Journal of Industrial Management Studies
Vol.19 No 62, Autumn 2021, 225-257
.atu.ac.ir
DOI: 10/22054/jims. 2021.46596.2382

ATU PRESS

Original Reserch / Review / …
Received:30/9/2019
Accepted:13/6/2021
ISSN:
eISSN:

Planning Multi-Stage Rework Production System Considering Energy Consumption

Hadi Mokhtari*
Associate Professor, Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, University Of Kashan, Kashan, Iran.

Hossein Shirani Bidabadi
B.Sc. in Industrial Engineering, University Of Kashan, Kashan, Iran.

Abstract

Today, in order to maximize the productivity, sales and profits of factories, various factors must be considered. One of these factors is energy saving, which leads to success in any businesses. Another important factor is rework in the production process, which reduces waste and optimal use of resources. In this research, a linear mathematical programming model has been developed for a multi-stage production system considering energy consumption and the possibility of rework. The objective function of the model is calculated from a combination of energy costs and raw material costs, and the proposed model has three categories of balance constraints, demand constraints and time constraints. The balance constraints, the task of calculating the number of raw materials required and the amount of input materials to each part of the production stage, the demand constraints are the task of calculating the number of final products, and the inventory and time constraints are also the task of calculating the time available to the production of each product. A hypothetical production system is flow shop. To understand the proposed model better, a logical example is designed and solved and analyzed using GAMS software . In the current situation , energy consumption is one of the concerns of policy make rs in the fields of production and industry , and therefore this research with the propo sed model , helps decision makers in manufacturing industries to ensure optimal ene rgy consumption , optimal decisions in adopt multi - stage rework and production conditions .

Keywords: Optimization, Production Systems Planning, Energy, Rework, Mathematical Programming

* Corresponding Author: mokhtari_ie@kashanu.ac.ir
How to Cite: xxxxxxx

مقاله پژوهشی

فصلنامهٔ مطالعات مدیریت صنعتی
دوره نوزدهم، شماره ٦٢، پاییز ١٤٠٠، ٢٥٧-٢٢٥
.atu.ac.ir
DOI:١٠,٢٢٠٤٥/jims.٢٠٢١/٤٦٥٩٦/٢٣٨٢

برنامه‌ریزی یک سیستم تولیدی-دوباره‌کاری چندمرحله‌ای با درنظر گرفتن مصرف انرژی

هادی مختاری * دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

حسین شیرانی بیدآبادی فارغ‌التحصیل کارشناسی رشته مهندسی صنایع، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۲۳

eISSN: ISSN:۲۲۵۱۸۰۲۹

چکیده

امروزه برای به حداکثر رساندن بهره‌وری، فروش و سود کارخانه‌ها، باید عوامل مختلفی را در نظر گرفت. یکی از عوامل اصلی، انرژی است که صرفه‌جویی در آن باعث دستیابی به موفقیت در هر کسب‌وکاری می‌شود. از دیگر عوامل مهم، دوباره‌کاری در فرآیند تولید است که باعث کاهش ضایعات و استفاده بهینه از منابع می‌شود. در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی برای یک سیستم تولیدی چند مرحله‌ای با درنظر گرفتن مصرف انرژی و امکان دوباره‌کاری توسعه داده شده است. تابع هدف مدل، از ترکیب هزینه انرژی و هزینه مواد اولیه محاسبه می‌گردد و مدل ارائه شده دارای سه دسته محدودیت بالانس، تقاضا و زمان است. محدودیت‌های بالانس، وظیفه‌ی محاسبه‌ی تعداد مواد اولیه مورد نیاز و مقدار مواد ورودی به هر قسمت از مراحل تولید، محدودیت‌های تقاضا وظیفه محاسبه تعداد محصول نهایی تولید شده و موجودی انبار و محدودیت‌های زمانی نیز وظیفه محاسبه زمان در دسترس برای تولید هر محصول را بر عهده دارند. سیستم تولیدی فرض شده، یک سیستم تولیدی مبتنی بر خط تولید است. در ادامه برای درک بیشتر از مدل ارائه شده، یک مثال منطقی طراحی شده و با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شده و تجزیه‌وتحلیل انجام شده است. در شرایط فعلی مصرف انرژی به عنوان یکی از دغدغه‌های سیاست‌گذاران در حوزه‌های تولید و صنعت مطرح است و لذا این تحقیق با مدل ارائه شده، به تصمیم‌گیری مدیران صنایع تولیدی کمک می‌کند تا با اطمینان از مصرف بهینه انرژی، تصمیمات بهینه در شرایط دوباره‌کاری و تولید چند مرحله‌ای اتخاذ کنند.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی سیستم‌های تولیدی، انرژی، دوباره کاری، برنامه‌ریزی ریاضی

* نویسنده مسئول: mokhtari_ie@kashanu.ac.ir

مقدمه

یکی از مهم‌ترین موضوعاتی که امروزه ضرورت وجود یک طرح بهینه‌سازی در مصرف منابع مختلف انرژی را هشدار می‌دهد، شرایط اقتصادی و بازرگانی می‌باشد. یکی از معیارهای پیشرفت و توسعه کشور، صنایع تولیدی می‌باشند و باید به این نکته توجه نمود که صنایع کشور از مصرف‌کنندگان عمده انرژی هستند. لذا توجه خاص به این بخش و بهبود و توسعه آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سهم صنایع مختلف از انرژی مصرف شده در جهان، در حدود نیمی از آن می‌باشد (Ding et al., 2016). کل مصرف انرژی در بخش‌های صنعتی در جهان از ۵۸/۹ پتا وات ساعت[1] در سال ۲۰۱۰ به ۹۰/۴ پتا وات ساعت در سال ۲۰۴۰ افزایش خواهد یافت (Wang et al., 2018).

یک سیستم تولیدی مجموعه‌ای از اجزای تولیدی به هم وابسته است که برای دستیابی به یک هدف واحد که تولید محصول می‌باشد با یکدیگر در ارتباط هستند و به وظایف خود عمل می‌کنند. هر سیستمی متشکل از سه بخش ورودی، فرآیند و خروجی می‌باشد. ورودی‌های سیستم تولیدی شامل مواد اولیه، نیروی انسانی، ماشین‌آلات، ساختمان، فناوری، انرژی، سرمایه و پول، نیروی کار و غیره می‌باشد. قسمت اجرای فرآیند سیستم شامل اجرای عملیات تولید بر مبنای دستورالعمل‌های تولیدی است و خروجی این سیستم محصول نهایی تولیدشده می‌باشد.

آگاهی از نیاز به کاهش ضایعات در تولید برای محافظت از محیط زیست و همچنین افزایش سود، در صنعت افزایش یافته است. در عمل، دوباره کاری و تولید مجدد به عنوان یک استراتژی مفید برای کاهش ضایعات در تولید در نظر گرفته می‌شود (Chang et al., 2015). دوباره‌کاری باعث تحمیل هزینه‌های اضافی به کارخانه‌ها می‌شود و مدیران کارخانه‌ها علاقه دارند سیستم تولیدی خود را به نحوی بهینه کنند که دوباره‌کاری‌ها کاهش پیدا کنند. از آنجا که اشتباهات اجتناب‌ناپذیر هستند، روش‌های دوباره‌کاری و تعمیر بخش مهمی از تولید هستند و در بهبود بهره‌وری موثر می‌باشند.

1. PWh

همانگونه که بیان شد صرفه‌جویی و مدیریت انرژی در صنایع به جهت تعیین میزان تولید اقتصادی، کاهش بهای تمام شده، افزایش بهره‌وری و راندمان و غیره دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. از طرف دیگر عملیات دوباره‌کاری، منجر به بهره‌برداری بیشتر از منابع و استفاده از محصولات معیوب و کاهش ضایعات می‌شود که بکار گرفتن این استراتژی در صنعت کمک شایانی به کارایی و اثربخشی کارخانه‌ها می‌کند. در این پژوهش یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی با درنظر گرفتن مصرف انرژی پیشنهاد شده است که در فرآیند تولید محصول نهایی عملیات دوباره‌کاری در هر مرحله از تولید اجرا می‌شود که با توجه به فرآیند تولید، مصرف انرژی، درصد دوباره‌کاری محصولات، درصد ضایعات و تقاضای محصولات نهایی در هر ماه، تعداد مواد اولیه بهینه مورد نیاز را تعیین می‌کند.

پیشینه پژوهش

کندیلی و همکاران[1] برای برنامه‌ریزی عملیات پیوسته متمرکز انرژی چند محصولی که هزینه انرژی وابسته به زمان است و مقدار انرژی مورد نیاز برای تولید یک مقدار واحد از مواد، به محصول تولید شده و تجهیزات استفاده شده بستگی دارد، یک الگوریتم بهینه ارائه دادند. آن‌ها نمونه‌ای از این فرآیند را بر روی عملیات آسیاب سیمان پیاده کردند. در پژوهش آن‌ها تقاضا برای منابع موجود (تجهیزات پردازش، ظرفیت ذخیره‌سازی و برق) به طور همزمان توسط تعدادی از محصولات نهایی تعیین شده است. علاوه بر این، هزینه برق در یک دوره ۲۴ ساعته متفاوت است. روش ارائه شده، مسئله برنامه‌ریزی را به عنوان یک برنامه خطی عدد صحیح فرمول‌بندی می‌کند. هدف آن‌ها به حداقل رساندن کل هزینه انرژی و تغییرات در حالی که تقاضای مشتری در زمان ارائه شده برآورده شود، بوده است.

