Industrial Management Perspective

Print ISSN: 2251-9874, Online ISSN: 2645-4165
Volume 11, Serial Number 43, Autumn 2021, Pages 153-180 (Original Article)
DOI: 10.52547/JIMP.11.3.153

Scheduling Employees with Different Skill Levels in Small Clothing Workshops

Mohammad Akbari*, Mohammad Ghasemi Namaqhi**

Abstract

In this research, it has been tried to optimize the efficiency of employees by considering the concept of human factor engineering in scheduling. Due to the importance of human parameters such as learning and forgetting in employees' skills, especially during job rotation, these factors have been studied and modeled in the issue of staff job rotation scheduling. For this purpose, a nonlinear integer programming model is proposed for scheduling problem of employees with two types of skills. The objective function of the model is to maximize the employee performance. Different examples are solved by considering different parameters to analyze the effects of staff costs, learning and forgetting on staff scheduling efficiency. To solve this problem, GAMZ software is used. The results showed that the proposed model has the ability to provide employee scheduling plans with the aim of maximizing employees. The computational results also indicated that learning and forgetting rate play an important role in determining the optimal scheduling plan and the use or non-use of semi-skilled workers and the movement of employees between machines. The proposed model and the results of this research help employers in using a variety of scheduling schemes and system optimization with dual constraints.

Keywords: Dual Constraint Systems; Mathematical modeling; Employee Scheduling; Learning; Forgetting.

Received: Jul. 15, 2020; Accepted: Jul. 17, 2021.

* Assistant Professor of Industrial Management, Department of Management, Economics and Accounting, Payame Noor University, Tehran, Iran (Corresponding Author).
Email: md.akbary@gmail.com
** Assistant Professor of Business Management, Department of Management, Economics and Accounting, Payame Noor University, Tehran, Iran.

چشم‌انداز مدیریت صنعتی
شاپای چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپای الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵
سال یازدهم، شماره ۴۳، پاییز ۱۴۰۰، ص‌ص ۱۵۳ – ۱۸۰ (**نوع مقاله: پژوهشی**)
DOI: 10.52547/JIMP.11.3.153

زمان‌بندی کارکنان با درجه مهارت متفاوت در کارگاه‌های کوچک تولیدی پوشاک

محمد اکبری اره‌کمری*، محمد قاسمی نامقی**

چکیده

در این پژوهش سعی شده است تا با درنظرگرفتن مفهوم مهندسی عوامل انسانی در زمان‌بندی نوبت‌های کاری، کارایی کارکنان بهینه‌سازی شود. با توجه به اهمیت پارامترهای انسانی همچون یادگیری و فراموشی در مهارت کارکنان، به‌ویژه هنگام چرخش شغلی، این عوامل در مسئله زمان‌بندی گردش شغلی کارکنان مطالعه و مدل‌سازی شده است. بدین منظور یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی برای مسئله زمان‌بندی کارکنان با دو نوع مهارت (ماهر و نیمه‌ماهر) ارائه شده است. تابع هدف مدل ریاضی بیشینه‌سازی کارایی کارکنان مدل‌سازی شد. برای تجزیه‌وتحلیل تأثیرات هزینه کارکنان، یادگیری و فراموشی بر کارایی زمان‌بندی کارکنان، مثال‌های مختلف با درنظرگرفتن پارامترهای متفاوت حل شد. برای حل مسئله ارائه‌شده، نرم‌افزار گمز به‌کار رفت. نتایج نشان داد که مدل ارائه‌شده توانایی ارائه طرح‌های زمان‌بندی کارکنان با هدف بیشینه‌سازی کارکنان را دارد؛ همچنین نتایج محاسباتی نشان داد که نرخ یادگیری و فراموشی در تعیین طرح زمان‌بندی بهینه و استفاده و یا عدم‌استفاده از کارگران نیمه-ماهر و جابه‌جایی کارکنان اصلی بین ماشین‌ها نقش مهمی دارد. مدل ارائه‌شده و نتایج این پژوهش به کارفرمایان در استفاده از انواع طرح‌های زمان‌بندی و بهینه‌سازی سیستم با محدودیت دوگانه کمک مؤثری می‌کند.

کلیدواژه‌ها: سیستم‌های با محدودیت دوگانه؛ مدلسازی ریاضی؛ زمان‌بندی کارکنان؛ یادگیری؛ فراموشی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶.

* استادیار مدیریت صنعتی، گروه مدیریت، اقتصاد و حسابداری، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران (نویسنده مسئول).
Email: md.akbary@gmail.com
** استادیار مدیریت بازرگانی، گروه مدیریت، اقتصاد و حسابداری، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

۱. مقدمه

رقابت در بازار موجب شده است که مؤسسه‌ها و شرکت‌ها تولیدی به سمت انعطاف‌پذیری و بومی‌سازی فرایندهای تولیدی حرکت کنند. این انعطاف‌پذیری با مشخصه‌هایی همچون معرفی سریع محصولات جدید با چرخه عمر کوتاه‌تر، حجم کوچک‌تر از محصولات و ترکیب متغیر محصولات تولیدی، فرایندهای تولیدی را تحت تأثیر قرار داده است. در چنین شرایطی فرایندهای تولیدی بیشتر از قبل مبتنی بر قابلیت‌ها و انعطاف‌پذیری نیروی کار شده است. بر این اساس برای یک زمان‌بندی بهینه، مدیریت منابع سازمان باید بسیار بیشتر از قبل ویژگی‌های منحصر به ماشین‌آلات و کارکنان را در نظر داشته باشد. در مبانی نظری پژوهش، سیستم‌هایی که ظرفیت آن‌ها با توجه به دو عامل ماشین و انسان محدود شده و برنامه‌ریزی انجام می‌گیرد، «سیستم‌های با محدودیت دوگانه»[۱] تعریف می‌شوند. این سیستم‌ها نسبت به سیستم‌های تک محدودیتی/ تک‌منبعی در زمان برنامه‌ریزی منابع دارای پیچیدگی بیشتری هستند [۱]. در این سیستم‌ها نه‌تنها باید ویژگی‌ها و محدودیت‌های ماشین مدنظر قرار گیرد؛ بلکه انسان به‌عنوان عامل تولید نیز باید مطالعه و ویژگی‌ها و محدودیت‌هایش در برنامه‌ریزی منابع مدل‌سازی شود.

انسان بر خلاف ماشین دارای قابلیت‌هایی همچون یادگیری، فراموشی، خستگی، انگیزش، استرس و غیره است و بر این اساس اندازه‌گیری و مدل‌سازی این متغیرها در برنامه‌ریزی منابع بسیار پیچیده‌تر است؛ اگرچه چنین مشخصه‌هایی موجب افزایش انعطاف‌پذیری کارکنان و درنتیجه سیستم تولید می‌شود. با توجه به مهم‌شدن افزایش انعطاف‌پذیری مؤسسه‌ها و شرکت‌های تولیدی و درنتیجه سیستم‌های تولیدی، ضرورت مطالعه و ارائه مدل‌های بهینه سیستم‌های با محدودیت دوگانه افزایش می‌یابد. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که تعداد کمی از پژوهش‌ها به مدل‌سازی مشخصه‌های انسانی در بهینه‌سازی سیستم‌های زمان‌بندی پرداخته‌اند [۳۳]. در این پژوهش سعی می‌شود که یک سیستم محدودیت دوگانه با توجه به مشخصه‌های انسانی مطالعه و مدل‌سازی شود؛ بنابراین در پژوهش حاضر سعی شده است که یک مدل بهینه‌سازی عملکرد کارکنان با درنظرگرفتن پارامترهای مهم یادگیری و فراموشی انسان در مسئله زمان‌بندی نوبت‌های کاری کارکنان ارائه شود. این پژوهش در ادامه پژوهش توماس و نمبهارد[۲] (۲۰۰۴) است [۳۱]. با این تفاوت که این پژوهشگران فقط به معرفی مدل ریاضی عوامل انسانی ذکرشده و توابع ریاضی آن پرداختند. این پژوهش سعی در توسعه و به‌کارگیری یافته‌های مطالعه توماس و نمبهارد (۲۰۰۴)، در مسئله زمان‌بندی/ گمارش کارکنان و بهینه‌سازی عملکرد کارکنان دارد؛ همچنین با توجه به مقادیر مختلف در عوامل انسانی یافته‌ها موردتحلیل قرار گرفته است.

---

۱. Dual Resource Constrained (DRC)

۲. Thomas & Nembhard

در ادامه مقاله در بخش دوم، مطالعات پیشین بررسی خواهد شد. روش‌شناسی پژوهش در بخش سوم و تعریف مدل ریاضی زمان‌بندی کارکنان با توجه به محدودیت‌ها، مفروضات، متغیرها و عوامل انسانی نیز در بخش سوم ارائه می‌شود. نتایج عددی در بخش چهارم و همچنین نتیجه‌گیری و پیشنهادهای پژوهش در بخش پنجم بررسی و ارائه شده است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

سیستم‌های با محدودیت دوگانه، سیستم‌هایی هستند که محدودیت ظرفیت تولید از دو عامل انسان و ماشین ناشی می‌شود. معمولاً سطح نیروی کار[۱] (نسبت اپراتورها به ماشین‌ها) در این سیستم‌ها کمتر از ۱۰۰ درصد است و کارکنان با دارابودن چند مهارت و محدودیت‌هایی همچون اندازه بسته‌های تولیدی، زمان بیکاری کارکنان، زمان تحویل، طول صف و سطح آموزش در صورت نیاز بین ماشین‌های کاری جابه‌جا می‌شوند [۳۲]. آموزش بین‌وظیفه‌ای[۲] این امکان را می‌دهد که با برنامه‌ریزی مناسب حجم کاری را با ترکیب‌های مختلف بین کارکنان به‌طور بهینه تقسیم کرد. با استفاده از نیروی کار چندوظیفه‌ای، سازمان می‌تواند به تغییرات غیرمنتظره و نامتعادل حجم کاری (متأثر از تغییرات بازار) از طریق کاهش زمان تولید و موجودی‌های در جریان تولید، افزایش شتاب فرایند یادگیری کارکنان، بهبود کیفیت و بهره‌وری و ارتقای سطح خدمت مشتریان پاسخ مناسب دهد [۱۵]؛ همچنین با استفاده از برنامه‌ریزی مناسب سیستم‌های با محدودیت دوگانه می‌توان خستگی، کسالت و استرس ناشی از کارهای تکراری را کاهش داد [۱۳].

بعد از معرفی سیستم‌های با محدودیت دوگانه توسط نلسون (۱۹۶۷) در پژوهش‌های متعددی به بررسی و توسعه این‌گونه سیستم‌ها پرداخته است [۲۲]. بررسی این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که کلیه مسائل سیستم‌های با محدودیت دوگانه به پنج دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: ۱. توزیع کارها به سطح کارگاه[۳]؛ ۲. تنظیم توالی کارها و تخصیص به ایستگاه کاری[۴]؛ ۳. انعطاف‌پذیری کارکنان[۵]؛ ۴. گمارش کارکنان[۶] و ۵. هزینه جابه‌جایی کارکنان بین ایستگاه‌ها[۷]. بسیاری از پیشرفت‌های این حوزه، به‌خصوص مدل‌سازی و مطالعه ویژگی‌های انسان، در سال‌های اخیر انجام شده است. از جمله توسعه‌های دیگری که در سال‌های اخیر در این حوزه

۱. Staffing Level
۲. Cross-training
۳. Job release mechanisms
۴. Job dispatching
۵. Worker flexibility
۶. Worker assignment
۷. Transfer costs

انجام شده است، مطالعه عمیق‌تر عواملی همچون تنوع گونه‌های کاری و اولویت‌بندی آن‌ها و پویایی پاسخ به اختلال متفاوت در محیط کار است [۳۳].

