل

جدول ۹-۴. مقدار توابع هدف در هر راه حل برای مساله‌ی S-I و S-II

شماره هر راه حل	Problem S_I		Problem S_II	
	Process costs	C_{max}	Process costs	C_{max}
۱	۳۱۹۷	۸۷	۳۷۸۶	۱۰۲
۲	۳۳۷۳	۸۰	۳۹۵۹	۹۵
۳	۳۴۰۶	۷۰	۳۹۷۷	۸۷
۴	۳۴۴۹	۶۹	۳۹۹۵	۸۵
۵	۳۵۸۴	۶۸	۴۰۳۸	۸۴
۶	۳۹۴۵	۶۷	۴۱۰۰	۸۱
۷	-	-	۴۲۰۶	۷۸
۸	-	-	۴۲۲۸	۷۷
۹	-	-	۴۵۰۰	۷۶

۲-۳-۴ حل مدل FFS-I در ابعاد متوسط و بزرگ

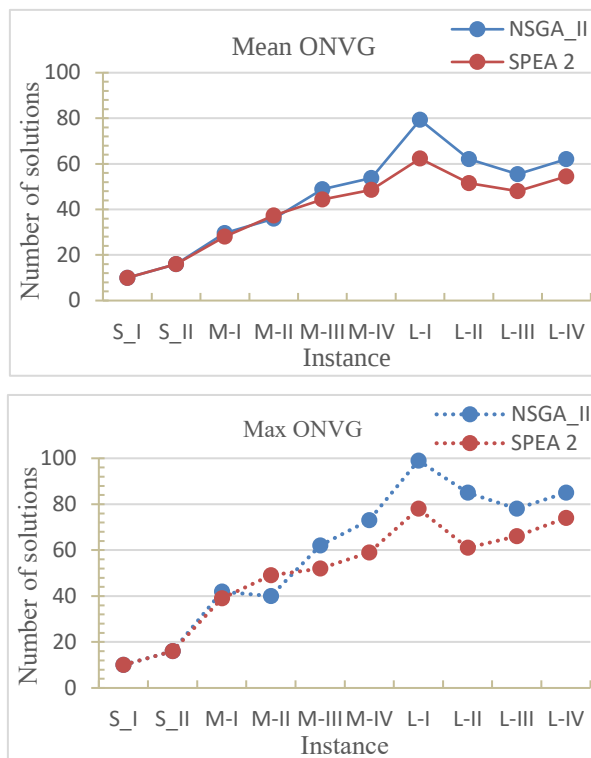
با توجه به داده‌های جدول ۵-۴ و جدول ۶-۴، مدل FFS-I در ابعاد متوسط و بزرگ توسط دو الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و SPEA-II حل می‌شوند. جدول ۱۰-۴ نتایج اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری را براساس شاخص‌های معرفی شده در ابعاد متوسط و بزرگ نشان می‌دهد. اولین شاخصی که در این جدول مورد بررسی قرار گرفت شاخص ONVG می‌باشد. براساس این شاخص الگوریتم NSGA-II در تمام مسائل غیر از مساله M-II توانسته است تعداد نقاط بیشتری را در جبهه پاراتو بدست آورد. که این امر باعث می‌شود مدیران و تصمیم‌گیرندگان گزینه‌های بیشتری برای انتخاب داشته باشند. ارزیابی شاخص MID الگوریتم NSGA-II به غیر از مساله M-I و M-III در دیگر مسائل توانست عملکرد بهتری داشته باشد. از

نظر شاخص‌های S و D نیز الگوریتم NSGA-II توانسته است عملکردی بهتر نسبت به الگوریتم SPEA-II از خود نشان دهد.

جدول ۱۰-۴. نتایج محاسباتی مقادیر معیارهای عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II در ابعاد متوسط و بزرگ

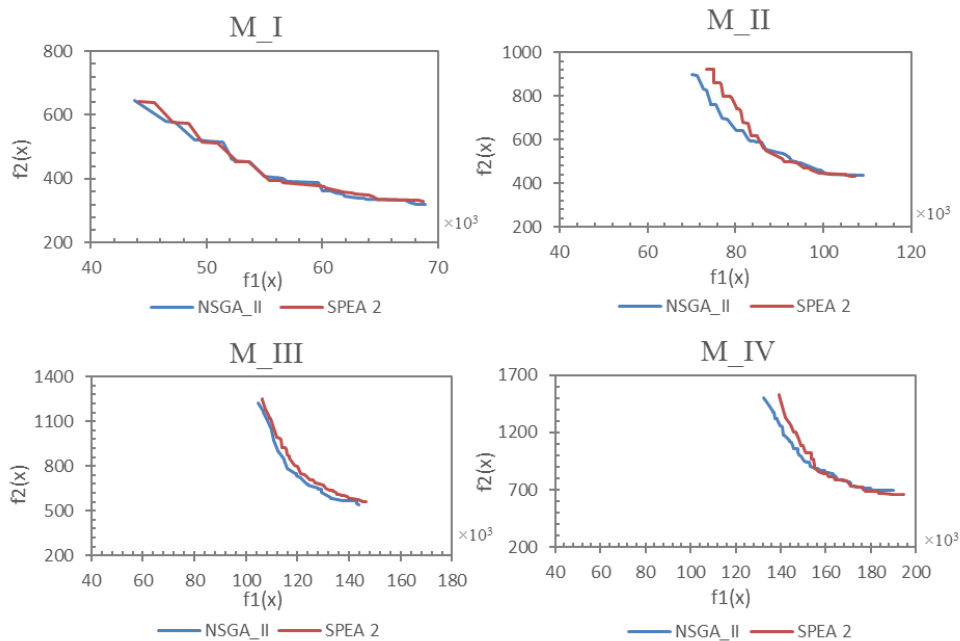
ابعاد	مساله	ONVG		MID		S		D	
		NSGA-II	SPEA-II	NSGA-II	SPEA -II	NSGA-II	SPEA-II	NSGA-II	SPEA -II
متوسط	M-I	۴۲	۳۸	۵۵۳۴۶/۷	۵۳۰۷۴/۹	۹۴۷/۹	۸۱۶/۴	۳۴۲	۳۳۰/۳
	M-II	۴۰	۴۹	۸۷۲۵۰/۶	۸۸۱۴۱/۱	۱۵۳۶/۴	۸۲۰/۷	۴۳۳/۸	۴۰۶/۲
	M-III	۶۲	۵۲	۱۲۱۰۶۲/۱	۱۱۳۹۰۳	۱۱۴۸	۱۰۳۹/۲	۴۷۲	۴۷۲/۲
	M-IV	۷۳	۵۹	۱۵۶۵۸۳/۹	۱۵۲۷۱۸/۷	۶۹۸/۷	۶۷۶/۶	۵۳۰/۹	۵۲۷/۸
بزرگ	L-I	۹۹	۷۸	۳۲۷۱۵۲/۶	۳۳۱۵۳۰/۷	۱۱۶۳/۲	۱۱۰۰/۹	۷۵۵/۹	۷۱۶/۶
	L-II	۸۵	۶۱	۵۳۲۰۵۵/۵	۵۳۵۴۴۴/۱	۵۳۲۵/۲	۲۴۶۸/۵	۸۹۱/۳	۸۷۹
	L-III	۷۸	۶۶	۷۲۵۶۱۲/۱	۷۴۳۵۷۹/۲	۳۳۲۸/۶	۲۹۹۸/۹	۱۰۲۹	۹۸۴/۹
	L-IV	۸۵	۷۴	۱۱۴۲۵۷۲/۶	۱۱۴۲۲۱۶/۴	۶۷۹۳/۷	۱۷۵۵/۳	۱۲۳۹/۸	۱۲۰۵/۴

برای تجزیه و تحلیل بهتر، میانگین تعداد راه‌حل‌های نامغلوب در ۱۰ تکرار و ماکزیمم جواب بدست آمده توسط هر دو الگوریتم در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. این نتایج نیز مجدد بر برتری الگوریتم NSGA-II در مقایسه با الگوریتم SPEA-II تاکید می‌کند.

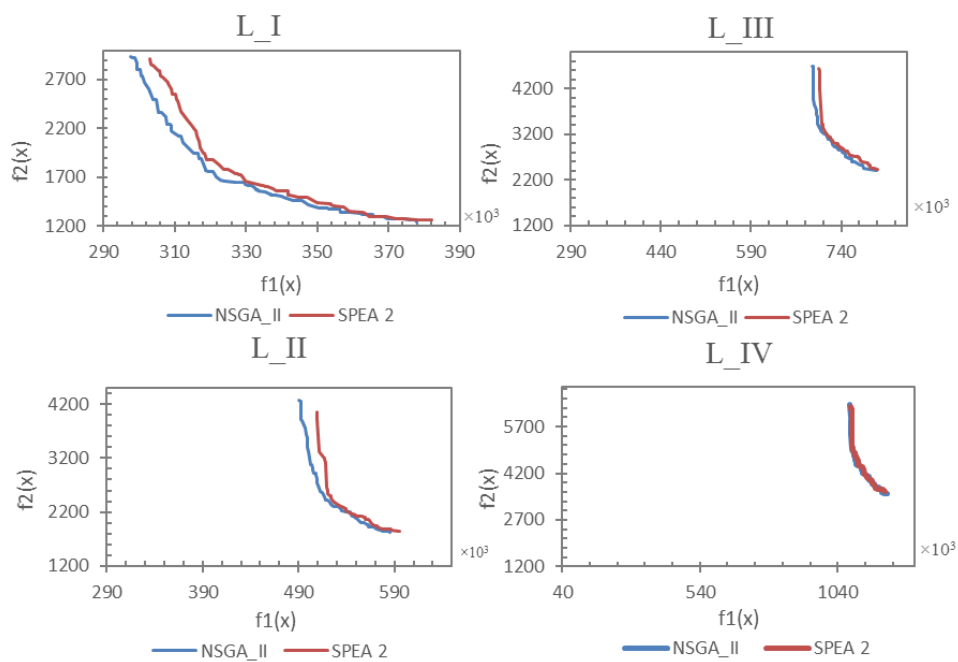


شکل ۴-۴. مقدار میانگین و ماکزیمم شاخص ONVG

شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶ مقایسه جبهه پاراتو را بین دو الگوریتم در ابعاد متوسط و بزرگ نشان می دهد. نتایج نشان می دهد در بیشتر موارد جبهه پاراتو بدست آمده توسط الگوریتم NSGA-II توانسته است جبهه پاراتو الگوریتم SPEA-II را مغلوب نماید. دامنه تغییرات دو تابع هدف در جبهه پاراتوهای ارائه شده توسط دو الگوریتم به صورت جداگانه در جدول ۴-۱۱ نشان داده شده است. نتیجه نشان می دهد از نظر ازدحام دو الگوریتم مشابه هستند ولی الگوریتم NSGA-II توانسته است دامنه تغییرات بیشتری را در دو تابع هدف در امتداد جبهه پاراتو ایجاد نماید.



شکل ۴-۵. راه حل‌های جبهه پاراتو برای مسائل در ابعاد متوسط



شکل ۴-۶. راه حل‌های جبهه پاراتو برای مسائل در ابعاد بزرگ

جدول ۴-۱۱. دامنه تغییرات توابع هدف در جواب های جبهه پاراتو

مساله	NSGA_II						SPEA 2					
	f1(x)			f2(x)			f1(x)			f2(x)		
	مینیمم	ماکسیمم	دامنه تغییرات	مینیمم	ماکسیمم	دامنه تغییرات	مینیمم	ماکسیمم	دامنه تغییرات	مینیمم	ماکسیمم	دامنه تغییرات
S_I	3197	3945	18.96	67	87	22.99	3197	3945	18.96	67	87	22.99
S_II	3786	4500	15.87	76	102	25.49	3786	4500	15.87	76	102	25.49
M_I	43760	68888	36.48	319	644	50.47	44120	68692	35.77	330	642	48.60
M_II	70206	109106	35.65	437	898	51.34	73408	107132	31.48	430	924	53.46
M_III	104806	143718	27.08	543	1227	55.75	106126	146516	27.57	559	1252	55.35
M_IV	132330	189972	30.34	696	1500	53.60	139326	194420	28.34	659	1526	56.82
L_I	297775	377832	21.19	1244	2929	57.53	303197	382119	20.65	1261	2913	56.71
L_II	490672	585532	16.20	1828	4276	57.25	508760	595486	14.56	1851	4052	54.32
L_III	691784	798130	13.32	2414	4689	48.52	703130	800244	12.14	2433	4640	47.56
L_IV	1083552	1218618	11.08	3540	6404	44.72	1089345	1213722	10.25	3624	6329	42.74

۴-۳-۴ ارزیابی و تحلیل نتایج مدل FFS-II

۴-۳-۴-۱ حل مدل FFS-II در ابعاد کوچک

برای حل مدل در ابعاد کوچک از جداول بخش ۴-۱ استفاده شده است. علاوه بر آن جدول ۴-۱۲ پارامتر هزینه فرآیند و مصرف انرژی را برای هر ماشین در دو حالات نشان می دهد.

جدول ۴-۱۲. مشخصات هزینه فرآیند و مصرف انرژی کارها در مدل FFS-II

SECP	ECP	هزینه پردازش $(CP_{kj}^{(l)})$					کد قطعه
		$j-5$	$j-4$	$j-3$	$j-2$	$j-1$	
۲	۸	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	CNC503
۳	۱۰	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	ایستگاه ۱ HTC10S
۴	۱۶	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	BRT3
۶	۲۰	۸	۸	۸	۸	۸	ایستگاه ۲
۴	۱۵	۶	۶	۶	۶	۶	ایستگاه ۳
۲	۶	۳	۳	۳	۳	۳	ایستگاه ۴

جدول ۱۳-۴ مقایسه پاسخ‌های حاصل از اجرای دو الگوریتم پیشنهادی و روش دقیق محدودیت جزئی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد هر دو الگوریتم عملکرد یکسانی داشته و مشابه جواب دقیق می‌باشد اما از لحاظ زمانی الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر داشته است. همچنین با افزایش ابعاد مساله زمان حل الگوریتم محدودیت جزئی به شدت افزایش می‌یابد.