لو و همکاران[2] یک فرمول برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای کنترل بار جانبی تقاضای انرژی الکتریکی برای معدن ذغال سنگ ارائه دادند. فرمول ارائه شده توسط آن‌ها از پیش‌بینی تقاضا برای تعیین اینکه آیا اقدامات کنترل ضروری است، استفاده می‌کند و بر اساس مدل بهینه‌سازی که هزینه‌های خالص تخلیه بار را به حداقل می‌رساند، هر دو زمان

1. Kondili et al., 1993
2. Luo et al., 1998

تخلیه و بارگذاری را زمانبندی می‌کند. محدودیت‌های عملیاتی با استفاده از حداقل/ حداکثر زمان کارکرد صحیح / زمان از کار افتادگی، که بستگی به وضعیت فعلی سیستم دارند، متناسب هستند. محدودیت‌های فرآیند و ذخیره‌سازی در پژوهش آن‌ها وجود ندارد.

آشوک و بانرجی (**Ashok & Banerjee, 2001**) یک فرمول ریاضی برنامه ریزی خطی عدد صحیح برای به دست آوردن یک زمانبندی تولید بهینه در یک کارخانه آرد با به حداقل رساندن هزینه مصرف انرژی و همچنین هزینه‌های الکتریکی توسط زمانبندی بارهای متناسب با فرآیند، ذخیره‌سازی و محدودیت‌های تولید، توسعه دادند. با این حال، آن‌ها هزینه تقاضا را در نظر نگرفتند و بنابراین راه‌حل ممکن است لزوما بهینه نباشد. ایراپتریتو و همکاران (**Ierapetritou et al., 2002**) یک مدل که معرف متغیرهای باینری برای نشان دادن حالت‌های عملیاتی و تعویض بین حالت‌های مختلف عملکرد را برای بهینه‌سازی زمانبندی ارائه کردند. این مشکل از این واقعیت ناشی شده است که میزان برقی که شرکت برق به کارخانه توزیع می‌کند دارای نوسانات زیادی است و این یک فرصت بالقوه برای کاهش میانگین هزینه‌های عملیاتی با تغییر حالت عملیات و میزان تولید وابسته به هزینه‌های برق ایجاد می‌کند. مسئله بهینه‌سازی زمانبندی با توجه به اینکه قیمت برق و تقاضای محصول فقط برای یک بخش از افق مطلوب بهینه‌سازی وجود دارد، چالش برانگیزتر شده است. این چالش‌ها با توسعه‌ی یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای مواجه شدند. تحقیقات آن‌ها منجر به یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (**MINLP**[1]) برای کاهش هزینه برق شده است. آن‌ها مدل ارائه شده را به یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (**MILP**[2]) تبدیل کردند و با استفاده از مدل **ARIMA** سناریوهای لازم برای قیمت برق درآینده را ایجاد کردند. یوزل (**Uzel, 2004**) برای یک کارخانه که با استفاده از برق و مازوت محصولات خود را تولید می‌کند ۴ مدل مختلف برنامه ریزی خطی را توسعه داد که با استفاده از این مدل‌ها می‌توان مقدار مصرف بهینه انرژی را برحسب برنامه‌ریزی تولید مشخص نمود. او در

1 mixed integer nonlinear programming
2 mixed integer linear programming

مدل‌هایی که ارائه نمود، یک کارخانه با سیستم تولیدی **FlowShop** با ۵ مرحله تولید را درنظر گرفت که تنها مرحله دوم این سیستم دارای دوباره‌کاری بود.

آشوک (**Ashok, 2006**) کار قبلی خود را با اضافه کردن هزینه تقاضای انرژی به تابع هدف برای مدلسازی عملیات یک کارخانه فولاد کوچک گسترش داد. با این وجود، سیستم تولیدی مدل شده یک فرآیند تولید دسته‌ای ساده بود. برخی از مدل‌های ریاضی نیز برای زمانبندی پویا در سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر (**FMS**[1]) با کمینه کردن مصرف انرژی پیشنهاد شده است . ژانگ و همکاران (**Zhang et al., 2012**) یک مدل برنامه-ریزی ریاضی خطی عدد صحیح برای زمانبندی پویا در **FMS**، که شامل مصرف انرژی و زمانبندی کارا به طور همزمان است، ارائه کردند. این مدل به طور همزمان مصرف انرژی و زمانبندی را در نظر می‌گیرد.

کاسترو و همکاران (**Castro et al., 2009**) زمانبندی کارخانه‌های پیوسته را با توجه به محدودیت‌های انرژی مرتبط با قیمت‌گذاری و در دسترس بودن برق وابسته به زمان و با تمرکز بر مدلسازی رویدادهای گسسته که در یک زمان از پیش تعریف شده با یک فرمول زمانبندی زمان پیوسته، مورد توجه قرار دادند. مدل ریاضی ارائه شده، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط بود. آن‌ها فرمولاسیون‌های زمان گسسته و پیوسته را ارائه کردند که می‌تواند این مسائل را همراه با چندین مقطع زمانی کوتاه‌مدت مورد توجه قرار دهد. هر دو فرمول‌ها به ارائه فرآیند شبکه منابع وظیفه متکی هستند. آن‌ها تحقیقات بیشتری در مورد تأثیر تمایز تعرفه برق در زمانبندی تولید با هزینه بهینه برق انجام دادند.

زمانبندی مرتبط با انرژی (**EAS**[2]) فرآیندهای تولید، نیاز به یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی صرفه‌جویی در انرژی برای یک برنامه زمانی مشخص دارد. بروزون و همکاران (**Bruzzone et al., 2012**) یک الگوریتم زمانبندی مرتبط با انرژی را بر اساس یک فرمول برنامه‌ریزی اعداد صحیح مختلط ارائه کردند تا برای استقرار محصولی یا خط تولیدی انعطاف‌پذیر در برنامه زمانی مشخص مورد در اصل زمانبندی و توالی کارها صرفه

1 flexible manufacturing systems
2 energy-aware scheduling

جویی انرژی ایجاد شود. پتانسیل صرفه‌جویی مقدار قابل توجهی انرژی وجود دارد که می‌تواند با انتخاب ماشین‌آلات جایگزین و کاهش مصرف انرژی بدون استفاده از طریق زمانبندی بهتر انجام شود. مون و همکاران (**Moon et al., 2013**) یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلط برای بهینه‌سازی مجموع وزن دو معیار به حداقل رساندن زمان تکمیل کل و به حداقل رساندن هزینه‌های برق وابسته به زمان را پیشنهاد کردند. در مدل آن‌ها، زمان بیکاری بدون هزینه برق مجاز است به طوری که راه‌حل آن‌ها به قرار دادن زمان بیکاری زمانیکه هزینه‌های انرژی بالا است، بستگی دارد. علاوه بر این، هزینه‌ها تنها در سه دوره مختلف (حداکثر بارگیری، بارگیری متوسط و بار خاموش) با سه احتمال انتخاب شده و رتبه‌بندی می‌شوند. یک الگوریتم ژنتیکی هیبریدی برای حل مسئله‌ی ماشین‌های موازی نامتجانس با موعد مقرر و زمان‌های بیکاری یکسان در نظر گرفته شده است. شروف و همکاران (**Shrouf et al., 2014**) با درنظر گرفتن تصمیم‌گیری در سطح ماشین برای تعیین زمان راه‌اندازی برای پردازش کار، زمان بیکاری، زمانی که دستگاه باید خاموش شود، یک مدل ریاضی **NP-hard** برای به حداقل رساندن هزینه کل مصرف انرژی برای برنامه‌ریزی تک ماشینه با توجه به تغییرات مداوم در قیمت انرژی را ارائه کردند. آن‌ها برای بدست آوردن راه‌حل نزدیک به بهینه از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. آن‌ها در نتایج بدست آمده از مدل خود نشان دادند که با توجه به تغییرات مداوم در قیمت انرژی در زمانبندی تولید، صرفه جویی قابل توجهی می‌تواند حاصل شود. هه و همکاران (**He et al., 2015**) یک روش بهینه‌سازی برای کاهش مصرف انرژی در عملیات ماشینکاری و کاهش مصرف انرژی بدون استفاده که شامل انتخاب ماشین‌آلات و توالی عملیاتی برای استقرار کارگاهی انعطاف‌پذیر است ارائه کردند. آن‌ها یک مدل ریاضی را با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله و هدف مصرف انرژی را با یک هدف کلاسیک زمان تکمیل کل ترکیب کردند. همچنین آن‌ها از الگوریتم **Nested Partition** که ثابت شده است برای مسائل **NP-hard** مناسب است برای حل مدل استفاده کردند. عاقلی‌نژاد و همکاران (**Aghelinejad et al., 2020**) یک مسئله برنامه‌ریزی دو ماشینه دو مرحله‌ای برای سیستم تولید جریانی تحت تعرفه‌های مختلف برق در زمان استفاده را مورد مطالعه قرار دادند. مسئله آن‌ها شامل مجموعه‌ای از

مشاغل بود که باید به اسلات‌های زمانی در دسترس با هزینه‌های مختلف انرژی تخصیص داده می‌شد تا کل هزینه‌های مصرف انرژی به حداقل برسد. برای این منظور، یک مدل جدید برنامه‌ریزی خطی (**LP**) پیشنهاد کردند و با چندین مثال عددی مختلف، کارایی مدل پیشنهادی را ارزیابی نمودند. اسچولز و همکاران (**Schulz et al., 2020**) یک مسئله زمانبندی سیستم تولید محصولی ترکیبی با سطوح متغیر سرعت تولید گسسته با هدف به حداقل رساندن هزینه انرژی و تاخیر کلی را مورد مطالعه قرار دادند.

