Journal of Industrial Management Studies
Vol.19 No 63, Winter 2021, 163-192
.atu.ac.ir
DOI: 10/22054/jims. 2021.24283.2342

ATU PRESS

Original Reserch / Review / …
Received:30/6/2019
Accepted:31/8/2021
ISSN:
eISSN:

A Multi-Objective Optimization Model for Multi-Product Aggregate Production Planning Considering Production Preferences: A Case Study

Majid Shakhsi-Niaei* Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran.

Fateme Ghayoor M.Sc. in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

Abstract

Aggregate production planning is a multi-objective problem which is influenced by managerial preferences which is rarely considered with these preferences in many researches. In this paper, a multi-objective model for multi-product aggregate-production-planning has been proposed and implemented in an industrial ball-valves manufacturing company. In the first phase, preferences of various product groups have been determined via a multiple-attribute-decision-making method which is used as an input for the second phase. To do this, one of the outranking methods has been used because of the variety in the dimension and the nature of different attributes. In the second phase, a deterministic multi-objective mixed-integer mathematical model has been designed considering the needs of the company. This model not only concentrates on the benefits, but also considers the preferences of the products. The third objective function is decreasing work in process. To solve this model, ϵ-constraint method has been used leading to a set of Pareto-optimal solutions, enabling the decision-maker to choose the best solution by trading off between the three objective functions. So top managers are able to decide how to provide product preferences and how to decrease WIP products while the benefits remain reasonable. The results show that using the proposed approach in the case study has improved 35%, 28%, and 56% total benefit, total utility, and WIP products, respectively.

Keywords: Aggregate Production Planning, Multi product, Multiple-Criteria Decision Making, Preferences, Optimization.

* Corresponding Author: m.niaei@yazd.ac.ir
How to Cite: Vol.19 No 63, Winter 2021

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۹

eISSN: ISSN:

فصلنامهٔ مطالعات مدیریت صنعتی
دوره نوزدهم، شماره ٦٣، زمستان ١٤٠٠، ١٩٢-١٦٣
.atu.ac.ir
DOI:١٠,٢٢٠٥٤ /jims.٢٠٢١,٤٤٢٨٣,٢٣٤٢

ارایه مدل برنامه‌ریزی تولید ادغامی چندمحصولی با ترکیب تصمیم‌گیری چند شاخصه ترجیحات تولید و بهینه‌سازی چندهدفه: نمونه‌موردی تولید شیرهای گاز صنعتی

مجید شخصی نیائی * استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

فاطمه غیور کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

چکیده

یکی از ملاحظاتی که می‌تواند در برنامه‌ریزی تولید ادغامی لحاظ شود؛ ترجیحات مدیریتی است که در مقاله حاضر، ضمن درنظرگیری آن، رویکردی پیشنهاد شده که در یک شرکت تولیدکننده شیرهای گاز طراحی و پیاده‌سازی شده است. در فاز اول از رویکرد پیشنهادی، ملاحظات موردنظر مدیریت و ترجیحات تولید محصولات مختلف با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری چندشاخصه تعیین شده و به عنوان ورودی به فاز دوم وارد می‌شوند. با توجه به تفاوت ماهیت و بعد شاخص‌ها، در فاز اول از یک روش غلبه نسبی استفاده شده است. در فاز دوم، با درنظرگیری نیازهای شرکت مورد بررسی، مدل بهینه‌سازی چندهدفه خطی عددصحیح مختلط به صورت قطعی طراحی شده که علاوه بر تابع هدف بیشینه‌سازی سود، ترجیحات تولیدی را نیز در انتخاب محصولات اعمال نموده و تابع هدف سوم بر کمینه‌سازی محصولات نیمه‌ساخته متمرکز است. برای حل مدل چندهدفه، از روش محدودیت حدی تقویت‌شده استفاده گردیده که مجموعه‌ای از جواب‌های کارا ایجاد می‌نماید و تصمیم‌گیرنده قادر خواهد بود با تبادل بین سه تابع هدف، مناسب‌ترین جواب موردنظر خود را انتخاب نماید. به عنوان مثال، مدیران ارشد متوجه خواهند شد تا چه اندازه از مقدار بهینه سود فاصله گرفته و در مقابل ترجیحات تولیدی را تامین یا محصولات نیمه‌ساخته را کاهش دهند. مقایسه نتایج عددی ارایه شده با مقادیر واقعی عملیاتی سازمان نشان داد که با به‌کارگیری مدل برنامه‌ریزی تولید ادغامی پیشنهادی در نمونه موردی، میزان سود کارخانه به میزان ۳۳٪ ، مطلوبیت تولید خانواده محصولات ۲۸٪ و کالای نیمه ساخته ۵۶٪ بهبود داده شده‌اند.

کلیدواژه‌ها: برنامه‌ریزی تولید ادغامی، چندمحصوله، تصمیم‌گیری چند شاخصه، ترجیحات، بهینه‌سازی.

* نویسنده مسئول: m.niaei@yazd.ac.ir

مقدمه

در بازارهای پرنوسان امروزی شرکت‌هایی موفق خواهند بود که قدرت پاسخگویی و انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به تغییرات بازار و نیازهای مشتریان داشته باشند و بتوانند سازمان خود را با تغییرات هم‌جهت سازند (Khoshalhan & Cheraghali-Khani, 2012). برنامه‌ریزی تولید، اهرمی مناسب برای افزایش یکپارچه‌سازی دریافت و برنامه ریزی سفارشات، برآورد نیازمندی‌های مواد و منابع، کنترل و مدیریت تولید، موازنه ایستگاه‌های کاری، ایجاد سفارشات خرید و کنترل برون‌سپاری است که بدینوسیله می‌تواند به سودآوری و رقابت‌پذیری سازمان کمک نماید (Su, 2017). یکی از تکنیک‌هایی مرتبط با این حوزه، برنامه‌ریزی تولید ادغامی[1] است که در افق زمانی متوسط (از سه الی هجده ماه) انجام می‌شود. در این نوع برنامه‌ریزی تلاش بر آن است که روشی با کمترین هزینه تولید به منظور برآورده‌سازی نیازمندی‌های مشتری و پاسخگویی به تقاضاهای پرنوسان بازار در طول افق برنامه‌ریزی ایجاد گردد. این روش، رویکرد مناسبی است که تعیین‌کننده میزان تولیدات، مواد خام، موجودی تولید نهایی و سطوح نیروی کاری برای هر دوره برنامه‌ریزی با در نظرگیری داده‌های مربوط به منابع است (Gholamian et al., 2015). ورودی‌های این برنامه‌ریزی شامل: تقاضای پیش‌بینی شده، میزان موجودی‌های اولیه، ظرفیت ماشین‌آلات و امکان انعقاد قراردادهای جنبی و برون‌سپاری، میزان ساعات مجاز اضافه‌کاری و مجاز بودن کمبود یا پس‌اُفت است.

در این تحقیق مدلی چندهدفه برای برنامه‌ریزی تولید ادغامی در یک شرکت تولید ساخت تسهیلات گازرسانی طراحی و پیاده‌سازی شده است. تحقیقات منتشر شده تا کنون، کمتر به موضوع رتبه‌بندی خانواده محصولات توجه نموده‌اند که در این تحقیق نظرات مدیران ارشد سازمان در قالب یک روش تصمیم‌گیری چندشاخصه تعیین شده و در مدل برنامه ریزی تولید ادغامی لحاظ شده‌اند.

در ادامه، پس از بررسی پیشینه پژوهش و چارچوب روش تحقیق، مراحل طراحی، پیاده سازی و نتایج حاصل از اجرای مدل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

1. Aggregate production planning (APP)

پیشینه پژوهش

در این بخش مهم‌ترین تحقیقات منتشر شده در حوزه برنامه‌ریزی تولید ادغامی چندهدفه قطعی بررسی شده‌اند.

رسمی و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی تولید ادغامی عددصحیح مختلط برای تحلیل شاخص‌های محیطی، اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی ارایه داده‌اند (Rasmi et al., 2019). آنها هزینه مواد خام مورد نیاز، هزینه نیروی کار و اضافه کاری، هزینه استخدام و اخراج نیروی کار، هزینه نگهداری موجودی، هزینه کمبود موجودی و هزینه قراردادهای جانبی را در نظر گرفته‌اند. علاوه براین، سایر هزینه‌های کسب و کار مانند هزینه دی اکسید کربن تولید شده و برق مصرفی توسط عملیات تولید، نگهداری موجودی، برون‌سپاری و همچنین هزینه یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر و جایگزینی تکنولوژی‌های قدیم با جدید در مدل لحاظ شده است. در این تحقیق نقاط غیرمغلوب در فضای توابع هدف یافت شده و تبادل آنها به منظور ایجاد دیدگاه‌های مدیریتی مورد تجزیه تحلیل قرار گرفته است.