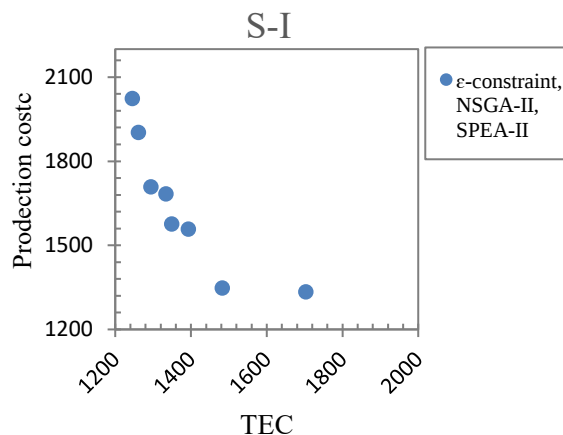
جدول ۱۳-۴. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی در مسائل با ابعاد کوچک (مدل FFS-II)

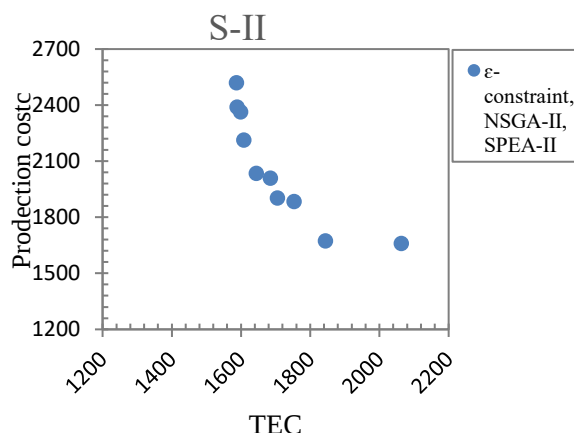
الگوریتم	مساله ۱ (S-I)			مساله ۲ (S-II)			زمان حل (ثانیه)
	بهترین مقدار تابع هدف	بهترین مقدار تابع هدف	تعداد نقاط	بهترین مقدار تابع هدف	بهترین مقدار تابع هدف	تعداد نقاط	
	اول	دوم	پاراتو	اول	دوم	پاراتو	
-constraint	۱۲۴۵	۱۳۳۳	۸	۱۵۸۷	۱۶۶۰	۱۰	۴۲۵۷/۱۲
NSGA-II	۱۲۴۵	۱۳۳۳	۸	۱۵۸۷	۱۶۶۰	۱۰	۳۷/۴۲
SPEA-II	۱۲۴۵	۱۳۳۳	۸	۱۵۸۷	۱۶۶۰	۱۰	۵۱/۰۲

در جدول ۱۴-۴ نتایج حاصل از اجرای دو الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی و الگوریتم دقیق محدودیت جزئی را در دو مساله با ابعاد کوچک نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، هر دو الگوریتم توانستند عملکرد یکسانی با الگوریتم دقیق داشته باشند. شکل ۷-۴ نقاط نامغلوب شناسایی شده توسط سه الگوریتم را نشان می‌دهد. براساس آن هر دو الگوریتم NSGA-II و SPEA-II توانسته اند مانند الگوریتم محدودیت اپسیلون تعمیم یافته (ϵ -constraint II) توانسته‌اند به جبهه پاراتو بهینه دست پیدا کنند.

جدول ۱۴-۴. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی در مسائل با ابعاد کوچک (مدل FFS-II)

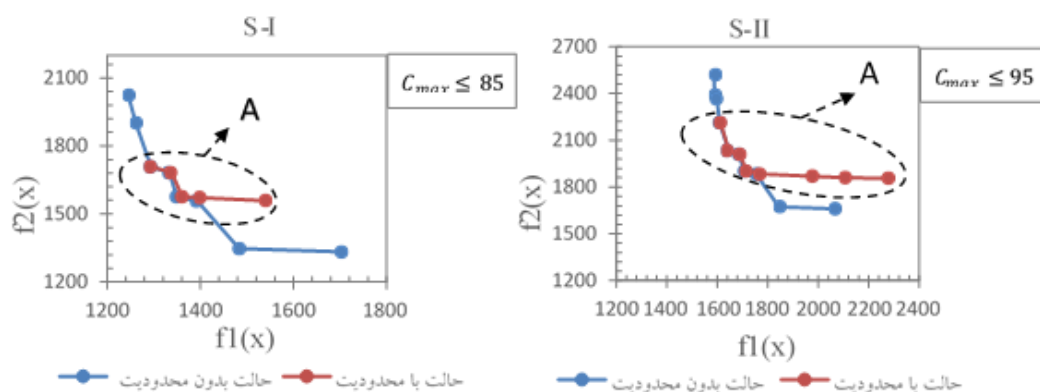
مساله	ONVG			ER			GD			ONVGR	
	ϵ -constraint II	NSGA-II	SPEA-II	ϵ -constraint-II	NSGA-II	SPEA-II	ϵ -constraint II	NSGA-II	SPEA-II	NSGA-II	SPEA-II
S-I	۸	۸	۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱
S-II	۱۰	۱۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱





شکل ۷-۴. نقاط نامغلوب شناسایی شده توسط سه الگوریتم در مساله S-I و S-II (مدل FFS-II)

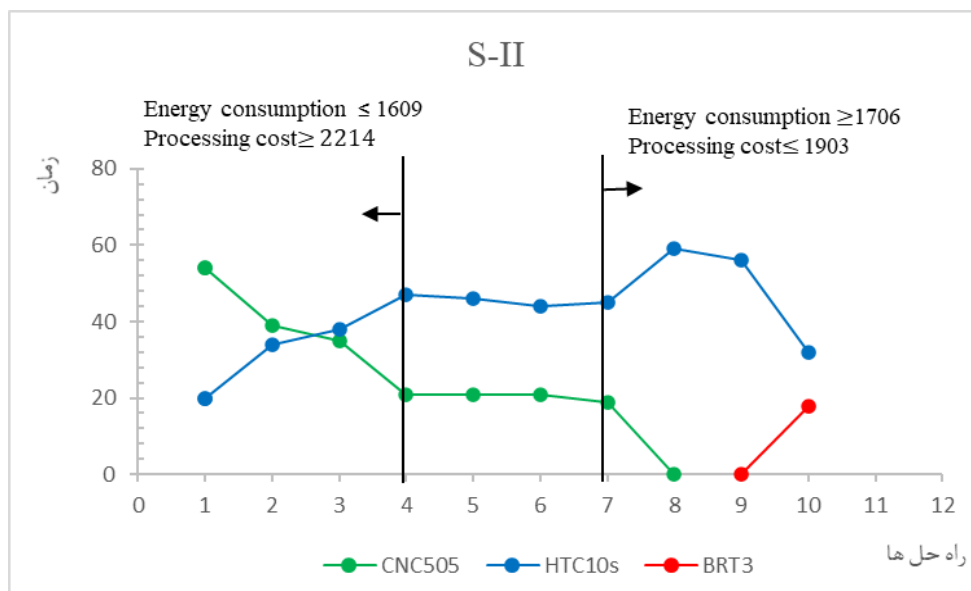
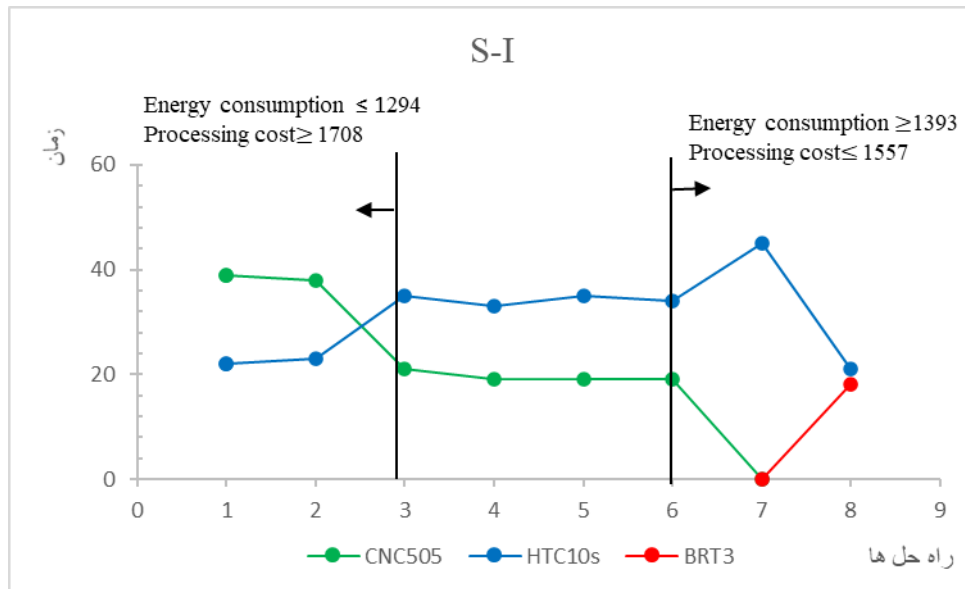
در دنیای واقعی معمولاً یک محدودیت زمانی جهت زمانبندی کارها در نظر گرفته می‌شود، که این موضوع از تخصیص آزادانه کارها به ماشین‌ها جلوگیری می‌کند. در اینجا مسائل S-I و S-II را با یک محدودیت زمانی مواجه کرده و مجدد مدل را اجرا می‌نماییم. همان طور که در شکل ۸-۴ نشان داده شده است چنانچه متغیر C_{max} در مساله S-I کوچکتر مساوی ۸۵ و در مساله S-II کوچکتر مساوی ۹۵ در نظر گرفته شود از گستردگی جواب‌ها کاسته شده و جبهه‌ی پاراتو محدود به ناحیه‌ی A می‌شود.



شکل ۸-۴. جواب‌های جبهه پاراتو در حالت محدود شدن متغیر C_{max}

شکل ۹-۴ به همراه جدول ۱۵-۴ اطلاعات تکمیلی در خصوص هر یک از راه حل‌ها در مسائل S-I و S-II نشان می‌دهند. شکل ۹-۴ میزان ظرفیت استفاده شده از هر ماشین را نشان می‌دهد. راه‌حلهایی که در سمت چپ نمودارها قرار دارند از نظر تابع هدف اول (مصرف انرژی) در حالت بهینه می‌باشند و راه‌حلهایی که در سمت راست نمودارها قرار دارند از نظر تابع هدف دوم (هزینه فرآیند) در حالت بهینه می‌باشند. این نمودارها نشان می‌دهند هرچه کارها به ماشین‌های با سطح تکنولوژی بالاتر تخصیص یابند میزان مصرف انرژی کاهش یافته ولی هزینه فرآیند افزایش می‌یابد و بالعکس هرچه کارها به ماشین‌های با سطح تکنولوژی

پایین تخصیص یابد هزینه فرآیند کاهش یافته اما مصرف انرژی افزایش می‌یابد. همچنین جدول ۴-۱۵ نشان می‌دهد در مساله S-I کمترین زمان تکمیل کارها مربوط به راه حل ۴ می‌باشد، جایی که مصرف انرژی ۷/۱۴٪ و هزینه فرآیند ۲۶/۲٪ از مقدار بهینه خود فاصله گرفته‌اند. در مساله S-II نیز کمترین زمان تکمیل کارها مربوط به راه حل ۵ می‌باشد جایی که مصرف انرژی ۳/۶٪ و هزینه فرآیند ۲۲/۵٪ از مقدار بهینه خود فاصله دارند.

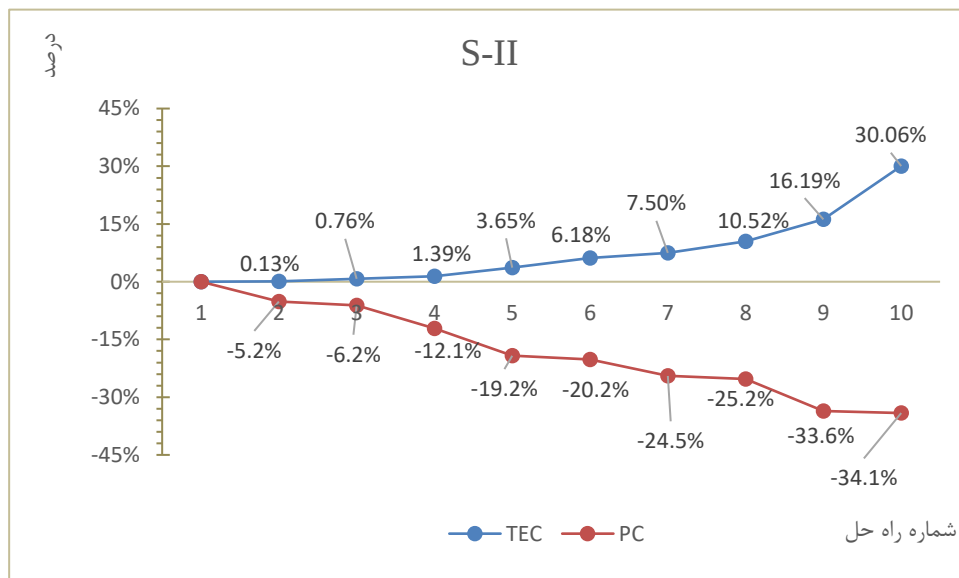
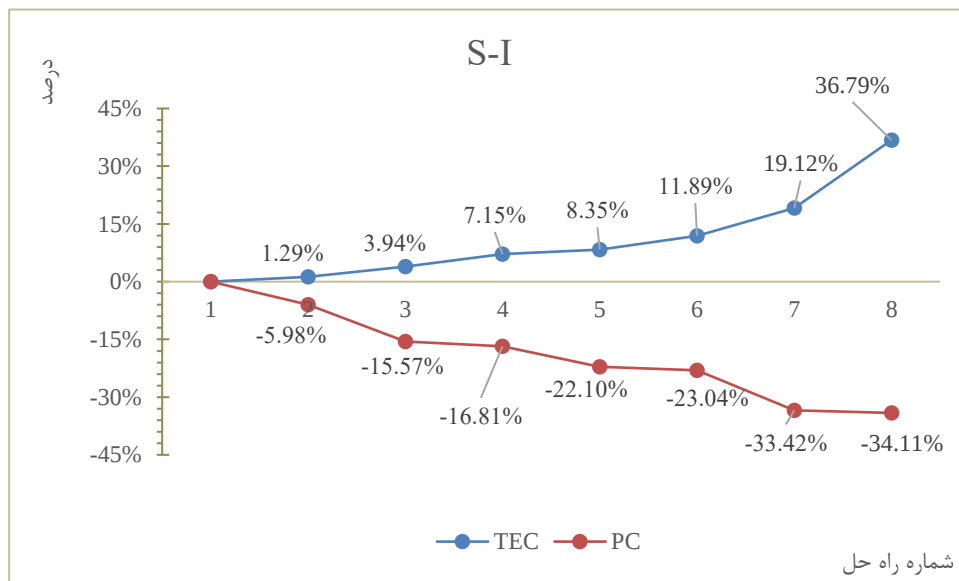