اگرچه سرعت پایین می‌تواند مصرف انرژی را کاهش دهد، اما زمان پردازش را افزایش می‌دهد، که هدف تحویل دقیق را خنثی می‌کند. برای حل این مشکل آن‌ها دو مدل جدید ارائه کردند که قیمت انرژی در زمان استفاده را درنظر می‌گیرد و آن‌ها همچنین بین مدل‌ها مقایسه انجام دادند. تأثیر سطوح متغیر سرعت تولید گسسته بر هزینه‌های انرژی، مصرف انرژی، تحویل دقیق و همچنین وابستگی متقابل بین این اهداف را توسط یک مثال عددی نشان دادند. وانگ و همکاران (**Wang et al., 2020**) با الهام گرفتن از فرآیند تولید سرامیک شیشه‌ای در دنیای واقعی، یک مسئله زمانبندی سیستم تولید محصولی ترکیبی دو مرحله‌ای با دو معیار کارآمدی انرژی را بررسی کردند. در مدل آن‌ها ماشین-های موازی دارای شایستگی در مرحله **۱** و یک دستگاه دسته ای[1] در مرحله **۲** بودند. مقیاس‌های عملکردی در نظر گرفته شده، میزان مصرف کل انرژی و مدت زمان صرف شده برای اتمام کار[2] بود و قیمت برق در زمان استفاده (**TOU**) و حالت‌های مختلف ماشین آلات (کار، بیکار و خاموش) یکپارچه بود. آن‌ها برای حل با این مسئله، یک مدل عدد صحیح مختلط (**MIP**) ارائه کردند که از یک روش محدودیت تقویت شده (**AUGMECON**) برای بدست آوردن جبهه دقیق پارتو استفاده کردند.

در **Error! Reference source not found.** خلاصه‌ای از تحقیقات صورت گرفته به همراه اقدامات اصلی انجام شده توسط محققین، آورده شده است و نشان داده شده است که اکثر مقالات بر روی مسئله‌ی دوباره‌کاری تمرکز نداشته‌اند.

1 batch machine
2 makespan

جدول ۱. خلاصه‌ای از مرور ادبیات گذشته

نویسنده	دوباره-کاری	زمینه انرژی مورد بحث	مختلط/ ساده
لو و همکاران (۱۹۹۸)	✗	– کنترل بار جانبی تقاضای انرژی الکتریکی برای معدن ذغال سنگ – عدم وجود محدودیت‌های فرآیند و ذخیره‌سازی در این پژوهش	مختلط
آشوک و بانرجی (۲۰۰۱)	✗	– زمانبندی تولید بهینه کارخانه آرد با به حداقل رساندن هزینه مصرف انرژی و همچنین هزینه‌های الکتریکی	ساده
ایراپتریتو و همکاران (۲۰۰۲)	✗	– استفاده از یک برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای – کاهش میانگین هزینه‌های عملیاتی با تغییر حالت عملیات و میزان تولید وابسته به هزینه‌های برق	مختلط
یوزل (۲۰۰٤)	✓	– استفاده از برنامه ریزی خطی برای بهینه سازی مصرف انرژی برق برای یک کارخانه با ۵ مرحله تولید – تنها در مرحله دوم دوباره‌کاری درنظرگرفته شده است	مختلط
آشوک (۲۰۰٦)	✗	–توسعه پژوهش قبلی خود با افزودن هزینه تقاضای انرژی به تابع هدف برای فرآیندهای تولید دسته‌ای	ساده
کاسترو و همکاران (۲۰۰۹)	✗	-زمانبندی کارخانه‌های پیوسته با توجه به محدودیت‌های انرژی مرتبط با قیمت‌گذاری و در دسترس بودن برق وابسته به زمان	مختلط
ژانگ و همکاران (۲۰۱۲)	✗	– زمانبندی پویا در **FMS** شامل مصرف انرژی و زمانبندی کارا به طور همزمان	ساده
بروزون و همکاران (۲۰۱۲)	✗	–ارائه یک الگوریتم زمانبندی مرتبط با انرژی برای استقرار محصولی یا خط تولیدی انعطاف‌پذیر در برنامه زمانی مشخص	مختلط
مون و همکاران (۲۰۱۳)	✗	–بهینه‌سازی مجموع وزن دو معیار به حداقل رساندن زمان تکمیل کل و به حداقل رساندن هزینه‌های برق وابسته به زمان – هزینه‌ها تنها در سه دوره مختلف (حداکثر بارگیری، بارگیری متوسط و بار خاموش) با سه احتمال انتخاب شده و رتبه‌بندی می‌شود	مختلط
شروف و همکاران	✗	– به حداقل رساندن هزینه کل مصرف انرژی برای برنامه-ریزی تک ماشینه با توجه به تغییرات مداوم در قیمت انرژی	مختلط

نویسنده	دوباره-کاری	زمینه انرژی مورد بحث	مختلط/ ساده
(۲۰۱٤)		را ارائه کردند	
هه و همکاران (۲۰۱۵)	✗	– ترکیب مصرف انرژی با زمان تکمیل کل در تابع هدف – کاهش مصرف انرژی در عملیات ماشینکاری در استقرار کارگاهی انعطاف‌پذیر	مختلط
عاقلی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۹)	✗	– مسئله برنامه‌ریزی دو ماشینه دو مرحله‌ای برای سیستم تولید محصولی تحت تعرفه‌های مختلف برق	ساده
اسچولز و همکاران (۲۰۲۰)	✗	– مسئله زمانبندی سیستم تولید محصولی ترکیبی با سطوح متغیر سرعت تولید گسسته با هدف به حداقل رساندن هزینه انرژی و تاخیر کلی	مختلط
وانگ و همکاران (۲۰۲۰)	✗	– مسئله زمانبندی سیستم تولید محصولی ترکیبی دو مرحله-ای با دو معیار کارآمدی انرژی	مختلط
پژوهش حاضر	✓	– در نظر گرفتن مصرف انرژی و دوباره‌کاری برای یک سیستم تولیدی چند مرحله‌ای برای تولید محصولات پیوسته برای کاهش هزینه‌ها – انتخاب میزان بهینه تولید در هر ماه بر اساس هزینه‌های تولید در آن ماه	مختلط

روش

در این مقاله یک سیستم تولیدی چند مرحله‌ای برای تولید محصولات پیوسته، درنظر گرفته شده است که هر مرحله از یک قسمت اصلی تولید و یک قسمت دوباره‌کاری تشکیل شده است. در مدل ارائه شده منظور از مصرف انرژی، انرژی-ای است که مستقیما در تولید محصولات استفاده می‌شود. در مرحله اول پس از ورود مواد اولیه خام، مواد اولیه وارد قسمت اصلی تولید می‌شوند. درصدی از مواد اولیه به هر دلیلی در این مرحله ضایعات شده و از روند تولید بکلی خارج می‌شوند و درصدی دیگر در جریان تولید نیاز به دوباره‌کاری پیدا می‌کنند و به مرحله‌ی دوم یعنی دوباره‌کاری مرحله اول ارسال می‌شوند. در نهایت درصد باقیمانده مواد اولیه قسمت اصلی تولید که نه ضایعات هستند و نه نیاز به دوباره‌کاری دارند

آماده‌ی ورود به مرحله دوم می‌شوند. موادی که نیاز به دوباره‌کاری دارند و وارد مرحله‌ی دوم از مرحله اول شده‌اند، فرآیند دوباره‌کاری روی آن‌ها پیاده می‌شود. درصدی از مواد این قسمت ضایعات هستند که دور ریخته می‌شوند و درصد باقیمانده با مواد تکمیل شده از مرحله‌ی اول به عنوان ورودی نهایی مرحله دوم به مرحله‌ی اصلی تولید این مرحله فرستاده می‌شوند و روند فوق تا آخرین مرحله تکرار می‌شود.

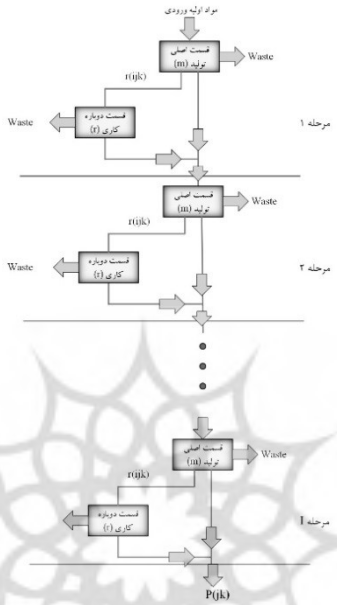
برای مدلسازی از سه دسته محدودیت به نام محدودیت‌های بالانس، محدودیت-های تقاضا و محدودیت‌های زمانی استفاده شده است. محدودیت‌های بالانس، وظیفه‌ی محاسبه‌ی تعداد مواد اولیه مورد نیاز و مقدار مواد ورودی به قسمت از مراحل تولید را برعهده دارد. محدودیت‌های تقاضا تعداد محصول نهایی تولید شده و موجودی انبار را تعیین می‌کند و تضمین می‌کند هیچ کدام از مشتری‌ها با کمبود مواجه نمی‌شوند. محدودیت‌های زمانی نیز برای مشخص کردن زمان در دسترس برای تولید هر محصول کاربرد دارند و دوره‌ی زمانی بصورت ماهانه درنظر گرفته شده است.

مفروضات مدل پیشنهادی

- محصولاتی که در یک خانواده قرار می‌گیرند امکان تولید شدن دارند.
- محصولات همه‌ی مراحل را طی می‌کنند ولی لزوما در همه‌ی مراحل تمامی عملیات‌های هر مرحله روی آن انجام نمی‌گیرد و ممکن است عملیات‌ها برای محصولات مختلف متفاوت باشد.
- هزینه‌های تولید و دوباره‌کاری به ازای هر واحد محصول ثابت و برابر فرض شده است
- بین هر مرحله هیچ موجودی انباری وجود ندارد.
- مدل برای تولید محصولاتی با واحد کیلوگرم، تن و غیره مناسب است.

حالت کلی خط تولید محصول بصورت شکل ۱ می‌باشد.