هان و برندنبرگ برنامه‌ریزی عملیات پایدار شامل وضعیت‌های تولید انتخاب چندگانه، خروجی کربن ناشی از تولید، ابعاد اجتماعی عملیات تولیدی و همچنین برنامه‌ریزی یکپارچه در سطح عملیاتی برای پیش‌بینی تصمیمات انتخاب مسیر تولید، حجم تولید و ادغام محصولات با در نظرگیری زمان‌های تحویل محصولات مختلف را مورد بررسی قرار داده‌اند (Hahn & Brandenburg, 2018). در این پژوهش یک فرایند تولید شیمیایی چند سطحی با ابعاد اجتماعی و محیطی مختلف بررسی شده است. همچنین مسیرهای مختلف انتخابی تولید محصول موجود به گونه‌ای انتخاب شده که از کل ظرفیت عملیاتی موجود استفاده شود و همزمان خروجی‌های دی اکسید کربن و ساعات کاری اضافه کار ناخواسته کاهش داده شوند. علاوه براین، وابستگی میان برنامه‌ریزی تولید عملیاتی و میان‌مدت مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل حساسیت پارامترهای هزینه‌ای و غیر هزینه‌ای در سطح برنامه‌ریزی میان مدت ارایه شده است.

گانس‌ترر چارچوب جامعی برای برنامه‌ریزی تولید ادغامی سلسله مراتبی در محیط تولیدی ساخت سفارشی برای یک شرکت تامین قطعات خودرو ارایه داده است (Gansterer,

2015). مدل عددصحیح مختلط ارایه شده براساس سطوح موجودی و خدمت‌دهی ارزیابی شده است.

خاتمی‌فیروزآبادی و همکاران مدلی برای برنامه‌ریزی تولید ادغامی مبتنی بر برنامه‌ریزی آرمانی ارایه داده‌اند. توابع هدف شامل حداکثرسازی درآمد تولید کارخانه و همچنین کمینه‌سازی هزینه‌های تولیدی و زمان تحویل سفارشات بوده‌اند (Khatami-Firoozabadi et al., 2013).

حسینی برنامه‌ریزی تولید ادغامی چند محصولی چند دوره‌ای دو هدفه شامل کمینه‌سازی هزینه‌های تولید کارخانه و هزینه‌های مربوط به نگهداری تعمیرات ارایه نموده است (Hosseini, 2020). در تابع هدف دوم میزان نارضایتی مشتریان در اثر تاخیر در تحویل به موقع محصول کمینه‌سازی شده است. با توجه به NP-hard بودن مساله، از الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب استفاده شده است.

سیلوا فیلهو و همکاران یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برنامه‌ریزی تولید ادغامی برای کسب و کارهای کوچک ارایه کرده‌اند که برای محیط ساخت برای انبارش طراحی شده است (Silva Filho et al., 2010).

جورجیادیس و همکاران مساله زمانبندی تولید با در نظرگیری مراحل تولید چندگانه منابع مشترک تسهیلات و محدودیت‌های عملیاتی یک کارخانه را مدلسازی نموده‌اند (Georgiadis et al., 2021).

مدرس و ایزدپناهی یک مدل برنامه‌ریزی تولید ادغامی سه هدفه با در نظرگیری مصرف انرژی، تقاضا و ظرفیت تولیدی برای یک کارخانه ذوب فلزات ارایه نموده‌اند. هدف کلی مساله برنامه‌ریزی خطی عددصحیح ارایه شده، کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های مصرف انرژی و هزینه کربن خروجی است (Modarres & Izadpanahi, 2016).

در مدل برنامه‌ریزی تولید ادغامی خوش‌الحان و چراغعلی‌خانی میزان تولید بهینه محصولات در دوره‌های مختلف برنامه‌ریزی به همراه بهترین زمان برای انجام عملیات نگهداری و تعمیرات ارایه شده است. نتایج آنها نشان داده است که در نظرگیری توامان دو سیستم برنامه‌ریزی تولید ادغامی و تعمیرات نگهداری به صورت همزمان منجر به کاهش هزینه‌های کارخانه می‌گردد (Khoshalhan & Cheraghali-Khani, 2012).

داسیل‌وا و همکاران مدل برنامه‌ریزی تولید ادغامی برای یک کارخانه‌ی مصالح ساختمانی ارایه داده‌اند که تعداد هر نوع کارگر، تعداد ساعات اضافه‌کاری، سطح موجودی برای هر خانواده محصول و سطوح برون‌سپاری به منظور برآورد تقاضای پیش‌بینی‌شده را برای یک دوره دوازده ماهه تعیین نموده است (da-Silva et al., 2006). در مدل آنها برای انواع مختلف کارگران سطوح مهارت خاصی تعریف شده است که مدل را به دنیای واقعی نزدیک کرده است. همچنین با توجه به اینکه قوانین برخی کشورها محدودیت‌های قابل توجهی در اخراج کارمندان به شرکت‌ها تحمیل نموده است، این محدودیت‌ها در مدل اصلی لحاظ شده‌اند.

انتظامی نیا و همکاران یک مدل ریاضی عددصحیح مختلط قطعی و چندهدفه برای برنامه‌ریزی تولید ادغامی چندمحصولی، چند دوره‌ای و چند کارخانه‌ای در قالب زنجیره تامین سبز با در نظرگیری ظرفیت بالقوه برای مکان‌های بازیافت و جمع‌آوری در طول شبکه لجستیک معکوس ارایه داده‌اند (Entezaminia et al., 2016).

چکرابورتی و هسین سیستم برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی ادغامی بلندمدت و کوتاه‌مدت ارایه کرده‌اند. آنها از الگوریتم ژنتیک چندهدفه تعاملی برای حل مساله چندهدفه چندمحصوله در افق برنامه‌ریزی تولید ادغامی بادر نظرگیری تقاضای پیش‌بینی شده و در نظرگیری هزینه‌های عملیاتی ظرفیت تولیدی کارخانه استفاده نموده‌اند (Chakrabortty & Hasin, 2013). سایر ملاحظات شامل مجموع تولید در ساعات عادی و اضافه کاری، سطح موجودی کالا، کالای برون‌سپاری‌شده و سطح سفارشات به تعویق افتاده بوده‌اند. روش ارایه شده سعی در کاهش هزینه‌های مرتبط با سطح موجودی، سطح نیروی کار در ساعات عادی و اضافه کاری، هزینه کالای برون‌سپاری شده، سطح سفارشات به تعویق افتاده، ظرفیت نیروی انسانی، ماشین آلات و انبار دارد.

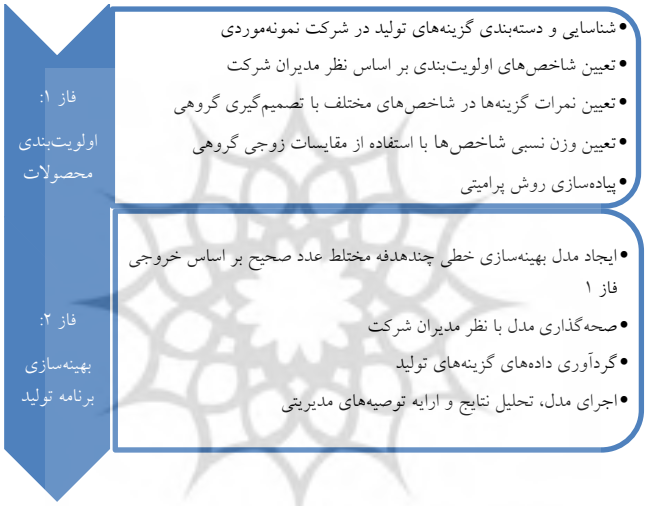
همانگونه که در تحقیقات بررسی‌شده مشخص است؛ ملاحظات متعددی در مساله برنامه‌ریزی تولید قابل بررسی هستند که حسب نیاز شرکت نمونه‌موردی این پژوهش، برخی از آنها در فرایند مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو، ضمن بهره گیری از تحقیقات پیشین، مدلی خاص‌منظوره با درنظرگیری ملاحظات موردنظر مدیریت

سازمان (مانند کمینه‌سازی موجودی نیمه‌ساخته در ایستگاه‌های کاری و اعمال ترجیحات تولیدی) طراحی، صحه‌گذاری و پیاده‌سازی شده است.

روش

تحقیق حاضر جزو تحقیقات کاربردی و توسعه‌ای است. به منظور گردآوری نظر مدیران از روش میدانی (پرسشنامه) استفاده شده است. رویکرد ارایه شده دارای دو فاز است که گام‌های هر فاز در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند.

