نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید
IERPS

نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

سال دهم، شماره بیست و یکم، پاییز و زمستان ۱۴۰۱، صفحه ۱۰۷-۱۱۷
www.ier.basu.ac.ir

ISSN: 2345-2269

DOI: 10.22084/IER.2023.27325.2111

یک مدل برنامه‌ریزی خطی دوهدفهٔ فازی برای مسأله زمان‌بندی تک‌ماشین تولید انباشته‌ای با درنظر گرفتن سیاست تعرفهٔ زمانی مصرف برق

لادن السادات موسوی[۱]، فریبرز جولای[۲*]

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، پردیس بین‌المللی کیش دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۱۷
پذیرش ۱۴۰۱/۰۶/۰۵
(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:
سیاست تعرفهٔ زمان مصرف برق
ماشین تولید انباشته‌ای
زمان ختم کل کارها
زمان پردازش فازی
برنامه‌ریزی چندهدفه فازی

خلاصه

با کاهش منابع انرژی‌های تجدیدناپذیر و افزایش هزینه انرژی در سال‌های اخیر، توسعه یک مدل برای درنظر گرفتن انرژی و به‌خصوص برق بسیار حائز اهمیت است. سیاست قیمت‌گذاری زمانی مصرف برق یکی از سیاست‌های تشویقی در همه دنیا است که فرصت‌های جدیدی برای صرفه‌جویی در مصرف برق و هزینه انرژی فراهم می‌کند. این مقاله یک مسأله زمان‌بندی کارهای با اندازه یکسان بر روی یک ماشین تولید انباشته‌ای با دو تابع هدف حداقل‌سازی هزینه برق مصرفی ماشین و حداقل‌سازی زمان ختم کل کارها را به‌طور همزمان تحت سیاست قیمت‌گذاری زمانی مصرف برق درنظر می‌گیرد. همچنین باتوجه به وجود عدم قطعیت‌هایی همچون اطلاعات ناکامل و ناکافی در مورد زمان فعالیت‌ها و تغییرات محیطی در شرایط واقعی، زمان پردازش کارها به‌صورت فازی درنظر گرفته شده است. این مدل ریاضی دوهدفه با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی چندهدفه فازی و با بهره‌گیری از مفاهیم ایده‌آل مثبت و منفی برای اهداف به یک مدل تک‌هدفه تبدیل و حل می‌شود. با انجام دو سری آزمایشات عددی کارآیی روش پیشنهادی و کارآمدی مدل در کاهش هزینه برق نشان داده می‌شود.

۱. مقدمه

با توسعه سریع اقتصاد، تقاضای انرژی با رشد خیلی سریع به گلوگاه توسعه اقتصاد در بسیای ازکشورها تبدیل شده است. سهم برق به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین انرژی‌ها، حدود ۳۰ درصدازکل تقاضای انرژی صنعت در منطقه سازمان همکاری اقتصادی آسیا-اقیانوسیه (APEC) است [۱]. بنابراین ارتقا بهره‌وری و صرفه‌جویی در مصرف انرژی و به‌خصوص انرژی برق در صنایع بسیار حائز اهمیت است که ازطریق سه راهبرد قابل تحقق است: اولی صرفه‌جویی ساختاری در انرژی نامیده می‌شود که به کاهش صنایع پرمصرف انرژی و روی آوردن به صنایع کم مصرف انرژی اشاره دارد. مورد دوم صرفه‌جویی فنی در انرژی است که منظور از آن بهبود فناوری ماشین‌های تولیدی به‌منظور کاهش مصرف انرژی آن‌ها است. سومین مورد، مدیریت صرفه‌جویی در انرژی است که به‌دنبال کاهش مصرف و صرفه‌جویی درانرژی به‌وسیله مدیریت علمی است [۲]. در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی بر روی صرفه‌جویی انرژی در برنامه‌ریزی تولید متمرکز شده‌اند. افسر و بهنامیان [۳] ماشین‌های موازی ناهمگون را با درنظر گرفتن هزینه‌های انرژی زمان‌بندی کردند. عطائی و همکاران [۴] زمان‌بندی ماشین‌های موازی را با درنظر گرفتن تابع هدف کاهش انرژی توسعه داده‌اند. یکی از تکنیک‌های مؤثر و پرکاربرد برای کاهش هزینه برق، برنامه‌ریزی مناسب تولید است. درمقایسه با دو راهبرد اول و دوم، راهبرد سوم سریع‌ترین، ارزان‌ترین و انعطاف‌پذیرترین راه است.

* نویسنده مسئول: فریبرز جولای
تلفن: ۸۸۰۲۱۰۶۷-۰۲۱؛ پست الکترونیکی: fjolai@ut.ac.ir

مجموعه‌ای از سیاست‌های صرفه‌جویی در انرژی در بسیاری ازکشورها مانند آمریکا، کانادا، فرانسه وچین وجود دارد. در بین این سیاست‌ها، قیمت‌گذاری زمان مصرف برق یکی ازسیاست‌های مهم و موفق است [۵،۶]. با این سیاست، فرصت مناسبی برای کارخانجات تولیدی فراهم می‌شود تا با انجام عملیات با مصرف انرژی بالا در ساعات کم باری و عملیات با مصرف انرژی کم در ساعات پرباری هزینه تولید خود را کاهش دهند. علاوه‌بر این، با بالانس مصرف برق بین دوره اوج مصرف و دوره کم باری بوسیله کنترل قیمت، کاهش بار در دوره اوج مصرف بهبود می‌یابد و انرژی برق برای کل جامعه ذخیره می‌شود [۷،۸].

بسیاری از گارگاه‌های تولیدی دارای ماشین‌های تولیدانباشته‌ای می‌باشند. این ماشین‌ها توانایی پردازش چندین کار به‌صورت همزمان را دارند. ماشین‌های تولید انباشته‌ای در صنایع تولید نیمه هادی [۹]، تولید فولاد [۱۰] و صنایع مختلف دیگری وجود دارند که خیلی از آن‌ها جزو صنایع انرژی‌بر هستند. به‌طوری‌که ممکن است هزینه مصرف برق آن‌ها ۱۰ تا ۱۵ درصد هزینه تولید محصول نهایی را شامل شود [۱۱]. لذا در سال‌های اخیر موضوع زمان‌بندی ماشین‌های تولید انباشته‌ای با ملاحظات انرژی مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است، ولیکن در تمامی این تحقیقات زمان پردازش کارها قطعی فرض شده است. زمان پردازش کارها به‌دلیل ناکامل بودن و یا ناکافی بودن دانش و اطلاعات و همچنین تغییرات محیطی داخلی و خارجی به‌صورت یک عدد قطعی قابل بیان نیستند، به‌همین دلیل در این شرایط و همچنین به‌دلیل عدم قطعیت‌هایی که در دنیای واقعی وجود دارد، مجموعه‌های فازی می‌توانند به مدل‌سازی بهتر زمان انجام کارها کمک کنند و برای مواجهه با عدم قطعیت‌های دنیای واقعی استفاده شوند. دلایل مختلف و انواع گوناگونی از عدم قطعیت وجود دارد [۱۲،۱۳]. در این شرایط مجموعه‌های فازی می‌توانند مثمر ثمر واقع شوند [۱۴].

در این پژوهش برای اولین‌بار مسأله زمان‌بندی کارهای با زمان پردازش فازی بر روی یک ماشین تولید انباشته‌ای با اهداف حداقل‌سازی زمان ختم کل کارها و حداقل‌سازی هزینه مصرف انرژی تحت سیاست تعرفه زمانی مصرف برق بررسی شده است. برای حل این مسأله با استفاده از برش‌های آلفا مسأله فرموله می‌شود. سپس مدل دوهدفه فازی پیشنهادی با استفاده از مدل برنامه‌ریزی دوهدفه خطی فازی تبدیل به یک مدل تک‌هدفه فازی شده و حل می‌شود.