شکل ۹-۴. مقدار ظرفیت اشغال شده ماشین‌ها در هر راه‌حل برای مسائل S-I و S-II (مدل FFS-II)

جدول ۱۵-۴. جزئیات راه‌حل‌ها در مسائل S-I و S-II برای مدل FFS-II

شماره راه حل	مساله S_I			مساله S_II		
	Energy consumption	Process costs	C_{max}	Energy consumption	Process costs	C_{max}
۱	۱۲۴۵	۲۰۲۳	۱۰۲	۱۵۸۷	۲۵۲۰	۱۰۷
۲	۱۲۶۱	۱۹۰۲	۸۵	۱۵۸۹	۲۳۹۰	۹۶
۳	۱۲۹۴	۱۷۰۸	۸۶	۱۵۹۹	۲۳۶۵	۹۰
۴	۱۳۳۴	۱۶۸۳	۷۵	۱۶۰۹	۲۲۱۴	۹۷
۵	۱۳۴۹	۱۵۷۶	۹۹	۱۶۴۵	۲۰۳۵	۸۴
۶	۱۳۹۳	۱۵۵۷	۹۲	۱۶۸۵	۲۰۱۰	۱۱۱
۷	۱۴۸۳	۱۳۴۷	۹۲	۱۷۰۶	۱۹۰۳	۹۰
۸	۱۷۰۳	۱۳۳۳	۹۲	۱۷۵۴	۱۸۸۴	۱۲۱
۹	-	-	-	۱۸۴۴	۱۶۷۴	۱۳۰
۱۰	-	-	-	۲۰۶۴	۱۶۶۰	۱۳۴

برای اینکه بتوان دریافت در هر راه حل مقدار توابع هدف چقدر از مقدار بهینه خود فاصله گرفتند می‌توان به شکل ۱۰-۴ مراجعه کرد. شکل ۱۰-۴ درصد تغییرات دو تابع هدف را نشان می‌دهد. این شکل به مدیران کمک می‌کند تا بتوانند راه حل مناسب را انتخاب نمایند. در نمودار S-I چنانچه راه حل ۲ انتخاب شود، مقدار مصرف انرژی ۱/۳٪ از حالت بهینه‌ی خود فاصله می‌گیرد ولی هزینه فرآیند ۶٪ کاهش می‌یابد. همچنین در راه حل ۳ مقدار مصرف انرژی ۴٪ بدتر از حالت بهینه خود است ولی هزینه فرآیند ۱۵/۶٪ بهبود می‌یابد. از مقایسه راه حل‌های ۷ و ۸ نیز می‌توان دریافت راه حل ۷ مناسب‌تر است زیرا در راه حل ۸ هزینه فرآیند در مقایسه با راه حل ۷ تنها ۰/۷٪ بهبود می‌یابد ولی مقدار مصرف انرژی حدود ۱۸٪ افزایش می‌یابد. مشابه همین نتایج را نیز می‌توان از نمودار S-II بدست آورد. به طور مثال با مقایسه راه‌حل‌های ۹ و ۱۰ می‌توان دریافت که با مشارکت دستگاه‌های قدیمی در تولید، مصرف انرژی با شیب زیادی افزایش می‌یابد ولی هزینه‌ی تولید با شیب خیلی کمتری کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰-۴. درصد تغییرات توابع هدف برای مساله S-I و S-II (مدل FFS-II)

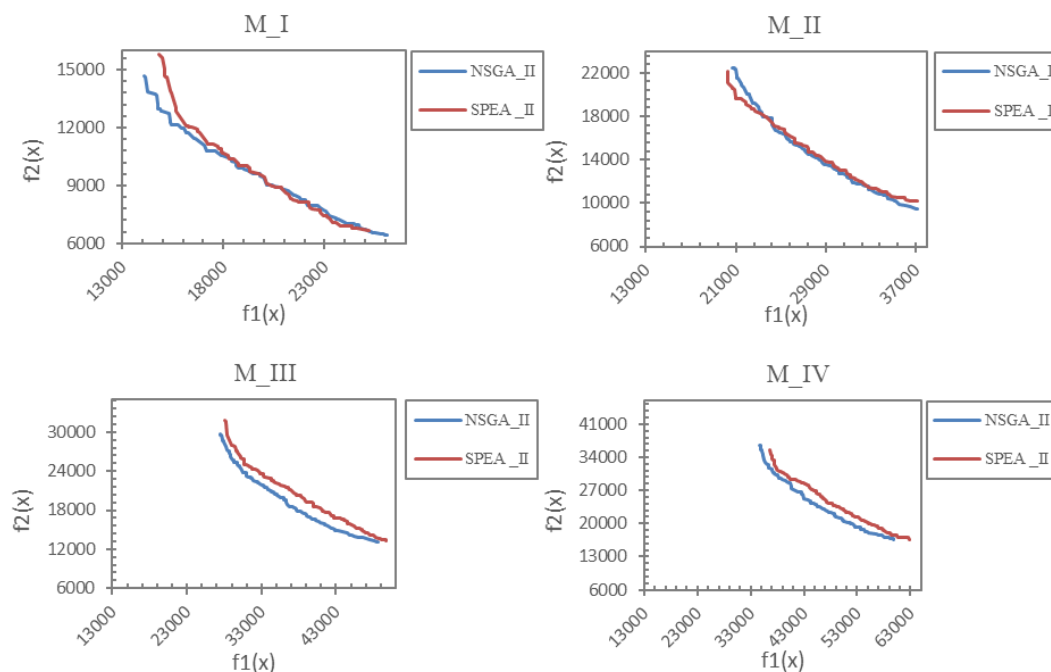
۲-۴-۳-۴ حل مدل FFS-II در ابعاد متوسط و بزرگ

جدول ۱۶-۴ نتایج اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری را براساس شاخص‌های معرفی شده در ابعاد متوسط و بزرگ نشان می‌دهد. طبق نتایج، از نظر شاخص *MID* الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری در تمام مسائل داشته است. از نظر شاخص‌های *S* و *D* الگوریتم SPEA-II در ابعاد متوسط و الگوریتم NSGA-II در ابعاد بزرگ عملکرد بهتری داشتند.

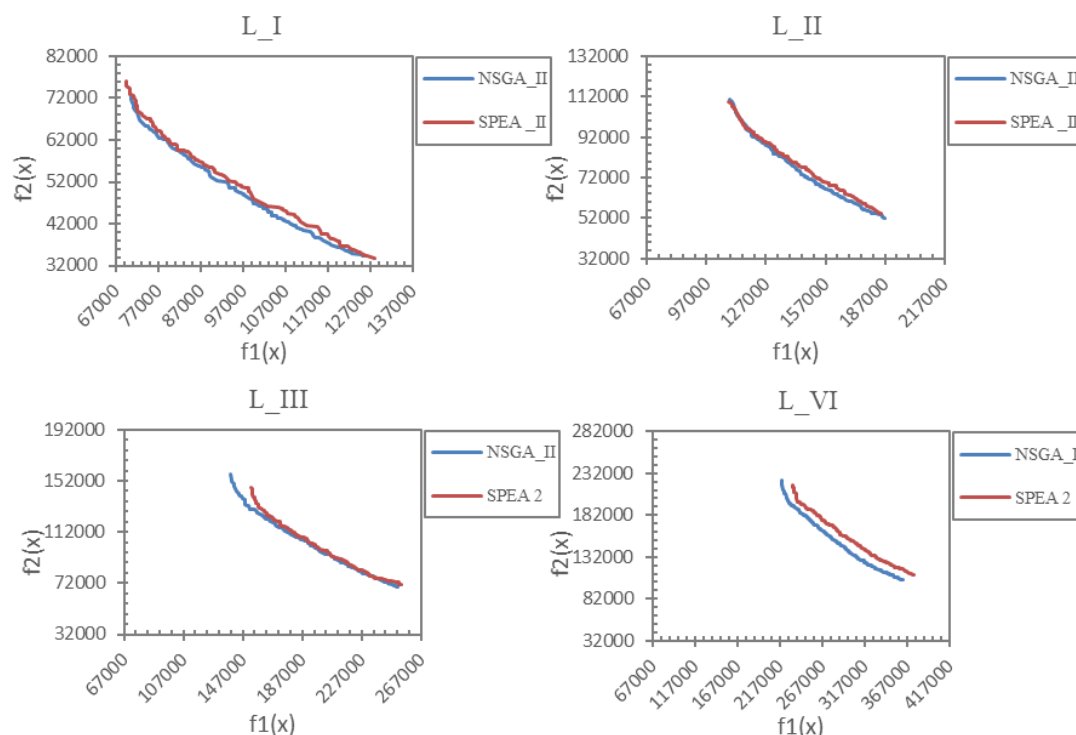
شکل ۴-۱۱ و شکل ۴-۱۲ جواب‌های جبهه‌ی پاراتو را در ابعاد متوسط و بزرگ نشان می‌دهد. مطابق این شکل الگوریتم NSGA-II توانسته است بیشتر جواب‌های جبهه‌ی پاراتوی الگوریتم SPEA-II را در ابعاد مختلف مغلوب نماید که نشان دهنده عملکرد بهتر آن می‌باشد.

جدول ۴-۱۶. نتایج محاسباتی مقادیر معیارهای عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II در ابعاد متوسط و بزرگ (مدل FFS-II)

ابعاد	مساله	ONVG		MID		S		D	
		NSGA-II	SPEA-II	NSGA-II	SPEA -II	NSGA-II	SPEA-II	NSGA-II	SPEA -II
متوسط	M-I	۹۴	۱۰۰	۱۴۶۱۱/۵	۲۱۷۶۲/۹	۱۴۳/۷	۱۶۷/۳	۲۲۵/۱	۲۲۷/۴
	M-II	۱۲۹	۱۳۰	۳۲۰۹۵/۳	۳۲۱۵۷/۱	۱۷۱/۸	۲۵۱/۲	۲۷۶/۸	۲۸۰
	M-III	۱۴۷	۱۵۰	۴۱۴۶۸/۸	۴۲۴۲۱	۱۵۳/۸	۱۸۷/۸	۳۱۴/۸	۳۱۷/۶
	M-IV	۱۷۰	۱۷۰	۵۳۰۲۵/۶	۵۳۷۲۶/۷	۱۵۸/۴	۱۷۲/۷	۳۵۴/۱	۳۵۳/۹
بزرگ	L-I	۱۷۰	۱۶۵	۱۰۸۴۷۵/۸	۱۰۹۲۶۱/۷	۳۹۲/۵	۳۷۴/۵	۵۰۵/۲	۵۰۴/۳
	L-II	۱۹۰	۱۷۸	۱۶۳۷۹۸/۶	۱۶۳۹۰۸/۷	۵۰۶/۲	۴۷۸/۵	۶۲۵/۸	۶۱۰/۵
	L-III	۲۱۷	۲۱۴	۲۱۱۴۵۸/۱	۲۱۹۰۷۶/۱	۷۰۲/۳	۴۵۱/۶	۷۰۱/۸	۶۹۱/۷
	L-IV	۲۵۰	۲۳۹	۳۲۶۹۰۶/۹	۳۴۰۳۲۷	۷۱۷/۵	۵۳۶/۷	۸۳۰/۲	۸۱۷/۱



شکل ۴-۱۱. جواب‌های جبهه پاراتو در مسائل با ابعاد متوسط (مدل FFS-II)



شکل ۱۲-۴. جواب‌های جبهه پاراتو در مسائل با ابعاد بزرگ (مدل FFS-II)

۴-۳-۵ ارزیابی و تحلیل نتایج مدل FFS-III

۴-۳-۵-۱ حل مدل FFS-III در ابعاد کوچک

برای تست مدل ریاضی FFS-III، جدول ۴-۱۷ و جدول ۴-۱۸ مفروض است. در این مدل ماشین‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند. ماشین FULL62 (K_1) جزء ماشین‌های با سطح تکنولوژی بالا است که کارهای تخصیص یافته به آن وارد مرحله ۳ نمی‌شود ($Y_{j,1,3} = 0$) و ماشین‌های BRT3 (K_2) و A100 (K_3) جزء ماشین‌های با سطح تکنولوژی پایین می‌باشد که کارهای تخصیص یافته به آنها باید تمام مراحل را طی نمایند.