مسئله گمارش کارکنان یکی از زیرمسائل مهم و کاربردی سیستم‌های با محدودیت دوگانه است که دو مشخصه اصلی آن قاعده «زمان گمارش»[۱] و «مکان گمارش»[۲] است. قاعده «زمان گمارش» به تصمیم‌گیری در خصوص زمان مناسب جابه‌جایی کارکنان بین ایستگاه‌های کاری و قاعده «مکان گمارش» به تصمیم‌گیری در خصوص ایستگاه کاری مناسب برای نیروی کاری می‌پردازد. بسیاری از مطالعات انجام‌شده نشان داده است زمانی که کارکنان چندوظیفه‌ای هستند با تأثیرگذاشتن بر عملکرد سیستم از طریق چرخه‌های یادگیری و فراموشی، مانع از کاهش بهره‌وری می‌شوند [۱۷]. ناهنجاری‌های اسکلتی بیشترین مشکل سلامتی مرتبط با کار است که در پژوهش‌های مختلف ناشی از خستگی در شرایط کاری بد ذکر شده است. این شرایط بد حاصل حجم کاری زیاد، وظایف تکراری متعدد و بار کاری طولانی، به‌خصوص در حالت کاری نامناسب است [۲۷]. این پژوهش همچنین نشان داده است که هزینه گمارش و زمان‌بندی مجدد سیستم‌ها برای تصحیح برنامه ماشین‌ها و کارکنان بسیار بیشتر از هزینه زمان‌بندی و برنامه‌ریزی استاندارد سیستم با محدودیت دوگانه است.

اکبری (۲۰۱۷) با هدف به‌کارگیری مهندسی عوامل انسانی در سیستم‌های با محدودیت دوگانه، عوامل انسانی مهم در مسئله زمان‌بندی کارکنان مطالعه و مدل‌سازی کرده است. در این پژوهش، عوامل انسانی شامل یادگیری، فراموشی، خستگی و استراحت به‌منظور کمینه‌سازی نسبت تعداد کارکنان به کارایی مدل‌سازی ریاضی شده است. با بررسی سناریوهای مختلف، نتایج نشان داد که پارامترهای انسانی بر کارایی سیستم با محدودیت دوگانه تأثیر دارد و انتخاب سناریوی زمان‌بندی مناسب می‌تواند کارایی کارکنان را تا ۲۰ درصد افزایش دهد [۲]. اکبری (۲۰۱۷)، مسئله زمان‌بندی نیروی کار موقت با عملکرد متغیر را بررسی کرد [۳]. ویژگی منحصربه‌فرد این پژوهش درنظرگرفتن ابعاد ارگونومی (خستگی کارکنان) در زمان‌بندی کارکنان بوده و برای حل مدل ریاضی ارائه‌شده از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. این پژوهش نشان داد که می‌توان خستگی کارکنان را در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی کارکنان مدل‌سازی کرد و به‌منظور کاهش هزینه‌های کارکنان و افزایش کارایی تولید، نوبت‌های کاری انعطاف‌پذیر در نظر گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که می‌توان با استفاده از مدل ارائه‌شده به‌منظور بررسی سیاست‌های کاهش خستگی کارکنان و افزایش ظرفیت کاری آنان هزینه‌های این سیاست‌ها (چون آموزش، گردش شغلی، اتوماسیون و غیره) با میزان بهینگی اقتصادی ناشی از آن در زمان‌بندی، مقایسه و بهترین برنامه‌ها انتخاب شود.

---

۱. When
۲. Where

جابر و همکاران (۲۰۰۳) با مطالعه انعطاف‌پذیری و عامل تشابه کار دریافتند که کاهش جابه‌جایی کارکنان در بین ایستگاه‌های کاری موجب کاهش فراموشی کاری می‌شود [۱۷]. یو[۱] (۲۰۰۵) در مطالعه سیستم‌های با محدودیت دوگانه موازی با تأثیرات یادگیری و فراموشی به این نتیجه رسیدند که در شرایط یادگیری/ فراموشی سریع انعطاف‌پذیری ممکن است به بهبود عملکرد سیستم منجر نشود؛ چراکه انعطاف‌پذیری بیشتر نیازمند یادگیری بیشتر است و درنتیجه فراموشی بیشتری را به بار می‌آورد. اگرچه برای مدیریت حجم کاری، مقداری معینی از انعطاف‌پذیری مطلوب است [۳۴]. جابر و خر (۲۰۰۵)، سیستم‌های با محدودیت دوگانه با فرض خارج‌شدن فرایند تولید از کنترل و تولید محصولات معیوب نیازمند تعمیر را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که برای کارهای با درجه بالای عملیاتی[۲]، آموزش چندوظیفه‌ای مناسب نیست [۱۴]. زامیسکا و همکاران[۳] (۲۰۰۷) با مطالعه مدل یادگیری ـ فراموشی دومرحله‌ای برای فعالیت‌های فیزیکی و شناختی به نتایج مشابه پژوهش جابر و همکاران (۲۰۰۳) رسیدند. نتایج این پژوهش نشان داد زمانی که نرخ یادگیری پایین است، ضرورتی برای افزایش جابه‌جایی کارکنان بین ماشین‌آلات نیست و برای مقابله با نرخ فراموشی بالا جابه‌جایی کارکنان و آموزش پیشرفته ضروری به نظر می‌رسد [۳۵]. کیم و نمبهارد[۴] (۲۰۱۰)، سیستم‌های با محدودیت دوگانه را با توجه به سطح یادگیری و فراموشی و ناهمگن‌بودن وظایف بررسی کردند. در این پژوهش تأثیر عوامل سیاست انتخاب کارگر، وظایف نامتجانس، سطح آموزش بین‌وظیفه‌ای، جدول زمانی کارگسسته و نیازمندی‌های تولید بر حداقل سطح موردنیاز نیروی کار در سیستم با محدودیت دوگانه موازی بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که با داشتن گروه کارکنان خوب نسبت به گروه کارکنان متوسط، نیازمندی نیروی کار کاهش می‌یابد؛ همچنین محدودکردن توسعه آموزش بین‌وظیفه‌ای نیازمندی نیروی کار را افزایش می‌دهد [۱۸]. گیومارس و همکاران[۵] (۲۰۱۲)، تأثیر سطح پیچیدگی متفاوت وظایف بر عملکرد و یادگیری کارکنان در صنعت کفش را بررسی کردند. در این پژوهش دو سناریو شامل جابه‌جایی کارکنان از وظیفه ساده به وظیفه سخت و برعکس بررسی شد. نتایج نشان داد که تفاوت معناداری در عملکرد دو گروه وجود ندارد و به‌عبارتی ترتیب پیچیدگی وظایف کاری تغییری در نرخ یادگیری و عملکرد کارکنان ایجاد نمی‌کند [۱۲]. عزیزی و لیانگ[۶] (۲۰۱۳) برای گمارش و گردش شغلی کارکنان و تعیین جدول آموزشی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه کردند. تابع هدف این مدل ریاضی کمینه‌سازی هزینه‌ها شامل

۱. Yue
۲. Highly motor tasks
۳. Zamiska, et al.
۴. Kim & Nembhard
۵. Guimarães, et al.
۶. Azizi & Liang

هزینه‌های آموزش، هزینه انعطاف‌پذیری و هزینه ازدست‌دادن بهره‌وری است. برای حل مدل نیز الگوریتم جست‌وجوی ابتکاری ارائه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که طول مدت فاصله گردش شغلی بر هزینه کل تأثیر دارد و هر چه فاصله‌ها کوتاه‌تر باشد، هزینه کل بیشتر می‌شود [۹]. آریانژاد و همکاران (۲۰۰۹) برای زمان‌بندی گردش شغلی ایمن مبتنی بر مهارت، برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح با توابع هدف کمینه‌سازی صدمات ناشی از وضعیت کاری را ارائه کردند [۷]. جابر و نیومن (۲۰۱۰) و اوتمن و همکاران[۱] (۲۰۱۲)، نیز برای ارائه مدل زمان‌بندی کارکنان، عوامل انسانی همچون سطح مهارت، آموزش، شخصیت، خستگی و بهبود را در نظر گرفتند [۱۵، ۲۴]. اکبری و همکاران (۲۰۱۳) برای زمان‌بندی کارکنان نامتناجس، عوامل انسانی همچون خستگی، رضایت کارکنان، چندمهارته‌بودن، بهره‌وری، نرخ حضور و سطح ارشدیت را مدنظر قرار دادند. با توجه به پیچیدگی مدل ارائه‌شده برای حل آن از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده کردند [۵]. جابر و همکاران (۲۰۱۳) برای توسعه مدل‌های شبیه‌سازی عوامل انسانی خستگی فیزیکی را به مدل یادگیری ـ فراموشی اضافه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که در نظرگرفتن یادگیری در فرایند تولید باعث کاهش خستگی و بهبود عملکرد سیستم تولیدی می‌شود. از طرف دیگر خستگی نیروی کار فرایند تولید را افزایش می‌دهد و موجب کاهش نرخ تولید می‌شود. در این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر عوامل انسانی بر یکدیگر و نرخ تولید از طراحی آزمایش‌ها استفاده شد [۱۶]. گیوی و همکاران[۲] (۲۰۱۵)، تأثیر ویژگی‌های انسانی (یادگیری ـ فراموشی، خستگی ـ تجدید نیرو) بر برنامه‌ریزی تولید در سیستم با محدودیت دوگانه را بررسی کردند. این پژوهش نشان داد که در سیستم‌های تولیدی که انسان نقش دارد، روش‌های زمان‌بندی کلاسیک بدون درنظرگرفتن عوامل انسانی کارایی ندارد [۱۱]. پژوهش‌های دیگری نیز برای توسعه مدل‌های با محدودیت دوگانه و روش‌های حل در پیشینه پژوهش ارائه شده‌اند که به‌نحوی شرایط، مفروضات و محدودیت‌های مختلفی را مدنظر قرار داده‌اند [۲۰، ۲۵، ۱۹].

بهره‌برداری از عملکرد بهینه کارکنان با استفاده از ارائه مدل زمان‌بندی نوبت کاری کارکنان در پژوهش اکبری و همکاران (۲۰۱۲) مطالعه شده است. در این پژوهش، عملکرد کارکنان به‌صورت متغیر و تابعی از خستگی ناشی از حجم کاری مدل‌سازی شده است. تابع هدف مدل ریاضی ارائه‌شده کمینه‌سازی هزینه‌های نیروی کار بوده و ابعاد ارگونومیکی کارکنان شامل یادگیری، فراموشی و خستگی در نظر گرفته شده است. این مطالعه نشان داده است که پارامترهای انسانی موردبررسی بر کارایی کارکنان و ساختار برنامه زمان‌بندی کارکنان تأثیر دارد [۴]. ازآنجاکه عملکرد مطلوب سیستم‌های تولید به تخصیص بهینه کارکنان به ایستگاه‌های

۱. Othman, et al.
۲. Givi, el al.

کاری وابسته است، عیوق و همکاران (۲۰۱۴) به مطالعه اهمیت جنبه‌های انسانی و ضرورت گردش شغلی در سلول‌های تولید ناب و خستگی ناشی از تکرار وظایف پرداختند [۸]. در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای زمان‌بندی کارکنان تک‌مهارته ارائه و با توجه به محدودیت‌های بسته‌های نرم‌افزاری در حل مسئله ارائه‌شده از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که درنظرگرفتن اثرات انسانی در مدل، هرچند به پیچیدگی آن می‌افزاید، می‌تواند نتایج زیادی به‌دست دهد.