در بخش دوم به مرور ادبیات مرتبط با این تحقیق پرداخته می‌شود. بخش سوم به تشریح مسأله و مدل پیشنهادی می‌پردازد. در بخش چهارم کاربرد و کارایی مدل با یک‌سری محاسبات عددی نشان داده شده است. در پایان در بخش پنجم نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی ارائه شده است.

۲. مرور ادبیات مقالات زمان‌بندی تولید انباشته‌ای با ملاحظات مصرف انرژی

علاقه‌مندان به ادبیات موضوع زمان‌بندی ماشین‌های تولید انباشته‌ای را به مقاله فولر و مانک [۱۵] ارجاع می‌دهیم که به‌صورت جامع و کامل به طبقه‌بندی تحقیقات این حوزه از مسائل زمان‌بندی می‌پردازد. بنابراین درادامه این بخش فقط به مرور تحقیقاتی می‌پردازیم که برنامه زمان‌بندی ماشین‌های تولید انباشته‌ای را با ملاحظات انرژی مطالعه کرده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد در تمام این تحقیقات ظرفیت ماشین تولید انباشته‌ای محدود درنظر گرفته شده است. همچنین زمان پردازش یک انباشته برابر بزرگترین زمان فرآیند یک کار در داخل انباشته می‌باشد. همچنین تمام این تحقیقات سیاست تعرفه زمانی مصرف برق را به‌عنوان سیاست افزایش بهره‌وری انرژی اتخاذ کرده‌اند.

احتمالاً چنگ و همکاران [۲] اولین تحقیقی بوده که مسأله زمان‌بندی ماشین‌های تولید انباشته‌ای را با ملاحظات مصرف انرژی بررسی کرده است. آن‌ها یک ماشین تولید انباشته‌ای را با معیار حداقل‌سازی زمان ختم کل کارها (C_{max}) و سیاست تعرفه زمانی مصرف(TOU) درنظر گرفتند. ابتدا یک مدل دوهدفه برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی ارائه و سپس خواص بهینه مسأله را مورد بررسی قرار دادند. همچنین الگوریتمی برای خطی‌سازی و حل مسأله براساس روش ε-constraint پیشنهاد شده است.

در سال‌های بین ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ مسأله مطرح شده توسط چنگ و همکاران [۲] از جهات مختلف توسعه داده شده است. ازجمله می‌توان به توسعه مقاله چنگ و همکاران [۱۶] اشاره کرد که در سال ۲۰۱۶ همان مفروضات مسأله مطرح شده توسط چنگ و همکاران [۲] را درنظر می‌گیرد ولیکن روش جدیدی برای تبدیل مسأله به یک تابع هدف براساس روش اپسیلون محدودیت ارائه و پیچیدگی مسأله را اثبات می‌کند. هردوی این مقالات فقط روش بهینه ارائه داده‌اند که قادر به حل مسأله در ابعاد کوچک می‌باشند. سپس وو و همکاران [۱۷] دو روش ابتکاری براساس مدل‌سازی کوله‌پشتی برای مسأله مطرح شده توسط چنگ و همکاران [۲] ارائه دادند. در سال ۲۰۱۷ یک مدل جدید توسط چنگ و همکاران [۱۸] منتشر شد که در آن تابع هدف مصرف انرژی که توسط چنگ و همکاران [۱۶] درنظر گرفته شده بود را با اضافه کردن تابع هدف مصرف انرژی ماشین تولید انباشته‌ای در هربار روشن/خاموش شدن (on/off)، توسعه دادند. آن‌ها همچنین یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی بهبودیافته و نیز روش تجربی براساس اپسیلون محدودیت برای حل مسأله ارائه دادند. توسعه دیگری که برای مدل پایه ارائه شده توسط چنگ و همکاران [۱۶] انجام شده است برداشتن محدودیت الزام شروع و پایان پردازش یک انباشته در یک دوره بود [۱۹]. آزادسازی این محدودیت نیازمند تغییر در تعریف متغیرهای تصمیم‌گیری بود. لذا دو مدل ریاضی یکی براساس اندیس زمانی و دیگری براساس اندیس فواصل توسعه داده شده و

کارایی آن‌ها با یکدیگر مقایسه شدند.

ونگ و همکاران [۲۰] یک ماشین تولید انباشته‌ای (کوره حرارتی صنایع شیشه‌سازی) را با دو معیار حداقل‌سازی C_{max} و هزینه مصرف انرژی (برق) با سیاست TOU درنظر گرفتند. کارها دارای اندازه‌های غیریکسانی بود. کوره با دو نوع حرارت بالا و پایین کار می‌کرد. زمان‌های پردازش تحت هر حرارات متفاوت بود. تعرفه برق هر دوره متفاوت درنظر گرفته شد. در برنامه بهینه مشخص شد که اولاً چه تعداد کار با اندازه‌های مختلف در هر انباشته باید باشد. ثانیاً هر انباشته با چه درجه حرارتی و در چه دوره‌ای باید آغاز شود. برای حل این مسأله روش ε-constraint و یک روش تجربی براساس دو مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شده است.

ژنگ و همکاران [۲۱] مدل ارائه شده توسط ونگ و همکاران [۲۰] را از زمان گسسته به زمان پیوسته توسعه دادند. سایر مفروضات یکسان بود. در مدل‌سازی زمان گسسته افق برنامه‌ریزی به یک سری از واحدهای زمانی مساوی تقسیم شد. هر دوره شامل چند واحد زمانی بود. باید مشخص می‌شد که یک انباشته در چه واحد زمانی پردازش می‌شود. در زمان پیوسته افق زمانی تقسیم‌بندی نمی‌شود و متغیرهای تصمیم و محدودیت‌ها مستقیماً براساس دوره‌های قیمت تعریف می‌شوند. ابتدا حداقل و حداکثر تعداد انباشته‌های برنامه بهینه مسأله به‌دست آورده سپس یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیحی زمان پیوسته ارائه دادند. در انتها دو روش تجربی نیز ارائه کرده‌اند.

تعدادی دیگر از تحقیقات برای زمان بیکاری ماشین نیز مصرف انرژی را درنظر گرفته‌اند. ژو و همکاران [۲۲] یک ماشین تولید انباشته‌ای با معیار حداقل‌سازی C_{max} و سیاست TOU درنظر گرفتند. کارها اندازه غیریکسان با زمان ورود نامساوی داشتند. هر ماشین دارای دو حالت بیکاری و فعال بود که هزینه‌های انرژی متفاوتی داشتند. تابع هدف انرژی گسسته است و افق برنامه‌ریزی به چند دوره تقسیم شده بود. برای حل مسأله علاوه‌بر مدل ریاضی یک روش سه مرحله‌ای توسعه داده شده است که در مرحله اول با روش PSO توالی کارها مشخص می‌شود. در مرحله دوم با دو روش ابتکاری انباشته ها مشخص می‌شدند. بالاخره در مرحله سوم دو روش تجربی سریع برای کاهش مصرف انرژی پیشنهاد شده است. ژو و همکاران [۲۳] تعدادی ماشین موازی تولید انباشته‌ای با سرعت‌های متفاوت درنظر گرفتند. تابع هدف حداقل‌سازی C_{max} و سیاست TOU بود. در تابع هزینه مصرف انرژی حالت بیکاری و مشغول بودن جدا شده‌اند. برای حل مسأله، یک مدل ریاضی به‌همراه سه روش فرابتکاری براساس دیفرانسیل و ژنتیک چندمعیاره ارائه شده است. جیا و همکاران [۲۴] چند ماشین موازی تولید انباشته‌ای مشابه را با معیار حداقل‌سازی C_{max} و سیاست TOU درنظر گرفتند. کار ها اندازه غیریکسان با زمان ورود نامساوی داشتند. هر ماشین دارای دو حالت بیکاری و فعال بود که هزینه‌های انرژی متفاوتی داشتند. تابع هدف انرژی پیوسته درنظر گرفته شده بود. جیا و همکاران [۲۵] مسأله‌ای مشابه را بررسی نمودند با این تفاوت که ماشین‌های موازی غیریکسان با سرعت‌های متفاوت وجود داشت. مدل ریاضی به‌همراه روش‌های تجربی و فرابتکاری مبتنی‌بر الگوریتم مورچگان ارائه شده بود [۲۶]. مفروضاتی مشابه روش ارائه شده جیا و همکاران [۲۷] داشت ولیکن روش توسعه داده شده براساس خوشه‌بندی تطبیقی بود.