جدول ۴-۱۷. زمان پردازش هر کار در هر مرحله کاری برای مدل FFS-III

نام قطعه	کد قطعه	ایستگاه ۱			ایستگاه ۲	ایستگاه ۳	ایستگاه ۴	ایستگاه ۵
		FULL62 (K_1)	A100 (K_2)	BRT3 (K_3)				
فنر اگزوز منیفولد	w - 1	۱۳	۷	۸	۹	۱۸	۴	۵
فنر کونیک سوپاپ هوا	w - 2	۱۵	۱۰	۹	۱۰	۲۰	۶	۵
فنر سوئیچ قطع کن سوخت	w - 3	۱۱	۶	۷	۱۰	۱۶	۴	۴

۵	۸	۲۵	۱۱	۱۰	۱۲	۱۸	$w - 4$	فتر حفاظ زیر کنسول سمند
۴	۵	۲۰	۱۲	۸	۷	۱۲	$w - 5$	فتر زبانه درب موتور پژو ۴۰۵

جدول ۱۸-۴. زمان راه اندازی هر کار در ابعاد کوچک برای مدل FFS-III

زمان های راه اندازی																	
$S_{ij1}^{(1)}$						$S_{ij2}^{(1)}$						$S_{ij3}^{(1)}$					
i/j	۱	۲	۳	۴	۵	i/j	۱	۲	۳	۴	۵	i/j	۱	۲	۳	۴	۵
۰	۱۵	۱۰	۸	۱۲	۱۰	۰	۱۰	۷	۵	۹	۶	۰	۸	۶	۴	۹	۵
۱		۶	۶	۹	۱۰	۱		۴	۴	۶	۶	۱		۳	۳	۵	۵
۲	۸		۸	۱۲	۵	۲	۵		۵	۹	۴	۲	۴		۴	۹	۳
۳	۱۵	۹		۶	۱۰	۳	۱۰	۶		۴	۶	۳	۸	۵		۳	۵
۴	۹	۱۰	۴		۱۰	۴	۶	۷	۳		۶	۴	۵	۶	۲		۵
۵	۱۵	۶	۸	۱۲		۵	۱۰	۴	۵	۹		۵	۸	۳	۴	۹	

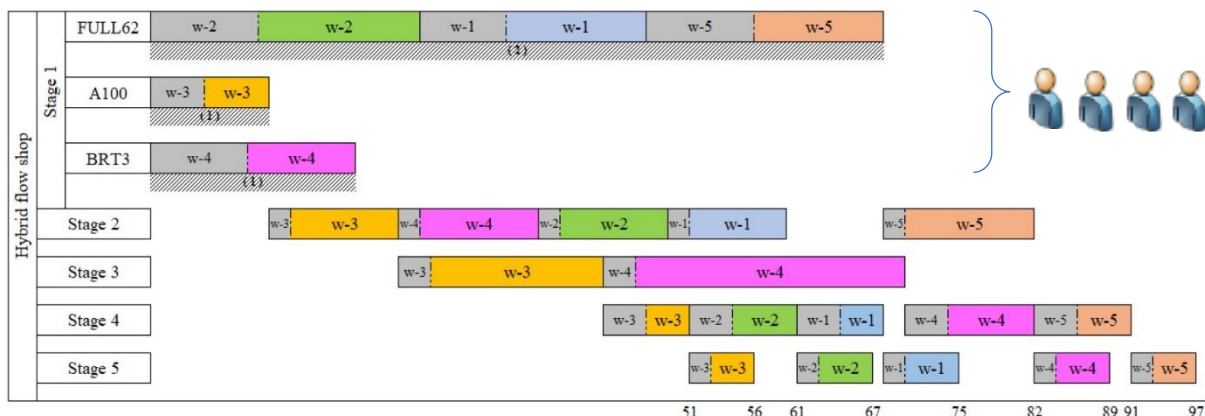
زمان های راه اندازی در مراحل ۲ تا ۵ وابسته به توالی نمی باشد.

$$S_{ij1}^{(2)} = 2, \quad S_{ij1}^{(3)} = 3, \quad S_{ij1}^{(4)} = 4, \quad S_{ij1}^{(5)} = 2$$

جدول ۱۹-۴ نتایج حل مدل را نشان می دهد. براساس نتایج، مقدار بهینه مساله برابر ۹۷ است ($C_{max} = 97$). همچنین جهت رسیدن به این مقدار بهینه تعداد ۴ منبع کمکی (نیروی کار متخصص) مورد نیاز است. نمودار گانت مربوط به این مساله و نحوه به کارگیری منابع کمکی در شکل ۱۳-۴ نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد، کارهای W-1، W-2، و W-5 به دلیل اینکه در مرحله ی یک به ماشین Full62 تخصیص یافتند لذا وارد مرحله ۳ نشدند و مستقیما به مرحله ۴ رفتند.

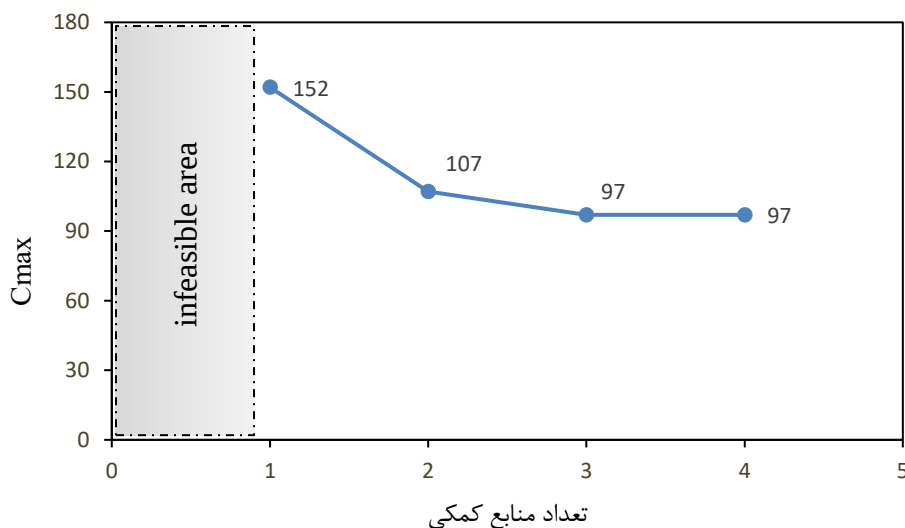
جدول ۱۹-۴. نتایج راه حل ها در مدل FFS-III در ابعاد کوچک

اندازه	مساله	N	$\frac{k}{k_1^{new} k_1^{old}}$		C_{max}	AR_v	$CPU(s)$
small-sized	I	۵	۱	۲	۹۷	۴	۴۱۷۸۴

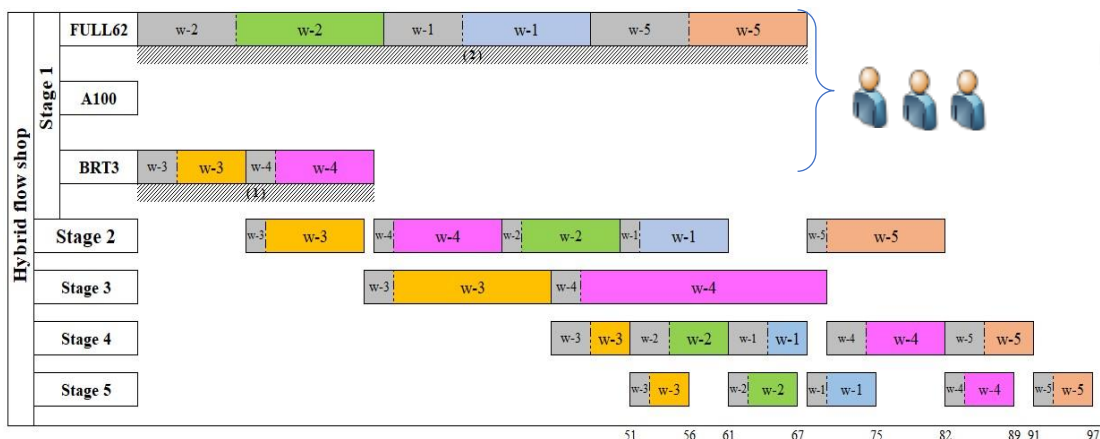


شکل ۴-۱۳. نمودار گانت حالت بهینه (مدل FFS-III)

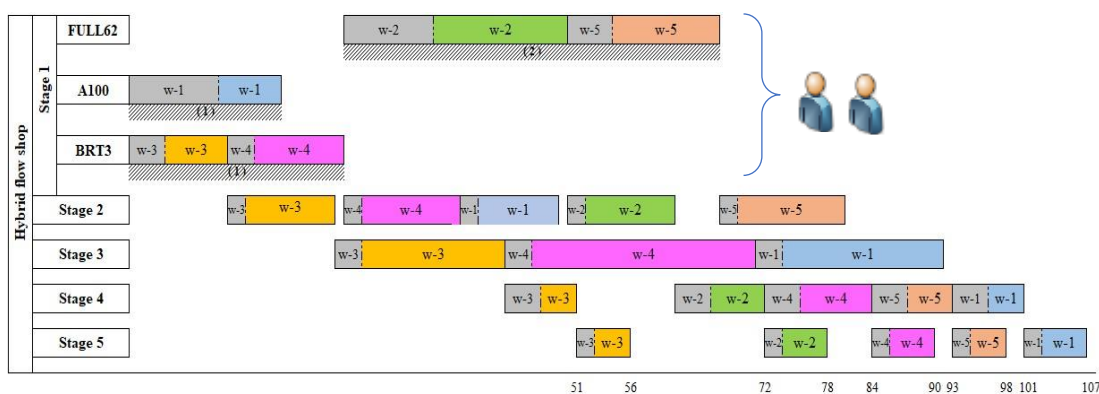
برای اینکه تاثیر منابع کمکی بر زمانبندی مورد بررسی قرار گیرد. در این قسمت با محدود کردن منابع کمکی، تاثیر آن بر تابع هدف ارزیابی می شود. مطابق شکل ۴-۱۴ چنانچه تنها یک منبع کمکی در دسترس باشد تابع هدف (C_{max}) برابر ۱۵۲ خواهد شد و از حالت بهینه ۵۶٪ فاصله خواهد گرفت. ولی اگر تعداد منابع کمکی به ۲ واحد افزایش یابد تابع هدف ۳۰٪ کاهش یافته و به عدد ۱۰۷ می رسد. همچنین از این شکل می توان دریافت با ۳ منبع کمکی همچنان تابع هدف در حالت بهینه قرار داشته و برابر ۹۷ می باشد. از آنجایی که کلیه ماشین ها در ایستگاه ۱ بدون منابع کمکی قادر به پردازش نمی باشند لذا منابع کمکی کمتر از یک فضای حل را غیر موجه کرده و پاسخی برای تابع هدف وجود ندارد. شکل ۴-۱۵ تا شکل ۴-۱۷ نمودار گانت مربوط به هر یک از حالت ها را نشان می دهد.



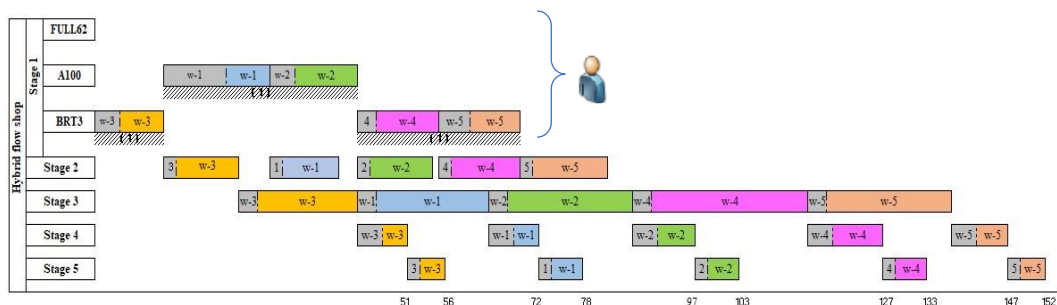
شکل ۴-۱۴. مقایسه تاثیر منابع کمکی بر تابع هدف (مدل FFS-III)



شکل ۴-۱۵. نمودار گانت مدل FFS-III در حالت $AR_v \leq 3$



شکل ۴-۱۶. نمودار گانت مدل FFS-III در حالت $AR_v \leq 2$



شکل ۴-۱۷. نمودار گانت مدل FFS-III در حالت $AR_v \leq 1$

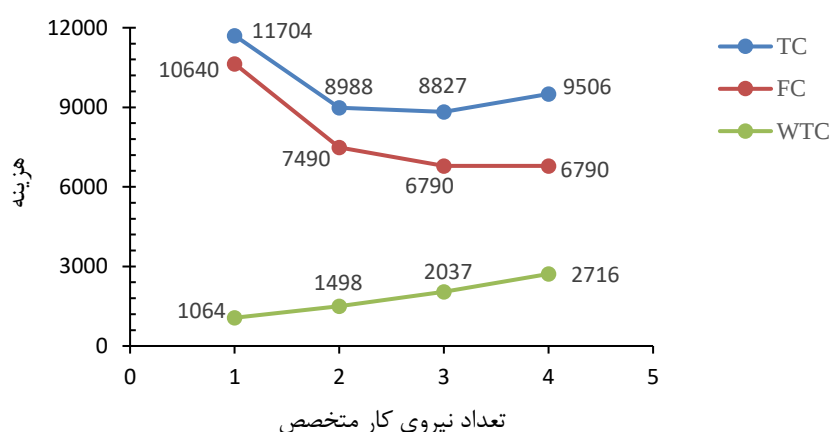
یکی از معیارهایی که برای مدیران سازمان ها در تصمیم‌گیری از اهمیت زیادی برخوردار است، معیار هزینه می‌باشد. با توجه به نظر خبرگان به طور متوسط ۱۰٪ هزینه های تولید مربوط به نیروی کار متخصص می باشد. برای اینکه از نظر شاخص هزینه مساله را بررسی کنیم فرضیات زیر را در نظر می گیریم:

- هزینه هر ساعت استفاده از تسهیلات تولید برابر ۷۰ واحد پولی است.
- هزینه هر ساعت به کارگیری نیروی کار متخصص برابر ۷ واحد پولی می‌باشد.

با استفاده از رابطه (۴-۱۰) شاخص هزینه محاسبه می شود.

$$TC = C_{max} * \{FC + (N * EWC)\} \quad (4-10)$$

در این رابطه TC نشان دهنده هزینه کل و FC نشان دهنده هزینه هرساعت استفاده از تسهیلات می باشد. همچنین N نشان دهنده تعداد نیروی کار متخصص و EWC هزینه هر ساعت بکارگیری آن می باشد. شکل ۴-۱۸ مقدار تاثیر محدودیت منابع کمکی بر شاخص هزینه را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشخص است وقتی تعداد منابع کمکی برابر ۳ باشد شاخص هزینه در بهترین حالت قرار می گیرد. همچنین با ۲ منبع کمکی نیز شاخص هزینه تغییر چندانی ندارد و فقط ۲٪ افزایش می یابد.



شکل ۴-۱۸. مقایسه تاثیر محدودیت منابع کمکی در شاخص هزینه (مدل FFS-III)

۴-۳-۵-۲ حل مدل FFS-III در ابعاد متوسط و بزرگ

به دلیل تک هدفه بودن مدل FFS-III، برای حل آن در ابعاد متوسط و بزرگ از الگوریتم GA و SA استفاده شده است. پارامترهای مدل در ابعاد متوسط و بزرگ مطابق جدول ۴-۲۰ می باشد. در این جدول K_1^{new} ماشینهای با سطح تکنولوژی بالا را نشان می دهد که مرحله ۳ را برای کارهای تخصیص یافته به آن حذف می کند و $(Y_{j,1,3} = 0)$ و K_1^{old} نشان دهنده ماشینهای قدیمی می باشد، که کارهای تخصیص یافته به آنها باید تمام مراحل را به ترتیب طی نمایند.