*شکل ۱ - **فرآیند اصلی تولید محصول***



پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

معرفی متغیرها و پارامترهای مدل

i	تعداد مراحل تولید
j	تعداد محصولات
k	تعداد ماه‌هایی که تولید در آن‌ها انجام می‌شود
E_{ijk}	هزینه انرژی برای تولید محصول **j** ام در مرحله **i** ام برای ماه **k** ام
A_{1jk}	تعداد مواد اولیه ورودی به مرحله اول برای محصول **j** ام در ماه **k** ام
X_{ijk}^{m}	تعداد محصول ورودی به مرحله‌ی اصلی تولید برای محصول **j** ام در
X_{ijk}^{r}	تعداد محصول ورودی به مرحله‌ی دوباره‌کاری برای محصول **j** ام در
r_{ijk}	درصد دوباره‌کاری برای محصول **j** ام در مرحله **i** برای ماه **k** ام
W_{ijk}^{m}	درصد ضایعات مرحله‌ی اصلی تولید برای محصول **j** ام در مرحله **i**
W_{ijk}^{r}	درصد ضایعات مرحله‌ی دوباره‌کاری تولید برای محصول **j** ام در
P_{jk}	تعداد محصول نهایی **j** تولید شده از فرآیند تولید در ماه **k** ام
D_{jk}	تقاضای محصول نهایی **j** در ماه **k** ام
I_{jk}	میزان موجودی انبار شده محصول نهایی **j** در ماه **k** ام
s_{ij}	زمان مورد نیاز برای آماده‌سازی[1] تولید محصول نهایی **j** در مرحله **i**
R_j	زمان پردازش[2] محصول نهایی **j**
C_{ik}	ظرفیت زمانی تولید در ماه **k** ام برای مرحله **i** ام
Y_{jk}	متغیر باینری که درصورت تولید محصول نهایی **j** در ماه **k** مقدار
M	مقدار جریمه برای محدودیت‌هایی که متغیر باینری در آن‌ها استفاده

1 setup time
2 processing time

مدل بهینه‌سازی سیستم تولیدی

$$Z = \sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}(E_{1jk} \times A_{1jk}) + \sum_{i=2}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}(E_{ijk} \times X_{ijk}^{m}) \qquad (۱)$$

عبارت فوق بیانگر تابع هدف مسئله است که با درنظر گرفتن هزینه انرژی، مواد اولیه ورودی و مواد ورودی به هر مرحله را به‌گونه‌ای انتخاب می‌کند که هزینه‌ها حداقل شوند. همانگونه که مشخص است تابع هدف بصورت دو قسمت مجزا نوشته شده است که قسمت اول برای مرحله اول و قسمت دوم برای مرحله دوم تا آخر می‌باشد و علت این جداسازی این است که مواد خروجی از هر مرحله، ورودی به مرحله بعدی می‌باشد. مواد ورودی به مرحله دوم و باقی مرحله‌ها ترکیب مواد خروجی قسمت اصلی تولید و مواد خروجی از قسمت دوباره‌کاری همان مرحله می‌باشد که در محاسبه‌ی X_{ijk}^{m} از هر دو مرحله استفاده شده است. برای مرحله اول مواد اولیه ورودی به آن، بصورت مستقیم وارد مرحله می‌شود و مانند باقی مرحله‌ها ترکیبی از مواد خروجی از دو قسمت مرحله نیست و این موضوع با نماد A_{1jk} نمایش داده شده است.

محدودیت‌های بالانس

$$X_{1jk}^{r} = r_{1jk} \times A_{1jk} \qquad \begin{matrix} \forall\ j = 1, 2, \dots, J \\ \forall\ k = 1, 2, \dots, K \end{matrix} \qquad (۲)$$

این محدودیت نشان‌دهنده‌ی تعداد مواد ورودی به مرحله‌ی بازفرآوری یا دوباره-کاری مرحله اول می‌باشد. مواد اولیه‌ی ورودی برای محصولات مختلف به مرحله اول در ماه‌های گوناگون (A_{1jk}) پس از ورود به مرحله‌ی اصلی تولید، در درصد دوباره‌کاری این مرحله که برای هر محصول و هر ماه متفاوت است (r_{1jk}) ضرب شده و تعداد مواد ورودی به مرحله‌ی دوباره‌کاری مرحله اول (X_{1jk}^{r}) را نشان می-دهد. برای مثال اگر تعداد ۱۰۰ واحد ماده‌ی اولیه برای تولید محصول یک درماه

اول وارد مرحله اول شود ($A_{111} = 100$) و پس از تکمیل تولید در مرحله‌ی اول، ۱۰ درصد از مواد تکمیل شده نیاز به دوباره‌کاری داشته باشند ($r_{111} = 0.1$)، آنگاه تعداد ۱۰ تا از مواد تکمیل شده نیاز به دوباره‌کاری دارند.

$$X^m_{2jk} = \left(1 - W^m_{1jk} - r_{1jk}\right) \times A_{1jk} + \left(1 - W^r_{1jk}\right) \times X^r_{1jk} \qquad \forall\ j = 1, 2, \dots, J \quad \forall\ k = 1, 2, \dots, K \qquad (۳)$$

محدودیت فوق نشان‌دهنده‌ی تعداد مواد ورودی به مرحله‌ی اصلی تولید در مرحله دوم (X^m_{2jk}) می‌باشد و بر اساس مواد خروجی از دو مرحله‌ی مرحله قبلی نوشته شده است. هنگامی که مواد اولیه وارد مرحله اولی می‌شوند درصدی از آن-ها ضایعات شده (W^m_{1jk}) و درصدی دیگر نیاز به دوباره‌کاری (r_{1jk}) دارد. با درنظر گرفتن این دو درصد، درصد باقیمانده در مواد اولیه ورودی (A_{1jk}) ضرب شده و خروجی از مرحله‌ی اصلی تولید در این مرحله را شکل می‌دهد. همچنین برای یافتن میزان محصولات خروجی از مرحله‌ی دوباره کاری مرحله اول، مقدار محصولاتی که نیاز به دوباره‌کاری دارند و در محدودیت قبلی حساب شد در درصد باقیمانده این مرحله که ضایعات (W^r_{1jk}) را درنظر نمی‌گیرد ضرب می‌شود و مجموع این دو خروجی از مرحله اول، میزان محصولات ورودی به مرحله‌ی اصلی تولید مرحله دوم (X^m_{2jk}) را نشان می‌دهد. با توجه به مفروضات مثالی که برای محدودیت قبلی آورده شد، اگر ضایعات مرحله‌ی اصلی تولید در ماه اول پنج درصد ($W^m_{111} = 0.05$) و ضایعات مرحله‌ی دوباره‌کاری در ماه اول نیز پنج درصد ($W^r_{111} = 0.05$) درنظر گرفته شود، آنگاه مطابق با محدودیت فوق داریم:

$$X^m_{2jk} = (1 - 0.05 - 0.1) \times 100 + (1 - 0.5) \times 10 = 85 + 9.5 = 94.5$$

$$X^r_{ijk} = r_{ijk} \times X^m_{ijk} \qquad \forall\ i = 2, \dots, I \quad \forall\ j = 1, 2, \dots, J \quad \forall\ k = 1, 2, \dots, K \qquad (۴)$$

محدودیت فوق نشان‌دهنده‌ی تعداد مواد ورودی به مرحله‌ی دوباره‌کاری مرحله دوم تا آخرین مرحله می‌باشد و مانند محدودیت اول از ضرب درصد دوباره‌کاری هر مرحله در مواد ورودی به هر مرحله محاسبه می‌شود.

$$X_{ijk}^{m} = \left(1 - W_{(i-1)jk}^{m} - r_{(i-1)jk}\right) \times X_{(i-1)jk}^{m} + (1 - W_{(i-1)jk}^{r}) \times X_{(i-1)jk}^{r} \quad \begin{matrix} \forall\ i = 3, \dots, I \\ \forall\ \ j = 1, 2, \dots, J \\ \forall\ k = 1, 2, \dots, K \end{matrix} \quad (۵)$$

این محدودیت همانند محدودیت دوم تعداد مواد ورودی به مرحله‌ی اصلی هر مرحله را نشان می‌دهد با این تفات که این رابطه برای مرحله سوم تا آخرین مرحله نوشته شده است. دلیل جداسازی این محدودیت‌ها مربوط به مواد اولیه ورودی به مرحله اول می‌باشد که با باقی مرحله‌ها متفاوت است. در مرحله اول ورودی، فقط مواد اولیه است که به همین خاطر با نماد A_{1jk} نمایش داده شد ولی از مرحله دوم به بعد خروجی دومرحله‌ی مرحله قبل، ورودی آن مرحله می‌باشد. همانطور که مشاهده شد تعداد مواد ورودی به مرحله دوم نیز توسط یک محدودیت بصورت جداگانه محاسبه گردید. زیرا ورودی هر مرحله توسط خروجی مرحله قبلی تعیین می‌گردد و در مرحله اول از مواد اولیه ورودی (A_{1jk}) استفاده می‌شود و از مرحله دوم تا آخر دو مقدار X_{ijk}^{m} و X_{ijk}^{r} ایجاد می‌گردند و مبنای محاسبات بعدی قرار می‌گیرند. به همین خاطر توسط دو محدودیت قبلی این دو مقدار را ایجاد و سپس در این محدودیت که برای مرحله سوم تا آخر نوشته شده است از آن‌ها استفاده می‌گردد.