در تمام تحقیقات بالا شاخص کارایی برنامه‌ریزی کارگاه حداقل‌سازی زمان ختم کل کارها انتخاب شده بود. روچول و همکاران [۲۷] ماشین‌های تولید انباشته‌ای همراه با خانواده کارهای ناسازگار و معیارهای حداقل‌سازی هزینه انرژی تحت سیاست TOU و حداقل‌سازی میانگین وزنی زمان ختم کارها ($\sum W_j C_j$) را درنظر گرفتند. افق برنامه‌ریزی به چندین دوره مساوی زمانی شکسته شده و پردازش یک انباشته می‌توانست در چند دوره ادامه داشته باشد. تعرفه برق در هر دوره متفاوت بود. ماشین‌های موازی یکسان و کارها دارای اندازه غیریکسان با زمان‌های ورود متفاوت از دیگر مفروضات این مقاله بودند. برای این مسأله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شده و برای حالت‌های خاص کارهای با اندازه یکسان، کارهای با زمان ورود صفر و حالت خاصی که اندازه حداکثری انباشته مضرب صحیحی از اندازه کار باشد، خواص بهینگی اثبات شده است. از این خواص بهینگی برای بهبود مدل ریاضی اولیه استفاده شده است. اخیراً نویسندگان این مقاله کار خود را کامل کرده و در یک مجله علمی به چاپ رسانیده‌اند [۲۸]. ایشان علاوه‌بر اینکه معیار حداقل‌سازی میانگین تاخیرات ($\sum W_j T_j$) را جایگزین تابع هدف قبلی کردند، یک مدل ریاضی به‌همراه روش‌های تجربی نیز برای حل مسأله ارائه داده‌اند که اولین تحقیق با معیارهای موعد تحویل‌دار محسوب می‌شود.

در جدول (۱) مقالات فوق با پژوهش حاضر مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تاکنون عدم قطعیت در مسائل زمان‌بندی ماشین‌های تولید انباشته‌ای درنظر گرفته نشده است. همچنین رویکرد چندهدفه فازی برای اولین‌بار در حل این‌گونه مسائل استفاده شده است که تفاوت این پژوهش در مفروضات و رویکرد حل نسبت به ادبیات موضوع تفاوت است.

۳. مفروضات مسأله و مدل پیشنهادی

تعداد n کار وجود دارد که باید بر روی یک ماشین تولید انباشته پردازش شود. این ماشین تولید انباشته به‌طور همزمان می‌تواند Q کار را پردازش نماید (ظرفیت آن Q است). زمان پردازش فعالیت j، $j=1,2,\ldots,n$ با P_j نشان داده می‌شود. زمان پردازش فعالیت‌ها لزوماً یکسان نیست و می‌تواند متفاوت باشد. n کار می‌تواند در $V \le \left\lceil \frac{n}{Q} \right\rceil$ دسته گروه‌بندی شود. $\tilde{P}_{bs}$ نیز نشان‌دهنده زمان پردازش دسته B_b است که $b=1,2,\ldots,v$ به‌وسیله بزرگترین زمان پردازش فعالیت‌ها در یک دسته تعیین می‌شود. لازم به ذکر است که تمامی کارها در زمان صفر در دسترس هستند. یک روز کاری براساس

سیاست زمان مصرف می‌تواند به چندین بازه تقسیم شود که آنگاه دو بازه زمانی در کنار هم ممکن است دارای هزینه‌های برق متفاوت باشند. همچنین فرض می‌شود که یک دسته فقط در یک دوره زمانی پردازش می‌شود. مفروضات و متغیرها و توابع هدف درادامه بیان می‌شوند.

مفروضات مسأله مورد بررسی به‌شرح زیر است:

- یک ماشین تولید انباشته‌ای با ظرفیت محدود وجود دارد که قابلیت پردازش همزمان تعدادی کار را به‌صورت یک انباشته دارد.
- n کار وجود دارد که در زمان صفر در کارگاه حاضرند.
- کارها دارای زمان پردازش فازی می‌باشند.
- کارها دارای اندازه یکسان می‌باشند.
- زمان پردازش یک انباشته از کارها برابر بزرگترین زمان کارهای داخل انباشته می‌باشد.
- اهداف مسأله عبارتند از حداقل‌سازی زمان ختم کل کارها و حداقل‌سازی هزینه مصرف برق ماشین تحت سیاست تعرفه زمانی مصرف برق.
- یک روز کاری به چند دوره زمانی با هزینه برق متفاوت تقسیم می‌شوند. طول یک دوره زمانی از زمان پردازش هرکدام از کارها بیشتر است.
- فرض می‌شود که یک انباشته باید فقط در یک دوره زمانی پردازش شود.
- هزینه مصرف برق یک دوره میانگین قیمت برق واحد ساعات مختلف یک دوره است.

به‌طور مثال زمان اوج مصرف برق در زمستان از ساعت ۱۷ تا ۲۱ است که هزینه آن ۳۲۸ ریال و زمان کم‌باری از ساعت ۲۱ تا ۵ صبح است که هزینه هر ساعت استفاده آن به ۸۲ ریال و از ساعت ۵ تا ۱۷ هم میان‌باری مصرف برق است که هزینه هر ساعت آن ۱۶۴ ریال است. اگر فرض شود که دو شیفت ۱۲ ساعته وجود دارد در یک شرکت تولیدی که شیفت اول از ساعت ۸ صبح تا ۲۰ بعدازظهر و شیفت دوم از ۲۰ بعدازظهر تا ۸ صبح ادامه داشته باشد آنگاه هزینه برق متوسط در شیفت اول که ۹ ساعت آن در میان‌باری است و ۳ ساعت در اوج مصرف برابر است با ۲۴۶۰ ریال است و برای شیفت دوم که یک ساعت در اوج مصرف برق و ۸ ساعت در کم‌باری و سه ساعت در میان باری است برابر با ۱۴۷۶ است که همان‌گونه که مشاهده می‌شود هزینه برق در شیفت دوم تقریباً نصف شیفت اول است. همچنین تعداد دوره‌های زمانی می‌تواند هر عدد صحیحی باشد و طول دوره‌ها نیز می‌توانند با یکدیگر برابر نباشند.