جدول ۴-۲۰. پارامترهای مدل FFS-III در ابعاد متوسط و بزرگ

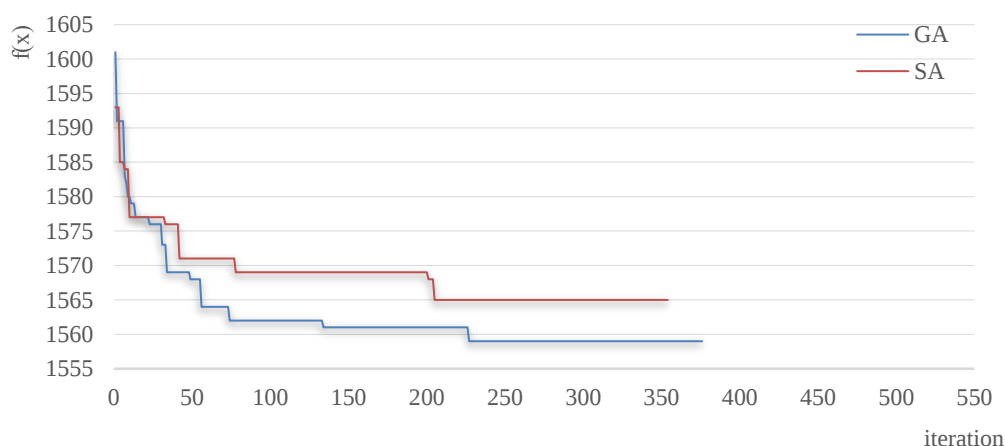
پارامترها	l_1		l_2	l_3	l_4	l_5
	K_1^{new}	K_1^{old}				
$S_{ijk}^{(l)}$	[۱۵, ۱۰]	[۸, ۵]	[۳, ۲]	[۳, ۲]	[۳, ۲]	[۳, ۲]
$P_{kj}^{(l)}$	[۳۰, ۲۵]	[۱۵, ۱۰]	[۲۰, ۱۵]	[۲۵, ۲۰]	[۲۰, ۱۵]	[۲۰, ۱۵]

جدول ۴-۲۱ نتیجه حل مدل در ابعاد متوسط و بزرگ را نشان می دهد. برای سنجش الگوریتمهای پیشنهادی یک ارزیابی با مقایسهی راه حلهای بدست آمده انجام شده است. نتایج نشان می دهد که

الگوریتم ژنتیک توانسته است غیر از مساله III در همه موارد الگوریتم SA را مغلوب نماید. در جدول ۴-۲۱ علاوه بر تابع هدف (C_{max})، مقدار منابع کمکی (AR_v) و کمترین تکرار برای رسیدن به مقدار بهینه ($iteration$) نیز نشان داده شده است. برای مثال با توجه به شاخص $iteration$ در مساله V الگوریتم GA در تکرار ۱۰۷ به مقدار ۵۵۹ برای تابع هدف دست یافت، ولی الگوریتم SA در تکرار ۸۲ به همگرایی رسید و به عدد $C_{max} = ۵۶۲$ رسید و در تکرارهای بعدی تا رسیدن به شرایط خاتمه (۱۵۰ تکرار بدون بهبود تابع هدف یا رسیدن به دمای نهایی) نتوانست مقدار تابع هدف را بهبود بخشد. شکل ۴-۱۹ نحوه همگرایی دو الگوریتم و رسیدن آنها به جواب نزدیک به بهینه را در مساله VII نشان می‌دهد. براساس این شکل الگوریتم ژنتیک بعد از ۳۷۵ تکرار نتوانست به جواب مناسب دست یابد ولی الگوریتم SA بعد از ۳۵۴ تکرار و رسیدن به شرایط خاتمه، نتوانست الگوریتم GA را مغلوب کند.

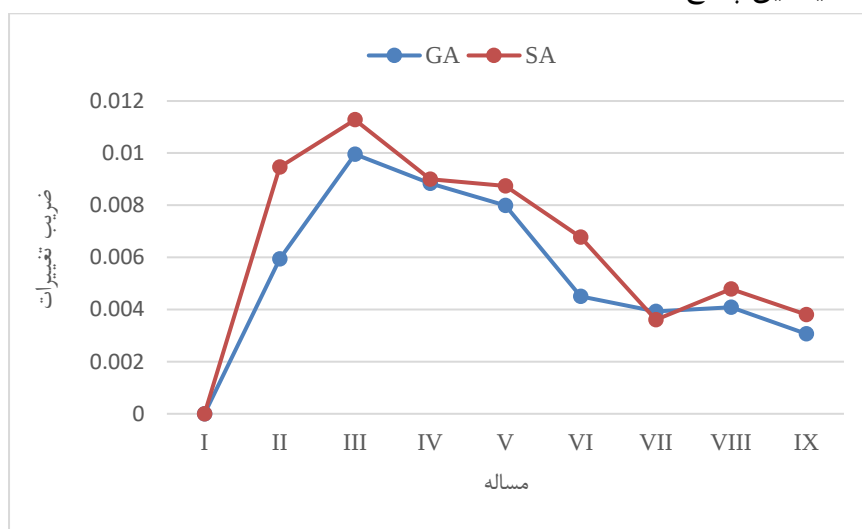
جدول ۴-۲۱. مقایسه نتایج راه حل های الگوریتم های پیشنهادی در ابعاد متوسط و بزرگ (مدل FFS-III)

طبقه بندی	مساله	N	k		GA			SA		
			k_1^{new}	k_1^{old}	C_{max}	AR_v	$iteration$	C_{max}	AR_v	$iteration$
متوسط	II	۱۰	۲	۴	۲۶۸	۵	۴۳	۲۶۹	۴	۱۴۱
	III	۱۵	۳	۴	۳۶۸	۵	۶۹	۳۵۶	۵	۲۳۱
	IV	۲۰	۴	۵	۴۶۴	۷	۲۹۸	۴۷۱	۷	۴۳
	V	۲۵	۶	۶	۵۵۹	۹	۱۰۷	۵۶۲	۹	۸۲
بزرگ	VI	۵۰	۷	۷	۱۰۵۱	۹	۲۳۱	۱۰۶۸	۱۱	۱۰۲
	VII	۷۵	۸	۸	۱۵۵۹	۱۰	۲۲۷	۱۵۶۵	۱۶	۱۰۲
	VIII	۱۰۰	۱۰	۹	۲۰۳۳	۱۷	۳۲۰	۲۰۷۷	۱۹	۱۱۷
	IX	۱۵۰	۱۰	۱۰	۳۰۵۳	۱۸	۳۸۳	۳۰۷۹	۲۳	۲۷۲



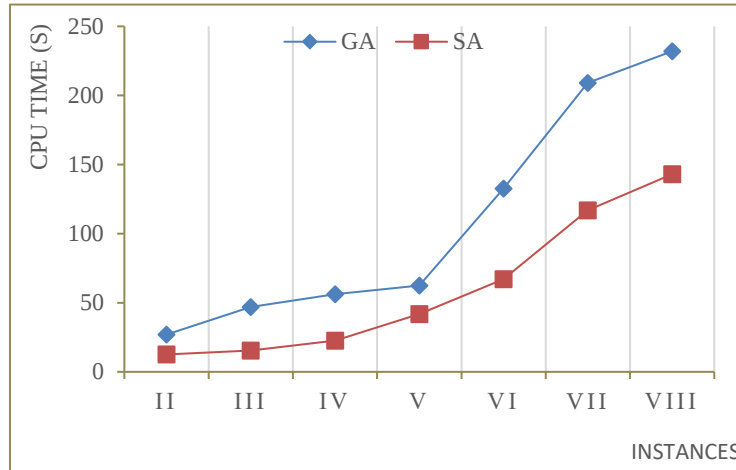
شکل ۱۹-۴. نحوه همگرایی دو الگوریتم پیشنهادی در مساله VII (مدل FFS-III)

برای مقایسه میزان پراکندگی در پاسخ های دو الگوریتم، ضریب تغییرات آنها را در ۳۰ تکرار محاسبه می شود. شکل ۲۰-۴ نشان می دهد در مساله یک هر دو الگوریتم دارای ضریب تغییرات صفر می باشند، یعنی توانسته اند در هر ۳۰ تکرار به جواب یکسان دست پیدا کنند. همچنین در تمام مسائل غیر از مساله VII ضریب تغییرات الگوریتم GA کمتر از SA بوده است، که نشان دهنده انحراف معیار کمتر پاسخ های این الگوریتم نسبت به میانگین پاسخ ها است.



شکل ۲۰-۴. مقایسه شاخص ضریب تغییرات در الگوریتم های GA و SA

شکل ۴-۲۱ نتیجه ارزیابی دو الگوریتم را با استفاده از شاخص زمان نشان می‌دهد. نتیجه گویای این مطلب است سرعت اجرای الگوریتم SA بیشتر از الگوریتم GA بوده و با افزایش ابعاد مساله الگوریتم GA نسبت به الگوریتم SA به مدت زمان بیشتری برای رسیدن به مقدار نهایی نیاز دارد.



شکل ۴-۲۱. میانگین زمان CPU برای دو الگوریتم پیشنهادی (مدل FFS-III)

معمولاً مدیران در شرایط واقعی برای رسیدن به اهداف برنامه‌ریزی شده خود با محدودیت‌های بودجه‌ای مواجه هستند و نمی‌توانند هر مقدار منابع را به صورت آزادانه بکار بگیرند همچنین ممکن است در استخدام نیروی کار متخصص دچار محدودیت باشند، لذا مجبورند زمانبندی‌ها را با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها برنامه‌ریزی نمایند. همچنین سعی می‌کنند تخصیص و توالی کارها را به گونه‌ای زمانبندی نمایند که ماشین‌ها با راندمان بالاتری کار کنند.

ما در اینجا فرض می‌کنیم برای یک دوره‌ی برنامه‌ریزی تعداد ۲۰ کار باید انجام شود. سازمان با محدودیت بودجه ۲۰۰۰۰ واحدی مواجه است و همچنین مدیریت نمی‌تواند بیش از ۷ نیروی کار متخصص را استخدام نماید. هزینه استفاده از ماشین‌های با سطح تکنولوژی بالا (k_1^{new}) برابر ۶۰۰۰ واحد و هزینه استفاده از ماشین‌های قدیمی (k_1^{old}) ۳۰۰۰ واحد می‌باشد. معادله (۴-۱۱) نحوه محاسبه شاخص راندمان را نشان می‌دهد. همچنین کارایی هر ماشین در هر مرحله توسط رابطه (۴-۱۲) محاسبه می‌شود.

$$AEM = Average\{Efficiency(k, L)\} \quad (4-11)$$

$$Efficiency(k, L) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=1 \neq i}^n p_{kj}^{(l)} + s_{ijk}^{(l)}}{C_{max}} \quad \forall k, l \quad (4-12)$$

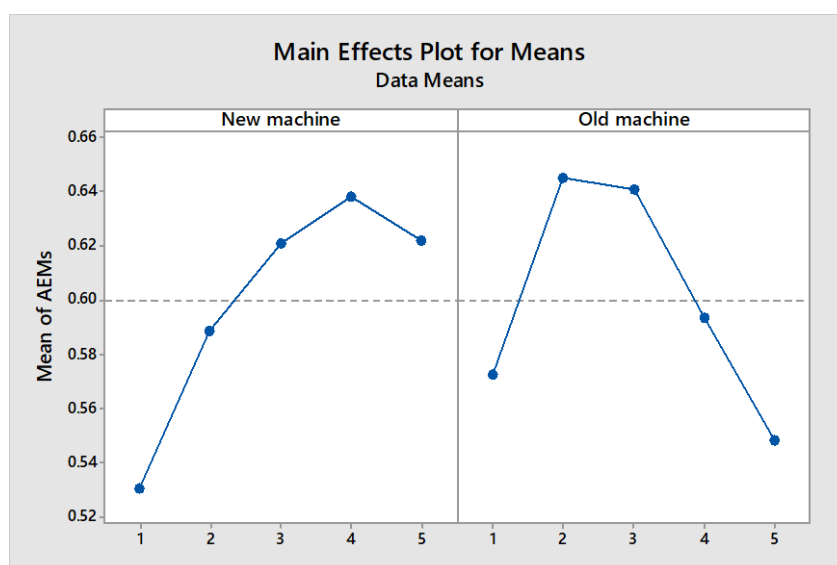
در این روابط AEM نشان دهنده میانگین راندمان کل ماشین‌ها، $p_{kj}^{(l)}$ زمان پردازش کار j بر روی ماشین k و $s_{ijk}^{(l)}$ زمان آماده‌سازی کار j وقتی که بعد از کار i روی ماشین k پردازش می‌شود، می‌باشد. برای بدست آوردن بهترین ترکیب ماشین‌ها، ابتدا پنج سطح از هر نوع ماشین تعریف شده و سپس از روش تاگوشی با شاخص AEM بهترین ترکیب مشخص شده است. جدول ۴-۲۲ سطوح مختلف ماشین‌ها را

¹ Average Efficiency of Machines

نشان می‌دهد. شکل ۲۲-۴ نشان می‌دهد در صورتی تعداد ماشین K_1^{new} برابر ۴ و تعداد ماشین از نوع K_1^{old} برابر ۲ باشد. شاخص میانگین کارایی در بهینه ترین حالت و برابر ۰.۶۹ قرار می‌گیرد. در این حالت به ۱۰ نیروی کار متخصص و ۳۰۰۰۰ واحد پولی احتیاج است.