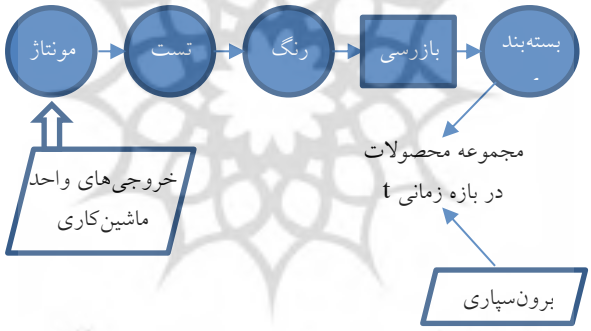
شکل ۱. چارچوب پیشنهادی



شرکت تولیدی صنعتی گازسوزان شامل چهار واحد اصلی می‌باشد که هر یک به تولید تعدادی از محصولات مرتبط با صنعت گازرسانی مشغول می‌باشد. واحد اول به تولید رگولاتور گاز خانگی و صنعتی، اتصال عایقی، فیلتر، هیتر، سپراتور، رگولاتورهای صنعتی، واحد دوم به تولید کنتورهای گاز خانگی و صنعتی و واحد سه به تولید ایستگاه‌های گاز صنعتی و واحد چهار (که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است) به تولید شیرهای گاز صنعتی در اندازه‌ها و فشارهای کاری مختلف می‌پردازد. مشتریان واحد چهارم، شرکت‌های گاز استانی، برخی از پیمانکاران صنایع گازرسانی و همچنین واحد سه شرکت گازسوزان (به عنوان مشتری داخلی) می‌باشند. شیرهای گاز صنعتی در انتقال سیال در ایستگاه‌های گاز بین‌شهری به منظور تنظیم فشار و همچنین قطع و وصل نمودن سیال در

لوله‌های خط انتقال مورد استفاده قرار می‌گیرند. کارگاه واحد چهارم، شامل دو سالن «تولید» و سالن «مونتاژ و تست» می‌باشد. سالن تولید به تولید قطعات مورد نیاز سالن مونتاژ و تست می‌پردازد. در سالن مونتاژ، پنج ایستگاه کاری وجود دارند که به ترتیب عبارتند از: ایستگاه‌های مونتاژ، تست، رنگ، بازرسی و بسته‌بندی (شکل ۲). شیرهای تولیدی از نوع فلوتینگ[1]، ترنیون[2]، شیرهای فشار قوی[3] و ... می‌باشند. هر شیر گاز صنعتی دارای سه قطعه اصلی بدنه، کلوزِر[4] و بال[5] و قطعاتی فرعی مانند پیچ، مهره و واشر است. موجودی سه قطعه اصلی در هر دوره، عاملی محدود کننده در میزان تولید هر نوع شیر می‌باشد زیرا این قطعات توسط تامین کننده تولید می‌گردند. تولید محصولات در ساعات کار عادی یا اضافه‌کاری صورت می‌پذیرد و به تازگی شرکت درصدد است که در صورت صرفه‌ی اقتصادی، بخشی از برنامه‌ی تولید را به منظور جلوگیری یا کاهش فروش از دست رفته، در قالب برون‌سپاری تامین نماید.

شکل ۲. نمای شماتیک کلی ایستگاه‌های قسمت مونتاژ – تست



پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. Floating
2. Trunnion
3. High-pressure ball valve
4. Closure
5. Ball

در این پژوهش مدلی برای برنامه‌ریزی تولید ادغامی سالن «مونتاژ و تست» به منظور بهینه سازی اهداف ذکر شده با توجه به محدودیت‌های موجود ارایه شده است. لازم به ذکر است که در شرکت، پیش‌بینی تقاضا با توجه به سوابق فروش در سال‌های گذشته و اعمال نظر مدیران ارشد در دوره‌های زمانی شش ماهه صورت پذیرفته و بر اساس آن، برنامه‌ریزی تولید نیز به صورت شش ماهه مدنظر است.

یکی از ارکان برنامه‌ریزی تولید ادغامی، انتخاب محصولی به عنوان نماینده خانواده برای انجام برنامه‌ریزی بر روی آن خانواده محصول می‌باشد. با درنظرگیری نظر مدیران شرکت که با استفاده از روش دلفی استخراج شده است؛ خانواده‌های محصولات و نماینده‌های انتخابی در هر گروه، به صورت جدول ۱ تعیین گردیده است.

جدول ۱. خانواده‌های محصولات، اعضای خانواده محصول و نماینده هر خانواده محصول

ردیف	خانواده محصول	نام محصول	نماینده
۱	گروه ۱: فلوتینگ	فلوتینگ ۲-۱۵۰	فلوتینگ ٤-۱۵۰
۲		فلوتینگ ۳-۱۵۰	
۳		فلوتینگ ٤-۱۵۰	
٤		فلوتینگ ٦-۱۵۰	
٥	گروه ۲: ترنیون	ترنیون ۲-۳۰۰	ترنیون ٤-۳۰۰
٦		ترنیون ۳-۳۰۰	
۷		ترنیون ٤-۳۰۰	
۸		ترنیون ۲-٦۰۰	
۹		ترنیون ۳-٦۰۰	
۱۰		ترنیون ٤-٦۰۰	
۱۱		ترنیون ٦-۳۰۰	
۱۲		ترنیون ٦-٦۰۰	
۱۳	گروه ۳: شیرهای فشار قوی	بال ولو استیل ۱/۲-۳۰۰۰	بال ولو استیل ۱/۲-۳۰۰۰
۱٤		بال ولو استیل ۱/۲-٦۰۰۰	
۱٥		بال ولو استیل ۱-۳۰۰۰	
۱٦		بال ولو استیل ۱-٦۰۰۰	

به منظور تعیین شاخص‌های رتبه‌بندی، ابتدا تحقیقات مختلفی مانند (Chen, 2010)، (De Figueiredo et al., 2011) و (Akçay, 2002) بررسی شده و فهرست اولیه شاخص‌ها استخراج شده و سپس با نظر مدیران قسمت‌های مختلف شرکت گازسوزان و چند مرحله اجرای روش دلفی، از مدیران ارشد درخواست شد که ضمن درج دلیل، اهمیت هریک از شاخص‌ها را با تعیین امتیازاتی بین ۱ تا ۹ با واژگان معادل «بسیار کم اهمیت» تا «بسیار مهم» مشخص کنند. سپس با حذف موارد دارای کمترین امتیاز، مجددا از مدیران درخواست شد که معیارهای باقی‌مانده را امتیازدهی نمایند. این روند طبق روش دلفی تا هفت تکرار ادامه پیدا کرد تا نقطه نظر مشترکی در مورد انتخاب شاخص‌ها برای تولید محصولات حاصل شد. در پایان این تکرارها، معیارهای زیر برای اندازه‌گیری مطلوبیت تولید هر خانواده از محصول انتخاب شدند:

- کم بودن زمان استاندارد تولیدی
- سهولت در ماشین‌کاری قطعات
- سهولت در مونتاژ
- میزان مصرف انرژی
- تعداد مرجوعی‌های ایستگاه تست
- وجود گواهینامه‌های استاندارد کیفی
- سهولت تامین مواد اولیه از تامین‌کنندگان
- تقاضای سالانه

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پس از مشخص شدن شاخص‌های مختلف در گام قبلی، در قالب پرسش‌نامه‌های جداگانه از مدیران ارشد خواسته شد که با انجام مقایسات زوجی، نسبت به تعیین نمرات نسبی هر خانواده محصول اقدام نمایند و با استفاده از روش تصمیم‌گیری گروهی[1] وزنی (به صورت میانگین هندسی وزن‌دار)، نمره تلفیقی خانواده i در شاخص k یعنی A_{ik} با استفاده از نمره‌ی تعیین شده توسط هر خبره‌ی r یعنی a_{ik}^{r} و با اعمال وزن خبره یعنی w^{r} توسط رابطه (۱) به دست آمد (Saaty, 1989):

$$A_{ik} = \prod_{r} (a_{ik}^{r})^{w^{r}} \qquad (۱)$$

شایان ذکر است که مجموع وزن‌های در نظر گرفته شده برای خبرگان برابر با ۱ یعنی $\sum_r w^r = 1$ خواهد بود. نمرات تلفیق شده خبرگان در جدول ۲ ارایه شده است.

در ادامه با استفاده از پرسش‌نامه های جداگانه از مدیران ارشد خواسته شد که با انجام مقایسات زوجی، نسبت به تعیین وزن نسبی شاخص‌ها نیز اقدام نمایند و در انتها با اعمال مجدد رابطه (۱)، وزن نسبی شاخص‌ها در قالب جدول ۳ حاصل شد.

جدول ۲. نتایج تلفیق نظر خبرگان در خصوص خانواده محصولات در شاخص‌های مختلف

	کم بودن زمان استاندارد تولیدی	سهولت در ماشین کاری قطعات	سهولت در مونتاژ	ملاحضات ارزی	مرجوعی های ایستگاه تست	وجود گواهینامه‌های استاندارد کیفی	تامین مواد اولیه از تامین کنندگان	تقاضای سالانه
امتیاز خانواده محصول ۱	۰/۵۹	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۵۹	۰/۶۶	۰/۷۰	۰/۵۹	۰/۷۰
امتیاز خانواده محصول ۲	۰/۴۰	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۲۹	۰/۴۳	۰/۳۹	۰/۴۳	۰/۴۳
امتیاز خانواده محصول ۳	۰/۸۱	۰/۹۲	۰/۸۸	۰/۸۱	۰/۴۳	۰/۱۴	۰/۷۰	۰/۸۹

1. Group decision making

جدول۳. نظر خبرگان در خصوص وزن‌دهی نسبی به شاخص‌ها

کم بودن زمان استاندارد تولیدی	سهولت در ماشین کاری قطعات	سهولت در مونتاژ	ملاحضات ارزی	مرجوعی‌های ایستگاه تست	وجود گواهینامه‌های استاندارد کیفی	تامین مواد اولیه از تامین کنندگان	تقاضای سالانه
۰/۱۷۳۲	۰/۱۲۱۳	۰/۱۸۲۶	۰/۱۷۳۵	۰/۱۴۱۹	۰/۰۵۳۸	۰/۱۲۶۴	۰/۰۲۷۳

تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره دامنه وسیعی از از تکنیک‌ها را شامل می‌شوند که در زمینه‌های متعددی قابل استفاده هستند. در میان روش‌های موجود، هر یک مزیت‌های خاص خود را داشته و انتخاب روش حل، به طبیعت مساله تحت مطالعه بستگی دارد. روش پرامیتی[1] یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه بوده و در گروه روش‌های غلبه نسبی[2] قرار می‌گیرد. این گروه از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه برای مصارفی که شاخص‌ها دارای بُعد و ماهیت متفاوت باشند؛ بسیار مفید است (Oubahman & Duleba, 2021) و از آنجایی که شاخص‌های مورد بررسی در این پژوهش هم این ویژگی را دارند؛ از یکی از روش‌های این گروه یعنی PROMETHEE II استفاده شده است. اولین مزیت استفاده از این روش، کاربرپسند بودن آن است و مزیت دیگر آن، در کامل بودن رتبه‌بندی‌های حاصل از آن است. مزیت‌های اصلی خانواده روش‌های پرامیتی در قالب موارد زیر مطرح شده‌اند (Oubahman & Duleba, 2021):

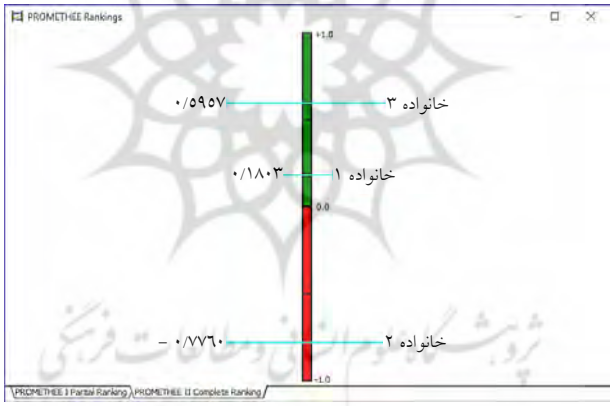
- عدم لزوم مستقل بودن شاخص‌ها
- قدرت ارزیابی معیارهای کمی و کیفی
- تقویت ساختار ارجحیت‌های تصمیم‌گیرنده شامل توابع ترجیحات مختلف
- تقویت رابطه تسلط بین گزینه‌ها برای هر معیار
- تصمیم‌گیری در مورد اولویت گزینه‌ها پس از تصمیم‌گیری در خصوص رتبه‌بندی کامل یا جزئی

1. Preference ranking organization method for enrichment of evaluations (PROMETHEE)
2. Outranking

برای تعیین اولویت‌ها، ماتریس تصمیم‌گیری و وزن‌ها در نرم‌افزار Visual PROMETHEE درج شده و امتیاز نهایی هر خانواده محصول بصورت شکل ۳ بدست آمده‌اند.

همانگونه که پیشتر نیز بیان شد؛ مقادیر شاخص‌ها توسط خبرگان و به صورت طیف ۵ گزینه‌ای یا دو گزینه‌ای (صفر و یک) مقداردهی شده‌اند و چون مقادیر آنها ماهیت گسسته دارد؛ اختلاف ارزشی گزینه‌ها قابل سنجش نیست و در نتیجه تابع ترجیح Usual برای این موارد مناسب می‌باشد (Ilangkumaran et al., 2013). با توجه به خروجی حاصل از این روش (شکل ۳)، گروه محصولات ۳ (شیرهای فشار قوی) بیشترین مطلوبیت را داشته‌اند.

شکل ۳. نمرات نهایی خانواده محصولات با استفاده از پرامیتی ۲



مدل پیشنهادی در این مقاله، توسعه‌ای بر مدل ارایه شده توسط (Gansterer, 2015) است که برخی ایده‌های جدید به آن اضافه شده است. از جمله نوآوری‌های مدل در مقایسه با مدل مورد اشاره، ترجیحات تولیدی خانواده‌های محصول است که توسط روش پرامیتی تعیین شده و به مدل بهینه‌سازی خورانده می‌شود. همچنین در تابع هدف مساله گانس‌ترر تنها هزینه سفارش به تعویق افتاده و موجودی بررسی شده است اما در توابع هدف مساله حاضر، کمینه‌سازی کالای نیمه‌ساخته و بیشینه‌سازی سود نیز مطرح شده است.

همچنین متغیرهای به کار رفته در مدل پیشنهادی مانند مقدار محصول میانی/ نهایی در ساعات عادی و اضافه کار به صورت دقیق‌تر و مطابق با نیاز برنامه‌ریزی تولید شرکت مطالعه موردی تعریف شده‌اند.

پیش از توضیح مدل و نشانه‌های به‌کار رفته در آن، مهم‌ترین مفروضات در نظر گرفته شده در آن به قرار زیر بیان می‌گردند:

- به منظور ذخیره‌سازی محصولات میانی در ایستگاه‌های کاری، محدودیتی وجود ندارد.
- برای کاهش کمبود، امکان اضافه‌کاری و همچنین برون‌سپاری وجود دارد.
- در مواجهه با کمبود، به صورت تولید به‌موقع[1] برخورد شده است یعنی در صورت رخداد کمبود، سفارش از دست رفته و امکان تحویل با تاخیر وجود ندارد.
- محصولات معیوب هر ایستگاه به انبار ضایعات منتقل می‌شوند و با قیمت مشخص برای هر نوع محصول به فروش رسانده می‌شوند.
- خروجی هر یک از ایستگاه‌ها بلافاصله به ایستگاه بعد منتقل نمی‌شود بلکه این انتقال در ابتدای بازه زمانی بعدی صورت می‌گیرد.

علائم و نشانه‌های به‌کار رفته در مدل به قرار زیر بوده‌اند که به منظور تفکیک بهتر، اندیس ها و متغیرها با حروف کوچک و پارامترها (داده‌ها) با حروف بزرگ نمایش داده شده‌اند:

اندیس‌ها:

i	خانواده محصولات (۱ الی ۳)
j	ایستگاه‌های کاری (۱: مونتاژ، ۲: تست، ۳: رنگ، ۴: بازرسی، ۵: بسته بندی)
t	دوره‌های زمانی برنامه‌ریزی (۱ الی ۶)

پارامترها:

M	عددی بزرگ
STK_i	میزان موجودی محصول نهایی i در انبار در ابتدای دوره زمانی اول
$WTK_{i,j}$	میزان موجودی محصول نیمه ساخته i در ایستگاه jدر ابتدای دوره زمانی اول
$CAP_{j,t}$	ظرفیت زمانی ایستگاه j در دوره t در ساعات عادی
$CAP'_{j,t}$	ظرفیت زمانی ایستگاه j در دوره t در ساعات اضافه‌کاری

1. Just in time (JIT)

$OCAP$ سقف مجاز میزان برون‌سپاری در هر دوره

$PT_{i,j}$ میزان زمان لازم برای پردازش محصول میانی/ نهایی i در ایستگاه j

$D_{i,t}$ میزان تقاضای پیش‌بینی شده برای محصول نهایی i در دوره t

B_i قیمت فروش هر واحد محصول نهایی i

SV_i قیمت فروش هر واحد محصول محصول معیوب i

FC_t میزان کل هزینه‌های ثابت در دوره زمانی t

MC_i قیمت هر واحد محصول نیمه‌ساخته i وارد شده به سیستم

OT_j میزان کل هزینه هرساعت عادی در ایستگاه j

OT'_j میزان کل هزینه هرساعت اضافه‌کاری در ایستگاه j

UC_i میزان کل هزینه برون سپاری هر واحد محصول نهایی i

H_i هزینه نگهداری هر واحد محصول نهایی i

CB_i هزینه تبعات غیرمستقیم فروش از دست رفته هر واحد محصول نهایی i

F_i وزن نهایی ارجحیت محصول i حاصل از روش پرامیتی

BDi ظرفیت تامین کننده برای تحویل بدنه محصولات خانواده i

CLi ظرفیت تامین کننده برای تحویل کلوژر محصولات خانواده i

BLi ظرفیت تامین کننده برای تحویل بال محصولات خانواده i

$HC_{i,j}$ هزینه نگهداری هر واحد محصول میانی i در ایستگاه j

$WR_{i,j}$ نرخ تولید معیوب محصول میانی/ نهایی i در ایستگاه j در ساعات عادی

$WR'_{i,j}$ نرخ تولید معیوب محصول میانی/ نهایی i در ایستگاه j درساعات اضافه‌کاری

متغیرهای تصمیم:

$inp_{i,t}$ مقدار محصول اولیه i خریداری شده دوره t

$x_{i,j,t}$ مقدار محصول میانی/ نهایی i تولید شده در ایستگاه j طی دوره t در ساعات عادی

$x'_{i,j,t}$ مقدار محصول میانی/ نهایی i تولید شده در ایستگاه j طی دوره t در ساعات اضافه‌کاری

$v_{i,j,t}$ مقدار محصول معیوب i تولید شده در ایستگاه j طی دوره t

$s_{i,t}$ مقدار مازاد تولید محصول نهایی i انتهای دوره t که به انبار ارسال خواهد شد

$l_{i,t}$ مقدار فروش از دست رفته محصول نهایی i در انتهای دوره t که با توجه به مفروضات مدل، امکان جبران در دوره بعد را نداشته است.

u_{it} مقدار محصول نهایی i برون‌سپاری‌شده در دوره t

$wip_{i,j,t}$ مقدار موجودی نیمه‌ساخته از محصول میانی i در ایستگاه jدر ابتدای دوره t که ایستگاه قبلی در اختیار ایستگاه jقرار داده است.