جدول (۱). مقالات تولید انباشته‌ای با ملاحظات انرژی

#	مشخصات ماشین			مشخصات کارها				توابع هدف			روش حل بهینه	
	تعداد ماشین		سرعت/مصرف	اندازه کار		زمان پردازش		انرژی		زمان‌بندی		
مرجع	تک	موازی	ثابت	متغیر	مساوی	نامساوی	قطعی	فازی	TOU	on/off		روش اپسیلون	فازی چندهدفه
[۲۳]		❊	*		❊		*		*		C_{max}	❊	
[۲۶]		❊	*			❊	❊		*		C_{max}	-	
[۲۴]		❊	*			❊	❊		*		C_{max}	❊	
[۲۸]		❊	*			❊	❊		*		$\sum W_jT_j$	*	
[۱۸]	*		*		*		❊		*	*	C_{max}	-	
[۲]	❊		❊		❊		❊		*		C_{max}	*	
[۲۰]	❊			❊		❊	❊		*		C_{max}	❊	
[۱۶]	❊		❊		❊		❊		*		C_{max}	*	
[۲۲]	❊		*			❊	❊		*		C_{max}	❊	
[۲۱]	*			*		*	❊		*		C_{max}	*	
[۱۷]	❊		❊		❊		❊		*		C_{max}	-	
[۲۵]		❊	*			❊	❊		*		C_{max}	-	
[۱۹]	❊		❊		❊		❊		*		C_{max}	*	
[۲۷]		❊	*			❊	❊		*		$\sum W_jC_j$	-	
این مقاله	*		*		*			*	*		C_{max}		❊

ابتدا مجموعه پارامترها تعریف می‌شوند و سپس متغیرهای تصمیم مورد بررسی در این پژوهش معرفی می‌شوند و درنهایت مدل پیشنهادی ارائه می‌گردد.

مجموعه پارامترها

$J = \{1,2,\dots,n\}$ مجموعه‌ای n کار که باید پردازش شوند.

$\tilde{p}_j$ زمان فازی پردازش کار j، $j \in J$

Q ظرفیت ماشین تولید انباشته‌ای

S تعداد دوره‌های زمانی، $s \in \{1,2,\dots,S\}$

t_s زمان اتمام دوره s، $s \in \{1,2,\dots,S\}$ و $t_0 = 0$

T_s مدت زمان دوره s که $T_s = t_s - t_{s-1}$

U_s هزینه واحد برق در دوره s

v تعداد انباشته‌ها، $\left[\frac{n}{Q}\right] \le v \le n$

متغیرهای تصمیم

x_{jbi} اگر کار j به انباشته b تخصیص یابد و در دوره i پردازش شود $x_{jbi} = 1$؛ در غیر این صورت $x_{jbi} = 0$

y_{bi} اگر انباشته b به دوره i تخصیص یابد $y_{bi} = 1$؛ در غیر این صورت $y_{bi} = 0$

z_i اگر یک انباشته به دوره i تخصیص یابد $z_i = 1$؛ در غیر این صورت $z_i = 0$

$\tilde{P}_{bs}$ زمان اجرای انباشته b که برابر بزرگترین زمان کارهای داخل آن است و در دوره s اجرا می‌شود.

توابع هدف

$$min\ f_1 = \sum_{s=1}^{S} U_s \sum_{b=1}^{v} \tilde{P}_{bs} \quad (۱۰)$$

$$min\ f_2 = \tilde{C}_{max} \quad (۱۱)$$

محدودیت‌ها

$$\sum_{s=1}^{S}\sum_{b=1}^{v} x_{jbs} = 1 j = 1,2,\dots,n \quad (۱۲)$$

$$\sum_{s=1}^{S} y_{bs} = 1 b = 1,2,\dots,v \quad (۱۳)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{jbs} \le Q y_{bs} \quad b = 1,\dots,v, s = 1,\dots,S \quad (۱۴)$$

$$\left[\frac{n}{Q}\right] \le v \le n \quad (۱۵)$$

$$x_{jbs}\tilde{p}_j \le \tilde{P}_{bs} \quad j = 1,\dots,n; b = 1,\dots,v; s = 1,\dots,S \quad (۱۶)$$

$$\sum_{b=1}^{v} \tilde{P}_{bs} \le (t_s - t_{s-1}) z_s s = 1,\dots,S \quad (۱۷)$$

$$t_{s-1} z_s + \sum_{b=1}^{v} \tilde{P}_{bs} \le \tilde{C}_{max} \quad (۱۸)$$

$$x_{jbi}, y_{bi}, z_i \in \{0,1\}; \quad j = 1,\dots,n; b = 1,\dots,v; s = 1,\dots,S \quad (۱۹)$$

$$\tilde{P}_{bs} \ge 0, \tilde{C} +_{max} \quad (۲۰)$$

رابطه شماره (۱۰) تابع هدف اول و حداقل‌سازی هزینه مصرف انرژی برق است. رابطه شماره (۱۱) تابع هدف دوم و حداقل‌سازی زمان ختم کل کارها می‌باشد. محدودیت اول در رابطه شماره (۱۲) اطمینان حاصل می‌کند که کار j به دو انباشته یا دوره زمانی تخصیص نیابد. محدودیت دوم در رابطه شماره (۱۳) تضمین می‌کند که انباشته b فقط در یک دوره s پردازش می‌شود. محدودیت سوم در رابطه شماره (۱۴) برای جلوگیری از فراتر رفتن اندازه هر انباشته از ظرفیت ماشین (Q) درنظر گرفته شده است. همچنین این محدودیت را برقرار می‌کند که کار j نمی‌تواند در دوره s پردازش شود بدون اینکه انباشته b به دوره s اختصاص یافته باشد. محدودیت چهارم در رابطه شماره (۱۵) محدودیت تعداد انباشته‌های موجود باتوجه به ظرفیت ماشین را بیان می‌کند. محدودیت پنجم در رابطه شماره (۱۶) زمان پردازش انباشته‌ها را تعیین می‌کند. محدودیت ششم در رابطه شماره (۱۷) برای جلوگیری از بیشتر نشدن زمان پردازش دوره s از مدت زمان دوره s است. محدودیت هفتم در رابطه شماره (۱۸) درواقع محاسبه تابع هدف دوم است. محدودیت هشتم در رابطه شماره (۱۹) متغیرهای تصمیم صفر و یکی را نشان می‌دهد و بالاخره محدودیت بعدی نیز به‌ترتیب مثبت بودن متغیرهای $\tilde{P}_{bs}$ و $\tilde{C}_{max}$ را گارانتی می‌کند و اطمینان می‌دهد که تعدادانباشته ها از اعداد صحیح مثبت باشد.

لازم به ذکر است چون تابع هدف زمان‌بندی حداقل‌سازی زمان ختم کل کارها می‌باشد وابسته به توالی اجرای انباشته‌ها بر روی ماشین نمی‌باشد. همچنین بدیهی است اگر چنانچه انباشته‌ای هنوز دارای ظرفیت خالی باشد و کاری با زمان پردازش کوچکتر از زمان انباشته وجود داشته باشد که هنوز برنامه‌ریزی نشده باشد می‌توان این کار را به آن انباشته اضافه کرد بدون آنکه تابع هدف زمان‌بندی تغییر یابد. لذا اگر ابتدا کارها را به‌ترتیب صعودی مرتب‌سازی و شماره‌گذاری نماییم تعداد انباشته‌ها را می‌توان $V = \left[\frac{n}{Q}\right]$ درنظر گرفت به این ترتیب انباشته اول ممکن است پر نباشد و بقیه انباشته‌ها با ظرفیت کامل هستند.

