

اثر برنامه‌های گردش شغلی سلولی بر عملکرد سلول ناب

اشکان عبوق^۱، مصطفی زندیه^۲

چکیده: گردش شغلی، عملیات استاندارد سلول‌های ناب شناخته می‌شود. با این حال، گردش شغلی به‌عنوان تشریح‌کننده عملکرد سلول ناب در پژوهش‌ها بررسی نشده است. فاصله (تواتر) گردش شغلی از طریق اثرگذاری بر نحوه تخصیص وظایف به افراد، بر عملکرد سلول در خلال چند دوره گردش شغلی تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش، عملکرد سلول ناب از طریق عامل فاصله گردش شغلی و به‌همراه عوامل مرتبط با سلول (شامل اندازه سلول، نوع وظایف سلول و زمان تکت) تشریح شده است که نوآوری اصلی تحقیق نیز به‌شمار می‌آید. پس از مدل‌سازی ریاضی و تحلیل آن، آزمایش‌های مناسب با استفاده از طراحی آزمایش‌های تاگوچی اجرا شد و داده‌ها در قالب جواب‌های نزدیک به بهینه برای اهداف عملکردی سلول به‌دست آمد. سپس با تحلیل واریانس یک و چندمتغیره، اثر عوامل آزمون شد. نتایج تحقیق اثر عامل فاصله گردش شغلی و روابط متقابل پیچیده میان آن و دیگر عوامل را تأیید کرد و الگوهایی را در زمینه رفتار معیارهای عملکرد سلولی تعیین کرد.

واژه‌های کلیدی: برنامه گردش شغلی، تحلیل واریانس چندمتغیره، سلول ناب، طراحی آزمایش‌های تاگوچی، عملکرد سلول ناب.

۱. استادیار مدیریت تولید و عملیات، مرکز مطالعات مدیریت ایران، تهران، ایران

۲. دانشیار دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۲۹

نویسنده مسئول مقاله: اشکان عبوق

E-mail: ayough@caspian.ac.ir

مقدمه

در مطالعات حاضر در زمینه گردش شغلی، آثار مختلف گردش شغلی بر عملکرد انسان کمتر مدل سازی و بررسی شده است (برای نمونه پژوهش های نمبهارد و نرمن، ۲۰۰۶ و نمبهارد و اوسوسیلپ، ۲۰۰۵). همچنین در زمینه سلول تولید ناب- که گردش شغلی در آن جزء عملیات استاندارد سلول است- پژوهشی صورت نگرفته و برای تعیین برنامه های گردش شغلی در این سلول ها با توجه به فاکتورهای انسانی و به منظور اعمال پویایی های عملکرد فرد و تأثیر آن بر عملکرد سلول تولید تلاشی نشده است. بنابر گزارش کانان و جنسن (۲۰۰۴) پویایی عملکرد فرد در محیط سلولی موجب تغییرات جدی در عملکرد سلول می شود؛ بنابراین پژوهش در این زمینه اهمیت دارد. به علاوه، برای تبدیل سیستم های تولید انبوه به ناب باید سلول های تولید ناب طراحی شود و افراد با گردش شغلی در آنها مشغول به کار شوند و همچنین باید توجه داشت که در نظر گرفتن ابعاد انسانی در این تحول ضروری است (نیدی و همکاران، ۲۰۰۱). یکی از مشخصه های اساسی هر برنامه گردش شغلی، اندازه دوره گردش شغلی (فاصله گردش شغلی) یا تعداد دفعات گردش شغلی در افق برنامه ریزی است. بررسی ادبیات موضوع نشان می دهد مطالعات معدود در زمینه تعیین فاصله گردش شغلی، به طور عمده درباره وظایفی انجام گرفته است که الزامات ارگونومیکی دارند. در نتیجه، هدف اصلی این تحقیق مطالعه آثار فاصله گردش شغلی بر عملکرد سلول ناب است. اهداف جزئی نیز عبارتند از: تحلیل آثار فاصله گردش شغلی بر عملکرد سلول ناب با و بدون در نظر گرفتن روابط متقابل میان دیگر عوامل مؤثر بر عملکرد سلول ناب.

به طور خلاصه پرسش های تحقیق عبارتند از: ۱. فاصله زمانی بین دو گردش متوالی چه تأثیری بر معیارهای عملکرد سلول تولید ناب و معیارهای گردش شغلی دارد؟ ۲. تفاوت تأثیر فاصله زمانی بین دو گردش متوالی بر معیارهای عملکرد سلول تولید ناب و معیارهای گردش شغلی بر اساس مقادیر مختلف زمان تکت^۱ و اندازه سلول و همچنین نوع وظایف عمده سلول چیست؟

این تحقیق از نظر علمی تأثیر پذیری عملکرد سلول ناب از فاصله گردش شغلی در حضور دیگر عوامل را بررسی می کند و می تواند به مدیران خطوط راهنمای مفیدی را به منظور بهبود عملکرد سلول های ناب ارائه دهد.

پیشینه تحقیق

به‌منظور تشریح عملکرد سلول و سیستم‌های تولیدی سلولی، به‌کارگیری ساختار مسائل متعادل‌سازی و تعیین توالی ضروری است. در محیط ناب، سلول‌های یو-شکل مزیت‌های فراوانی به سیستم تولید سلولی می‌افزاید و برای مطالعه آن، ساختار مسائل متعادل‌سازی و تعیین توالی را باید به‌صورت درهم‌تنیده در نظر گرفت. این موضوع در مطالعه میلتنبرگ (۲۰۰۲)، کارا و همکاران (۲۰۰۸)، ازکان و همکاران (۲۰۱۰) و لیان و همکاران (۲۰۱۲) بررسی شده است. همچنین در محیط ناب، سلول‌ها ماهیت بازتعادل‌سازی دارند که به تطابق هرچه بیشتر با تقاضای مشتری برمی‌گردد (بلک، ۲۰۰۷؛ موندن، ۱۹۹۳ و هیرانو ۱۹۸۷). به‌علاوه، هدایت چندفرآیندی، افزایش سطح مهارت و توانایی حل مسئله در این محیط از اصول اساسی به‌شمار می‌آید (شینگو، ۱۹۹۷؛ بلک، ۲۰۰۳ و هایر و ومرف، ۲۰۰۵). در نتیجه، به‌منظور تشریح عملکرد سلول ناب به بهترین نحو، باید ساختار مسائل متعادل‌سازی و تعیین توالی را با تأکید بر مشخصه انسان و تأثیرپذیری او از محیط بازتعریف کرد. در عین حال، طبق الزامات محیط ناب، باید متعادل‌سازی ایستا به متعادل‌سازی پویا تغییر یابد. این مهم از طریق زمان‌بندی گردش شغلی صورت می‌پذیرد. همچنین، هرگونه مطالعه در زمینه زمان‌بندی گردش شغلی مستلزم تحقیق در مورد چگونگی تخصیص وظایف به‌صورت پویا به فرد در افق برنامه‌ریزی است. منظور از چگونگی تخصیص وظایف، تعیین فعالیت‌ها و تعداد (فاصله) گردش شغلی است. بخش عمده‌ای از تحقیقات کنونی در زمینه گردش شغلی فقط معطوف به مسائل ارگونومیکی بوده است (سارموفر نیلاس و نرمن، ۲۰۰۴؛ کرانهان و همکاران، ۲۰۰۰ و آریانژاد و همکاران، ۲۰۰۷). در این دسته از تحقیقات، فواصل گردش شغلی الزاماً باید تا حد ممکن (قابل اجرا) کوچک انتخاب شود، زیرا بزرگ‌تر بودن فواصل به‌معنای ایجاد آسیب‌هایی به سلامتی و در نتیجه عملکرد فرد است؛ بنابراین، محققان از پیش در مورد آثار منفی فواصل بلند گردش شغلی بر معیارهای ارگونومیکی مطلع بوده‌اند و حد بالایی قابل قبول برای فواصل گردش شغلی را جست‌وجو کرده‌اند. در مطالعات حاضر در زمینه گردش شغلی، آثار مختلف گردش شغلی بر عملکرد انسان کمتر مدل‌سازی و بررسی شده است (مانند تحقیقات نمبهارد و نرمن، ۲۰۰۶ و اوسوسیلپ، ۲۰۰۵) و در زمینه سلول تولید ناب که در آن گردش شغلی جزء عملیات استاندارد سلول به‌شمار می‌رود، پژوهش صورت نگرفته است. در دو نمونه اخیر از مطالعات، مک دونالد و همکاران (۲۰۰۹) فقط بر وجه ارتقای مهارت تأکید داشته‌اند و عزیزی و همکاران (۲۰۱۰) آثار یادگیری، فراموشی و خستگی، انگیزش را مدل‌سازی کرده‌اند، اما در مطالعه آنها آثار گردش شغلی در ازای فواصل مختلف بررسی نشده است. همچنین، اصول و الزامات سلول ناب در مدل‌سازی وارد نشده

است. جدول ۱ ارزیابی صورت گرفته روی مدل‌های مرتبط موجود در ادبیات موضوع را جمع‌بندی می‌کند.

جدول ۱. جمع‌بندی ارزیابی مدل‌های مرتبط موجود در ادبیات موضوع

| مدل | نوع مدل | محدودیت اصلی (×: محدودیت دارد ✓: محدودیت ندارد) | | | | | | | مغایلت‌سازی - توانی | تخصیص | محقق |
|-----------|---------|---|--------------------|-------------------|-----------|---------------------------|-----------------------|-------|---------------------|-------|------|
| | | عملیات سلول ناب | | | | تجانس نداشتن نیروی انسانی | | | | | |
| | | چندمدلی | ساختار عملکرد سلول | هدف تعداد کارکنان | گردش شغلی | سلول پوی - شکل | زمان‌های پردازش متغیر | مهارت | یادگیر / فراموشی | خستگی | |
| مک دونالد | ✓ | × | ✓ | × | ✓ | × | × | ✓ | × | × | |
| میلتنبرگ | - | ✓ | ✓ | × | × | ✓ | × | × | × | × | |
| کارا | - | ✓ | ✓ | ✓ | × | ✓ | × | × | × | × | |
| ناکاده | ✓ | × | ✓ | ✓ | × | ✓ | × | ✓ | × | × | |
| هوانگ | ✓ | × | × | ✓ | × | × | × | ✓ | × | × | |
| شوچاک | ✓ | × | ✓ | ✓ | × | ✓ | × | × | × | × | |
| عزیزی | ✓ | × | × | × | ✓ | × | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |

همان‌طور که تشریح شد، عملیات سلول ناب کمتر در تمام مدل‌های موجود پوشش داده شده است. همچنین، برای تعیین برنامه‌های گردش شغلی در این سلول‌ها با ملاحظه فاکتورهای انسانی و به منظور اعمال پویایی‌های عملکرد فرد و تأثیر آن بر عملکرد سلول تولید تلاشی صورت نگرفته است. بنابر گزارش کانان و جنسن (۲۰۰۴) پویایی عملکرد فرد در محیط سلولی موجب تغییرات جدی در عملکرد سلول می‌شود؛ بنابراین پژوهش در این زمینه اهمیت دارد. به علاوه، برای تبدیل سیستم‌های تولید انبوه به ناب باید سلول‌های تولید ناب طراحی شود و افراد با گردش شغلی در آنها مشغول به کار شوند و همچنین باید توجه داشت که در نظر گرفتن ابعاد انسانی در این تحول ضروری است (نیدی و همکاران، ۲۰۰۱). مک دونالد و همکاران (۲۰۰۹) از اولین محققانی هستند که مسئله زمانبندی گردش شغلی را در سلول تولید ناب مدل‌سازی کرده‌اند. با این حال، مدل آنها فقط به ارتقای مهارت افراد توجه دارد. این مدل معیار ویژه‌ای برای گردش شغلی ندارد و نقش برنامه در پویایی عملکرد فرد در مدل‌سازی دیده نشده است. از دیگر محدودیت‌های تحقیق ذکر شده، تک‌مدلی بودن خط و محدود بودن اهداف به کمینه‌سازی تعداد کارکنان و هزینه‌های آموزش و موجودی است، در حالی که در هرگونه مطالعه

در محیط سلولی، به‌کارگیری ساختار مسائل متعادل‌سازی و توالی مدل‌ها الزامی است. در این تحقیق، نتایج به‌کارگیری گردش شغلی در سلول تولید ناب با تأکید بر مشخصه‌های انسانی و به‌منظور بررسی آثار مختلف گردش شغلی بر معیارهای کارایی سلول تولید ناب بررسی می‌شود.

بررسی این مسئله، به‌منزله حل سه مسئله زمانبندی گردش شغلی (تعیین ایستگاه‌های کاری هر اپراتور در هر دوره گردش)، متعادل‌سازی و توالی مدل‌هاست و در نتیجه پرداختن به آن دشوار و پیچیده است. میلتنبرگ (۲۰۰۰) در پژوهش خود به مطالعه توصیفی سلول‌های تولید یو-شکل در محیط تولید بهنگام (JIT) پرداخته است. او بالغ‌بر نه نمونه از این سلول‌ها را در ایالات متحده آمریکا و ۱۰۵ سلول را در کشور ژاپن بررسی کرده است. وی برای بررسی سلول‌های ژاپنی از کتاب *جریان تک‌قطعه‌ای* نوشته سکاین (۱۹۹۸) استفاده کرد. همچنین، شوچاک (۲۰۰۸) نمونه‌های مورد آزمایش مدل ریاضی تخصیص اپراتور به سلول یو-شکل خود را براساس حدود داده‌های مطالعات دیگر محققان شبیه‌سازی کرده است.

از جمله پژوهش‌هایی که بر موضوع تحول سیستم تولید متمرکز بوده‌اند می‌توان به تحقیق کسائی و همکاران (۱۳۹۱) و اکبر عالم تبریز و همکاران (۱۳۹۲) اشاره کرد. کسائی و همکاران (۱۳۹۱) به کمک روش‌های فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و دیماتیل^۱، توانمندسازهای چابکی در گروه بهمن موتور را اولویت‌بندی کرده‌اند. نتیجه تحلیل بر اولویت سوم دانش کارکنان پس از سخت‌افزار و زنجیره تأمین تأکید دارد.

اکبر عالم تبریز و همکاران (۱۳۹۲) عوامل کلیدی پیاده‌سازی موفق تولید در کلاس جهانی در گروه ایران خودرو و سایپا را ارزیابی کرده‌اند و دریافته‌اند که باید در راستای افزایش سطح عوامل کلیدی تعهد مدیریت مسائل مربوط به کیفیت، رضایتمندی مشتریان محصولات و خدمات، مدیریت زنجیره تأمین، رویکردهای مربوط به بهبود مستمر، خلاقیت و انعطاف‌پذیری در عملیات و تأسیسات و فناوری اهتمام بیشتری ورزید. برادران و همکاران (۱۳۹۴) درباره میزان آمادگی شرکت ایران ترانسفو جهت اجرای سیستم تولید ناب پژوهش کرده‌اند و نتیجه گرفته‌اند مؤلفه‌های سازماندهی و رهبری، مدیریت منابع انسانی و مدیریت فرایند تولید به‌ترتیب بیشترین اهمیت را برای دستیابی به تولید ناب دارند. تحقیق حاضر یکی از مهم‌ترین عوامل مورد اشاره محققان ذکر شده را در تحول سیستم به‌شکل سلول ناب به‌طور اخص مطالعه می‌کند و خطوط راهنمای کاربردی ارائه می‌دهد.

مطالعه تقوی‌فرد (۱۳۹۰) از جمله تحقیقاتی است که بر مسئله متعادل‌سازی خط مونتاژ چندمدلی معطوف بوده و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته برای بالانس خطوط مونتاژ

چند محصولی همراه با زمان‌های عملیاتی بیشتر از زمان سیکل و محدودیت‌های منطقه‌ای ارائه داده است. نتیجه این تحقیق به دلیل در نظر گرفتن توالی مدل‌ها، پویانبودن عملکرد اپراتورها و تک‌دوره‌ای بودن در زمینه پیشنهاد راهکاری به منظور تحول سلولی ناب، با محدودیت روبه‌رو است.

احمد نیز در سال ۲۰۱۲ درباره عملکرد سلول ناب پژوهش کرده است. این محقق با رویکرد سیستم پویا شرایط عدم اطمینان ناشی از تغییرات تقاضا و دسترسی به ماشین‌آلات در سلول را بررسی کرده و شاخص کمبود را به عنوان معیار عملکرد سلول تجزیه و تحلیل کرده است. رهاب و احمد (۲۰۱۴) نیز با به کارگیری پویایی سیستم، ناب بودن شرکت تولیدی را ارزیابی کرده‌اند و پویایی‌های مرتبط با جریان تک‌قطعه‌ای را از طریق تأثیرهای زمان تکت تحلیل کرده‌اند. لو و یانگ (۲۰۱۴) اجرای تکنیک‌های ناب در سیستم‌ها با سطح خودکارسازی بالا را به منظور بررسی تأثیرهای تغییرات تقاضا و تغییرپذیری سیستم تولید انجام داده‌اند و نتیجه گرفته‌اند که توانش مرکز کاری سرعت‌ساز از طریق حل مسئله بافر کار در جریان ساخت بهبود یافته است. هیچ‌یک از این تحقیقات مشخصه‌های اصلی سلول ناب را در نظر نگرفته‌اند و واحد تحلیل و بررسی عملکرد در آنها سیستم تولید است.

اهدافی که به عنوان معیارهای عملکرد سلول تولید ناب در این تحقیق مد نظر هستند، عبارت‌اند از:

- تطابق با زمان تکت: به دلیل آرایش تازه سلول تولید ناب مورد مطالعه در این تحقیق، هدف این است که تا حد ممکن از عدول از زمان تکت ممانعت شود. در این زمینه، هم میزان متوسط انحراف از زمان تکت و هم تعداد متوسط دفعات نقض زمان تکت باید کمینه شود. در نظر گرفتن نقض زمان تکت به عنوان واقعه‌ای محتمل و تلاش به منظور کمینه کردن آثار آن، از نوآوری‌های این تحقیق در زمینه کاربرد مدل‌های کلاسیک (به طور مشخص مدل متعادل‌سازی) به شمار می‌آید. رابطه‌های ۱ و ۲ نحوه محاسبه این هدف در مدل تحقیق را به دست می‌دهد.

$$Z_{12} = \frac{1}{RW} \sum_i^I \sum_r^R (1 - b_i^r) \frac{\bar{c}_i^r - Takt}{Uz_2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$Z_2 = \frac{1}{RW} \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R b_i^r \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن تکت زمان چرخه مطابق با تقاضای مشتری، \bar{c}_i^r محتوای کاری متوسط اپراتور i در خلال دوره گردش r است و b_i^r متغیری است که مشخص می‌کند در دوره گردش r محتوای

کاری متوسط اپراتور i از زمان چرخه مطابق با تقاضای مشتری کوچک‌تر بوده است یا خیر. UZ_2 حد بالای میزان انحرافات محتوای کاری هر اپراتور از زمان تکت است و طبق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$UB(Z^2) = \sum_j \max_{m,i} t_{i,j}^1(m) - Takt \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه ۳، $t_{i,j}^1(m)$ زمان پردازش اولیه مدل m توسط اپراتور i روی مرکز کاری j است.

- سطح کار کامل: از مهم‌ترین اصول تولید ناب که در سلول تولید ناب نمود ویژه‌ای می‌یابد، ارجح‌پنداشتن انسان در برابر ماشین است. بیکاری فرد در سلول تولید ناب ممنوع است هر چند اگر به بیکاری ماشین منجر شود؛ بنابراین، در این پژوهش سطح متوسط محتوای کاری که زیر زمان تکت قرار دارد، کمینه می‌شود. رابطه ۴ نحوه محاسبه این هدف را در مدل تحقیق نشان می‌دهد.

$$Z_{11} = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R b^r \frac{Takt - \bar{c}_{min}^r}{Takt} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن $Takt$ زمان چرخه مطابق با تقاضای مشتری، \bar{c}_{min}^r محتوای کاری کمینه در خلال دوره گردش r است و b^r متغیری است که مشخص می‌کند در دوره گردش r محتوای کاری کمینه از زمان چرخه مطابق با تقاضای مشتری کوچک‌تر بوده است یا خیر.

- تعداد اپراتور تخصیص‌یافته به سلول: از جمله اهداف کلاسیک طراحی خط یا سلول‌های تولید، کمینه‌کردن تعداد اپراتورهایی است که قرار است عملیات آن را انجام دهند. به این دسته از مسائل، متعادل‌سازی نوع یک اطلاق می‌شود. رابطه ۵ نحوه محاسبه این هدف را در مدل تحقیق تعیین می‌کند.

$$Z_3 = \frac{5(w-1)}{6(J-2)} \quad \text{رابطه ۵}$$

- توازن بار کاری ایستگاه‌ها: سرفصل اهداف مسائل متعادل‌سازی است که در این پژوهش تعادل حول زمان تکت هدف قرار داده می‌شود.

درمورد رابطه بین اهداف مذکور، می‌توان سه گزاره را عنوان کرد: الف) بدیهی است هرچه تعداد اپراتورهای تخصیص‌یافته به سلول بیشتر (کمتر) باشد، ممکن است سطح کار کامل کاهش

(افزایش) یابد. ب) بدیهی است هرچه تعداد اپراتورهای تخصیص یافته به سلول بیشتر (کمتر) باشد، ممکن است متوسط میزان عدول از زمان تکت کاهش (افزایش) یابد. ج) بدیهی است هرچه تعداد اپراتورهای تخصیص یافته به سلول بیشتر (کمتر) باشد، ممکن است متوسط تعداد دفعات عدول از زمان تکت کاهش (افزایش) یابد.

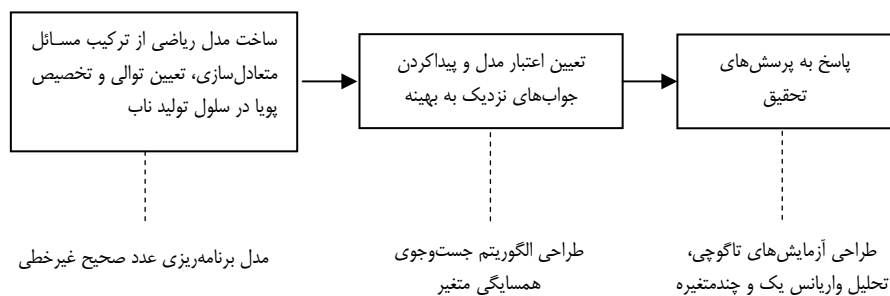
یکی از مشخصه‌های اساسی هر برنامه گردش شغلی، اندازه دوره گردش شغلی (فاصله گردش شغلی) یا تعداد دفعات گردش شغلی در افق برنامه‌ریزی است. بررسی‌های صورت گرفته در ادبیات موضوع نشان می‌دهد مطالعات محدود صورت گرفته در زمینه تعیین فاصله گردش شغلی به طور عمده درباره وظایف انجام گرفته است که الزامات ارگونومیکی دارند. در نتیجه، در این تحقیق آثار فاصله گردش شغلی بر اهداف ذکر شده مطالعه می‌شود. شوچاک (۲۰۰۸) در تحلیل مسئله تخصیص به سلول یو-شکل، خروجی سالور^۱ سیپلکس را به تفکیک اندازه سلول تقسیم بندی کرده است. هدف این تحقیق بررسی و ارزیابی عملکرد سالور در مسائل با اندازه‌های مختلف بوده، اما نگاه اجمالی به نتایج مطالعات قبلی موجب شده است تا ایده تغییرپذیری اهداف مرتبط با عملکرد سلول ناب بر اساس اندازه سلول تحلیل شود.

همچنین، به نظر منطقی است که اندازه زمان تکت را- که آثار آن بر تعداد اپراتورهای تخصیص یافته به سلول و در نتیجه رفتار فرد نمود پیدا می‌کند- بر تشریح عملیات سلول تأثیرگذار دانست. به علاوه، نقش نوع وظایف سلول در تبیین رفتار شخص و تأثیرپذیری آن از فواصل گردش غیرقابل انکار است. بی تردید وظایف عمدتاً متحرک در سلول موجب فراموشی کمتر فرد می‌شود و یادگیری سریع تر و همچنین خستگی شدیدتر را برای وی به دنبال دارد. در نتیجه، در نظر گرفتن نوع سلول به عنوان یک عامل در تحلیل‌های پس از بهینگی ضروری به نظر می‌رسد. از این پس مجموعه شرایطی را که از طریق عوامل زمان تکت، نوع وظایف در سلول و اندازه سلول توصیف می‌شوند، شرایط اولیه می‌نامیم.

روش تحقیق

این تحقیق نوعی تحقیق شبه آزمایشی است که از طریق شبیه سازی وضعیت‌های مختلف، اثر برنامه گردش شغلی بر عملکرد سلول ناب را تبیین می‌کند. به منظور تحلیل پرسش‌های تحقیق، در گام نخست مدل ریاضی از ترکیب سه مسئله متعادل سازی، تعیین توالی و تخصیص پویا در سلول تولید ناب بنا نهاده شد. این مدل تکمیل یافته مدل ارائه شده در پژوهش عیوق و همکاران

(۱۳۹۳) با در نظر گرفتن توالی مدل هاست. در گام دوم، جواب‌های نزدیک به بهینه به دست آمد و در گام سوم به پرسش‌های تحقیق پاسخ داده شد. شکل ۱ گام‌های تحقیق را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. گام‌های تحقیق

در گام اول، مدل تحقیق به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی فرموله شد و تابع هدف آن از طریق ترکیب اهداف پیش گفته با استفاده از روش ال پی- متریک با فرض $p=1$ تعیین شد. محدودیت‌های مدل در هفت گروه قرار می‌گیرد: محدودیت‌های کلاسیک مسئله تخصیص و تعیین تعداد اپراتور تخصیص یافته به سلول، محدودیت‌های تعیین حوزه (ایستگاه) کاری اپراتورها، محدودیت‌های تعیین توالی کارهای تخصیص یافته به اپراتور (مسیر جابه‌جایی اپراتور در سلول)، محدودیت‌های کلاسیک مسئله متعادل‌سازی سلول (برگرفته از مدل تحقیق عیوق و همکاران، ۱۳۹۳)، محدودیت‌های فواصل زمانی تخصیص / عدم تخصیص وظایف به هر اپراتور در آفق برنامه‌ریزی، محدودیت‌های مرتبط با محاسبه توابع مشخصه‌های انسانی و محدودیت‌های زمان‌های پردازش. پس از ورود محدودیت‌های کلاسیک، مسئله تعیین توالی مدل‌ها در مدل تحقیق بازنویسی شد.

در گام دوم، مدل بنا نهاده شده در گام اول حل شد. ابتدا براساس داده‌های واقعی جمع‌آوری شده از واحد ماشین‌کاری یکی از قطعه‌سازان بزرگ کشور، الگوریتم طراحی شده برای حل مدل و همچنین اعتبار مدل سنجیده شد. با توجه به پیچیدگی الگوریتمی مدل تحقیق که از ترکیب سه مسئله Np-Hard ایجاد شده است، از الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر (VNS) استفاده شد. الگوریتم جست‌وجوی متغیر توسعه داده شده در این تحقیق با توجه به ماهیت جواب مدل و امکان بهبود آن، با سه ساختار همسایگی کار می‌کند.

ساختار همسایگی اول با بررسی محتوای کاری اپراتورهای تخصیص داده شده به سلول و شناسایی اپراتور پرمشغله و کم مشغله و تغییر سطح تخصیص هریک، به بهترین جواب در دسترس شوک وارد می کند و سپس از طریق چند جست و جوی محلی امکان بهبود جواب را بررسی می کند. پس از خروج از ساختار همسایگی اول، ساختار همسایگی دوم با جابه جایی تمام اپراتورهای تخصیص یافته به سلول به یک اندازه در جهت حرکت عقربه ساعت یا خلاف آن، شوک دیگری به جواب خروجی از اولین ساختار همسایگی وارد می کند و سپس آن را در چند حلقه جست و جوی محلی قرار می دهد. ساختار همسایگی سوم با تعویض یک اپراتور با اپراتور تخصیص نیافته به سلول در تمام دوره های گردش، شوکی به جواب فعلی خروجی از ساختار همسایگی دوم وارد می کند و آن را در دو حلقه جست و جوی درگیر می کند.

سهم علمی و نوآوری اصلی تحقیق با گام سوم محقق می شود. در این گام، ابتدا داده های مورد نیاز به این منظور از طریق حل مدل برای مسائل (سلول های نمونه) و در چارچوب آزمایش های طرح عاملی مهیا می شود. با توجه به پرسش های تحقیق، عوامل کنترلی آزمایش ها عبارتند از: اندازه فاصله گردش شغلی، نوع سلول، زمان تکت و اندازه سلول. به این ترتیب، اگر برای عوامل مذکور سطوح سه گانه در نظر گرفته شود، استعداد کاملاً فاکتوریالی ۸۱ سناریوی آزمایشی قابل طرح است که حداقل حدود نه تا پانزده آزمایش (تکرار) در هر سناریو قابل اجراست. در نتیجه، استفاده از طرح های نسبتی مقرون به صرفه است و در این تحقیق، آزمایش ها طبق رویکرد طراحی آزمایش های تاگوچی سناریوسازی می شود.

در این رویکرد از طریق ایجاد مجموعه ای از آرایه های متعامد، تعداد کمتری آزمایش برای دستیابی به نتایج قابل قبول انجام می گیرد. تاگوچی میانگین مربعات انحراف یا پراکندگی حول مقدار هدف را با استفاده از نسبت سیگنال به نوفه (S/N)^۱ کمینه و به عبارتی فرایند را در برابر تغییرات مقاوم می کند (رانجیت، ۱۹۹۰ و تاگوچی، ۲۰۰۴). با استفاده از طرح L_9 - که در این تحقیق مناسب عوامل و سطوح آنهاست - و همچنین با انجام دادن آزمایش ها، داده های لازم به منظور پاسخ به پرسش های تحقیق فراهم شد. در واقع، این داده ها خروجی حل مدل بهینه سازی یا معیارهای عملکرد سلول در قالب اهداف اشاره شده در رابطه های ۱، ۲، ۴ و ۵ محسوب می شوند.

مشخصه های توصیفگر سلول ها با توجه به مطالعات پیشین، استاندارد است. برای احراز مشخصات سلول های تولیدی چند مطالعه مینا در ادبیات موضوع وجود دارد که به احصای حدود منطقی مذکور در سلول های یو-شکل پرداخته اند. مهم ترین مرجع در این زمینه کتاب سیستم

1. Signal to Noise (S/N)

تولید توپوتا اثر ماندن در سال ۱۹۹۳ است. بخشی از این کتاب با موضوع عملیات استاندارد در سلول‌های تولید ناب، اطلاعات مبنایی معتبری را در زمینه زمان‌های پردازش و جابه‌جایی و تعداد اپراتورها ارائه می‌دهد.

در این پژوهش، داده‌های مربوط به سلول‌ها شامل حدود زمان‌های پردازش، حدود زمان‌های جابه‌جایی و حدود زمان‌های تکت بر مبنای این مطالعات و به‌ویژه مطالعه شوچاک (۲۰۰۸) بنا نهاده شده است. تولید داده در این حدود با به‌کارگیری توزیع یکنواخت صورت گرفته است. همچنین، تقسیم‌بندی سلول‌ها براساس اندازه آنها از این تحقیق الگوبرداری شده است. داده‌های مرتبط با مشخصه‌های رفتار فرد (ضرایب یادگیری، فراموشی و خستگی) با توجه به ماهیت وظایف در سلول (از نظر درجه شناختی یا درجه متحرک - مکانیکی بودن کار) و براساس الگوی به‌دست‌آمده در ادبیات موضوع تولید شده است. به‌طور مشخص، برای ضرایب یادگیری از معیارهای مدل دار- ال و حدود ضریب یادگیری برای انواع چهارگانه کار (دار- ال، ۱۹۹۱) بهره گرفته شد.

ابزار و روش‌های آماری مورد استفاده به‌منظور تحلیل پرسش‌های تحقیق عبارت‌اند از: نمودار روابط متقابل برای تشخیص گرافیکی روابط متقابل بین عوامل (فاکتورها)، محاسبه‌های آماری طراحی آزمایش‌های تاگوچی، تحلیل واریانس یک‌متغیره و تحلیل واریانس چندمتغیره برای بررسی معنی‌دار بودن تفاوت معیارهای عملکرد به‌ازای سطوح عوامل.

یافته‌های پژوهش

تحلیل بدون در نظر گرفتن روابط متقابل میان عوامل

با توجه به اینکه مطالعه حاضر بر پویایی‌های عملکرد فرد و تأثیرپذیری آن از نحوه تخصیص کار تأکید دارد، ابتدا مدل تحقیق بر مبنای تخصیص پویا و لحاظ‌کردن آثار عوامل انسانی شامل یادگیری، فراموشی و خستگی در قالب توابعی از نحوه تخصیص فرد در افق برنامه‌ریزی توسعه داده شد. پس از ارائه راه‌حل کارا و دسترسی به نتایج حل مدل، امکان بررسی تأثیر فواصل گردش شغلی بر توابع هدف مدل تحقیق فراهم شد. درواقع، با تغییر اندازه فاصله گردش شغلی - که در مدل زمان‌بندی گردش شغلی در سلول تولید ناب به‌عنوان پارامتر مفروض بود - نتایج مختلفی حاصل شد و این نتایج به‌منظور بررسی تأثیر فواصل گردش شغلی بر توابع هدف مدل تحلیل شد. با ایجاد نود مسئله نمونه در ابعاد مختلف، با زمان‌های پردازش، سطح مهارت اولیه و همچنین مشخصه‌های انسانی که به‌صورت تصادفی تولید شدند، آثار سه سطح فاصله گردش شغلی به‌شرح جدول ۲ بررسی شد.

جدول ۲. سطوح عامل فاصله گردش شغلی در تحلیل نتایج

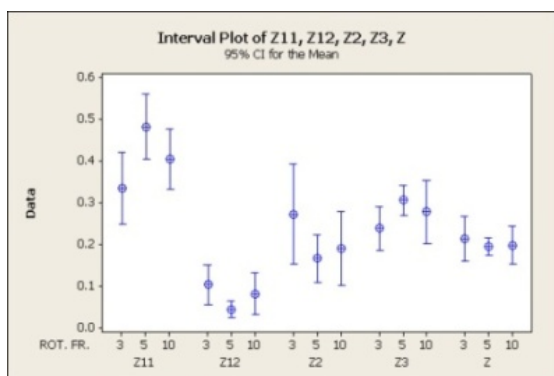
| فاصله گردش شغلی | پارامتر مربوطه در مدل تحقیق (تعداد دفعات گردش در افق برنامه ریزی) |
|------------------------|--|
| ۱۵ ساعت (یک روز و نیم) | ۳ |
| ۹ ساعت (یک روز) | ۵ |
| ۴ ساعت و نیم (نیم روز) | ۱۰ |

یکی از تفاوت‌های اصلی مدل این تحقیق با مدل‌های موجود در ادبیات موضوع، لزوم در نظر گرفتن افق کوتاه‌مدت در مدل‌سازی و تحلیل نتایج است؛ بنابراین، تمام مسائل نمونه در افق هفتگی معادل ۴۵ ساعت کاری تحلیل شده‌اند. معمولاً کنترل فعالیت‌های کف کارخانه به صورت هفتگی مرور و بازنگری می‌شود (فوگارتی، ۱۹۹۱).

کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین تعداد گردش شغلی در افق برنامه ریزی برای اساس در نظر گرفته شده‌اند که هیچ‌یک از آثار عوامل انسانی بر دیگر آثار فائق نمی‌شود، هزینه‌های کنترل برنامه گردش شغلی معقول است و فرایند خوگرفتن اپراتورها به گردش شغلی به عنوان بخشی از نحوه کار آنها آسان تر می‌شود. همچنین، فرض می‌شود وظایف در مراکز کاری عواقب ارگونومیکی شدیدی ندارند؛ بنابراین، فواصل گردش کوتاه مانند یک یا دو ساعت معادل به ترتیب ۴۵ یا ۲۳ تعداد گردش شغلی طی هفته ضرورتی پیدا نمی‌کند.

شکل ۲ مقادیر توابع هدف را به‌ازای سطوح مختلف تعداد گردش شغلی نشان می‌دهد. تعداد متغیرهای وابسته مورد بررسی بیشتر از یک است؛ بنابراین، انجام دادن تحلیل‌های واریانس جداگانه برای بررسی آثار سطوح مختلف گردش شغلی موجب متورم شدن خطای آلفا از α به $\alpha^4 (1 - \alpha) - 1$ و کاهش توان آزمون از $1 - \beta$ به $1 - \beta^4$ می‌شود. در نتیجه، درصد بیشتری از نتایج بی‌معنی در جامعه به اشتباه معنی‌دار تلقی می‌شود (هومن، ۱۳۸۰). همچنین، ممکن است هیچ‌یک از متغیرهای وابسته به صورت جداگانه اختلاف سطوح عامل را معنی‌دار نشان ندهند، درحالی‌که تحلیل همزمان و یک‌جا توسط آزمون تحلیل واریانس چندگانه آثار معنی‌داری دارد، زیرا تحلیل تک‌متغیری همبستگی میان متغیرهای وابسته را به حساب نمی‌آورد. نتایج آزمون فرض برابری اثر فواصل گردش شغلی بر متغیرهای وابسته با استفاده از نرم‌افزار SPSS 18 به شرح جدول‌های ۳ تا ۶ است. جدول ۳ تعداد مشاهده‌ها در هر سطح عامل تعداد

دوره‌های گردش را نشان می‌دهد. جدول ۴ صحت پیش‌فرض آزمون MANOVA^۱ مبنی بر برابری ماتریس‌های کوواریانس را برای گروه‌های مورد مطالعه آزمون کرده است.



شکل ۲. مقادیر توابع هدف به‌ازای سطوح مختلف تعداد گردش شغلی

جدول ۳. آمار مشاهده‌ها در هر سطح عامل

| | | |
|----|----|-------|
| N | | |
| ۲۷ | ۳ | |
| ۲۷ | ۵ | rotfr |
| ۲۷ | ۱۰ | |

جدول ۴. آزمون برابری ماتریس‌های کوواریانس باکس

| | |
|---------|-----------|
| Box's M | ۱۰۲/۲۱۴ |
| F | ۴/۷۳۰ |
| df1 | . |
| df2 | ۲۱۸۳۸/۸۶۹ |
| Sig. | ./۰۰۰ |

جدول ۵. آزمون برابری واریانس‌های خطا لاین

| | F | df1 | df2 | Sig. |
|-----|--------|-----|-----|-------|
| z11 | ۰/۳۷۴ | ۲ | ۷۸ | ۰/۶۸۹ |
| z12 | ۷/۹۸۴ | ۲ | ۷۸ | ۰/۰۰۱ |
| z2 | ۱۱/۵۵۷ | ۲ | ۷۸ | ۰/۰۰۰ |
| z3 | ۸/۰۲۸ | ۲ | ۷۸ | ۰/۰۰۱ |

جدول ۶. آزمون برابری میانگین آثار سطوح مختلف تعداد گردش شغلی

| تست چندمتغیره | | | | | | |
|---------------------|--------|----------|---------------|---------|--------|-------------------|
| Partial Eta Squared | Sig. | Error df | Hypothesis df | F | Value | Effect |
| .۰/۸۹ | .۰/۰۰۰ | ۵ | ۴ | ۱۵۴/۳۶۷ | .۰/۸۹۲ | معیار پیلا |
| .۰/۸۹۲ | .۰/۰۰۰ | ۷۵ | ۴ | ۱۵۴/۳۶۷ | .۰/۱۰۸ | لامبدای ویلکس |
| .۰/۸۹۲ | .۰/۰۰۰ | ۷۵ | ۴ | ۱۵۴/۳۶۷ | ۸/۲۳۳ | معیار هتلینگ |
| .۰/۸۹۲ | .۰/۰۰۰ | ۷۵ | ۴ | ۱۵۴/۳۶۷ | ۸/۲۳۳ | بزرگترین ریشه روی |
| .۰/۰۸۱ | .۰/۱۰۷ | ۱۵۲ | ۸ | ۱/۶۸۰ | .۰/۱۶۲ | معیار پیلا |
| .۰/۰۸۳ | .۰/۱۰۴ | ۱۵۰ | ۸ | ۱/۶۹۴ | .۰/۸۴۱ | لامبدای ویلکس |
| .۰/۰۸۴ | .۰/۱۰۱ | ۱۴۸ | ۸ | ۱/۷۰۶ | .۰/۱۸۴ | معیار هتلینگ |
| .۰/۱۳۶ | .۰/۰۲۴ | ۷۶ | ۴ | ۲/۹۷۹ | .۰/۱۵۷ | بزرگترین ریشه روی |

همان طور که مشاهده می شود فرض برابری ماتریس های کوواریانس رد می شود؛ بنابراین، در تحلیل نتایج باید احتیاط کرد. همچنین در جدول ۵، پیش فرض تمام آزمون های تحلیل واریانس یعنی برابری واریانس گروه ها برای هر یک از متغیرهای وابسته آزمون شده است. در این آزمون، فرض برابری واریانس ها برای سه متغیر وابسته مربع انحراف مثبت از زمان تکت (Z_{12})، تعداد دفعات نقض زمان تکت (Z_2) و تعداد اپراتور تخصیص داده شده به سلول (Z_3) رد شد، اما در مورد مربع انحراف منفی از زمان تکت (Z_{11}) فرض برابری واریانس ها را نمی توان رد کرد. به این ترتیب برای تفسیر اثر سطوح عامل بر متغیرهای وابسته مربع انحراف مثبت از زمان تکت (Z_{12})، تعداد دفعات نقض زمان تکت (Z_2) و تعداد اپراتور تخصیص داده شده به سلول (Z_3) باید آزمون های بیشتری صورت گیرد.

جدول ۶ معنی دار بودن آثار سطوح مختلف عامل تعداد دفعات گردش شغلی را آزمون می کند. غیر از مشخصه بزرگترین ریشه روی که اختلاف آثار سطوح مختلف را در سطح دو درصد معنی دار می داند، براساس بقیه مشخصه ها، برابری میانگین آثار سطوح مختلف تعداد گردش شغلی را نمی توان رد کرد. به طور خلاصه، می توان نتیجه گرفت سطوح عامل تعداد دفعات گردش شغلی، واریانس ترکیب خطی متغیرهای وابسته را توضیح نمی دهد.

متغیرهای وابسته در مسئله زمان بندی گردش شغلی در سلول تولید ناب از اندازه سلول، زمان تکت و نوع سلول برحسب وظایف آن نیز تأثیر می پذیرند؛ برای مثال، هرچه سلول بزرگ تر باشد محدوده زمان تکت موجه بزرگ تر است و به تبع آن، متوسط مربع انحراف از زمان تکت و

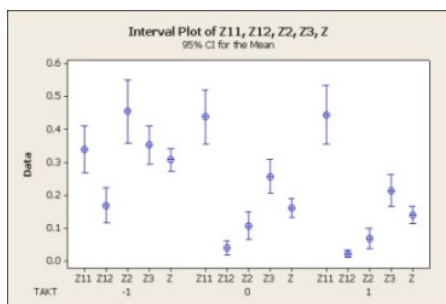
همچنین تعداد دفعات انحراف از زمان تکت تغییرپذیری بیشتری خواهد داشت. به‌علاوه، از آنجاکه در سلول بزرگ‌تر ممکن است وظایف بیشتری به فرد تخصیص یابد، واریانس آثار عوامل انسانی نیز می‌تواند بیشتر از سلول کوچک باشد.

جدول ۷ عوامل و سطوح را نشان می‌دهد. براساس آزمایش‌های انجام‌گرفته طبق شکل ۳، مشخص است هرچه سلول بزرگ‌تر باشد واریانس (درون‌گروهی) مربع انحراف منفی از زمان تکت بیشتر می‌شود. همچنین، تعداد دفعات انحراف مثبت از زمان تکت در سلول بزرگ‌تر بیشتر از سلول کوچک است و بیشترین واریانس این متغیر وابسته در سلول‌های بزرگ قابل مشاهده است.

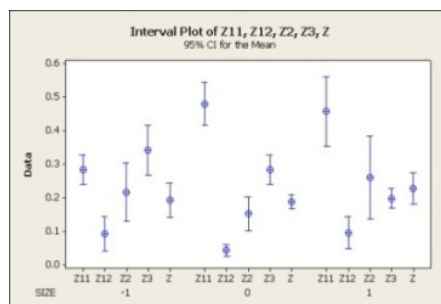
جدول ۷. عوامل و سطوح

| عوامل | اندازه | | زمان تکت | | تعداد گردش | نوع وظایف |
|-------|--------|-------|----------|-------|------------|--------------------|
| | مقدار | برچسب | مقدار | برچسب | | |
| ۱ | کوچک | -۱ | کوتاه | -۱ | ۱۰ | شناختی (C) |
| ۲ | متوسط | ۰ | متوسط | ۰ | ۵ | شناختی-متحرک (C-M) |
| ۳ | بزرگ | ۱ | بلند | ۱ | ۳ | متحرک (M) |

همچنین، بیشترین واریانس بین گروهی برای متغیرهای $Z11$ و $Z2$ وجود دارد. شاید بتوان گفت قسمتی از واریانس توضیح‌داده‌نشده از طریق سطوح فواصل گردش شغلی توسط عامل اندازه در مورد متغیرهای وابسته $Z11$ و $Z2$ توضیح داده می‌شود. در شکل ۴، مشاهده می‌شود سه متغیر وابسته $Z12$ و $Z2$ و $Z3$ با افزایش زمان تکت کاهش می‌یابند. با این حال، سطوح متوسط و بزرگ زمان تکت در مقایسه با یکدیگر تفاوت چندانی در واریانس این متغیرها ایجاد نمی‌کنند. در ضمن، متغیر وابسته $Z12$ در سطوح متوسط و بزرگ زمان تکت بهینه می‌شود و این بهینگی به دلیل اندک بودن واریانس پایدار به نظر می‌رسد.

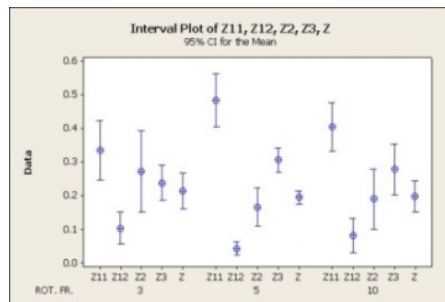


شکل ۴. گروه‌بندی مقادیر پاسخ در سطوح عامل اندازه زمان تکت

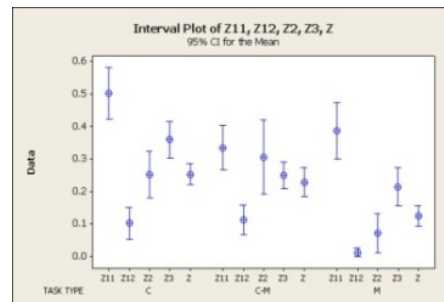


شکل ۳. گروه‌بندی مقادیر پاسخ در سطوح عامل اندازه سلول

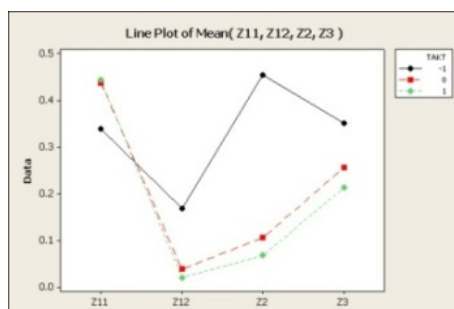
همچنین، واریانس درون گروهی متغیرهای وابسته به غیر از متغیر Z_{11} در هنگام کوچک بودن زمان تکت بالاتر است. شایان ذکر است مقادیر مطلوب متغیرهای وابسته به غیر از متغیر Z_{11} در سطوح متوسط و بزرگ زمان تکت حاصل شده‌اند. بعید نیست زمان تکت نیز نقش مؤثری در توضیح واریانس متغیرهای وابسته داشته باشد. شکل ۵ نشان می‌دهد سه متغیر وابسته Z_2 و Z_3 در حالتی که وظایف بیشتر جنبه متحرک دارند، مقادیری بهتر با واریانس کمتر به دست آورده‌اند. از مقایسه سه شکل مورد بحث و شکل ۶ می‌توان استدلال کرد واریانس‌های بین گروهی برای متغیر تعداد (یا فواصل) گردش شغلی به اندازه دیگر متغیرها نیست. برای بررسی وضعیت متوسط متغیرهای وابسته در هر یک از سطوح عوامل چهارگانه مطرح شده، نمودارهای چهارگانه در شکل‌های ۷ تا ۱۰ ترسیم شده است.



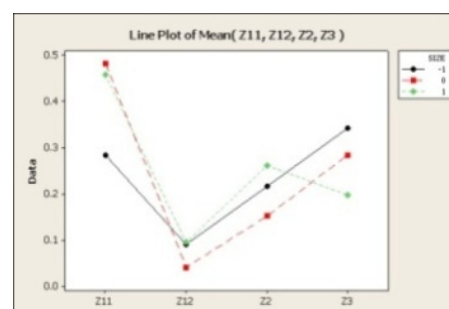
شکل ۶. گروه‌بندی مقادیر پاسخ در سطوح عامل تعداد دفعات گردش شغلی



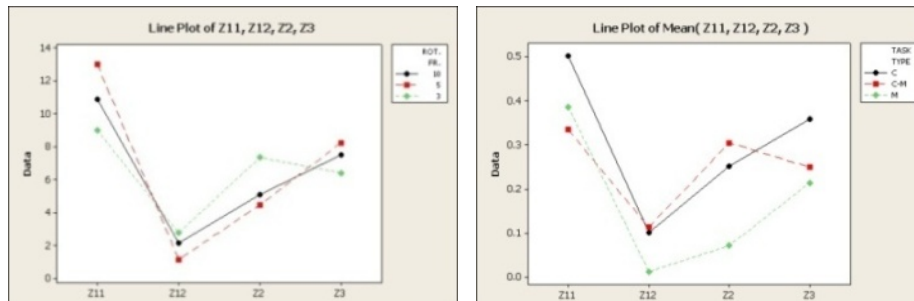
شکل ۵. گروه‌بندی مقادیر پاسخ در سطوح عامل نوع سلول



شکل ۸. مقادیر متوسط پاسخ در سطوح مختلف عامل زمان تکت



شکل ۷. مقادیر متوسط پاسخ در سطوح مختلف عامل اندازه سلول



شکل ۹. مقادیر متوسط پاسخ در سطوح مختلف عامل نوع سلول
 شکل ۱۰. مقادیر متوسط پاسخ در سطوح مختلف عامل تعداد گردش شغلی

شکل ۸ نشان می‌دهد تعیین برنامه گردش شغلی مناسب، اهمیت بیشتری به هنگام کوتاه‌بودن زمان‌های تکت پیدا می‌کند.

جدول ۸. طرح آزمایش‌های L_9 و جانمایی عوامل

| EXP. | اندازه | زمان تکت | تعداد گردش | نوع وظیفه |
|------|--------|----------|------------|----------------------|
| ۱ | کوچک | کوتاه | ۱۰ | شناختی (C) |
| ۲ | کوچک | متوسط | ۵ | شناختی - متحرک (C-M) |
| ۳ | کوچک | بلند | ۳ | متحرک (M) |
| ۴ | متوسط | کوتاه | ۵ | متحرک (M) |
| ۵ | متوسط | متوسط | ۳ | شناختی (C) |
| ۶ | متوسط | بلند | ۱۰ | شناختی - متحرک (C-M) |
| ۷ | بزرگ | کوتاه | ۳ | شناختی - متحرک (C-M) |
| ۸ | بزرگ | متوسط | ۱۰ | متحرک (M) |
| ۹ | بزرگ | بلند | ۵ | شناختی (C) |

برای بررسی آثار همزمان چهار متغیر مستقل مذکور، با توجه به اینکه هر کدام در سه سطح متمایز طبقه‌بندی می‌شوند، باید از طراحی آزمایش‌ها بهره گرفت یا اینکه آثار عوامل را دوبه‌دو توسط منوا آزمون کرد. تعداد آزمایش‌های لازم (بدون تکرار) برای انجام طرح عاملی برابر با 3^4 است. به‌منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها می‌توان از طرح متعامد L_9 که تاگوچی ارائه داده است، استفاده کرد. طرح مذکور می‌تواند حداکثر چهار عامل سه سطحی را دربرگیرد. جدول ۸ طرح آزمایش‌های L_9 و جانمایی عوامل مورد مطالعه را نشان می‌دهد. خلاصه نتایج تحلیل طراحی

1. Orthogonal Array

آزمایش‌های تاگوچی با طرح بالا پس از انجام‌دادن نه تکرار به صورت سه تکرار از سه مسئله نمونه که به صورت تصادفی ایجاد شدند در جدول ۹ ارائه می‌شود. شکل‌های ۱۱ تا ۱۸ تغییرات سیگنال به نوفه و میانگین را برای هریک از متغیرهای وابسته در ازای سطوح مختلف عوامل نشان می‌دهد.

براساس جدول ۹ مشخص است:

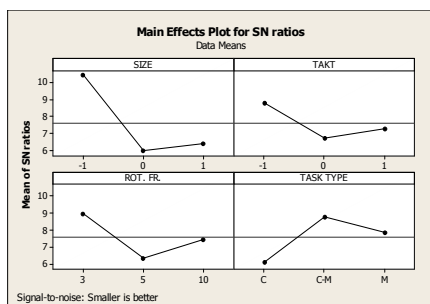
۱. برای حصول بهترین مقادیر هر هدف (متغیر وابسته)، سطوح مختلف از عوامل وجود دارد؛ برای مثال، برای بهینه‌کردن $Z3$ باید ترکیب (بزرگ، متحرک، بلند، بلند یا کوتاه) از عوامل (اندازه سلول، نوع سلول، زمان تکت، فاصله گردش شغلی) اتفاق بیفتد، درحالی‌که ترکیب بهینه عوامل مذکور برای بهینه‌کردن $Z11$ عبارت است از: کوچک، ترکیبی، کوتاه، بلند.
۲. برای بهینه‌کردن زوج اهداف $Z3$ و $Z11$ ، سطوح مختلف از عوامل با اهمیت‌های تقریباً مشابه وجود دارد؛ برای نمونه، بهترین مقدار $Z3$ در سلول بزرگ رخ می‌دهد و به‌طور همزمان بهترین مقدار پاسخ $Z11$ در سلول کوچک اتفاق می‌افتد، درحالی‌که اندازه سلول برای هر دو پاسخ در اولویت قرار اول دارد.
۳. برای بهینه‌کردن زوج اهداف $Z2$ و $Z12$ ، سطوح تقریباً مشابه از عوامل با اهمیت‌های تقریباً مشابه وجود دارد؛ برای نمونه، بهترین مقادیر اهداف $Z2$ و $Z12$ برای زمان تکت بلند رخ می‌دهد، درحالی‌که اندازه زمان تکت برای هر دو پاسخ در اولویت اول قرار دارد.
۴. هیچ‌یک از سطوح عوامل را به‌طور مطلق برای تمام متغیرهای وابسته نمی‌توان به‌عنوان سطح بهینه قلمداد کرد.
۵. فقط عامل زمان تکت در سطح زمان تکت بلند می‌تواند با یک سطح به‌طورهمزمان سه متغیر وابسته را بهینه کند. با توجه به سطر مربوط به این عامل در جدول ۹، مشخص است بهترین تعداد اپراتور تخصیص‌یافته به سلول وقتی رخ می‌دهد که زمان تکت بلندتر است (این نتیجه‌ای معقول و مورد انتظار است، زیرا با کاهش فشار تقاضا از ناحیه مشتری می‌توان تعداد افراد کمتری به سلول تخصیص داد)؛ بنابراین، ضرورتاً کمترین تعداد دفعات نقض زمان تکت و مجموع مربعات انحراف از تکت نیز بهبود می‌یابد. در این میان، احتمالاً یک یا چند اپراتور محتوای کاری کمتر از زمان تکت خواهند داشت؛ بنابراین سطح کار کامل در این وضعیت، در مقایسه با حالتی که زمان تکت کوتاه است، از بهینگی فاصله بیشتری پیدا می‌کند.

جدول ۹. خلاصه نتایج تحلیل آزمایش‌های طرح تاگوچی

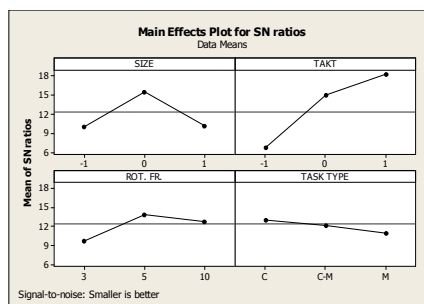
| اهداف | | Z11 | | | Z12 | |
|-----------------|-----------|------|--------|---------|-------|--------|
| عامل | شاخص | رتبه | بهترین | الگو | اهمیت | بهترین |
| اندازه سلول | معیار S/N | ۱ | کوچک | غیر خطی | ۲* | متوسط* |
| | میانگین | ۱ | کوچک | غیر خطی | ۳ | متوسط |
| نوع سلول | معیار S/N | ۲ | ترکیبی | غیر خطی | ۴* | متحرک* |
| | میانگین | ۲ | ترکیبی | غیر خطی | ۲ | متحرک |
| زمان تکت | معیار S/N | ۴ | کوتاه | غیر خطی | ۱* | بلند* |
| | میانگین | ۴ | کوتاه | غیر خطی | ۱ | بلند |
| فاصله گردش شغلی | معیار S/N | ۳ | بلند | غیر خطی | ۳* | متوسط* |
| | میانگین | ۳ | بلند | غیر خطی | ۴ | متوسط |

| اهداف | | Z2 | | | Z3 | |
|-----------------|-----------|------|-------|---------|----------|--------|
| عامل | شاخص | رتبه | اهمیت | بهترین | الگو | بهترین |
| اندازه سلول | معیار S/N | ۱ | ۲* | متوسط* | غیر خطی* | ۱ |
| | میانگین | ۱ | ۴ | متوسط | غیر خطی | ۲ |
| نوع سلول | معیار S/N | ۲ | ۴* | شناختی* | خطی* | ۲ |
| | میانگین | ۲ | ۲ | متحرک | غیر خطی | ۱ |
| زمان تکت | معیار S/N | ۴ | ۱* | بلند* | غیر خطی* | ۳ |
| | میانگین | ۴ | ۱ | بلند | غیر خطی | ۳ |
| فاصله گردش شغلی | معیار S/N | ۳ | ۳* | متوسط* | غیر خطی* | ۴ |
| | میانگین | ۳ | ۳ | متوسط | غیر خطی | ۴ |

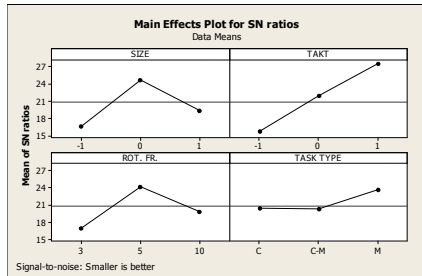
* احتیاط در تفسیر نتایج به دلیل وجود روابط متقابل لازم است.



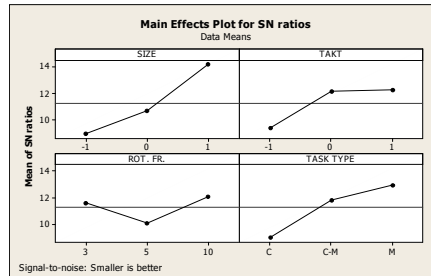
شکل ۱۲. تغییرات مقادیر متوسط شاخص سیگنال به نوفه متغیر z11



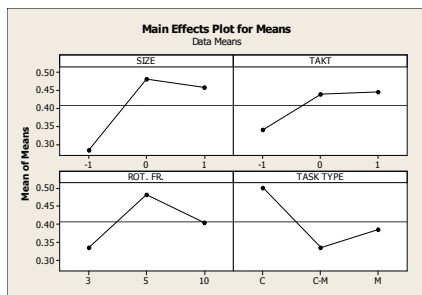
شکل ۱۱. تغییرات مقادیر متوسط شاخص سیگنال به نوفه متغیر z2



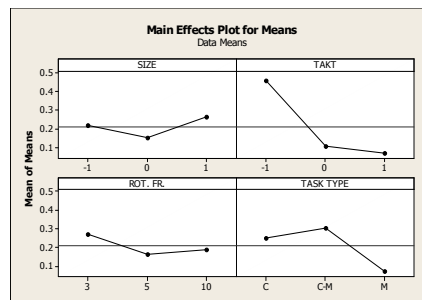
شکل ۱۴. تغییرات مقادیر متوسط شاخص سیگنال به نوفه متغیر z12



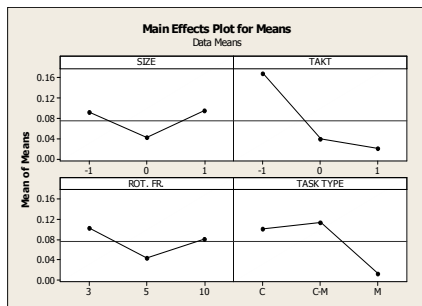
شکل ۱۳. تغییرات مقادیر متوسط شاخص سیگنال به نوفه متغیر z3



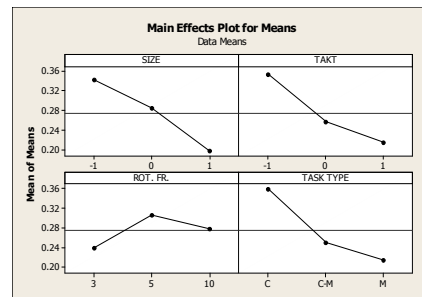
شکل ۱۶. تغییرات مقادیر متوسط متغیر z11



شکل ۱۵. تغییرات مقادیر متوسط متغیر z2



شکل ۱۸. تغییرات مقادیر متوسط متغیر z12



شکل ۱۷. تغییرات مقادیر متوسط متغیر z3

۶. براساس تحلیل نتایج روش تاگوچی برای بهینه‌سازی متغیرهای Z11 و Z3 فاصله گردش باید بلند انتخاب شود. درمورد دو پاسخ Z12 و Z2، برای تنظیم عامل فاصله گردش شغلی به دلیل وجود همبستگی شدید میان این عامل و عوامل دیگر، به تحلیل بیشتر از طریق

در نظر گرفتن آثار متقابل عوامل نیاز است. مهم‌ترین مشکل طرح مذکور امکان نداشتن بررسی روابط متقابل است (مونتگومری، ۱۹۹۱). همان‌طور که مشاهده می‌شود، عوامل متقابل در هیچ‌یک از ستون‌های عوامل طرح مستقر نشده‌اند؛ بنابراین، نرم‌افزار مینی‌تب ۱۶ در مورد متغیرهای وابسته z_{12} و z_2 به دلیل همبستگی شدید متغیر مستقل (عامل) فاصله گردش شغلی با دیگر عوامل قادر به انجام دادن محاسبه‌های تحلیل واریانس نبوده است. این نتیجه با استفاده از شاخص سیگنال به نوبه به دست آمد که واریانس بین نتایج هر آزمایش را در تحلیل آثار سطوح عوامل مد نظر قرار می‌دهد. همبستگی شدید فاصله گردش شغلی و دیگر عوامل در مورد متغیرهای وابسته z_{12} و z_2 در صورتی که تحلیل فقط در زمینه میانگین مقادیر پاسخ انجام گیرد، احصا نمی‌شود و به تبع آن تفسیر نتایج جدول تحلیل واریانس و سطوح پاسخ نیازمند احتیاط بیشتر است.

تحلیل با در نظر گرفتن روابط متقابل میان عوامل

برای تحلیل بیشتر و کسب نتایج دقیق‌تر لازم است به آثار متقابل میان تمام عوامل تأثیرگذار بر متغیرهای وابسته تحقیق توجه شود، زیرا فرض معنی‌دار نبودن آثار متقابل اکثر اوقات مورد تردید است (هومن، ۱۳۸۰). با فرض یک سطح ثابت از متغیر فاصله (تعداد) گردش شغلی، در سلول‌های ناب کوچک‌تر، محدوده زمان تکت در مقایسه با سلول‌های بزرگ‌تر بازه کوتاه‌تری است و فرد به دلیل مواجهه با تعداد وظایف کمتر، احتمالاً خستگی و یادگیری بیشتر و فراموشی کمتری دارد، در حالی که در سلول ناب بزرگ‌تر با توجه به اینکه بازه بزرگ‌تر زمان تکت وجود دارد، احتمالاً با تخصیص تعداد افراد کمتر، آثار خستگی و یادگیری کمتر و اثر فراموشی بیشتر است. آثار خستگی و یادگیری و فراموشی بیانگر عملکرد فرد است؛ بنابراین، بر مربع انحرافات از زمان تکت - به عنوان متغیرهای وابسته - تأثیر می‌گذارد. استدلال پیش‌گفته علاوه بر فرض یک سطح ثابت از متغیر فاصله (تعداد) گردش شغلی به فرض یکسان بودن وظایف به لحاظ شناختی یا متحرک بودن آنها در سلول‌های مورد مقایسه نیز وابسته است. در سلولی که وظایف عمدتاً متحرک است آثار یادگیری و فراموشی کندتر از آثار مذکور در سلول متشکل از وظایف عمدتاً شناختی عمل می‌کنند و بر پیچیدگی روابط متقابل متغیرهای مورد بحث می‌افزاید. به منظور تأیید معنی‌دار بودن روابط متقابل به لحاظ آماری، آزمون تحلیل واریانس چندمتغیره با توجه به آثار متقابل برای هر زوج از عوامل مورد مطالعه در جدول ۱۰ انجام گرفته است. جدول ۱۰ نشان می‌دهد تمام معیارهای پیلائی، ویلکس، هتلینگ و R^2 معنی‌دار بودن آثار هر یک از عوامل و آثار متقابل آنها را تأیید می‌کنند. در مورد عامل فاصله گردش که در جدول ۶ معنی‌دار بودن آثار آن بر متغیرهای وابسته تأیید نشده است، جدول‌های تحلیل واریانس چندگانه برای زوج عوامل شامل

عامل فاصله گردش شغلی، معنی‌دار بودن آثار آن بر متغیرهای وابسته را تأیید می‌کنند. به این ترتیب، برای توصیف آثار عامل فاصله گردش لازم است دیگر عوامل و آثار متقابل عامل فاصله گردش و هریک از عوامل نوع، اندازه سلول و زمان تکت مد نظر باشد.

جدول ۱۰. آزمون تحلیل واریانس چندمتغیره دوطرفه برای عوامل فاصله تخصیص و دیگر عوامل

| طرح ۳ | | | طرح ۲ | | | طرح ۱ | | | اثر | |
|-------|----------------------|--------|-------|----------------------|--------|-------|-------|--------|--------------------|--------------------------|
| Sig. | F | Value | Sig. | F | Value | Sig. | F | Value | | |
| . | ۴۰۶/۰۲۸ ^a | ۰/۹۵۹ | . | ۴۰۶/۰۲۸ ^a | ۰/۹۵۹ | . | . | ۰/۹۵۹ | Pillai's Trace | مقدار ثابت |
| . | ۴۰۶/۰۲۸ ^a | ۰/۰۴۱ | . | ۴۰۶/۰۲۸ ^a | ۰/۰۴۱ | . | . | ۰/۰۴۱ | Wilks' Lambda | |
| . | ۴۰۶/۰۲۸ ^a | ۲۳/۵۳۸ | . | ۴۰۶/۰۲۸ ^a | ۲۳/۵۳۸ | . | . | ۲۳/۵۳۸ | Hotelling's Trace | |
| . | ۴۰۶/۰۲۸ ^a | ۲۳/۵۳۸ | . | ۴۰۶/۰۲۸ ^a | ۲۳/۵۳۸ | . | . | ۲۳/۵۳۸ | Roy's Largest Root | |
| ./۰۰۹ | ۲/۶۹۶ | ۰/۲۶۷ | ./۰۰۹ | ۲/۶۹۶ | ۰/۲۶۷ | ./۰۰۹ | ./۰۰۹ | ۰/۲۶۷ | Pillai's Trace | تعداد گردش |
| ./۰۰۷ | ۲/۷۶۵ ^a | ۰/۷۴۳ | ./۰۰۷ | ۲/۷۶۵ ^a | ۰/۷۴۳ | ./۰۰۷ | ./۰۰۷ | ۰/۷۴۳ | Wilks' Lambda | |
| ./۰۰۶ | ۲/۸۳۱ | ۰/۳۳۳ | ./۰۰۶ | ۲/۸۳۱ | ۰/۳۳۳ | ./۰۰۶ | ./۰۰۶ | ۰/۳۳۳ | Hotelling's Trace | |
| ./۰۰۱ | ۵/۰۲۳ ^b | ۰/۲۸۷ | ./۰۰۱ | ۵/۰۲۳ ^b | ۰/۲۸۷ | ./۰۰۱ | ./۰۰۱ | ۰/۲۸۷ | Roy's Largest Root | |
| . | ۱۲/۵۵۴ | ۰/۸۳۵ | . | ۱۳/۰۴۷ | ۰/۸۵۴ | . | . | ۰/۸۳۴ | Pillai's Trace | عامل دوم |
| . | ۲۳/۳۵۵ ^a | ۰/۱۸ | . | ۱۵/۷۰۶ ^a | ۰/۲۷۴ | . | . | ۰/۲۹۷ | Wilks' Lambda | |
| . | ۳۷/۸۴۹ | ۴/۴۵۳ | . | ۱۸/۵۴۷ | ۲/۱۸۲ | . | . | ۱/۹۵۷ | Hotelling's Trace | |
| . | ۷۷/۵۷۷ ^b | ۴/۴۳۳ | . | ۳۳/۹۶۷ ^b | ۱/۹۴۱ | . | . | ۱/۷۲۱ | Roy's Largest Root | |
| . | ۱۱/۶۳۶ | ۱/۵۷۱ | . | ۷/۱۸۳ | ۱/۱۴۱ | . | . | ۱/۵۵۳ | Pillai's Trace | تعداد گردش * عامل دوم |
| . | ۱۶/۰۱۹ | ۰/۰۸۸ | . | ۱۴/۵۵ | ۰/۱۰۳ | . | . | ۰/۰۵۷ | Wilks' Lambda | |
| . | ۱۷/۴۶۲ | ۴/۱۳۹ | . | ۲۷/۰۴۲ | ۶/۴۱ | . | . | ۶/۶۳۵ | Hotelling's Trace | |
| . | ۳۶/۳۲۸ ^b | ۲/۰۱۸ | . | ۱۰۹/۰۷۱ ^b | ۶/۰۵۹ | . | . | ۴/۷۳۹ | Roy's Largest Root | |

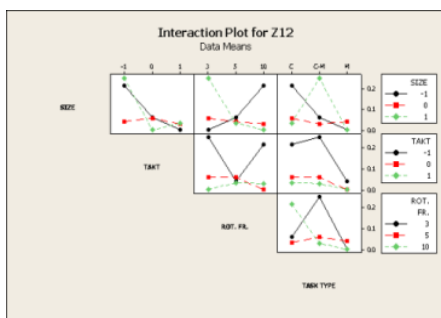
a. Exact statistic. b. The statistic is an upper bound on F that yields a lower bound on the significance level.

طرح ۱: مقدار ثابت + تعداد گردش + نوع سلول + تعداد گردش * نوع سلول؛

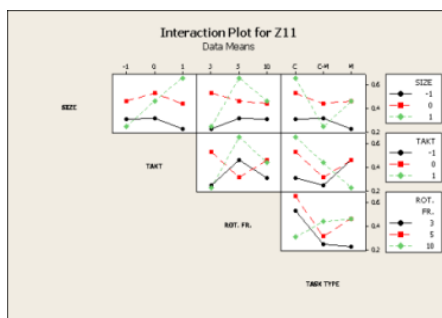
طرح ۲: مقدار ثابت + تعداد گردش + اندازه سلول + تعداد گردش * اندازه سلول؛

طرح ۳: مقدار ثابت + تعداد گردش + زمان تکت + تعداد گردش * زمان تکت

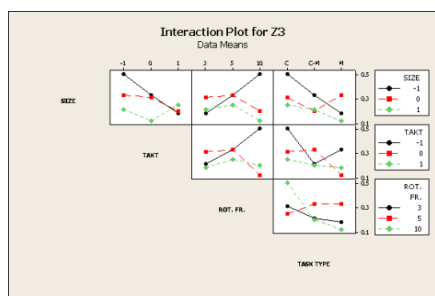
شکل‌های ۱۹ تا ۲۲ به منظور بررسی آثار متقابل دوجه‌دوی عوامل با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب ۱۶ ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمام روابط متقابل معنی‌دار و نامنظم است و تفسیر روابط پیچیده است. از شکل ۱۹ مشخص است که با افزایش تعداد دفعات گردش (یا کاهش فواصل گردش) برای سلول‌های کوچک و بزرگ و همچنین برای زمان‌های تکت کوتاه و بلند، متوسط مربع انحراف منفی از زمان تکت ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به‌علاوه، ملاحظه می‌شود بهترین سطح کار کامل در فواصل گردش بلند مشاهده شده است. جالب اینکه نتایج پیش‌بینی طرح تاگوچی برای تمام ۲۷ حالت ممکن (شرایط اولیه) در هر یک از سطوح سه‌گانه عامل فاصله گردش شغلی (یا تعداد دفعات گردش شغلی)، بهبود یافتن فاصله گردش شغلی بلند را با هدف بهترین سطح کار کامل تأیید کرده است. همچنین، برای سلول موتوری تغییرپذیری متوسط مربع انحراف مثبت از زمان تکت بسیار پایین مشاهده می‌شود. مشاهده‌های مذکور با نتایج شکل‌های ۱۴ و ۱۸ طرح تاگوچی تطابق دارد.



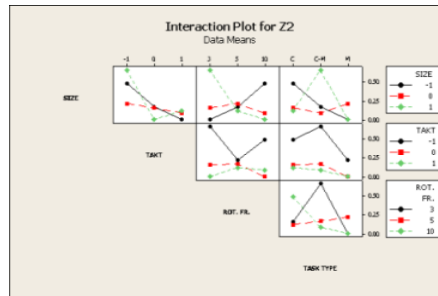
شکل ۲۰. اثر متقابل عوامل در ارتباط با متوسط متغیر وابسته مربع انحراف مثبت از زمان تکت



شکل ۱۹. اثر متقابل عوامل در ارتباط با متوسط متغیر وابسته مربع انحراف منفی از زمان تکت



شکل ۲۲. اثر متقابل عوامل در ارتباط با متوسط متغیر تعداد اپراتور



شکل ۲۱. اثر متقابل عوامل در ارتباط با متوسط متغیر تعداد دفعات انحراف مثبت از زمان تکت

مشاهده‌های شکل ۲۱ نتایج مشابه شکل ۲۰ دارد. با این حال، در سطح سلول موتوری تغییرپذیری متوسط متغیر تعداد دفعات انحراف مثبت از زمان تکت بیشتر از تغییرپذیری متوسط مربع انحراف مثبت از زمان تکت است. در تحلیل به دست آمده از طرح تاگوچی، شاخص سیگنال به نوفه برای متوسط متغیر تعداد دفعات انحراف مثبت از زمان تکت طبق شکل ۱۱ در سطح شناختی بهینه شده است، اما برای متوسط مربع انحراف مثبت از زمان تکت سطح موتوری تعیین شده است. شکل ۲۲ نشان می‌دهد در سلول‌های کوچک و برای زمان تکت کوتاه با افزایش تعداد دفعات گردش شغلی، متوسط متغیر تعداد اپراتور افزایش می‌یابد. با این حال، کمترین تعداد اپراتور در سطح بیشترین تعداد دفعات گردش شغلی وقتی رخ می‌دهد که زمان تکت متوسط است. همچنین، در این سطح از تعداد دفعات گردش شغلی بی‌ثباتی متوسط تعداد اپراتور بالا است. طبق شکل ۱۳، نتایج طرح تاگوچی مؤید این است که سطوح تعداد گردش شغلی پایین و بالا تقریباً در یک سطح بیشترین مقدار شاخص سیگنال به نوفه را به دست می‌دهد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق با تأکید بر لزوم به کارگیری گردش شغلی در سلول‌های ناب به عنوان عملیات استاندارد، آثار برنامه‌های گردش شغلی در حضور متغیرهای اندازه، زمان تکت و نوع فعالیت‌های سلول بر عملکرد سلول ناب بررسی شد. نتایج تحقیق بیانگر پیچیدگی روابط متقابل عوامل در تبیین عملکرد سلول است. در نتیجه، نمی‌توان قانونی عمومی مثلاً در مورد سلول‌های کوچک ارائه داد به نحوی که تنظیم برنامه گردش شغلی بر مبنای آن عملکرد سلول را تضمین کند. با این حال، مشاهده شد سهم علمی عمده این مطالعه معنی‌دار بودن اثر برنامه گردش شغلی بر عملکرد سلول (در قالب چهار هدف متمایز) به لحاظ آماری است. این نتیجه با گزارش عزیززی و همکاران (۲۰۱۱) در محیط سلولی همخوانی دارد و با توجه به در نظر گرفتن عوامل اندازه سلول، نوع فعالیت‌های سلول و زمان تکت و همچنین آثار رفتاری فرد، نتایج رساله دکتری مک دونالد (۲۰۰۶) درباره محیط سلول خطی را تکمیل می‌کند. همچنین، در این تحقیق برای اولین بار نشان داده شد که نحوه اثرگذاری برنامه گردش شغلی در شرایط مختلف متفاوت است. به عنوان یک قاعده کلی و مستقل از شرایط اولیه مفروض، می‌توان نتیجه گرفت فاصله گردش بلند برای تحقق بهتر سطح کار کامل (هدف Z11) و تخصیص اپراتور کمتر به سلول ناب (هدف Z3) مناسب است. همچنین، در سطح فاصله گردش متوسط، عملکرد سلول به لحاظ اهداف متوسط زمان انحراف از زمان تکت (هدف Z12) و تعداد دفعات عدول از زمان تکت (هدف Z2) پایایی بیشتری از دیگر متغیرهای مورد بررسی نشان می‌دهد. البته فاصله گردش شغلی متوسط، ممکن

است به عملکرد بهینه سلول در این اهداف منجر نشود، ولی از این طریق عملکرد نزدیک به بهینه مورد انتظار خواهد بود. با توجه به وجود روابط متقابل نامنظم معنی‌دار میان متغیرها، طراحی آزمایش‌ها می‌تواند در تبیین دقیق‌تر عملکرد سلول کاربرد مؤثری داشته باشد. همچنین، مقایسه سیاست‌های گردش شغلی مد نظر مدیریت یا پیشنهادشده در ادبیات موضوع (مانند تعقیب خرگوش، زنجیره‌سازی مهارت و...) در محیط مهارت ناقص از دیگر زمینه‌های تحقیقات آتی است. به‌علاوه، تسهیم وظایف در سلول را که بر بهبود عملکرد سلول مؤثر است، می‌توان در طراحی مدل ریاضی در نظر گرفت.

References

- Alem Tabriz, A., Tallaei, H. R. & Moradi, E. (2012). Evaluating the key factors of successful implementation of world class manufacturing using an integrated approach of interpretive structural modeling (ISM), Graph theory and Matrix approach (GTMA): A Case study for Iran Khodro and Saipa in Iran, *Journal of Industrial Management*, 5(1): 63- 81. (in Persian)
- Aryanezhad, M. B., Kheirkhah, A. S., Deljoo, V. & Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J. (2009). Designing safe job rotation schedules based upon worker's skills, *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, (41): 193–199.
- Ayough, A., Zandieh, M., Farsijani, H. & Dorri, B. (2014). Job rotation scheduling in the newly arranged lean cell through genetic algorithm approach, *Journal of industrial Management Persprctive*, 15 33- 59. (in Persian)
- Azizi, N., Zolfaghari, S. & Liang, M., (2010). Modeling job rotation in manufacturing systems: The study of employee's boredom and skill variations, *International Journal of Production Economics*, (123): 69–85.
- Baradaran, S., Daraee, M. R. & Fattahi, D. (2015). Examining the readiness of Iran Transfo Rey Co., for performing the lean production system, *Journal of Industrial management*, Accepted Article online on April 2015. (in Persian)
- Black, J. T. & Hunter, S. L. (2003). *Lean Manufacturing Systems and Cell Design*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan.
- Black, J. T. (2007). Design rules for implementing the Toyota production system, *International Journal of Production Research*, 45(16): 3639– 3664.

- Carnahan, B. J., Redfern, M. S. & Norman, B. (2000). Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search, *Ergonomics*, 43(4): 543–560.
- Deif, A.M. (2012). Dynamic analysis of a lean cell under uncertainty, *International Journal of Production Research*, 50(4): 1127- 1139.
- Fogarty, D. W., Blackstone, J. R. & Hoffmann, T. R. (1991). *Production and Inventory management*, Cincinnati, Ohio.
- Hirano, H. (1987). *JIT Factory Revolution*, Productivity Press, Portland, OR.
- Homan, H. A. (2001). *Multi variate data analysis in behavioral researches*, Published by Parsa, Tehran. (In Persian)
- Huang, Y. (1999). *Employee training and assignment for team-based manufacturing systems*, PhD Thesis, Submitted to the department of systems and industrial engineering, University of Arizona.
- Hyer, N. & Wemmerlov, U. (2002). *Reorganizing the Factory*, Productivity Press, Portland, OR.
- Kannan, V. R. & Jensen, J. B. (2004). Learning and labor assignment in a dual constrained cellular shop, *International Journal of Production Research*, 42(7): 1455– 1470.
- Kara, Y., Ozcan, U. & Peker, A. (2007). An approach for balancing and sequencing mixed-model JIT U-lines, *International Journal Advanced Manuf Technol*, 32(11): 1218- 1231.
- Kasaei, M., Farrokh, M. & Tallaei, H. R. (2013). Ranking and selecting agile providers for achieving enterprise agility by using ANP and Dematel: A case study for Bahman Motor Group in Iran, *Journal of Industrial management*, 4(2): 135- 152. (In Persian)
- Lian, K., Zhang, C., Gao, L. & Shao, X. (2012). A modified colonial competitive algorithm for the mixed-model Uline balancing and sequencing problem, *International Journal of Production Research*, 1–15.
- Lu, J. Ch. & Yang, T. (2014). Implementing lean standard work to solve a low work-in-process buffer problem in a highly automated manufacturing environment, *International Journal of Production Research*, DOI: 10.1080/00207543.2014.937009.

- McDonald, T. & Kimberly, P. E. (2009). Development and application of a worker assignment model to evaluate a lean manufacturing cell, *International Journal of Production Research*, 47(9): 2427– 2447.
- Miltenburg, J. (2002). Balancing and scheduling mixed-model U-shaped production lines, *International Journal Flexible Manufacturing Systems*, 14(2): 119– 151
- Monden, Y. (1993). *Toyota production system: An integrated approach to just in time*, Institute of Industrial Engineers, Norcross.
- Montgomery, D. C. (2000). *Design and Analysis of Experiments*, 5th edition, John Wiley & Sons, New York, NY.
- Nakade, K. & Nishiwaki, R. (2008). Optimal allocation of heterogeneous workers in a U-shaped production line, *Computers & Industrial Engineering*, (54): 432– 440.
- Needy, K. L., et al. (2001). Human capital assessment in lean manufacturing, *Proceedings of 2001 American Society Foreengineering Management Conference*, Huntsville: AL.
- Nembhard, D. A. & Osothsilp, N. (2005). Learning and forgetting-based worker selection for tasks of varying complexity, *Journal of the Operational Research Society*, (56): 576– 587.
- Nembhard, D., A. & Norman, B. A. (2006). *Cross-training in production systems with human learning and forgetting*, Handbook of Industrial and Systems Engineering, Chapter 16, In Badiru, A. B. (Ed.), CRC Press, New York, 16-1-13 49(10): 2833– 2855.
- Ozcan, U., Kellego, Z. T. & Toklu, B. (2011). A genetic algorithm for the stochastic mixed-model u-line balancing and sequencing problem, *International Journal of Production Research*, 49(6): 1605– 1626.
- Ranjit, R. (1990). *A primer on the Taguchi method*, 1st edition, Van Nostard Reinhold, USA.
- Rehab, M. A. & Ahmed, M. D. (2014). Dynamic Lean Assessment for Takt Time Implementation, *Procedia CIRP*, 17: 577– 581.
- Shewchuk, J. P. (2008). Worker allocation in lean U-shaped production lines, *International Journal of Production Research*, 46(13): 3485– 3502.
- Shingo, S. (1997). *A Study of the Toyota Production System from an Industrial Engineering Viewpoint*, Shingo, S.

- Taghi Taghavi Fard, M. (2011). A New Mathematical Model for Solving Multi-Product Assembly Line Balancing Problems, *Journal of Industrial management*, 3(6): 1– 16. (in Persian)
- Taguchi, G., Wu, Y. & Chowdhury, S. (2004). *Taguchi's quality engineering handbook*, Wiley, Hoboken.
- Tharmmaphornphilas, W. & Norman, B. (2004). A quantitative method for determining proper job rotation nintervals, *Annals of Operations Research* (128): 251– 266.