با استفاده از علائم و نشانه‌های تعریف شده، جریان تولید نمایش داده شده شکل ۲، در قالب روابط (۲) تا (۱۷) مدلسازی شده‌اند.

رابطه (۲)، تابع هدف سود را با جزییات زیر مدل‌سازی می‌نماید:

سود کل = مجموع درآمدهای فروش – هزینه تبعات فروش از دست رفته – هزینه‌های نگهداری – مجموع هزینه‌های مواد اولیه و ماشین کاری در ساعات عادی و اضافه کاری – هزینه ساعات اضافه کاری – هزینه برون‌سپاری – هزینه‌های ثابت

$$\begin{aligned}\text{Max } z_1 = {} & \sum_i B_i \left(\sum_t D_{i.t} - l_{i,t} \right) + \sum_i \sum_j \sum_t SV_i \, v_{i.j.t} \\ & - \sum_i CB_i \left(\sum_t l_{i.t} \right) - \sum_i H_i \left(\sum_t s_{i.t} \right) \\ & - \sum_i MC_i \left(\sum_t inp_{i,,t} \right) \\ & - \sum_j OT_j \left(\sum_i PT_{i.j} \left(\sum_t x_{i.j.t} \right) \right) \\ & - \sum_j OT'_j \left(\sum_i PT_{i.j} \left(\sum_t x'_{i.j.t} \right) \right) - \sum_i \sum_t u_{i.t} UC_i \\ & - \sum_t FC_t - \sum_i \sum_j \sum_t HC_{i,j} \left(wip_{i,j,t} - x_{i.j.t} - x'_{i.j.t} \right)\end{aligned} \qquad (۲)$$

تابع هدف دوم، مجموع کل امتیاز ترجیحات را برای تمامی محصولات (میزان تولید در ساعات عادی و اضافه کاری و میزان محصولات تامین شده از مجرای برون سپاری[1]) بیشینه سازی می‌نماید.

$$\text{Max } z_2 = \sum_i \sum_t F_i \left(x_{i.5.t} + x'_{i.5.t} - v_{i,5,t} + u_{i.t} \right) \qquad (۳)$$

1. Outsourcing

تابع هدف سوم نیز به دنبال کاهش کل کالاهای نیمه‌ساخته در ایستگاه‌ها می‌باشد.

$$\text{Min } z_3 = \sum_i \sum_j \sum_t wip_{i,j,t} - x_{i.j.t} - x'_{i.j.t} \qquad (۴)$$

دو رابطه (۵) و (۶) مقدار محصولات معیوب را به صورت عددی صحیح محاسبه می‌کنند. از آنجایی که حاصلضرب نرخ تولید محصول معیوب در مقدار محصول تولید شده در ساعات عادی و اضافه‌کاری الزاما عددی صحیح نمی‌شود؛ استفاده از علامت مساوی برای این رابطه منجر به نشدنی بودن این مقدار خواهد شد. به عنوان مثال اگر نرخ تولید کالای معیوب در ساعت اضافه کاری ۰/۲ و در ساعت عادی ۰/۱۵ باشد و تعداد تولید در ساعات اضافه کاری و عادی به ترتیب ۲۶ و ۳۵ باشد؛ در نتیجه تعداد محصول میعوب بدون استفاده از این دو محدودیت برابر با ۱۰/۴۵ می‌شد که متغیر صحیح $v_{i.j.t}$ نمی‌تواند مساوی با این مقدار بشود. برای رفع این مشکل، با استفاده از دو محدودیت (۵) و (۶)، الزام می‌کنیم که متغیر صحیح $v_{i.j.t}$ بین ۹/۹۵ و ۱۰/۹۵ قرار گیرد که مقدار ۱۰ را به خود خواهد گرفت.

$$v_{i.j.t} \geq WR_{i,j}\, x_{i.5.1} + WR'_{i,j}\, x'_{i.j.1} - 0.5 \qquad (۵)$$
$$\forall i,j,t$$

$$v_{i.j.t} \leq WR_{i,j}\, x_{i.j.1} + WR'_{i,j}\, x'_{i.j.1} + 0.5 \qquad (۶)$$
$$\forall i,j,t$$

در بازه زمانی اول، مجموع محصول نهایی تولیدی ($x_{i.5.1} + x'_{i.5.1}$)، برون‌سپاری شده ($u_{i.1}$)، تامین‌شده از انبار (STK_i) و از دست رفته ($l_{i.1}$) بایستی حداقل به اندازه تقاضا باشد:

$$x_{i.5.1} + x'_{i.5.1} - v_{i.5.1} + u_{i.1} + STK_i - D_{i.1} = s_{i.1} - l_{i.1} \qquad (۷)$$
$$\forall i$$

برای بازه‌های زمانی دوم به بعد، مجموع محصول نهایی تولیدی، برون‌سپاری شده و از دست رفته بایستی تقاضا را تامین نماید و مقدار مازاد بر تقاضا ($s_{i,t}$) به انبار ارسال می‌شود:

$$x_{i.5.t} + x'_{i.5.t} - v_{i.5.t} + u_{i.t} + s_{i.t-1} - D_{i.t} = s_{i.t} - l_{i.t} \qquad (۸)$$
$$\forall i.t > 1$$

شایان ذکر است؛ با توجه به اینکه این دو متغیر $s_{i.t}$ و $l_{i.t}$ در محدودیت‌های مدل با علامت قرینه یکدیگر حضور دارند؛ در ماتریس ضرایب مدل وابسته خطی هستند و بنابراین نمی توانند همزمان در پایه قرار گیرند. این بدان معنی است که این دو متغیر

نمی‌توانند همزمان مقادیر بزرگتر از صفر داشته باشند که در دنیای واقعی نیز به همین گونه است یعنی همزمان مازاد تولید و فروش از دست رفته رخ نخواهند داد.

در هر ایستگاه کاری، میزان تولید در ساعات عادی و اضافه‌کاری تنها به اندازه‌ی کالای نیمه‌ساخته موجود در آن (که ایستگاه قبلی به آن تحویل داده است) مقدور خواهد بود. این موضوع توسط رابطه زیر تضمین می‌شود:

$$x_{i.j.t} + x'_{i.j.t} \leq wip_{\ i.j.t} \qquad (۹)$$
$$\forall i.j.t$$

البته لازم به ذکر است که مقدار کالای نیمه‌ساخته موجود در هر ایستگاه، برابر است با میزان مصرف نشده از کالای نیمه‌ساخته دوره زمانی قبل همین ایستگاه ($wip_{\ i,j,t-1} - x_{i.j.t-1} - x'_{i.j.t-1}$) به اضافه تولیدات ایستگاه قبلی در بازه زمانی قبل که غیرمعیوب بوده‌اند ($x_{i,j-1,t-1} + x'_{i,j-1,t-1}$). این موضوع توسط محدودیت زیر تامین می‌شود:

$$wip_{\ i,j,t} = wip_{\ i,j,t-1} - x_{i,j,t-1} - x'_{i,j,t-1} + x_{i,j-1,t-1} + x'_{i,j-1,t-1} - v_{i,j-1,t-1} \qquad (۱۰)$$
$$\forall i, \forall j > 1, \forall t > 1$$

که رابطه (۱۰) برای ایستگاه اول به صورت زیر متفاوت شده است:

$$wip_{\ i,1,1} = WTK_{\ i,1} + inp_{i,1} \qquad (۱۱)$$
$$\forall i$$

$$wip_{\ i,1,t} = \left(wip_{\ i,1,t-1} - x_{i,1,t-1} - x'_{i,1,t-1}\right) + inp_{i,,t} \qquad (۱۲)$$
$$\forall i, \forall t > 1$$

در هر ایستگاه در اولین بازه زمانی، به میزان مشخصی ($WTK_{\ i.j}$) کالای نیمه ساخته وجود دارد:

$$wip_{\ i.j.1} = WTK_{\ i,j} \qquad (۱۳)$$
$$\forall i, j > 1$$

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

به طور خاص، در ایستگاه مونتاژ حداکثر میزان تولید در هر دوره، به اندازه حداقل موجودی از سه قطعه اصلی مورد نیاز است که توسط تامین کننده مهیا می‌شود. البته لازم به ذکر است که برای تولید هر شیر صنعتی از خانواده محصول ۱، یک عدد کلوژر به کار می‌رود و برای خانواده‌های محصول ۲ و ۳، دو عدد کلوژر لازم است لذا این محدودیت برای این دو گروه، جداگانه نوشته شده است:

$$x_{1.1.t} + x'_{1.1.t} \leq \min(BL_1.BD_1.CL_1) \qquad \forall t \quad (۱۴)$$

$$x_{i.1.t} + x'_{i.1.t} \leq \min\left(BL_i.BD_i.\frac{CL_i}{2}\right) \qquad (۱۵)$$
$$\forall t, i \in \{2.3\}$$

دو رابطه زیر، سقف ساعات کاری عادی و اضافه‌کاری در هر ایستگاه کاری را تضمین می‌کنند:

$$\sum_i x_{i.j.t} PT_{i.j} \leq CAP_{j.t} \qquad (۱۶)$$
$$\forall j.t$$

$$\sum_i x'_{i.j.t} PT_{i.j} \leq CAP'_{j.t} \qquad (۱۷)$$
$$\forall j.t$$

رابطه زیر نیز، سقف مجاز میزان برون‌سپاری را برای تمامی دوره‌ها تضمین می‌کند:

$$u_{i.t} \leq OCAP \qquad (۱۸)$$
$$\forall i.t$$

داده‌های مورد نیاز مدل، تا حد امکان با استفاده از اسناد حسابداری شرکت گردآوری شد و در برخی از موارد نیز با روش دلفی توسط نظر مدیران سازمان برآورد گردیده‌اند. به منظور سهولت استفاده در دوره‌های آتی، داده‌ها در قالب فایل‌های اکسل ذخیره‌سازی و نرم‌افزار **GAMS** به این فایل‌ها متصل شده است که با استفاده از حل کننده‌ی **CPLEX** مدل را اجرا می‌نماید.