۳-۱. تک‌هدفه‌سازی مدل دوهدفه فازی

در این بخش از مفاهیم ارائه شده توسط بلمن و زاده [۲۹] و زیمرمن [۳۰] بهره گرفته شده است و تابع دوهدفه پیشنهادی به‌صورت یک تابع تک‌هدفه تبدیل شده است. در این قسمت باتوجه به برش‌های آلفا، مدل پیشنهادی با زمان پردازش فازی کارها تبدیل به دو مدل با حد بالا (R) و حد پایین (L) می‌شود. این مدل به‌صورت زیر و در قالب پارامتریک فرموله می‌شود:

توابع هدف

$$min\ f_{1W} = \sum_{s=1}^{S} U_s \sum_{b=1}^{v} P_{biW} \quad W \in [L,R] \quad (۲۱)$$

$$min\ f_{2W} = C_{W\,max}\ W \in [L,R] \quad (۲۲)$$

محدودیت‌ها

$$\sum_{s=1}^{S}\sum_{b=1}^{v} x_{jbsW} = 1 \qquad W \in [L,R]; \quad (۲۳)$$

$$j = 1,2,\dots,n$$

$$\sum_{s=1}^{S} y_{bsW} = 1 \qquad W \in [L,R]; b = 1,2,\dots,v \tag{۲۴}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{jbsW} \le Q y_{bsW} \quad W \in [L,R]; \quad b = 1,\dots,v, i = 1,\dots,I \tag{۲۵}$$

$$v = \left[\frac{n}{Q}\right] \tag{۲۶}$$

$$x_{jbsW} p_{jW}(\alpha) \le P_{bsW} \qquad W \in [L,R]; \quad \alpha \in [0,1]; j = 1,\dots,n; b = 1,\dots,v; \quad s = 1,\dots,S \tag{۲۷}$$

$$\sum_{b=1}^{v} P_{bsW} \le \left(t_{sW} - t_{(s-1)W}\right) z_{iW} \qquad W \in [L,R]; s = 1,\dots,S \tag{۲۸}$$

$$t_{(s-1)W} z_{sW} + \sum_{b=1}^{v} P_{bsW} \le C_{Wmax} \tag{۲۹}$$

$$x_{jbsW}, y_{bsW}, z_{sW} \in \{0,1\}; \quad W \in [L,R]; \quad j = 1,\dots,n; b = 1,\dots,v; \quad s = 1,\dots,S \tag{۳۰}$$

$$P_{bsW} \ge 0, C_{Wmax} \tag{۳۱}$$

$$v \in IN^{+} \tag{۳۲}$$

برای حل مسأله مورد نظر در ابتدا مسأله به یک مسأله تک‌هدفه تبدیل می‌شود. برای تبدیل این مسأله دوهدفه به یک مسأله تک‌هدفه از پژوهش بدری و همکاران [۷] الهام گرفته شده است. این روش به این صورت عمل می‌کند که در ابتدا بهترین جواب ممکن برای تابع هدف اول را پیدا می‌کند که با کنار گذاشتن تابع هدف دوم همانند رابطه (۳۳) این مهم تعیین می‌شود، سپس در همین شرایط بهترین جواب برای تابع هدف دوم همانند رابطه (۳۴) نیز تعیین می‌شود. در نهایت به‌منظور به‌دست آوردن بدترین جواب برای تابع هدف اول و دوم، یک‌بار در مدل بهترین جواب تابع هدف دوم و یک‌بار در مدل بهترین جواب تابع هدف اول که از رابطه‌های (۳۳) و (۳۴) به‌دست‌آمده همانند رابطه‌های (۳۵) و (۳۶) صورت می‌گیرد. پس از تعیین بهترین مقدار و بدترین مقدار برای هر تایع هدف از مفاهیم مطرح شده توسط زیمرمن [۳۰] بهره گرفته می‌شود و تایع عضویت خطی آن تشکیل داده می‌شود. درنهایت با استفاده از روش بلمن و زاده [۲۹] مدل تبدیل به یک مدل تک‌هدفه می‌شود. که مقدار λ_W در مدل هرچه بیشتر باشد نشان‌دهنده بالاتر بودن سطح ارضای توابع هدف است.

گام های این روش به‌صورت زیر است:

گام ۱: در ابتدا ایده‌آل مثبت (PIS) و ایده‌آل منفی (NIS) با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شود (روش لکسیکوگراف در اینجا استفاده شده است):

$$f_{1W}^{PIS} = min\, f_{1W}\, W \in [L,R] \quad subject\ to: (12) - (19); \tag{۳۳}$$

$$f_{2W}^{PIS} = min\, f_{2W}\, W \in [L,R] \tag{۳۴}$$

$$subject\ to: (12) - (19); \quad f_{1W} = f_{1W}^{PIS}; \tag{۳۵}$$

$$f_{1W}^{NIS} = min\, f_{1W}\, W \in [L,R] \quad subject\ to: (12) - (19) \quad and\ f_{2W} = f_{2W}^{PIS}; \tag{۳۶}$$

که f_{zW}، f_{zW}^{PIS} و f_{zW}^{NIS} به‌ترتیب نشان‌دهنده حد بالا و پایین تابع هدف Z، حد بالا و پایین ایده‌آل مثبت تابع هدف Z و حد بالا و پایین ایده‌آل منفی تابع هدف Z هستند. لازم به ذکر است که هرکدام از مدل های بالا به‌صورت جداگانه حل می‌شوند.

گام ۲: برای هر تابع هدف، تابع عضویت خطی زیر تشکیل داده می‌شود:

$$\mu_{zW}(f_{zW}) = \begin{cases} 1 & f_{zW} \le f_{zW}^{PIS} \\ \dfrac{f_{zW}^{NIS} - f_{zW}}{f_{zW}^{NIS} - f_{zW}^{PIS}} & for\ \ f_{zW}^{NIS} \le f_{zW} \le f_{zW}^{PIS} \\ 0 & for \qquad f_{zW} \ge f_{zW}^{NIS} \end{cases} \tag{۳۷}$$

$$z = 1,2; W \in [L,R]$$

گام ۳: با استفاده از تابع عضویت خطی بالا و قاعده تصمیم‌گیری فازی بلمن و زاده، مسأله برنامه‌ریزی خطی چندهدفه فازی به‌صورت زیر درنظر گرفته می‌شود:

$$max\left[min\left\{\frac{f_{1W}^{NIS} - f_{1W}}{f_{1W}^{NIS} - f_{1W}^{PIS}}, \frac{f_{2W}^{NIS} - f_{2W}}{f_{2W}^{NIS} - f_{2W}^{PIS}}\right\}\right] \quad W \in [L,R] \quad subject\ to: (12) - (19); \tag{۳۸}$$

گام ۴: براساس روش زیمرمن و درنظر گرفتن $0 \le \lambda_W \le 1$، مسأله برنامه‌ریزی خطی چندهدفه به‌صورت زیر به یک‌هدفه تبدیل می‌شود:

$$max\ \ \lambda_W \qquad W \in [L,R] \quad subject\ \ to: (12) - (19) and \tag{۳۹}$$

$$\lambda_W \le \frac{f_{1W}^{NIS} - f_{1W}}{f_{1W}^{NIS} - f_{1W}^{PIS}} \quad W \in [L,R] \tag{۴۰}$$

$$\lambda_W \le \frac{f_{2W}^{NIS} - f_{2W}}{f_{2W}^{NIS} - f_{2W}^{PIS}} \quad W \in [L,R] \tag{۴۱}$$

توجه داشته باشید که λ_W نشان‌دهنده سطح ارضای حد بالا و پایین توابع هدف است و درجه بالایی از λ_W نشان می‌دهد که همه اهداف با درجه بالایی از رضایت، بهینه شده‌اند.