محدودیت‌های تقاضا

$$P_{jk} = \left(1 - W_{Ijk}^{m} - r_{Ijk}\right) \times X_{Ijk}^{m} + \left(1 - W_{Ijk}^{r}\right) \times X_{Ijk}^{r} \quad \begin{matrix} \forall\ j = 1, 2, \dots, J \\ \forall\ k = 1, 2, \dots, K \end{matrix} \quad (۶)$$

عبارت فوق بیان کننده‌ی تعداد محصول نهایی **j** ام تولید شده از فرآیند تولید در ماه **k** ام (P_{jk}) می‌باشد. مواد تکمیل شده که برای اجرای عملیات نهایی بر روی آن‌ها وارد مرحله آخر می‌شوند، همانند گذشته وارد دو مرحله‌ی اصلی تولید و

دوباره‌کاری می‌شوند و پس از دور ریختن ضایعات، خروجی این دو مرحله با یکدیگر جمع شده و خروجی محصول نهایی را تشکیل می‌دهد.

$$P_{j1} \geq D_{j1} \qquad \forall\, j = 1, 2, \dots, J \qquad (۷)$$

این محدودیت بیان کننده‌ی این مطلب است که تعداد محصول نهایی **j** ام تولید شده در ماه اول (P_{j1}) باید بزرگتر یا مساوی تقاضای این محصول در ماه اول (D_{j1}) باشد. این محدودیت تضمین کننده‌ی عدم مواجهه با کمبود می‌باشد. ضمنا در ماه اول هنوز هیچ موجودی‌ای از دوره‌ی قبل موجود نمی‌باشد و به همین خاطر این رابطه و رابطه‌ی بعد برای ماه اول بصورت جداگانه مدل شده است.

$$I_{j1} = P_{j1} - D_{j1} \qquad \forall\, j = 1, 2, \dots, J \qquad (۸)$$

محدودیت فوق نشان‌دهنده‌ی موجودی ذخیره شده محصول نهایی **j** ام در ماه اول می‌باشد و از تفاضل تعداد محصول نهایی **j** ام در ماه اول (P_{j1}) و تقاضای این محصول در ماه اول (D_{j1}) ایجاد می‌شود.

$$I_{j(k-1)} + P_{jk} \geq D_{jk} \qquad \forall\, k = 2, 3, \dots, K \qquad (۹)$$

این محدودیت همانطور که قبلا ذکر شد نشان‌دهنده و تضمین کننده‌ی عدم مواجهه با کمبود از ماه دوم به بعد می‌باشد که بیان می‌کند موجودی ذخیر شده در انبار از ماه قبل به همراه محصول نهایی تولید در این ماه باید از تعداد تقاضا در این ماه بیشتر باشد.

$$I_{jk} = \left(I_{j(k-1)} + P_{jk}\right) - D_{jk} \qquad \begin{matrix} \forall \quad j = 1, 2, \dots, J \\ \forall\ k = 2, 3, \dots, K \end{matrix} \qquad (۱۰)$$

این محدودیت، میزان موجودی انبار ذخیره شده در ماه دوم تا آخرین ماه را بدین صورت محاسبه می‌کند که تقاضای این دوره باید از موجودی انبار دوره‌ی قبل و محصول تولیدی در این دوره کاسته شود.

محدودیت‌های زمانی

$$\sum_{j=1}^{J}(s_{1j} \times y_{jk} + R_j \times A_{1jk}) \leq C_{1k} \qquad \forall\ k = 1, 2, \dots, K \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{j=1}^{J}(s_{ij} \times y_{jk} + R_j \times X_{ijk}^{m}) \leq C_{ik} \qquad \begin{matrix} \forall \quad i = 2, \dots, I \\ \forall\ k = 1, 2, \dots, K \end{matrix} \qquad (۱۲)$$

دو محدودیت فوق بصورت مقدار مواد ورودی به هر مرحله تعریف شده است. در محدودیت اول مواد اولیه ورودی به مدل که توسط A_{1jk} نشان داده شده است. درصورت تولید هر کدام از محصولات y_{jk} مقدار یک می‌گیرد و چون فرض شده است برای تولید محصول، مواد اولیه از همه‌ی مراحل عبور می‌کند برای این متغیر اندیس ***i*** که بیانگر شماره‌ی مرحله است درنظر گرفته نشده است. باتئجه به توضیحات یاد شده y_{jk} در زمان آماده‌سازی مورد نیاز برای هر محصول در هر مرحله (s_{1j}) ضرب شده و با ضرب مواد اولیه‌ی ورودی به مرحله اول در زمان عملیات محصول جمع می‌شود. این مقدار باید از زمان در دسترس برای مرحله اول در ماه **k** ام کمتر باشد.

روند محدودیت دوم همانند محدودیت اول است و علت جداسازی این است که مواد اولیه ورودی به مرحله اول با مواد ورودی به مرحله‌های دبگر متفاوت درنظر گرفته شده است. زیرا مواد ورودی به مرحله دوم به بعد از مجموع مواد خروجی از مرحله‌ی اصلی تولید و مرحله‌ی دوباره‌کاری مرحله‌ی قبل تشکیل می‌شود.

$$\begin{cases} P_{jk} \le MY_{jk} & \forall \quad j = 1, 2, \dots, K \\ P_{jk} \ge Y_{jk} & \forall\, k = 1, 2, 3, \dots, K \end{cases} \qquad (۱۳)$$

این محدودیت با درنظر گرفتن یک مقدار جریمه (**M**) تضمین می‌کند اگر محصولی تولید شود Y_{jk} مقدار یک و اگر تولید نشود مقدار صفر بگیرد. اگر Y_{jk} یک شود آنگاه مقدار P_{jk} حتما بزرگتر و مساوی یک و کوچکتر از یک مقدار بسیار بزرگ خواهد بود. حال اگر Y_{jk} صفر شود، **M** درصفر ضرب شده و P_{jk} بزرگتر و مساوی صفر و کوچکتر و مساوی صفر خواهد شد. پس حتما هیچ محصولی تولید نمی‌شود.

$$\begin{cases} X_{ijk}^{m}, X_{ijk}^{r}, A_{1jk} \ge 0 \\ Y_{jk} = 0 \; or \; 1 \end{cases} \qquad (۱۴)$$

محدودیت فوق نشان‌دهنده‌ی مثبت بودن متغیرهای تصمیم و تعریف متغیر باینری Y_{jk} است. این مدل پس از مشخص شدن تعداد تقاضا و ظرفیت تولید در هر ماه و باقی پارامترها بر روی هر از متغیرهای فوق تصمیم‌گیری کرده و مقدار بهینه آن‌ها را با توجه به حداقل کردن هزینه‌ی انرژی تعیین می‌کند. همانطور که قبلا نیز بیان شده این مدل برای محصولاتی که بصورت دسته‌ای تولید می‌شوند، نوشته شده است.

یافته‌ها

در این بخش برای درک بیشتر از مدل ارائه شده، با درنظر گرفتن مفروضات مطرح شده در ابتدای فصل، یک مثال منطقی با الگو گرفتن از یوزل (Uzel, 2004) ایجاد و ارائه می‌گردد. در این مثال تعداد مرحله‌های تولیدی پنج مرحله (i=5)، تعداد خانواده‌ی محصولی که باید تولید شود سه عدد (j=3) و تعداد ماه‌های تولید ۱۲ ماه (k=12) درنظر گرفته شده است. سایر پارامترهای مدل در ادامه توضیح داده خواهند شد. مطابق با فرض در نظر گرفته شده در ابتدای فصل سوم برای مدل، این سیستم تولیدی در هفت روز هفته بصورت ۲۴ ساعته فعالیت می‌کند و درنتیجه کلا ۷۲۰ ساعت زمان برای یک ماه در دسترس می‌باشد. اما مطابق با مفروضات مدل در هر ماه بین یک تا دو روز زمان برای نگهداری و

تمیزکاری تجهیزات و دستگاه‌ها مورد نیاز است که با توجه به این موضوع اگر ۲۹ روز فعالیت انجام شود، میزان ساعات در دسترس برابر ۶۹۶ ساعت و اگر ۲۸ روز فعالیت انجام شود، میزان ساعات در دسترس برابر ۶۷۲ ساعت، است. جدول ۱ نشان‌دهنده‌ی ظرفیت زمانی در دسترس برای هرماه بر حسب ساعت می‌باشد.

جدول ۱ – ظرفیت زمانی در دسترس(C_k) بر حسب ساعت

مرحله	ماه											
	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
مرحله اول	٦٩٦	٦٢٤	٦٧٢	٦٩٦	٦٩٦	٦٧٢	٦٩٦	٦٩٦	٦٧٢	٦٩٦	٦٩٦	٦٩٦
مرحله دوم	٦٥٠	٦٨٠	٦٩٦	٦٧٢	٦٠٠	٦٩٦	٦٧٢	٦٩٦	٦٧٢	٦٦٠	٦٨٠	٦٦٠
مرحله سوم	٦٦٠	٦٧٢	٦٢٤	٦٦٦	٦٩٦	٦٢٤	٦٧٢	٦٢٤	٦٢٤	٦٧٢	٦٩٦	٦٩٦
مرحله چهارم	٦٩٦	٦٧٢	٦٢٤	٦٢٤	٦٢٤	٦٩٦	٦٧٢	٦٠٠	٦٨٠	٦٨٠	٦٨٠	٦٨٠
مرحله پنجم	٦٢٤	٦٢٤	٦٢٤	٦٩٦	٦٧٢	٦٧٢	٦٨٠	٦٢٤	٦٢٤	٦٩٦	٦٧٢	٦٧٢

سیستم تولیدی درنظر گرفته شده، خانواده از محصولات مشابه را تولید می‌کند. در نتیجه برای تولید هر کدام از محصولات این خانواده نیاز به آماده‌سازی خط تولید می‌باشد. جدول ۲ زمان آماده‌سازی برحسب ساعت برای هر محصول در هر مرحله را نمایش می‌دهد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

جدول ۲ – زمان آماده سازی (Setup Time) بر حسب ساعت برای هر محصول

مرحله (i)	محصولات (j)		
	محصول اول	محصول دوم	محصول سوم
مرحله اول	۱	۲	۱
مرحله دوم	۲	۱	۱
مرحله سوم	۱	۱	۱
مرحله چهارم	۲	۲	۱
مرحله پنجم	۲	۲	۲

پس از آماده‌سازی دستگاه‌ها و تجهیزات، زمان عملیات برای تولید محصول نهایی بر روی مواد ورودی به سیستم، به عنوان یک پارامتر باید تعیین شود. جدول ۳ نشان‌دهنده‌ی زمان پردازش برای هر واحد از محصول بر حسب ساعت بر کیلوگرم می‌باشد.

