Industrial Management Studies
Vol. 21, No.69, Summer 2023; P 43-75
jims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/jims.2023.59976.2638

ATU PRESS

Original Research
Accepted: 06/07/2023
Received: 05/04/2021
eISSN: 2476-602X
ISSN: 2251/8029

Integrated Production and Distribution Scheduling in a Dental Prosthetics Supply Chain under Additive Manufacturing Environment

Yasin Heidari MSc. in Industrial Engineering, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Seyed Ali Torabi * Full Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

In a competitive world, one of the most crucial ways to enhance the supply chain performance of manufacturing companies is through integrated scheduling of production and distribution activities. Two significant concerns for dentists and patients include delayed denture deliveries and the multiple production and correction processes for dentures. This research addresses these concerns by developing a mixed-integer linear programming model for solving the integrated production and distribution scheduling problem in a fixed denture supply chain operating under an additive manufacturing environment. The objective functions of this model aim to minimize the cost of production and distribution orders while reducing weighted delays. The Augmented Epsilon Constraint Method is employed to identify Pareto-optimal solutions. To validate the mathematical model, a numerical example and a case study are presented, and various sensitivity analyses are conducted on key model parameters. The numerical results demonstrate substantial improvements in total costs and customer satisfaction levels.

Introduction

A supply chain (SC) comprises several interconnected echelons and processes, where an integrated perspective can lead to optimal overall SC performance. Simply improving an organization's internal processes is insufficient for competitiveness in the market; establishing effective

* Corresponding Author: satorabi@ut.ac.ir
How to Cite: Heidari, Y., Torabi, S. A. (2023). Integrated Production and Distribution Scheduling in a Dental Prosthetics Supply Chain under Additive Manufacturing Environment, *Industrial Management Studies, 21(69),* 43-75.

relationships with suppliers, distributors, and other SC stakeholders is essential. Achieving maximum value along the SC involves focusing on cost reduction through cost-effective decision-making. In the past decade, the rising adoption of 3-D printing and additive manufacturing technologies in SCs, as a prominent disruptive technology in the Industry 4.0 era, has created numerous opportunities for improving manufacturing SCs compared to traditional production methods. These opportunities include reduced setup and production times, lower safety stock levels, and fewer processing steps. Additive manufacturing has found applications in various fields, particularly in denture production. This research addresses two primary concerns in the field: timely denture delivery and the multiple production and correction processes associated with dentures. A novel mathematical model is developed to tackle these issues, aiming to solve the integrated production and distribution scheduling problem in a fixed denture supply chain operating within an additive manufacturing environment. The objective functions of this model aim to minimize the costs associated with production and order distribution while minimizing the weighted total delays.

Materials and Methods

A mixed-integer linear programming model is devised to address the problem outlined in this paper. The Augmented Epsilon Constraint Method is applied to identify Pareto-optimal solutions. To validate the mathematical model, a numerical example and a case study are presented, and several sensitivity analyses are conducted on key model parameters to elucidate their critical roles in the final solutions.

Discussion and Results

A case study is provided to demonstrate the practical applicability of the developed model. Sensitivity analyses on demand data highlight the substantial impact of demand management on final solutions. This research presents a two-objective optimization model to address the simultaneous scheduling of production and order delivery in a three-tier dental prosthesis supply chain. The first tier comprises a dental prosthesis production laboratory, while the second and third tiers include distributors and dentists (final customers). The objective functions include the minimization of total order delivery costs and the average weighted lateness of delivered products from a fixed dental prosthesis production laboratory. Constraints encompass delivery time delays, order allocation to customers, capacity limitations, calculations of time to reach each customer, and vehicle routing. Given that this research problem falls into the category of multi-objective problems, the Augmented Epsilon Constraint Method is employed to obtain Pareto-optimal solutions. To investigate and implement the proposed model, a fixed dental

prosthesis production laboratory in Neka City is examined. The numerical results indicate the existence of a trade-off between the problem's objectives.

Conclusions

This paper presents a bi-objective model to address the integrated production and distribution scheduling problem in a three-tier dentures supply chain, aiming to minimize total delivery costs and the average weighted tardiness. The first tier includes a dentures production laboratory, while the second and third tiers comprise distributors and dentists, respectively. Numerical results based on a real case study demonstrate the practical applicability of the model. Several avenues for future research include considering uncertainty in input data and developing efficient meta-heuristic algorithms for solving large-scale instances.

Keywords: Integrated production and distribution scheduling; Additive manufacturing; Batch delivery; Augmented Epsilon Constraint Method.

مقاله پژوهشی

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۰۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۵

ISSN: 2251/8029

eISSN: 2476-602X

مطالعات مدیریت صنعتی
سال بیست و یکم، شماره ٦٩، تابستان ١٤٠٢، ص ٤٣ تا ٧٥
jims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/jims.2023.59976.2638

زمان‌بندی یکپارچه‌ی تولید و توزیع در یک زنجیره تأمین تولید پروتزهای دندانی در محیط تولید افزایشی

یاسین حیدری
دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

سیدعلی ترابی *
استاد تمام دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در جهان رقابتی، یکی از مهم‌ترین راهکارها برای بهبود عملکرد زنجیره تأمین شرکت‌های تولیدی، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی یکپارچه‌ی بخش‌های تولید و توزیع است. دو معضل اصلی برای دندان‌پزشکان و بیماران، عدم تحویل به‌موقع پروتزهای دندانی و فرآیند چندباره تولید و اصلاح پروتزها است. در این پژوهش، در راستای حل این معضلات، یک مدل ریاضی برای حل مسئله زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع در یک زنجیره‌تأمین تولید پروتزهای ثابت دندان در محیط تولید افزایشی توسعه یافته است. توابع هدف این مدل شامل کمینه‌کردن هزینه تولید و ارسال سفارش‌ها و کمینه کردن مجموع وزن‌دار تأخیرات است. همچنین، تصمیمات مرتبط با ارسال دسته‌ای سفارش‌ها و یافتن بهترین مسیر برای ارسال هر دسته نیز در نظر گرفته شده است. به‌منظور تک هدفه کردن مدل ریاضی و یافتن جواب‌های پارتو، از روش اپسیلون محدودیت تقویت‌شده استفاده شده است. درنهایت، به‌منظور اعتبارسنجی مدل ریاضی، یک مثال عددی و یک مطالعه موردی ارائه و همچنین، تحلیل حساسیت روی پارامترهای کلیدی مدل پیشنهادی انجام‌شده است. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر کاهش قابل‌ملاحظه‌ی هزینه‌های تولید و توزیع و همچنین افزایش سطح رضایت مشتریان با توجه به کاهش میزان تأخیرت در تحویل محصولات به مشتریان است.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع، تولید افزایشی، تحویل دسته‌ای، روش اپسیلون محدودیت تقویت‌شده.

* نویسنده مسئول: satorabi@ut.ac.ir

مقدمه

یک زنجیره تأمین از بخش‌های مختلفی تشکیل‌شده است و توجه به هر بخش به‌صورت جداگانه لزوماً بهترین عملکرد را سبب نمی‌شود. ازاین‌رو، توجه یکپارچه به کلیه بخش‌ها به علت لحاظ نمودن ارتباطات داخلی میان فرآیندها (نظیر وابسته بودن برنامه توزیع محصولات به برنامه تولید و نیز بالعکس)، موجب عملکرد بهتر زنجیره می‌گردد. در اوایل دهه ۹۰ میلادی بود که بسیاری از شرکت‌ها دریافتند که داشتن حضور مؤثر در بازار صرفاً نیازمند اصلاح فرآیندهای داخلی تولیدی نیست، بلکه باید با تأمین‌کنندگان، توزیع‌کنندگان و سایر عوامل که از محیط بیرونی با شرکت ارتباط برقرار می‌کنند، یک ارتباط مؤثر داشته باشند (Anzam,2015).

هدف هر زنجیره تأمین حداکثر نمودن ارزش است. از دیدگاه تجاری می‌توان گفت ارزش همان سوددهی زنجیره تأمین یعنی تفاضل بین درآمد کسب‌شده و هزینه‌های زنجیره تأمین است. بدین‌ترتیب در یک زنجیره تأمین تجاری، تمرکز اصلی بر روی تصمیم‌گیری‌های صحیح در مراحل مختلف زنجیره است که می‌توانند تأثیر بالایی بر روی سود کل سیستم بگذارد (Chopra & Meindl, 2007).

دردهه اخیر با رشد فناوری‌های چاپ سه‌بعدی و به‌کارگیری آن‌ها در زنجیره‌های‌تامین، رویکرد فناوری تولید افزایشی[1] به‌عنوان یکی از فناوری‌های صنعت نسل چهارم، فرصت‌های زیادی را در مقابل تولید سنتی (ازجمله کاهش زمان‌های راه‌اندازی و تولید، سطح موجودی اطمینان و تعداد مراحل کمتر نسبت به تولید سنتی) ایجاد کرده است (Özceylan, Çetinkaya, Demirel & Sabırlıoğlu, 2018).

فناوری چاپ سه‌بعدی در حوزه‌های کاربردی مختلفی من‌جمله تولید پروتزهای دندانی مورداستفاده روزافزون قرار گرفته است. دو معضل اصلی برای دندان‌پزشکان و بیماران، عدم تحویل به‌موقع پروتزهای دندانی و فرآیند چندباره تولید و اصلاحات پروتزها می‌باشد. لذا در راستای حل این معضلات، یک مدل ریاضی برای حل مسئله برنامه‌ریزی

1. Additive manufacturing supply chain

هم‌زمان تولید و توزیع در یک زنجیره تأمین تولید پروتزهای دندانی در فضای تولید افزایشی ارائه‌شده و اعتبارسنجی مدل از طریق پیاده‌سازی آن بر روی یک مطالعه موردی انجام‌شده است. اهداف این مدل پیشنهادی شامل حداقل‌سازی هزینه ارسال سفارش‌ها به مشتریان و نیز افزایش سطح رضایت مشتریان (در قالب حداقل‌سازی زمان تأخیر وزن‌دار در تحویل سفارشات به مشتریان) است.

پیشینه پژوهش

در مرور ادبیات این پژوهش سعی شده است پژوهش‌های مرتبط با زنجیره‌ی تأمین تولید افزایشی، تحویل دسته‌ای و زمان‌بندی زنجیره تأمین موردبررسی قرار بگیرد. در مطالعات مرتبط با زنجیره‌ی تولید افزایشی، (Tuck, Hague & Burns, 2007) نشان دادند که استفاده از فناوری ساخت سریع و نمونه‌سازی سریع[1] تأثیر ویژه‌ای در پارادایم‌های مدیریت زنجیره تأمین مانند پارادایم‌های تولید ناب و چابک[2] خواهد داشت. (liu, Huang, Mokasdar, Zhou & Hou, 2014) بر اساس مدل مرجع عملکرد زنجیره تأمین[3]، تأثیر تولید افزایشی را بر روی زنجیره تأمین قطعات هواپیما موردبررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از تولید افزایشی فرصت‌های مختلفی را برای کاهش موجودی اطمینان[4] موردنیاز قطعات یدکی هواپیما در زنجیره تأمین ایجاد می‌کند. (Strong, Kay, Conner, Wakefield & Manogharan, 2018) به بررسی یک سیستم هاب استراتژیک تولید افزایشی پرداختند که می‌تواند تولید افزایشی را با تولید سنتی ادغام کند. در این مقاله، یک مدل مکان‌یابی تسهیلات برای تعیین مکان‌های بهینه هاب‌های تولید افزایشی بر اساس داده‌های جغرافیایی ارائه می‌شود. (Velázquez, Simon, Helleno & Mastrapa, 2020) به بررسی پیامدهای تولید افزایشی، به‌عنوان یک مدل تولید پیشرفته، بر زنجیره تأمین و لجستیک پرداخته‌اند؛ و نتیجه گرفتند که پیامدهای اصلی تولید افزایشی بر روی زنجیره

1. Rapid Prototyping
2. Lean & Agile
3. SCOR
4. safety inventory

تأمین و لجستیک شامل کاهش پیچیدگی زنجیره تأمین، تدارکات انعطاف‌پذیرتر و مدیریت موجودی کاراتر است.

در مطالعات مربوط به تحویل دسته‌ای، (Mahdavi, Hamidinia & Karamouzian, 2011) برنامه‌ریزی مجموعه‌ای از سفارش‌های وزن‌دار را در یک محیط تک ماشینه با تاریخ تحویل مشخص برای تحویل هر دسته به مشتریان بررسی نمودند. آن‌ها دو تابع هدف به حداقل رساندن مجموع وزن‌دار تأخیرات و زمان در جریان ساخت را در نظر گرفتند. (Jamili, Ranjbar & Salari, 2016) یک مدل برنامه‌ریزی تولید و توزیع یکپارچه را در یک زنجیره تأمین مطالعه کردند. در مسئله آن‌ها، مجموعه‌ای از سفارش‌های چندین مشتری وجود دارد که باید بر روی یک ماشین پردازش شوند. هر سفارش تاریخ تحویل مخصوص خود را دارد. در کارخانه، سفارش‌ها باید دسته‌بندی و در قالب دسته‌های مختلف به مشتریان مربوطه تحویل داده شوند. آن‌ها به‌منظور پیدا کردن یک برنامه مشترک تولید و توزیع برای بهینه‌سازی سطح خدمات مشتریان، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح را پیشنهاد کردند. (Shen & Zhu, 2019) مسئله یکپارچه‌سازی مدیریت زنجیره تأمین دومرحله‌ای بین یک سایت تولیدی و مشتریان را بررسی نمودند. در مرحله اول، سفارش‌های مشتریان توسط تعدادی ماشین موازی یکسان تولید می‌شوند. در مرحله دوم، سفارش‌ها در دسته‌هایی گروه‌بندی‌شده و سپس از طریق کامیون‌هایی با ظرفیت محدود تحویل مشتریان می‌شوند. هدف از این مسئله، زمان‌بندی هم‌زمان تولید سفارش‌ها روی ماشین‌ها و تحویل دسته‌ای سفارش‌ها به مشتریان باهدف حداقل‌سازی زمان اتمام تحویل کل کارهای دسته‌بندی‌شده است. برای تعیین راه‌حل بهینه مسئله، یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط ارائه شده است. ازآنجاکه درجه پیچیدگی این مدل NP hard است، سه الگوریتم مبتنی بر الگوریتم ژنتیک نیز برای افزایش کارایی حل در مسائل بزرگ پیشنهادشده است. آزمایش‌های عددی نشان می‌دهد که یکی از الگوریتم‌های پیشنهادی قادر به ارائه راه‌حل‌های تقریباً بهینه در یک‌زمان معقول است.

در بخش مطالعات مربوط به زمان‌بندی یکپارچه زنجیره تأمین با رویکرد به حداقل

رساندن پارامتر تأخیر، (Hall & Potts, 2003) زمان‌بندی یکپارچه تولید و دسته‌بندی و تحویل سفارش‌ها را در یک محیط تک ماشینه با در نظر گرفتن زمان در جریان در پروژه، هزینه ارسال و حداکثر تأخیر موردبررسی قراردادند. همچنین یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویا برای حداقل کردن اهداف ذکر شده طراحی کردند. (Mazdeh, Haddadm & Ghanbari, 2012) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط را برای تعیین تعداد سفارش‌های تأخیری و هزینه ارسال در یک محیط تک ماشینه با چند مشتری توسعه دادند. آن‌ها از الگوریتم فرا ابتکاری باز پخت شبیه‌سازی‌شده[1] استفاده و نتایج را با راه‌حل‌های بهینه مقایسه کردند. نتایج عددی نشان داد که الگوریتم پیشنهادی زمان محاسبه معقولی دارد. (خلیفه زاده و سیف برقی، ۱۳۹۳) یک مدل عدد صحیح ترکیبی دو هدفه (شامل کمینه‌سازی هزینه سیستم و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان در حمل‌ونقل محصولات) را در یک سیستم تولید و توزیع یکپارچه با مراکز تولید و توزیع چندگانه ارائه دادند. آن‌ها از یک الگوریتم ابتکاری بر پایه الگوریتم ژنتیک بنام الگوریتم ژنتیک رتبه‌ای برای حل مسئله استفاده کردند.

(Rostami, Kheirandish & Ansari, 2015) مدلی برای حداقل سازی هزینه تأخیر و تحویل در محیط تک ماشینه با در نظر گرفتن زمان انتشار، ارائه دادند. آن‌ها یک الگوریتم شاخه و کران و دو روش فرا ابتکاری برای حل مدل عدد صحیح مختلط ارائه دادند. نتایج مطالعه نشان داد که دو روش فرا ابتکاری در ابعاد بسیار بزرگ بهتر عمل می‌کنند.

(Assarzadegan & Rasti-Barzoki, 2016) برای به حداقل رساندن حداکثر زمان تأخیر، تاریخ تحویل و هزینه‌های تحویل محصول، دو مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی و ریزی خطی را توسعه دادند. ازآنجاکه مدل توسعه‌یافته ان‌پی-سخت بود، آن‌ها از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مثل الگوریتم ژنتیک تطبیقی برای نمونه‌های بزرگ استفاده کردند. (Kazemi, Mazdeh & Rostami, 2017) مسئله برنامه‌ریزی دومرحله‌ای در یک محیط کارگاهی با دستگاه‌های مونتاژ چندگانه را بررسی و یک الگوریتم رقابتی

1. Simulated Annealing (SA)

امپریالیستی ترکیبی برای حل آن ارائه دادند. نتایج مطالعه نشان داد که عملکرد الگوریتم رقابتی امپریالیستی ترکیبی بهتر از الگوریتم رقابتی امپریالیستی است. (Noroozi, Mazdeh, Heydari & Rasti-Barzoki, 2018) مسئله برنامه‌ریزی تولید و توزیع یکپارچه با پذیرش سفارش، تحویل مستقیم دسته‌ای و بهینه‌سازی تدارکات شخص ثالث[1] را پیشنهاد کردند. به‌منظور به حداکثر رساندن درآمد، آن‌ها دو مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه کردند و آن‌ها را با رویکرد جستجوی تطبیقی و الگوریتم ژنتیکی تطبیقی حل کردند. (Mohammadi, Al-e-Hashem & Rekik, 2020) یک مدل عدد صحیح مختلط دو هدفه (شامل حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های برنامه‌ریزی تولید و توزیع و مجموع وزنی زودکرد و دیرکرد) را برای حل مسئله یکپارچه تولید و مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی محدود ارائه نمودند. این مدل ابتدا با یک روش محدودیت به‌صورت مطلوب حل می‌شود و سپس یک الگوریتم بهینه‌سازی ذرات ترکیبی برای حل مدل در مسائل متوسط و بزرگ در یک‌زمان مناسب ارائه می‌شود. نتایج یک مطالعه موردی در یک شرکت تولیدکننده مبلمان که کالاهای سفارشی تولید می‌کند، نشان می‌دهد که شرکت می‌تواند تعادل منطقی مناسبی بین هزینه و نگرانی مشتری برقرار کند و آن‌ها می‌توانند از سیاست ادغام به‌عنوان اهرمی برای بهبود رضایت مشتری استفاده کنند بدون اینکه سیستم افزایش قابل‌توجهی در کل هزینه عملیاتی را تجربه کند.

بررسی ادبیات نشان می‌دهد که اغلب مدل‌های توسعه یافته در تحقیقات قبلی تک هدفه هستند. همچنین، در بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده، نوع وسایل نقلیه همگن و ظرفیت آن نیز نامحدود فرض شده است؛ اما اخیراً به‌منظور واقعی‌تر کردن مفروضات مسئله، جهت‌گیری تحقیقات به سمت وسایل نقلیه ناهمگن با ظرفیت محدود است.

در این پژوهش بر آنیم تا در یک محیط تولید سفارشی تک ماشینه با تکنولوژی تولید افزایشی (چاپگر سه‌بعدی)، برنامه‌ریزی هم‌زمان تولید و توزیع سفارش‌های مشتریان را در یک زنجیره تأمین تولید و تحویل پروتزهای دندانی موردبررسی قرار دهیم. اندازه سفارش‌ها می‌تواند غیر یکسان باشد و تعداد مشتریان نیز بیش از یک عدد است و هر

1. third-party logistics optimization

مشتری می‌تواند بیش از یک سفارش ثبت کند. همچنین دو تابع هدف برای برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و توزیع در نظر گرفته‌شده و وسایل نقلیه نیز ناهمگن و با ظرفیت نامحدود می‌باشند. همچنین سفارش‌ها به‌صورت دسته‌ای و هر دسته در طی یک مسیر، تحویل مشتریان مربوطه می‌شود.

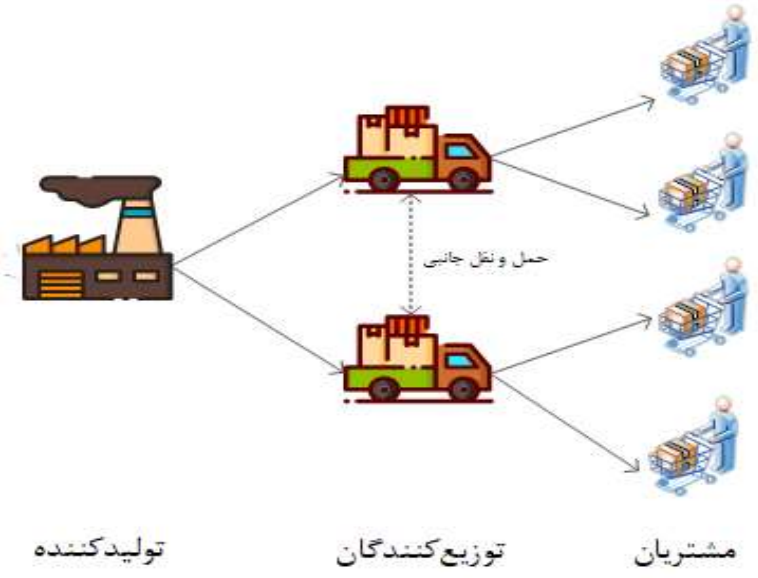
نوآوری‌های اصلی این پژوهش شامل ارائه یک مدل دوهدفه جدید برای برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و توزیع سفارش‌ها در یک محیط تولید افزایشی با در نظر گرفتن تحویل دسته‌ای و مسیریابی ارسال دسته‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که مقاله (Mohammadi, Al-e-Hashem & Rekik, 2020) شاید نزدیک‌ترین کار به موضوع این مقاله باشد و تفاوت‌های پژوهش حاضر با آن مدل این است که نوع تحویل محصولات در اینجا دسته‌ای است و محیط تولید نیز از نوع تولید افزایشی است.

تعریف مسئله

فرایند یک لابراتوار ساخت پروتزهای دندان‌پزشکی مطابق شکل (۱) در نظر گرفته شده است. دندان‌پزشکان قالب‌های دندان بیماران را به این لابراتوار ارسال نموده و پروتز قالب‌های دریافتی در لابراتوار ساخته‌شده و به دندان‌پزشکان تحویل داده می‌شود. هر قالب ساخته‌شده توسط یک دندان‌پزشک دارای یک طول عمرمحدود است و اگر در مدت‌زمان مشخصی به لابراتوار ارسال نشود، قالب مستهلک‌شده و قابل‌استفاده نخواهد بود. همچنین، حداکثر زمان مجاز لابراتوار برای ساخت پروتز و ارسال آن به مطب دندان‌پزشکان معادل حداقل طول عمر باقیمانده قالب به‌اضافه زمان ساخت پروتز و زمان ارسال آن به مطب است که باید در داخل این فرجه‌ی زمانی، هر محصول (پروتز) تحویل مشتری (مطب مربوطه) داده شود. لازم به ذکر است که پزشکان بلافاصله پس از قالب‌گیری اولیه از بیمار، سفارش خود را اعلام می‌کنند. همچنین فرض می‌شود زمان اعلامی از طرف پزشک از زمان تولید بیشتر می‌باشد. نحوه تحویل سفارش‌ها به‌صورت دسته‌ای است. هر وسیله یک تور را طی می‌کند. تور هر وسیله از محل لابراتوار شروع و پس از سرویس مشتریان تخصیصی به لابراتوار بازمی‌گردد. ظرفیت وسایل حمل با توجه

به‌اندازه‌ای که سفارش‌ها دارند، عملاً نامحدود فرض شده و هزینه ارسال هر سفارش با توجه به مسیری که طی می‌شود، متفاوت است. لابراتوار موردنظر چندین شهر را پوشش می‌دهد لذا هر وسیله نقلیه شاید نتواند تمامی سفارش‌های تخصیصی خود را در یک روز تحویل دهد. هدف این مسئله حداقل‌سازی هزینه‌های تولید و توزیع پروتزهای دندانی و مجموع وزنی تأخیرات در تحویل سفارش‌ها است.

شکل ۱. ساختار شماتیک مسئله



مفروضات مساله

- محیط تولید یک محیط تک ماشینه و مبتنی بر سفارش است[1].
- افق برنامه‌ریزی شامل یک دوره با طول چند روز (مثلاً پنج روز) است.
- مقدار تقاضا در افق برنامه‌ریزی از قبل مشخص بوده و یک عدد ثابت است.
- لابراتوار مسئولیت تولید سفارش‌های دریافتی و حمل کالاهای نهایی به مشتریان مربوطه را بر عهده دارد.

1. MTO

- محصولات به‌صورت دسته‌ای تحویل داده می‌شود.
- زمان موردنیاز برای ساخت[1] یک سفارش بستگی به نوع سفارش و تعداد واحدهای آن سفارش دارد و می‌تواند بسته به نوع سفارش متفاوت باشد و همچنین بزرگ‌تر از صفر می‌باشد.
- تمامی سفارش‌های در ابتدای افق برنامه‌ریزی آماده زمان‌بندی هستند.
- زمان پیش‌تولید (زمان آماده‌سازی مربوط به اسکن قالب) بر اساس نظر تجربی خبره برای هر سفارش از قبل مشخص است.
- زمان تحویل سفارش‌ها[2] توسط دندان‌پزشکان اعلام‌شده و می‌تواند باهم متفاوت باشد.
- وقفه[3] در پروسه تولید هر سفارش مجاز نمی‌باشد.
- ظرفیت ماشین محدود هست و در هرروز به‌اندازه مشخصی می‌تواند کار کند.
- ظرفیت وسایل نقلیه باهم متفاوت است، همچنین به تعداد کافی وسیله نقلیه موجود است و با توجه به اینکه محصول حجم زیادی ندارد فضای کافی برای ارسال هر تعداد محصول را داریم.

مدل‌سازی مسئله

در این بخش مدل ریاضی مسئله ارائه شده است. شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مورداستفاده برای فرمول‌بندی مسئله به شرح زیر هستند:

شاخص‌ها:

i	شاخص شمارنده سفارش
j	شاخص شمارنده مشتری
k, q	شاخص شمارنده بسته

1. processing time
2. due date
3. interruption

v شاخص شمارنده وسیله نقلیه

پارامترها:

M یک عدد بسیار بزرگ

N تعداد کل سفارش‌ها

C تعداد کل مشتری‌ها

B تعداد کل بسته‌ها

V تعداد کل وسایل نقلیه

α_j نرخ هزینه تأخیر برای مشتری j

DD_{ij} موعد تحویل سفارش i مشتری j

P_{ij} مدت‌زمان پردازش سفارش i مشتری j

F_v هزینه ثابت وسیله نقلیه v

θ_v هزینه متغیر وسیله نقلیه v در هر دقیقه

t_{kqv} زمان سفر وسیله نقلیه v از مشتری بسته k به مشتری بسته q

متغیرها

Tar_{ij} مقدار تأخیر در سفارش i مشتری j

x_{ijq} ۱ است اگر سفارش i ام مشتری j ام در بسته q باشد.

y_{jq} ۱ است اگر محصولی از مشتری j در بسته q باشد.

C_q زمان موردنیاز تکمیل بسته q

Z_{qv} ۱ است اگر بسته q توسط وسیله نقلیه v حمل شود.

U_{kqv} ۱ است اگر بسته k دقیقاً قبل از بسته q توسط وسیله نقلیه v ارسال شود.

T_{qv} زمان رسیدن بسته k توسط وسیله نقلیه v

S_v زمان ترک لابراتوار توسط وسیله نقلیه v

E_v زمان رسیدن به آخرین مشتری توسط وسیله نقلیه v

D_k زمان تحویل بسته k

D_{ij} زمان تحویل سفارش i مشتری j

W_k ۱ است اگر از وسیله نقلیه v استفاده شود.

$L_{kqv}, O_{kv}, G_{kv}, R_{ijk}$ متغیرهای مثبت کمکی

مدل پیشنهادی

این مسئله به شکل یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی دو هدفه فرموله شده است. هدف این مدل نیز حداقل سازی زمان تأخیر وزن‌دار و هزینه ارسال سفارش‌ها به مشتری‌ها است (Mahdavi, Hamidinia & Mohammadi, Al-e-Hashem & Rekik, 2020؛ Karamouzian, 2011).

$$f_1 = min \sum_{v}^{V} (F_v W_v + \theta_v (E_v - S_v)) \quad (۱)$$

$$f_2 = min \sum_{i}^{N} \sum_{j}^{F} \alpha_j Tar_{ij} \quad (۲)$$

معادله (۱) مجموع هزینه‌های تحویل کالا به مشتری را حداقل می‌کند به این صورت که بخش اول هزینه ثابت ارسال و بخش دوم نیز هزینه متغیر ارسال را محاسبه و معادله (۲) مجموع وزندار تأخیر را حداقل می‌کند.

$$Tar_{ij} \geq D_{ij} - DD_{ij} ; \forall i, j \quad (۳)$$

$$Tar_{ij} \geq 0; \forall i, j \quad (۴)$$

$$\sum_{q=1}^{B} x_{ijq} = 1; \forall i, j \quad (۵)$$

معادلات (۳) و (۴) مقدار حداکثر تأخیر را محاسبه می‌کند که یا مقدار آن برابر حداکثر دو مقدار صفر یا تفاضل زمان موردنیاز برای تکمیل محصول و موعد تحویل محصول موردنظر و معادله (۵) نشان می‌دهد که هر سفارش باید در یک بسته باشد.

$$-\sum_{i=1}^{N} x_{ijq} + My_{jq} \geq 0 ; \forall j, q \quad (۶)$$

$$\sum_{i=1}^{N} x_{ijq} + M(1 - y_{jq}) \geq 0 ; \forall j, q \quad (۷)$$

$$\sum_{j=1}^{F} y_{jq} \leq 1 ; \forall q \quad (۸)$$

$$C_q = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{F} x_{ijq} P_{ij} + C_{q-1} ; \forall q \quad (۹)$$

$$C_0 = 0 \quad (۱۰)$$

معادلات (۶) و (۷) و (۸) نشان می‌دهند حداکثر بسته‌ها برابر تعداد سفارش‌ها است. همچنین، چون امکان دارد چند سفارش در یک بسته قرار گیرد، لذا می‌توان چند بسته را حذف کرد. همچنین این معادله نشان می‌دهد هر بسته فقط و فقط مربوط به یک مشتری می‌باشد. معادلات (۹) و (۱۰) نشان‌دهنده یک رابطه بازگشتی است که زمان اتمام هر بسته را تعیین می‌کند که برابر با کل زمان پردازش سفارش‌های موجود در آن بسته به‌علاوه زمان اتمام دسته قبلی است.

$$\sum_{v=1}^{V} Z_{qv} = 1 ; \forall q \quad (۱۱)$$

$$Z_{qv} = \sum_{k=0}^{B} U_{kqv} ; \forall q, v \quad (۱۲)$$

$$\sum_{k=0}^{B} U_{kqv} = \sum_{k=1}^{B+1} U_{kqv} \leq 1; \forall q, v \quad (۱۳)$$

معادله (۱۱) نشان می‌دهد هر بسته باید به یکی از وسایل نقلیه موجود ارجاع داده شود. معادله (۱۲) تضمین می‌کند که هر وسیله نقلیه در تور به این محدود می‌شود که فقط یک بسته قبل از آن تحویل داده شود. معادله (۱۳) بیانگر این است که هر وسیله نقلیه دقیقاً بعد از تحویل سفارش‌های تعیین‌شده مکان را ترک کند.

$$\sum_{q=1}^{B} U_{[0]qv} = \sum_{k=1}^{B} U_{k[B+1]v} \leq 1; \forall v \quad (۱۴)$$

$$T_{[0]v} = S_v = \max_{q\in(1,...,B)} Z_{qv} C_q; \forall v \quad (۱۵)$$

معادله (۱۴) نشان می‌دهد که هر وسیله نقلیه دقیقاً تور خود را از لابراتوار آغاز می‌کند و فقط یک‌بار به آن بازمی‌گردد. به همین منظور دو بسته مصنوعی $[0]$ و $[N+1]$ در نظر گرفته می‌شود و نشان می‌دهد هر تور با لابراتوار شروع و به آن ختم می‌شود. معادله (۱۵) نشان می‌دهد که زمان حرکت هر وسیله نقلیه برابر بزرگ‌ترین زمان تکمیل بسته‌های موجود در وسیله نقلیه می‌باشد.

$$T_{qv} = \sum_{k=0}^{B} U_{kqv} (T_{kv} + t_{kqv}); \forall q, v \quad (۱۶)$$

$$D_k = \sum_{v=1}^{V} Z_{kv} T_{kv}; \forall k \quad (۱۷)$$

$$D_{ij} = \max_{k\in(1,...,B)} X_{ijk} D_k; \forall i, j \quad (۱۸)$$

معادله (۱۶) نشانگر زمان تحویل q توسط وسیله نقلیه v برابر زمان تحویل k توسط این وسیله نقلیه به‌علاوه سفر بین k و q می‌باشد. معادله (۱۷) زمان تحویل هر بسته را در هر سفر و معادله (۱۸) زمان تحویل هر سفارش هر مشتری را در هر سفر محاسبه می‌کند.

$$E_v = S_v + \sum_{k=0}^{B} \sum_{q=1}^{B+1} U_{kqv} t_{kqv}; \forall v \quad (۱۹)$$

$$W_v = \max_{k\in(1,...,B)} Z_{kv}; \forall v \quad (۲۰)$$

$$\begin{cases} Tar_{ij}, C_{ij}, C_k, T_{kv}, S_v, E_v, D_k \geq 0 \\ x_{ijk}, y_{jk}, Z_{kv}, U_{kqv}, W_v \in \{0,1\} \end{cases} \quad (۲۱)$$

معادله (۱۹) بیانگر زمان پایان هر تور است که برابر زمان شروع آن از محل تولید به‌اضافه

زمان کل مسیرهای طی شده توسط وسیله نقلیه می‌باشد. معادله (۲۰) نشان می‌دهد کدام وسیله نقلیه برای حمل‌ونقل استفاده می‌شود و معادلات (۲۱) نوع متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

خطی‌سازی محدودیت‌های غیرخطی

مدل پیشنهادی یک مدل عدد صحیح غیرخطی است. قبل از حل مدل، از برخی تکنیک‌های خطی‌سازی استفاده خواهد شد تا مدل به حالت خطی تبدیل شود (محمدی و همکاران،۲۰۲۰). در مسئله فوق محدودیت‌های (۱۵)-(۱۸) و (۲۰) غیرخطی می‌باشند که با معادلات زیر جایگزین خواهند شد تا مدل اولیه به یک مدل خطی تبدیل شود.

خطی سازی معادله (۱۵) با یک متغیر کمکی مثبت $G_{qv} = Z_{qv} C_q$:

$$C_q - (1 - Z_{qv}) * M \leq G_{qv} ; \forall q,v \quad (۲۲)$$

$$G_{qv} \leq C_q ; \forall q,v \quad (۲۳)$$

$$G_{qv} \leq M * Z_{qv} ; \forall q,v \quad (۲۴)$$

$$S_v \geq G_{qv} ; \forall q,v \quad (۲۵)$$

خطی سازی معادله (۱۶) با یک متغیر کمکی مثبت $L_{kqv} = U_{kqv} T_{kv}$:

$$T_{qv} = \sum_{k=0}^{B} L_{kqv} + \sum_{k=0}^{B} U_{kqv} t_{kqv} ; \forall q,v \quad (۲۶)$$

$$T_{kv} - (1 - U_{kqv}) \times M \leq L_{kqv} ; \forall k,q,v \quad (۲۷)$$

$$L_{kqv} \leq T_{kv} ; \forall k,q,v \quad (۲۸)$$

$$L_{kqv} \le M \times U_{kqv} ; \forall k, q, v \quad (۲۹)$$

خطی سازی معادله (۱۷) با یک متغیر کمکی مثبت $O_{kv} = Z_{kv} T_{kv}$:

$$D_k = \sum_{v=1}^{V} O_{kv} ; \forall k \quad (۳۰)$$

$$T_{kv} - (1 - Z_{kv}) \times M \le O_{kv} ; \forall k, v \quad (۳۱)$$

$$O_{kv} \le T_{kv} ; \forall k, v \quad (۳۲)$$

$$O_{kv} \le M \times Z_{kv} ; \forall k, v \quad (۳۳)$$

و خطی سازی معادله (۱۸) با یک متغیر کمکی مثبت $R_{ijk} = X_{ijk} D_k$:

$$D_k - (1 - X_{ijk}) * M \le R_{ijk} ; \forall i, j, k \quad (۳۴)$$

$$R_{ijk} \le D_k ; \forall i, j, k \quad (۳۵)$$

$$R_{ijk} \le X_{ijk} * M ; \forall i, j, k \quad (۳۶)$$

$$D_{ij} \ge R_{ijk} ; \forall i, j, k \quad (۳۷)$$

خطی سازی معادله (۲۰)

$$W_v \ge Z_{kv} ; \forall k, v \quad (۳۸)$$

روش حل مدل برنامه دوهدفه

برنامه‌ریزی چندهدفه بخشی از برنامه‌ریزی ریاضی است که در آن متغیرهای تصمیم با توجه به توابع هدف چندگانه که باید به‌طور هم‌زمان روی مجموعه‌ای شدنی از تصمیمات

بهینه‌سازی شوند، مشخص می‌شوند. چنین مسائلی به‌عنوان مسائل برنامه‌ریزی چندهدفه تعریف می‌شوند. ازجمله روش‌های معمول برای حل مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه می‌توان به روش محدودیت اپسیلون[1] و روش مجموع وزنی اشاره نمود. در این پژوهش، روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده[2] با توجه به مزایای آن نسبت به روش‌های مجموع وزنی و محدودیت اپسیلون، برای تعیین جواب‌های کارا مورداستفاده قرار می‌گیرد (Mavrotas, 2009).

مطالعه موردی

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها فرآیندی چندمرحله‌ای است که طی آن داده‌های اولیه جهت حل مسئله خلاصه، کدبندی، دسته‌بندی و درنهایت پردازش می‌شوند. بدین منظور در ابتدا ساختار تولید داده‌های عددی تشریح شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار گمز[3] و با کمک حل‌کننده سیپلکس[4] در یک سیستم باقدرت پردازندگی ۳۲ گیگاهرتز و حافظه تصادفی در دسترس ۱۶ گیگابایت، مدل ریاضی حل‌شده و نتایج عددی موردبررسی قرار می‌گیرد. درنهایت از طریق انجام تجزیه‌وتحلیل‌های عددی، رفتار مدل در شرایط مختلف موردبررسی قرار می‌گیرد.

ساختار داده‌ها

در این پژوهش سعی شده است که داده‌های ورودی مدل به‌گونه‌ای درنظرگرفته شود که منطبق بر ساختار دنیای واقعی باشد تا حداکثر مطلوبیت ممکن برای حصول پاسخ‌ها حاصل گردد. علاوه بر آن، سایر داده‌های عددی که مرتبط با نوآوری‌های تحقیق بوده و در سایر پژوهش‌ها وجود ندارد، به‌صورت تصادفی در بازه یکنواخت تولیدشده است.

---

1. ε-constraint
2. Augmented ε-constraint method
3. GAMS
4. Cplex 12.1

معرفی موردمطالعه

جهت بررسی و اجرای مدل پیشنهادی، یک لابراتوار ساخت پروتزهای ثابت دندان‌پزشکی در شهرستان نکا موردبررسی قرارگرفته است. در این لابراتوار انواع پروتزهای دندانی به سفارش دندان‌پزشکان ساخته می‌شود که شامل انواع پروتزهای دندانی ازجمله روکش، دندان مصنوعی و همچنین قطعات درمانی نظیر قطعات ارتودنسی می‌باشد. روش تولید این لابراتوار به دو صورت سنتی و افزایشی می‌باشد. بخش تولید افزایشی از دستگاه فرم ۲ که از دستگاه‌های رومیزی و معمول برای ساخت پروتزهای دندان به روش افزایشی می‌باشد، استفاده می‌کند. این لابراتوار سفارش‌ها را از ۳ دندان‌پزشک در شهر نکا (شماره ۱ الی ۳)، ۴ دندان‌پزشک در شهر بهشهر (شماره ۴ الی ۷) و ۲ دندان‌پزشک در شهر ساری (شماره ۸ و ۹) دریافت می‌کند و پس از ساخت، محصولات ساخته‌شده را تحویل دندان‌پزشکان می‌دهد. بر اساس یافته‌های میدانی، اطلاعات ورودی مدل ریاضی به‌صورت جداول زیر تشریح شده است و همچنین تعداد وسیله‌های نقلیه‌ای که سفارش مشتریان را به دستشان می‌رساند دو عدد است. جهت محاسبه هزینه ارسال از داده‌های موجود هزینه‌های ثابت و متغیر و نرم‌افزار مسیریابی بلد استفاده‌شده و در این تحقیق فرض بر این است که زمان طی مسیر برای وسایل نقلیه اول و دوم با یکدیگر مشابه است. محاسبه نرخ هزینه تأخیر برای هر مشتری، با استفاده از تعداد سفارش هر مشتری حاصل می‌شود، به این صورت که مشتری با بیشترین تعداد سفارش دارای ضریب ۱ و مابقی نیز با توجه به تعداد سفارش‌هایشان ضریب کمتری رادارند و موعد تحویل سفارش‌های هر مشتری نیز ۵ روز می‌باشد، همچنین میانگین زمان ساخت هر سفارش نیز برابر ۵۰ دقیقه می‌باشد.

جدول ۱. تعداد دندان‌پزشکان و تعداد سفارش هر دندان‌پزشک

دندان‌پزشک	مقدار سفارش
1	8
2	7
3	12
4	4
5	6
6	15

مقدار سفارش	دندان‌پزشک
3	7
8	8
9	9

جدول ۲. هزینه ثابت (هزار تومان) و متغیر (تومان بر دقیقه) برای هر یک از وسایل نقلیه

F_1	800
θ_1	1500
F_2	1000
θ_2	1200

جدول ۳. نرخ هزینه تأخیر برای هر مشتری

j	α_j
1	0/53
2	0/47
3	0/8
4	0/27
5	0/4
6	1
7	0/2
8	0/53
9	0/6

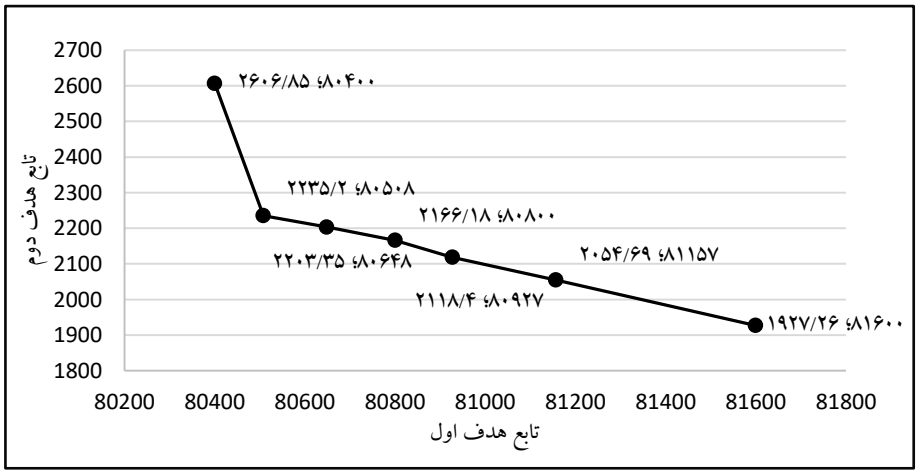
جدول ٤. زمان بین لابراتوار تا دندان‌پزشکان (دقیقه)

	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
0	0	5	6	4	6	25	30	28	35	32
1	5	0	5	5	4	25	30	28	35	32
2	6	5	0	5	7	25	30	28	35	32
3	4	5	5	0	6	25	30	28	35	32
4	6	4	7	6	0	25	30	28	35	32
5	25	25	25	25	25	0	6	48	45	46
6	30	30	30	30	30	6	0	48	45	46
7	28	28	28	28	28	48	48	0	9	6
8	35	35	35	35	35	45	45	9	0	7
9	32	32	32	32	32	46	46	6	7	0

نتایج حاصل از مدل

پس از اجرای مدل با استفاده از روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده، جدول مقادیر توابع هدف به‌صورت زیر ارائه می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در صورت درنظرگرفتن تابع هدف اول به‌عنوان تابع اصلی، مقدار بهینه این تابع هدف برابر با ۸۰۴۰۰ و مقدار تابع هدف دوم (در حالت غیر بهینه) برابر با ۲۶۰۶ خواهد بود؛ اما درصورتی‌که تابع هدف دوم به‌عنوان تابع هدف اصلی درنظرگرفته شود، مقدار بهینه آن برابر با ۱۹۲۷ بوده و مقدار تابع هدف اول (در حالت غیر بهینه) برابر با ۸۱۶۰۰ خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با ایجاد بهبود در یک تابع هدف، مقدار تابع هدف دیگر بدتر می‌شود که این مسئله نشان‌دهنده وجود تضاد در توابع هدف مسئله است.

شکل ۲. جبهه پارتویی حاصل از حل مسئله تحقیق



جدول ۵. جواب روش اپسیلون محدودیت

تابع اصلی	$f_1(x)$	$f_2(x)$
تابع هدف اول	80400	2606
تابع هدف دوم	81600	1927
بیشترین مقدار توابع هدف	81600	2606
کمترین مقدار توابع هدف	80400	1927

تحلیل حساسیت

به‌منظور بررسی عملکرد مدل نسبت به تغییرات تقاضا، یک مثال عددی در ابعاد متوسط با درنظرگرفتن ۱۰ مشتری، ۵ بسته و ۳ وسیله نقلیه درنظرگرفته شده است. پارامتر تقاضا در چهار حالت مختلف در قالب سناریوهای عددی مقداردهی شده و رفتار مدل نسبت به تغییر هریک از آن‌ها سنجیده شد. جهت تحلیل حساسیت مدل در شرایط تغییر مقدار تقاضا، این پارامتر بر اساس سناریوهای موجود در جدول (۶) تغییر می‌کند.

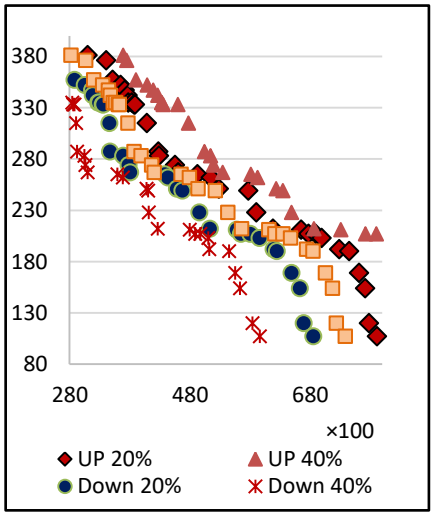
جدول ٦. سطح تغییر پارامتر تقاضا

سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم	سناریو چهارم
۴۰ درصد کاهش	۲۰ درصد کاهش	۲۰ درصد افزایش	۴۰ درصد افزایش

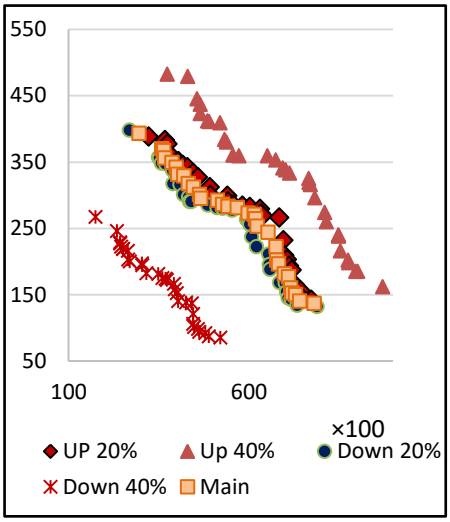
پس از حل مثال عددی موردبررسی، جبهه‌های پارتویی تولیدشده به‌صورت شکل (۳) است.

کاملاً مشخص است که با تغییر تقاضا، پاسخ‌های نهایی به‌شدت تحت تأثیر قرارگرفته و هر دو تابع هدف مقادیر متفاوتی را تولید می‌کنند. این موضوع اثر بسیار زیاد مدیریت تقاضا بر حصول پاسخ‌های نهایی را نشان می‌دهد. درواقع با تغییر تقاضا توابع هدف دچار تغییرات اساسی می‌شود؛ بنابراین می‌توان به این جمع‌بندی رسید که توجه به تخمین سطح دقیق تقاضای مشتریان دارای اهمیتی زیاد در طراحی سیستم به‌صورت مناسب است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر مدل، تغییرات مقدار نرخ هزینه تأخیر برای هر مشتری نیز در سناریوهای چهارگانه موردبررسی قرار گرفت. مشابه با جدول (۶) درصد تغییرات این پارامتر درنظرگرفته شده و سپس نتایج عددی به‌صورت شکل (۴) ارائه گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با اعمال تغییرات در پارامتر هزینه تأخیر برای هر مشتری، مقدار هر دو تابع هدف تحت تأثیر قرار می‌گیرد. دلیل این موضوع را می‌توان در تأثیرگذاری این پارامتر در متغیر مقدار تأخیر در هر سفارش دانست که طبیعتاً در سایر متغیرهای تصمیم نیز تأثیر می‌گذارد.

شکل ۳-تغییرات جبهه پارتویی در مقابل سناریوهای مختلف تقاضا



شکل ٤-تغییرات جبهه پارتویی در مقابل سناریوهای مختلف



تحلیل حساسیت در شرایط تغییر مدت‌زمان سفارش

در این بخش به‌منظور بررسی رفتار مدل در حل مثال عددی در شرایط تغییر مدت‌زمان سفارش، چند مثال عددی در ابعاد مختلف حل و نتایج تشریح می‌شود. قابل‌ذکر است که در این تحلیل نیز مدل ریاضی به‌صورت تک هدفه موردتوجه است. بدین منظور تعداد ۳ دسته مثال عددی در ابعاد مختلف تولیدشده که اطلاعات در جدول (۷) مشاهده می‌شود. سپس نتایج حاصل از حل ارائه‌شده است. پس از حل نمونه‌های عددی، نتایج به‌صورت جداول (۸) الی (۱۰) قابل‌مشاهده است. تمام داده‌های ورودی مسئله برای مثال‌های ذکرشده به‌صورت تصادفی یکنواخت در محیط نرم‌افزار تولیدشده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تابع هدف اصلی دارای سطح تفاوتی مشخص باحالت تغییر در زمان پردازش است. در حقیقت حل مسئله در شرایط تغییر در زمان پردازش باعث می‌شود که فضای مسئله بزرگ‌تر شده و بنابراین پاسخ نهایی در شرایط تغییر در زمان پردازش از پاسخ نهایی در شرایط اصلی بهتر نباشد. این مسئله نشان می‌دهد که باید تا حد زیادی در تعیین سطح دقیق پارامتر زمان پردازش دقت عمل داشت تا مشکلات این‌چنینی کمتر به وجود

آید.

در جدول ۷ ابعاد مختلف این مسئله نشان داده شده است که برای این دسته‌بندی از نظرات فرد خبره که تکنسین لابراتوار بود جهت سایزبندی سفارش‌های استفاده شده است، همچنین با توجه به ابعاد لابراتوار و تعداد کارکنان و ... به‌صورت حدودی حجم سفارش‌ها و تعداد بسته‌ها به دست آمد. سپس با توجه به حل مسئله و شکست‌های زمانی بین دسته‌های مختلف یک دسته‌بندی دقیق‌تر حاصل شد.

جدول ۷. ابعاد نمونه‌های عددی برای تحلیل شرایط عدم قطعیت

ابعاد	تعداد وسایل نقلیه	تعداد بسته	مشتریان	ابعاد	تعداد وسایل نقلیه	تعداد بسته	مشتریان	ابعاد	تعداد وسایل نقلیه	تعداد بسته	مشتریان
کوچک	2	3	15	متوسط	4	5	25	بزرگ	6	6	35
	2	3	16		4	5	26		6	7	36
	2	3	17		4	5	27		6	7	37
	3	4	18		4	5	28		6	7	38
	3	4	19		5	5	29		6	8	39
	3	4	20		5	5	30		6	8	40
	3	4	21		5	5	31		6	8	41
	3	4	22		5	6	32		7	8	42
	3	4	23		5	6	33		7	8	43
	4	4	24		5	6	34		7	8	44

جدول ۸- نتایج حاصل از اجراها در ۱۰ مسئله با اندازه کوچک (×۱۰)

شماره مسئله		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
تابع هدف اصلی		621	801	1188	1165	1445	939	1343	1742	1806	2214
تغییر در زمان پردازش	10%	637	823	1214	1193	1472	952	1337	1884	1928	2318
	-10%	600	778	1178	1072	1389	902	1269	1689	1720	2159

جدول ۹. نتایج حاصل از اجراها در ۱۰ مسئله با اندازه متوسط (×۱۰)

شماره مسئله		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
تابع هدف اصلی		2155	2992	2923	3322	2857	3128	3457	3190	3633	3117
تغییر در زمان پردازش	10%	2187	3064	2960	3480	2966	3337	3554	3222	3641	3268
	-10%	2119	2814	3008	3292	2762	3042	3203	3012	3594	3003

جدول ۱۰. نتایج حاصل از اجراها در ۱۰ مسئله با اندازه بزرگ (×۱۰)

شماره مسئله		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
تابع هدف اصلی		2972	3875	4360	4033	4045	4042	5083	4235	3881	4762
تغییر در زمان پردازش	10%	3011	3968	4388	4151	4119	4190	5172	4350	3928	4791
	-10%	2929	3874	4325	3992	3938	3914	4918	4040	3958	4740

آنالیز ابعادی

در این بخش تأثیرگذاری تغییرات در ابعاد نمونه‌های عددی مختلف بر تعداد محدودیت‌ها، متغیرها و البته زمان حل بررسی می‌شود. از این طریق می‌توان سطح نیاز فنی مدل به سیستم کامپیوتری جهت اجرای آن را تخمین زد. بدین منظور ۲۰ مثال عددی در ابعاد مختلف متناسب با جدول (۱۱) تولید شد. پس از تست تمامی نمودهای عددی با ابعاد ارائه‌شده در جدول، اطلاعات مرتبط با تعداد محدودیت‌ها، تعداد متغیرهای اصلی، تعداد متغیرها گسسته و البته زمان حل به‌صورت جدول (۱۲) ارائه گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان حل به‌شدت تحت تأثیر قرارگرفته که البته در حل مدل‌های بهینه‌سازی منطقی است، چراکه اصالتاً این مسائل از رده مسائل ان-پی سخت بوده و حل آن‌ها برای ابعاد متوسط و بزرگ ناممکن است. شکل (۶) رویه تغییر این تحلیل‌ها را نشان می‌دهد. قابل به ذکر است که با توجه به ماهیت مدل پیشنهادی که از رده مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است، تمام متغیرها به‌جز یک نوع متغیر، به‌صورت پیوسته بوده و بنابراین تفاوت بین تعداد متغیرهای اصلی و متغیرهای پیوسته زیاد نیست و در شکل (۵)، نمودارهای مربوط به این المان‌ها بر یکدیگر منطبق شدند؛ اما موضوع جالب‌توجه این است که تعداد محدودیت‌ها و تعداد متغیرها نیز به یکدیگر شبیه بوده تفاوت معناداری ندارند. البته این موضوع ویژگی خاصی از مدل را نشان نداده و تنها یک تشابه اتفاقی قلمداد می‌شود. شکل (۶) رویه رشد زمان حل مدل را با افزایش ابعاد مسئله نشان می‌دهد. قابل‌مشاهده است که رشد زمان حل به‌صورت نمایی دلیلی بر ویژگی ان-پی سخت بودن مسئله می‌باشد و به‌منظور بررسی دقیق‌تر ساختار ابعاد مدل پیشنهادی، شکل (۷) به بررسی برهمکنش تعداد محدودیت‌ها به زمان حل پرداخته و می‌توان مشاهده نمود که با افزایش

تعداد محدودیت‌ها، زمان حل به‌صورت مشخص افزایش‌یافته که بیانگر تأثیر بسزای محدودیت‌های مدل بر حصول پاسخ در ابعاد مختلف است.

جدول ۱۱. ابعاد نمونه‌های عددی مختلف

ردیف	تعداد وسایل نقلیه	تعداد بسته‌ها	تعداد سفارش	تعداد متقاضی
1	2	3	4	5
2	2	3	4	6
3	3	4	5	8
4	3	4	5	10
5	4	4	7	12
6	4	5	7	14
7	5	5	8	16
8	5	5	8	18
9	6	5	10	20
10	6	6	10	22

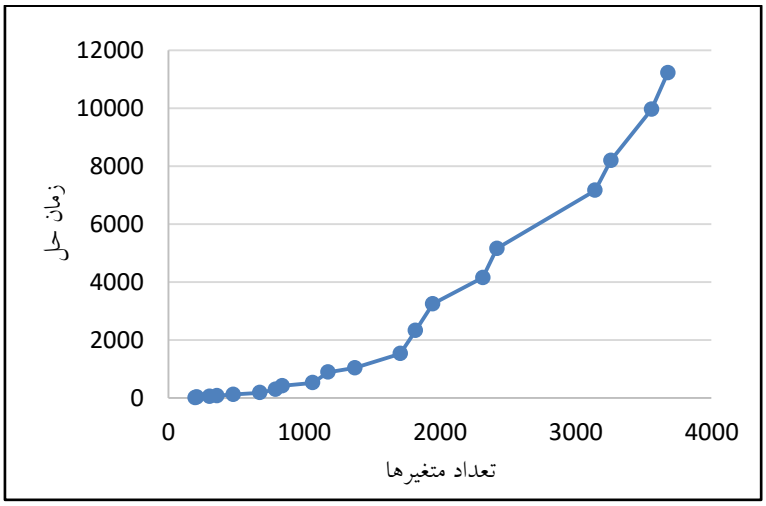
ردیف	تعداد وسایل نقلیه	تعداد بسته‌ها	تعداد سفارش	تعداد متقاضی
11	7	6	12	24
12	7	7	12	26
13	8	7	12	28
14	8	8	12	30
15	8	9	14	32
16	8	9	14	34
17	9	10	16	36
18	9	10	16	38
19	10	12	16	40
20	10	12	16	42

جدول ۱۲. نتایج حاصل از تحلیل ابعادی

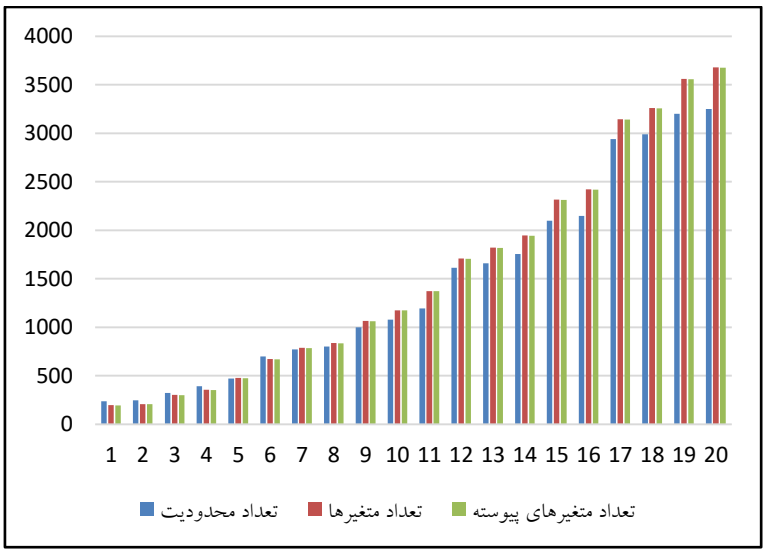
زمان حل	تعداد متغیرهای پیوسته	تعداد متغیر	تعداد محدودیت
10	194	197	236
25	205	208	247
49	299	302	322
74	353	356	390
120	475	478	472
183	670	673	697
298	785	788	770
416	835	838	802
526	1060	1063	997
886	1172	1175	1077

زمان حل	تعداد متغیرهای پیوسته	تعداد متغیر	تعداد محدودیت
1037	1370	1373	1193
1529	1705	1708	1613
2325	1817	1820	1659
3249	1944	1947	1755
4153	2313	2316	2098
5158	2417	2420	2148
7160	3140	3143	2939
8193	3256	3259	2989
9958	3556	3559	3201
11220	3676	3679	3251

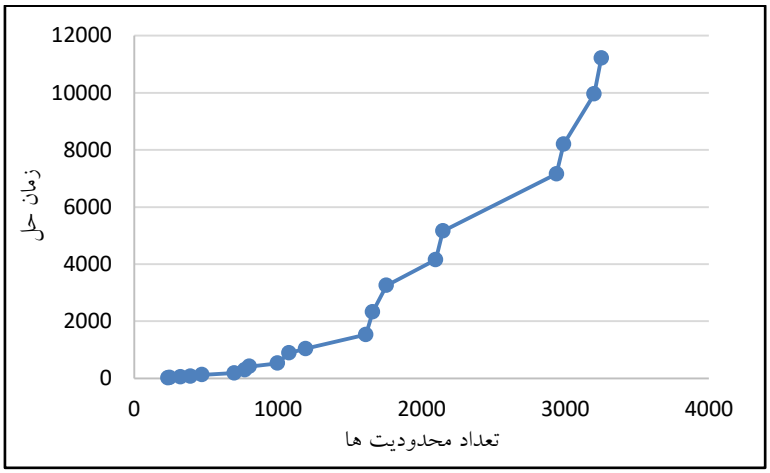
شکل ۵. تغییرات المان‌های مدل ریاضی در نمونه‌های عددی مختلف



شکل ٦. رشد زمان حل با افزایش ابعاد مسئله



شکل ۷. تغییرات زمان حل نسبت به تعداد محدودیت‌ها



بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه برای حل مسئله زمان‌بندی هم‌زمان تولید و تحویل سفارش‌ها در یک زنجیره تأمین سه سطحی پروتزهای دندانی ارائه شده است. در سطح اول این زنجیره یک لابراتوار تولید پروتزهای دندانی و در سطوح دوم و سوم، به ترتیب، توزیع‌کنندگان و دندان‌پزشکان (مشتریان نهایی) حضور دارند.

در این تحقیق، حداقل‌سازی هزینه‌ی کل ارسال سفارش‌ها و میانگین وزن‌دار تأخیرات در محصولات ارسالی یک لابراتوار تولید افزایشی پروتز ثابت به‌عنوان توابع هدف درنظرگرفته شد. محدودیت‌های مسئله نیز شامل محاسبه زمان تأخیر در ارسال کالاها، تخصیص سفارش‌ها به مشتریان، محدودیت‌های ظرفیتی، محدودیت‌های محاسبه زمان رسیدن به هر مشتری و همچنین مسیریابی وسایل نقلیه بود.

با توجه به اینکه مسئله پژوهش از رده مسائل چندهدفه می‌باشد، به‌منظور حصول پاسخ‌های پارتویی از روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده استفاده شد. جهت بررسی و اجرای مدل پیشنهادی، یک لابراتوار ساخت پروتزهای ثابت دندان‌پزشکی در شهرستان نکا موردبررسی قرارگرفت. نتایج عددی نشان‌دهنده وجود تضاد بین اهداف مسئله است.

به‌منظور تحلیل حساسیت رفتار مدل یک مثال عددی درنظرگرفته شد. پارامتر تقاضا

در چهار حالت مختلف در قالب سناریوهای عددی مقداردهی شده و رفتار مدل نسبت به تغییر هریک از آن‌ها سنجیده شده است. بر اساس نتایج عددی، کاملاً مشخص است که با تغییر مقادیر مختلف تقاضا، پاسخ‌های نهایی به‌شدت تحت تأثیر قرارگرفته و هر دو تابع هدف مقادیر متفاوتی را تولید کردند. این موضوع اثر بسیار زیاد مدیریت تقاضا بر حصول پاسخ‌های نهایی را نشان داد. درواقع با تغییر تقاضا توابع هدف دچار تغییرات اساسی می‌شود؛ بنابراین می‌توان به این جمع‌بندی رسید که توجه به تخمین سطح دقیق تقاضای مشتریان دارای اهمیتی زیاد در طراحی سیستم به‌صورت مناسب است.

پس از انجام سایر تحلیل‌ها نیز می‌توان گفت که مدل ارائه‌شده در این تحقیق دارای رفتاری مناسب و منطقی بوده و بنابراین قابلیت استفاده در محیط‌های واقعی را به‌صورت مناسب دارد. درنظرگرفتن مدل در شرایط عدم قطعیت بازه‌ای و استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری به‌منظور حل مسئله در ابعاد بزرگ می‌تواند ازجمله موضوعات پژوهش‌های آتی باشند.

ORCID
Yasin Heidari **https://orcid.org/0000-0002-7763-6547**
Seyed Ali Torabi **https://orcid.org/0000-0002-9764-9679**

منابع

۱. خلیفه زاده، ساسان.، سیف برقی، مهدی. (۱۳۹۳) .یک مدل برنامه‌ریزی دو هدفه برای یک سیستم تولید- توزیع یکپارچه و حل با استفاده از الگوریتم ژنتیک رتبه‌ای .*مطالعات مدیریت صنعتی*،۱۲(۳۴)،۶۳-۸۸.

2. Assarzadegan, P., & Rasti-Barzoki, M. (2016)."Minimizing sum of the due date assignment costs, maximum tardiness and distribution costs in a supply chain scheduling problem", *Applied Soft Computing*, *47*, 343-356.
3. Australian and NewZealand Academy of Management,ANZAM, 2015.
4. Chopra, S. and P. Meindl (2007), "Supply chain management. Strategy, planning &operation, in Das summa summarum des management", Springer. p. 265-275.
5. Hall, N. G., & Potts, C. N. (2003). "Supply chain scheduling: Batching and delivery". *Operations Research*, *51*(4), 566-584.
6. Jamili, N., Ranjbar, M., & Salari, M. (2016), "A bi-objective model for integrated scheduling of production and distribution in a supply chain with order release date restrictions", *Journal of Manufacturing Systems*, *40*, 105-118.
7. Kazemi, H., Mazdeh, M. M., & Rostami, M. (2017), " The two stage assembly flow-shop scheduling problem with batching and delivery", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *63*, 98-107.
8. Liu, P., Huang, S. H., Mokasdar, A., Zhou, H., & Hou, L. (2014). The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: supply chain operation reference (scor) model based analysis. Production planning & control, 25(13-14), 1169-1181.
9. Mahdavi Mazdeh, M., Hamidinia, A., & Karamouzian, A. (2011), "A mathematical model for weighted tardy jobs scheduling problem with a batched delivery system", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, *2*(3), 491-498.
10. Mavrotas, G. (2009), "Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems", Applied mathematics and computation, 213(2), 455-465.
11. Mazdeh, M. M., Haddadm, H., & Ghanbari, P. (2012). Solving a single machine stochastic scheduling problem using a branch and bound algorithm and simulated annealing. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, *7*(2), 110.

12.Mazdeh, M., Esfahani, A., Sakkaki, S., & Pilerood, A. (2012). Single-machine batch scheduling minimizing weighted flow times and delivery costs with job release times. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, *3*(3), 347-364.

13.Mohammadi, S., Al-e-Hashem, S. M., & Rekik, Y. (2020). "An integrated production scheduling and delivery route planning with multi-purpose machines: A case study from a furniture manufacturing company", *International Journal of Production Economics*, *219*, 347-359.

14.Noroozi, A., Mazdeh, M. M., Heydari, M., & Rasti-Barzoki, M. (2018), "Coordinating order acceptance and integrated production-distribution scheduling with batch delivery considering Third Party Logistics distribution", *Journal of manufacturing systems*, *46*, 29-45.

15.Özceylan, E., Çetinkaya, C., Demirel, N., & Sabırlıoğlu, O. (2018). Impacts of additive manufacturing on supply chain flow: A simulation approach in healthcare industry. Logistics, 2(1), 1.

16.Pei, J., Liu, X., Pardalos, P. M., Fan, W., Yang, S., & Wang, L. (2014), "Application of an effective modified gravitational search algorithm for the coordinated scheduling problem in a two-stage supply chain", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,*70*(14),335-348.

17.Rostami, M., Kheirandish, O., & Ansari, N. (2015), "Minimizing maximum tardiness and delivery costs with batch delivery and job release times", *Applied Mathematical Modelling*,*39*(16),4909-4927.

18.Shen, J., & Zhu, Y. (2019). An uncertain programming model for single machine scheduling problem with batch delivery. Journal of Industrial & Management Optimization, 15(2), 577.

19.Strong, D., Kay, M., Conner, B., Wakefield, T., & Manogharan, G. (2018). Hybrid manufacturing–integrating traditional manufacturers with additive manufacturing (AM) supply chain. Additive Manufacturing, 21, 159-173.

20.Tuck, C., Hague, R., & Burns, N. (2007). Rapid manufacturing: impact on supply chain methodologies and practice. *International journal of services and operations management*,*3*(1),1-22.

21.Velázquez, D. R. T., Simon, A. T., Helleno, A. L., & Mastrapa, L. H. (2020). "Implications of additive manufacturing on supply chain and logistics", *Independent Journal of Management & Pr*

References [In Persian]

1. Khalifezadeh, S. & Seif Barghi, M. (2014). A bi-objective programming

model for an integrated production-distribution system and solution using ordinal genetic algorithm. *The journal of Industrial Management Studies*, 12(34), 63-88 [In Persian].

استناد به این مقاله: حیدری، یاسین.، ترابی، سیدعلی. (۱۴۰۲). زمان‌بندی یکپارچه‌ی تولید و توزیع در یک زنجیره تأمین تولید پروتزهای دندانی در محیط تولید افزایشی، *مطالعات مدیریت صنعتی، ۲۱(۶۹)*، ۷۵-۴۳.

DOI: 10.22054/jims.2023.59976.2638

Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.