۳. محاسبات عددی

ارزیابی کارایی روش حل و مدل پیشنهادی در طی دو مرحله با محاسبات عددی صورت پذیرفته است. هدف مرحله اول ، ارزیابی توان روش پیشنهادی در حل مسائل مختلف و تأثیر اندازه مسائل بر پیچیدگی حل قرار داده شد. هدف مرحله دوم بررسی کارآمدی مدل و مفید بودن آن در کاهش هزینه‌ها تعیین گردید. در هر دو

مرحله نمونه‌های تصادفی از مسأله تولید گردید. حل این مسائل بر روی یک لپ‌تاپ شخصی با ۲/۸ گیگا هرتز سی‌پی‌یو و ۱۲ گیگا بایت رم انجام شده است. همچنین برنامه CPLEX در نرم‌افزار گمز برای حل مدل استفاده شده است.

در مرحله اول آزمایشات، برای ارزیابی جامع روش پیشنهادی با الهام از نمونه مسائل تصادفی تولید شده در مقالات مروری، مسائلی با تعداد کارهای ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰و۵۰ و با تعداد دوره‌های ۲، ۳ و ۴ درنظر گرفته شده است. زمان پردازش $\tilde{p}_j$ فازی برای کارها به‌صورت تصادفی و براساس توزیع یکنواخت در بازه (۱۰۰ تا ۱۴۰) دقیقه تولید شده است. همچنین طول مدت زمان دوره‌ها نیز به‌طور یکنواخت در بازه (۱۴۰ تا ۱۶۰) به‌صورت تصادفی ساخته شدند. حداکثر ظرفیت ماشین ۵ درنظر گرفته شده و هزینه برق نیز به‌صورت یکنواخت در بازه (۴ تا ۱۰) تولید شده است. لازم به ذکر است در این ازمایشات مقدار آلفا ۰/۵ درنظر گرفته شده است. جدول (۲) زمان محاسبات حل مسائل بر حسب ثانیه را نشان می‌دهد. میزان آلفا هر چه به یک نزدیکتر باشد سطح بالاتری از قطعیت را نشان می‌دهد و هرچه به صفر نزدیکتر باشد سطح بالاتری از عدم قطعیت را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد کارها و همچنین تعداد دوره‌ها، زمان محاسبات روش حل پیشنهادی به‌شدت زیاد می‌شود. به‌طور مثال در شش مجموعه اول زمان حل از ۱/۲۲۵ ثانیه در ۱۵ کار به ۴۰۹/۸۸ ثانیه در ۵۰ کار رسیده است و نشان‌دهنده وابستگی پیچیدگی مسأله به تعداد کارها است. همچنین در روند کلی و با افزایش تعداد دوره‌ها نیز شاهد افزایش زمان حل و محاسبات هستیم که نشان می‌دهد دو پارامتر اصلی در تعیین پیچیدگی این مسأله تعداد کارها و دوره‌ها هستند.

در مرحله دوم از آزمایشات عددی، ازشش مجموعه‌اول از مسائل تولید شده در مرحله اول استفاده شده است برای این مسائل فرض شده دو شیفت کاری ۱۲ ساعته وجود دارد و همچنین هزینه برق با توجه به شرایط ایران درنظر گرفته شده است. به این صورت‌که در زمان کم‌باری ۸۲ واحد پولی در زمان میان‌باری ۱۶۴ واحد پولی و در زمان اوج مصرف ۳۲۸ واحد پولی درنظر گرفته می‌شود. همچنین فرض می‌شود زمان اوج مصرف برق از ساعت ۱۷ تا ۲۱ است و زمان کم‌باری از ساعت ۲۱ تا ۵ صبح است و از ساعت ۵ تا ۱۷ هم میان‌باری مصرف برق است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد هدف این مرحله از آزمایشات بررسی رفتار تابع هدف می‌باشد. نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود و انتظار می‌رفت مقادیر توابع هدف اول و دوم با افزایش تعداد کارها افزایش پیدا می‌کنند که به‌نوعی تأییدکننده صحت مدل است. نکته حائز اهمیت این است اگر تنها به‌دنبال حداقل‌سازی زمان ختم کارها باشیم و فقط هدف اول را درنظر بگیریم هزینه برق زیادتری باید پرداخت گردد اما باتوجه به سیاست تعرفه زمانی مصرف برق و درنظر گرفتن توأم دو هدف هزینه برق کمتر شده است. به‌طور مثال درصورتی‌که تابع هدف کمینه کردن هزینه برق درنظر گرفته نشود در مجموعه شماره شش که تعداد کارها ۵۰ عدد است باید ۴۷۵۶ واحد پولی پرداخت شود درصورتی‌که در مدل پیشنهادی ۳۲۹۶/۳۵ واحد پولی پرداخت خواهد شد و هزینه به‌شدت کاهش یافته است. این نتیجه نشان‌دهنده کارایی مدل پیشنهادی در کاهش هزینه ها و بهبود عملکرد سیستم تولید کارگاهی درنظر گرفته شده در این پژوهش می‌باشد. در جدول (۴) می‌توان نتایج محاسباتی براساس آلفاهای متفاوت را مشاهده کرد که هرچه مقدار آلفا به عدد یک نزدیکتر می‌شود بازه موجود برای هرکدام از اهداف نیز تنگ‌تر شده و به‌سمت یک عدد قطعی میل می‌کنند. این موضوع نشان‌دهنده این است که هرچه مقدار عدم قطعیت بالاتر باشد بازه‌ی اعداد نیز بزرگتر است و هرچه میزان عدم قطعیت کمتر باشد، بازه‌ی اعداد کوچکتر است و زمانی‌که آلفا برابر یک باشد حد بالا و پایین یکسان است و به یک عدد قطعی میل می‌کند. میزان آلفا بنا به نظر کارشناسان یا مدیران ارشد و سطح عدم قطعیت قابل تغییر است. درواقع با استفاده از میزان آلفا نیز وابسته به محیط و شرایط و نظرات مدیران ارشد، عدم قطعیت را در مدل بهتر درنظر گرفت.

جدول (۲). نتایج محاسباتی برای نمونه مسائل تصادفی

# مسائل	تعداد کارها	تعداد دوره	زمان حل (ثانیه)	# مسائل	تعداد کارها	تعداد دوره	زمان حل (ثانیه)	# مسائل	تعداد کارها	تعداد دوره	زمان حل (ثانیه)
۱	۱۵	۲	۱/۲۲۵	۷	۱۵	۳	۱/۵۲۶	۱۳	۱۵	۴	۲/۰۳
۲	۲۰		۳/۵۲۶	۸	۲۰		۴/۱۲۸	۱۴	۲۰		۶/۰۹
۳	۲۵		۴/۰۷۴	۹	۲۵		۵/۳۴۸	۱۵	۲۵		۱۰/۳۲۵
۴	۳۰		۴/۳۵۵	۱۰	۳۰		۷/۵۶۹	۱۶	۳۰		۱۴/۲۵۹
۵	۴۰		۳۸/۳۲۴	۱۱	۴۰		۵۰/۶۵۹	۱۷	۴۰		۷۰/۷۵۶
۶	۵۰		۴۰۹/۸۸	۱۲	۵۰		۶۵۲/۳۶۹	۱۸	۵۰		۸۰۶/۱۲۲

جدول (۳). مقادیر توابع هدف در مسائل آزمایش شده

# مجموعه	تعداد کارها	تعداد دوره	زمان حل (ثانیه)	حد پایین تابع هدف اول (ساعت)	حد بالای تابع هدف اول (ساعت)	حد پایین تابع هدف دوم (واحد پولی)	حد بالای تابع هدف دوم (واحد پولی)
۱	۱۵	۲	۱/۲۱	۷/۰۸	۷/۳۴	۱۱۶۱/۳	۱۲۰۳/۹۴
۲	۲۰		۳/۴۲۵	۹/۵۳	۹/۸۸	۱۵۶۹/۹۲	۱۶۲۷/۳۲
۳	۲۵		۴/۰۱۲	۱۲/۴۲	۱۳/۲۵	۲۰۳۶/۸۸	۲۱۹۲/۸۶
۴	۳۰		۴/۳۴۶	۱۸/۴۵	۲۰/۷۵	۲۱۳۲/۲۴	۲۳۶۰/۲۴
۵	۴۰		۳۷/۴۲۸	۲۳/۲۵	۲۶/۳۵	۲۴۸۰/۵۶	۲۶۴۹/۳۵
۶	۵۰		۴۰۱/۸۵۶	۳۰/۲۴	۳۳/۴۵	۳۲۹۶/۳۵	۳۴۲۶/۳۷