جدول ۲۲-۴. سطوح در نظر گرفته شده برای پارامتر تعداد ماشین (مدل FFS-III)

سطوح	نوع ماشین
۱, ۲, ۳, ۴, ۵	K_1^{new}
۱, ۲, ۳, ۴, ۵	K_1^{old}



شکل ۲۲-۴. سطح بهینه ماشین‌ها با توجه به شاخص AEM (مدل FFS-III)

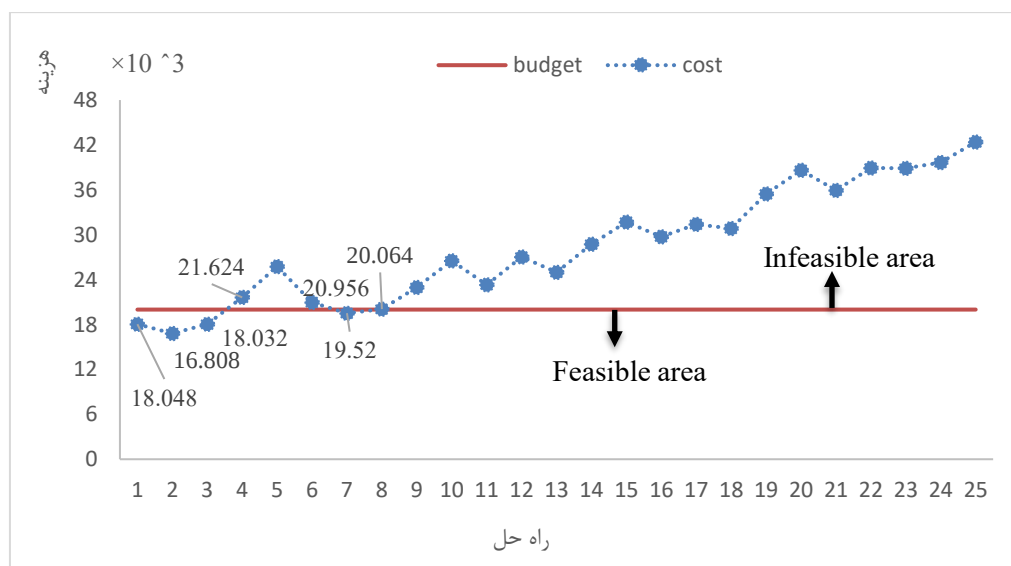
جدول ۲۳-۴ راه حل‌های ممکن را با پنج سطح ماشین و در نظر گرفتن محدودیت نیروی کار متخصص (کمتر مساوی ۷) نشان می‌دهد. پاسخ ۸ با $AEM = 0.64$ بهترین پاسخ می‌باشد ولی به دلیل هزینه ۲۰۰۶۴ واحدی آن مدیریت نمی‌تواند این پاسخ را انتخاب نماید. با توجه به شکل ۲۳-۴ و در نظر گرفتن محدودیت بودجه‌ای، پاسخ‌های ۱، ۲، ۳ و ۷ امکان‌پذیر و قابل ارزیابی می‌باشند. با مقایسه شاخص AEM در این پاسخ‌ها مشخص می‌شود که پاسخ ۷ با ۱۹۵۲۰ واحد هزینه، ۶ نیروی کار متخصص، تعداد ۲ ماشین از نوع K_1^{new} و تعداد ۲ ماشین از نوع K_1^{old} بهینه ترین انتخاب می‌باشد.

جدول ۲۳-۴. مقایسه راه حل‌ها با توجه به شاخص AEM و محدودیت نیروی کار متخصص و محدودیت هزینه‌ای

(مدل FFS-III)

راه‌حل‌ها	K_1^{new}	K_1^{old}	نیروی کار متخصص ($AR \leq 7$)	C_{max}	AEM	هزینه
۱	۱	۱	۳	۵۶۴	۰.۴۵۶	۱۸۰۴۸
۲	۱	۲	۴	۳۸۲	۰.۵۷۷	۱۶۸۰۸
۳	۱	۳	۵	۳۲۲	۰.۶	۱۸۰۳۲
۴	۱	۴	۶	۳۱۸	۰.۵۳۹	۲۱۶۲۴
۵	۱	۵	۷	۳۲۲	۰.۴۸۰	۲۵۷۶۰

۲۰۹۵۶	۰.۵۴۷	۴۰۳	۵	۱	۲	۶
۱۹۵۲۰	۰.۶۳۲	۳۰۵	۶	۲	۲	۷
۲۰۰۶۴	۰.۶۴۵	۲۶۴	۷	۳	۲	۸
۲۲۹۶۸	۰.۵۸۶	۲۶۱	۷	۴	۲	۹
۲۶۵۰۰	۰.۵۲۸	۲۶۵	۷	۵	۲	۱۰
۲۳۳۲۸	۰.۶۰۰	۳۲۴	۷	۱	۳	۱۱
۲۷۰۴۸	۰.۵۳۳	۳۲۲	۷	۲	۳	۱۲
۲۴۹۶۰	۰.۵۸۷	۲۶۰	۷	۳	۳	۱۳
۲۸۷۲۸	۰.۵۲۱	۲۶۶	۷	۴	۳	۱۴
۳۱۶۸۰	۰.۴۸۰	۲۶۴	۷	۵	۳	۱۵
۲۹۷۱۶	۰.۵۳۶	۳۲۳	۷	۱	۴	۱۶
۳۱۴۰۸	۰.۵۱۶	۳۰۲	۷	۲	۴	۱۷
۳۰۸۵۶	۰.۵۲۳	۲۶۶	۷	۳	۴	۱۸
۳۵۴۵۶	۰.۴۵۶	۲۷۷	۷	۴	۴	۱۹
۳۸۶۴۰	۰.۴۲۶	۲۷۶	۷	۵	۴	۲۰
۳۵۹۵۲	۰.۴۸۵	۳۲۱	۷	۱	۵	۲۱
۳۸۹۳۶	۰.۴۴۸	۳۱۴	۷	۲	۵	۲۲
۳۸۸۹۶	۰.۴۴۴	۲۸۶	۷	۳	۵	۲۳
۳۹۶۶۴	۰.۴۳۸	۲۶۸	۷	۴	۵	۲۴
۴۲۴۰۰	۰.۴۱۲	۲۶۵	۷	۵	۵	۲۵



شکل ۲۳-۴. مقایسه راه حل های شدنی با اعمال محدودیت های بودجه ای (مدل FFS-III)

۴-۴ جمع‌بندی

در این فصل، مدل‌های ریاضی معرفی شده برای حل مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی نامرتب و زمان ستاپ وابسته به توالی به وسیله یک مثال واقعی از صنعت فنر سازی مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین الگوریتم‌های فراابتکاری متناسب با هر مدل در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ آزمایش شده و نتایج آنها با راه‌حل‌های دقیق بدست آمده مقایسه شد. نتایج آزمایشات نشان داد که همه الگوریتم‌های پیشنهادی در ابعاد کوچک موفق شدند در یک زمان محاسباتی معقول به راه‌حل‌های بهینه دست یابند. در ابعاد متوسط و بزرگ با توجه به شاخص‌های ارزیابی، مشخص شد الگوریتم NSGA-II در مقایسه با الگوریتم SPEA-II عملکرد بهتری از خود نشان داده و به جواب‌های با کیفیت بالاتری دست یافته است. همچنین در مدل تک هدفه الگوریتم GA در مقایسه با الگوریتم SA عملکرد بهتری در ابعاد متوسط و بزرگ داشته است. البته از نظر زمانی سرعت اجرای الگوریتم SA بیشتر از الگوریتم GA بوده است. همچنین در تحلیل‌های تکمیلی مشخص گردید هرچه کارها به ماشین‌های با سطح تکنولوژی بالاتر اختصاص یابد زمان تکمیل کارها و مصرف انرژی پایین‌تر است ولی هزینه تولید بالاتر می‌رود. از طرف دیگر، هرچه مشارکت ماشین‌های قدیمی در تولید بیشتر می‌شود مصرف انرژی و زمان تکمیل بالاتر می‌رود ولی هزینه تولید پایین‌تر است.

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادات آتی

۵-۱ مقدمه

مسائل زمانبندی به خاطر تاثیر بسیار زیادی که بر روی بهره‌وری منابع و راندمان تولید دارند، جایگاه ویژه‌ای در صنایع تولیدی پیدا کرده‌اند. در میان انواع مختلف مسائل زمانبندی، مساله زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر (FFSP) به خاطر کاربرد زیاد در صنایع تولیدی مورد توجه بیشتر محققین این حوزه بوده است. ما نیز در این پژوهش با توجه به اهمیت موضوع، و شکاف‌های تحقیقاتی در ادبیات موضوعی بر آن شدیم تا موضوع زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر را با در نظر گرفتن محدودیت‌های کاربردی و جدید مورد مطالعه قرار دهیم. از آنجایی که هزینه‌های عملیاتی موضوع مهمی است که منعکس کننده بازده منابع بوده و هم برای تولید کننده و هم برای مشتری اهمیت زیادی دارد و می‌بایست در فرآیندهای برنامه‌ریزی و زمانبندی مورد توجه قرار گیرد، در این پژوهش موضوع کاهش مستقیم هزینه‌های تولید به عنوان یکی از جنبه‌های مهم تولید اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به اینکه امروزه مصرف انرژی به یکی از مهمترین چالش‌های امروزی در صنایع تولیدی تبدیل شده است و محقق بر روی بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع تولیدی تمرکز زیادی نموده‌اند. ما نیز در بخشی از این پژوهش به موضوع زمانبندی تولید با رویکرد کاهش مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های تولید به صورت توأمان پرداخته‌ایم.

در صنایع تولیدی علاوه بر منابع اصلی تولید، منابع کمکی دیگری مانند اپراتورها، ربات‌های صنعتی، فضا و ابزارآلات نه تنها در پردازش کارها مورد نیاز هستند بلکه همواره با محدودیت‌هایی مواجه می‌شوند. با این حال در بررسی ادبیات موضوعی ملاحظه شد که اکثر مطالعات در حوزه زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، ماشین را به عنوان تنها منبع محدود کننده مورد مطالعه قرار داده‌اند و منابع کمکی دیگر را در نظر نگرفته‌اند. با توجه به اهمیت این موضوع و شکاف مطالعاتی یاد شده، در بخش دیگری از این پژوهش موضوع محدودیت منابع کمکی را با هدف به حداقل رساندن حداکثر زمان تکمیل کارها مورد مطالعه قرار دادیم. و نتایج آن را بررسی نمودیم.

در این فصل به نتایج حاصل از اجرای مدل‌های پیشنهادی در ابعاد کوچک و به نتایج اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسائل در ابعاد متوسط و بزرگ پرداخته می‌شود. همچنین در پایان با توجه به آگاهی‌های بدست آمده از مطالعات صورت گرفته در این حوزه، پیشنهاداتی برای مطالعات آتی جهت بهره‌برداری محققین ارائه می‌گردد.

۵-۲ نتیجه گیری

تحقیق حاضر به بررسی و حل مساله زمانبندی در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی نامرتب، زمان‌های راه‌اندازی وابسته به توالی و وابستگی فرآیندهای پردازش به منبع اصلی (ماشین) با اهداف کاهش هزینه تولید، به حداقل رساندن حداکثر زمان تولید و کاهش مصرف انرژی پرداخته است.

این بررسی در شرایطی انجام می‌شود که به دلیل استفاده از ماشین‌آلات پیشرفته با قابلیت انجام چند عملیات بر روی کارها در مرحله اول، کارهایی که با این نوع ماشین‌آلات پردازش می‌شوند نیازی به پردازش در برخی از مراحل بعدی ندارند. این سیستم تولیدی در این پژوهش تحت عنوان مراحل پردازش وابسته به ماشین تعریف می‌شود. بعلاوه اینکه در جهت نزدیک شدن مساله به شرایط دنیای واقعی، زمان‌های آماده‌سازی به صورت وابسته به توالی در نظر گرفته شده است. برای حل این مساله، ۳ مدل ریاضی عدد صحیح مختلط با توابع هدف متفاوت پیشنهاد گردید.

در مدل اول (FFS-I) تابع هدف هزینه تولید به عنوان یک هدف جدید و متفاوت از مطالعات قبلی، در کنار تابع هدف حداکثر زمان تکمیل (Makespan) به عنوان یک هدف کلاسیک مورد بررسی قرار گرفت. برای روشن ساختن هزینه‌های تولید ماشین‌آلات و منابع مرتبط با آن، این هزینه‌ها به دو دسته‌ی هزینه‌های وابسته به زمان و هزینه‌های وابسته به فرآیند تقسیم شد. با استفاده از یک مثال در دنیای واقعی که برگرفته از یک مطالعه موردی در صنعت تولید فنر می‌باشد، مدل ریاضی آزمایش و نحوه عملکرد آن ارزیابی گردید. سپس با بررسی ظرفیت اشغال شده ماشین‌ها در پاسخ‌های بهینه‌ی جبهه پارا تو مشخص شد که هر چه کارهای بیشتری به ماشین‌های با سطح تکنولوژی بالا تخصیص یابد مقدار Makespan کاهش یافته ولی مجموع هزینه‌های تولید افزایش می‌یابد اما بالعکس با افزایش مشارکت ماشین‌های قدیمی در تولید، هزینه‌های پردازش کاهش یافته و مقدار Makespan افزایش می‌یابد. از آنجایی که مساله مورد بررسی جزء مسائل NP-hard است، برای حل مساله در ابعاد متوسط و بزرگ و یافتن راه حل‌های بهینه یا تقریباً بهینه در زمان اجرای مناسب، الگوریتم ژنتیک چند هدفه مبتنی بر مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و الگوریتم تکاملی مبتنی بر قدرت پارتو (SPEA-II) پیشنهاد گردید. برای بررسی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی، بهترین پاسخ‌های آنها در ابعاد کوچک با جواب‌های بدست آمده توسط الگوریتم دقیق اپسیلون-محدودیت مقایسه شد. نتایج شاخص‌های ارزیابی $ONVG$ ، ER و GD نشان داد که هر دو الگوریتم عملکرد خوبی داشتند و توانستند به جواب‌های بهینه دست پیدا کنند. در ابعاد بزرگ به دلیل عدم وجود جواب بهینه، دو الگوریتم پیشنهادی با شاخص‌های $ONVG$ ، MID و S و D با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که الگوریتم NSGA-II از نظر کارایی و کیفیت پاسخ‌ها، عملکرد بهتری دارد.