جدول ۳ – زمان پردازش (processing time) برای هر واحد از محصولات بر حسب ساعت بر کیلوگرم

محصولات	زمان
محصول اول	۰/۰۰۱۳
محصول دوم	۰/۰۰۱۰
محصول سوم	۰/۰۰۰۸

جدول ۴ میزان تقاضای محصولات در هر ماه (D_{jk}) را بر حسب کیلوگرم نشان می‌دهد. تعداد مواد اولیه مورد نیاز بگونه‌ای تعیین می‌شوند که این تقاضا به نحو مطلوب پاسخ داده شود.

جدول ٤ – تقاضای محصولات در هر ماه (D_{jk}) بر حسب کیلوگرم

محصولات	ماه											
	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
محصول اول	۱٤٥	۱۰۰	۱٤۷	۹٦۹	۱۲۷	۱۰۸	۸٤۱	۱٦۸	۱۱۳	۱۹٤	۱٥۷	۸۲۹
	۲۹۹	٦۷۰	۱٥۹	۱۲	۱٥۷	۱٦٥	۱۷	۹۷۸	۲۳۰	۱۹۰	۰۷۰	۳۹
محصول دوم	۲٦۳	۲۰۰	۳٥۰	۲۰۳	۲٥۳	۲۰۰	۲۲٦	۲۹۸	۳۲۲	۲۹٥	۲٤۸	۲۷۰
	۹۰۷	۹۰٦	٥٥٤	۱۱۸	٥۸٤	۳۹٤	۰۲٤	۳٦٥	۱٤۸	۱٥۰	۳۰۳	٥٦۰
محصول سوم	۱٤۰	۱۰۰	۲۱٥	۱۱۰	۱۲۷	۹۷۰	۱٥۱	۷۰۷	۱۳٥	۱۲٦	۱۳۹	۱۰۳
	۲۸٥	۲٥۱	٦۳۹	۷۱٤	٦٦۰	۸۰	۹۸۹	٥٤	۳٥٥	۹۳۰	۹٤۰	۳۱٦

هزینه‌ی انرژی بر حسب تومان بر کیلوگرم برای تولید هر واحد از محصول در هر ماه و در هر مرحله (E_{ijk}) در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵ – هزینه‌ی انرژی (E_{ijk}) بر حسب تومان بر کیلوگرم

$(i.j)$	ماه											
	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱,۱	۸۰۰۰	۸۳۰۰	۸٤۰۰	۸۰۰۰	۷٦۰۰	۷۱۰۰	۸٦۰۰	۸۲۰۰	۸۰۰۰	۸۳۰۰	۷۹۰۰	۷۱۰۰
۱,۲	٦٦۰۰	۷۰۰۰	۸۱۰۰	۸۳۰۰	٦٤۰۰	۷۰۰۰	٦۸۰۰	۷۳۰۰	۸۰۰۰	۷۲۰۰	۸٥۰۰	۷۰۰۰
۱,۳	۷٥۰۰	۷٦۰۰	٦٥۰۰	٦۳۰۰	٦۹۰۰	۸٤۰۰	۷٥۰۰	۷۱۰۰	۸٤۰۰	۸٦۰۰	٦۹۰۰	۷۹۰۰
۲,۱	۷٦۰۰	۷۱۰۰	٦٥۰۰	٦۱۰۰	٦۸۰۰	۷۳۰۰	٦٦۰۰	٦۹۰۰	٦۷۰۰	۷٦۰۰	۷۷۰۰	۷۲۰۰
۲,۲	۷۱۰۰	۸٤۰۰	۸۷۰۰	۸۳۰۰	۷۷۰۰	۷۳۰۰	۷۸۰۰	۸۰۰۰	۸۳۰۰	۸۰۰۰	٦۳۰۰	٦۷۰۰
۲,۳	٦۱۰۰	۷۰۰۰	۷۲۰۰	۸٥۰۰	۸۱۰۰	۷٦۰۰	۷۹۰۰	۷۷۰۰	۸۰۰۰	٦۹۰۰	٦۱۰۰	۷۲۰۰
۳,۱	۷٦۰۰	٦۷۰۰	٦٤۰۰	٦۳۰۰	٦۸۰۰	۸۰۰۰	۷۰۰۰	۷٦۰۰	٦٥۰۰	٦۳۰۰	٦۸۰۰	۸۰۰۰
۳,۲	۷۸۰۰	۷٦۰۰	٦۸۰۰	٦۹۰۰	٦۲۰۰	٦۰۰۰	٦۹۰۰	۸۰۰۰	۷۸۰۰	۷۹۰۰	۷۲۰۰	٦۳۰۰
۳,۳	٦٦۰۰	٦۳۰۰	۷۰۰۰	۷۸۰۰	٦۹۰۰	۷۸۰۰	۷۷۰۰	٦٤۰۰	۸٤۰۰	۸۰۰۰	٦۹۰۰	٦۰۰۰
٤,۱	۷۰۰۰	۷٥۰۰	۷٤۰۰	۷۱۰۰	۸۰۰۰	٦۷۰۰	٦۳۰۰	۷٦۰۰	۷۱۰۰	٦٥۰۰	٦۰۰۰	٦٥۰۰

	ماه											
$(i.j)$	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
٤,۲	٦۳۰۰	۷۰۰۰	۷٦۰۰	٦۸۰۰	۸۰۰۰	٦۸۰۰	٦۸۰۰	٦۸۰۰	۷۰۰۰	۷۰۰۰	۷۰۰۰	۷۰۰۰
٤,۳	۷۸۰۰	۷۹۰۰	۷۱۰۰	۸۰۰۰	۸۳۰۰	۸٤۰۰	۸۰۰۰	۷٦۰۰	۷۱۰۰	۸٦۰۰	۷۸۰۰	۷۹۰۰
٥,۱	٦۳۰۰	٦۸۰۰	۸۰۰۰	۷۰۰۰	۷٦۰۰	٦٥۰۰	٦۳۰۰	۷٦۰۰	۷۱۰۰	٦٥۰۰	٦۰۰۰	٦٥۰۰
٥,۲	۷۱۰۰	۸٤۰۰	۸۷۰۰	۸۳۰۰	۷۷۰۰	۷۳۰۰	۷۸۰۰	۷٦۰۰	۷۱۰۰	۸٦۰۰	۸۲۰۰	۸۰۰۰
٥,۳	٦٦۰۰	۷۰۰۰	۸۱۰۰	۸۳۰۰	٦٤۰۰	۷۰۰۰	٦۸۰۰	۷۳۰۰	۸۰۰۰	۷۲۰۰	۸٥۰۰	۷۰۰۰

جدول ۶ درصد دوباره‌کاری‌ای که بر روی مواد ورودی به هر مرحله در هر ماه (r_{ijk}) انجام می‌شود را نشان می‌دهد.

جدول ٦ – درصد دوباره‌کاری (r_{ijk}) اعمال شده بر روی مواد هر مرحله در هر ماه

	ماه											
$(i.j)$	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱,۱	۱۰	۱۰	۱۰	۹	۹/٥	۹/۸	۱۰	۱۰	۹/۸	۹	۹	۹
۱,۲	۸/٥	۸	۲/۳	۹/۱	۹/٥	۸/۲	۱۰	۱۰	۸/۱	۹	۹	۱۰
۱,۳	۸	۸/۲	۹	۹/٤	۸/۳	۸	۹	۹/٤	۸/۱	۹/۳	۱۰	۱۰
۲,۱	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۹	۹/۲	۸	۸/٥
۲,۲	۸	۸/٥	۹	۸/۳	۹/۱	۸/۲	۹/۱	۸/۲	۸/٦	۸/٤	۹/٤	۹
۲,۳	۹	۸	۸	۸/٥	۸/٤	۸/۸	۸/۲	۸/۱	۹	۹	۹/۹	۹/۹
۳,۱	۹	۹/۷	۸/۲	۹/۱	۸/۳	۸/۱	۹	۱۰	۸/۲	۹/٤	۹/۸	۱۰
۳,۲	۱۰	۹	۹/۷	۸/٥	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۸/۲	۹/٤	۹/۷	۱۰
۳,۳	۱۰	۹/۷	۹/٥	۸/۳	۹/٤	۸/۱	۹/۷	۹/۹	۸/٤	۱۰	۱۰	۱۰
٤,۱	۸	۸/٥	۹	۸/٤	۸/۳	۹	۹/۱	۹/۷	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
٤,۲	۹/۷	۸	۱۰	۱۰	۱۰	۸/۷	۱۰	۸	۸/۹	۹	۹/۹	۹/۷

	ماه											
$(i.j)$	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
٤,۳	۹	۸	۹	۹	۸/۸	۸/۳	۹/۱	۹	۸/٥	۸/٤	۸/۷	۸/٦
٥,۱	۹	۹/٤	۹/۱	۹/٦	۹/٤	۹/۳	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
٥,۲	۹	۸	۱۰	۸/٦	۱۰	۹	۹/٤	۸/۹	۸	۹/۱	۸/۸	۸
٥,۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۹	۸	۱۰	۱۰	۹/۸	۹/۹

جدول ۷ درصد ضایعات مرحله‌ی اصلی تولید (W_{ijk}^{m}) برای هر محصول را در هر ماه نشان می‌دهد.

جدول ۷ – درصد ضایعات مرحله‌ی اصلی تولید (W_{ijk}^{m}) برای هر محصول در هر ماه

	ماه											
$(i.j)$	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱,۱	۱	۱	۱/٥	۱/۷	۱	۲	۱	۳	۱/٥	۱/٦	۱/۷	۲/٥
۱,۲	۲/۳	۲/۷	۲/٥	۳	۱	۱/٥	۲	۲	۳	۲	۳	۳
۱,۳	۱/٥	۱/٦	۲/٥	۳	۲/٥	۱/۷	۱/۹	۲/۳	۳	۲/٥	۲/٦	۲/۷
۲,۱	۱/٦	۱/۷	۲	۳	۲/٦	۱/۹	۱/۷	۱/٥	۱/۳	۲	۳	۲/٦
۲,۲	۱/۹	۱/۳	۱/۷	۱/٦	۱/٤	۱/۸	۲	۲	۲/۳	۲/۹	۳	۳
۲,۳	۲/۹	۲/۹	۲/۹	۲/۷	۳	۲/٥	۱/٦	۲/۸	۱/٥	۲/٥	۲/۹	۱/۹
۳,۱	۱/۷	۱/٦	۲	۳	۲/٥	۹	۱/۹	۱/۷	۱/۳	۱	۱	۱
۳,۲	۱	۲/٥	۲/۳	۳	۱/٦	۱	۱/۷	۱/۹	۲/٥	۲/٥	۳	۳
۳,۳	۳	۲/٥	۲/۹	۱/٥	۱/۳	۱	۱	۲	۳	۲/۷	۱	۱/۸
٤,۱	۱/۸	۱/۹	۲	۳	۲/٦	۲/۸	۲/۷	۱/٥	۱/٤	۱/۳	۲	۲
٤,۲	۳	۲	۱	۱/٥	٦	۲/٤	۱/٤	۱/٦	۲/٥	۱/۸	۱/٦	۲/٥

$(i.j)$	ماه											
	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
٤,۳	۲/۷	۱/٦	۱/٥	۲/٦	۳	۲	۳	۳	۳	۲/۳	۲/٦	۱/٦
٥,۱	۱/٥	۲/۸	۲/۷	۱	۱/۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
٥,۲	۲	۳	۲	۱	۱	۲	۳	۲	۱	۲	۱	۱
٥,۳	۱/۲	۱	۱	۱/٥	۱/٥	۲	۳	۱/۷	۲/٥	۱/۸	۲/٤	۳

جدول ۸ درصد ضایعات مرحله‌ی دوباره‌کاری برای هر محصول در هر مرحله (W_{ijk}^{r}) در هر ماه را نشان می‌دهد.

جدول ۸ – درصد ضایعات مرحله‌ی دوباره‌کاری برای هر محصول در هر مرحله (W_{ijk}^{r})

$(i.j)$	ماه											
	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱,۱	۲	۲/٥	۳	۲/۳	۱/٥	۲/۳	۱/٦	۳	۳	۲/۳	۲/٥	۲
۱,۲	۲	۲/٥	۲/۳	۲/۷	۳	۱/٥	۱/۷	۲	۱/۹	۱/۸	۱/٥	۱
۱,۳	۱	۲	۲/٥	۱/٥	۱/۳	۱	۱/٥	۱/۷	۱/۸	۱/۳	۲	۲/۳
۲,۱	۲	۳	۲	۲/۳	۲/٦	۱/٥	۱/۹	۲/٥	۳	۲	۱/٦	۱/۸
۲,۲	۲	۳	۱/٤	۱/٥	۲	۲/۸	۳	۱	۲	۲/٥	۲/٦	۲/۹
۲,۳	۳	۲/۳	۱/٥	۲	۱/۸	۱/٦	۲	۳	۱	۱	۱	۱
۳,۱	۱	۲	۳	۱/٥	۲/٤	۳	۱/٥	۱/۷	۲	۱/٦	۱/۳	۱/٥
۳,۲	۱/٥	۱/٤	۱/۳	۲	۳	۲/٥	۲/۷	۱/٥	۱/۹	۱/۸	۲	۲/٥
۳,۳	۱/٥	۱/٦	۲/٥	۲	۲/۷	۳	۲/۸	۲/۹	۲/٥	۱/٥	۱/۷	۱
٤,۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۲/٥	۳	۲/٤	۲/٥	۱
٤,۲	۲	۲/۳	۳	۳	۳	۳	۱/٤	۱/۷	۱/۹	۲	۲/۹	۱/۷
٤,۳	۲	۲/۷	۲/۳	۲/٥	۲	۲	۱	۱/٥	۱/٥	۱/۹	۱/۹	۱/۷

ماه												
$(i.j)$	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
٥,۱	۱	۱	۱	۱/٥	۱/۷	۱/٦	۱/۹	۱/٦	۱/۳	۲	۲/٦	۲/۷
٥,۲	۲/۸	۳	۳	۳	۲/٦	۲/٤	۱/۹	۲/٦	۱/۹	۲/٦	۲/۷	۳
٥,۳	۱	۱/۲	۱/٥	۱/۷	۲/٦	۲/۲	۲/۳	۱/٥	۱/۷	۱	۱	۱

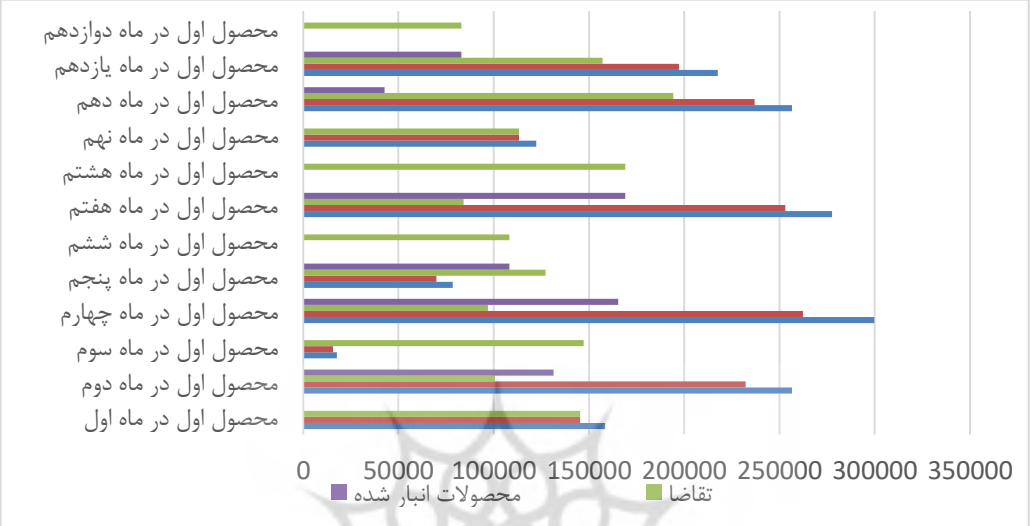
خروجی نرم‌افزار

پس از وارد کردن داده‌های قسمت قبل به نرم‌افزار گمز، مقدار بهینه تابع هدف نشان‌دهنده‌ی کمترین هزینه با توجه به انتخاب بهینه مقادیر ورودی به هر مرحله می‌باشد. این مقدار برابر با Z=۲۲۸۶۳۲۸۱۷۰۵۷/۷۷۱ واحد پول می‌باشد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

شکل ۲ – نمودار مواد ورودی اولیه، محصولات نهایی تولید شده، تقاضا و محصولات انبار شده

برای محصول اول در ماه‌های اول تا دوازدهم



همانگونه که در شکل ۲ مشخص است نمودار مواد ورودی اولیه، محصولات نهایی تولید شده، تقاضا و محصولات انبار شده برای محصول اول در ماه‌های اول تا دوازدهم رسم شده است. با توجه به نمودار تعداد محصولات تولید شده در ماه اول برابر با میزان تقاضا است و چیزی به عنوان موجودی ذخیره نمی‌شود. در ماه دوم میزان تقاضا کمتر از میزان محصولات تولید شده می‌باشد به همین جهت باقی‌مانده این دو مقدار به عنوان موجودی ذخیره می‌شود که به ماه سوم منتقل می‌شود و برای پاسخ‌گویی به تقاضای ماه سوم میزان کمتری مواد اولیه وارد و در نتیجه میزان کمتری محصول نهایی تولید می‌شود که به همراه موجودی منتقل شده کفاف تقاضای ماه سوم را می‌دهد. این روند تا ماه دوازدهم ادامه می‌یابد به گونه‌ای تقاضای ماه دوازدهم فقط از طریق میزان موجودی ذخیره شده از دوره‌ی قبل پاسخ داده می‌شود.

برای بررسی صحت مدل، در جدول شماره ۱۰ مقدار تابع هدف برای چند مثال دیگر محاسبه شده وارائه می گردد. همانگونه که مشخص است مدل ارائه شده در شرایط مختلف به خوبی جواب داده و پاسخ بهینه را ارائه می کند و جواب‌ها منطقی می‌باشد.