جدول (۴). مقادیر توابع هدف در مسائل آزمایش شده به ازای برش های آلفای متفاوت

آلفا	# مجموعه	تعداد کارها	تعداد دوره	زمان حل (ثانیه)	حد پایین تابع هدف اول (ساعت)	حد بالای تابع هدف اول (ساعت)	حد پایین تابع هدف دوم (واحد پولی)	حد بالای تابع هدف دوم (واحد پولی)
۰/۲	۱	۱۵	۲	۱/۲۳	۷/۰۲	۷/۴	۱۱۱۸/۲	۱۲۴۳/۴۵
	۲	۲۰		۳/۴۶۵	۹/۴۲	۹/۹۸	۱۵۲۴/۳۵	۱۶۵۲/۳۶
	۳	۲۵		۴/۰۱	۱۱/۳۱	۱۴/۳۷	۱۹۹۸/۳	۲۲۳۵/۲
	۴	۳۰		۴/۳۲۲	۱۷/۲۶	۲۱/۹۵	۲۲۳۵/۲۴	۲۴۱۰/۸۵
	۵	۴۰		۳۶/۳۵۷	۲۲/۴۵	۲۷/۰۲	۲۳۶۷/۹۵	۲۷۳۲/۵
	۶	۵۰		۴۰۳/۸۲۶	۲۹/۵۴	۳۴/۷۶	۳۰۰۵/۲۶	۳۵۷۹/۲۳
۰/۴	۱	۱۵		۱/۱۶	۷/۰۵	۷/۳۷	۱۱۴۳/۲	۱۲۲۵/۳۱
	۲	۲۰		۳/۲۷۴	۹۴۷	۹/۹۳	۱۵۴۱/۳۷	۱۶۳۹/۲۳
	۳	۲۵		۴/۵۸۹	۱۱/۹۱	۱۳/۸۲	۲۰۱۲/۴۹	۲۲۱۷/۲۱
	۴	۳۰		۴/۵۴۲	۱۷/۸۳	۲۱/۳۴	۲۱۹۰/۸	۲۳۹۲/۷۱
	۵	۴۰		۳۴/۴۸۱	۲۲/۹۲	۲۶/۸۷	۲۴۰۵/۶	۲۵۲۸/۳۲
	۶	۵۰		۳۹۹/۴۶۷	۲۹/۹۸	۳۳/۷۵	۳۱۲۱/۷۲	۳۵۰۳/۴۱
۰/۶	۱	۱۵		۱/۱۲	۷/۱۵	۷/۲۹	۱۱۸۰/۲۱	۱۱۹۹/۰۲
	۲	۲۰		۳/۸۶۱	۹/۶۴	۹/۷۳	۱۵۸۰/۲	۱۶۰۳/۲
	۳	۲۵		۴/۲۱۱	۱۲/۵۶	۱۳/۱۵	۲۰۵۷/۹	۲۱۶۳/۲
	۴	۳۰		۴/۴۲۷	۱۸/۸	۲۰/۱	۲۱۵۹/۲	۲۳۲۸/۳
	۵	۴۰		۳۵/۴۱	۲۴/۰۵	۲۶/۰۱	۲۵۰۳/۲	۲۶۱۲/۳
	۶	۵۰		۳۹۵/۸۵۹	۳۱/۰۵	۳۲/۹	۳۳۲۹/۵	۳۳۹۰/۲
۰/۸	۱	۱۵		۱/۲۴	۷/۲	۷/۲۵	۱۱۸۶/۴	۱۱۹۲/۳
	۲	۲۰		۳/۲۵۸	۹/۶۷	۹/۶۹	۱۵۸۹/۳	۱۹۹۳/۴
	۳	۲۵		۳/۹۸۵	۱۲/۷۲	۱۲/۹۳	۲۰۸۲/۱	۲۱۳۲/۱
	۴	۳۰		۴/۷۵۶	۱۹/۱	۱۹/۷	۲۱۹۸/۲	۲۲۷۸/۱
	۵	۴۰		۳۶/۲۱۵	۲۴/۴۲	۲۵/۶۵	۲۵۴۲/۴	۲۵۷۳/۲
	۶	۵۰		۴۰۴/۷۱۱	۳۱/۷	۳۲/۳	۳۳۵۰/۲	۳۳۷۱/۲

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل دوهدفه فازی برای ایجاد تعادل بین میزان تولید مصرف برق و کارآیی تولید ارائه شده است. این پژوهش سیاست تعرفه زمانی مصرف برق در جهت کاهش هزینه‌های مصرف برق را در مدل زمان‌بندی کلاسیک ماشین‌های تولید انباشته‌ای با هدف حداقل‌سازی زمان ختم کل کارها ادغام کرده است. همچنین مجموعه‌های فازی برای درنظر گرفتن زمان پردازش کارها در مواجهه با عدم قطعیت با موفقیت اعمال شده است. برای حل این مسأله دوهدفه زمان‌بندی از رویکرد برنامه‌ریزی چندهدفه فازی استفاده شده است تا مدل پیشنهادی تبدیل به یک مدل تک‌هدفه گردد. مدل تک‌هدفه در نرم‌افراز گمز با استفاده از نرم‌افزار CPLEX حل شده است.

نتایج محاسبات عددی در دو مرحله از آزمایشات نشان می‌دهد که پیچیدگی مسأله با افزایش تعداد کارها و دوره‌ها افزایش می‌یابد و نیز نشان داده شد می‌توان میزان مصرف برق را با استفاده از مدل پیشنهادی کاهش داد و به نتایج مطلوب و مورد نظر در مورد

صرفه‌جویی در مصرف انرژی برق و در نتیجه کاهش هزینه تولید دست یافت.

برای مطالعات آینده می‌توان برای مسائل اندازه بزرگ به ارائه روش‌های ابتکاری و فراابتکاری پرداخت. زمان‌بندی ماشین‌های تولید انباشته‌ای با اندازه کارهای نامساوی و زمان‌های غیرصفر ورود کارها از موضوعات دیگری هستند که مدل فازی این پژوهش را می‌توان برای آن‌ها تعمیم داد. همچنین توابع هدف دیگر ازجمله کاهش تأخیرات و جریمه‌های زودکرد و دیرکرد و زمان اتمام کارها را درنظر گرفت و می‌توان مسأله تولید انباشته‌ای موازی را نیز مورد بررسی قرار داد. توابع هدف همراه با موعد تحویل و توابع هدف بی‌قاعده و نیز سیستم‌های تولیدی شامل بیش از یک ماشین تولید انباشته‌ای زمینه‌های تحقیقاتی جدیدی را تشکیل می‌دهند.

مراجع

[1] APERC, A. (2013). APEC energy demand and supply outlook. Technical report, Asia-Pacific Economic Cooperation.

[2] Cheng, J., Chu, F., Xia, W., Ding, J., & Ling, X. (2014, November). Bi-objective optimization for single-machine batch scheduling considering energy cost. In 2014 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT) (pp. 236-241). IEEE.

[۳] عطائی، حشمت الله، احمدی زر، فردین، ارکات، & جمال. (۲۰۲۲). زمان‌بندی ماشین‌های موازی یکسان با درنظر گرفتن عملیات مشترک به‌منظور کمینه نمودن مجموع انرژی‌های مصرفی و مجموع زمان‌های دیرکرد. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۹(۱۹)، ۱۲۳-۱۰۷.

[۴] افسر، & بهنامیان. (۲۰۲۰). زمان‌بندی چندعاملی ماشین‌های موازی ناهمگن با درنظر گرفتن هزینه انرژی و کارهای بهنگام. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۷(۱۵)، ۲۸۷- ۳۰۳.

[5] Cheng, J., Chu, F., & Zhou, M. (2017). An improved model for parallel machine scheduling under time-of-use electricity price. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 15(2), 896-899.

[6] Park, M. J., & Ham, A. (2022). Energy-aware flexible job shop scheduling under time-of-use pricing. International Journal of Production Economics, 248, 108507.

[7] Badri, S. A., Daghbandan, A., AghabeiginiyayFatalaki, Z., &Mirzazadeh, M. (2021). Flow shop scheduling under Time-Of-Use electricity tariffs using fuzzy multi-objective linear programming approach. Journal of mathematical modeling, 9(2), 215-227.

[8] Rego, M. F., Pinto, J. C. E., Cota, L. P., & Souza, M. J. (2022). A mathematical formulation and an NSGA-II algorithm for minimizing the makespan and energy cost under time-of-use electricity price in an unrelated parallel machine scheduling. PeerJ Computer Science, 8, e844.

[9] Uzsoy, R. (1994). Scheduling a single batch processing machine with non-identical job sizes. The International Journal of Production Research, 32(7), 1615-1635.

[10] Tang, L., & Liu, P. (2009). Minimizing makespan in a two-machine flowshop scheduling with batching and release time. Mathematical and Computer Modelling, 49(5-6), 1071-1077.

[11] Hadera, H., &Harjunkoski, I. (2013). Continuous-time batch scheduling approach for optimizing electricity consumption cost. In Computer Aided Chemical Engineering. Vol. 32, 403-408.

[12] Hejari, S. R., Emami, S., &Arkan, A. (2009). A Heuristic algorithm for minimizing the expected make span in two machine flow shops with fuzzy processing time. Journal of uncertain systems, 3(2), 114-122.

[13] Yuan, F., Xu, X., & Yin, M. (2019). A novel fuzzy model for multi-objective permutation flow shop scheduling problem with fuzzy processing time. Advances in Mechanical Engineering, 11(4), 1687814019843699.

[14] Wang, G. G., Gao, D., &Pedrycz, W. (2022). Solving multi-objective fuzzy job-shop scheduling problem by a hybrid adaptive differential evolution algorithm. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 18(12), 8519-8528.

[15] Fowler, J. W., &Mönch, L. (2022). A survey of scheduling with parallel batch (p-batch) processing. European journal of operational research, 298(1), 1-24.

[16] Cheng J, Chu F, Chu C, Xia W (2016) Bi-objective optimization of single-machine batch schedulingunder time-of-use electricity prices. RAIRO Oper Res 50(4–5):715–732

[17] Wu, P., Cheng, J., & Chu, F. (2021). Large-scale energy-conscious bi-objective single-machine batch scheduling under time-of-use electricity tariffs via effective iterative heuristics. Annals of Operations Research, 296(1), 471-494.

[18] Cheng J, Chu F, Liu M, Wu P, Xia W (2017) Bi-criteria single-machine batch scheduling with machineon/off switching under time-of-use tariffs. Comput Ind Eng 112:721–734

[19] Cheng J, Chu F, Liu M, Xia W (2016) Single-machine batch scheduling under time-of-use tariffs: newmixed-integer programming approaches. In: Proceedings of the 2016 IEEEinternational conferenceon systems, man, and cybernetics (SMC), pp 3498–3503.

[20] Wang S, Liu M, Chu F, Chu C (2016) Bi-objective optimization of a single machine batch schedulingproblem with energy cost consideration. J Clean Prod 137:1205–1215

[21] Zhang, S., Che, A., Wu, X., & Chu, C. (2018). Improved mixed-integer linear programming model and heuristics for bi-objective single-machine batch scheduling with energy cost consideration. Engineering Optimization, 50(8), 1380-1394.

[22] Zhou, S., Jin, M., & Du, N. (2020). Energy-efficient scheduling of a single batch processing machine with dynamic job arrival times. Energy, 209, 118420.

[23] Zhou, S., Li, X., Du, N., Pang, Y., & Chen, H. (2018). A multi-objective differential evolution algorithm for parallel batch processing machine scheduling considering electricity consumption cost. Computers &Operations Research, 96, 55-68.

[24] Jia, Z. H., Zhang, Y. L., Leung, J. Y. T., & Li, K. (2017). Bi-criteria ant colony optimization algorithm for minimizing makespan and energy consumption on parallel batch machines. Applied Soft Computing, 55, 226-237.

[25] Jia Z-H, Wang Y, Wu C, Yang Y, Zhang X-Y, Chen H-P (2019). Multi-objective energy-aware batchscheduling using ant colony optimization algorithm. Comput Ind Eng 131:41–56.

[26] Qian, S. Y., Jia, Z. H., & Li, K. (2020). A multi-objective evolutionary algorithm based on adaptive clustering for energy-aware batch scheduling problem. Future Generation Computer Systems, 113, 441-453.

[27] Rocholl, J., Mönch, L., & Fowler, J. W. (2018, December). Electricity power cost-aware scheduling of jobs on parallel batch processing machines. In 2018 Winter Simulation Conference (WSC) (pp. 3420-3431). IEEE.

[28] Rocholl, J., Mönch, L., & Fowler, J. (2020). Bi-criteria parallel batch machine scheduling to minimize total weighted tardiness and electricity cost. Journal of Business Economics, 90(9), 1345-1381.

[29] Bellman, R. E., & Zadeh, L. A. (1970). Decision-making in a fuzzy environment. Management science, 17(4), B-141.

[30] Zimmermann, H. J. (1978). Fuzzy programming and linear programming with several objective functions. Fuzzy sets and systems, 1(1), 45-55.

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Autumn and Winter 2022, Volume 10., No. 21., pp. 107-117
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10.22084/IER.2023.27325.2111

A Two-objective Fuzzy Linear Programming Model for a Single Batch Processing Machine Scheduling Problem under Time-of-Use Electricity Consumption Policy

LS. Mousavi[1], F. Jolai[2*]

[1.] PhD student in industrial engineering, Department of Industrial Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

[2.] Professor, Department of Industrial Engineering, School of Industrial Engineering, Technical School, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 07 Jan 2022
Accepted 27 Aug 2022

***Keywords*:**

Time-of Use Electricity Policy
Batch Processing Machine
Makespan
Fuzzy Processing Time
Fuzzy Multi-Objective
Mathematical Model

ABSTRACT

With the reduction of non-renewable energy sources and the increased energy costs in recent years, the decision-making model with energy and electricity consumption consideration is significant. Time-of-Use (ToU) policy is one of the incentive policies in the whole world that provides new opportunities to save electricity consumption and energy costs. This paper considers a batch processing machine scheduling problem with identical jobs and a two-objective function of minimizing the cost of electricity consumed by the machine and minimizing the makespan under the ToU policy. The processing time of jobs is considered fuzzy due to uncertainty in the real world. The effectiveness and efficiency of the proposed model and solution approach to reduce the electricity cost are demonstrated by carrying out two numerical experiments.

[*] Corresponding author. F. Jolai
Tel.:021-88021067; E-mail address: fjolai@ut.ac.ir