یافته‌ها

به منظور حل مدل بهینه‌سازی چند هدفه طراحی شده، از روش محدودیت حدی تقویت‌شده[1] استفاده شده است. در این روش، یکی از توابع هدف بهینه‌سازی می‌شود و سایر توابع هدف در قالب محدودیت‌هایی به محدودیت‌های مساله اصلی اضافه می‌شوند و

1. Augmented ε-constraint method

با تغیر پارامتری به نام آلفا، مقدارگیری توابع هدف بیان شده در محدودیت‌های جدید کنترل می‌شود. به منظور کنترل مقدارگیری هر تابع هدف، لازم است که محدوده مقدارگیری هر تابع هدف به صورت جداگانه محاسبه شود که این مقادیر در جدولی به نام جدول تبادل[1] درج می‌شوند. خوانندگان محترم به منظور توضیحات بیشتر درباره این روش به (Mavrotas, 2009) ارجاع داده می‌شوند.

برای این منظور، ابتدا مدل به صورت جداگانه با تمرکز بر هریک از توابع هدف، اجرا شد و مقادیر سه تابع هدف در این سه اجرا، در قالب جدول تبادل زیر به دست آمد:

جدول ٤. تبادل توابع هدف

تمرکز بهینه سازی	مقدار تابع هدف		
	z_1	z_2	z_3
تمرکز بر z_1	**۱۰,۰۵۰,۰۰۰,۰۰۰**	۱,۲۱۴,۴۰۰	۳۷,۸۳۰
تمرکز بر z_2	-۱,۴۶۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	**۱,۷۹۲,۳۰۰**	۱۳۳,۸۰۰
تمرکز بر z_3	-۱۰۵,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۷۳۹,۴۹۰	**۳۲,۴۲۰**

توضیح: مقادیر بهینه در هر ستون بصورت پررنگ نمایش داده شده‌اند و طبیعتا مربوط به سطری هستند که تمرکز بهینه‌سازی بر متغیر آن ستون بوده است.

در گام بعد، با قراردهی یکی از توابع هدف به عنوان تمرکز بهینه‌سازی (در اینجا z_1) و قراردهی سایر توابع به عنوان محدودیت و تغییر مقدار آلفا در روش محدودیت حدی، مرز کارای جواب‌ها[2] در قالب جدول ۵ و شکل ۴ بدست آمد.

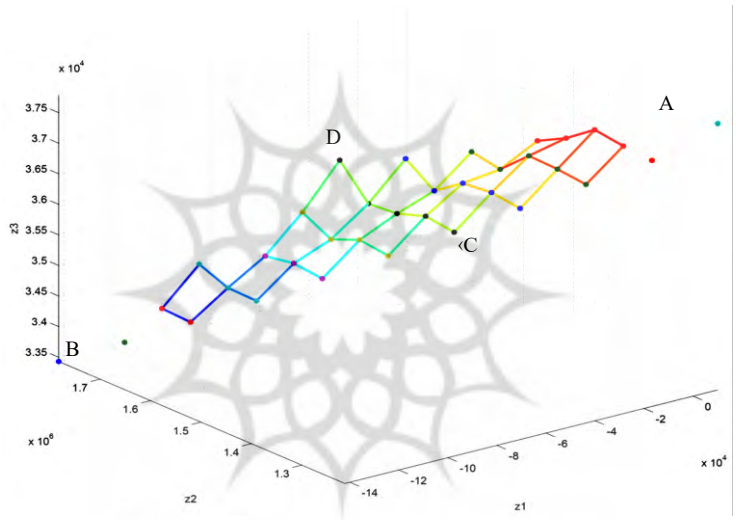
جدول ۵. جواب‌های کارای سه تابع هدف مساله با تغییر مقادیر آلفا

ردیف	مقدار آلفا	z_1	z_2	z_3
۱	۰	1.01E+10	1.21E+06	3.81E+04
۲	۰/۱	1.01E+10	1.21E+06	3.77E+04
۳	۰/۲	1.01E+10	1.21E+06	3.76E+04
٤	۰/۳	1.01E+10	1.21E+06	3.76E+04
٥	۰/٤	1.01E+10	1.21E+06	3.76E+04

1. Payoff table
2. Pareto-optimal frontier

ردیف	مقدار آلفا	z_1	z_2	z_3
٦	۰/۵	9.54E+09	1.27E+06	3.76E+04
۷	۰/٦	8.41E+09	1.37E+06	3.76E+04
۸	۰/۷	7.19E+09	1.48E+06	3.70E+04
۹	۰/۸	-1.36E+10	1.58E+06	3.69E+04
۱۰	۰/۹	-4.18E+10	1.69E+06	3.68E+04
۱۱	۱	-1.42E+11	1.78E+06	3.34E+04

شکل ٤. نمایش گرافیکی جواب‌های کارای مساله



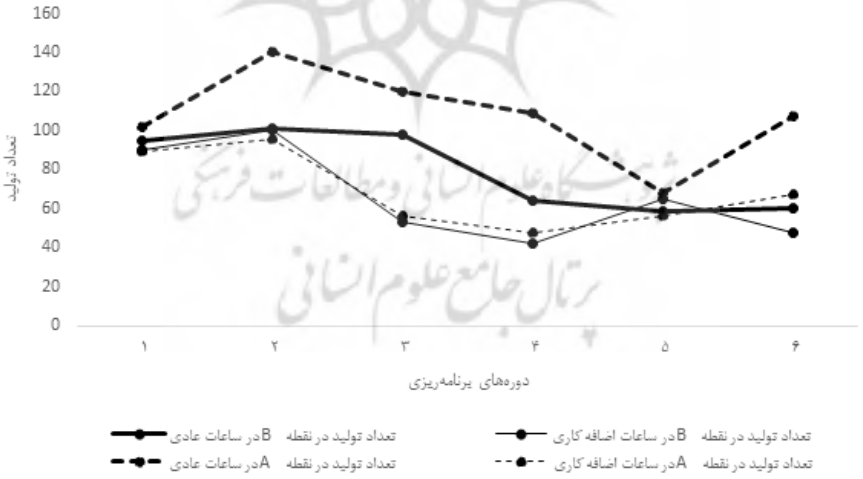
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

شکل ۴ به تصمیم‌گیرنده کمک می‌نماید تا با درنظرگیری اولویت‌های خود در خصوص توابع هدف‌های مختلف، نقطه‌ی مشخصی را به عنوان جواب بهینه انتخاب نماید. به عنوان مثال، اگر تمرکز وی کاملا بر تابع هدف اول باشد؛ جواب‌های مرتبط با نقطه‌ی A(معادل با ردیف اول در جدول ۵) برای وی توصیه خواهد شد که بیشترین سود کل و بدترین مقادیر دو تابع هدف دیگر را به دست می‌دهد.

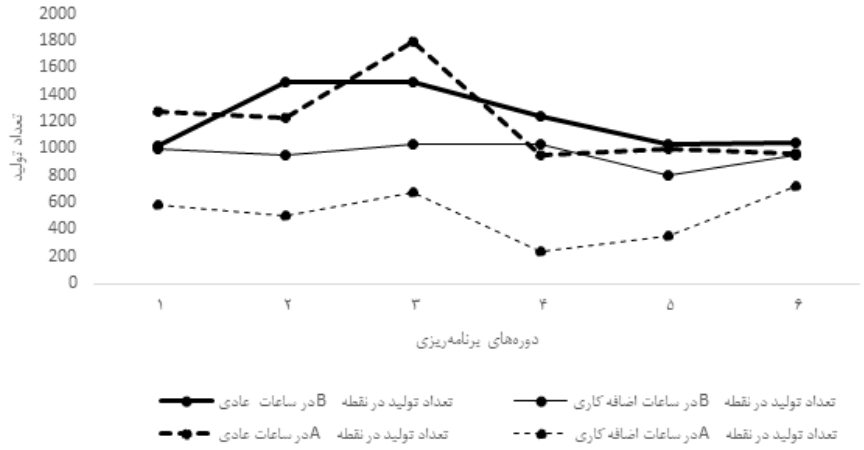
نقطه‌ی B به صورت همزمان بیشترین (مطلوب‌ترین) مقدار تابع هدف دوم و کمترین (مطلوب‌ترین) مقدار تابع هدف سوم را در اختیار می‌گذارد اما بدترین سود (ضرر ۱۴۲ میلیاردی) را نیز ایجاد خواهد نمود (معادل با ردیف آخر در جدول ۵).