اگرالی و همکاران[۱] (۲۰۱۷) برای زمان‌بندی کارکنان در صنایع خدماتی، انعطاف‌پذیری در ساعت‌های کاری و تعادل در تخصیص حجم کاری را مدل‌سازی کردند [۱]. توابع هدف مدل زمان‌بندی ارائه‌شده توسط آن‌ها بیشینه‌سازی رضایت کارکنان و بیشینه‌سازی انصاف در حجم کاری توزیع‌شده بین کارکنان بود. نتایج پژوهش نشان داد که مدل ارائه‌شده توانایی ارائه یک الگوی کاری بهینه را دارد. استفاده از کارکنان با مهارت‌های متعدد در مسئله زمان‌بندی کارکنان به‌منظور جابه‌جایی بین ایستگاه‌های تولید در مقاله تاسکیران و ژانگ[۲] (۲۰۱۷) بررسی شد [۳۰]. مدل ارائه‌شده در این پژوهش از نوع مسائل عدد صحیح است که سعی در زمان‌بندی نوبت و روزهای کاری دارد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های واقعی در یک مرکز تماس نشان داده شد که می‌توان با استفاده از مدل ارائه‌شده نوسان در تقاضای مشتریان را کنترل کرد و بدون استفاده از کارکنان مازاد درخواست مشتریان را پاسخ داد. ماتیا و همکاران[۳] (۲۰۱۷)، همین مسئله را در مرکز تماس موردمطالعه قرار دادند. برعکس مطالعات قبلی، در پژوهش ماتیا و همکاران (۲۰۱۷)، تعداد کارکنان برای اطمینان‌یافتن از سطح کیفیت مطلوب به‌صورت نامعلوم در نظر گرفته شد [۲۱]. مسئله ارائه از نوع عدد صحیح بود و نتایج نشان داد که بهتر است برای مدل‌سازی، زمان‌های کاری به‌صورت گسسته در نظر گرفته شود. مسئله زمان‌بندی با مدل عدد صحیح در پژوهش ژان و همکاران[۴] (۲۰۱۸) نیز با استفاده از روش بیزین بررسی شد [۳۶]. توابع هدف مدل ارائه‌شده شامل کمینه‌سازی هزینه کارکنان با توجه به سطح مطلوب کیفیت خدمات به مشتریان است. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که روش ارائه‌شده توانایی مطلوبی در حل مسائل زمان‌بندی با رویکرد عدم‌اطمینان در ورود تقاضای مشتریان دارد. برگی و همکاران[۵] (۲۰۱۹)، زمان‌بندی کارکنان در فروشگاه‌های خرده‌فروشی را با درنظرگرفتن تابع هدف کمینه‌سازی هزینه مرتبط با ترجیحات کاری کارکنان مطالعه کردند [۱۰]. تحلیل مدل عدد صحیح ارائه‌شده با استفاده از داده‌های واقعی نشان داد که کیفیت الگوی زمان‌بندی کارکنان

۱. Agrali, et al.
۲. Taskiran & zhang
۳. Mattia, et al.
۴. Zan, et al.
۵. Burgy, et al.

برای انجام حجم کاری دریافت‌شده افزایش یافته است. مدل ارائه‌شده توانایی تعریف طول زمان نوبت‌های کاری را دارد و با تعریف نوبت‌های کاری طولانی‌تر و متغیر بر اساس تقاضای مشتریان، زمان‌بندی بهینه ارائه می‌کند. این پژوهشگران اظهار داشتند که زمان‌بندی انعطاف‌پذیر در شرایط کاری مختلف یک استراتژی حیاتی است. با توجه به اهمیت زمان‌بندی انعطاف‌پذیر برای کارکنان، پورتو و همکاران[۱] (۲۰۱۹)، تأثیر استراتژی زمان‌بندی انعطاف‌پذیر ترکیبی[۲] برای کارکنان در صنایع خدماتی را بررسی کردند [۲۶]. استراتژی ترکیبی آن‌ها شامل قرارداد منعطف کاری و کارکنان چندمهارته بود. آن‌ها برای تعیین تعداد بهینه کارکنان ازهر نوع قرارداد و مهارت به‌منظور انجام وظایف تعریف‌شده یک مدل برنامه‌ریزی خطی و عدد صحیح توسعه دادند. نتایج مقایسات نشان داد که استراتژی ارائه‌شده برای زمان‌بندی کارکنان نسبت به زمانی که قرارداد کاری و مهارت‌ها ثابت و مشخص هستند، منفعت مالی برای سازمان دارد. سوریانو و همکاران[۳] (۲۰۲۰)، مسئله بهینه‌سازی زمان‌بندی کارکنان را با توجه به تقاضای متغیر مشتری در محیط واقعی بررسی کردند. مدل ارائه‌شده آن‌ها ترکیبی از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و برنامه‌ریزی خطی و عدد صحیح برای حل یک مسئله چندبعدی بود [۲۹]. آن‌ها برای ارائه یک زمان‌بندی بهینه نوبت‌های کاری را به‌صورت فاصله زمانی‌های منقطع در نظر گرفتند؛ همچنین ترجیحات کاری کارکنان نیز مدل‌سازی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که زمان‌بندی کارکنان یک مسئله سخت برای حل است و با توجه به درنظرگرفتن شرایط و مفروضات مختلف می‌توان مسائل گوناگونی را تعریف و ارائه کرد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که مدل ارائه‌شده توانایی مطلوبی در ارائه یک زمان‌بندی بهینه و قابل‌قبول برای کارکنان دارد. زمان‌بندی نوبت‌های کاری با چندین زمان استراحت برای کارکنان تمام‌وقت در پژوهش آلورز و همکاران[۴] (۲۰۲۰) موردبررسی و مدل‌سازی قرار گرفت [۶]. در این پژوهش به‌منظور کاهش هزینه‌های کمبود و مازاد نیروی کار از زمان‌بندی انعطاف‌پذیر برای نوبت‌های کاری و زمان‌های استراحت متعدد استفاده شده است. مدل ارائه‌شده این پژوهشگران متفاوت از پژوهش‌های قبلی است؛ زیرا مدل ارائه‌شده علاوه بر کمینه‌سازی هزینه‌های نیروی کار سعی در کمینه‌سازی تأثیرات منفی استراتژی نوبت‌های کاری گسسته دارد. مدل ارائه‌شده در صنعت خرده‌فروشی موردتحلیل قرار گرفت و نتایج آن نشان داد که مدل ارائه‌شده نه‌تنها می‌تواند هزینه‌های نیروی کار مازاد و کمبود را از طریق تخصیص زمان‌های استراحت کاهش دهد، بلکه توانایی ایجاد تعادل در زمان‌های استراحت تخصیص‌یافته به کارکنان را نیز دارد.

---

۱. Porto, et al.,
۲. Hybrid flexibility strategy
۳. Soriano et al.
۴. Alverz et al.

مسئله زمان‌بندی کارکنان بیمارستان به‌منظور کمینه‌سازی هزینه‌های کارکنان با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در پژوهش نوبیل و همکاران[۱] (۲۰۲۱) برررسی شد [۲۳]. هدف این پژوهش بهینه‌سازی زمان‌بندی نوبت‌های کاری با استفاده از کارکنان با مهارت مشابه و کمینه‌سازی هزینه‌های متغیر بیمارستان بود. برای حل مدل از نرم‌افزار لینگو[۲] استفاده شد و تحلیل یافته‌های این پژوهش در بیمارستان پاسارگاد تهران نشان داد که بهینه‌سازی زمان‌بندی با استفاده از نیروی کار ماهر در بخش‌ها می‌تواند هزینه‌های متغیر مرتبط با اضافه‌کاری، شب‌کاری و تعطیلات را تا ۱۰ درصد کاهش دهد. ازآنجاکه زمان‌بندی کارکنان و نوبت‌های کاری قابلیت کاربرد بالایی در صنعت و خدمات دارد، صدرآباد و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل ریاضی برای حل مسئله زمان‌بندی خدمات دوره‌ای ارائه کردند [۲۸]. در این گروه از مسائل تعدادی مشتری یا مراجعه‌کننده وجود دارند که به‌صورت دوره‌ای به‌منظور دریافت خدمت به سازمان مراجعه می‌کنند. در این پژوهش، مسئله زمان‌بندی مراجعه دانشجویان با هدف توزیع یکنواخت مراجعات و تعریف نوبت کاری پیوسته، در قالب یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح فرموله شد. برای اعتبارسنجی نیز مدل با استفاده از دو مثال عددی و یک مثال واقعی و با کمک نرم‌افزار لینگو حل شد. نتایج حل مثال‌های عددی نشان داد که مدل ارائه‌شده توانایی مطلوبی در حل مسائل مختلف دارد و زمان حل مسئله برای مسائل واقعی بسیار کوتاه و اثربخش است.

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که انعطاف‌پذیری در زمان‌بندی کارکنان روش مناسبی برای پاسخگویی به تقاضای مشتریان و کاهش هزینه‌های کارکنان است؛ همچنین در پیشینه پژوهش علی‌رغم مدل‌های ارائه‌شده برای زمان‌بندی سیستم با محدودیت دوگانه، بسیاری از ویژگی‌های انسانی و شرایط واقعی هنوز به‌طور کامل مدل‌سازی نشده است. در این پژوهش سعی می‌شود شرایط واقعی یکی از کارگاه‌های تولیدی پوشاک که یک سیستم با محدودیت دوگانه است، مدل‌سازی و راه‌حل مناسب ارائه شود. ترکیب کارکنان ماهر و نیمه‌ماهر به همراه ماشین‌های با سطح مهارت متفاوت، همراه با عوامل یادگیری ـ فراموشی، در این پژوهش بررسی و مدل‌سازی می‌شود.

۳. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر یک پژوهش کاربردی و توسعه‌ای است که با توجه به بررسی شرایط، مفروضات و محدودیت‌های محیط کار و مطالعات گذشته مدل مناسب برای زمان‌بندی کارکنان ارائه می‌کند. با توجه به تجربه کاری پژوهشگر در کارگاه‌های تولیدی کوچک، در این پژوهش شرایط کارگاه‌های تولیدی کوچک پوشاک مطالعه و مدل‌سازی شده است. در این کارگاه‌ها چند دستگاه

۱. Nobil et al.
۲. Lingo

تولیدی وجود دارد و هر دستگاه نیاز مهارتی متفاوت دارد؛ همچنین کارگران بر اساس مهارت-هایشان به یکی از این دستگاه‌ها تخصیص می‌یابند و غالباً جابه‌جایی بین دستگاه‌ها برای یک کارگر تعریف نمی‌شود. این در شرایطی است که بعضی از دستگاه‌های فرعی، مانند سردوز، همیشه در حال کار نیست؛ اما برای آن دستگاه یک کارگر ثابت تعریف می‌شود. مسئله موردبررسی در این پژوهش به این سؤال می‌پردازد که آیا به‌جای گمارش یک کارگر ثابت (کارگر تکمیلی) به دستگاه‌هایی که همیشه در حال کار نیستند، می‌توان از کارگر چندمهارته (کارگر اصلی) استفاده کرد. آیا استفاده از کارگر چندمهارته و ایجاد یک زمان‌بندی انعطاف‌پذیر برای کارگران برای چرخش بین دستگاه‌ها نسبت به روش استفاده ثابت از کارگران ثابت بدون چرخش شغلی مزیت دارد؟ با توجه به اینکه پارامترهای انسانی همچون یادگیری و فراموشی می‌تواند بر عملکرد کارگران به هنگام چرخش شغلی اثر بگذارد، در این پژوهش سعی شده است که اثر این عوامل انسانی نیز زمان‌بندی کارکنان مدل‌سازی شود.

در این کارگاه‌ها معمولاً n ماشین متشکل از ماشین دوزندگی، سردوز و میان‌دوز با درجه سختی متفاوت و m کارگر ماهر و نیمه‌ماهر یک سیستم تولیدی با محدودیت دوگانه وجود دارد. کلیه ویژگی‌های تعداد کارگر، ماشین، هزینه‌ها و محدودیت‌ها بر اساس داده‌های واقعی از کارگاه‌های تولیدی پوشاک مدل‌سازی شده است. ازآنجاکه چرخش شغلی بین ایستگاه‌های تولیدی می‌تواند موجب فراموشی نسبی مهارت و کاهش عملکرد فرد و عامل یادگیری نیز می‌تواند به هنگام انجام کارهای تکراری باعث افزایش عملکرد کارگر شود؛ بنابراین این دو عامل در مدل‌سازی زمان‌بندی کارکنان در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای انسانی مربوط به ضرایب یادگیری و فراموشی در شغل‌های مرتبط با تولید پوشاک بر اساس مطالعات گذشته و تجربه مشابه تعیین می‌شود. در این پژوهش دوره زمانی کاری هشت‌ساعته به‌صورت ۸ دوره یک‌ساعته مدل‌سازی می‌شود. با تبدیل زمان به پارامتر گسسته و استفاده از فرمول‌های یادگیری و فراموشی ارائه‌شده توسط توماس و نمبهارد (۲۰۰۴)، می‌توان اثرات این پارامترها را بر خروجی کارکنان محاسبه کرد [۳۱].

برای بررسی مدل ریاضی و تجزیه‌وتحلیل تأثیر پارامترهای هزینه کارکنان، نرخ یادگیری و فراموشی بر انتخاب طرح بهینه زمان‌بندی کارکنان، دو مدل پایه زمان‌بندی مورداستفاده در کارگاه‌های تولیدی پوشاک حل می‌شود. دو طرح زمان‌بندی مورداستفاده در کارگاه‌های تولیدی شامل استفاده از کارگران ثابت برای هر دستگاه تولیدی بدون چرخش شغلی و استفاده از کارگران چندمهارته و گردش شغلی بین دستگاه‌های تولیدی است.