با توجه به اهمیت بالای مباحث زیست محیطی در شرایط امروزی و توجه روزافزون مدیران به کنترل مصرف انرژی در واحدهای تولیدی، مدل پیشنهادی دوم (FFS-II) جهت حداقل کردن مقدار مصرف انرژی کل و هزینه فرآیند به صورت توانمند ارائه گردید. برای بررسی شرایط کاربردی در این مدل، زمان ترخیص و آماده بودن کارها برای پردازش به صورت متفاوت از هم و غیر صفر لحاظ شد. همچنین محدودیت در دسترس بودن ماشین‌ها و عدم امکان پردازش برخی کارها توسط بعضی از ماشین‌ها در این مدل مورد بررسی قرار گرفت. برای اطمینان از عملکرد مناسب آن، این مدل در مثال واقعی برگرفته شده از صنعت فنر سازی سنجدیه و صحت عملکرد آن ارزیابی شد. در این مدل نیز همانند مدل قبل برای حل آن در ابعاد متوسط و بزرگ از دو الگوریتم NSGA-II و SPEA-II استفاده گردید. به منظور اطمینان از حفظ کارایی

دو الگوریتم در حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ، نتایج بدست آمده در قالب شاخص‌های ارزیابی بهینه‌سازی چندهدفه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این ارزیابی مبتنی بر شاخص‌های S, MID, ONVG و D نشان‌دهنده برتری الگوریتم NSGA-II و توفیق آن در حل مسائل بزرگ با حفظ کارایی مناسب بود. مدل FFS-II با دو تابع هدف هزینه تولید و مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفت، درحالیکه زمان تکمیل کارها نیز در مواقع زیادی اهمیت داشته و حتی دارای محدودیت می‌باشد. لذا در راستای تکمیل تحلیل نتایج با لحاظ زمان تکمیل کارها، این مساله در دو حالت آزاد بودن زمان تکمیل کارها (Makespan) و اعمال محدودیت بر روی آن حل و نتایج حاصل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج این تحلیل بیانگر صحت عملکرد رویکرد پیشنهادی در حل مساله با لحاظ محدودیت‌های عملیاتی ازجمله زمان تکمیل کارها بود.

موضوع منابع کمکی از دیگر موارد حائز اهمیت در مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر می‌باشد که اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته است. مدل (FFS-III)، مساله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر را با منابع کمکی جهت به حداقل رساندن حداکثر زمان تکمیل کارها مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که مدل به خوبی توانسته است کارها را زمانبندی کرده و تعداد منابع کمکی مورد نیاز را اندازه‌گیری نماید. به دلیل اینکه مدیران در دنیای واقعی جهت تامین منابع کمکی با محدودیت‌هایی مواجه هستند، در این مدل محدودیتی برای بکارگیری منابع کمکی اعمال گردید و کارها مجدداً زمانبندی شدند. نتیجه کار، نشان دهنده کارایی مدل در اعمال محدودیت منابع کمکی بود و مدل توانست با رعایت شرایط محدود کننده، کارها را مجدداً زمانبندی نماید. به دلیل اهمیت فراوان فاکتور هزینه در تصمیم‌گیری مدیران، یک معیار هزینه‌ای برای تصمیم‌گیری در انتخاب راه‌حل مناسب معرفی گردید و راه‌حل‌های بدست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. از آنجا که این مدل نیز در زمره مسائل سخت قرار می‌گیرد، برای حل آن در ابعاد متوسط و بزرگ از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک (GA) و شبیه‌سازی تبرید (SA) استفاده شد. نتایج ارزیابی‌ها در ابعاد کوچک نشان داد که هر دو الگوریتم توانسته‌اند به جواب بهینه در یک زمانی کمتر از زمان الگوریتم دقیق دست یابند. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهاد شده در ابعاد متوسط و بزرگ تعداد ۸ مساله طراحی گردید. مقایسه پاسخ‌های بدست آمده حاکی از آن است که در اکثر مسائل الگوریتم ژنتیک توانسته است به جواب‌های بهینه‌تری نسبت به الگوریتم SA دست یابد. همچنین نتایج بررسی شاخص ضریب تغییرات نیز عملکرد بهتر الگوریتم GA را تایید نموده است. در پایان برای کاربردی‌تر کردن پژوهش، موضوع محدودیت بودجه‌ای و محدودیت به کارگیری منابع کمکی (نیروی کار متخصص) بر روی نتایج مدل اعمال گردید و یک شاخص کارایی (AEM) برای اندازه‌گیری کارایی ماشین‌ها در هر راه‌حل معرفی شد. سپس نتایج راه‌حل‌ها با توجه به محدودیت‌های یاد شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۵-۳ پیشنهادات آتی

تحقیق پیشرو با موضوع زمانبندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی نامرتبط و زمان‌های راه‌اندازی وابسته به توالی در راستای کاهش شکاف‌های موجود در ادبیات موضوع، صورت گرفته است. با این حال، به منظور انجام تحقیقات آتی موضوعات مختلفی در این حوزه می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. موارد زیر برای انجام تحقیقات بیشتر پیشنهاد می‌گردد:

- با افزودن محدودیت‌های عملیاتی دیگر مانند محدودیت ظرفیت انبار، امکان خرابی ماشین، بحث نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و تاثیر موضوع ندای مشتری بر زمانبندی تولید، می‌توان مساله را مورد مطالعه قرار داد.
- در این پژوهش فضای حل در یک محیط قطعی صورت پذیرفته است در صورتی که می‌توان برای هرچه نزدیکتر شدن به شرایط دنیای واقعی مساله را در فضای عدم قطعیت و استفاده از پارامترهای فازی مورد پژوهش قرار داد.
- برای حل مسائل دو هدفه در این پژوهش از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و SPEA-II استفاده شد، در حالی که می‌توان از الگوریتم‌های دیگری مانند: الگوریتم MOPSO^۱، الگوریتم MOSA^۲، و الگوریتم تلفیقی هوشمند LNSGA-II استفاده نمود.
- این پژوهش موضوع زمانبندی با ماشین‌های سطح تکنولوژی متفاوت و وابستگی فرآیندهای پردازش کارها به ماشین در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر صورت پذیرفته است، در حالی که می‌تواند در محیط‌های جریان کار کارگاهی یا محیط‌های ترکیبی نیز مورد مطالعه قرار گیرد.
- این پژوهش را می‌توان در صنایعی مانند صنعت کاشی و سرامیک، صنایع نساجی و صنعت تولید پیچ و مهره مجدد مورد مطالعه قرار داد و نتایج آن را با نتایج بدست آمده در این تحقیق مقایسه نمود.
- می‌توان مساله در نظر گرفته شده در این تحقیق را با اهداف دیگری نظیر موضوع ریسک و خطرات ارگونومیکی و موضوع گردش شغلی کارکنان و رضایتمندی آنان مورد مطالعه قرار داد.

¹ Multi Objective Particle Swarm

² Multi Objective Simulated Annealing

- [1] A. Hasani and S. M. H. Hosseini, "A bi-objective flexible flow shop scheduling problem with machine-dependent processing stages: Trade-off between production costs and energy consumption," *Appl. Math. Comput.*, vol. 386, no. in press, p. in press, 2020.
- [2] D. H. Cummings and M. P. J. Egbelu, "Minimizing production flow time in a process and assembly job shop," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 36, no. 8, pp. 2315–2332, 1998.
- [3] A. Maleki-Daroukolaei, M. Modiri, R. Tavakkoli-Moghaddam, and I. Seyyedi, "A three-stage assembly flow shop scheduling problem with blocking and sequence-dependent set up times," *J. Ind. Eng. Int.*, vol. 8, no. 1, p. 26, Dec. 2012.
- [4] I.-L. Wang, Y.-C. Wang, and C.-W. Chen, "Scheduling unrelated parallel machines in semiconductor manufacturing by problem reduction and local search heuristics," *Flex. Serv. Manuf. J.*, vol. 25, no. 3, pp. 343–366, 2013.
- [5] P. Fattahi and M. M. Ahmadian, *Advanced topics in scheduling and sequencing*. Tehran: Alzahra University, 2017.
- [6] K. R. Baker and D. Trietsch, "Safe scheduling: Setting due dates in single-machine problems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 196, no. 1, pp. 69–77, 2009.
- [7] A. Allahverdi, "The third comprehensive survey on scheduling problems with setup times/costs," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 246, no. 2, pp. 345–378, 2015.
- [8] M. Afzalirad and J. Rezaeian, "Resource-constrained unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times, precedence constraints and machine eligibility restrictions," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 98, pp. 40–52, 2016.
- [9] E. V. Sibirskaia, L. V. Oveshnikova, L. A. Mikheykina, and I. R. Lyapina, "Statistics of Production Costs," in *Economic Systems Analysis: Statistical Indicators*, Springer, 2019, pp. 119–125.
- [10] P. Senthilkumar and S. Narayanan, "Literature Review of Single Machine Scheduling Problem with Uniform Parallel Machines," *Intell. Inf. Manag.*, vol. 02, no. 08, pp. 457–474, 2010.
- [11] P. M. França, J. N. D. Gupta, A. S. Mendes, P. Moscato, and K. J. Veltink, "Evolutionary algorithms for scheduling a flowshop manufacturing cell with sequence dependent family setups," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 48, no. 3, pp. 491–506, 2005.
- [12] T. S. Lee and Y. T. Loong, "A review of scheduling problem and resolution methods in flexible flow shop," *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 10, no. 1, pp. 67–88, 2019.
- [13] J. N. D. Gupta and E. A. Tunc, "Minimizing tardy jobs in a two-stage hybrid flowshop," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 36, no. 9, pp. 2397–2417, 1998.
- [14] C.-Y. Liu and S.-C. Chang, "Scheduling flexible flow shops with sequence-dependent setup effects," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 16, no. 4, pp. 408–419, 2000.
- [15] T. H. Tran and K. M. Ng, "A water-flow algorithm for flexible flow shop

- scheduling with intermediate buffers,” *J. Sched.*, vol. 14, no. 5, pp. 483–500, 2011.
- [16] A. Mollaei, M. Mohammadi, and B. Naderi, “A bi-objective MILP model for blocking hybrid flexible flow shop scheduling problem: robust possibilistic programming approach,” *Int. J. Manag. Sci. Eng. Manag.*, vol. 14, no. 2, pp. 137–146, 2019.
- [17] S. M. H. Hosseini, “A multi-objective genetic algorithm (MOGA) for hybrid flow shop scheduling problem with assembly operation,” *J. Ind. Syst. Eng.*, vol. 10, no. special issue on production and inventory, pp. 132–154, 2017.
- [18] Ebrahim Asadi Gangraj, Nasim Nahavandi, “Developing a Lagrangian Relaxation Method for Flexible Flowshop Scheduling Problem,” *J. Ind. Eng. Res. Prod. Syst.*, vol. 3, no. 6, pp. 121–131, 2016.
- [19] M. K. Marichelvam, M. Geetha, and Ö. Tosun, “An improved particle swarm optimization algorithm to solve hybrid flowshop scheduling problems with the effect of human factors—A case study,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 114, p. 104812, 2020.
- [20] F. R. abyaneh Saiedeh Gholami, “Efficient Algorithms for Solving Flexible Flow shop Scheduling Problem with Unrelated Parallel Machines and Sequence-dependent Setup Times Considering Earliness/Tardiness Minimization,” *Prod. Oper. Manag.*, vol. 7, no. 1, pp. 65–82, 2016.
- [21] V. Yaurima, L. Burtseva, and A. Tchernykh, “Hybrid flowshop with unrelated machines, sequence-dependent setup time, availability constraints and limited buffers,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 56, no. 4, pp. 1452–1463, 2009.
- [22] J. Behnamian and M. Zandieh, “A discrete colonial competitive algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize earliness and quadratic tardiness penalties,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 12, pp. 14490–14498, 2011.
- [23] D. Li, X. Meng, Q. Liang, and J. Zhao, “A heuristic-search genetic algorithm for multi-stage hybrid flow shop scheduling with single processing machines and batch processing machines,” *J. Intell. Manuf.*, vol. 26, no. 5, pp. 873–890, 2015.
- [24] O. Shahvari and R. Logendran, “An enhanced tabu search algorithm to minimize a bi-criteria objective in batching and scheduling problems on unrelated-parallel machines with desired lower bounds on batch sizes,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 77, pp. 154–176, 2017.
- [25] M. Ebrahimi, S. M. T. F. Ghomi, and B. Karimi, “Hybrid flow shop scheduling with sequence dependent family setup time and uncertain due dates,” *Appl. Math. Model.*, vol. 38, no. 9–10, pp. 2490–2504, 2014.
- [26] E. A. Garavito-Hernández, E. Peña-Tibaduiza, L. E. Perez-Figueredo, and E. Moratto-Chimenty, “A meta-heuristic based on the Imperialist Competitive Algorithm (ICA) for solving Hybrid Flow Shop (HFS) scheduling problem with unrelated parallel machines,” *J. Ind. Prod. Eng.*, pp. 1–9, 2019.
- [27] J. A. Ventura and D. Kim, “Parallel machine scheduling about an unrestricted due date and additional resource constraints,” *Iie Trans.*, vol. 32, no. 2, pp. 147–153, 2000.
- [28] E. B. Edis and C. Oguz, “Parallel machine scheduling with additional resources: a lagrangian-based constraint programming approach,” in *International Conference on AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems*, 2011, pp. 92–98.
- [29] S. A. Torabi, N. Sahebjamnia, S. A. Mansouri, and M. A. Bajestani, “A particle swarm optimization for a fuzzy multi-objective unrelated parallel machines

- scheduling problem,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 13, no. 12, pp. 4750–4762, 2013.
- [30] E. B. Edis, C. Oguz, and I. Ozkarahan, “Parallel machine scheduling with additional resources: Notation, classification, models and solution methods,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 230, no. 3, pp. 449–463, 2013.
 - [31] L. Fanjul-Peyro, F. Perea, and R. Ruiz, “Models and matheuristics for the unrelated parallel machine scheduling problem with additional resources,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 260, no. 2, pp. 482–493, 2017.
 - [32] T. Arbaoui and F. Yalaoui, “Solving the unrelated parallel machine scheduling problem with additional resources using constraint programming,” in *Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems*, 2018, pp. 716–725.
 - [33] A. Costa, F. A. Cappadonna, and S. Fichera, “A hybrid genetic algorithm for job sequencing and worker allocation in parallel unrelated machines with sequence-dependent setup times,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 69, no. 9–12, pp. 2799–2817, 2013.
 - [34] F. A. Cappadonna, A. Costa, and S. Fichera, “Makespan minimization of unrelated parallel machines with limited human resources,” *Procedia CIRP*, vol. 12, pp. 450–455, 2013.
 - [35] A. Costa, F. A. Cappadonna, and S. Fichera, “A novel genetic algorithm for the hybrid flow shop scheduling with parallel batching and eligibility constraints,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 75, no. 5–8, pp. 833–847, 2014.
 - [36] Z. H. Han, X. F. Ma, L. L. Yao, and H. B. Shi, “Cost optimization problem of hybrid flow-shop based on PSO algorithm,” in *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 532, pp. 1616–1620.
 - [37] S. Jiang, M. Liu, J. Hao, and W. Qian, “A bi-layer optimization approach for a hybrid flow shop scheduling problem involving controllable processing times in the steelmaking industry,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 87, pp. 518–531, 2015.
 - [38] S. Schulz, “A multi-criteria MILP formulation for energy aware hybrid flow shop scheduling,” in *Operations Research Proceedings 2016*, Springer, 2018, pp. 543–549.
 - [39] S. Schulz, “A Genetic Algorithm to Solve the Hybrid Flow Shop Scheduling Problem with Subcontracting Options and Energy Cost Consideration,” in *International Conference on Information Systems Architecture and Technology*, 2018, pp. 263–273.
 - [40] S. Li, “A hybrid two-stage flowshop with part family, batch production, major and minor set-ups,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 102, no. 1, pp. 142–156, 1997.
 - [41] M. E. Kurz and R. G. Askin, “An adaptable problem-space-based search method for flexible flow line scheduling,” *IIE Trans.*, vol. 33, no. 8, pp. 691–693, 2001.
 - [42] H. Soewandi and S. E. Elmaghraby, “Sequencing three-stage flexible flowshops with identical machines to minimize makespan,” *IIE Trans.*, vol. 33, no. 11, pp. 985–994, 2001.
 - [43] F. Riane, A. Artiba, and S. E. Elmaghraby, “Sequencing a hybrid two-stage flowshop with dedicated machines,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 40, no. 17, pp. 4353–4380, 2002.
 - [44] H. Allaoui and A. Artiba, “Scheduling two-stage hybrid flow shop with availability constraints,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 33, no. 5, pp. 1399–1419, 2006.
 - [45] R. Ruiz and C. Maroto, “A genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent setup times and machine eligibility,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 169, no. 3, pp. 781–800, 2006.

- [46] M. Gholami, M. Zandieh, and A. Alem-Tabriz, "Scheduling hybrid flow shop with sequence-dependent setup times and machines with random breakdowns," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 42, no. 1–2, pp. 189–201, 2009.
- [47] A. Khamseh, F. Jolai, and M. Babaei, "Integrating sequence-dependent group scheduling problem and preventive maintenance in flexible flow shops," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 77, no. 1–4, pp. 173–185, 2015.
- [48] C. Chamnanlor, K. Sethanan, M. Gen, and C.-F. Chien, "Embedding ant system in genetic algorithm for re-entrant hybrid flow shop scheduling problems with time window constraints," *J. Intell. Manuf.*, vol. 28, no. 8, pp. 1915–1931, 2017.
- [49] J. Cai, R. Zhou, and D. Lei, "Engineering Applications of Artificial Intelligence Dynamic shuffled frog-leaping algorithm for distributed hybrid flow shop scheduling with multiprocessor tasks ☆," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 90, no. December 2019, p. 103540, 2020.
- [50] M. K. Marichelvam, M. Geetha, and Ö. Tosun, "Computers and Operations Research An improved particle swarm optimization algorithm to solve hybrid flowshop scheduling problems with the effect of human factors – A case study," *Comput. Oper. Res.*, vol. 114, p. 104812, 2020.
- [51] M. Azizoğlu, E. Çakmak, and S. Kondakci, "A flexible flowshop problem with total flow time minimization," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 132, no. 3, pp. 528–538, 2001.
- [52] E. Gerstl and G. Mosheiov, "The optimal number of used machines in a two-stage flexible flowshop scheduling problem," *J. Sched.*, vol. 17, no. 2, pp. 199–210, 2014.
- [53] Q.-K. Pan and Y. Dong, "An improved migrating birds optimisation for a hybrid flowshop scheduling with total flowtime minimisation," *Inf. Sci. (Ny).*, vol. 277, pp. 643–655, 2014.
- [54] D.-F. Shiau, S.-C. Cheng, and Y.-M. Huang, "Proportionate flexible flow shop scheduling via a hybrid constructive genetic algorithm," *Expert Syst. Appl.*, vol. 34, no. 2, pp. 1133–1143, 2008.
- [55] X. Wang and L. Tang, "A tabu search heuristic for the hybrid flowshop scheduling with finite intermediate buffers," *Comput. Oper. Res.*, vol. 36, no. 3, pp. 907–918, 2009.
- [56] D. Alisantoso, L. P. Khoo, and P. Y. Jiang, "An immune algorithm approach to the scheduling of a flexible PCB flow shop," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 22, no. 11–12, pp. 819–827, 2003.
- [57] K. Takaku and K. Yura, "Online scheduling aiming to satisfy due date for flexible flow shops," *JSME Int. J. Ser. C Mech. Syst. Mach. Elem. Manuf.*, vol. 48, no. 1, pp. 21–25, 2005.
- [58] S. Jun and J. Park, "A hybrid genetic algorithm for the hybrid flow shop scheduling problem with nighttime work and simultaneous work constraints: A case study from the transformer industry," *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 15–16, pp. 6196–6204, 2015.
- [59] V. Botta-Genoulaz, "Hybrid flow shop scheduling with precedence constraints and time lags to minimize maximum lateness," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 64, no. 1–3, pp. 101–111, 2000.
- [60] S. Bertel and J.-C. Billaut, "A genetic algorithm for an industrial multiprocessor flow shop scheduling problem with recirculation," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 159, no. 3, pp. 651–662, 2004.
- [61] V. A. Raghavan, S. W. Yoon, and K. Srihari, "Heuristic algorithms to minimize total weighted tardiness with stochastic rework and reprocessing times," *J. Manuf.*

- Syst., vol. 37, pp. 233–242, 2015.
- [62] D. Rahmani and R. Ramezani, “A stable reactive approach in dynamic flexible flow shop scheduling with unexpected disruptions: A case study,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 98, pp. 360–372, 2016.
 - [63] H.-T. Lin and C.-J. Liao, “A case study in a two-stage hybrid flow shop with setup time and dedicated machines,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 86, no. 2, pp. 133–143, 2003.
 - [64] J. Jungwattanakit, M. Reodecha, P. Chaovalitwongse, and F. Werner, “Algorithms for flexible flow shop problems with unrelated parallel machines, setup times, and dual criteria,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 37, no. 3–4, pp. 354–370, 2008.
 - [65] T. Sawik, “Hierarchical approach to production scheduling in make-to-order assembly,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 44, no. 4, pp. 801–830, 2006.
 - [66] A. J. Yu and J. Seif, “Minimizing tardiness and maintenance costs in flow shop scheduling by a lower-bound-based GA,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 97, pp. 26–40, 2016.
 - [67] M. Li, D. Lei, and J. Cai, “Two-level imperialist competitive algorithm for energy-efficient hybrid flow shop scheduling problem with relative importance of objectives,” *Swarm Evol. Comput.*, vol. 49, no. April, pp. 34–43, 2019.
 - [68] S. Schulz, J. S. Neufeld, and U. Buscher, “A multi-objective iterated local search algorithm for comprehensive energy-aware hybrid flow shop scheduling,” *J. Clean. Prod.*, vol. 224, pp. 421–434, 2019.
 - [69] B. Zhang, Q.-K. Pan, L. Gao, L.-L. Meng, X.-Y. Li, and K.-K. Peng, “A Three-Stage Multiobjective Approach Based on Decomposition for an Energy-Efficient Hybrid Flow Shop Scheduling Problem,” *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, vol. PP, pp. 1–16, 2019.
 - [70] K. Geng, C. Ye, Z. Dai, and L. Liu, “Bi-Objective Re-Entrant Hybrid Flow Shop Scheduling considering Energy Consumption Cost under Time-of-Use Electricity Tariffs,” vol. 2020, 2020.
 - [71] S. Schulz, U. Buscher, and L. Shen, “Multi-objective hybrid flow shop scheduling with variable discrete production speed levels and time-of-use energy prices,” *J. Bus. Econ.*, pp. 1–29, 2020.
 - [72] H. Mokhtari, I. N. K. Abadi, and A. Cheraghalikhani, “A multi-objective flow shop scheduling with resource-dependent processing times: trade-off between makespan and cost of resources,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, no. 19, pp. 5851–5875, 2011.
 - [73] K.-H. Kim and P. J. Egbelu, “Scheduling in a production environment with multiple process plans per job,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 37, no. 12, pp. 2725–2753, 1999.
 - [74] J. L. He, Z. Yuan, and X. M. Zou, “Fuzzy Synthetic Estimation of Multi-Process Planning Schemes in CAPP,” in *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 433, pp. 3070–3075.
 - [75] H. Luo, G. Q. Huang, Y. Shi, and T. Qu, “Divergent production scheduling with multi-process routes and common inventory,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 50, no. 20, pp. 5762–5782, 2012.
 - [76] J. Guo, “SIMULATION STUDY ON FLEXIBLE JOB SHOP SCHEDULING OPTIMIZATION OF MULTI-PROCESS PLANNING ROUTES CONSIDERING ENERGY CONSUMPTION,” *Acad. J. Manuf. Eng.*, vol. 17, no. 3, 2019.
 - [77] G. Gong *et al.*, “Energy-efficient flexible flow shop scheduling with worker flexibility,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 141, p. 112902, 2020.
 - [78] seyed mohammad hassan Hosseini and ali akbar Hassani, “Proposed a branch and bound algorithm for Assembly flow shop scheduling problem,” *Model. Eng.*, vol.

- 15, no. 51, pp. 85–98, 2017.
- [79] A. H. Land, “Doig. AG, ‘An Automatic Method for Solving Discrete Programming Problems,’” *Econometrica*, vol. 28, no. 3, pp. 497–520, 1960.
 - [80] C. Rajendran and O. Holthaus, “A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and jobshops,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 116, no. 1, pp. 156–170, 1999.
 - [81] L. Wang, Y. Xu, G. Zhou, S. Wang, and M. Liu, “A novel decoding method for the hybrid flow-shop scheduling problem with multiprocessor tasks,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 59, no. 9–12, pp. 1113–1125, 2012.
 - [82] P. Korytkowski, T. Wiśniewski, and S. Rymaszewski, “An evolutionary simulation-based optimization approach for dispatching scheduling,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 35, pp. 69–85, 2013.
 - [83] S. Nguyen, M. Zhang, M. Johnston, and K. C. Tan, “Learning iterative dispatching rules for job shop scheduling with genetic programming,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 1–4, pp. 85–100, 2013.
 - [84] Seyed Mohammad Hassan Hosseini Milad Kolagar Daronkola Hossein Amoozad, “Multi-cycle and multi-product Integrated and two objectives model for Production Planning and maintenance considering storage capacity limitations and minimizing the work force changes approach,” *Adv. industrial Eng.*, vol. 52, no. 4, pp. 547–559, 2019.
 - [85] A. Costa, V. F. Viagas, and J. M. Framinam, “Solving the hybrid flow shop scheduling problem with limited human resource constraint,” *Comput. Ind. Eng.*, p. 106545, 2020.
 - [86] C. A. C. Coello, G. B. Lamont, and D. A. Van Veldhuizen, *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, vol. 5. Springer, 2007.
 - [87] M. Talebzadeh, “A multi-objective optimization model in a green supply chain considering reliability under uncertainty,” Kharazmi University, 2017.
 - [88] G. Mavrotas, “Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 213, no. 2, pp. 455–465, 2009.
 - [89] K. Deb, S. Agrawal, A. Pratap, and T. Meyarivan, “A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II,” in *International conference on parallel problem solving from nature*, 2000, pp. 849–858.
 - [90] N. Babaei Mybodi, “Production scheduling with a view to reducing energy consumption, completion time and tardiness in flow shop environment,” Sadjad University of Technology, 2017.
 - [91] E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele, “SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm,” *TIK-report*, vol. 103, 2001.
 - [92] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, “Optimization by simulated annealing,” *Science (80-.)*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983.
 - [93] N. Abbaszadeh, “Flexible flow shop scheduling problem with Flexible resource,” Babol Noshirvani University of Technology, 2017.
 - [94] D. M. Byrne and S. Taguchi, “The Taguchi approach to parameter design,” *Qual. Prog.*, vol. 20, no. 12, pp. 19–26, 1987.
 - [95] P. Fattahi, S. M. H. HOSSEINI, F. Jolai, and S. A. SAFI, “Multi-objective scheduling problem in a three-stage production system,” *Internattiionall Journall off Industtriiall Engiineeriing Prod. Researc*, vol. 25, pp. 1–12, 2014.

Abstract

This paper investigates a flexible flow shop scheduling problem in which the parallel machines in the first stage are considered unrelated with different technology levels. Some of these machines are multifunctional that can do several processes on jobs. Therefore, the jobs that are assigned to these machines don't required to process in some other next stages. This problem is defined by the inspiration of a real problem, derived from the spring industry. Therefore, the jobs that are assigned to these machines don't required to process in some other next stages. Furthermore, setup times are assumed as sequence-dependent and are need when a machine starts to process a new job. Also, in this problem addresses different release dates and machine eligibility. Three linear mathematical models based on MIP is developed to solve the problem in small-sized scales. The first model was studied simultaneously with the aim of optimizing production costs and maximum completion time (Makespan). Due to the great importance of environmental issues, in the second model, the reduction of energy consumption and the reduction of production costs were studied simultaneously. In the third model, the effect of auxiliary resource constraints on production scheduling as a variable factor measured by the model was investigated with the aim of minimizing the Makespan. Since the problem is discussed in an NP-hard environment, to solve them in medium and large dimensions, meta-heuristic algorithms NSGA-II and SPEA-II for two-objective problems and meta-heuristic algorithms GA and SA for solving one-objective problem were proposed. The experimental results showed that all three proposed models were able to schedule jobs well considering the applied constraints. Also, by measuring the evaluation indicators, it was found that NSGA-II algorithm against SPEA-II algorithm and GA algorithm against SA algorithm had better performance and achieved more appropriate answers.

Keywords (5 to 7 keywords): scheduling, flexible flow shop, machine-dependent processing stages, unrelated parallel machines, energy consumption, production costs, auxiliary resource constraints.



Shahrood University of
Technology

Faculty of Industrial Engineering and Management

M.Sc. Thesis in Industrial Management

**Modelling and solving the flexible flow shop
scheduling problem with unrelated parallel
machines with the approach of reducing the
operational costs**

By:Ali Hasani

**Supervisor:
Dr. Seyed Mohammad Hassan Hosseini**

September,2020