سایر نقاط مانند C و D نیز به تصمیم‌گیرنده این اختیار را می‌دهند که با توجه به ترجیحات خود، بهترین جواب‌ها را برای متغیرهای تصمیم مدل انتخاب کند. به عنوان مثال، شکل‌های ۵ و ۶ و ۷ جواب بهینه متناظر با نقاط A و B را نمایش می‌دهد که ترکیب بهینه تولید خانواده‌های محصول را به دست می‌دهد.

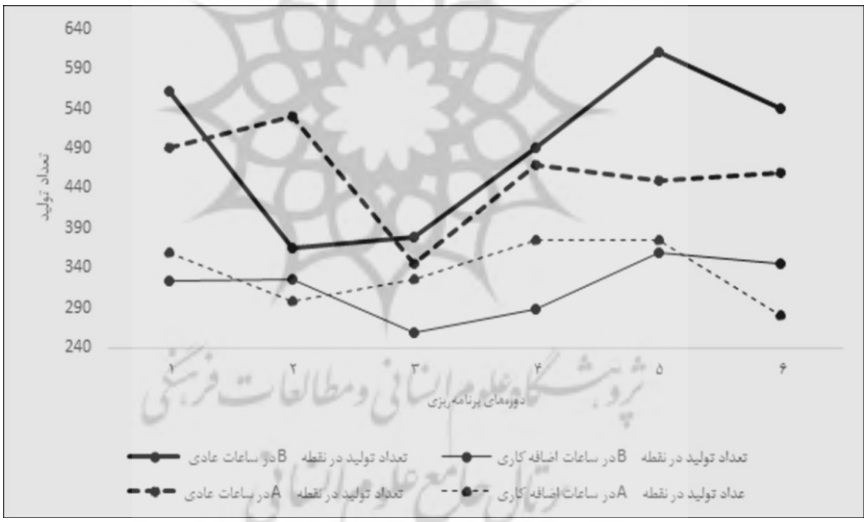
شکل ۵. تولید خانواده محصول شیرگاز ترنیون در ساعات عادی و اضافه‌کاری در دو نقطه A و B



شکل ٦. تولید خانواده محصول شیر فشارقوی در ساعات عادی و اضافه‌کاری در دو نقطه A و B



شکل ۷. تولید خانواده محصول شیر فلوتینگ در ساعات عادی و اضافه کاری در دو نقطه A و B



همانگونه که از شکل‌های ۵ تا ۷ مشخص است؛ در هر دو نقطه A و B تعداد تولید در ساعات اضافه کار کمتر از ساعات عادی است زیرا تولید در زمان اضافه‌کاری با هزینه بیشتری همراه است. بین تغییرات توابع در جدول ۵ با تعداد تولید در خانواده محصولات نیز ارتباط منطقی وجود دارد. چنانچه از نمودارها مشخص است تعداد شیرهای خانواده

فلوتینگ و خانواده محصول شیرهای فشار قوی در نقطه B در تمامی دوره‌ها تقریبا بیشتر از نقطه A است. اما تعداد شیر گاز تولیدی از خانواده ترنیون در نقطه B تقریبا در تمامی دوره‌ها کمتر از نقطه A است. بنابراین با توجه به اینکه خانواده محصول شیر فشارقوی و فلوتینگ در روش پرامیتی به ترتیب دارای بیشترین میزان اهمیت تولید بوده‌اند؛ در نقطه B بیشترین میزان مطلوبیت و در نقطه A کمترین میزان مطلوبیت طبق جدول ۵ به دست آمده است. از طرف دیگر با توجه به اینکه سود حاصل از فروش خانواده محصولات ترنیون به جهت پیچیدگی بیشتر محصولات این خانواده بیشتر از خانواده فلوتینگ و شیرهای فشار قوی می‌باشد؛ با توجه به زیاد بودن تعداد شیرهای ترنیون در نقطه A نسبت به نقطه B طبق جدول ۵ بیشترین سود مربوط به نقطه A بوده است.

با توجه به اینکه مدل توسعه داده شده برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط خطی[1] بوده است؛ با استفاده از حل‌کننده‌ی GAMS CPLEX حل شده و میزان خطای مجاز صفر درصد تعیین گردید که جواب‌های بهینه را به دست داده است و لذا اعتبارسنجی[2] جواب‌های حاصل مورد تایید است.

در راستای صحه‌گذاری[3] مدل، مقادیر تولید واقعی در ساعات عادی و اضافه‌کاری همان بازه زمانی از شرکت اخذ و در قالب محدودیت‌های جدیدی به مدل تحمیل شد تا متغیرهای x و x' این مقادیر را اخذ نمایند. جواب‌های حاصل در این وضعیت با تمرکز بر سه تابع هدف به صورت جداگانه به دست آمد که در جدول ۶ مقایسه شده‌اند.

جدول ٦. مقایسه جواب تجربی با جواب‌های مدل

تابع هدف	جواب مدل پیشنهادی	جواب تجربی	درصد بهبود توسط مدل
سود کل	10,050,000,000	7,539,100,000	۳۳٪
ترجیحات تولیدی	1,792,300	1,400,600	۲۸٪
کالاهای نیمه‌ساخته	32,420	72,910	۵۶٪

1. Mixed-integer linear programming (MILP)
2. Validation
3. Verification

همانگونه که در جدول ۶ مشخص است؛ مدل توانسته است بهبودهای قابل توجهی در هر یک از توابع هدف ایجاد کند که موید درستی عملکرد کلی آن است. این موضوع به اطلاع خبرگان نیز رسانده شد تا صحت مدل مورد تایید ایشان نیز قرار گیرد.

با کسب نظر از مدیریت سازمان، تحلیل حساسیت روی دو پارامتر هزینه برونسپاری (UC_i) و هزینه تبعات فروش از دست (CB_i) رفته انجام شده است. برای این منظور، مشابه با (Fallahi et al., 2021)، (Chizari et al., 2018) و (Tsai, & Lu, 2018) در اجراهای مختلف مدل، سه سناریوی مقادیر فعلی، ۳۰ درصد کاهش و ۳۰ درصد افزایش برای این دو پارامتر اعمال شد که نتایج (قدر مطلق درصد تغییر در سه تابع هدف) به شرح جدول زیر به دست آمد.

جدول ۷. تحلیل حساسیت

سناریو	قدر مطلق درصد تغییر		
	z_1	z_2	z_3
افزایش ۳۰ درصدی UC_i	۸۴٪	۰٪	۵٪
کاهش ۳۰ درصدی UC_i	۸۵٪	۰٪	۱٪
افزایش ۳۰ درصدی CB_i	۸۱٪	۰٪	۱٪
کاهش ۳۰ درصدی CB_i	۸۰٪	۰٪	۰٪

این تحلیل نشان می‌دهد که تابع هدف اول نسبت به هر دو پارامتر مورد بررسی به شدت حساس است و ۳۰ درصد تغییر در هریک، تقریبا ۸۰ درصد تغییر در این تابع هدف را به دنبال داشته است.

تابع هدف دوم هیچ حساسیتی نسبت به این پارامترها ندارد و تابع هدف سوم حساسیت اندکی را نسبت به آنها نشان می‌دهد.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، ضمن بررسی ویژگی‌های خاص و ملاحظات لازم برای یک واحد تولید کننده شیرهای گاز صنعتی، مدل خاص‌منظوره‌ای به صورت چندهدفه توسعه داده شده است که در خلال فرایند طراحی مدل، از منظر اعمال ملاحظات مدیریتی و همچنین پس از اجرای آن، از منظر منطقی بودن جواب‌ها توسط خبرگان شرکت مذکور بررسی و پس از انجام اصلاحات لازم و رفع نواقص، صحه‌گذاری گردیده است.

مدل توسعه داده شده، علاوه بر درنظرگیری ملاحظات درآمدی و هزینه‌ای مرسوم در مدل های برنامه‌ریزی تولید ادغامی، ترجیحات مدیریت ارشد شرکت را نیز از منظر ۸ شاخص مختلف بررسی نموده و با استفاده از یکی از رویکردهای مناسب تصمیم‌گیری چندشاخصه، اولویت‌های تولیدی را نیز در مساله برنامه‌ریزی تولید وارد نموده است. از آنجایی که سیستم تولید در کارخانه مورد نظر تولید برای انبارش می‌باشد و همسویی با استراتژی‌های سازمان یکی از ملاحظات مدیریتی بوده است؛ تابع هدف دوم در مدل درج شده است که تلاش می‌نماید با درنظرگیری ترجیحات تولید با توجه به هدف شرکت، محصولات دارای ارجحیت بیشتر را به مقدار بیشتری تولید نماید تا سمت و سوی تولید تنها بر اساس هزینه‌ها شکل داده نشود. تابع هدف سوم نیز بر کمینه‌سازی موجودی‌های نیمه‌ساخته متمرکز است که یکی از انتظارات مدیریت ارشد شرکت از تیم مدل‌سازی بوده است چرا که باعث کاهش سرمایه‌های درگیر در تولید خواهد شد که در وضعیت جاری اقتصادی بسیار اهمیت داشته است.