به‌منظور ارائه یک زمان‌بندی بهینه به دو سؤال پژوهشی در دو طرح زمان‌بندی مرتبط با کارگاه‌های تولیدی کوچک پوشاک پاسخ داده می‌شود:

ـ تأثیر پارامتر نسبت هزینه کارگر فرعی/ تکمیلی (تک‌مهارته) به کارگر اصلی (چندمهارته) بر متغیر عملکرد زمان‌بندی سیستم با محدودیت دوگانه به چه صورت است؟
ـ تأثیر پارامتر یادگیری ـ فراموشی بر عملکرد زمان‌بندی کارکنان به چه صورت است؟

مدل ریاضی زمان‌بندی کارکنان در سیستم‌های با محدودیت دوگانه. در این پژوهش سیستم با محدودیت دوگانه به‌منظور ارائه مدل ریاضی زمان‌بندی کارکنان بررسی می‌شود. در این سیستم تعداد n دستگاه/ ماشین و تعداد m نیروی کار وجود دارد. ماشین‌های تولیدی در دو سطح با مهارت بالا (دستگاه دوزندگی) و مهارت پایین (دستگاه سردوز/ میان‌دوز) طبقه‌بندی می‌شود. کارکنان نیز به دو دسته کارکنان اصلی و تکمیلی طبقه‌بندی می‌شوند. تعداد کارکنان اصلی باید به تعداد ماشین‌های سطح بالا باشد. این ترکیب در بسیاری از کارگاه‌های کوچک تولیدی پوشاک وجود دارد. بعضی از کارفرمایان به‌منظور کاهش هزینه ترجیح می‌دهند که کارکنان اصلی بعد از اتمام کار بر ماشین اصلی (دستگاه دوزندگی) به دستگاه سردوز/ میان‌دوز جابه‌جا شوند و نیاز محصول به پردازش روی دستگاه فرعی را انجام دهند. بعضی دیگر از کارفرمایان برای افزایش سرعت تولید، علاوه بر کارکنان اصلی (برای دستگاه دوزندگی)، تعدادی کارکنان نیمه‌ماهر با هزینه دستمزد پایین‌تر برای کار بر روی دستگاه‌های سردوز/ میان‌دوز استخدام می‌کنند. در این سیستم تولیدی همیشه کارکنان اصلی مشغول کار هستند؛ اما کارکنان فرعی به‌دلیل آسان‌بودن پردازش و زمان کوتاه پردازش محصول بر روی ماشین سردوز/ میان‌دوز درصدی از زمان کاری بیکار هستند که این امر موجب افزایش هزینه‌ها می‌شود. متغیر تصمیم‌گیری در سیستم با محدودیت دوگانه موردبررسی سطح و ترکیب نیروی کار[۱] است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر مسئله، عوامل انسانی یادگیری و فراموشی نیروی کار با توجه به جابه جایی بین ماشین‌های تولیدی مدل‌سازی می‌شود. برای شبیه‌سازی منحنی یادگیری ـ فراموشی از مدل ارائه‌شده توسط توماس و نمبهارد (۲۰۰۴) استفاده می‌شود [۳۱].

برای ارائه مدل ریاضی مفروضات، محدودیت‌ها، متغیرها و اندیس‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

مفروضات و محدودیت‌های مدل ریاضی. برای طراحی مدل ریاضی سیستم با محدودیت دوگانه مفروضات زیر مدنظر قرار گرفت:
ـ تقاضای محصول/ برنامه‌ریزی تولید برای روزهای کاری مشخص و ثابت است؛
ـ حضور کارکنان مشخص و احتمال عدم‌حضور کارکنان وجود ندارد؛

۱. Staffing level

ـ افق برنامه‌ریزی محدود و برای یک هفته است؛
ـ هزینه کارکنان شامل هزینه روزانه است؛
ـ دو نوع ماشین تولیدی وجود دارد: ۱: ماشین دوزندگی، ۲: ماشین سردوز/ میان‌دوز؛
ـ دو نوع کارگر وجود دارد و هزینه کارگر اصلی بیشتر از هزینه کارگر تکمیلی است؛
ـ سطح مهارت کارگر اصلی بالاتر است و توان کار بر روی همه دستگاه‌ها را دارد. سطح مهارت کارگر تکمیلی پایین است و فقط مهارت کار بر روی دستگاه سردوز/ میان‌دوز را دارد؛
ـ یادگیری کارکنان با انجام متوالی کارها روی یک ماشین افزایش یافته و با دوربودن کارگر از ماشین خاص، فراموشی کارگر افزایش می‌یابد؛
ـ تعداد T نوبت کاری وجود دارد که بر اساس نیاز محصول به تعویض ماشین مشخص می‌شود (برای مثال، اگر یک محصول ۲ بار نیاز به دوزندگی و ۲ بار نیاز به سردوزی داشته باشد، ۴ نوبت کاری وجود خواهد داشت)؛
ـ تأثیر زمان استراحت بر فرایند یادگیری ـ فراموشی کارگر ناچیز در نظر گرفته شده است.

به‌منظور بررسی دقیق و تعیین سطح بهینه سطح و ترکیب نیروی کار فرض شده است که در یک هفته کاری، تنوع محصول وجود نداشته و عوامل مختل‌کننده فرایند تولید اعم از بیرونی (رکود، نبود مواد اولیه و غیره) و درونی (خرابی دستگاه‌ها، اتفاقات و حوادث و غیره) تأثیری بر فرایند کاری ندارد.

اندیس‌ها

i: نشان‌دهنده کارگر $(i=1, 2, \ldots, n,)$

t: نشان‌دهنده نوبت کاری $(t=1, 2, \ldots, T)$

متغیرها و پارامترهای مورداستفاده در مدل پیشنهادی

R_t^1: تعداد تولیدات موردنیاز برای پردازش در ماشین دوزندگی برای دوره زمانی t

R_t^2: تعداد تولیدات موردنیاز برای پردازش در ماشین سردوز/ میان‌دوز برای دوره زمانی t

x_{it}^1: متغیر تصمیم‌گیری گمارش کارگر اصلی i به ماشین دوزندگی در دوره زمانی t $(i=1, 2, \ldots, n1, \ t=1, 2, \ldots, T)$

x_{it}^2: متغیر تصمیم‌گیری گمارش کارگر اصلی i به ماشین سردوز/میاندوز در دوره زمانی t $(i=1, 2, \ldots, n1, \ t=1, 2, \ldots, T)$

y_{it}: متغیر تصمیم‌گیری گمارش کارگر تکمیلی i به ماشین سردوز/ میان‌دوز در دوره زمانی t $(i=1, 2, \ldots, n2, t=1, 2, \ldots, T)$

C_1: هزینه روزانه کارگر اصلی

C_2: هزینه روزانه کارگر تکمیلی

l_i^1: حداقل تجربه کارگر اصلی i بر روی ماشین دوزندگی (واحد اندازه‌گیری: تعداد تولید در دوره زمانی)

l_i^2: حداقل تجربه کارگر اصلی/ تکمیلی i بر روی ماشین سردوز/ میان‌دوز (واحد اندازه‌گیری: تعداد تولید در دوره زمانی)

K_i^1: حداکثر نرخ کارایی کارگر اصلی i بر روی ماشین دوزندگی با شرط یادگیری کامل (واحد اندازه‌گیری: تعداد تولید بر دوره زمانی)

K_i^2: حداکثر نرخ کارایی کارگر اصلی/ تکمیلی i بر روی ماشین سردوز/ میان‌دوز با شرط یادگیری کامل (واحد اندازه‌گیری: تعداد تولید بر دوره زمانی)

L_i^1: نرخ یادگیری کارگر اصلی i بر روی ماشین دوزندگی (واحد محاسباتی: تعداد دوره زمانی که کارگر i بر روی ماشین دوزندگی به نرخ تولید $K_i^1/2$ می‌رسد)

L_i^2: نرخ یادگیری کارگر اصلی/ تکمیلی i بر روی ماشین سردوز/ میان‌دوز (واحد محاسباتی: تعداد دوره زمانی که کارگر i بر روی ماشین سردوز/ میان‌دوز به نرخ تولید $K_i^2/2$ می‌رسد)

F_i^1: نرخ فراموشی کارگر اصلی i بر روی ماشین دوزندگی (واحد محاسباتی: تعداد دوره زمانی که کارگر i بر روی ماشین دوزندگی به‌علت دوربودن از تولید به نرخ تولید $K_i^1/2$ کاهش می‌یابد)

F_i^2: نرخ فراموشی کارگر اصلی/ تکمیلی i بر روی ماشین سردوز/ میان‌دوز (واحد محاسباتی: تعداد دوره زمانی که کارگر i بر روی ماشین سردوز/ میان‌دوز به‌علت دوربودن از تولید به نرخ تولید $K_i^2/2$ کاهش می‌یابد)

Q_{it}^1: نرخ تولید کارگر اصلی i بر روی ماشین دوزندگی در واحد زمانی t

Q_{it}^2: نرخ تولید کارگر اصلی i بر روی ماشین سردوز/ میان‌دوز در واحد زمانی t

Q'^2_{it}: نرخ تولید کارگر تکمیلی i بر روی ماشین سردوز/ میان‌دوز در واحد زمانی t

P^1_{it}: نرخ تولید کارگر اصلی i بر روی ماشین دوزندگی در طول واحد زمانی $t\text{-}1$ تا t

P^2_{it}: نرخ تولید کارگر اصلی i بر روی ماشین سردوز/ میان‌دوز در طول واحد زمانی $t\text{-}1$ تا t

P'^2_{it}: نرخ تولید کارگر تکمیلی i بر روی ماشین سردوز/ میان‌دوز در طول واحد زمانی $t\text{-}1$ تا t

w_i : نشان می‌دهد که آیا کارگر اصلی i گمارش یافته است یا خیر؟

v_i: نشان می‌دهد که آیا کارگر تکمیلی i گمارش یافته است یا خیر؟

مدل ریاضی یادگیری ـ فراموشی. مدل یادگیری ـ فراموشی مورداستفاده برای کارکنان اصلی (روابط ۱ و ۲) و کارکنان فرعی (رابطه ۳) در این پژوهش به صورت زیر است. برای توسعه مدل زمان‌بندی کارکنان مدل پژوهش توماس و نمبهارد (۲۰۰۴) به‌کار رفت [۳۱].

$$Q_{it}^{1} = l_i^1 + k_i^1 \left[1 - exp\left(-\frac{1}{L_i^1}\sum_{k=1}^{t} x_{ik}^1\right)\right] \times exp\left[\frac{1}{F_i^1}\left(\sum_{k=1}^{t} x_{ik}^1 - t\right)\right]$$ رابطه (۱)

$$Q_{it}^{2} = l_i^2 + k_i^2 \left[1 - exp\left(-\frac{1}{L_i^2}\sum_{k=1}^{t} x_{ik}^2\right)\right] \times exp\left[\frac{1}{F_i^2}\left(\sum_{k=1}^{t} x_{ik}^2 - t\right)\right]$$ رابطه (۲)

$$Q_{it}^{'2} = l_i^2 + k_i^2 \left[1 - exp\left(-\frac{1}{L_i^2}\sum_{k=1}^{t} y_{ik}\right)\right] \times exp\left[\frac{1}{F_i^2}\left(\sum_{k=1}^{t} y_{ik} - t\right)\right]$$ رابطه (۳)

با توجه به محاسبات انجام‌شده در پژوهش توماس و نمبهارد (۲۰۰۴) و کارایی محاسباتی برای محاسبه تولید کل یک سیستم که نشان‌دهنده مساحت زیر منحنی نرخ یادگیری است از روابط زیر استفاده می‌شود. روابط ۱، ۲ و ۳ نشان‌دهنده تولید آنی در زمان t است. با توجه به اینکه کارگر i بر روی ماشین در بازه زمانی *t-1* تا t به تولید ادامه می‌دهد؛ ازاین‌رو تولید کارگر در این بازه به‌صورت زیر (روابط ۴، ۵، و ۶) محاسبه می‌شود (برای مطالعه بیشتر به منبع [۳۱] مراجعه شود). برای محاسبه تولید تجمعی هر یک از کارگران نیز از روابط ۷، ۸ و ۹ استفاده می‌شود. شکل ۱، منحنی یادگیری ـ فراموشی مورداستفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد که در مقاله توماس و نمبهارد (۲۰۰۴) ارائه شده است [۳۱].