جدول ۱۰ – مقدار تابع هدف برای چند مثال مختلف

	مثال ارائه شده در بخش قبل	مثال دوم	مثال سوم	مثال چهارم
مقدار تابع هدف	۲۲۸٦۳۲۸۱۷۰۵۷/۷۷۱	۲۲۹۸۳۱۰٦٤۱۹۷/۰۵۷	۲۲٤۹۱۱٤۹۳۰۵۱/۸۳۳	۲۳۱٥٦۷٤۰۲٥۸۰/٤٤۸

تجزیه‌وتحلیل

با توجه به جدول ۱۱ مشخص است با کاهش زمان پردازش محصولات، هزینه کل و مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد

جدول ۱۱ – تجزیه‌وتحلیل زمان پردازش محصولات

محصول	زمان (مثال ارائه شده در بخش قبل)	زمان (تغییر نسبت به مثال اصلی)	زمان (تغییر نسبت به مثال اصلی)	زمان (تغییر نسبت به مثال اصلی)
محصول اول	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۳
محصول دوم	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۱۰
محصول سوم	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۵
مقدار تابع هدف	**۲۲۸٦۳۲۸۱۷۰۵۷,۷۷۱**	**۲۲۷۲۸٤۰۰۸٥٦۰,۹۳۲**	**۲۲٦٥۰٦٥۲۱۷۹۱,۱٦٥**	**۲۲٥۷٤۷۱٤۷۸٥٤,۷۹۳**

با توجه به جدول ۱۲ مشخص است که در ستون دوم با افزایش زمان آماده‌سازی، مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد و در ستون سوم با کاهش زمان آماده‌سازی نسبت به ستون دوم، مقدار تابع هدف نیز نسبت به ستون دوم کاهش می‌یابد.

جدول ۱۲ – تجزیه‌وتحلیل زمان آماده‌سازی

مرحله (i)	محصولات (j) (مثال ارائه شده)			محصولات (j) (تغییر نسبت مثال اصلی)			محصولات (j) (تغییر نسبت به ستون قبل)		
	محصول اول	محصول دوم	محصول سوم	محصول اول	محصول دوم	محصول سوم	محصول اول	محصول دوم	محصول سوم
مرحله اول	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۱
مرحله دوم	۲	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۲
مرحله سوم	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱
مرحله چهارم	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱	۱
مرحله پنجم	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۲	۱
مقدار تابع هدف	**۲۲۸۶۳۲۸۱۷۰۵۷/۷۷۱**			**۲۲۸۶۷۶۳۸۱۳۷۳/۷۹۲**			**۲۲۸۶۷۰۰۳۲۵۱۲/۱۵۲**		

با افزایش هزینه انرژی نسبت به مثال مطرح شده، مقدار تابع هدف نسبت به قبل افزایش یافته و از مقدار ۲۲۸۶۳۲۸۱۷۰۵۷/۷۷۱ واحد پول به مقدار ۲۲۹۱۴۲۴۱۵۸۳۳/۹ واحد پول تغییر می‌کند. با افزایش درصد دوباره‌کاری نسبت به مثال مطرح شده، مقدار تابع هدف نسبت به قبل افزایش یافته و از مقدار ۲۲۸۶۳۲۸۱۷۰۵۷/۷۷۱ واحد پول به مقدار ۲۲۸۶۶۶۵۳۲۲۰۸/۹۳ واحد پول تغییر می‌کند. اگر کارخانه با ماکزیمم ظرفیت زمانی تولید

کار کند، مقدار تابع هدف نسبت به قبل کاهش یافته و از مقدار ۲۲۸۶۳۲۸۱۷۰۵۷/۷۷۱ واحد پول به مقدار ۲۲۷۲۹۱۰۷۵۸۰۹/۷۳۸ واحد پول تغییر می‌کند.

بحث و نتیجه‌گیری

امروزه مسئله بهینه‌سازی مصرف انرژی به یکی از مسائل اصلی و پیچیده واحدهای صنعتی تبدیل شده است چرا که عدم استفاده موثر و بهینه از انرژی، ضررهای اقتصادی شدیدی را در پی دارد و منجر به افزایش هزینه‌ها می‌شود. همچنین دوباره‌کاری محصولات معیوب از موضوعاتی است که در صنایع و کارخانه‌ها نیاز به توجه ویژه دارد زیرا این موضع باعث افزایش بهره‌وری و درآمد و کاهش ضایعات می‌گردد لذا در این مقاله هدف بهینه‌سازی یک سیستم تولیدی با امکان دوباره‌کاری و در نظر گرفتن مصرف انرژی است. به این منظور یک مدل بهینه‌سازی ریاضی برای یک کارخانه که دارای استراتژی تولید خط محصولی[1] می‌باشد پیشنهاد شد. عملیات تولید هفت روز هفته و ۲۴ ساعته اجرا می‌شود و تنها یک تا دو روز در ماه برای نگهداری و تمیزکاری دستگاه‌ها، فعالیت تولید متوقف می‌شود. مدل دارای سه دسته محدودیت(۱) تعادل مواد، (۲) تعادل تقاضا و (۳) ظرفیت زمانی تولید می‌باشد. محدودیت‌های تعادل مواد، وظیفه‌ی محاسبه‌ی تعداد مواد اولیه مورد نیاز و مقدار مواد ورودی به هر قسمت از مرحله‌ها را برعهده دارد. محدودیت‌های تقاضا تعداد محصول نهایی تولید شده و موجودی انبار را تعیین می‌کند و تضمین می‌کند هیچ کدام از مشتری‌ها با کمبود مواجه نمی‌شوند. محدودیت‌های زمانی نیز برای مشخص کردن زمان در دسترس برای تولید هر محصول کاربرد دارند. در ادامه برای پیاده‌سازی عملی مدل، یک مثال منطقی طراحی و با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شد. در این مثال یک خط تولید پنج مرحله‌ای برای تولید خانواده‌ای از محصولات متشکل سه نوع محصول در ۱۲ ماه درنظر گرفته شد. نرم‌افزار با توجه به میزان ساعات در دسترس برای کار در ماه، هزینه انرژی برای تولید هر واحد محصول، درصد دوباره‌کاری مواد، درصد ضایعات و همچنین تقاضای محصولات میزان بهینه مواد اولیه مورد نیاز و مواد ورودی به هرمرحله را تعیین کرد. نقطه ضعف مقاله ارائه شده استفاده از مدل بهینه‌سازی تک هدفه برای مدلسازی و همچنین در نظر نگرفتن هزینه‌های جنبی انرژی می‌باشد. به عنوان پیشنهادی برای پژوهش-

1 Flow Shop

های آینده، استفاده از تابع هدف چندگانه برای بهینه‌سازی مصرف انرژی پیشنهاد می‌شود و همچنین توسعه مدل فعلی که برای یک واحد تولیدی است، در یک زنجیره تامین در ارتباط با تامین کنندگان و خریداران نیز پیشنهاد می گردد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

ORCID

Hadi Mokhtari http://orcid.org/0000-0002-5297-5841

References

Aghelinejad, M. M., Ouazene, Y., & Yalaoui, A. (2020). Energy-cost-aware flow-shop scheduling systems with state-dependent energy consumptions. *Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.

Ashok, S. (2006). Peak-load management in steel plants. *Applied energy,* 83(5), 413-424.

Ashok, S., & Banerjee, R. (2001). An optimization mode for industrial load management. *IEEE Transactions on Power Systems,* 16(4), 879-884.

Bruzzone, A. A., Anghinolfi, D., Paolucci, M., & Tonelli, F. (2012). Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: A mathematical model for flexible flow shops. *CIRP annals,* 61(1), 459-462.

Castro, P. M., Harjunkoski, I., & Grossmann, I. E. (2009). New continuous-time scheduling formulation for continuous plants under variable electricity cost. *Industrial & engineering chemistry research,* 48(14), 6701-6714.

Chang, P.-C., Lin, Y.-K., & Chen, J. C. (2015). A fuzzy-based assessment procedure for a clothing factory with waste-prevention consideration. *Journal of Cleaner Production,* 108, 484-493.

Ding, J.-Y., Song, S., & Wu, C. (2016). Carbon-efficient scheduling of flow shops by multi-objective optimization. *European Journal of Operational Research,* 248(3), 758-771.

He, Y., Li, Y., Wu, T., & Sutherland, J. W. (2015). An energy-responsive optimization method for machine tool selection and operation sequence in flexible machining job shops. *Journal of Cleaner Production,* 87, 245-254.

Ierapetritou, M., Wu, D., Vin, J., Sweeney, P., & Chigirinskiy, M. (2002). Cost minimization in an energy-intensive plant using mathematical programming approaches. *Industrial engineering chemistry research,* 41(21), 5262-5277.

Kondili, E., Shah, N., & Pantelides, C. C. (1993). Production planning for the rational use of energy in multiproduct continuous plants. *Computers chemical engineering,* 17, S123-S128.

Luo, Z., Kumar, R., Sottile, J., & Yingling, J. C. (1998). An milp formulation for load-side demand control. *Electric machines power systems,* 26(9), 935-949.

Moon, J.-Y., Shin, K., & Park, J. (2013). Optimization of production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost for industrial energy efficiency. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 68(1-4), 523-535.

Schulz, S., Buscher, U., & Shen, L. (2020). Multi-objective hybrid flow shop scheduling with variable discrete production speed levels and time-of-use energy prices. *Journal of Business Economics*, 1-29.

Shrouf, F., Ordieres-Meré, J., García-Sánchez, A., & Ortega-Mier, M. (2014). Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs. *Journal of Cleaner Production,* 67, 197-207.

Uzel, E. (2004). *A mathematical modeling approach to energy cost saving in manufacturing plant.* (Master's thesis). Izmir Institute of Technology,

Wang, S., Wang, X., Chu, F., & Yu, J. (2020). An energy-efficient two-stage hybrid flow shop scheduling problem in a glass production. *International Journal of Production Research,* 58(8), 2283-2314.

Wang, S., Wang, X., Yu, J., Ma, S., & Liu, M. (2018). Bi-objective identical parallel machine scheduling to minimize total energy consumption and makespan. *Journal of Cleaner Production,* 193, 424-440.

Zhang, L., Li, X., Gao, L., Zhang, G., & Wen, X. (2012). Dynamic scheduling model in FMS by considering energy consumption and schedule efficiency. *Paper presented at the Proceedings of the 2012 IEEE 16th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی