پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۳، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷

زمان‌بندی گردش شغلی درون و برون سلول‌های ناب با رویکرد الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری

اشکان عیوق*

استادیار، گروه مدیریت کسب‌وکار، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

دریافت: ۱۳۹۷/۴/۲۸ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۵

چکیده

سیستم‌های سرو در زمره پیشرفته‌ترین سیستم‌های تولید تکراری به شمار می‌روند که در حجم کم یا متوسط تولید می‌کنند. این سیستم‌ها متشکل از چندین سلول بوده و از طریق روش‌های نوین تخصیص متصدی ها، به بهترین زمان جریان کار دست می‌یابند. تحقیقات انجام‌شده در این حوزه بیشتر به جنبه‌های شکل‌گیری، تخصیص و توالی محصولات مختلف به سلول‌ها توجه کرده‌اند و موضوع تخصیص متصدی ها که بااهمیت‌ترین عنصر در این سیستم‌ها به‌حساب می‌آیند، همسنگ با دیگر تصمیمات موردمطالعه قرار نگرفته است؛ لذا در این مقاله این تصمیمات به‌طور مستقل بررسی و در قالب گردش شغلی درون و بین سلول‌ها تحلیل شده است. مدل ارائه‌شده، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (ILP) است که مجموعه‌ای از متصدی را به سلول‌ها تخصیص می‌دهد؛ به‌نحوی‌که عدم جابجایی‌های بین سلولی در دوره‌های متوالی کمینه شود. برای حل مدل، از نرم‌افزار گمز استفاده شده و همچنین به‌منظور بهبود کارایی حل برای مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ، الگوریتم ابتکاری بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری طراحی شده است. چندین مسئله نمونه در ابعاد مختلف برای بررسی اعتبار مدل و عملکرد الگوریتم به صورت تصادفی ایجاد و حل شده‌اند که حاکی از کارایی و کیفیت مناسب این الگوریتم است.

واژگان کلیدی: سیستم تولید سرو؛ گردش شغلی؛ برنامه‌ریزی عددصحیح؛ بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری؛ نرم‌افزار گمز.

---

* نویسنده مسئول مقاله: E-mail: A_ayough@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

در بازار بی‌ثبات و نامطمئنی مانند صنعت الکترونیک، کسب‌وکارها به دلیل کوتاه‌تر شدن چرخه عمر محصولات در محیطی در حال تغییرات سریع عمل می‌نماید [۱]. دو جنبه اصلی از تغییرات تقاضا وجود دارد: تنوع محصول و حجم محصول [۲]. برای مقابله با تقاضای بی‌ثبات، بسیاری از غول‌های الکترونیکی تلاش کرده‌اند تا از سیستم تولید تویوتا (TPS)[۲] برای مواجهه با نوسانات تقاضای مشتریان استفاده کنند، اما شکست خورده‌اند. این در حالی است که مزیت‌های کارایی و هزینه‌ای خطوط مونتاژ نوار نقاله، تحت شرایط تقاضای ناپایدار شدیداً به چالش می‌افتد [۳]. ازاین‌رو، خط مونتاژ نوار نقاله در سیستم TPS سنتی نتوانست تقاضای ناپایدار مشتریان را برآورده کند. شرکت سونی در این وضعیت برای دست‌یابی به تولید با تنوع بیش‌تر، حجم انعطاف‌پذیرتر و محصولات با ارزش‌افزوده بالاتر از سیستم تولید سرو[۳] استفاده کرد [۴]. سیستم تولید سرو به‌طور موفقیت‌آمیزی در صنعت الکترونیک ژاپن و توسط شرکت‌های پیشرو ژاپنی مانند سونی، کانن، پاناسونیک، فوجیتسو، شارپ و NEC مورداستفاده قرار گرفته است [۵]، [۶].

سرو یک واحد مونتاژ شامل چندین تجهیز ساده و یک یا چند متصدی چندمهارته است.در سرو، کارگر باید چند مهارت داشته باشد؛ زیرا کارگران باید تمام یا بیشتر فرآیندهای تولیدی را انجام دهند [۷]. سرو یک سیستم مونتاژ انسان‌محور است و در آن به تجهیزات کمتر از انسان اهمیت داده می‌شود.

با توجه به ماهیت خودمختار سلول‌ها و هدایت چند فرآیندی توسط متصدی در آن، در تحقیق حاضر برای ساده‌سازی و بدون ایجاد کاستی کلی، فقط یک مورد ساده که سیستم سلول خالص است، در نظر گرفته شده است. در سیستم سلول خالص، سیستم برنامه‌ریزی چرخش شغلی درون و برون سلول‌ها عمل می‌کند. برای ارزیابی سیستم، هدف کمینه‌کردن تعداد دفعاتی در نظر گرفته شده است که کارها در دو دوره متوالی به متصدی تخصیص می‌یابد.

---

۲. Toyota Production System

۳. Seru Production System

در ادامه و در قسمت دوم مقاله، مبانی نظری پژوهش بررسی شده و سپس در قسمت سوم، مدل تحقیق ارائه خواهد شد. الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری برای حل مسئله تحقیق در قسمت چهارم تشریح شده و قسمت پنجم به بررسی نتایج محاسبات می‌پردازد. در نهایت، در قسمت ششم، نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای تحقیقات آتی مطرح می‌شود.

۲- مبانی نظری پژوهش

معرفی دقیق سیستم سرو و سازوکار مدیریت آن را می‌توان در آثار ین، استک و زانگ مشاهده کرد [۱۰-۸]. این سازمان کوچک مونتاژ به‌عنوان ترکیبی ایده‌آل از نمونه‌های تولید ناب و چابک محسوب می‌شود [۴]، [۱۱]. یک سرو سه ویژگی اساسی دارد: کانکتسو[۴] یا کامل شدن همه وظایف در یک سرو، ماجیم[۵] یا کاهش حرکات غیرضروری از طریق فشرده‌سازی و در کنار هم قرار گرفتن ماشین‌آلات، متصدی و ابزارهای تولید، و جیریتسو[۶] که به خودمختاری سرو و متصدی های آن اشاره دارد [۴]. سرو یک سازمان تولیدی مونتاژ کوچک است که می‌تواند به‌سرعت ساخته، برچیده و بازسازی شود [۷]، [۱۲]. در کل، سه نوع سرو وجود دارد (که در شکل ۱ نشان داده شده است): ***سرو تقسیم‌بندی شده:*** کارگران در یک صف خطی کوتاه به‌صورت متقاطع کار می‌کنند و وظایف بین مجموعه‌های مختلف تقسیم شده است و هر مجموعه دارای یک یا چند کارگر است. ***سرو چرخشی:*** در این روش، طراحی سلول معمولاً U شکل است و هر کارگر، کار را از ابتدا تا انتهای فرآیند تولید محصول درون سلول انجام می‌دهد و وظایف مونتاژ در ایستگاه‌های ثابت انجام می‌شود؛ بنابراین، کارگران از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر می‌روند و در واقع، کارگران درون سلول ها حرکت می‌نمایند و ***یا تائی***[۷]: کوچک‌ترین سازمان تولیدی است که فقط یک کارگر تمامی عملیات را در آن بر عهده دارد. به‌عنوان نمونه، در ارتباط با محصول S-Class شرکت کانن، یک کارگر

---

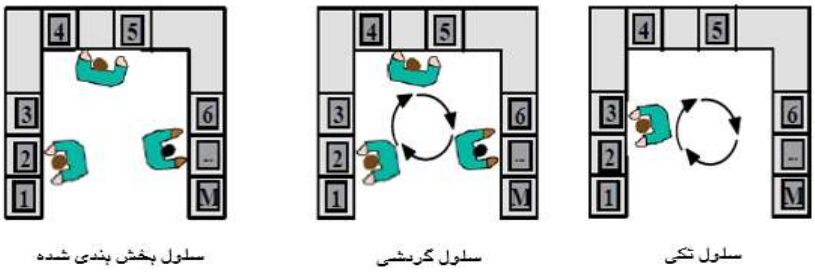
۴. Kanketsu

۵. Majime

۶. Jiritsu

۷. Yatai

۲۷۰۰ قطعه را در زمان ۲ ســـاعت مونتاژ می‌کند یا در ارتباط با محصـــولات گران‌قیمت کانن، ۹۴۰ قطعه را فقط در ۴ ساعت مونتاژ می‌نماید [۱]، [۱۳].



شکل ۱ سه نوع از سیستم مونتاژ سرو [۱۴]

در عمل، سیستم سرو به شکل خالص شامل یک یا چند سرو یا به‌صورت سیستم ســرو ترکیبی شــامل چند ســرو و یک خط کوتاه مونتاژ مورداســتفاده قرار می‌گیرد. استک و همکاران ادعا کرده‌اند با قدرت ترکیبی ناشی از فلسفه ناب تویوتا و سازمان تولید تک‌نفره سونی، سیستم سرو نسبت به خط مونتاژ نوار نقاله یک سیستم کارآمد، انعطاف‌پذیر و پربازده اســت [۹]. انعطاف‌پذیری ســرو بیش از هر چیز مرهون وجود متصـــدی های چندمهارته اســـت که می‌توانند هدایت چند فرآیندی و پردازش چندین محصول را انجام دهند [۱۵]، [۱۶]. به هنگام نو سانات جدید در بازار، سیستم سرو می‌تواند با اتکا به ایستگاه‌های کاری پویا و کارگران چندمهارته به سرعت تطبیق‌پذیر عمل نماید. علاوه بر این، ،ســیســتم ســرو مداوماً بهبود را تجربه می‌کند؛ چراکه ســرو یک ســـیســـتم کاری تیمی اســـت که مســـائل کاری در آن موردتحلیل قرار می‌گیرد. به‌علاوه، سیستم سرو تعادل بهتری نسبت به خط مونتاژ دارد، زیرا سیستم سرو می‌تواند تأثیر بدترین کارگر را از طریق اختصــاص کارگران با مهارت مشــابه کاهش دهد. همچنین سیستم سرو می‌تواند با تغییر ترکیب متصدی ها تنگناهای کاری را به‌شدت بهبود بخشد [۱۷].

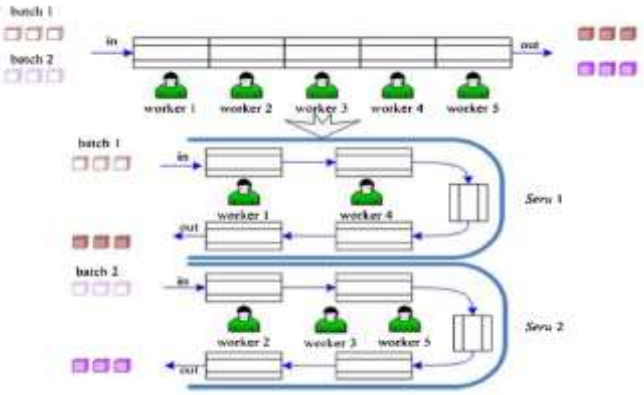
ماهیت مسـئله تبدیل خطوط مونتاژ به سـیسـتم‌های سـرو در چگونگی تبدیل خط مونتاژ نوار نقاله سنتی به یک سیستم متشکل از چند سرو یا چند سرو و یک خط

مونتاژ کوچک‌تر نهفته است. همان‌طور که مرور خواهد شد، این مسئله بر شکل و ترکیب‌بندی سیستم تولید، متمرکز است و جز مواردی اندک که به ویژگی‌های رفتار انسان به‌صورت محدودی پرداخته شده، توجه چندانی به اهمیت انسان به‌عنوان سنگ بنای اصلی این سیستم‌ها نشده است.

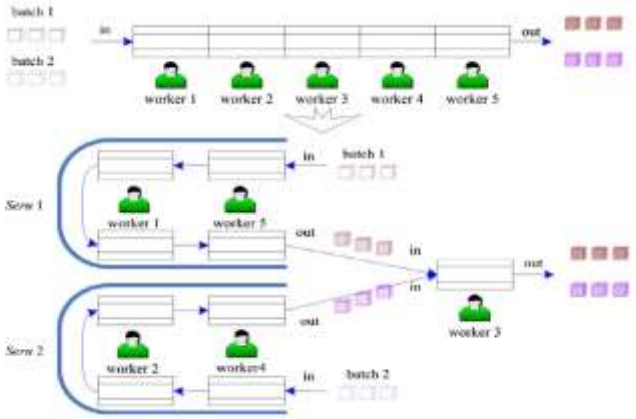
بسیاری از پژوهش‌ها، مانند [۱۸]، [۱۹] و [۲۰]، بر تبدیل خط مونتاژ به سیستم سرو خالص تمرکز نموده‌اند. این مطالعات به دنبال تعیین تعداد سرو و تعداد کارگر تخصیص داده‌شده به هرکدام از سروها هستند [۲۱].

یک مورد ساده از تبدیل خط به سیستم سرو خالص در شکل ۲ نشان داده شده است که در آن خط مونتاژ به دو سرو تبدیل شده است که سرو ۱ شامل متصدی های ۱ و ۴ و سرو ۲ شامل متصدی های ۲، ۳ و ۵ است. به‌علاوه، دسته‌های ۱ و ۲ به ترتیب توسط سرو ۱ و سرو ۲ پردازش می‌شوند. تبدیل خط مونتاژ به سیستم سرو ترکیبی توسط کاکو و همکاران موردتحقیق قرار گرفته است [۵]. این محققین سه نوع سیستم مونتاژ را در نظر گرفتند: یک سیستم سرو خالص، یک سیستم مونتاژ خالص و سیستم مونتاژ ترکیبی، شامل سروها و یک خط کوتاه. یک مورد ساده از تبدیل خط مونتاژ به سیستم سرو ترکیبی در شکل ۳ نشان داده شده که متشکل از دو سرو است. سرو ۱ شامل متصدی های ۱ و ۵، سرو ۲ شامل متصدی های ۲ و ۴ بوده و متصدی ۳ در خط کوتاه باقی مانده است. سپس، دسته‌های ۱ و ۲ ابتدا در سروهای ۱ و ۲ مونتاژ شده و برای تکمیل فرآیند مونتاژ وارد خط کوتاه می‌شوند [۲۲]. کاکو و همکاران نشان دادند که تبدیل خط مونتاژ به سرو می‌تواند به‌منظور بهبود زمان تکمیل کارها (C_{max}) و ساعات کل کار (TLH)[۸] مورداستفاده قرار گیرد [۵].

۸. Total Labor Hours



شکل ۲ تغییر شکل سیستم مونتاژ خطی به سیستم خالص سلول سرو [۱۹]



شکل ۳ تغییر شکل سیستم مونتاژ خطی به سیستم ترکیبی مونتاژ خط-سلول [۲۲]

آن‌ها از اصـــطلاح تبدیل خط به ســـلول اســـتفاده کردند. یو و همکاران تبدیل خط مونتاژ به ســـرو را با به حداقل‌رســـاندن زمان تکمیل کارها و TLH به‌طور هم‌زمان، بررسی کردند که در آن یک خط مونتاژ نوار نقاله به سیستم سرو خالص تبدیل شده بود [۱۸]. ســـپس یو و همکاران مدل تبدیل خط به ســـلول را با حداقل‌کردن تعداد متصـــدی ها و زمان تکمیل کارها به‌طور هم‌زمان بســـط دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تعداد متصدی ها و زمان تکمیل کارها با تبدیل خط به سلول، به‌طور هم‌زمان کاهش می‌یابد. این محققین ثابت کردند مسئله تبدیل خط به سرو یک مسئله NP-hard است

[۲۳]. سان و همکاران مدل تک هدفه حداقل‌کردن زمان تکمیل کارها با محدودیت TLH را مورداستفاده قرار دادند [۲۰]. کاکو و همکاران برخی عوامل عملیاتی تأثیرگذار در تبدیل خط مونتاژ به سرو را بررسی و نحوه حل مسئله را مطالعه کردند [۲۴]. چندین مطالعه، عملکرد تبدیل خط به سرو را تحت تأثیر عوامل عملیاتی شامل اثرات جانبی عوامل عملیاتی [۲۵] یا تعاملات بین آن ها [۲۶] و اهمیت عوامل انسانی [۱۸] موردبررسی قرار داده‌اند. به منظور دستیابی به عملکرد بهتر خط-سرو، بسیاری از محققان مدل‌های چندهدفه مرتبط با بهینه‌سازی دو معیار کل زمان عملیاتی و کل ساعات کار را تحلیل نموده‌اند. کاکو و همکاران مدلی را با در نظر گرفتن عوامل انسانی در تبدیل خط-سرو ایجاد کرده و به این نتیجه رسیدند که عامل متصدی های آموزش‌دیده عاملی کلیدی در موفقیت تبدیل است [۲۶]. یو و همکاران یک مدل اصلاح‌شده از مدل کاکو، ایجاد و همچنین الگوریتم NSGA-II را برای حل مسئله چندهدفه طراحی کردند [۱۹]. کاکو و همکاران یک روش وزن خطی برای حل مسئله چندهدفه و تعیین سودآورترین چیدمان سلول‌ها و کارگران در آن پیشنهاد کردند [۲۷]. لیو و همکاران یک الگوریتم ابتکاری سه مرحله‌ای برای حل مسئله پیشنهاد کردند و چندین آزمایش به‌منظور اعتبارسنجی عملکرد مدل صورت دادند [۲۲]. شائو و همکاران در سال ۲۰۱۶ طراحی سیستم سرو و بهینه‌سازی سفارش‌ها را با نظریه صف تحلیل کردند [۱۴].

با توجه به‌مرور مطالب بررسی شده معلوم می شود که آخرین کارهای انجام شده مربوط به تولید سلولی سرو،انجام کار در فضایی ثابت بوده است و کارکنان اجازه جابجایی برای انجام کارهای متنوع را نداشته‌اند؛ این باعث می‌شود که متصدی ها از تنوع مهارتی محدودی برخوردار بوده و همچنین به لحاظ روحی، دچار یکنواختی و دل‌زدگی در کار شوند. در این حالت، بدیهی است که سیستم به‌شدت وابسته به متصدی های غیر منعطف خواهد شد. همچنین سیستم گردش شغلی که یک استراتژی رایج به‌منظور رفع این نقایص به شمارمی رود، فقط در محیط عمومی سیستم‌های تولید در قالب مسئله تخصیص کلاسیک و مونتاژ خطی موردمطالعه قرار گرفته است [۲۸-۳۱] و در تحقیقات، شکافی موضوعی در این زمینه وجود دارد. با توجه به این تحلیل، در این پژوهش به بررسی مدلی می‌پردازیم که گردش شغلی را به‌منظور جابجایی متصدی ها بین و درون سلول‌ها طی دوره‌های زمانی مختلف، تحلیل کند.

۳- مدل برنامه ریاضی تحقیق

در مدل ارائه شده، با پذیرفتن عملکرد بهتر سلول‌های تولیدی سرو و همچنین منافعی که از طریق ایجاد گردش شغلی در کار ایجاد می شود، کمینه سازی تعداد دفعاتی که کارها طی دو دوره متوالی به متصدی ها اختصاص یافته را با ایجاد سیستم گردشی در سلول‌های تولیدی سرو دنبال می‌نماییم. این هدف از یک‌سو جنبه رفتاری دارد و از سوی دیگر، بر این مشخصه سلول‌های ناب که در آن‌ها باید سطح چندمهارته شدن کارکنان بالا باشد، متمرکز است. در صورت پائین‌ماندن سطح تنوع مهارتی کارکنان طی زمان، ذیل به اهدافی مانند کاهش زمان جریان، کاهش تعداد کارکنان با چالش مواجه شده و افزایش قابلیت تطبیق‌پذیری سلول با سرعت تقاضای مشتریان غیر ممکن می شود.

۳-۱- زیروندها (اندیس‌ها)

i: شمارنده هر متصدی (i=1,2,…,W)؛

j: شمارنده هر سلول (j=1,2,…,J)؛

s: شمارنده هر ایستگاه کاری (s=1, 2,…,S)؛

r: شمارنده هر فعالیت (r=1,2,…..,R)؛

t: دوره گردش شغلی (t=1,2,…..,T)؛

۳-۲- داده‌ها (پارامترها)

$\bar{c}$: میانگین زمان چرخه ؛

p_{ri} :زمان فرآیند تولید فعالیت r توسط کارگر i؛

۳-۳- متغیرهای تصمیم

X_{ijsrt}: اگر کارگر i به سلول j در ایستگاه s برای انجام فعالیت r در دوره گردش شغلی t تخصیص یافته باشد، برابر با یک و در غیر این صورت، برابر صفر است.

$X_{ijt,t+1}$: اگر کارگر i به سلول j در دو دوره گردش شغلی متوالی t و t+1 اختصاص یافته باشد، برابر با یک و در غیر این صورت، برابر صفر است.

H_{ijst}: اگر به کارگر i در ســـلول j و در ایســـتگاه s در دوره t حداقل یک فعالیت اختصاص یافته باشد، برابر با یک و در غیر این صورت، برابر صفر است.

۴-۳- دیگر متغیرهای مدل

c_t: زمان چرخه

مدل برنامه‌ریزی ریاضـــی تحقیق، کمینه‌ســـازی تعداد دفعاتی را که کارها در دو دوره متوالی به متصـدی ها تخصـیص یافته اسـت، هدف قرار می‌دهد. فرض بر این است که مدیریت قصد دارد سطح مهارت متصدی ها را تنوع ببخشد و درعین‌حال، سـطح متوسـطی از زمان چرخه را که با نیازمندی بازار مطابقت دارد محقق نماید. در ادامه، روابط مدل تشریح خواهد شد:

$$Min\ z = \sum_{i=1}^{W}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T-1} x_{ijt,t+1} \qquad (۱)$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{W}\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S} H_{ijst} = \mathrm{W} \qquad \forall t \qquad (۲)$$

$$\sum_{r=1}^{R}\sum_{i=1}^{W} X_{ijsrt} \geq 1 \qquad \forall j, \forall s, \forall t \qquad (۳)$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S}\sum_{r=1}^{R} X_{ijsrt} \leq \mathrm{R} \qquad \forall \mathrm{i}, \forall \mathrm{t} \qquad (۴)$$

$$\sum_{i=1}^{W} X_{ijsrt} = 1 \qquad \forall t, \forall j, \forall s, \forall r \qquad (۵)$$

$$\sum_{s=1}^{S}\sum_{r=1}^{R} X_{ijsrt} + \sum_{s=1}^{s}\sum_{r=1}^{R} X_{ijsrt+1} \leq 2 + M(1 - x_{ijt,t+1}) \qquad \forall \mathrm{i}. \forall \mathrm{j}, \forall \mathrm{t} \qquad (۶)$$

$$-(\sum_{s=1}^{S}\sum_{r=1}^{R}X_{ijsrt}+\sum_{s=1}^{S}\sum_{r=1}^{R}X_{ijsrt+1})\geq 2-M(1-x_{ijt,t+1}) \quad \forall i,\forall j,\forall t \quad (۷)$$

$$\sum_{s=1}^{S}\sum_{r=1}^{R}X_{ijsrt}+\sum_{s=1}^{S}\sum_{r=1}^{R}X_{ijsrt+1}\leq 1+Mx_{ijt,t+1} \quad \forall i,\forall j,\forall t \quad (۸)$$

$$\sum_{r=1}^{R}X_{ijsrt}\geq 1+MH_{ijst}-M \quad \forall i,\forall j,\forall s,\forall t \quad (۹)$$

$$\sum_{r=1}^{R}X_{ijsrt}\leq MH_{ijst} \quad \forall i,\forall j,\forall s,\forall t \quad (۱۰)$$

$$\sum_{t=1}^{T}H_{ijst}\leq T_1 \quad \forall i,\forall j,\forall s \quad (۱۱)$$

$$\sum_{r=1}^{R}P_{ir}.X_{ijsrt}\leq C_t \quad \forall i,\forall s,\forall t,\forall j \quad (۱۲)$$

$$\sum_{t=1}^{T}C_t\leq T.\bar{C} \quad (۱۳)$$

رابطه ۱ نشـــان دهنده یک تابع کمینه‌ســـازی اســـت که تعداد دفعاتی را که کارها برای دو دوره متوالی به متصـــدی‌ها تخصـــیص یافته، کمینه می‌کند. محدودیت ۲: مجموع کارگران تخصـــیصـــی به ســـلول‌ها با تعداد متصـــدی های موجود باید برابر باشد. فرض بر این است که متصدی نباید بیکار بماند و حداقل باید در یک دوره به کار گرفته شـــود. محدودیت ۳: حداقل یک متصـــدی را در هر دوره چرخش به یک ایستگاه کاری تخصیص داده و تعداد ایستگاه کاری تخصیص‌یافته به هر متصدی را در هر دوره گردش، حداکثر برابر با یک می‌کند؛ به‌این‌ترتیب، یک متصدی هم‌زمان در دو ایســـتگاه کاری نمی‌تواند کار کند. همچنین تخصـــیص یا عدم تخصـــیص هر متصدی به سلول و تعداد متصدی تخصیص‌یافته به سلول توسط این محدودیت کنترل می شود. محدودیت ۴: مجموع فعالیت‌های تخصیص‌یافته به متصدی ها باید کوچک‌تر یا مســـاوی کل کارها باشـــد. این محدودیت ازیک‌طرف توازن تخصـــیص را در نظر می‌گیرد و از طرفی، این امکان فراهم می‌شـــود که در صـــورت لزوم، یک

متصدی تمام فعالیت‌های یک ایستگاه را اداره کند. محدودیت ۵: بر اساس این فرض عمل می‌کند که یک فعالیت خاص در هر دوره گردش شغلی فقط توسط یک متصدی انجام می‌شود. محدودیت ۶، ۷ و ۸: اگر کارگر i به سلول j در ایستگاه s برای انجام فعالیت r در دو دوره گردش متوالی t و t+1 تخصیص یابد (یعنی $X_{ijsrt} = X_{ijsrt+1} = 1$)، در این صورت کارگر i در سلول j در دو دوره t و t+1 حضور داشته است و در نتیجه، ضرورتاً داریم: $x_{ijt,t+1} = 1$. محدودیت ۹ و ۱۰: نشان دهنده گردش شغلی حین یک دوره t در یک ایستگاه است. در واقع، متصدی می‌تواند حین یک دوره، در ایستگاه گردش شغلی داشته باشد و از یک فعالیت به فعالیت دیگر حرکت کند. محدودیت ۱۱: الزام می‌کند که متصدی ها حداقل یک‌بار در سلولی که در آن مشغول به کار می‌شوند، تغییر ایستگاه داشته باشند. محدودیت ۱۲: محاسبه‌کننده چرخه کاری در هر دوره گردش برحسب تخصیص‌های صورت گرفته است. این چرخه زمانی توسط بیشترین مقدار محاسبه‌شده در هر دوره گردش کنترل می‌شود. محدودیت ۱۳: میانگین زمان های چرخه کاری محاسبه‌شده را محدود به چرخه متوسط مشخص‌شده توسط مدیریت می‌کند.

۴- الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری[۹]

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری که در سال ۲۰۱۲ توسط رائو و همکاران ارائه شده است، الگوریتمی برگرفته از فرآیند آموزش و یادگیری بوده و بر مبنای تأثیر آموزگار بر بازده دانش آموزان در یک کلاس عمل می‌نماید [۳۲] و [۳۳]. به‌عنوان نمونه‌ای از کاربرد موفقیت‌آمیز این الگوریتم در حوزه مسائل مهندسی صنایع و مدیریت عملیات، می‌توان مطالعه بایکوزوقلو و همکاران در ارتباط با مسائل زمان‌بندی را مورد اشاره قرار داد [۳۴]. کران‌های بالا و پایین متغیرها، تعداد تولید و تابع برازندگی، ورودی این الگوریتم محسوب می‌شود. ابتدا اعضای کلاس با توجه به حدود کران متغیرها تولید می‌شوند. بهترین پاسخ با توجه به تابع برازندگی به‌عنوان استاد انتخاب می‌شود. در مرحله اول که فاز آموزش نامیده می‌شود، استاد سعی می‌کند با تأثیر بر سطح دانش اعضای کلاس میانگین آن را بالا برد تا سطح خود را افزایش دهد. اگر M_{new} بهترین جواب

۹. Teaching and Learning Based Optimization (TLBO)

فعلی در نظر گرفته شـود و M میانگین فعلی باشـد، هر جواب فعلی از طریق رابطه ۱۴ به جوابی جدید مبدل می‌شود.

$$X_{new,i} = X_{old,i} + r(M_{new} - T_F M) \quad (۱۴)$$

در رابطه بالا، r متغیری تصادفی بین صفر و یک با ابعادی معادل ابعاد متغیرهای مسئله و TF شتاب یادگیری (عددی تصادفی ما بین ۲- و ۲) است.

در مرحله دوم (فاز یادگیری)، دانش حاصـــل از تعامل متقابل یادگیرنده‌ها میانگین سطح کلاس را بهبود می‌دهد. روند الگوریتم در فاز دوم به‌این‌ترتیب است که دو عضو از کلاس به‌صـــورت تصـــادفی با یکدیگر در تعامل قرار می‌گیرند و دانش حاصـــل از تعامل آن دو بر سطح دانش سایر اعضا تأثیر می‌گذارد.

اگر X_I و X_j دو عضـــو از کلاس باشـــند که با یکدیگر در تعامل‌اند و $i \neq j$، در این صـــورت اگر $X_i > X_j$، آنگاه نحوه تبدیل بر اســـاس رابطه ۱۵ و در غیر این صـــورت، طبق رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود.

$$X_{new,i} = X_{old,i} + r_i(X_i - X_j) \quad (۱۵)$$

$$X_{new,i} = X_{old,i} + r_i(X_j - X_i) \quad (۱۶)$$

در صـــورت بهبود در تابع برازندگی، این تأثیر پذیرفته می‌شـــود. فرآیند مذکور تا یافتن پاسخ بهینه یا برآورد شرایط توقف تکرار می‌شود.

شـــرط توقف در الگوریتم ارائه‌شـــده تعداد تکرار اســـت که این میزان متناســـب با اندازه مسئله تعیین می‌شود.

در انتها، گفتنی ا ست که جهت ار ضای محدودیت‌های م سئله از ترکیب دور روش جریمه گذاری و تعدیل جواب ا ستفاده شده ا ست. شکل ۴ شبه کد طراحی شده از این الگوریتم برای حل مسـئله زمان‌بندی گردش شـغلی درون و برون سـلول‌های ناب را تشریح می‌کند.

قرار بده k=1
ماتریس مهارت (P) را دریافت کن

تعداد تکرار (MaxIt) و اندازه جمعیت (n) را دریافت کن. این مقادیر با توجه به‌اندازه مسـئله انتخاب می‌شود

تابع هدف: مجموع جریمه حاصل از نقض محدودیت‌ها + ($z=\min(\text{sum}(\text{sum}(x_{ijk,k+1}))$)

$X_i, i=1,2,\ldots,n$ (دانش آموزان اولیه کلاس را به‌صـورت تصـادفی تولید کن، n تعداد دانش آموزان است)

مقدار تابع هدف را برای تمام دانش آموزان محاسبه کن

بهترین جواب را مشخص کن

برای k=2:MaxIt

میانگین هر متغیر تصمیم x_{mean} را محاسبه کن

بهترین جواب را تعیین و به‌عنوان آموزگار برگزین

برای i=1:n

ضریب یادگیری TFرا برابر مقداری تصادفی ما بین ۲- و ۲+ قرار بده

$X_{new}^i = X^i + rand(0,1)[X_{teacher} - (T_F^i . X_{mean})]$

جواب را با توجه به بهترین جواب (آموزگار) تعدیل کن

اگر هر متغیر بزرگ‌تر از ۰/۵ است، آن را برابر یک قرار بده

در غیر این صورت، متغیر را برابر صفر قرار بده

پایان در غیر این صورت

پایان اگر

جواب‌ها را به داخل فضای شدنی منتقل کن

مقادیر هدف را برای جواب‌های جدید محاسبه کن

اگر X_{new}^i بهتر از X^i است

$X_{new}^i = X^i$

پایان اگر

یک دانش‌آموز دیگر مانند Xj، به صورتی که $i \neq j$ انتخاب کن

اگر X^i بهتر از X^j است

$X_{new}^i = X^i + rand(0,1)(X^i - X^j)$

در غیر این صورت

$X_{new}^i = X^i + rand(0,1)(X^j - X^i)$

پایان اگر

اگر هر متغیر بزرگ‌تر از ۰/۵ است آن را برابر ۱ قرار بده

در غیر این صورت، متغیر را برابر ۰ قرار بده

پایان در غیر این صورت

پایان اگر

جواب‌ها را به داخل فضای شدنی منتقل کن

اگر X_{new}^i بهتر از X^i است

$X^i = X^i_{new}$

پایان اگر

پایان برای

قرار بده k=k+1

پایان برای

پردازش نهایی و نمایش گرافیکی

شکل ۴ شبه کد الگوریتم TLBO برای مسئله تحقیق

۵- نتایج محاسبات

به‌منظور بررسی اعتبار مدل و همچنین نحوه عملکرد الگوریتم طراحی شده، تعدادی مسئله نمونه به صورت تصادفی تولید شد که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. با کدکردن مدل در محیط نرم‌افزار گمز و کدکردن الگوریتم در محیط نرم‌افزار متلب، محاسبات در یک رایانه ۶۴ بیتی با پردازشگر ۳/۶۰ گیگاهرتز و حافظه ۴ گیگ به اجرا در آمد.

به‌منظور تنظیم پارامترهای تعداد تکرار و اندازه جمعیت، مسائل برحسب تجربه‌های اولیه صورت‌گرفته از نظر زمان صرف شده به چهار گروه ۱ تا ۴ تقسیم‌بندی شدند. با در نظر گرفتن زوج (n,Maxit)، چهار گروه زوج مرتب برای هر گروه مسائل نمونه بر اساس معیار مطلوبیت نرمال ضربدر جمع کل زمان‌های محاسبات برای مسائل هر گروه، به شرح جدول ۱ تعیین شد. مطلوبیت نرمال، از جمع کل مطلوبیت‌های محاسبه‌شده برای مسائل گروه تقسیم‌بر جمع کل حاصل‌ضرب ابعاد مسائل گروه محاسبه می‌شود.

جدول ۱ تنظیم پارامترهای مسائل نمونه

گروه مسئله	شماره مسائل گروه بر اساس جدول ۲	زوج مرتب تخصیص‌یافته
۱	۶	(۸۰,۲۵)
۲	۱، ۲، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰	(۱۰۰,۲۰)
۳	۱۲، ۱۳ و ۱۴	(۲۰۰,۱۰)
۴	۳، ۴، ۵، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۵	(۴۰۰,۵)

همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است، کمترین زمان محاسبات مربوط به مسئله ردیف ۱۱ بوده که شامل چهار متصدی ، یک سلول، یک ایستگاه، یک فعالیت و دو دوره بوده و بیشترین زمان محاسبات برای مسئله ردیف ۶ انجام شده که شامل

بیست متصدی ، چهار سلول، چهار ایستگاه، چهار فعالیت و دو دوره است. سه نمونه همگرایی الگوریتم طراحی شده در مسئله مربوط به ردیف شماره ۱۷ الی ۱۹ که جزو مسائل تقریباً بزرگ به شمار می‌روند، به ترتیب در شکل‌های ۵ الی ۷ ارائه شده است. گفتنی است در این نمودارها مقدار مطلوبیت با احتساب مقدار جریمه (به دلیل غیرموجه بودن جواب‌ها) در نظر گرفته شده است که درهرحال باید کمینه شود.

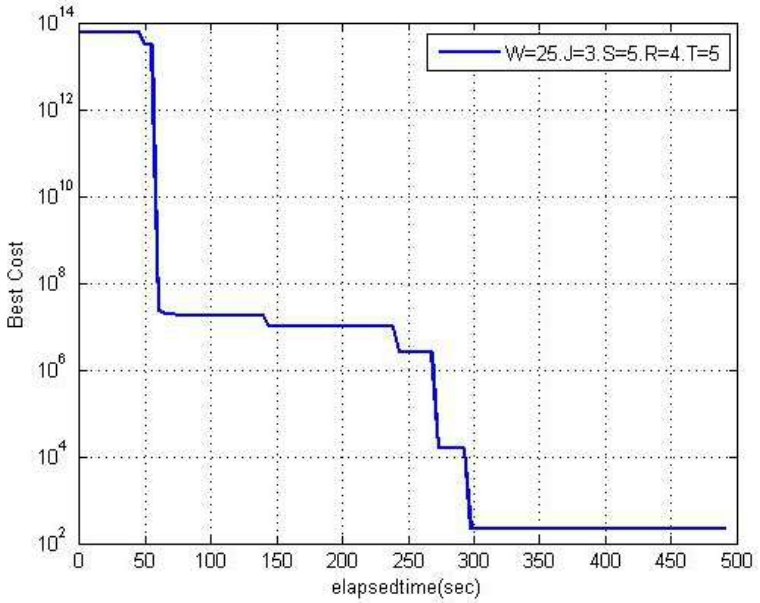
مسئله ردیف ۱۱ وضعیت ساده‌ای را بررسی می‌کند که چهار متصدی در دو دوره گردش در یک سلول باید بین وظایف گردش کنند. مشخصاً مقدار بهینه تابع هدف مسئله که کمترین تعداد ماندن در یک سلول در دو دوره متوالی (در این مسئله) است، برابر ۴ باید محاسبه شود. مسئله ردیف ۱۰ نشان می‌دهد دو متصدی در هر دو دوره گردش در هر دو سلول فعال بوده‌اند. این مورد بر اساس نحوه عمل تجویزشده توسط دستگاه محدودیت‌های مدل ممکن در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ مشخصات و نتایج حل مسائل نمونه

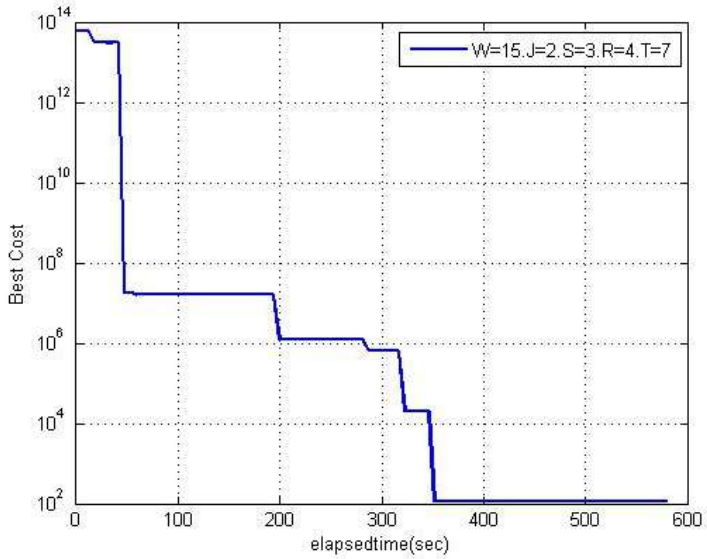
شماره مسئله	ابعاد مسئله					زمان اجرا		مقدار هدف		شکاف	
	W	J	S	R	T	GAMS	TLBO	GAMS	TLBO	بهبود تابع هدف	بهبود زمان حل
1	20	4	4	4	2	۱۰۰۰	۸۵۰	۵۰	۵۰	0%	۱۵%
2	20	3	4	4	2	۱۰۰۰	۷۸۰	۳۷	۳۷	0%	22%
3	20	2	4	4	2	۶۵	۷۴	۲۴	۲۴	0%	-14%
4	20	4	3	4	2	۱۰۰۰	۹۵	۱۶	۱۶	0%	91%
5	18	4	4	4	2	۱۰۰۰	۱۳۰	۵۶	۵۶	0%	87%
6	18	4	3	4	2	۱۰۰۰	۱۳۵۲	۲۹	۲۷	7%	-35%
7	12	3	2	4	2	۲۰	۱۴	۱۲	۱۲	0%	30%
8	12	2	2	4	2	۱۰	۱۵	۸	۸	0%	-۵۰%
9	10	3	2	4	2	۱۱	۱۰	۱۸	۱۸	0%	9%
10	10	2	2	4	2	۱۰	۸	۱۲	۱۲	0%	20%
11	4	1	1	4	2	۱۰	۵	۴	۴	0%	50%
12	20	5	3	4	5	۳۲۴	۲۹۱	۹۴	۸۷	8%	10%
13	20	4	3	4	5	۳۱۰	۲۸۳	۸۳	۷۱	17%	9%
14	20	3	3	4	5	۲۹۸	۲۷۱	۵۵	۵۳	4%	9%
15	20	2	2	4	5	۵۶	۳۱	۶۰	۵۸	3%	45%
16	25	4	5	4	5	۱۰۰۰	۵۶۵	۲۹۶	۲۸۴	4%	44%
17	25	3	5	4	5	۵۳۰	۴۹۱	۲۶۰	۲۱۴	22%	7%
18	15	2	3	4	7	۶۰۷	۵۸۰	۱۲۵	۱۱۷	7%	4%
19	15	3	3	4	7	۱۰۰۰	۶۷۳	۱۹۷	۱۶۲	22%	33%

20%	38%	۱۸۰	۲۱۶	۷۲۴	۱۰۰۰	7	4	5	5	25	20

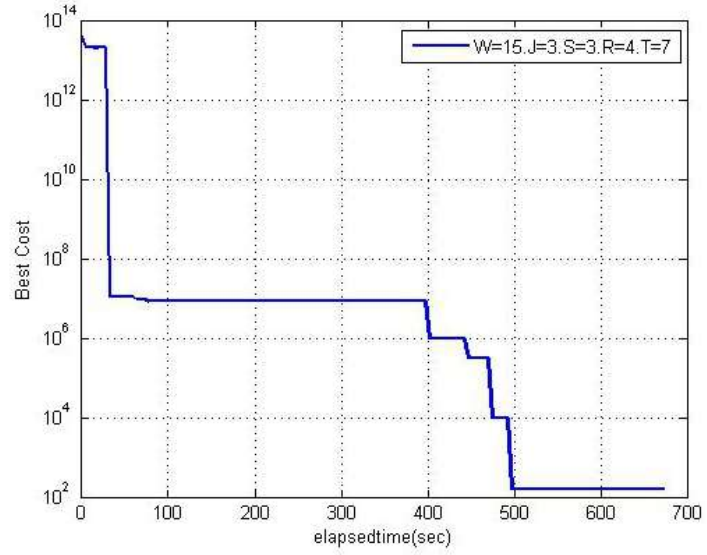
* در مسائلی که زمان اجرای آن ۱۰۰۰ ثانیه ذکر شده است، نرم‌افزار GAMS قادر به حل دقیق نبوده و پس از صرف ۱۰۰۰ ثانیه متوقف شده است.



شکل ۵ همگرایی پاسخ برای مسئله شماره ۱۷

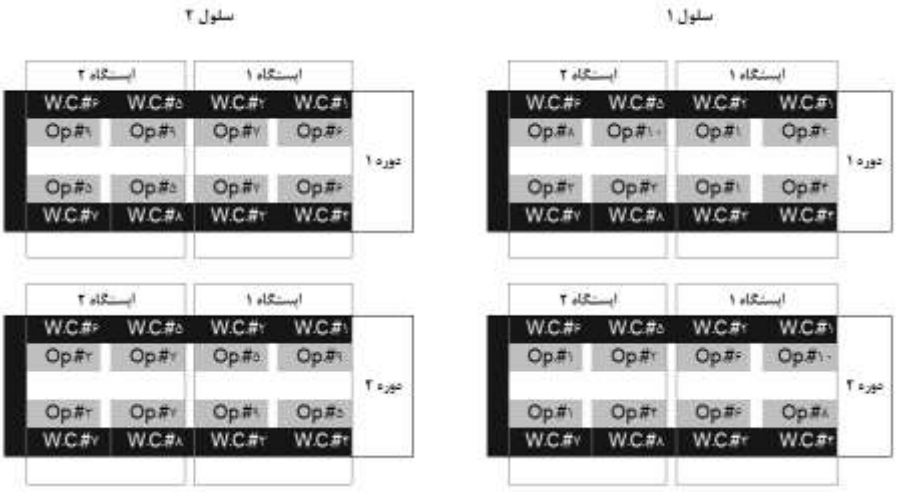


شکل ۶ همگرایی پاسخ برای مسئله شماره ۱۸



شکل ۷ همگرایی پاسخ برای مسئله شماره ۱۹

شکل ۸ نحوه تخصیص تعیین‌شده توسط الگوریتم برای مسئله شماره ۱۰ را نشان می‌دهد که در واقع، برنامه‌ریزی برای انجام ۱۶ فعالیت در دو سلول توسط ۱۰ متصدی است. همان‌طور که در شکل پیدا است، تنها متصدی های ۳ و ۶ در هر دو سلول در دو دوره گردش فعالیت داشته‌اند. متصدی ۶ در ایستگاه ۱ سلول ۱ در دوره دوم، دو فعالیت از دو سوی جلو و پشت سلول را انجام داده است و بدیهی است این گردش در سیستم‌های خطی غیرممکن بوده و در سیر تکامل کارها، ایجاد خلل و تأخیر می‌نماید. متصدی های ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۰ در دو دوره گردش در سلول ۱ باقی مانده‌اند، اما طی این دو دوره، تغییر ایستگاه کاری به‌اجبار برای آن‌ها مقرر شده است. به‌طور مشابه، متصدی های ۵، ۷ و ۹ طی دو دوره گردش در سلول ۲ مشغول بوده‌اند، ولی تغییر ایستگاه کاری برای آن‌ها برنامه‌ریزی شده است. این تصمیمات به نحوی اتخاذ شده است که زمان چرخه مدنظر مدیریت در دوره دوم گردش شغلی نقض نشود. درعین‌حال، این گردش‌ها سبب ارتقای مهارت و انعطاف‌پذیری سلول خواهد شد.



شکل ۸ نحوه تخصیص و گردش شغلی در مسئله شماره ۱۰

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این تحقیق با تأکید بر کارکرد گردش شغلی در سلول‌های ناب، مدل زمان‌بندی برای درون و برون سلول ارائه شد و هدف مدل با توجه به ماهیت تصمیمات گردش

شغلی، جابجایی بیشتر مابین سلول‌ها طی دو دوره متوالی در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که می‌توان گردش شغلی بین و درون سلول‌ها را به‌منظور ارتقا سطح چندمهارته شدن متصدی ها و انعطاف‌پذیری بیشتر سیستم سرو در برنامه‌ریزی نیروی انسانی به کار گرفت؛ بدون اینکه در پاسخگویی به تقاضای مشتری خللی وارد شود. گردش شغلی درون سلول‌های یو شکل سیستم سرو، جزئی از نحوه عمل سلول است که در سیستم‌های خطی امکان‌پذیر نیست. به‌علاوه از طریق گردش شغلی درون و بین سلولی، تولید با تعداد متصدی کمتر از تعداد کل فعالیت‌ها ممکن می‌شود. مدل این تحقیق می‌تواند در مورد برنامه‌ریزی سیستم‌های سرو با هدف کمینه‌سازی زمان جریان کارها به‌کار گرفته شود تا به‌وسیله آن بتوان ضمن دست‌یابی به زمان جریان کار بهتر تعداد دوره گردش مناسب را نیز تحلیل نمود. هدف بهینه‌سازی در این تحقیق می‌تواند با تعیین تعداد دوره گردش مدنظر مدیریت (از کل افق برنامه‌ریزی) که قرار است در آن گردش صورت گیرد، محاسبه شود؛ لذا در تحقیقات آتی می‌توان بر نوع محاسبه تابع هدف با اهمیت دادن به سایر موضوعات مربوط به رفتار متصدی ها متمرکز شد. همچنین این تحقیق، سلول‌ها را تشکیل یافته و از قبل مستقر، در نظر گرفته است که می‌توان تصمیمات ترکیب‌بندی سلول و برنامه‌ریزی برای عملیات آن را به‌صورت یکپارچه مدل‌سازی نمود. به‌علاوه سایر استراتژی‌های تخصیص به متصدی ها مانند در نظر گرفتن متصدی های سیّار و پشتیبان، مشترک‌نمودن فعالیت‌ها یا وظایف بر مبنای مهارت کارکنان را در تصمیمات گردش شغلی در نظر گرفت. تصمیمات مربوط به‌توالی متصدی ها در نحوه انجام وظایف مشترک در سلول‌ها، از دیگر پیشنهادهایی است که می‌توان در تحقیقات آتی به آن پرداخت.

۷- منابع

[1] Liu, C. G., J. Lian, Y. Yin, and W. J. Li. (2010). Seru Seisan – An Innovation of the Production Management Mode in Japan." *Asian Journal of Technology Innovation* 18(2): 89–113

[2] Ohno T., (1988) Toyota production system: beyond large-scale production. Productivity Press.

[3] Estrada DC, Shukla A, Cochran DS (2000). Converting from moving assembly lines to cells. In: Proceedings of the third world congress on intelligent manufacturing processes and systems, MA: 28–30.

[4] Yin, Y., Swink, M., and Kaku, I. (2017). Lessons from Seru Production on Manufacturing Competitively in a High Cost Environment. Journal of Operations Management. 49(51): 67–76

[5] Kaku, I., Gong, J., Tang, J., & Yin, Y. (2009). Modeling and numerical analysis of line cell conversion problems. *International Journal of Production Research*, 47(8):2055–2078.

[6] Sakazume, Y. (2005). Is Japanese cell manufacturing a new system? A comparative study between Japanese cell manufacturing and cell manufacturing. *Journal of Japan Industrial Management Association*, 12: 89–94.

[7] Liu, C., Stecke, K., Lian, J., & Yin, Y. (2014). An implementation framework for seru production. *International Transactions in Operational Research*, 21(1): 1–19.

[8] Y., K. E. Stecke, and I. Kaku (2008).The Evolution of Seru Production Systems throughout Canon. *Operations Management Education Review* 2: 27–40.

[9] Stecke, K. E., Y. Yin, I. Kaku, and Y. Murase. (2012).Seru: The Organizational Extension of JIT for a Super-talent Factory. *International Journal of Strategic Decision Sciences* 3 (1): 105–118.

[10] Zhang, X. L., C. G. Liu, W. J. Li, S. Evans, and Y. Yin. (2017). Effects of Key Enabling Technologies for Seru Production on Sustainable Performance. *Omega* 66: 290–307.

[11] Liu, C. G., N. Yang, W. J. Li, J. Lian, S. Evans, and Y. Yin. (2013). Training and Assignment of Multi-skilled Workers for Implementing Seru Production Systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 69(5–8): 937–959.

[12] Liu C, Li W, Lian J, Yin Y (2012). Reconfiguration of assembly systems from conveyor assembly line to Serus. *Journal of Manufacturing Systems.* 31(3):312–325.

[13] Kimura, T., & Yoshita, M. (2004). Kaomagma deha ayaui seru seisan [Seru systems run into trouble when nothing is done]. Nikkei Monozukuri, 7: 38–61.

[14] L Shao, Z Zhang, Y Yin.(2016). A bi-objective combination optimization model for line-seru conversion based on queuing theory. *International Journal of Manufacturing* Research, 11(4): 322-338.

[15] Mohammadi, M., & Forghani, K. (2016). Designing cellular manufacturing systems considering s-shaped layout. *Computers & Industrial Engineering*, 98: 221–236.

[16] Zohrevand, A. M., Rafiei, H., & Zohrevand, A. H. (2016). Multi-objective dynamic cell formation problem: a stochastic programming approach. *Computers & Industrial Engineering*, 98: 323–332.

[17] Andradóttir, S., Ayhan, H., & Down, D. G. (2013). Design principles for flexible systems. *Production and Operations Management*, 22(5):1144–1156.

[18] Y. Yu, J. Gong, J. Tang, Y. Yin, and I. Kaku, (2012). How to carryout assembly line-cell conversion? A discussion based on factor analysis of system performance improvements. *International Journal of Production Research*. 50(18):5259–5280.

[19] Y. Yu, J. Tang, J. Gong, Y. Yin, and I. Kaku. (2014). Mathematical analysis and solutions for multi-objective line-cell conversion problem. *European Journal of Operational Research*. 236(2):774–786.

[20] W. Sun, Y. Yu, J.-F. Tang, Y. Yin, and I. Kaku. (2014). Variable neighborhood search for line-cell conversion towards increasing productivity. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 20(12): 3040–3047.

[21] Yu, Y., Tang, J.F., Sun, W., Yin, Y. and Kaku, I. (2013a). Combining local search into non-dominated sorting for multi-objective line-cell conversion problem. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 26(4):316–326.

[22] Liu C, Yang N et al (2013). Training and assignment of multi-skilled workers for implementing seru production systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69(5–8):937–959

[23] Yu, Y., J. Tang, W. Sun, Y. Yin, and I. Kaku. (2013). Reducing Worker(S) by Converting Assembly Line into a Pure Cell System. *International Journal of Production Economics* 145 (2): 799–806.

[24] Kaku, I., Yu, Y., Tang, J.F. and Yin, Y. (2014). A discussion on seru and line-cell conversion. The 12th International Conference on Industrial Management, Chengdu, September, pp.3–5.

[25] Johnson, D.J. (2005). Converting assembly lines to assembly cells at sheet metal products: Insights on performance improvements. *International Journal of Production Research*. 43(7):1483–1509.

[26] Kaku, I., Murase, Y. and Yin, Y. (2008). A study on human tasks related performances of converting conveyor assembly line to cellular manufacturing. *European Journal of Industrial Engineering*. 2(1):17–34.

[27] Kaku I, Tang J et al (2011). A review: practice and theory in line-cell conversion. Waldemar Grzechca (Editor): Assembly line, Theory and practice (pp.107-130), INTECH Open Access Publisher, Croatia.

[28] Dorri B., Akbari M., Zandieh M. (2013). Bi-objective shift and job rotation scheduling for multi-skilled workforces with human factor engineering approach; *Management Researches in Iran*, 17(3): 1-21

[29] Akbari, Mohammad (2017). Mathematical Modeling of Human Factors in Dual Resourced Constraint System; *Modern Researches in Decision Making*, 2(2):23-49

[30] Akbari M. (2017). Part-Time Workforces Scheduling with Variable Productivity. *Management Researches in Iran*; 21 (3):25-47

[31] Ayough, A., Zandieh, M., & Farsijani, H. (2012). GA and ICA approaches to job rotation scheduling problem: considering employee's boredom. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(5): 651-666

[32] Rao, R.V., Savsani, V.J., & Vakharia, D.P. (2012). Teaching–Learning-Based Optimization: An optimization method for continuous non-linear large scale problems. *Information Sciences*, 183: 1– 15.

[33] Rao, R. (2016). Review of applications of TLBO algorithm and a tutorial for beginners to solve the unconstrained and constrained optimization problems. *Decision Science Letters*, 5(1): 1-30.

[34] Baykasog˘lu, A., Hamzadayi, A., Köse, S.Y. (2014). Testing the performance of teaching–learning based optimization (TLBO) algorithm on combinatorial problems: flow shop and job shop scheduling cases. *Information. Sciences*. 276 (0): 204–218.