$$P_{it}^{1} = \frac{Q_{i,t-1}^{1} + Q_{it}^{1}}{2}$$ رابطه (۴)

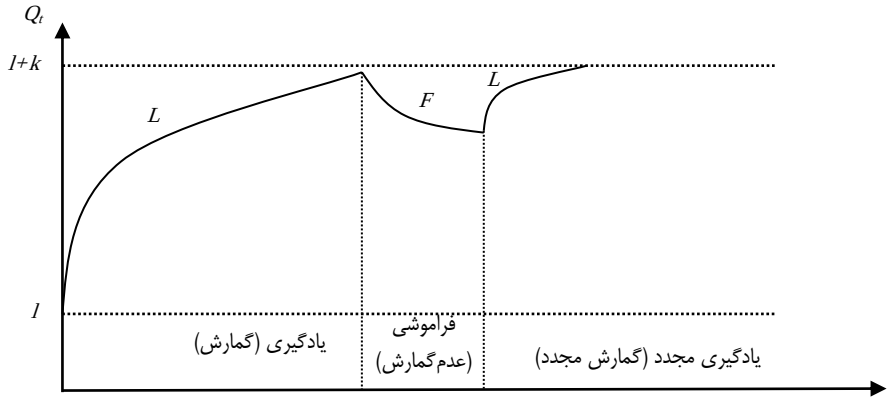
$$P_{it}^{2} = \frac{Q_{i,t-1}^{2} + Q_{it}^{2}}{2}$$ رابطه (۵)

$$P_{it}^{'2} = \frac{Q_{i,t-1}^{'2} + Q_{it}^{'2}}{2}$$ رابطه (۶)

$$\sum_{t=1}^{T} P_{it}^{1} = \sum_{t=1}^{T} \frac{Q_{i,t-1}^{1} + Q_{it}^{1}}{2}$$ رابطه (۷)

$$\sum_{t=1}^{T} P_{it}^{2} = \sum_{t=1}^{T} \frac{Q_{i,t-1}^{2} + Q_{it}^{2}}{2}$$ رابطه (۸)

$$\sum_{t=1}^{T} P_{it}^{'2} = \sum_{t=1}^{T} \frac{Q_{i,t-1}^{'2} + Q_{it}^{'2}}{2}$$ رابطه (۹)



شکل ۱. عملکرد کارگر با توجه به پارامترهای یادگیری و فراموشی [۲]

مدل ریاضی زمان‌بندی نیروی کار

$$\text{maximize } z = \frac{\sum_{t=1}^{T}(P_{it}^1+P_{it}^2+P_{it}^{'2})}{c_1\sum_{i=1}^{n} w_i + c_2\sum_{i=1}^{n} v_i}$$ رابطه (۱۰)

Subject to

$$x_{it}^1 + x_{it}^2 \le 1$$ رابطه (۱۱)

$$\sum_{i=1}^{n} P_{it}^1 \ge R_t^1$$ رابطه (۱۲)

$$\sum_{i=1}^{n} P_{it}^2 + \sum_{i=1}^{n} P_{it}^{'2} \ge R_t^2$$ رابطه (۱۳)

$$Q_{it}^1 = l_i^1 + k_i^1\left[1 - exp\left(-\frac{1}{L_i^1}\sum_{k=1}^{t} x_{ik}^1\right)\right] \times exp\left[\frac{1}{F_i^1}\left(\sum_{k=1}^{t} x_{ik}^1 - t\right)\right]$$ رابطه (۱۴)

$$Q_{it}^2 = l_i^2 + k_i^2\left[1 - exp\left(-\frac{1}{L_i^2}\sum_{k=1}^{t} x_{ik}^2\right)\right] \times exp\left[\frac{1}{F_i^2}\left(\sum_{k=1}^{t} x_{ik}^2 - t\right)\right]$$ رابطه (۱۵)

$$Q_{it}^{'2} = l_i^2 + k_i^2\left[1 - exp\left(-\frac{1}{L_i^2}\sum_{k=1}^{t} y_{ik}\right)\right] \times exp\left[\frac{1}{F_i^2}\left(\sum_{k=1}^{t} y_{ik} - t\right)\right]$$ رابطه (۱۶)

$$P_{it}^1 = \frac{Q_{i,t-1}^1+Q_{it}^1}{2}$$ رابطه (۱۷)

$$P_{it}^2 = \frac{Q_{i,t-1}^2+Q_{it}^2}{2}$$ رابطه (۱۸)

$$P_{it}^{'2} = \frac{Q_{i,t-1}^{'2}+Q_{it}^{'2}}{2}$$ رابطه (۱۹)

$$\sum_{t=1}^{T} P_{it}^1 = \sum_{t=1}^{T} \frac{Q_{i,t-1}^1+Q_{it}^1}{2}$$ رابطه (۲۰)

$$\sum_{t=1}^{T} P_{it}^2 = \sum_{t=1}^{T} \frac{Q_{i,t-1}^2+Q_{it}^2}{2}$$ رابطه (۲۱)

$$\sum_{t=1}^{T} P_{it}^{'2} = \sum_{t=1}^{T} \frac{Q_{i,t-1}^{'2}+Q_{it}^{'2}}{2}$$ رابطه (۲۲)

$$\begin{cases} 1, if\ \sum_{t=1}^{T} x_{it}^1 + x_{it}^2 \ne 0\ for\ \forall\ i \\ 0, \text{ در غیر این صورت} \end{cases}$$

رابطه (۲۳) $w_i =$

رابطه (۲۴) $v_i = \begin{cases} 1, if\ \sum_{t=1}^{T} y_{it} \neq 0\ for\ \forall\ i \\ 0, \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

رابطه (۲۵) $x_{it}^1 \in \{1, 0\} \qquad \forall\ i, t$

رابطه (۲۶) $x_{it}^2 \in \{1, 0\} \qquad \forall\ i, t$

رابطه (۲۷) $y_{it} \in \{1, 0\} \qquad \forall\ i, t$

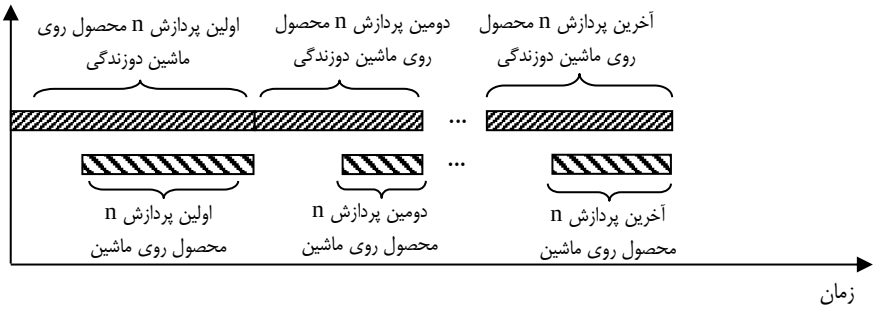
متغیرهای تصمیم مدل ریاضی ارائه‌شده از نوع صفر و یک است و به‌دلیل وجود توابع لگاریتمی در محاسبات مربوط به عملکرد کارگر با توجه به عوامل یادگیری و فراموشی مطابق شکل ۱، مدل ریاضی زمان‌بندی کارکنان از نوع برنامه عدد صحیح و غیرخطی است. تابع هدف این مدل ریاضی (رابطه ۱۰) سعی در بیشینه‌سازی نسبت تولیدات تجمعی به هزینه‌های کارگری دارد. تولید تجمعی برای کارگران مختلف با استفاده از روابط ۱۷ تا ۱۹، محاسبه می‌شود و در بخش محدودیت‌ها نشان داده شده است. روابط ۱۴ تا ۱۶، نیز با توجه به پارامترهای یادگیری و فراموشی عملکرد کارگر را با توجه دستگاه‌های تخصیص‌یافته محاسبه می‌کند. روابط مربوط به محاسبه کارکرد کارگر با توجه به چرخش شغلی و اثرات آن بر عملکرد با درنظرگرفتن عوامل یادگیری و فراموشی (محدودیت‌های ۱۴ تا ۱۹) از پژوهش توماس و نمبهارد (۲۰۰۴)، استخراج شده است [۳۱]. محدودیت ۱۱، نشان می‌دهد که کارگر اصلی i نمی‌تواند هم‌زمان در دوره زمانی t به ماشین دوزندگی و سردوز/ میان‌دوز گمارش یابد. محدودیت ۱۲، نیز کنترل می‌کند که در ماشین دوزندگی تولیدات کارگر اصلی i حداقل نیازمندی‌های تولیدی دوره زمانی t را برآورده می‌کند. به‌طور مشابه محدودیت ۱۳، نشان می‌دهد که مجموع تولیدات پردازش‌شده بر روی ماشین سردوز/ میان‌دوز توسط کارگر اصلی و تکمیلی i باید حداقل نیازمندی‌های تولیدی در دوره زمانی t را تأمین کند. محدودیت‌های ۲۳ و ۲۴ بر اساس متغیر تخصیص کارگر اصلی و فرعی مشخص می‌کند که آیا آن کارگر در آن روز گمارش شده است یا خیر؟ محدودیت‌های ۲۵، ۲۶ و ۲۷، نشان می‌دهند که متغیرهای گمارش کارکنان اصلی و تکمیلی باید صفر و یا یک باشد.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

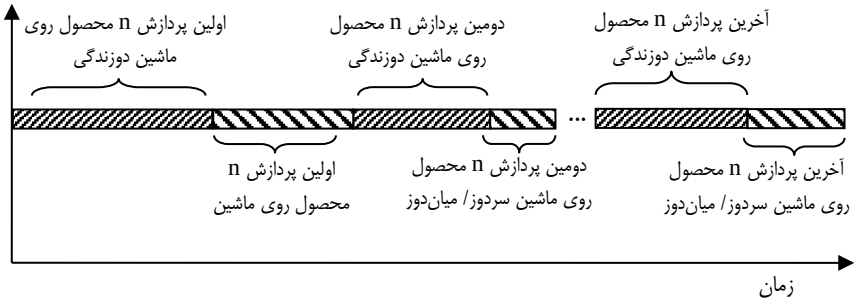
در این بخش از پژوهش به بررسی دو طرح زمان‌بندی مورداستفاده در کارگاه‌های کوچک تولیدی پوشاک و تأثیر پارامترهای مستقل بر تابع هدف مدل ریاضی (کارایی سیستم محدودیت دوگانه) پرداخته می‌شود. دو مدل پایه زمان‌بندی در این پژوهش در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. شکل ۲، طرح زمان‌بندی با استفاده از کارکنان اصلی و تکمیلی را نشان می‌دهد. در این طرح، کارکنان اصلی همیشه در حال کار بر روی ماشین دوزندگی و کارکنان تکمیلی همیشه در حال کار بر روی ماشین سردزو/ میان‌دوز هستند و جابه‌جایی کارکنان بین ماشین‌های وجود ندارد. شکل ۳، نشان‌دهنده طرح زمان‌بندی با استفاده از کارکنان اصلی است. در این طرح زمان‌بندی فقط برای کارکنان اصلی است و بعد از اتمام کار بر روی ماشین دوزندگی، کارگر اصلی به ماشین سردوز/ میان‌دوز جابه‌جا می‌شود و نیازمندی پردازش محصول را انجام می‌دهد. پارامترهای مستقل موردبررسی در محاسبات عددی عبارت‌اند از: نرخ یادگیری، نرخ فراموشی و نسبت هزینه کارگر فرعی به کارگر اصلی. کارایی سیستم (متغیر وابسته) عبارت از نسبت تعداد تولیدات به هزینه کارگران است. با توجه به جابه‌جایی کارکنان و منحنی یادگیری ـ فراموشی سؤال اصلی پژوهش این است که کدام طرح زمان‌بندی برای کارگاه‌های تولیدی کوچک پوشاک کارایی بیشتری دارد؟ طرح نخست، زمان‌بندی با یک نوع کارگر (طرح زمان‌بندی کارکنان چند مهارته با چرخش شغلی) و طرح دوم زمان‌بندی با دو نوع کارگر (طرح زمان‌بندی کارکنان تک-مهارته با شغل ثابت) است.

نتایج عددی مسائل مختلف زمان‌بندی. برای حل مسئله زمان‌بندی ارائه‌شده از نرم‌افزار گمز[۱] و حل‌کننده خطی بارون[۲] استفاده شد. نرم‌افزار گمز، به‌دلیل استفاده از حل‌کننده‌های مختلف، قابلیت بالایی در حل مسائل مختلف ازجمله عدد صحیح و غیرخطی دارد. به‌منظور بررسی کارایی مدل ریاضی زمان‌بندی کارکنان مجموعه مثال‌های متعدد با پارامترهای مختلف توسط نرم‌افزار حل شد که نتایج مربوط به هر طرح و مقایسه آن‌ها ارائه شده است. به‌منظور حل طرح ۲ (فقط نیروی کار اصلی) مقدار متغیر مربوط به کارگر تکمیلی صفر در نظر گرفته شده و مسئله توسط مدل ریاضی حل شد. در طرح دوم نیز استفاده از متغیر مربوط به کارگر تکمیلی ۱ در نظر گرفته شد. با تغییرات انجام‌شده مسائل ارائه‌شده حل و نتایج دو طرح موردمقایسه قرار گرفت.

۱ GAMZ
۲ BARON Solver



شکل ۲. فرایند پردازش محصول در طرح زمان‌بندی استفاده از نیروی کار اصلی و تکمیلی



شکل ۳. فرایند پردازش محصول در طرح زمان‌بندی استفاده از نیروی کار اصلی

برای مسائل مختلف زمان‌بندی کارکنان پارامترهای انسانی به‌صورت زیر است:

ـ نرخ یادگیری در سه سطح یادگیری پایین ($L=3$)، یادگیری متوسط ($L=2$) و یادگیری سریع ($L=1$) در نظر گرفته شده است؛

ـ نرخ فراموشی نیز در سه سطح فراموشی پایین ($F=3$)، فراموشی با نرخ متوسط ($F=2$) و فراموشی سریع ($F=1$) در نظر گرفته شده است؛

ـ نسبت هزینه کارگر فرعی به اصلی (v_i/w_i) نیز با توجه به دو طرح زمان‌بندی و سطوح یادگیری ـ فراموشی در فاصله ۴۰ تا ۹۰ درصد بررسی می‌شود.

به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای یادگیری، فراموشی و هزینه‌های کارگری و مقایسه دو طرح زمان‌بندی در این پژوهش سایر پارامترها به‌صورت زیر تعریف می‌شود؛ همچنین در کلیه زمان‌بندی‌ها فرض شده است که محصولات پردازش‌شده در هر دو ساعت روی ماشین دوزندگی در دوره زمانی بعدی نیازمند پردازش یک‌ساعته بر روی ماشین سردوز/ میان‌دوز است. به عبارت دیگر نسبت زمانی ماشین فرعی به اصلی ۰/۵ است. به‌منظور بررسی مدل ارائه‌شده و قابلیت حل مدل توسط نرم‌افزار گمز، مثال‌های مختلف با پارامترهای یادگیری و فراموشی متفاوت حل و

نتایج آن ارائه شد. پارامترهای یادگیری و فراموشی در سه سطح پایین، متوسط و زیاد مطابق با جدول ۱، در نظر گرفته شد است.

جدول ۱. پارامترهای مسئله همراه مقادیر آن‌ها

طرح زمان‌بندی	دوره‌های زمانی	حداقل تجربه اولیه	حداکثر نرخ کارایی
نیروی کار اصلی (شکل ۱)	۸ دوره زمانی یک‌ساعته	$l_i^1=(۳۰, ۴۰)$	$K_i^1=(۵۰, ۶۰)$
نیروی کار اصلی و نیروی کار فرعی (شکل ۲)	۸ دوره زمانی یک‌ساعته	$l_i^1=(۳۰, ۴۰)$ $l_i^2=(۳۰, ۴۰)$	$K_i^1=(۵۰, ۶۰)$ $K_i^2=(۵۰, ۶۰)$
پارامتر یادگیری ـ فراموشی	سطح یادگیری ـ فراموشی سریع		$L=۱, F=۱$ *(۱ دوره ۱۰ دقیقه‌ای)*
	سطح یادگیری ـ فراموشی متوسط		$L=۲, F=۲$ *(۲ دوره ۱۰ دقیقه‌ای)*
	سطح یادگیری ـ فراموشی کند		$L=۳, F=۳$ *(۳ دوره ۱۰ دقیقه‌ای)*

به‌منظور بررسی درستی و عملکرد مدل ریاضی ارائه‌شده، مجموعه مثال‌های مختلف با پارامترهای مختلف ارائه و با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شد. مسائل مختلف با پارامترهای آن و نتایج حل این مسائل با استفاده از نرم‌افزار گمز در جدول ۲، نشان داده شده است. برای بررسی بیشتر نتایج متغیرهای تصمیم برای مسئله ۱ در جدول ۳، نشان داده شده است. جدول ۲، مقدار تابع هدف همراه زمان محاسباتی نرم‌افزار گمز را نشان می‌دهد. حل مسائل مختلف نشان داد که نرم‌افزار استفاده‌شده توانایی مطلوبی در حل مسئله زمان‌بندی ارائه‌شده دارد؛ اما با بزرگ‌ترشدن مسئله زمان محاسباتی نرم‌افزار نیز افزایش یافته است و این نشان می‌دهد که پیچیدگی مسئله با افزایش تعداد متغیرهای تصمیم افزایش می‌یابد و برای مسائل بزرگ به توسعه روش‌های حل بهینه نیاز است. اگرچه پژوهشگر در پژوهش‌های بعدی سعی در توسعه الگوریتم بهینه برای حل مسائل زمان‌بندی کارکنان دارد (به‌واسطه داشتن متغیرهای صفر و یک و غیرخطی از پیچیدگی محاسباتی برخوردار است).

جدول ۲. مسائل زمان‌بندی با پارامترهای مختلف و نتایج حل توسط نرم‌افزار گمز

مثال	تعداد کارگران اصلی (n1) و فرعی (n2)	سطح یادگیری- فراموشی	تعداد تولیدات موردنیاز	هزینه کارگر اصلی و تکمیلی	پارامتر حداقل تجربه	پارامتر نرخ کارایی	مقدار تابع هدف	مدت‌زمان محاسباتی (ثانیه)
۱	n1=۵ n2=۲	L=۱, F=۱	R_t^1=۱۰ R_t^2=۴	C_1=۹۰۰۰۰ C_2=۴۰۰۰۰	l_i^1= ۳۰ l_i^2= ۳۲	K_i^1=۵۲ K_i^2=۵۰	۰/۰۰۳۱	۱۲ ثانیه
۲	n1=۵ n2=۲	L=۱, F=۱	R_t^1=۱۰ R_t^2=۳	C_1=۹۰۰۰۰ C_2=۳۰۰۰۰	l_i^1= ۳۰ l_i^2= ۳۲	K_i^1=۵۲ K_i^2=۵۰	۰/۰۰۳۴	۱۱ ثانیه
۳	n1=۵ n2=۲	L=۱, F=۱	R_t^1=۱۰ R_t^2=۲	C_1=۹۰۰۰۰ C_2=۲۰۰۰۰	l_i^1= ۳۰ l_i^2= ۳۲	K_i^1=۵۲ K_i^2=۵۰	۰/۰۰۲۷	۱۳ ثانیه
۴	n1=۶ n2=۳	L=۲, F=۲	R_t^1=۱۵ R_t^2=۱۰	C_1=۱۰۰۰۰۰ C_2=۵۰۰۰۰	l_i^1= ۳۲ l_i^2= ۳۵	K_i^1=۵۵ K_i^2=۵۳	۰/۰۰۲۱	۱۳ ثانیه
۵	n1=۶ n2=۳	L=۲, F=۲	R_t^1=۱۵ R_t^2=۸	C_1=۱۰۰۰۰۰ C_2=۴۰۰۰۰	l_i^1= ۳۲ l_i^2= ۳۵	K_i^1=۵۵ K_i^2=۵۳	۰/۰۰۲۳	۱۷ ثانیه
۶	n1=۶ n2=۳	L=۲, F=۲	R_t^1=۱۵ R_t^2=۴	C_1=۹۰۰۰۰ C_2=۳۰۰۰۰	l_i^1= ۳۲ l_i^2= ۳۵	K_i^1=۵۵ K_i^2=۵۳	۰/۰۰۱۹	۱۸ ثانیه
۷	n1=۸ n2=۳	L=۳, F=۳	R_t^1=۲۰ R_t^2=۱۲	C_1=۱۱۰۰۰۰ C_2=۵۰۰۰۰	l_i^1= ۳۵ l_i^2= ۴۰	K_i^1=۶۰ K_i^2=۵۶	۰/۰۰۲۱	۳۴ ثانیه
۸	n1=۸ n2=۳	L=۳, F=۳	R_t^1=۲۰ R_t^2=۱۰	C_1=۱۰۵۰۰۰ C_2=۴۰۰۰۰	l_i^1= ۳۵ l_i^2= ۴۰	K_i^1=۶۰ K_i^2=۵۶	۰/۰۰۱۸	۴۲ ثانیه
۹	n1=۸ n2=۳	L=۳, F=۳	R_t^1=۲۰ R_t^2=۸	C_1=۹۰۰۰۰ C_2=۳۰۰۰۰	l_i^1= ۳۵ l_i^2= ۴۰	K_i^1=۶۰ K_i^2=۵۶	۰/۰۰۱۵	۵۹ ثانیه

جدول ۳. جواب مسئله ۱ در نرم‌افزار گمز

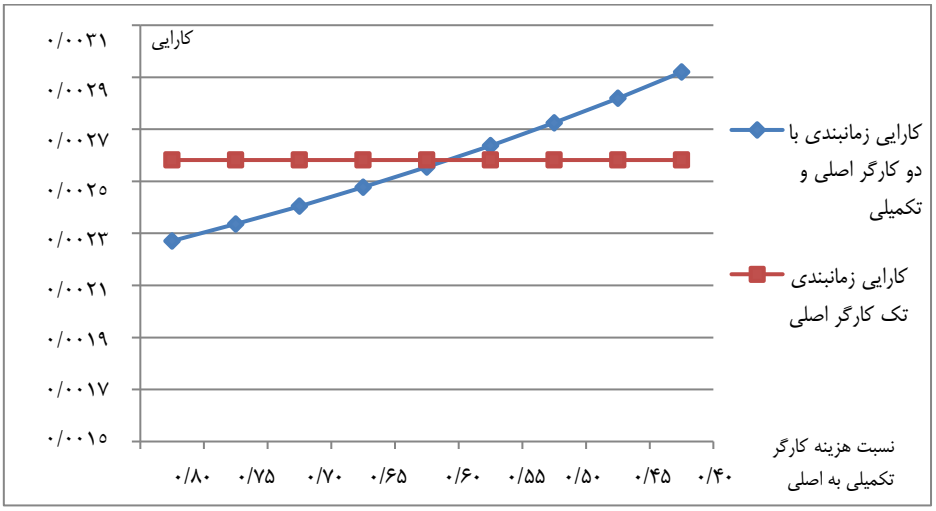
متغیر مسئله	بازه زمانی زمان‌بندی کارکنان							
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8
تعداد کارکنان اصلی	۵	۵	۴	۴	۴	۴	۴	۴
تعداد کارکنان فرعی	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱

جواب بهینه برای مسئله ۱ در نرم‌افزار گمز نشان می‌دهد که محدودیت‌های مدل ریاضی نقض نشده است و با توجه به ضریب یادگیری، عملکرد کارکنان افزایش یافته و برای نوبت‌های بعدی تعداد کارکنان کمتری برای هر نوبت تعریف شده است. تعداد کارکنان فرعی از نوبت کاری چهارم به بعد به یک نفر و تعداد کارکنان اصلی از ۵ نفر به چهار نفر در نوبت کاری سوم به بعد کاهش یافته است. سایر راه‌حل‌های به‌دست‌آمده برای مسائل مختلف (با پارامترهای متفاوت مسئله) نشان می‌دهد که ساختار نوبت کاری نیز متفاوت به‌دست آمد؛ همچنین بررسی این موارد

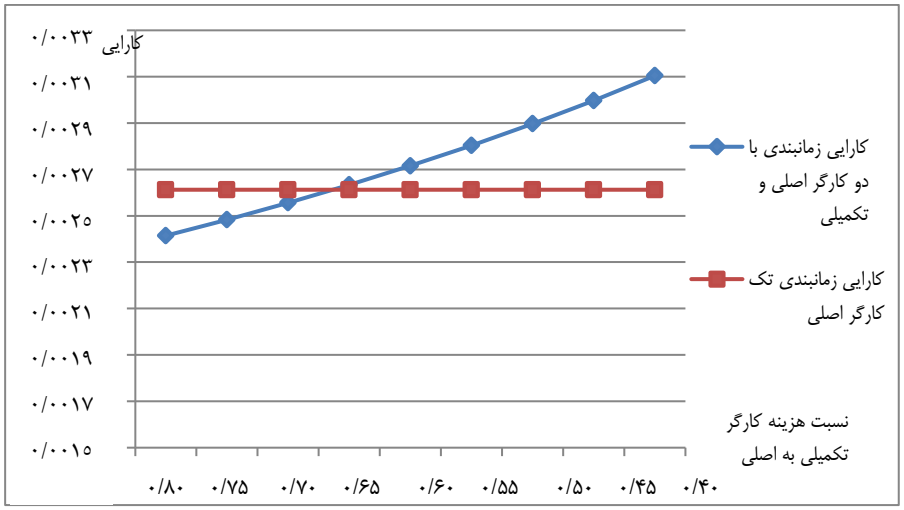
نیز حاکی از درست‌بودن مدل ریاضی و قابلیت اجرای زمان‌بندی کارکنان است. نتایج نشان می‌دهد که مدل ریاضی ارائه‌شده توانایی خوبی در حل مسئله زمان‌بندی کارگاه‌های تولیدی پوشاک و یا سایر کارگاه‌های با ساختار مشابه دارد.

بررسی کارایی دو سناریوی زمان‌بندی. برای بررسی کارایی دو برنامه زمان‌بندی کاملاً متفاوت (زمان‌بندی کاری با استفاده صرف از کارکنان اصلی به‌صورت چندمهارته و طرح زمان‌بندی کارکنان با استفاده از کارکنان تک‌مهارته بدون چرخش شغلی) از دو طرح تعریف‌شده در این پژوهش استفاده شد.

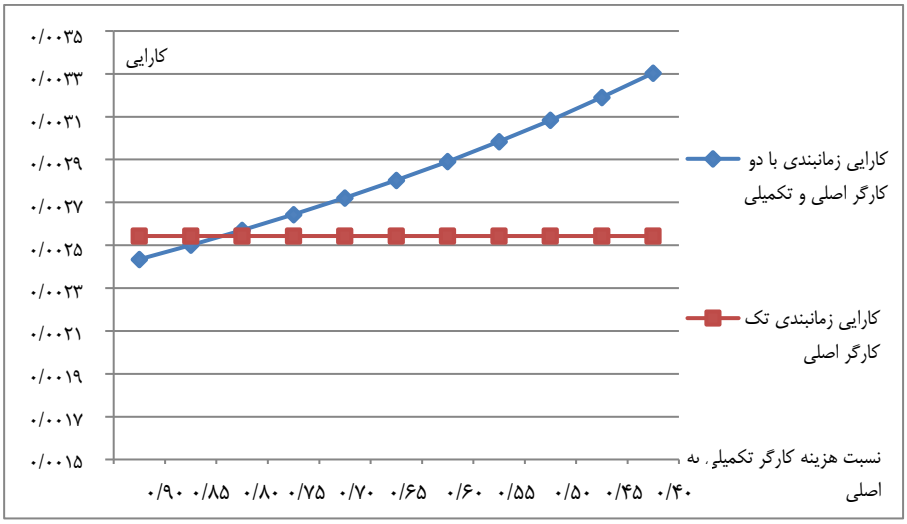
دو برنامه زمان‌بندی موردبررسی در این مطالعه با استفاده از مدل ریاضی عدد صحیح غیرخطی و مسائل عددی مختلف با توجه به پارامترهای انسانی جدول ۱، موردبررسی قرار گرفت. به‌منظور تجزیه‌وتحلیل طرح‌های زمان‌بندی کارکنان چندین مسئله با پارامترهای ارائه‌شده حل شد. کارایی دو طرح زمان‌بندی با توجه به نسبت‌های مختلف هزینه کارگر تکمیلی به کارگر اصلی محاسبه و مقایسه شد. این مقایسات کارایی طرح‌های زمان‌بندی با توجه به نرخ‌های یادگیری و فراموشی متفاوت در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴. مقایسه کارایی دو طرح زمان‌بندی با نرخ یادگیری-فراموشی پایین



شکل ۵. مقایسه کارایی دو طرح زمان‌بندی با نرخ یادگیری ـ فراموشی متوسط



شکل ۶. مقایسه کارایی دو طرح زمان‌بندی با نرخ یادگیری-فراموشی بالا

در پاسخ به سؤال پژوهشی ۱ مشاهده می‌شود که در شکل ۴، زمانی که نسبت هزینه کارگر تکمیلی به کارگر اصلی نزدیک به نقطه ۰/۶۰ است، دو طرح زمان‌بندی کارایی یکسانی دارند. از این نقطه به بعد با افزایش هزینه کارگر تکمیلی، کارایی طرح زمان‌بندی فقط با استفاده از کارگر اصلی بیشتر بوده و با کاهش هزینه کارگر تکمیلی، کارایی طرح زمان‌بندی با دو نوع کارگر اصلی و تکمیلی بیشتر است. این تعادل طرح‌های زمان‌بندی با توجه به نرخ یادگیری ـ فراموشی بالاتر در شکل‌های ۵ و ۶، مشاهده می‌شود؛ با این تفاوت که نقطه برابری طرح‌ها به درصد بالاتری از

نسبت هزینه کارگر تکمیلی به اصلی (نرخ یادگیری ـ فراموشی متوسط نزدیک به ۶۵ درصد و نرخ یادگیری ـ فراموشی بالا نزدیک به ۸۵ درصد) رسیده است. در این نمودارها با افزایش نرخ یادگیری ـ فراموشی بهتر است از طرح‌های زمان‌بندی با ترکیب دوگانه کارکنان اصلی و تکمیلی استفاده شود؛ بنابراین در پاسخ به سؤال پژوهشی ۲ می‌توان بیان کرد که با افزایش نرخ یادگیری ـ فراموشی، جابه‌جایی کارگر اصلی از ماشین دوزندگی به ماشین سردوز/ میاندوز و برعکس باعث کاهش کارایی و سرعت تولید کارگر می‌شود و درنتیجه کارایی سیستم با محدودیت دوگانه کاهش می‌یابد. این نمودارها همچنین نشان می‌دهد که استفاده از سیستم زمان‌بندی با دو نوع کارگر با توجه به هزینه بالای کارگر تکمیلی ممکن است کارایی بالایی نداشته باشد. در شکل ۶، مشاهده می‌شود که علی‌رغم بالابودن نرخ یادگیری و فراموشی، زمانی که نسبت هزینه کارگر تکمیلی به هزینه کارگر اصلی بیش از ۰/۸۵ باشد، طرح زمان‌بندی با یک نوع کارگر کارایی بهتری نسبت به طرح زمان‌بندی با دو نوع کارگر دارد؛ ازاین‌رو بهتر است در مقایسه طرح‌های زمان‌بندی در سیستم‌های با محدودیت دوگانه برای مسئله مطرح‌شده علاوه بر نرخ یادگیری ـ فراموشی نسبت هزینه کارگران نیز موردتوجه قرار گیرد.

مقایسه سناریوهای زمان‌بندی نشان می‌دهد که نمی‌توان به‌صورت کلی و جهان‌شمول یک طرح را به‌عنوان طرح بهینه انتخاب کرد؛ بنابراین برای بهبود کارایی سیستم‌های مدیریتی پیشنهاد می‌شود که ابتدا به اندازه‌گیری پارامترهای انسانی در محیط کاری پرداخت و سپس با استفاده از نسبت‌های هزینه کارگر تکمیلی به اصلی، طرح زمان‌بندی بهینه انتخاب شود؛ همچنین می‌توان در شرایطی که استفاده از کارکنان اصلی توجیه اقتصادی دارد و نسبت هزینه کارگر تکمیلی به اصلی بالا است، کارکنان را به‌صورت چندمهارته آموزش داد و با استفاده از مدل ریاضی بهینه‌سازی ارائه‌شده طرح بهینه زمان‌بندی را مشخص کرد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل بهینه‌سازی ارائه‌شده، قابلیت کاربرد مدل‌های ریاضی ارگونومی توماس و نمبهارد (۲۰۰۴) را دارد. در مقایسه با پژوهش توماس و نمبهارد (۲۰۰۴)، مدل ریاضی ارائه‌شده، مدل توسعه‌یافته و کاربردی در حوزه زمان‌بندی نوبت‌های کاری کارکنان با توجه به مهندسی عوامل انسانی است [۳۱]. پژوهش حاضر همچنین با بهره‌گیری از عوامل انسانی توانایی مطلوبی در مقایسه کارایی سناریوهای مختلف زمان‌بندی دارد؛ درصورتی‌که در پژوهش‌های اکبری (۲۰۱۷)، فقط به استفاده از عوامل انسانی در مدل‌سازی زمان‌بندی کارکنان پرداخته شده است [۲، ۳]. برخلاف پژوهش‌های اکبری و همکاران (۲۰۱۲) و اکبری و همکاران (۲۰۱۳) که همانند سایر پژوهش‌ها به بررسی کارکنان چندمهارته و تک‌مهارته در مسئله زمان‌بندی کارکنان پرداخته شده [۵-۴]، در این پژوهش، زمان‌بندی کارگران ماهر و نیمه‌ماهر مدل‌سازی شده است و نتایج تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده توانایی مطلوبی در ارائه یک نوبت کاری بهینه با توجه به کارگران ماهر و نیمه‌ماهر دارد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش مسئله زمان‌بندی در سیستم‌های با محدودیت دوگانه در کارگاه‌های کوچک تولیدی پوشاک بررسی و مدل‌سازی شد. یکی از مهم‌ترین مسائل در این کارگاه‌ها چگونگی استفاده از کارگران چندمهارته و تک‌مهارته برای کار بر روی ماشین‌های دوزندگی، سردوز و میان‌دوز است. بسیاری از مطالعات گذشته زمان‌بندی سیستم‌های با محدودیت دوگانه با کارکنان نامتجانس را بررسی کرده‌اند؛ اما مطالعه موردی حاضر از ابعاد سطح مهارت و نوع ماشین و هزینه متغیر مرتبط با نوع کارگر و لزوم پرداخت حقوق روزانه کارگران حتی در صورت بیکاری درصدی از روز مسئله‌ای جدید را ارائه می‌کند. برای مسئله موردبررسی مدل ریاضی عدد صحیح غیرخطی با درنظرگرفتن عوامل انسانی یادگیری و فراموشی ارائه شد. ازآنجاکه در این مسائل جابه‌جایی کارکنان بین ماشین‌ها امری ضروری است، عملکرد کارکنان با استفاده از مدل یادگیری ـ فراموشی توماس و نمبهارد (۲۰۰۴)، مدل‌سازی شد. تابع هدف مدل ریاضی زمان‌بندی بیشینه‌سازی کارایی سیستم (مقدار تولید نسبت به هزینه کارگران) در نظر گرفته شد. برای بررسی رابطه بین نرخ‌های یادگیری و فراموشی و نسبت هزینه کارگر تکمیلی/ فرعی به هزینه کارگر اصلی و کارایی زمان‌بندی کارکنان، مجموعه مثال‌های مختلف با پارامترهای متفاوت حل شد؛ همچنین دو مدل زمان‌بندی کارکنان موردتحلیل قرار گرفت. دو طرح زمان‌بندی شامل زمان بندی بر مبنای استفاده صرف از کارگران اصلی و جابه‌جایی آنان بین ماشین‌های دوزندگی و سردوز/ میان‌دوز و زمان‌بندی با استفاده از کارگران اصلی و کارگران تکمیلی و عدم‌جابه‌جایی بین ماشین‌ها است. پارامترهای مدل زمان‌بندی بر مبنای کارگاه‌های تولیدی کوچک پوشاک تنظیم شد. مسائل مختلف با استفاده از نرم‌افزار گمز و حل‌کننده بارون حل شد. نتایج عددی حل مدل‌های زمان‌بندی نشان داد که نرم‌افزار گمز توانایی مطلوبی در حل مسائل زمان‌بندی کارکنان با توجه به عوامل انسانی یادگیری و فراموشی دارد؛ همچنین مشخص شد که متغیرهای یادگیری، فراموشی و نسبت هزینه کارگران بر عملکرد زمان‌بندی سیستم با محدودیت دوگانه تأثیر دارد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ یادگیری ـ فراموشی مدل زمان‌بندی با دو نوع کارگر و بدون جابه‌جایی بین ماشین‌ها کارآمدتر است؛ ازاین‌رو استفاده از زمان‌بندی با یک نوع کارگر (ماهر) و جابه‌جایی کارگران بین ماشین‌ها زمانی کارایی دارد که نرخ یادگیری ـ فراموشی پایین باشد؛ همچنین در نرخ یادگیری ـ فراموشی پایین، نقطه برابری دو مدل زمان‌بندی نزدیک به ۶۰ درصد است. بدین معنی که براس استفاده هم‌زمان از کارگر اصلی و تکمیلی، باید دستمزد روزانه کارگر تکمیلی کمتر از ۶۰ درصد دستمزد کارگر اصلی باشد. به‌طور مشابه در نرخ‌های یادگیری ـ فراموشی متوسط و بالا نقطه تعادل طرح‌های زمان‌بندی نزدیک مقادیر ۶۵ و ۸۰ درصد است؛ بنابراین با افزایش نرخ یادگیری ـ فراموشی، نقطه تعادل طرح‌های زمان‌بندی نیز افزایش می‌یابد.

نتایج نشان می‌دهد که دستمزد پرداختی به کارگران نیمه‌ماهر نیز بر کارایی طرح زمان‌بندی تأثیر دارد؛ بنابراین کارفرمایان توجه داشته باشند که پرداخت درصدی مشخص از دستمزد کارگر ماهر به کارگر نیمه‌ماهر می‌تواند زمان‌بندی با دو نوع کارگر ماهر و نیمه‌ماهر را توجیه کند و چنانچه این درصد افزایش یابد، زمان‌بندی با یک نوع کارگر ماهر کارایی بیشتری دارد. با توجه به نتایج عددی می‌توان بیان کرد که کارفرمایان برای زمان‌بندی کارگران و استفاده از کارگران ترکیبی با مهارت متفاوت باید به نرخ یادگیری و فراموشی نوع کار توجه کنند؛ بنابراین برای کارگاه‌هایی که سعی در تعیین ساختار نوبت‌های کاری دارند، پیشنهاد می‌شود که علاوه بر درنظر گرفتن نوع کار و میزان سختی آن در یادگیری و فراموشی، میزان مهارت کارگران را نیز مدنظر قرار دهند.

مدل ارائه‌شده در این پژوهش و نتایج آن برای کارگاه‌های کوچک تولیدی پوشاک می‌تواند بسیار کاربردی باشد و نقطه بهینه تعیین دستمزد کارگران نیمه‌ماهر را مشخص کند؛ بنابراین کارفرمایان می‌توانند بر اساس سختی و پیچیدگی نوع کار و تأثیر آن بر نرخ یادگیری و فراموشی از طرح مناسب زمان‌بندی برای کارکنان استفاده کنند.

ازآنجاکه پارامترهای انسانی بر ساختار نوبت کاری بهینه اثر دارد، به مدیران پیشنهاد می‌شود طرح‌هایی برای سنجش پارامترهای انسانی مرتبط با ایستگاه‌های کاری داشته باشند؛ به‌گونه‌ای که در طراحی نوبت‌های کاری بتوانند از مدل ارائه‌شده استفاده بهینه‌تری کنند.

محدودیت‌های پژوهش حاضر مرتبط با محدودیت‌های شرایط مدل‌سازی است. درنظرگرفتن رفتار کاری یکسان برای کلیه کارکنان مهم‌ترین محدودیت مدل‌سازی این پژوهش بود؛ حال آنکه در واقعیت عملکرد و خروجی کارکنان یکسان نیست. همچنین عوامل انسانی همچون استرس، انگیزش و غیره بر پارامترهای یادگیری، فراموشی و خستگی کارکنان تأثیرگذار است و این عوامل در این پژوهش بررسی و مدل‌سازی نشده است؛ همچنین زمانی می‌توان از مدل ارائه‌شده استفاده بهینه کرد که بتوان کارگران ماهر و نیمه‌ماهر را در سیستم کاری و زمان‌بندی تعریف کرد.

برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود که سایر عوامل انسانی مهم همچون استرس و خستگی ناشی از حجم کاری نیز در مسئله زمان‌بندی کارکنان مدل‌سازی و مطالعه شود؛ همچنین می‌توان شرایط کاری متفاوت همچون میزان رطوبت، گرما، سرما، آلاینده‌های صنعتی و محیطی را نیز در ارائه طرح‌های زمان‌بندی و چرخش شغلی کارکنان بررسی کرد.

منابع

1. Ağralı, S., Taşkın, Z.C., & Ünal, A.T. (2017). Employee scheduling in service industries with flexible employee availability and demand. *Omega, 66,* 159-169.
2. Akbari, M. (2017). Mathematical Modeling of Human Factors in Dual Resourced Constraint System. *Modern Researches in decision making, 2(2),* 23-49.
3. Akbari, M. (2017). Part-Time Workforces Scheduling with Variable Productivity. *Management Research in Iran, 21(3),* 25-47.
4. Akbari, M., Dorri, B., & Zandie, M. (2012). Scheduling Working Shifts for Multi-skilled Workforces with Genetic algorithm Approach. *Journal of industrial management perspective, 2(3),* 87-102. (In Persian)
5. Akbari, M., Zandieh, M., & Dorri, B. (2013). Scheduling part-time and mixed-skilled workers to maximize employee satisfaction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 64 (5-8),* 1017-1027
6. Álvarez, E., Ferrer, J-C., Muñoz, J.C., & Henao, C.A. (2020) Efficient shift scheduling with multiple breaks for full-time employees: A retail industry case. *Computers & Industrial Engineering, 150,* 106884.
7. Aryanezhad, M., Kheirkhah, A., Deljoo, V., & Mirzapour Al-e-hashem, S. (2009). Designing safe job rotation schedules based upon workers' skills. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 41(1–2),* 193–199.
8. Ayough, A., Zandieh, M., Farsijani, H., & Dorri Nokarani B. (2014). Job Rotation Scheduling in a New Arranged Lean Cell, a Genetic Algorithm Approach. *Journal of industrial management perspective, 4(3),* 33-59. (In Persian)
9. Azizi, N., & Liang, M. (2013). An integrated approach to worker assignment, workforce flexibility acquisition, and task rotation. *Journal of the Operational Research Society, 64(2),* 260–275.
10. Bürgy, R., Michon-Lacaze, H., & Desaulniers, G. (2019). Employee scheduling with short demand perturbations and extensible shifts. *Omega, 89,* 177-192.
11. Givi, Z.S., Jaber, M.Y., & Neumann, W.P. (2015). Production planning in DRC systems considering worker performance. Comput. *Ind. Eng., 87(1),* 317–327.
12. Guimarães, L. M., Anzanello, M. J., & Renner, J. S. (2012). A learning curve-based method to implement multifunctional work teams in the
13. Brazilian footwear sector. *Applied Ergonomics, 43(3),* 541–547.
14. Hopp, W. J., Tekin, E., & Van Oyen, M. P. (2004). Benefits of skill chaining in serial production lines with cross-trained workers. *Management Science, 50(1),* 83–98.
15. Jaber, M. Y., & Kher, H. (2005). Workforce cross-training with learning in production and reworks. *Paper presented at the 18th International Conference on Production Research-ICPR 18, Salerno, Italy.*
16. Jaber, M. Y., & Neumann, W. P. (2010). Modelling worker fatigue and recovery in dual-resource constrained systems. *Computers and Industrial Engineering, 59(1),* 75–84.
17. Jaber, M. Y., Givi, Z. S., & Neumann, W. P. (2013). Incorporating human fatigue and recovery into the learning–forgetting process. *Applied Mathematical Modelling, 37(12–13),* 7287–7299.

18. Jaber, M. Y., Kher, H. V., & Davis, D. J. (2003). Countering forgetting through training and deployment. *International Journal of Production Economics, 85(1),* 33–46.
19. Kim, S., & Nembhard, D. A. (2010). Cross-trained staffing levels with heterogeneous learning/forgetting. *IEEE Transactions on Engineering Management, 57(4),* 560–574.
20. Lei, D., & Tan, X. (2016). Local search with controlled deterioration for multi-objective scheduling in dual-resource constrained flexible job shop. *28th Chinese Control and Decision Conference,* Wuhan, 430070 China, 28-30 May 2016, 4921-4926.
21. Li, J., & Huang, Y. (2016). A Hybrid Genetic Algorithm for Dual-Resource Constrained Job Shop Scheduling Problem. *Intelligent Computing Theories and Application: 12th International Conference, ICIC 2016, Lanzhou, China*
22. Mattia, S., Rossi, F., Servilio, M., Smriglio, S., (2017). Staffing and scheduling flexible call centers by two-stage robust optimization. *Omega, 72,* 25-37.
23. Nelson, R.T. (1967). Labor and machine limited production systems. *Management Science 13(9),* 648–671.
24. Nobil, A.H., Sharifnia, S.M.E., & Cárdenas-Barrón, L.E. (2021) Mixed integer linear programming problem for personnel multi-day shift scheduling: A case study in an Iran hospital. *Alexandria Engineering Journal,* ISSN 1110-0168.
25. Othman, M., Gouw, G. J., & Bhuiyan, N. (2012). Workforce scheduling: A new model incorporating human factors. *Journal of Industrial Engineering & Management, 5(2),* 259-284.
26. Pasquale,V.D., Miranda, S., Iannone, R., & Riemma, S. (2016). Integration of learning and forgetting processes with the SHERPA model. *IFAC-PapersOnLine, 49(12),* 197-202.
27. Porto, A.F., Henao, C.A., López-Ospina, H., & González, E.R. (2019). Hybrid flexibility strategy on personnel scheduling: Retail case study. *Computers & Industrial Engineering, 133,* 220-230.
28. Russell, H., Maitre, B., & Watson, D. (2016). Work-Related Musculoskeletal Disorders and Stress, Anxiety and Depression in Ireland: Evidence from the QNHS 2002-2013, *Economic & Social Research Institute.*
29. Sadrabad A.N., Boshrouei Shargh, S., & Mirfakhredini, S.H. (2020) Providing a Mathematical Model for Solving the Problem of Timetabling of Periodical Services. *Journal of industrial management perspective, 9(4),* 139-163. (In Persian)
30. Soriano, J., Jalao, E. R., & Martinez, I. A. (2020). Integrated employee scheduling with known employee demand, including breaks, overtime, and employee preferences. *Journal of industrial engineering and management, 13(3),* 451-463.
31. Taskiran, G. K., & Zhang, X. (2017). Mathematical models and solution approach for cross-training staff scheduling at call centers. *Computers & Operations Research, 87,* 258-269.
32. Thomas, B. G., & Nembhard, D. A. (2004). Preference based search approach for scheduling workers with learning and forgetting, *Proc. MSOM Sponsored Session INFORMS Ann. Meeting*, Oct. 2004.
33. Treleven, M. D. (1989). A review of the dual resource constrained system research. *IE Transactions, 21(3),* 279–287.

34. Xu, J., Xu, X., & Xie, S.Q. (2011). Recent developments in Dual Resource Constrained (DRC) system research. *European Journal of Operational Research, 215(2, 1),* 309-318.
35. Yue, H. (2005). Worker flexibility in dual resource constrained (DRC) shops. University Library Groningen [Host].
36. Zamiska, J. R., Jaber, M. Y., & Kher, H. V. (2007). Worker deployment in dual resource constrained systems with a task-type factor. *European Journal of Operational Research, 177(3),* 1507–1519.
37. Zan, J., Hasenbein, J. J., Morton, D. P., & Mehrotra, V. (2018). Staffing call centers under arrival-rate uncertainty with Bayesian updates. *Operations Research Letters, 46,* 379-384.