برای حل مدل توسعه داده شده، از روش محدودیت حدی تقویت‌شده استفاده شده است که یکی از روش‌های حل مسایل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه بوده و قادر است در تعامل با تصمیم گیرنده، ترجیحات او را در انتخاب جواب نهایی درنظر بگیرد. خروجی این روش، به جای یک جواب، مجموعه‌ای از جواب‌های کارا خواهد بود که تصمیم‌گیرنده را قادر خواهد ساخت تا با درنظرگیری اولویت‌های خود در خصوص توابع هدف مختلف و درنظرگیری شرایط حاکم بر سازمان در هر دوره‌ی برنامه‌ریزی، یکی از مجموعه جواب های ممکن را انتخاب نماید. با این کار، مدیران ارشد متوجه خواهند شد که تا چه اندازه از مقدار بهینه سود فاصله بگیرند تا در مقابل ترجیحات تولیدی را بیش‌تر تامین نمایند و یا محصولات نیمه‌ساخته را کاهش دهند. به عنوان مثال، در جواب مربوط به آلفای ۰/۶ در مقایسه به آلفای ۰/۵، با کاهش تقریبی ۱۱۰ میلیون تومانی در مقدار سود، به بهبود ۸ درصدی در تابع هدف ترجیحات تولید و ۰/۰۲ درصدی در تابع هدف محصولات نیمه ساخته رسیده‌ایم.

پس از انتخاب جواب مربوطه (مقادیر توابع هدف)، مجموعه‌ی جواب‌های بهینه برای هریک از متغیرهای تصمیم که مقدار تابع هدف مربوطه را شکل داده‌اند؛ قابل استحصال و استفاده خواهند بود.

با توجه به نتایج درج شده در جدول ۷، در میان سه تابع هدف مدل، تابع هدف اولویت‌های تولید هیچ حساسیتی نسبت به تغییرات دو پارامتر منتخب نشان نداده است اما تابع هدف سود شدیدا تحت تاثیر این تغییرات بوده است به طوری که در طیف سوددهی مناسب تا زیان‌دهی هنگفت متغیر بوده است. شایان ذکر است که با توجه به اهمیت زیاد سوددهی برای شرکت، در عمل گزینه‌های متناظر با مقادیر آلفای ۰/۸ الی ۱ انتخاب نخواهند شد چرا که باعث زیان‌دهی شرکت خواهند شد و در عمل مدیریت یکی از گزینه‌های دیگر (گزینه‌های متناظر با مقادیر آلفای صفر الی ۰/۷) را انتخاب خواهد نمود.

با توجه به سطح تغییرپذیری (میزان حساسیت) تابع هدف سود، درنظرگیری عدم‌قطعیت های موجود در پارامترهای مدل و به طور خاص دو پارامتر موردنظر مدیران شرکت شامل «هزینه برون‌سپاری» و «تبعات غیرمستقیم فروش از دست رفته» به عنوان پیشرانه‌ای برای تحقیقات آتی معرفی می‌گردد که استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو نیز برای تحلیل این اثر با روشی مشابه با (Rezaie et al., 2009) مناسب به نظر می‌رسد.

درنظرگیری موجودی اطمینان و تحلیل تاثیر مقادیر مختلف آن بر نتایج مدل، به عنوان ملاحظه دیگری برای افزودن به مدل پیشنهادی توصیه می‌شود.

از آنجایی که شاخص‌های اولویت‌بندی خانواده محصولات دارای تاثیر و تاثر می‌باشند؛ برای تحقیقات مشابه توصیه می‌شود از روش‌های دیگری مانند ANP برای نمره‌دهی به گزینه‌ها و تعیین وزن نسبی شاخص‌ها استفاده شود.

علاوه بر این محققان آتی می‌توانند ضمن تعریف بازه‌های زمانی کوچک‌تر (مثلا هفتگی)، انتقال کالا بین ایستگاه‌های متوالی را مشابه با حالت پیوسته مدل‌سازی نمایند و میزان افزایش دقت برنامه‌ریزی را در مقایسه با این تحقیق بررسی نمایند.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد.

ORCID

Majid Shakhsi-Niaei https://orcid.org/0000-0001-8034-9955

Fateme Ghayoor https://orcid.org/0000-0001-6433-5529

منابع

حسینی، س.م.ح. (۱۳۹۹). مدل‌سازی و حل مساله یکپارچه برنامه‌ریزی تولید ادغامی و تعمیرات و نگهداری در حالت دو هدفه و با رویکرد کاهش نارضایتی مشتریان، مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۸(۵۶)، ۱۲۹-۱۶۹.

خاتمی‌فیروزآبادی، س.م.ع.، ماکویی، ا.، پیری، و. (۱۳۹۲). برنامه‌ریزی تولید ادغامی شرکت لوله و ماشین‌سازی ایران با رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی خاکستری، مدیریت فردا، ۳۵(۱۲)، ۵۱-۶۴.

References

Akçay, Y. (2002). *Three essays on resource allocation problems: Inventory management in assemble-to-order systems and online assignment of flexible resources*. The Pennsylvania State University.

Chakrabortty, R., & Hasin, M. (2013). Solving an aggregate production planning problem by using multi-objective genetic algorithm (MOGA) approach. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 4(1), 1-12.

Chen, L. (2010). The Application of Value Stream Mapping Based Lean Production System. *International Journal of Business and Management*, 5(6), 203-209.

Chizari, E., Bonyadi Naeini, A., & Nouralizadeh, H. (2018). A new model for Physical flow optimization in the global automotive value chain (Case study: SIBA MOTOR Company). *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 11(4), 34-55.

da-Silva, C. G., Figueira, J., Lisboa, J., & Barman, S. (2006). An interactive decision support system for an aggregate production planning model based on multiple criteria mixed integer linear programming. Omega, 34(2), 167-177.

De Figueiredo, J. N., Mayerle, S. F., & Donato, F. S. (2011). Optimal product/customer mix selection as a strategic tool for cross-functional integration. *Journal of Operations and Supply Chain Management*, 4(1), 51-70.

Entezaminia, A., Heydari, M., & Rahmani, D. (2016). A multi-objective model for multi-product multi-site aggregate production planning in a green supply chain: Considering collection and recycling centers. *Journal of Manufacturing Systems*, 40, 63-75.

Fallahi, A., Azimi-Dastgerdi, M., & Mokhtari, H. (2021). A Sustainable Production-Inventory Model Joint with Preventive Maintenance and Multiple Shipments for Imperfect Quality Items. *Scientia Iranica*, Article in press.

Gansterer, M. (2015). Aggregate planning and forecasting in make-to-order production systems. *International Journal of Production Economics*, *170*, 521-528.

Georgiadis, G. P., Elekidis, A. P., & Georgiadis, M. C. (2021). Optimal production planning and scheduling in breweries. *Food and Bioproducts Processing*, 125, 204-221.

Gholamian, N., Mahdavi, I., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Mahdavi-Amiri, N. (2015). Comprehensive fuzzy multi-objective multi-product multi-site aggregate production planning decisions in a supply chain under uncertainty. *Applied soft computing*, 37, 585-607.

Hahn, G. J., & Brandenburg, M. (2018). A sustainable aggregate production planning model for -the chemical process industry. *Computers & operations research*, *94*, 154-168.

Ilangkumaran, M., Avenash, A., Balakrishnan, V., Kumar, S. B., & Raja, M. B. (2013). Material selection using hybrid MCDM approach for automobile bumper. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 14(1), 20-39.

Khoshalhan, F., & Cheraghali-Khani, A. (2012). An Integrated Model of Aggregate Production Planning with Maintenance Costs. *International Journal of Industrial Engineering & Production Managemen*t, 23(1), 67-77. (in Persian)

Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465.

Modarres, M., & Izadpanahi, E. (2016). Aggregate production planning by focusing on energy saving: A robust optimization approach. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1074-1085.

Oubahman, L., & Duleba, S. (2021). Review of Promethee method in transportation. *Production Engineering Archives*, *27*.

Rasmi, S. A. B., Kazan, C., & Türkay, M. (2019). A multi-criteria decision analysis to include environmental, social, and cultural issues in the sustainable aggregate production plans. *Computers & Industrial Engineering*, 132, 348-360.

Rezaie, K., Gereie, A., Ostadi, B., & Shakhseniaee, M. (2009). Safety interval analysis: A risk-based approach to specify low-risk quantities of uncertainties for contractor's bid proposals. Computers & Industrial Engineering, 56(1), 152-156.

Saaty, T.L. (1989) Group decision making and the AHP. In: Golden BL, Wasil EA, Harker PT (eds) The analytic hierarchy process—applications and studies. Springer, Berlin, pp 59-67.

Silva Filho, O.S., Cezarino, W., & Ratto, J. (2010). Aggregate production planning: Modeling and solution via Excel spreadsheet and solver. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(17), 89-94.

Su, T. S. (2017). A fuzzy multi-objective linear programming model for solving remanufacturing planning problems with multiple products and joint components. *Computers & Industrial Engineering*, 110, 242-254.

Tsai, W. H., & Lu, Y. H. (2018). A framework of production planning and control with carbon tax under industry 4.0. *Sustainability*, 10(9), 3221.

Hosseini, S.M.H. (2020). Modelling and solving the multi objective aggregate production planning with maintenance costs and dissatisfaction reduction approach. *Industrial Management Studies*, 18(56), 129-169. [In Persian]

Khatami-Firoozabadi, S.M.A., Makuee, A. , & Piri, V. (2013). Aggregate Production Planning Of L.M.I Corporation Using Grey Goal Programming Approach, *Modiriat-e-Farda Journal*, 35(12), 51-64. [In Persian]

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی