*پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری*
*دوره ۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، صص ۱۲۶-۱۵۵*
*نوع مقاله: پژوهشی*

# بهینه‌سازی مسئله زمان‌بندی سبز جریان کارگاهی ترکیبی به همراه سیستم ارسال بسته‌ای

**محمد رستمی[1*]، امیر صبری پور[2]**

۱. استادیار، گروه مهندسی صنایع و مدیریت، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت دانشگاه صنعتی شاهرود،شاهرود، ایران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع و پیشرفت دانشکده مهندسی پصنایع و پیشرفت، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸

## چکیده

با افزایش رقابت بین تولیدکنندگان در جهت پاسخ به نیازهای مشتریان، برنامه‌ریزی فرآیندهای تولیدی در قالب زنجیره‌های تامین پیچیده‌تر شده اند. تولیدکنندگان از یکسو به منظور ایجاد مزیت رقابتی ناچار به تولید با کمترین هزینه می‌باشند. از سوی دیگر الزامات زیست محیطی و توجه به تولید پایدار سبب توجه بیشتر به مصرف انرژی در سیستم‌های تولیدی شده است. در این پژوهش برای اولین بار مسئله زمانبندی سبز در محیط جریان کارگاهی ترکیبی به همراه سیستم ارسال بسته‌ای[i] سفارش‌ها برای مشتریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح دو هدفه ارائه می‌گردد. هدف اول مسئله مینیمم کردن مجموع هزینه مربوط به مجموع زمان‌های تکمیل کارها و هزینه‌های ارسال بسته ای می‌باشد. هدف دوم به دنبال مینیمم کردن مصرف انرژی است. مدل ریاضی با کمک روش محدودیت اپسیلون تک‌هدفه شده و تعدادی مسئله تصادفی با کمک آن مورد ارزیابی و تحلیل همه جانبه قرار می‌گیرد و تاثیرگذاری توجه به مصرف انرژی بر زمانبندی تولید سفارش‌ها ارائه می‌گردد. همچنین با توجه به NP-hard بودن مسئله، جهت حل مسائل بزرگ، از یک الگوریتم MOTLBO استفاده شده است.

**کلیدواژه‌ها:** جریان کارگاهی ترکیبی، زمان‌بندی، ارسال بسته‌ای، مصرف انرژی، مدل ریاضی دو هدفه.

---

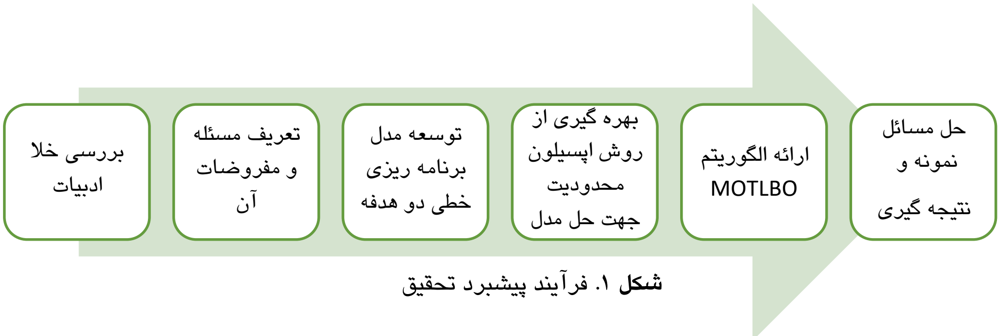
* نویسنده مسئول مقاله E-mail: Rostami_m@shahroodut.ac.ir

## ۱- مقدمه

مسئله جریان کارگاهی ترکیبی[1] یکی از توسعه‌های جدید بر روی مسئله جریان کارگاهی سنتی می‌باشد که با هدف حذف گلوگاه‌های تولیدی، افزایش بهره وری سیستم و ایجاد بالانس بین ایستگاه‌های کاری توسعه یافته است [۱]. در این سیستم تولیدی، در هر مرحله چندین ماشین تولیدی وجود دارد که بصورت موازی فعالیت مورد نظر را انجام می‌دهند. این سیستم بسیار منطبق بر محیط‌های تولیدی واقعی می‌باشد که توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است [۲] و [۳]. به جهت حل مسئله جریان کارگاهی ترکیبی برخی از محققین از روش‌های حل دقیق استفاده نموده‌اند. اما بدلیل پیچیدگی حل مسئله و NP-hard بودن آن اقبال به استفاده از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری [۴] بیشتر بوده است. در سال‌های اخیر توجه به انتشار گازهای گلخانه ای و مصرف انرژی در محیط های تولیدی زیاد شده است [۵]، [۶] و [۷]. این امر به این دلیل است که بخش قابل توجهی از انتشار گازهای گلخانه ای بدلیل مصرف انرژی در صنایع تولیدی می‌باشد. به همین دلیل فشار عمومی بر این بخش رو به افزایش بوده است. ازین رو تولیدکنندگان سعی می‌نمایند با حفظ مزیت‌های اقتصادی سیستم تولیدی خود، مصرف انرژی را نیز بهینه نمایند. اگرچه که ارتقا تکنولوژی تولید و استفاده از تجهیزات بروز و جدید می‌تواند بر مصرف انرژی تاثیرگذار باشد اما راه حل گران قیمتی است. تولیدکنندگان می‌توانند با تغییر در برنامه‌های تولیدی خود تا حدی بر مصرف انرژی تاثیر مثبت بگذارند. در بسیاری از صنایع، تجهیزات و دستگاه‌های تولید می‌توانند با سرعت‌های تولیدی متفاوت کارها را پردازش نمایند. تفاوت سرعت تولید بصورت مستقیم بر بهره وری تولید تاثیرگذار است اما تاثیر متقابلی نیز بر مصرف انرژی دارد.

با رقابتی تر شدن بازارها، نیاز به برنامه ریزی و هماهنگی یکپارچه سیستم‌های تولیدی در قالب شبکه‌های زنجیره تامین به منظور کاهش بهای تمام شده بیش از پیش احساس شده است. سیستم‌های تولیدی را نمی‌توان جدا از سیستم های لجستیکی و حمل و نقل دانست که این همان دیدگاه مدیریت زنجیره تامین است. علاوه بر آن زمانبندی تولید تاثیر بسزایی بر میزان کارایی زنجیره تامین دارد و می تواند بر سطح رضایت مشتریان تاثیرگذار باشد. از طرف دیگر نقش سیستم حمل و نقل را نمی‌توان نادیده گرفت. بدلیل هزینه‌های بالای ارسال محموله‌ها، نمی توان این هزینه‌ها را در برنامه ریزی‌های تولید نادیده گرفت. به همین دلیل تولیدکنندگان تلاش می‌کنند تا به نوعی برنامه ریزی نمایند تا محموله‌ها بصورت بسته‌ای ارسال شوند. اگرچه که در صورت ارسال بسته ای سفارش‌ها برای مشتریان، ممکن است سبب تاخیر در تکمیل کارها

و در نتیجه نارضایتی مشتریان گردد. به همین دلیل ایجاد بالانس میان هزینه‌های ارسال و هزینه‌های تکمیل کارها جزو تصمیمات پیچیده در برنامه‌ریزی عملیاتی تولید می‌باشد.
اگرچه که در ادبیات موضوع مسائل برنامه‌ریزی یکپارچه تولید-توزیع مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است، اما کمتر به بررسی همزمان مسائل زمانبندی سبز پرداخته شده است. توجه به زمانبندی سبز در سال‌های اخیر مورد توجه ویژه قرار گرفته است. بخصوص در کشور ایران با توجه به آزادسازی قیمت حامل‌های انرژی و تاثیرگذاری مستقیم آن بر بهای تمام شده محصولات و هزینه‌های تولیدکنندگان، بایستی بیش از پیش به زمانبندی تولید سبز توجه گردد. انگیزه اصلی این تحقیق از بررسی این مسئله، توجه ویژه به مصرف انرژی در زمانبندی‌های تولید جریان کارگاهی ترکیبی در صنعت تولید ظروف آلومینیومی می‌باشد. در این صنعت، سه مرحله از مراحل تولید محصولات شامل کوره های حرارتی با دمای بسیار بالا می باشد که جهت تثبیت پوشش گرانیتی (تفلون) و رنگ ظروف نیاز به مصرف انرژی قابل توجه می‌باشند. در این شرایط زمانبندی مناسب تولید با رویکرد کنترل مصرف انرژی می‌تواند به کاهش هزینه‌های کلی تولید منجر شود. اگرچه که باید تاکید گردد، این مسئله در صنایع دیگر نیز حائز اهمیت می‌باشد. به همین دلیل در این پژوهش مسئله زمانبندی سبز جریان کارگاهی ترکیبی به همراه سیستم ارسال بسته ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور حل این مسئله، یک مدل برنامه ریزی خطی عددصحیح مختلط[۲] (MILP) دو هدفه ارائه می‌گردد. این مدل با روش اپسیلون محدودیت[۳] می‌تواند به یک مدل تک هدفه تبدیل شده و با کمک نرم افزار GAMS و حل کننده CPLEX مسائل مختلف را حل نماید. جهت اعتباربخشی به مدل ارائه شده، تعدادی مسئله در ابعاد کوچک مورد بررسی قرار می‌گیرد و آنالیز حساسیت بر روی یک مسئله نمونه صورت می‌گیرد. در نهایت جهت حل مسائل بزرگ، یک الگوریتم MOTLBO[۴] توسعه داده می شود که قادر است جبهه پارتویی مسائل مختلف را ایجاد نماید. شکل ۱ نمودار فرآیند پیشبرد تحقیق را نشان می‌دهد.




**شکل ۱.** فرآیند پیشبرد تحقیق

در ادامه در ابتدا در بخش ۲ ادبیات موضوع مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سپس در بخش ۳ مسئله مورد نظر به همراه مفروضات آن تعریف می‌گردد و با تعریف پارامترها و متغیرهای تصمیم، یک مدل ریاضی خطی دوهدفه برای مسئله توسعه داده می شود. بخش ۴ الگوریتم MOTLBO را تشریح می‌نماید. در بخش ۵ نتایج محاسباتی گزارش داده می‌شود و در نهایت بخش ۶ نتایج و پیشنهادها را ارائه می‌دهد.

## ۲- مرور ادبیات

### ۲-۱- مسائل زمان‌بندی سبز

بدلیل توجه به تولید سبز، زمانبندی سبز نیز مورد توجه محققین حوزه برنامه ریزی عملیاتی تولید قرار گرفته است. عموم پژوهش های مربوط به زمانبندی سبز مربوط به درنظر گرفتن مصرف انرژی در کنار توابع هدف کلاسیک زمانبندی بوده است. فانگ و همکاران [۸] برای اولین بار زمانبندی سبز را به عنوان یک رویکرد جدید برای مسائل جریان کارگاهی مطرح نمودند. آن‌ها به منظور ایجاد بالانس میان بیشترین زمان تکمیل کارها، پیک مصرف انرژی و میزان انتشار کربن دی اکسید، یک مدل برنامه‌ریزی خطی چند هدفه ارائه دادند. با درنظر گرفتن عملیات وابسته به توالی، منصوری و همکاران [۹] مسئله فوق را در حالتی که محیط جریان کارگاهی دو-ماشینه می‌باشد توسعه داده و یک روش ابتکاری ساختاری ارائه دادند. رمضانیان و همکاران [۱۰] مسئله زمانبندی سبز در محیط جریان کارگاهی باجایگشت را مورد بررسی قرار دادند.

ژانگ و همکاران [۱۱] مسئله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی را در شرایطی که ماشین‌های مختلف نرخ مصرف انرژی متفاوتی دارند را مورد بررسی قرار دادند. آنها جهت حل مسئله یک الگوریتم سه مرحله ای بر پایه تجزیه ارائه نمودند.

در پژوهش های فوق که مورد بررسی قرار گرفتند، متفاوت بودن سرعت عملیات ماشین ها و در نتیجه تفاوت مصرف انرژی مربوط به هر سرعت مورد توجه قرار نگرفته‌اند. بنظر می‌رسد لیو و هوانگ [۱۲] برای اولین بار متفاوت بودن سرعت ماشین‌ها در محیط جریان کارگاهی ترکیبی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک مدل خاص دو مرحله ای مربوط به صنایع فولادی را مورد مطالعه قرار دادند و به منظور حل آن از یک الگوریتم NSGA-II استفاده کردند. به منظور بررسی بیشتر تحقیقات در حوزه زمانبندی سبز در محیط های تولیدی می‌توانید به مقاله مروری لی و همکاران [۱۳] که اخیرا به چاپ رسیده است رجوع نمایید.

### ۲-۲- مسائل زمان‌بندی به همراه سیستم ارسال بسته‌ای

به گواه بررسی ادبیات موضوع، اغلب تحقیقات صورت گرفته در این حوزه در محیطی که دارای یک ماشین می‌باشد صورت گرفته است. هال و پات [۱۴] مسائل مختلف براساس توابع هدف مختلف را مورد بررسی قرار دادند و ضمن بررسی سختی حل آن‌ها، برای حل برخی از مسائل در ابعاد کوچک از برنامه ریزی پویا استفاده نمودند. پس از وی تحقیقات گسترده ای صورت گرفت که از آن جمله می‌توان به تحقیقات این و همکاران [۱۵]، مزده و همکاران [۱۶] و رستمی و همکاران [۱۷] اشاره کرد. بدلیل پیچیدگی‌های مسائل زمانبندی زنجیره تامین، بنظر می‌رسد استفاده از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری می‌تواند مناسب تر باشد [۱۸]. از جمله تحقیقاتی که با رویکردهای ابتکاری سعی در حل مسائل زمانبندی زنجیره تامین در محیط تک ماشینه را داشته‌اند می‌توان به احمدی زر و فرهادی [۱۹]، خدابنده و همکاران [۲۰] و قرائی و جولای [۲۱] اشاره نمود.

با پیشرفت تکنولوژی و پیچیده‌تر شدن فرآیندهای تولیدی، محیط های تولیدی نیز پیچیده تر شده و مسائل امروزی بیشتر در محیط‌هایی با بیش از یک ماشین و ایستگاه کاری می‌باشند. اگرچه که حل مسائل زمانبندی به همراه ارسال بسته ای در محیط‌های جریان کارگاهی و ماشین‌های موازی بسیار سخت می‌باشد اما تعدادی تحقیق با کمک روش‌های دقیق مانند الگوریتم شاخه و کران و برنامه ریزی پویا در ادبیات موجود است که از آن جمله می‌توان به مزده و رستمی [۲۲] و کانگ و همکاران [۲۳] اشاره کرد.

اما اغلب تحقیقات در این زمینه سعی نموده اند تا با کمک روش‌های ابتکاری مسائل با ابعاد بزرگ را در زمان حل منطقی حل نمایند. وانگ و همکاران [۲۴] مسئله فلوشاپ جایگشتی را با درنظر گرفتن چندین مشتری در محیط زنجیره تامین مورد بررسی قرار دادند. آنها جهت حل این مسئله دو روش ابتکاری و یک روش جدید GA-TVNS ارائه دادند. کاظمی و همکاران [۲۵] در یک محیط جریان کارگاهی دو مرحله ای مونتاژی به دنبال مینیمم کردن مجموع زمان های تاخیر بودند و جهت این کار از الگوریتم رقابت استعماری استفاده نمودند. همچنین رستمی و شاد [۲۶] مسئله جریان کارگاهی دو ماشینه به همراه سیستم ارسال بسته ای را با ارائه یک الگوریتم هیبرید زنبور عسل حل نمودند.

براساس دانش ما و بررسی ادبیات موضوع تاکنون تنها یک تحقیق مسائل زمانبندی سبز را با درنظر گرفتن سیستم ارسال بسته ای مورد بررسی قرار داده اند. لی و همکاران [۲۷] مسئله جریان کارگاهی توزیع شده را با هدف مینیمم کردن همزمان makespan و مصرف انرژی

مورد بررسی قرار دادند و جهت حل مسائل از یک الگوریتم بهینه سازی ول [ii] استفاده کردند. بنابراین می‌توان ادعا نمود که مسئله زمانبندی سبز به همراه سیستم ارسال بسته ای تاکنون در محیط جریان کارگاهی ترکیبی مورد توجه محققین قرار نگرفته است. جدول ۱ خلاصه ادبیات موضوع مسائل زمانبندی تولید به همراه ارسال بسته‌ای را نشان داده و خلا ادبیات براین اساس مشخص می‌گردد.

**جدول ۱.** خلاصه مرور ادبیات

| شماره منبع | محیط ماشین آلات | سیستم ارسال بسته‌ای | زمان‌بندی سبز | تابع هدف | روش حل |
|---|---|---|---|---|---|
| [۱۵] | تک ماشینه | ✓ | – | تک هدفه | برنامه ریزی پویا |
| [۱۶] | تک ماشینه | ✓ | – | تک هدفه | الگوریتم B&B |
| [۱۷] | تک ماشینه | ✓ | – | تک هدفه | الگوریتم B&B |
| [۱۹] | تک ماشینه | ✓ | – | تک هدفه | الگوریتم رقابت استعماری |
| [۲۰] | تک ماشینه | ✓ | – | تک هدفه | روش ابتکاری |
| [۲۱] | جریان کارگاهی توزیع شده | ✓ | – | چندهدفه | الگوریتم ACO |
| [۲۲] | جریان کارگاهی دوماشینه | ✓ | – | تک هدفه | الگوریتم B&B |
| [۲۳] | جریان کارگاهی | ✓ | – | تک هدفه | الگوریتم IVNS |
| [۲۴] | جریان کارگاهی جایگشتی | ✓ | – | تک هدفه | الگوریتم GA-TVNS |
| [۲۵] | جریان کارگاهی دومرحله ای | ✓ | – | تک هدفه | الگوریتم رقابت استعماری |
| [۲۶] | جریان کارگاهی دوماشینه | ✓ | – | تک هدفه | الگوریتم زنبورهای عسل |
| [۸] | جریان کارگاهی | – | ✓ | چندهدفه | مدل ریاضی |
| [۹] | جریان کارگاهی دوماشینه | – | ✓ | چندهدفه | روش ابتکاری |
| [۱۰] | جریان کارگاهی جایگشتی | – | ✓ | چندهدفه | جستجوی حریصانه |
| [۱۱] | جریان کارگاهی ترکیبی | – | ✓ | چندهدفه | روش ابتکاری برمبنای تجزیه |
| [۱۲] | جریان کارگاهی ترکیبی | – | ✓ | چندهدفه | الگوریتم NSGA-II |
| [۲۷] | جریان کارگاهی توزیع شده | ✓ | ✓ | چندهدفه | الگوریتم WO |
| این تحقیق | جریان کارگاهی ترکیبی | ✓ | ✓ | چندهدفه | الگوریتم MOTLBO |

## ۳- مدل‌سازی مسئله

در این مسئله n کار وجود دارد که توسط F مشتری سفارش داده شده است. این کارها بایستی توسط چندین مرحله که بصورت سری قرار دارند پردازش شوند. در این مسئله m مرحله وجود دارد. در هر مرحله نیز چندین ماشین موازی یکسان حضور دارد که هر کار بایستی جهت پردازش یکی از آنها را انتخاب نماید. البته سرعت عملیات هر ماشین مربوط به هر کار می‌تواند متفاوت باشد و قابل تنظیم است. بدیهی است که در صورت انتخاب سرعت بالاتر برای ماشین، زمان پردازش آن کار کمتر شده اما مصرف انرژی افزایش می‌یابد. از دیدگاه مصرف انرژی می‌توان دو حالت برای ماشین ها متصور شد: ۱) حالت پردازش یعنی زمانی که ماشین در حال پردازش کارها می‌باشد و ۲) حالت خاموش یعنی زمانی که ماشین خاموش است.

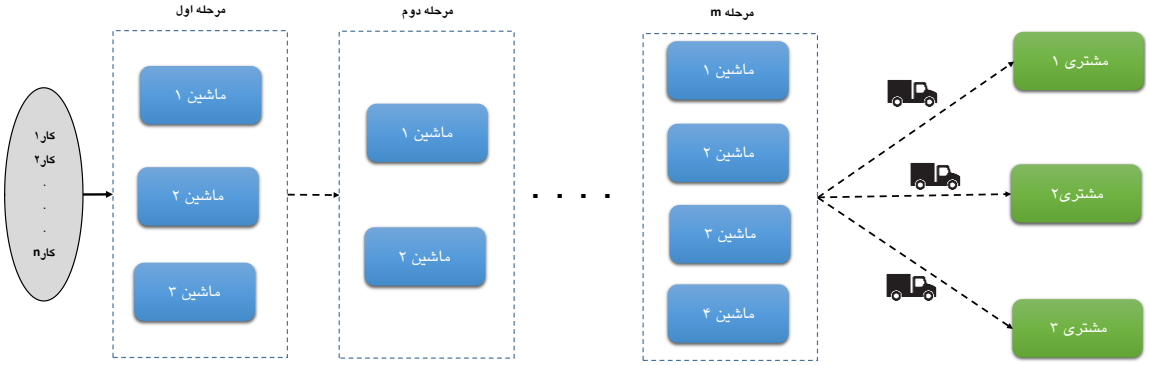
پس از پردازش کارهای مربوط به مشتریان در تمامی مراحل، این سفارش‌ها بایستی با کمک سیستم ارسال بسته ای برای مشتریان ارسال گردد. بایستی توجه شود که زمان تکمیل یک کار با حضور سیستم ارسال بسته ای، معادل زمانی است که آن کار تحویل وسیله نقلیه داده شده است. پس بنابراین معادل زمان تکمیل آخرین کاری است که به آن بسته تخصیص داده شده است. فرض شده است که ظرفیت وسایل نقلیه نامحدود است اما در هر بسته فقط می‌توان کارهای مربوط به یک مشتری را ارسال نمود. هزینه ارسال هر بسته برای هر مشتری از قبل مشخص و متفاوت است.

هدف اول مسئله مینیمم کردن مجموع هزینه مربوط به مجموع زمان‌های تکمیل کارها به علاوه هزینه‌های ارسال بسته ای می باشد. هدف دوم هم مینیمم کردن مصرف انرژی می‌باشد. براین اساس این مسئله شامل چهار زیرمسئله است که بایستی تواما برای آنها تصمیم گیری صورت گیرد: تعیین توالی کارها، تعیین تخصیص کارها به ماشین ها در هر مرحله، انتخاب سرعت ماشین ها برای پردازش هر کار و تعیین نحوه تخصیص سفارش ها به بسته‌های ارسالی. سایر مفروضات مسئله به شرح زیر می‌باشند:

- همه کارها در زمان صفر در دسترس هستند
- وقفه در کارها مجاز نمی‌باشد
- تمامی ماشین ها در طول افق برنامه ریزی در دسترس هستند
- در هر زمان روی هر ماشین حداکثر می‌توان یک کار را پردازش نمود و همچنین هر کار در هر زمان فقط روی یک ماشین می‌تواند پردازش شود
- بیکاری ماشین ها مجاز بوده و بافر با ظرفیت بی نهایت فرض شده است

- یک ماشین با تخصیص اولین کار به آن روشن شده و با اتمام پردازش آخرین کار تخصیصی به آن خاموش می‌شود.

شکل ۲ محیط تولیدی مربوط به این مسئله به همراه سیستم ارسال بسته‌ای برای مشتریان را نشان می‌دهد.




**شکل ۲.** نمایی از محیط تولیدی به همراه سیستم ارسال بسته‌ای مربوط به مسئله مورد بررسی

به منظور مدل‌سازی ریاضی مسئله فوق، پارامترها و متغیرهای تصمیم بصورت زیر تعریف می گردند.

اندیس ها و مجموعه ها:

| | |
|---|---|
| i | اندیس مربوط به کار |
| j | اندیس مربوط به مرحله |
| k | اندیس مربوط به ماشین |
| s | اندیس مربوط به جایگاه |
| v | اندیس مربوط به سطح سرعت |
| f | اندیس مربوط با مشتری |
| b | اندیس مربوط به بسته‌های تولیدی |

پارامترها:

| | |
|---|---|
| $p_{ifjv}$ | زمان پردازش کار i ام برای مشتری f ام در مرحلهj ام با سرعت v ام |
| $pp_{jv}$ | قدرت مورد نیاز ماشین در هرکار در مرحله j ام با سطح سرعت v ام. |
| $D_f$ | هزینه ارسال بسته‌های تولید به مشتری f ام |

متغیرهای تصمیم باینری:

$x_{ifj}^{kvs}$ برابر ۱ است اگر کار i ام به ماشین k ام در مرحله j ام با سرعت v و در پوزیشن s و برای مشتری f تخصیص یابد

$Y_{ifb}$ برابر ۱ است اگر کاری متعلق به بسته b ام باشد که به مشتری j و کار i ام مرتبط شود

$\theta_{bf}$ اگر بسته b ام به مشتری f ام تخصیص یابد

متغیرهای تصمیم مثبت:

$b_{ifjks}$ زمان شروع کار i ام برای مشتری f ام در مرحله j ام بروی ماشین k ام و جایگاه s ام

$e_{ifjks}$ زمان اتمام کار i ام برای مشتری f ام در مرحله j ام بروی ماشین k ام و جایگاه s ام

$R_{if}$ زمان واقعی ارسال کار i به مشتری f ام

$\psi_f$ تعداد بسته‌های متعلق به مشتری f ام

$C_b$ زمان تکمیل بسته‌های تولید b ام

براساس تعاریف فوق، مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط مربوط به این مسئله به صورت زیر قابل تعریف است:

$$Minz_1 = \sum_{i\in I}\sum_{f\in F} R_{if} + \sum_{f\in F} \Psi_f . D_f \qquad (۱)$$

$$Minz_2 = \sum_{i\in I}\sum_{f\in F}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{v\in V} x_{ifj}^{kvs} . p_{ifjv}\, pp_{jv} \qquad (۲)$$

S.t:

$$\sum_{k\in K}\sum_{v\in V}\sum_{s\in S} x_{ifj}^{kv} = 1 \quad \forall i \in I, f \in F, j \in J \qquad (۳)$$

$$\sum_{b\in B} Y_{ifb} = 1 \quad \forall i \in I, f \in F \qquad (۴)$$

$$Y_{ifb} + Y_{if'b} \le 1 \quad \forall i \in I, i' \in I, f \in F, f' \in F, b \in B, \forall f \ne \forall f' \qquad (۵)$$

$$\Psi_f = \sum_{b\in B} \theta_{bf} \quad \forall f \in F \qquad (۶)$$

$$e_{ifjks} - b_{ifjks} \ge \sum_{v\in V} p_{ifjv} . x_{ifj}^{kvs} \quad \forall i \in I, f \in F, j \in J, k \in K, s \in S \qquad (۷)$$

$$b_{ifjks} + (1 - \sum_{v \in V} x_{ifj}^{kvs}).M \geq e_{ifj-1k's'} \quad (۸)$$
$$\forall i \in I, f \in F, j \in J, k \in K, k' \in K, s \in S, s' \in S, j \neq 1$$

$$b_{ifjks} + (1 - \sum_{v \in V} x_{ifj}^{kvs}).M \geq e_{if'jks-1} \quad (۹)$$
$$\forall i \in I, , i' \in I, f \in F, f' \in F, j \in J, k \in K, k' \in K, s \neq 1$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} x_{ifj}^{kvs} \leq 1 \quad \forall j \in J, k \in K, s \in S \quad (۱۰)$$

$$-\sum_{i} Y_{ifb} + \theta_{bf}.M \geq 0 \quad \forall f \in F, b \in B \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i} Y_{ifb} + (1 - \theta_{bf}).M > 0 \quad \forall f \in F, b \in B \quad (۱۲)$$

$$R_{if} \geq C_b - (1 - Y_{ifb})M \quad \forall i \in I, f \in F, b \in B \quad (۱۳)$$

$$C_b \geq \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} e_{ifjkv} - (1 - Y_{ifb})M \quad \forall i \in I, f \in F, j \in J, b \in B \quad (۱۴)$$

$$b_{ifjks}, e_{ifjks}, R_{if}, \psi_f, C_b \geq 0$$
$$\forall i \in I, f \in F, j \in J, k \in K, s \in S, v \in V, b \in B \quad (۱۵)$$

$$x_{ifj}^{kvs}, Y_{ifb}, \theta_{bf} \in \{0,1\}$$
$$\forall i \in I, f \in F, j \in J, k \in K, s \in S, v \in V, b \in B \quad (۱۶)$$

تابع هدف اول (۱) به دنبال مینیمم کردن مجموع هزینه مربوط به مجموع زمان‌های تکمیل کارها به علاوه هزینه‌های ارسال بسته‌ای می‌باشد و هدف دوم (۲) به دنبال مینیمم کردن مصرف انرژی می‌باشد. محدودیت (۳) تضمین می‌کند که هر کار از تمام مراحل عبور می‌کند و در یک مرحله خاص هر کار دقیقاً به یک ماشین اختصاص داده می‌شود و دقیقاً در یک مکان و سطح سرعت پردازش می‌شود. براساس محدودیت (۴)، هر کار باید به یک بسته که ارائه می‌شود اختصاص داده شود. محدویت (۵) تضمین می‌کند که هر بسته شامل کارهایی است که متعلق به همان مشتری است. محدویت (۶) تعداد بسته هایی که باید برای مشتری تحویل داده شود را اندازه گیری می‌کند . محدودیت (۷) بیان می‌کند که وقفه در طول پردازش مجاز نیست. محدودیت‌های (۸) و (۹) اطمینان حاصل می‌دهد که یک عملیات کاری تنها پس از پردازش کامل عملیات قبلی آن در مرحله قبل می‌تواند شروع شود. محدویت (۱۰) تضمین می‌کند که یک کار

فقط پس از پردازش کامل کار قبلی و تکمیل تنظیمات انجام می‌شود. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) زمانی که حداقل یک کار به بسته مورد نظر اختصاص داده می شود، اجازه می‌دهد یک بسته تشکیل شود. محدودیت (۱۳) زمان واقعی ارسال سفارش به هر مشتری را محاسبه می‌کند. محدودیت (۱۴) زمان تکمیل هر بسته را محاسبه می‌کند و محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) به نوع متغیر های مدل اشاره می‌کند.

مدل خطی فوق با توجه به آن که دو هدفه است جهت حل در نرم افزار GAMS لازم است که ابتدا تک هدفه شده و براین اساس جبهه پارتویی تشکیل گردد. در اینجا از روش محدودیت اپسیلون برای این کار استفاده می‌گردد. از دلایل استفاده از این روش این است که این روش تضمین رسیدن به جبهه پارتویی بهینه را برای یک مدل برنامه‌ریزی خطی ارائه می‌دهد. همچنین حداکثر حدبالای تابع هدف دوم را می‌توان با این روش تحت کنترل درآورد. در این روش بصورت کلی در هر مرحله، یکی از هدف‌ها بهینه شده و دیگر اهداف به عنوان محدودیت با حد بالای اپسیلون ( $\varepsilon$ ) در نظر گرفته می‌شوند. در واقع این روش مسئله بهینه سازی چند هدفه را به یک مسئله تک هدفه تبدیل می‌کند. مراحل روش اپسیلون محدودیت شامل موارد زیر است:

۱. در هر مرحله یکی از توابع هدف به عنوان هدف اصلی انتخاب شده و مسئله با این هدف حل و مقدار بهینه برای این تابع هدف به دست می‌آید

۲. سایر توابع هدف، اهداف فرعی می شوند و فواصل بین مقادیر بهینه اهداف فرعی به یک عدد از پیش تعیین شده تقسیم می‌شود و جدولی برای این مقادیر، یعنی $\varepsilon_2,...,\varepsilon_n$ ترسیم می‌شود

۳. در هر مرحله، تابع هدف اصلی با هر مقدار بروز شده $\varepsilon_2,...,\varepsilon_n$ حل می شود و در نتیجه حل‌های پارتو بدست می‌آید.

در مسئله این تحقیق با توجه به آن‌که مسئله دو هدفه است، تابع هدف (۲) به عنوان محدودیت به مدل اضافه شده و با تغییر سمت راست این محدودیت (یعنی اپسیلون‌ها)، نقاط مختلفی از فضای جواب بدست می‌آید.

## ۴- الگوریتم MOTLBO

الگوریتم مبتنی بر آموزش- یادگیری یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت می‌باشد که اولین بار توسط رائو و همکاران [۲۸] معرفی شد. این الگوریتم از فرآیند یادگیری در کلاس درس الگو گرفته است به گونه‌ای که فرآیند بهینه سازی را طی دو فاز آموزش و یادگیری انجام می‌دهد. از مهم‌ترین ویژگی‌های این الگوریتم، سادگی فرآیند آن و تعداد کم پارامترها جهت

انجام تنظیمات می‌باشد. همچنین اجرای این الگوریتم به مراتب راحت‌تر و نیازمند حافظه کامپیوتری کمتر نسبت به الگوریتم‌های GA، PSO و ACO است. این ویژگی‌ها از دلایل مهم استفاده از این روش در این تحقیق است. در حالت توسعه یافته برای مسائل چندهدفه، لی و همکاران [۲۹] شکل جدیدی از TLBO را ارائه نمودند که قادر است مسائل چندهدفه را حل نموده و جبهه پارتویی بهینه را گزارش دهد. در این بخش مراحل الگوریتم MOTLBO تشریح شده و این الگوریتم برای حل مسائل مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

**۱-۴- مقداردهی اولیه و شکل ارائه**

همانطور که گفته شد، مسئله مورد بررسی دارای چهار بعد تصمیم گیری است. بر همین منوال شکل ارائه جواب‌ها در الگوریتم نیز از چهار بخش تشکیل می شود. بخش اول مربوط به تعیین توالی کارها می باشد که بصورت یک آرایه با n عضو بصورت $\pi = (\pi_1, \pi_2, ..., \pi_n)$ است. بطوریکه $\pi_i$ بیان کننده شماره کار $i$ در توالی کارهاست. بخش دوم مربوط به تعیین نحوه تخصیص کارها به ماشین‌ها در هر مرحله است که بصورت یک ماتریس با n سطر و m ستون بصورت زیر است. بطوریکه $\omega_{ij}$ بیان کننده شماره ماشین تخصیص یافته به کار $i$ در مرحله $j$ است.

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \dots & \omega_{1m} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \dots & \omega_{2m} \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ \omega_{n1} & \omega_{n2} & \dots & \omega_{nm} \end{bmatrix}$$

سومین بخش از شکل ارائه مربوط به انتخاب سطح سرعت ماشین در هر مرحله است که بصورت یک ماتریس با m سطر و n ستون بصورت زیر است. بطوری‌که $v_{ji}$ بیان کننده سطح سرعت انتخابی برای کار $i$ در مرحله $j$ است.

$$v = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix}$$

نهایتا آخرین بخش مربوط به نحوه تخصیص کارها به بسته ها می‌باشد که بصورت یک آرایه با n عضو بصورت $\delta = (\delta_1, \delta_2, ..., \delta_n)$ است. بطوریکه $\delta_i$ نشان دهنده شماره بسته تخصیص یافته کار $i$ می باشد. با تعریف شکل ارائه بصورت فوق، کلیه دانش آموزان در هر مرحله تولید جواب شدنی می‌نمایند مگر در دو حالت؛ در صورتی که اعداد هر درایه غیرصحیح باشد از فرآیند گرد کردن به منظور تبدیل به یک عدد صحیح استفاده می‌گردد. همچنین در صورت تجاوز عدد هر درایه از حدود پایین و بالای مربوطه، مقدار حد جایگزین می‌گردد.

در ابتدای الگوریتم بایستی جمعیت اولیه از دانش آموزان تولید شود. ابتدا اعضای کلاس با k متغیر تصمیم $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, ..., x_{ik})$ که نشانگر مشخصات $i$ امین دانش آموز در کلاس است به صورت تصادفی تولید می‌شوند، سپس با توجه به مختصاتی که هر یک از دانش آموزان دارند مقدار توابع هدف بدست می‌آید. با کمک روش سیگما که توسط عنایتی فر و همکاران [۳۰] برای رتبه بندی غیر مغلوب ها [iii] ارائه شده است، رتبه هر دانش آموز براساس مقدار سیگما بدست می‌آید. دانش آموز با کمترین مقدار سیگما به عنوان معلم انتخاب می‌شود.

**۲-۴- فاز آموزش**

در فاز اول که فاز آموزش می باشد دانش آموزان دانش خود را از طریق اختلاف میان معلم و میانگین کلاس ارتقا می‌دهند به گونه ای که تمام نقاط دیگر که همگی وضعیت بدتری نسبت به معلم دارند، به طرف نقطه معلم می‌روند. با این حرکت میانگین توزیع به سمت نقطه معلم پیش می رود. در این فاز از طریق رابطه (۱۷) موقعیت جدید دانش آموز بدست می‌آید:

$$x_i^{new} = x_i + r_i (x_{Teacher} - TF \times x_{Mean}) \quad (۱۷)$$

که در آن $r_i$ یک عدد تصادفی بین [۰,۱]، $x_{Teacher}$ مختصات نقطه معلم و $x_{Mean}$ میانگین کل دانش آموزان در آن مرحله می باشند. $TF$ فاکتور آموزش است که میزان تغییرات میانگین را تعیین می‌کند که از طریق $TF = round[1 + rand(0,1)]$ بدست می‌آید. اگر $x_i^{new}$ بر $x_i$ غلبه کند جایگزین آن می شود. بعد از این گام، فاز یادگیری آغاز می‌شود.

**۳-۴- فاز یادگیری**

در فاز دوم که فاز یادگیری است دانش آموزان کلاس از تعامل با یکدیگر می‌توانند سطح دانش خود را ارتقا دهند. بدین صورت که به ازای هر یک از دانش آموزان، یک دانش آموز دیگر به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، سپس اگر دانش آموز دوم بر دانش آموز اول غلبه

کند، دانش آموز اول به سمت دانش آموز دوم حرکت می‌کند (رابطه (۱۹)) و در غیر اینصورت، دانش آموز دوم به سمت دانش آموز اول می رود (رابطه (۱۸)). این گام را به صورت زیر می‌توان نشان داد.

$$x_i^{new} = x_i + r_i (x_i - x_j) \quad (۱۸)$$

$$x_i^{new} = x_i + r_i (x_j - x_i) \quad (۱۹)$$

که در آن $x_i^{new}$ نشان دهنده موقعیت جدید دانش آموز $x_i$ می باشد و همچنین $x_j$ موقعیت دانش آموز دیگر که به صورت تصادفی انتخاب شده است. $r_i$ یک عدد تصادفی بین [۰,۱] است. اگر $x_i^{new}$ بر $x_i$ غلبه کند جایگزین آن می شود در غیر اینصورت $x_i$ بدون تغییر باقی می‌ماند.

بعد از این مرحله نیز شرایط اختتام الگوریتم بررسی شده و در صورت برقرار بودن الگوریتم خاتمه می یابد، در غیر اینصورت حلقه فوق بار دیگر تکرار می شود. شرط توقف در این الگوریتم رسیدن به یک تعداد تکرار از قبل تعیین شده است. پس از اتمام الگوریتم، جبهه پارتویی بهینه یعنی دانش آموزانی که در رتبه اول غلبگی قرار گرفته اند به عنوان خروجی لحاظ می‌شوند.

## ۵- نتایج محاسباتی

در این بخش به منظور ارزیابی روش های حل ارائه شده و اعتباردهی به این روش ها تعدادی مسئله تصادفی تولید شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مدل ریاضی خطی ارائه شده در این تحقیق در نرم افزار GAMS کد شده و با حل کننده CPLEX حل شده است. همچنین الگوریتم MOTLBO توسط MATLAB کد و اجرا شده است. تمامی اجراهای نرم افزاری در یک سیستم لپ تاپ با پردازنده Intel Core i۷ ۱,۹ GHz و حافظه ۸GB صورت گرفته است.

در ابتدا ۴ مثال تصادفی با ابعاد کوچک توسط مدل ریاضی مورد بررسی قرار می‌گیرند و جبهه پارتویی مربوط به جواب ها برای تصمیم گیرندگان ایجاد می‌گردد. اما از آنجایی که حل مسائل با اندازه متوسط و بزرگ توسط مدل ریاضی در زمان حل منطقی (در این تحقیق ۳۶۰۰ ثانیه درنظر گرفته شده است) غیرممکن است لذا ۸ مثال تصادفی دیگر در ابعاد متوسط و بزرگ ایجاد شده و توسط الگوریتم MOTLBO حل می گردند و جبهه پارتویی مربوط به هریک از مثال ها نمایش داده می‌شود.

### ۱-۵- ارزیابی مسائل کوچک

در این قسمت ۴ مثال با ویژگی‌های مختلف اما در ابعاد کوچک توسط مدل MILP حل شده و جبهه پارتویی ایجاد می‌گردد. برای ایجاد این جبهه بازه حد پایین و حدبالای تابع هدف دوم که در محدودیت ها قرار گرفته است به ۱۲ قسمت مساوی تقسیم شده و مقدار اپسیلون به ازای هریک مشخص می‌گردد. پس بنابراین به ازای هر مثال ۱۲ بار مدل ریاضی اجرا می‌گردد.

مثال اول مربوط به یک محیط تولیدی دو مرحله ای می‌باشد که در هر مرحله دو ماشین قرار دارد. هر ماشین نیز قابلیت تنظیم دو سرعت متفاوت تولیدی را دارا می‌باشد. در این سیستم دو مشتری که هر کدام دو سفارش کار دارند درخواست تولید داده اند. هزینه ارسال هر بسته به این دو مشتری معادل ۳۴ واحد پولی می‌باشد. سایر اطلاعات مربوط به این مسئله در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند.

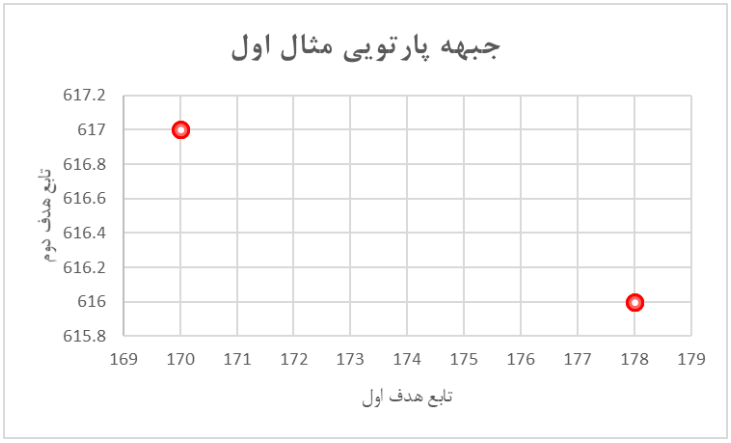
**جدول ۲.** اطلاعات زمان های پردازش مربوط به مثال اول

| | V۱ | V۲ |
|---|---|---|
| i۱.F۱.J۱ | ۸ | ۲۲ |
| I۱.F۱.J۲ | ۱۶ | ۱۱ |
| I۱.F۲.J۱ | ۱۱ | ۹ |
| I۱.F۲.J۲ | ۱۲ | ۲۲ |
| I۲.F۱.J۱ | ۶ | ۱۵ |
| I۲.F۱.J۲ | ۲۵ | ۱۷ |
| I۲.F۲.J۱ | ۲۵ | ۲۱ |
| I۲.F۲.J۲ | ۷ | ۱۸ |

**جدول ۳.** اطلاعات قدرت مورد نیاز مربوط به مثال اول

| | V۱ | V۲ |
|---|---|---|
| J۱ | ۵ | ۶ |
| J۲ | ۹ | ۷ |

براین اساس مدل ریاضی ۱۲ بار اجرا گردید و در نهایت جبهه پارتویی مربوط به این مسئله براساس شکل ۳ بدست آمد.




**شکل ۳.** جبهه پارتویی مربوط به مثال اول

همانطور که از شکل ۳ مشخص است علی رغم اجرای ۱۲ بار مدل ریاضی، اما عملا فقط دو نقطه بر روی جبهه پارتویی شناسایی شده است.

مثال دوم مربوط به یک محیط تولیدی سه مرحله ای می‌باشد که در هر مرحله دو ماشین قرار دارد. هر ماشین نیز قابلیت تنظیم سه سرعت متفاوت تولیدی را دارا می‌باشد. در این سیستم فقط یک مشتری وجود دارد که سفارش انجام دو کار را داده است. هزینه ارسال هر بسته به این مشتری معادل ۴۲ واحد پولی می‌باشد. سایر اطلاعات مربوط به این مسئله در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده اند.

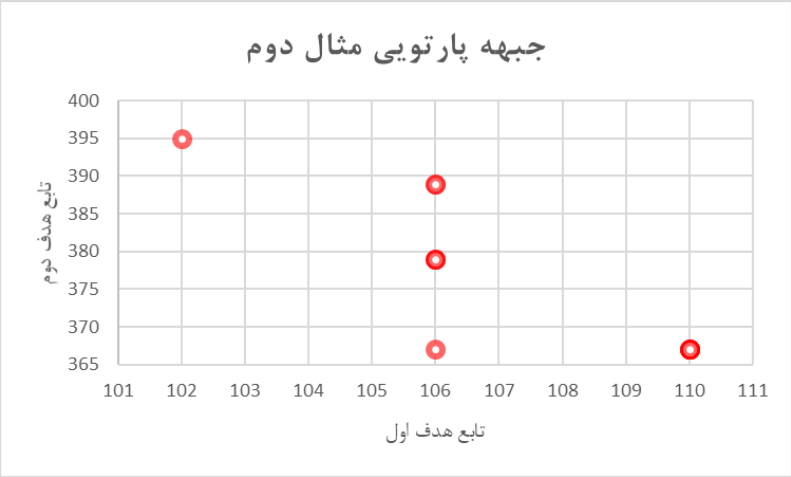
**جدول ۴.** اطلاعات زمان های پردازش مربوط به مثال دوم

| | V۱ | V۲ | V۳ |
|---|---|---|---|
| I۱.F۱.J۱ | ۸ | ۲۲ | ۱۶ |
| I۱.F۱.J۲ | ۱۱ | ۱۱ | ۹ |
| I۱.F۱.J۳ | ۱۲ | ۲۲ | ۶ |
| I۲.F۱.J۱ | ۱۵ | ۲۵ | ۱۷ |
| I۲.F۱.J۲ | ۲۵ | ۲۱ | ۷ |
| I۲.F۱.J۳ | ۱۸ | ۸ | ۱۰ |

**جدول ۵.** اطلاعات قدرت مورد نیاز مربوط به مثال دوم

| | V۱ | V۲ | V۳ |
|---|---|---|---|
| J۱ | ۹ | ۷ | ۷ |
| J۲ | ۷ | ۵ | ۵ |
| J۳ | ۸ | ۹ | ۶ |

براین اساس مدل ریاضی ۱۲ بار اجرا گردید و در نهایت جبهه پارتویی مربوط به این مسئله براساس شکل ۴ بدست آمد.




**شکل ۴**. جبهه پارتویی مربوط به مثال دوم

همانطور که از شکل ۴ مشخص است علی رغم اجرای ۱۲ بار مدل ریاضی، اما عملا فقط پنج نقطه بر روی جبهه پارتویی شناسایی شده است که در واقع جبهه پارتویی ضعیف را تشکیل داده‌اند.

مثال سوم مربوط به یک محیط تولیدی چهار مرحله‌ای می باشد که در هر مرحله سه ماشین قرار دارد. هر ماشین نیز قابلیت تنظیم سه سرعت متفاوت تولیدی را دارا می‌باشد. در این سیستم دو مشتری وجود دارد که هرکدام سفارش انجام سه کار را داده است. هزینه ارسال هر بسته به مشتری اول و دوم به ترتیب معادل ۲۸ و ۲۹ واحد پولی می‌باشد. سایر اطلاعات مربوط به این مسئله در جداول ۶ و ۷ نشان داده شده اند.

**جدول ۶**. اطلاعات زمان های پردازش مربوط به مثال سوم

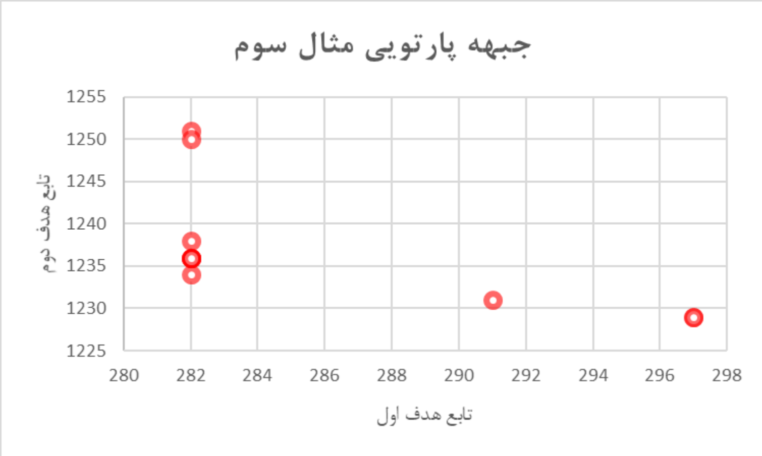
| | V۱ | V۲ | V۳ |
|---|---|---|---|
| I۱.F۱.J۱ | ۸ | ۲۲ | ۱٦ |
| I۱.F۱.J۲ | ۱۱ | ۱۱ | ۹ |
| I۱.F۱.J۳ | ۱۲ | ۲۲ | ٦ |
| I۱.F۱.J٤ | ۱٥ | ۲٥ | ۱۷ |
| I۱.F۲.J۱ | ۲٥ | ۲۱ | ۷ |
| I۱.F۲.J۲ | ۱۸ | ۸ | ۱۰ |
| I۱.F۲.J۳ | ۱۹ | ۱٤ | ۱۲ |
| I۱.F۲.J٤ | ۱۲ | ۷ | ۸ |

| | V۱ | V۲ | V۳ |
|---|---|---|---|
| I۲.F۱.J۱ | ۱۷ | ۲۲ | ۹ |
| I۲.F۱.J۲ | ۱۸ | ۲۱ | ۱۱ |
| I۲.F۱.J۳ | ۷ | ۱۵ | ۸ |
| I۲.F۱.J٤ | ۲۳ | ۱۰ | ۱۱ |
| I۲.F۲.J۱ | ۱۷ | ۲۰ | ۱۸ |
| I۲.F۲.J۲ | ۱٤ | ۱۳ | ۷ |
| I۲.F۲.J۳ | ۱۱ | ۵ | ۱۲ |
| I۲.F۲.J٤ | ۸ | ۱۸ | ۱٦ |
| I۳.F۱.J۱ | ۲۱ | ۱۱ | ۱۸ |
| I۳.F۱.J۲ | ۲۰ | ۱۸ | ۱۰ |
| I۳.F۱.J۳ | ٦ | ۷ | ۱۸ |
| I۳.F۱.J٤ | ۱٦ | ۵ | ۲۱ |
| I۳.F۲.J۱ | ٦ | ۸ | ۱٦ |
| I۳.F۲.J۲ | ۲۰ | ۸ | ۵ |
| I۳.F۲.J۳ | ۱۷ | ۱۸ | ۱۳ |
| I۳.F۲.J٤ | ۱۲ | ۱۰ | ۱۰ |

**جدول ۷.** اطلاعات قدرت مورد نیاز مربوط به مثال سوم

| | V۱ | V۲ | V۳ |
|---|---|---|---|
| J۱ | ۵ | ۱۰ | ۷ |
| J۲ | ۹ | ٦ | ۵ |
| J۳ | ۹ | ۵ | ٦ |
| J٤ | ۵ | ٦ | ۷ |

براین اساس مدل ریاضی ۱۲ بار اجرا گردید و در نهایت جبهه پارتویی مربوط به این مسئله براساس شکل ۵ بدست آمد.




**شکل ۵.** جبهه پارتویی مربوط به مثال سوم

همانطور که از شکل ۵ مشخص است علی رغم اجرای ۱۲ بار مدل ریاضی، اما عملا فقط هفت نقطه بر روی جبهه پارتویی شناسایی شده است که در واقع جبهه پارتویی ضعیف را تشکیل داده‌اند.

مثال چهارم مربوط به یک محیط تولیدی پنج مرحله ای می‌باشد که در هر مرحله سه ماشین قرار دارد. هر ماشین نیز قابلیت تنظیم سه سرعت متفاوت تولیدی را دارا می باشد. در این سیستم دو مشتری وجود دارد که هرکدام سفارش انجام سه کار را داده است. هزینه ارسال هر بسته به مشتری اول و دوم به ترتیب معادل ۳۰ و ۳۵ واحد پولی می‌باشد. سایر اطلاعات مربوط به این مسئله در جداول ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند.

**جدول ۸.** اطلاعات زمان های پردازش مربوط به مثال چهارم

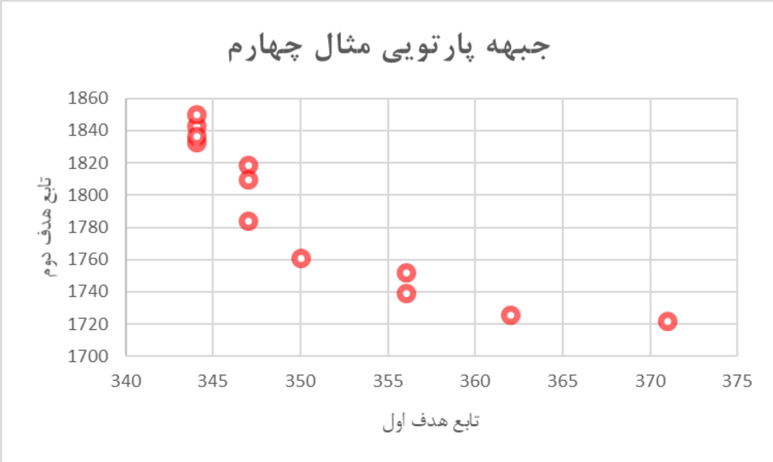
| | V۱ | V۲ | V۳ |
|---|---|---|---|
| I۱.F۱.J۱ | ٨ | ٢٢ | ١٦ |
| I۱.F۱.J۲ | ١١ | ١١ | ٩ |
| I۱.F۱.J۳ | ١٢ | ٢٢ | ٦ |
| I۱.F۱.J٤ | ١٥ | ٢٥ | ١٧ |
| I۱.F۱.J٥ | ٢٥ | ٢١ | ٧ |
| I۱.F۲.J۱ | ١٨ | ٨ | ١٠ |
| I۱.F۲.J۲ | ١٩ | ١٤ | ١٢ |
| I۱.F۲.J۳ | ١٢ | ٧ | ٨ |
| I۱.F۲.J٤ | ١٧ | ٢٢ | ٩ |
| I۱.F۲.J٥ | ١٨ | ٢١ | ١١ |
| I۲.F۱.J۱ | ٧ | ١٥ | ٨ |

| | V۱ | V۲ | V۳ |
|---|---|---|---|
| I۲.F۱.J۲ | ۲۳ | ۱۰ | ۱۱ |
| I۲.F۱.J۳ | ۱۷ | ۲۰ | ۱۸ |
| I۲.F۱.J٤ | ۱٤ | ۱۳ | ۷ |
| I۲.F۱.J٥ | ۱۱ | ٥ | ۱۲ |
| I۲.F۲.J۱ | ۸ | ۱۸ | ۱٦ |
| I۲.F۲.J۲ | ۲۱ | ۱۱ | ۱۸ |
| I۲.F۲.J۳ | ۲۰ | ۱۸ | ۱۰ |
| I۲.F۲.J٤ | ٦ | ۷ | ۱۸ |
| I۲.F۲.J٥ | ۱٦ | ٥ | ۲۱ |
| I۳.F۱.J۱ | ٦ | ۸ | ۱٦ |
| I۳.F۱.J۲ | ۲۰ | ۸ | ٥ |
| I۳.F۱.J۳ | ۱۷ | ۱۸ | ۱۳ |
| I۳.F۱.J٤ | ۱۲ | ۱۰ | ۱۰ |
| I۳.F۱.J٥ | ۷ | ۲٤ | ۱۲ |
| I۳.F۲.J۱ | ۲۱ | ۱۱ | ۷ |
| I۳.F۲.J۲ | ۲۰ | ٦ | ۹ |
| I۳.F۲.J۳ | ٥ | ۱۰ | ۱٥ |
| I۳.F۲.J٤ | ۸ | ۸ | ۱۱ |
| I۳.F۲.J٥ | ۱۱ | ۱۱ | ۲٥ |

**جدول ۹.** اطلاعات قدرت مورد نیاز مربوط به مثال چهارم

| | V۱ | V۲ | V۳ |
|---|---|---|---|
| J۱ | ۱۰ | ۷ | ۷ |
| J۲ | ۹ | ۷ | ۱۰ |
| J۳ | ٥ | ۹ | ٥ |
| J٤ | ۸ | ٥ | ٥ |
| J٥ | ۷ | ۸ | ۸ |

براین اساس مدل ریاضی ۱۲ بار اجرا گردید و در نهایت جبهه پارتویی مربوط به این مسئله براساس شکل ۶ بدست آمد.




**شکل ۶**. جبهه پارتویی مربوط به مثال چهارم

همانطور که از شکل ۶ مشخص است ۱۲ نقطه بر روی جبهه پارتویی شناسایی شده است که در واقع جبهه پارتویی ضعیف را تشکیل داده‌اند.

### ۲-۵- اعتبارسنجی مدل ریاضی

یکی از مراحل مهم در ارزیابی مدل‌های ریاضی، اعتبارسنجی این مدل‌ها می باشد. این اعتبارسنجی در دو فاز داخلی و خارجی اتفاق می‌افتد. اعتبارسنجی داخلی مربوط به عملکرد صحیح مدل پس از کدینگ در نرم افزار است. اعتبارسنجی خارجی مدل مربوط به عملکرد و دقت رسیدن به جواب‌ها توسط مدل در مقایسه با سایر روش‌های حل است. در این تحقیق با توجه به عملکرد موفق حل چهار مسئله نمونه توسط مدل ریاضی کد شده در گمز، اعتبارسنجی داخلی مدل مورد تایید قرار می‌گیرد. همچنین جهت اعتبارسنجی خارجی مدل، نتایج حل چهار مسئله فوق که توسط مدل ریاضی بدست آمده است با الگوریتم MOTLBO ارائه شده مقایسه می‌شود. جهت انجام این کار از معیار متوسط فاصله ایده‌آل (MID) که میانگین فاصله جواب-های پارتو از مبدا مختصات را نشان می‌دهد استفاده می‌گردد. این شاخص از روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه می‌شود:

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^{n} c_i}{n} \qquad (۱۸)$$

$$c_i = \sqrt{f_{1i}^{\,2} + f_{2i}^{\,2}} \qquad (۱۹)$$

که در آن $f_{1i}$ و $f_{2i}$ مقدار توابع هدف اول و دوم را بیان می‌کنند. جدول ۱۰ نتایج مربوط به مقایسه این شاخص برای هر دو روش حل ارائه شده را نشان می‌دهد.

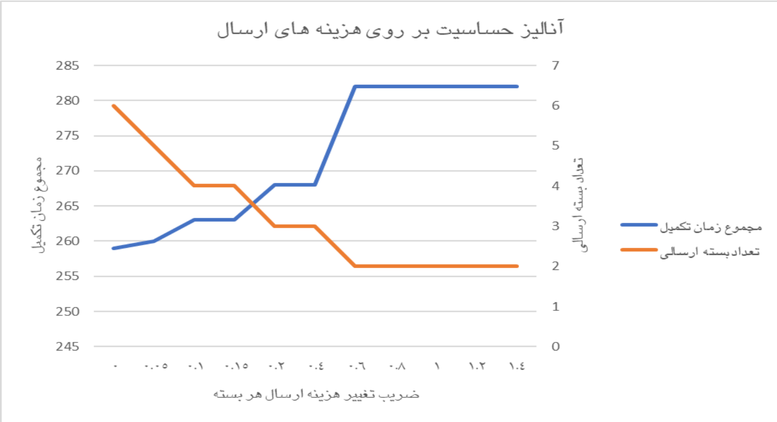
**جدول ۱۰.** مقایسه شاخص MID برای مسائل کوچک

| شماره مسئله | اپسیلون محدودیت | MOTLBO |
|---|---|---|
| ۱ | ۶۴۰.۶ | ۶۴۰.۶ |
| ۲ | ۳۹۱.۱ | ۳۹۱.۱ |
| ۳ | ۱۲۶۹.۷ | ۱۲۶۹.۷ |
| ۴ | ۱۸۲۵.۹ | ۱۸۵۷.۶ |

همانطور که از نتایج جدول ۱۰ مشخص است، هر دو الگوریتم در حل سه مسئله اول بصورت مشابه عمل کرده و مقدار شاخص MID یکسان بدست آمده است. در خصوص مسئله چهارم روش اپسیلون محدودیت عملکرد بهتری نسبت به MOTLBO داشته است.

### ۳-۵- آنالیز حساسیت

یکی از پارامترهای مهم در مسئله مورد بررسی که می‌تواند بر جواب توابع هدف تاثیر مستقیم بگذارد، مقدار هزینه ارسال بسته ها، یعنی $D_f$، است. به همین دلیل در این بخش تحلیل حساسیتی روی این پارامتر و برای مسئله چهارم صورت می‌گیرد. بدین منظور مقدار $\varepsilon = 1800$ لحاظ می‌گردد و مسئله به ازای ضرایب ۰ تا ۱.۴ از مقدار اولیه $D_f$ آنالیز می‌شود. شکل ۷ تغییرات مجموع زمان تکمیل واقعی کارها و همچنین تعداد بسته ارسالی برای مشتریان را براساس تغییر ضریب‌های فوق نشان می‌دهد.




**شکل ۷.** آنالیز حساسیت هزینه ارسال بسته‌ها

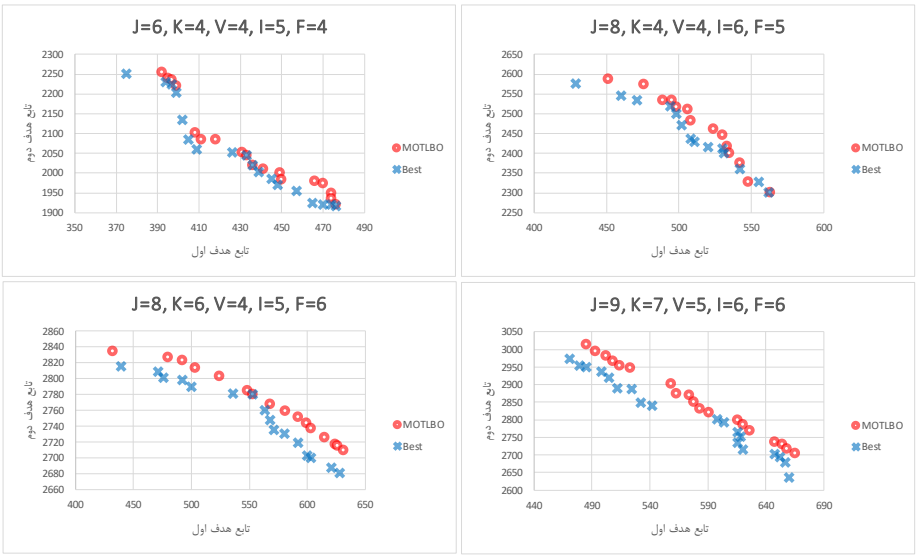
همانطور که مشخص است با بزرگ‌تر شدن هزینه‌های ارسال بسته‌ها، از نگاه مدل به صرفه می‌باشد که تعداد بسته‌های ارسالی کاهش یابد بطوریکه برای ضریب ۰ تعداد ۶ بسته و برای ضرایب ۰.۶ به بالا تعداد ۲ بسته ارسال می‌گردد. اما در مقابل با کاهش تعداد بسته‌های ارسالی، مدت زمان انتظار کارهای تکمیل شده جهت ارسال بالاتر رفته و در نتیجه مجموع زمان‌های تکمیل واقعی کارها افزایش می‌یابد. نتیجه حاصله از این بررسی نشان می‌دهد که برای مسئله چهارم، مدل حساسیتی نسبت به بزرگ‌تر شدن هزینه‌های ارسال بسته‌ها بعد از ضریب ۰.۶ ندارد و در حالت بهینه کلیه کارهای مشتری اول توسط یک بسته و کلیه کارهای مشتری دوم توسط یک بسته دیگر ارسال خواهد گردید.

## ۴-۵- ارزیابی مسائل متوسط و بزرگ

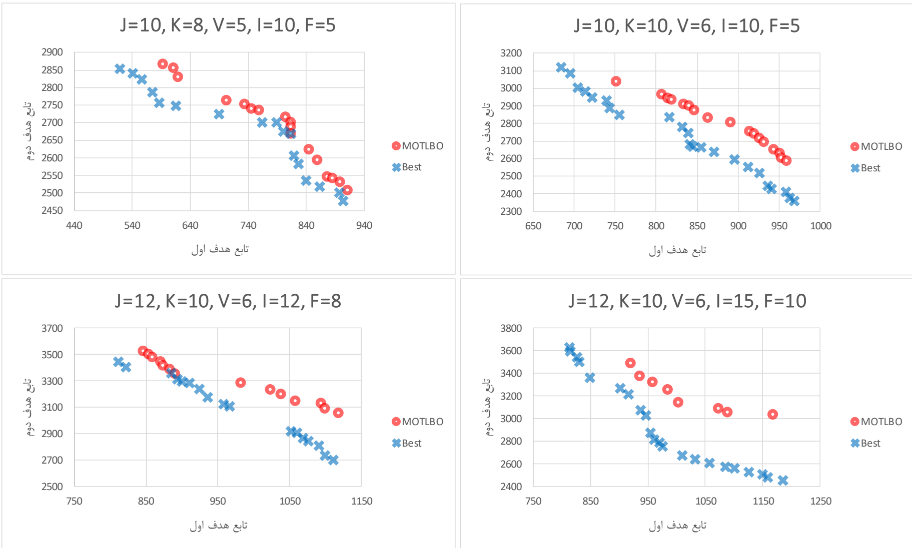
به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم MOTLBO در این بخش ۸ مسئله شامل ۴ مسئله با ابعاد متوسط و ۴ مسئله با ابعاد بزرگ بصورت تصادفی تولید شده و توسط الگوریتم حل می‌گردد. جهت تولید تصادفی مسائل، مقدار زمان پردازش بصورت تصادفی از تابع یکنواخت [۵,۳۰] انتخاب می‌گردد. مقدار قدرت مورد نیاز هر ماشین نیز بصورت تصادفی از تابع یکنواخت [۵,۱۵] انتخاب می‌گردد. نهایتا مقدار هزینه ارسال هر بسته نیز بصورت تصادفی از تابع یکنواخت [۲۰,۴۰] انتخاب می‌گردد.

با توجه به آنکه جبهه پارتویی بهینه توسط مدل ریاضی در مدت زمان حل منطقی قابل حصول نیست لذا جهت بررسی عملکرد الگوریتم MOTLBO هر مسئله در دو تنظیم مختلف توسط MOTLBO حل می‌گردد. در تنظیم اول این الگوریتم پس از اجرای ۱۰۰ تکرار متوقف می‌گردد.

سپس جهت رسیدن به بهترین جبهه پارتویی ممکن، مسئله توسط MOTLBO با ۵۰۰ تکرار به عنوان شرط توقف مجددا حل می گردد. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نتایج حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ را بصورت نمایش جبهه پارتویی حاصله نشان می‌دهند.




**شکل ۸.** نتایج محاسباتی مربوط به مسائل با ابعاد متوسط




**شکل ۹.** نتایج محاسباتی مربوط به مسائل با ابعاد بزرگ

نتایج حل مسائل با ابعاد متوسط نشان می دهد که الگوریتم MOTLBO در ۱۰۰ تکرار اجرا عملکرد مطلوبی داشته و عملکرد آن تفاوت زیادی با تعداد تکرار ۵۰۰ در ایجاد جبهه پارتویی بهینه ندارد. دلیل این ادعا اختلاف ناچیز میانگین شاخص MID در دو حالت اجرای الگوریتم با ۱۰۰ و ۵۰۰ تکرار است. براساس نتایج حاصله، میانگین اختلاف شاخص MID در مسائل متوسط ۰.۸٪ می‌باشد که اختلاف ناچیزی می‌باشد. همچنین از لحاظ پراکندگی و سطح پوشش نیز این الگوریتم در هر دو تنظیم ۱۰۰ و ۵۰۰ تکرار بصورت مشابه عمل می‌نماید.

برخلاف حل مسائل با ابعاد متوسط، در حل مسائل با ابعاد بزرگ‌تر الگوریتم MOLBO با تعداد تکرار ۱۰۰ توانایی قابل قبولی به نسبت تعداد تکرار ۵۰۰ نشان نمی‌دهد. در تمامی مسائل از لحاظ بهینگی، جبهه پارتویی بدست آمده در تنظیمات ۵۰۰ تکرار وضعیت بهتری نسبت به حالتی است که تنظیمات با ۱۰۰ تکرار دارد. دلیل این ادعا اختلاف قابل توجه میانگین شاخص MID در دو حالت اجرای الگوریتم با ۱۰۰ و ۵۰۰ تکرار است. براساس نتایج حاصله، میانگین اختلاف شاخص MID در مسائل بزرگ ۴.۸٪ می‌باشد که اختلاف قابل توجهی می‌باشد. همچنین از لحاظ پوشش و میزان پراکندگی نیز عملکرد این الگوریتم با ۵۰۰ تکرار به مراتب بهتر از حالتی است که تنظیمات با ۱۰۰ تکرار بوده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که در

حل مسائل با ابعاد بزرگ بهتر است شرط توقف را تعداد تکرار نزدیک به ۵۰۰ در نظر گرفت اما برای مسائل با ابعاد متوسط لحاظ کردن ۱۰۰ تکرار جهت توقف الگوریتم شرایط مناسبی ایجاد خواهد نمود.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای اولین بار مسئله زمانبندی سبز در محیط جریان کارگاهی ترکیبی به همراه سیستم ارسال بسته‌ای سفارش‌ها برای مشتریان مورد بررسی قرار گرفت. به منظور رسیدن به جواب بهینه یک مدل برنامه ریزی خطی عددصحیح دو هدفه ارائه گردید. هدف اول مسئله مینیمم کردن مجموع هزینه مربوط به مجموع زمان های تکمیل کارها و هزینه‌های ارسال بسته ای می‌باشد. هدف دوم به دنبال مینیمم کردن مصرف انرژی است. مدل ریاضی با کمک روش محدودیت اپسیلون تک هدفه شد و تعدادی مسئله با ابعاد کوچک با کمک آن مورد ارزیابی و تحلیل همه جانبه قرار گرفت و تاثیرگذاری توجه به مصرف انرژی بر زمانبندی تولید سفارش ها ارائه گردید. همچنین با توجه به NP-hard بودن مسئله، جهت حل مسائل بزرگ، از یک الگوریتم MOTLBO استفاده شد. بدین منظور ۸ مسئله با ابعاد متوسط و بزرگ بصورت تصادفی ایجاد شد و توسط این الگوریتم در دو تنظیم متفاوت حل گردید.

نتایج این تحقیق نشان داد که توجه به میزان مصرف انرژی در محیط‌های تولیدی جریان کارگاهی بشدت بر روی زمانبندی تولید سفارش‌ها و همچنین هزینه‌های تولیدی و ارسال محصولات تاثیرگذار است. به جهت ارزیابی این ادعا چهار مسئله کوچک با مدل ریاضی و با کمک روش اپسیلون محدودیت حل گردید و جبهه پارتویی بهینه ایجاد شد. بررسی ها نشان داد که در مسائل اول تا چهارم، توجه به مصرف انرژی در زمانبندی تولید سبب افزایش هزینه‌های تولید و ارسال به ترتیب معادل ۴.۷٪، ۷.۸٪، ۵.۳٪ و ۵.۲٪ می‌گردد. اما از آن طرف سبب کاهش مصرف انرژی به ترتیب معادل ۰.۲٪، ۸.۱٪، ۱.۸٪ و ۶.۴٪ می‌گردد. بنابراین به تصمیم گیرندگان پیشنهاد می‌گردد با توجه به درجه اهمیت هر کدام از توابع هدف در صنعت خود، نقطه بهینه را از جبهه پارتویی انتخاب نمایند. همچنین به منظور اعتبارسنجی مدل ریاضی، با کمک شاخص MID نتایج حل چهار مسئله کوچک با حل‌های بدست آمده توسط MOTLBO مقایسه گردید و در تمامی مسائل مدل ریاضی جوابی معادل و یا بهتر از الگوریتم فراابتکاری ایجاد نمود. آنالیز حساسیت بر روی پارامتر $D_f$ نشان داد که با افزایش این پارامتر، تمایل مدل به کاهش تعداد بسته‌های ارسالی خواهد رفت اما در مقابل مجموع زمان‌های تکمیل واقعی کارها افزایش می‌یابد.

در حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ با کمک الگوریتم MOTLBO، نتایج نشان داد که این الگوریتم توانایی ایجاد جبهه پارتویی نزدیک به بهینه را دارا می‌باشد. البته که در حل مسائل متوسط الگوریتم با ۱۰۰ تکرار قادر است بسیار مناسب عمل کرده بطوری‌که میانگین اختلاف شاخص MID با بهترین اجرا ۰.۸٪ می‌باشد. اگرچه که این اختلاف برای مسائل با ابعاد بزرگ ۴.۸٪ می‌باشد.

علی رغم نتایج بدست آمده این تحقیق دارای محدودیت‌هایی بوده است. یکی از این محدودیت ها عدم ارائه روش‌های حل دیگر می‌باشد. به همین دلیل به عنوان مطالعه آتی می‌توان پیشنهاد نمود این مسئله توسط روش‌های حل شمارشی و دقیق مانند الگوریتم شاخه و کرانه مورد ارزیابی قرار گرفته و با نتایج این تحقیق مقایسه شود. محدودیت دیگر این تحقیق بررسی مسائل در محیط قطعی می‌باشد. به همین دلیل پیشنهاد می گردد در مطالعات آتی برخی از پارامترهای مسئله بخصوص زمان پردازش سفارش ها بصورت غیرقطعی درنظر گرفته شود. همچنین در این تحقیق میزان مصرف انرژی براساس تنظیمات سرعت پردازش هر ماشین فرض شده است. از گونه‌های دیگر آن می‌توان به درنظر گرفتن پیک‌های مصرف انرژی و همچنین تفاوت مصرف انرژی ماشین‌های مختلف اشاره کرد که می‌تواند به عنوان مطالعات آتی مورد بررسی قرار گیرند.

## ۷- پی‌نوشت‌ها

۱. Batch delivery system
۲. Hybrid flow shop problem
۳. Mixed integer linear programming
۴. Epsilon-Constraint
۵. Multi-objective teaching-learning based optimization
۶. Wale optimization
۷. Non-dominated sorting

## ۸- منابع

[۱] B. Zhang, Q.-k. Pan, L. Gao, X.-l. Zhang, and K.-k. Peng, "A multi-objective migrating birds optimization algorithm for the hybrid flowshop rescheduling problem," *Soft Computing*, vol. ۲۳, no. ۱۷, pp. ۸۱۰۱-۸۱۲۹, ۲۰۱۹.

[۲] T.-P. Chung, H. Sun, and C.-J. Liao, "Two new approaches for a two-stage hybrid flowshop problem with a single batch processing machine under waiting time constraint," *Computers & Industrial Engineering*, vol. ۱۱۳, pp. ۸۵۹-۸۷۰, ۲۰۱۷.

[۳] I. Rastgar, J. Rezaeian, I. Mahdavi, and P. Fattahi, "Integrated production planning and scheduling with maintenance constraints in hybrid flow shop

environment," *Modern Research in Decision Making,* vol. ۷, no. ۲, pp. ۱-۲۷, ۲۰۲۲.

[٤] C. Yu, Q. Semeraro, and A. Matta, "A genetic algorithm for the hybrid flow shop scheduling with unrelated machines and machine eligibility," *Computers & Operations Research,* vol. ۱۰۰, pp. ۲۱۱-۲۲۹, ۲۰۱۸.

[٥] I. Módos, P. Šucha, and Z. Hanzálek, "On parallel dedicated machines scheduling under energy consumption limit," *Computers & Industrial Engineering,* vol. ۱٥۹, p. ۱۰۷۲۰۹, ۲۰۲۱.

[٦] A. Niusha, A. Azar, H. Moazzez, and K. Heydari, "A multi-objective optimization model for iran's renewable power portfolio," *Management Research in Iran,* vol. ۲۳, no. ۱, pp. ۱۷۱-۱۹۱, ۲۰۲۱.

[۷] H. Hassanpour, M. Soltani Tehrani, and S. Ramezani, "Two-objective optimization model of costs and carbon dioxide in closed loop supply chain," *Management Research in Iran,* vol. ۱۹, no. ۱, pp. ۱٦۹-۱۸۹, ۲۰۲۱.

[۸] K. Fang, N. Uhan, F. Zhao, and J. W. Sutherland, "A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction," *Journal of Manufacturing Systems,* vol. ۳۰, no. ٤, pp. ۲۳٤-۲٤۰, ۲۰۱۱.

[۹] S. A. Mansouri, E. Aktas, and U. Besikci, "Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption," *European Journal of Operational Research,* vol. ۲٤۸, no. ۳, pp. ۷۷۲-۷۸۸, ۲۰۱٦.

[۱۰] R. Ramezanian, M. M. Vali-Siar, and M. Jalalian, "Green permutation flowshop scheduling problem with sequence-dependent setup times: a case study," *International Journal of Production Research,* vol. ٥۷, no. ۱۰, pp. ۳۳۱۱-۳۳۳۳, ۲۰۱۹.

[۱۱] 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 Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems,* vol. ٥۰, no. ۱۲, pp. ٤۹۸٤-٤۹۹۹, ۲۰۱۹.

[۱۲] C.-H. Liu and D.-H. Huang, "Reduction of power consumption and carbon footprints by applying multi-objective optimisation via genetic algorithms," *International Journal of Production Research,* vol. ٥۲, no. ۲, pp. ۳۳۷-۳٥۲, ۲۰۱٤.

[۱۳] M. Li and G.-G. Wang, "A Review of Green Shop Scheduling Problem," *Information Sciences,* ۲۰۲۲.

[۱٤] N. G. Hall and C. N. Potts, "Supply chain scheduling: Batching and delivery," *Operations Research,* vol. ٥۱, no. ٤, pp. ٥٦٦-٥۸٤, ۲۰۰۳.

[۱٥] Y. Yin, T. Cheng, C.-J. Hsu, and C.-C. Wu, "Single-machine batch delivery scheduling with an assignable common due window, "*Omega,* vol. ٤۱, no. ۲, pp. ۲۱٦-۲۲٥, ۲۰۱۳.

[۱٦] M. M. Mazdeh, M. Rostami, and M. H. Namaki, "Minimizing maximum tardiness and delivery costs in a batched delivery system," *Computers & Industrial Engineering,* vol. ٦٦, no. ٤, pp. ٦۷٥-٦۸۲, ۲۰۱۳.

[۱۷] M. Rostami, O. Kheirandish, and N. Ansari, "Minimizing maximum tardiness and delivery costs with batch delivery and job release times," *Applied Mathematical Modelling*, vol. ۳۹, no. ۱٦, pp. ٤۹۰۹-٤۹۲۷, ۲۰۱٥.

[۱۸] A. Hamidinia, S. Khakabimamaghani, M. M. Mazdeh, and M. Jafari, "A genetic algorithm for minimizing total tardiness/earliness of weighted jobs in a batched delivery system," *Computers & Industrial Engineering*, vol. ٦۲, no. ۱, pp. ۲۹-۳۸, ۲۰۱۲.

[۱۹] F. Ahmadizar and S. Farhadi, "Single-machine batch delivery scheduling with job release dates, due windows and earliness, tardiness, holding and delivery costs," *Computers & Operations Research*, vol. ٥۳, pp. ۱۹٤-۲۰٥, ۲۰۱٥.

[۲۰] M. Khodabandeh, S. R. Hejazi Taghanaki, and M. Rasti-Barzoki, "A Heuristic Method to Minimize Total Weighted Number of Tardy Jobs and Transportation Costs for an Integrated Production and Distribution Problem with VRP," *Modern Research in Decision Making*, vol. ۳, no. ۳, pp. ٥٥-۷۸, ۲۰۱۸.

[۲۱] A. Gharaei and F. Jolai, "A Pareto approach for the multi-factory supply chain scheduling and distribution problem," *Operational Research*, vol. ۲۱, no. ٤, pp. ۲۳۳۳-۲۳٦٤, ۲۰۲۱.

[۲۲] M. M. Mazdeh and M. Rostami, "A branch-and-bound algorithm for two-machine flow-shop scheduling problems with batch delivery costs," *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, vol. ۱, no. ۲, pp. ۹٤-۱۰٤, ۲۰۱٤.

[۲۳] M. Kong, J. Pei, J. Xu, X. Liu, X. Yu, and P. M. Pardalos, "A robust optimization approach for integrated steel production and batch delivery scheduling with uncertain rolling times and deterioration effect," *International Journal of Production Research*, vol. ٥۸, no. ۱۷, pp. ٥۱۳۲-٥۱٥٤, ۲۰۲۰.

[۲٤] K. Wang, H. Luo, F. Liu, and X. Yue, "Permutation flow shop scheduling with batch delivery to multiple customers in supply chains," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. ٤۸, no. ۱۰, pp. ۱۸۲٦-۱۸۳۷, ۲۰۱۷.

[۲٥] H. Kazemi, M. M. Mazdeh, and M. Rostami, "The two stage assembly flow-shop scheduling problem with batching and delivery," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. ٦۳, pp. ۹۸-۱۰۷, ۲۰۱۷.

[۲٦] M. Rostami and S. Shad, "A Hybrid Bee Algorithm for Two-Machine Flow-Shop Scheduling Problems with Batch Delivery," *Journal of Quality Engineering and Production Optimization*, vol. ٥, no. ۱, pp. ۱۳۷-۱٦٤, ۲۰۲۰.

[۲۷] Q. Li, J. Li, X. Zhang, and B. Zhang, "A wale optimization algorithm for distributed flow shop with batch delivery," *Soft Computing*, vol. ۲٥, no. ۲۱, pp. ۱۳۱۸۱-۱۳۱۹٤, ۲۰۲۱.

[۲۸] R. V. Rao, V. J. Savsani, and D. Vakharia, "Teaching–learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems," *Computer-aided design*, vol. ٤۳, no. ۳, pp. ۳۰۳-۳۱٥, ۲۰۱۱.

[۲۹] D. Li, C. Zhang, X. Shao, and W. Lin, "A multi-objective TLBO algorithm for balancing two-sided assembly line with multiple constraints," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. ۲۷, no. ٤, pp. ۷۲٥-۷۳۹, ۲۰۱٦.

[۳۰] R. Enayatifar, M. Yousefi, A. H. Abdullah, and A. N. Darus, "MOICA: A novel multi-objective approach based on imperialist competitive algorithm," *Applied Mathematics and Computation*, vol. ۲۱۹, no. ۱۷, pp. ۸۸۲۹-۸۸٤۱, ۲۰۱۳.